

Qualité des eaux souterraines du Bassin Arachidier, Sénégal

Auteur : Collignon, Victoria

Promoteur(s) : Brouyere, Serge

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénieur et de l'environnement

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11529>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Département ArGENCo

« Architecture, Géologie, Environnement et Constructions »

Travail de fin d'étude

Promoteur académique : Dr Serge BROUYERE

Université de Liège

*Qualité des eaux souterraines du Bassin
Arachidier, Sénégal*

Travail de fin d'étude réalisé en vue de l'obtention du grade de
master « Ingénieur Civil des Mines et Géologue »

Par
Victoria Collignon
Année académique 2020-2021

Abstract

En raison des faibles quantités de réserves en eaux de surface, ce sont les eaux souterraines qui sont principalement exploitées dans le Bassin Arachidier, au Sénégal, en Afrique orientale.

Cependant, la diminution des niveaux piézométriques au Littoral - induite par une surexploitation des aquifères - combinée à la présence d'évaporites et d'anciennes saumures dans le Maastrichtien, a provoqué une hausse de la salinité des eaux souterraines du Bassin.

De plus, les pressions en surface telles que le développement de zones urbanisées et irriguées ont également influencé la qualité de l'eau souterraine en provoquant une hausse des concentrations en nitrates, sulfates et autres intrants agricoles.

Le phénomène de salinisation, combiné aux diverses contaminations d'origines anthropiques, a progressivement rendu l'eau souterraine du Bassin impropre à la consommation et/ou à l'irrigation.

Dans le cadre de ce travail, après création d'une base de données reprenant l'ensemble des campagnes d'échantillonnage et projets récents, la qualité de l'eau souterraine sera définie pour l'ensemble du réseau hydrogéologique du Bassin Arachidier. Le développement d'analyses chimiques et d'un Atlas cartographique permettra alors, d'une part, de confirmer l'état actuel du Bassin et, d'autre part, de définir plus précisément l'étendue spatiale des différentes contaminations en jeu.

Due to the low quantities of surface water reserves, groundwater is mainly exploited in the Arachidier Basin, in Senegal, in East Africa.

However, the decrease in piezometric levels on the Coastline - induced by overexploitation of aquifers - combined with the presence of evaporites and ancient brines in the Maastrichtian has caused an increase in the salinity of the groundwater's Basin.

In addition, surface pressures such as the development of urbanized and irrigated areas have also influenced the quality of groundwater by causing an increase in the concentrations of nitrates, sulphates and other agricultural inputs.

The salinization, combined with the various anthropogenic contaminations, has gradually made the groundwater unsuitable for consumption and / or irrigation.

As part of this work, after the creation of a database containing all the sampling campaigns and recent projects, the quality of the groundwater will be defined for the entire hydrogeological network of the Arachidier Basin. The development of chemical analyzes and a cartographic Atlas will confirm the current state of the Basin and will define more precisely the spatial extent of the various contaminations involved.

Remerciements

Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de ce travail de fin d'étude.

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs académiques et industriels pour leurs avis et conseils avisés tout au long de ce quadrimestre. Merci pour vos conseils, votre temps et vos explications complémentaires ! Plus particulièrement, je tiens à remercier :

Mon promoteur académique, le Dr. Serge Brouyère, de sa disponibilité, mais aussi d'avoir pris le temps de relire mon travail et de répondre à mes questions en m'expliquant certains concepts tout au long du quadrimestre. Je le remercie également de m'avoir permis de réaliser mon travail de fin d'étude sur un thème que j'apprécie.

Mon promoteur industriel, Johan Derouane, d'avoir été présent et à l'écoute durant l'entièreté du stage en entreprise, et ce malgré les circonstances particulières.

Je tiens d'ailleurs à remercier SHER, la structure d'accueil du stage, de nous avoir fait confiance à Julien et à moi.

Ensuite, je tenais à remercier l'ensemble des membres de département ArGENCo que j'ai côtoyé durant ces cinq années : professeurs, assistants, doctorants et autres. Je vous remercie d'avoir fait du B52 un endroit où il fait bon vivre. En particulier, je remercie Philippe Orban et Caroline Thomas pour leur aide et leurs conseils durant ce quadrimestre.

Enfin, je tiens à remercier mes amis et ma famille, avec une pensée particulière pour :

L'ensemble des « ingé-med » pour la bonne ambiance qui règne en maître depuis cinq années déjà,
La « team cailloux » pour ces deux très chouettes années de Master.

Delphine & Maman pour les relectures,
Caro & Ju pour les petits tutos Latex.
Ça vaut bien un verre en terrasse tout ça !

Amaury & Nini, pour les hébergements en temps utiles,
Tom, pour son soutien sans faille depuis des années entières,
Madeleine aka ma personne,
Julien, aka Julhutz, mon fidèle partenaire de projet du début jusqu'à la toute fin.

Table des matières

Liste des abréviations	1
Introduction et objectifs	2
1 Mise en situation du Bassin Arachidier	3
1.1 Localisation	4
1.2 Relief	5
1.3 Occupation du sol	5
1.3.1 Zones agricoles et aquacultures	7
1.3.2 Zones industrialisées	7
1.3.3 Zones urbanisées	8
1.4 Climatologie et pluviométrie	8
1.5 Cadre géologique	11
1.5.1 Unités morphopédologiques principales	13
1.6 Cadre hydrographique	14
1.7 Cadre hydrogéologique	15
1.7.1 Recharge des aquifères, tectonique et origine de la salinité	17
2 Description de la base de données généralisée créée	20
2.1 Description des données connues	21
2.2 Uniformisation de la base de données	22
2.3 Validation des balances ioniques	23
2.4 Suppression des doublons	24
2.5 Ajout de la base de données <i>Réseau</i>	26
2.6 Choix des données les plus récentes	27
2.7 Synthèse	27
3 Étude statistique des eaux souterraines du Bassin Arachidier	30
3.1 Statistiques générales	31
3.1.1 Origine des <i>outliers</i> : point de vue statistique	33
3.1.2 Origine des <i>outliers</i> : point de vue spatial	34
3.2 Évolution temporelle	35
3.2.1 Suivi temporel	38
3.3 Influence du type d'ouvrage	42
3.4 Normes de potabilité	45
4 Analyses spatiales des eaux souterraines du Bassin Arachidier	47
4.1 Analyse détaillée des paramètres	48
4.1.1 Conductivité laboratoire	48
4.1.2 Nitrates	50
4.1.3 Sodium	50
4.1.4 Chlorures	50

4.1.5	Fluorures	51
4.1.6	Sulfates	51
4.1.7	Fer	51
4.2	Étude spatiale des concentrations	52
4.2.1	Maastrichtien	54
4.2.2	Continental Terminal	55
4.2.3	Éocène	56
4.2.4	Oligo-Miocène	56
4.2.5	Paléocène	57
4.2.6	Quaternaire	57
4.3	Synthèse des observations	58
4.4	Stratégie d'échantillonnage	59
5	Étude hydrochimique des eaux souterraines du Bassin Arachidier	62
5.1	Conditions <i>in situ</i> vs laboratoires	63
5.2	Faciès hydrochimiques	64
5.3	Analyses multi-variées	69
5.3.1	Matrice de corrélation	69
5.3.2	SOMs sur l'ensemble du Bassin Arachidier	72
5.3.2.1	Tentative 1	73
5.3.2.2	Tentative 2	74
5.3.2.3	Tentative 3 : influence de la minéralogie	75
5.3.2.4	Tentative 4 : influence des conditions REDOX	79
5.3.3	SOMs par aquifère	82
5.4	Origines de la salinité	89
5.4.1	Graphes binaires du Na ⁺ et Br ⁻ en fonction du /Cl ⁻	91
5.4.1.1	Discussion des analyses spatiales des interprétations	93
5.4.2	Indices de saturation	95
5.4.2.1	Analyse de l'évolution des indices de saturation dans le sens d'écoulement du Maastrichtien	99
5.4.2.2	Discussion et limites des analyses	99
5.4.3	Discussion générale au sujet de l'origine de la salinité	100
5.5	Échanges cationiques	101
5.5.1	Échanges cationiques dans le sens d'écoulement du Maastrichtien	102
Conclusion et perspectives	104	
Références	106	
Annexe	113	
A	Base de données	113
B	Code MATLAB	114
C	Disposition des ouvrages relatifs à la Table 3.2	114
D	Outliers statistiques	115
E	Statistiques temporelles	116
F	Statistiques selon le type de l'ouvrage	119
G	Diagrammes de Piper	122
H	Matrices de corrélation	128
I	SOMs par aquifère	135

Table des figures

1.1	Situation générale de la zone d'étude (DGPRE, 2020a ; Universalis, 2021. Modifié)	4
1.2	Régions présentes dans la zone d'étude (DGPRE, 2020a)	5
1.3	Topographie de la zone d'intérêt avec résolution à 300 m (DGPRE, 2020a)	6
1.4	Occupation des terres de la zone d'intérêt avec résolution à 20 m (DGPRE, 2020a)	6
1.5	Nombre d'unités industrielles par département (DGPRE, 2020a)	7
1.6	Principales industries (DGPRE, 2020a)	8
1.7	Densité de population dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)	9
1.8	Évolution des précipitations annuelles à Louga de 1930 à 2004 (Le Borgne, 1988)	10
1.9	Évolution des précipitations annuelles à Bambeï de 1923 à 2010 (Le Borgne, 1988)	10
1.10	Coupe hydrogéologique ouest-est traversant la partie nord de la zone d'étude (modifié d'après DGPRE, 2013)	12
1.11	Coupe hydrogéologique ouest-est traversant la partie sud de la zone d'étude (modifié d'après DGPRE, 2013)	12
1.12	Unités morphopédologiques présentes dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)	13
1.13	Hydrographie de la zone d'intérêt (DGPRE, 2020b)	14
1.14	Les différents bassins hydrographiques présents dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)	15
1.15	Les différentes unités hydrogéologiques présentes dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)	17
1.16	Coupe hydrogéologique simplifiée du Maastrichtien (DGPRE, 2012 modifié par la CTB et les Universités de Liège et d'Arlon)	18
1.17	Délimitation de la bande salée (DGPRE, 2018c)	19
2.1	Exemple de format de donnée non uniformisée : « Faye suivi DGPRE »	22
2.2	Détermination du choix des balances ioniques	25
2.3	Répartition de l'ensemble des données par aquifère	28
2.4	Disposition spatiale de l'ensemble des données récentes, après 2010	28
3.1	Détection statistique des outliers par aquifère	33
3.2	Disposition spatiale des outliers	34
3.3	Évolution temporelle des concentrations par aquifère des moyennes (traits pleins) et médianes (traits pointillés)	36
3.4	Évolution temporelle des concentrations par aquifère : nuages de points	37
3.5	Localisation des ouvrages du réseau de suivi temporel et lien avec les pressions en surface	39
3.6	Évolution temporelle des concentrations du suivi Réseau depuis 2010	40
3.7	Suivi temporel de l'ouvrage Thiougoune (QUAT)	41
3.8	Évolution des concentrations en fonction du niveau statique	43
3.9	Évolution des concentrations en fonction de la profondeur de l'ouvrage	44
4.1	Corrélation entre la conductivité électrique (labo) et le TDS	48
4.2	Corrélation entre les conductivités <i>in situ</i> et laboratoire	49
4.3	Disposition spatiale des pressions en surface : industries et ressources minières	52
4.4	Disposition spatiale des pressions agricoles et urbaines en surface	53
4.5	Profondeurs des ouvrages et de la nappe en fonction de l'aquifère	54

4.6	Stratégie d'échantillonnage physico-chimique	60
4.7	Stratégie d'échantillonnage des pesticides	60
4.8	Stratégie d'échantillonnage bactériologique	61
4.9	Stratégie d'échantillonnage des éléments mineurs et traces (ML)	61
5.1	Interprétation théorique d'un diagramme de Piper (Piper, 1994)	65
5.2	Corrélation entre le résidu sec et le TDS	66
5.3	Interprétation des faciès hydrochimiques par l'analyse des diagrammes de Piper avec TDS	67
5.4	Interprétation des faciès hydrochimiques par l'analyse des diagrammes de Piper sans TDS	68
5.5	Histogrammes de certaines entités chimiques pour l'ensemble du jeu de données	70
5.6	Matrices de corrélation en fonction de l'aquifère	71
5.7	Résultats des SOMs pour l'ensemble des paramètres physico-chimiques	74
5.8	Résultats des SOMs pour un ensemble réduit des paramètres physico-chimiques	74
5.9	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques	75
5.10	Caractérisation du faciès hydrochimique par les SOMs	76
5.11	Disposition spatiale des ouvrages selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs	77
5.12	Diagramme de Piper selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs	78
5.13	Matrice des composants pour les paramètres REDOX	79
5.14	Caractérisation des conditions REDOX par les SOMs	80
5.15	Disposition spatiale des ouvrages selon les conditions REDOX définies par les SOMs .	80
5.16	Diagramme de Piper selon les conditions REDOX définies par les SOMs	81
5.17	Groupements par les SOMs pour le CT	83
5.18	Groupements par les SOMs pour l'EO	84
5.19	Groupements par les SOMs pour le MAAS	85
5.20	Groupements par les SOMs pour l'OM	86
5.21	Groupements par les SOMs pour le PAL	87
5.22	Groupements par les SOMs pour le QUAT	88
5.23	Répartition de l'ensemble des concentrations en chlorures dans le Bassin	89
5.24	Répartition de l'ensemble des conductivités électriques dans le Bassin	90
5.25	Graphes binaires Na^+/Cl^- selon l'aquifère et les groupes définis par les SOMs	92
5.26	Différents types d'intrusions en fonction du ratio Na^+/Cl^-	94
5.27	Indice de saturation de la calcite par aquifère	96
5.28	Indice de saturation du gypse par aquifère	97
5.29	Répartition spatiale des indices de saturation de la calcite dans la zone d'étude	98
5.30	Répartition spatiale des pH des différents ouvrages	99
5.31	Graphes binaires de $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-(\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-})$ en fonction de $(\text{Na}^++\text{K}^+)-\text{Cl}^-$	101
5.32	Schématisation de l'écoulement de l'eau souterraine et lien avec la bande salée	102
5.33	Évolution du nuage de points en fonction de l'écoulement	103
A.1	Représentation de la base de données	113
C.2	Distribution spatiale des ouvrages relatifs à la Tables 3.2	114
G.3	Diagramme de Piper du Continental Terminal	122
G.4	Diagramme de Piper de l'Éocène	123
G.5	Diagramme de Piper du Maastrichtien	124
G.6	Diagramme de Piper de l'Oligo-Miocène	125
G.7	Diagramme de Piper du Paléocène	126
G.8	Diagramme de Piper du Quaternaire	127
H.9	Matrice de corrélation du Continental Terminal	128
H.10	Matrice de corrélation de l'Éocène	129
H.11	Matrice de corrélation du Maastrichtien	130
H.12	Matrice de corrélation de l'Oligo-Miocène	131
H.13	Matrice de corrélation du Paléocène	132
H.14	Matrice de corrélation du Quaternaire	133

I.15	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Continental Terminal	135
I.16	Caractérisation du faciès hydrochimique du Continental Terminal par les SOMs	135
I.17	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques de l'Éocène	136
I.18	Caractérisation du faciès hydrochimique de l'Éocène par les SOMs	136
I.19	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Maastrichtien	137
I.20	Caractérisation du faciès hydrochimique du Maastrichtien par les SOMs	137
I.21	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Maastrichtien	138
I.22	Caractérisation du faciès hydrochimique de l'Oligo-Miocène par les SOMs	138
I.23	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Paléocène	139
I.24	Caractérisation du faciès hydrochimique du Paléocène par les SOMs	139
I.25	Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Quaternaire	140
I.26	Caractérisation du faciès hydrochimique du Quaternaire par les SOMs	140

Liste des tableaux

1.1	Régions et départements de la zone d'intérêt	4
2.1	Synthèse de l'ensemble des données disponibles	21
2.2	Limites de détection des éléments (LQ = limite de quantification)	23
2.3	Éléments chimiques majeurs et mineurs	23
2.4	Moyennes des concentrations en meq (Nb = le nombre de concentrations différentes de 0 ; Moy = la moyenne des concentrations en meq/L)	23
2.5	Mise en évidence des doublons présents dans la base de données	26
2.6	Répartition des ouvrages par aquifère	27
2.7	Tableau synthétique de la base de donnée généralisée	29
3.1	Statistiques des paramètres chimiques par aquifère	31
3.2	Ouvrages présentant des concentrations extrêmes	32
3.3	Percentile 80 des outliers	35
3.4	Ouvrages choisis parmi la base de données Réseau pour l'analyse du suivi temporel	38
3.5	Normes de potabilité	45
3.6	Taux de dépassement des normes de potabilité	45
4.1	Échantillonnage demandé par la DGP <small>E</small>	59
5.1	Statistiques des paramètres physiques par aquifère	63
5.2	Description des tentatives d'application des SOMs sur l'ensemble du jeu de données	73
5.3	Caractéristiques des groupes de faciès hydrochimiques	76
5.4	Légende associée à la Table 5.3	76
5.5	Définition théorique des classes d'interprétation selon le rapport Na^+/Cl^-	91
5.6	Récapitulatif des pentes et des coefficients de détermination des régressions linéaires pour les rapports Na^+/Cl^-	93
D.1	Détermination des outliers statistiques	115
E.2	Répartition des données en fonction des classes temporelles	116
E.3	Moyenne des données en fonction des classes temporelles	117
E.4	Médiane des données en fonction des classes temporelles	118
F.5	Répartition des données en fonction des types d'ouvrages	119
F.6	Moyenne des données en fonction des types d'ouvrages	120
F.7	Médiane des données en fonction des types d'ouvrages	121
H.8	Tableau des relations de corrélation	134

Liste des abréviations

AEP	Alimentation en Eau Potable
BDD	Base De Données
BI	Balance Ionique
BRGM	Bureau de Recherche pour le Gestion Minière
Cond.	Conductivité électrique
CT	Continental Terminal
DGPRE	Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
EO	Éocène
LD	Limite de détection
LQ	Limite de quantification
MAAS	Maastrichtien
MO	Matière organique
N-S	Nord-Sud
OM	Oligo-Miocène
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PAGIRE	Plan d'Aménagement de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PAL	Paléocène
QUAT	Quaternaire
RS	Résidu sec
SI	Indice de Saturation
SOMs	Self Organizing Map
TDS	Total Dissolved Solids
Temp.	Température
UE	Union Européenne

À noter que, dans le cadre de ce travail, les termes « Continental Terminal », « Éocène », « Maastrichtien », « Oligo-Miocène », « Paléocène » et « Quaternaire » désignent, sauf si autrement précisé, les formations géologiques aquifères plutôt que la période géologique concernée.

Introduction et objectifs

Ce travail de fin d'étude a pour objectif d'améliorer mais également de compléter la cartographie de la qualité de l'eau souterraine du Bassin Arachidier, principale ressource d'eau potable du Sénégal. Il s'inscrit dans la continuité du projet de la DGPRE (**D**irection de la **G**estion et de la **P**lanification des **R**essources en **E**au) visant à améliorer le service ainsi que l'accès à l'eau potable de manière durable.

Au Sénégal, comme dans la plupart des pays en voie de développement du Sahel, l'accès à l'eau potable reste problématique en raison des réserves qui s'amenuisent d'année en année. Ce phénomène est dû notamment à la diminution globale des précipitations couplée à une augmentation de la demande liée tant à la démographie croissante qu'au développement du pays (DGPRE, 2020b). Ainsi, le maintien d'un équilibre entre la demande, les besoins et les ressources est devenu nécessaire.

Suite aux pressions démographiques et agricoles ainsi qu'à la faible fertilisation des terres, les sols du Bassin Arachidier se sont appauvris et se montrent de plus en plus vulnérables à l'érosion.

Ainsi, le Bassin fait face à une destruction non négligeable de sa couverture végétale. À long terme, les pressions en surface ont entraîné une surexploitation des ressources en eau provoquant, par rabattement des niveaux piézométriques, des intrusions d'eau de mer. À cela s'ajoutent les intrusions salines d'origine probablement évaporitiques liées aux épisodes de transgression-régression de la mer lors de la mise en place du Bassin Arachidier (DGPRE, 2020b).

Le Bassin Arachidier compte six aquifères classés en trois systèmes constituants des ressources importantes en eau largement exploitées : les systèmes d'aquifères superficiels, intermédiaires et profonds. En raison de la détérioration des ressources par des processus naturels et/ou anthropiques, la question de la qualité de l'eau se pose. Ainsi, la diminution couplée à la détérioration de la qualité des ressources en eau fait de l'accès et de la gestion de l'eau souterraine des sujets sensibles (DGPRE, 2011).

Dans le cadre de ce travail, après caractérisation et description de la zone d'étude (cadre géographique, pressions en surface, hydrogéologie, ...), une base de données reprenant l'ensemble des campagnes d'échantillonnage à disposition sera créée.

Cette base de données permettra alors une analyse fine de la qualité de l'eau du Bassin sur base de l'interprétation des statistiques descriptives, de la disposition spatiale des concentrations, des analyses chimiques (diagrammes de Piper, diagrammes binaires Na^+/Cl^- ,) et multi-variées (matrices de corrélation, SOMs).

Un des objectifs de ce travail consistera à préciser l'origine ainsi que l'extension des intrusions salines auxquelles la zone d'étude fait face. Ainsi, un parallèle sera mené entre l'interprétation des données chimiques et statistiques avec la disposition spatiale des ouvrages dans le but de mettre en évidence les zones les plus touchées par d'éventuelles contaminations naturelles et/ou anthropiques.

Chapitre 1

Mise en situation du Bassin Arachidier

Ce chapitre a pour but, avant toute analyse statistique ou chimique de la base de données, de présenter la zone d'étude. Ainsi, le cadre géographique, le relief, l'occupation du sol, le climat, l'hydrographie ainsi que la géologie et l'hydrogéologie spécifiques au Bassin Arachidier seront décrits.

Le Sénégal fait partie des pays du Sahel, bande s'étendant d'Ouest en Est de l'Afrique joignant l'Océan Atlantique et la mer Rouge. Situé en bordure Atlantique Nord de l'Afrique, le pays est caractérisé par une topographie plutôt plate à couverture essentiellement constituée de cultures pluviales. Le climat de la zone d'étude est de type soudano-sahélien avec une pluviométrie en baisse d'année en année provoquant ainsi un appauvrissement des ressources en eau réparties en six aquifères différents classés selon trois systèmes (superficiels, intermédiaires et profonds).

En raison du changement climatique mais également de la surexploitation des ressources, les eaux souterraines font l'objet d'intrusions salines liées à la remontée du niveau marin rendant l'eau impropre à la boisson et/ou à l'irrigation. De plus, l'importante érosion éolienne des terres côtières a également provoqué une remontée d'eaux salines contaminant ainsi les ressources en eau douce. Ces intrusions ont deux origines : la présence d'eau de mer, principalement au Littoral, liée à la surexploitation des aquifères avec rabattement des niveaux piézométriques ; la dissolution d'évaporites et/ou mélange avec d'anciennes saumures, touchant principalement le Maastrichtien, formées lors des épisodes de transgression-régression de la mer lors de l'établissement du Bassin.

Les sols, principalement ferrugineux, sont propices à des phénomènes d'enrichissement de l'eau souterraine en fer. Aussi, l'occupation du sol (zones urbanisées, présence d'industries, de zones agricoles, ...) pourrait influencer le faciès hydrochimique des aquifères.

Ainsi, depuis 2007, le Sénégal s'est engagé dans un **Plan d'Aménagement et de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE)** qui a pour objectif d'améliorer de manière durable tant l'accès que la gestion d'une eau de boisson et de culture de qualité (Pasotti et al, 2016).

Les cartes présentées dans ce travail ont soit été élaborées spécifiquement pour ce rapport soit était déjà réalisées par ARTELIA - SHER - IDEV pour la DGPRE. Le système de coordonnées utilisé est WSGS84 - UTM28. En Annexe, un Atlas cartographique reprendra les cartes dans un format A3. Dans un souci d'homogénéisation de cet Atlas, la mise en page utilisée est restée identique à celle d'origine.

1.1 Localisation

Situé en Afrique occidentale, le Sénégal est limité à l'ouest par l'Océan Atlantique, au nord par la Mauritanie, à l'est par le Mali et au sud par la Guinée ainsi que la Guinée-Bissau (Figure 1.1). Au sud-ouest du pays, la Gambie se présente sous la forme d'une enclave le long du fleuve du même nom (DGPRE, 2011 ; Centre de Suivi Ecologique, 2013).

Délimité en rouge sur la Figure 1.1, le Bassin Arachidier s'étend sur approximativement 200 km nord-sud et 350 km d'ouest en est pour une superficie totale avoisinant $46\ 387\ km^2$ (DGPRE, 2020b).

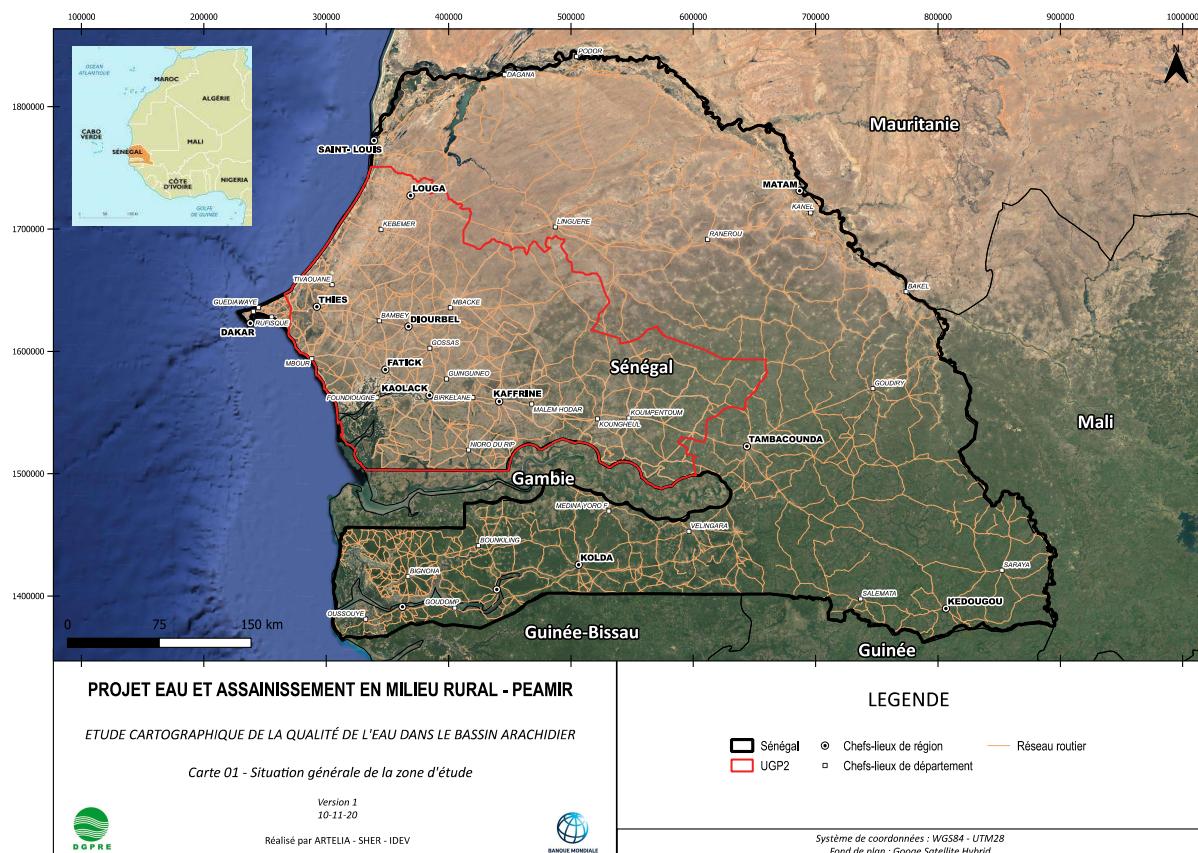


FIGURE 1.1 – Situation générale de la zone d'étude (DGPRE, 2020a ; Universalis, 2021. Modifié)

Comme présenté à la Figure 1.2, la zone d'étude regroupe les régions administratives de Thiès, Louga, Diourbel, Fatick, Kaolack, Kaffrine et Tambacounda regroupées en divers départements (Table 1.1).

Région	Département
Fatick	Foundiougne, Fatick et Gossas
Kaolack	Guinguineo, Kaolack et Nioro du rip
Kaffrine	Birkelane, Kaffrine, Koungheul et Malem Hoddar
Diourbel	Bambey, Diourbel et de Mbacké
Louga	Kébémer, Linguère et de Louga
Thiès	Thiès, Tivaouane et Mbour
Tambacounda	Koumpentoum et Tambacounda

TABLE 1.1 – Régions et départements de la zone d'intérêt

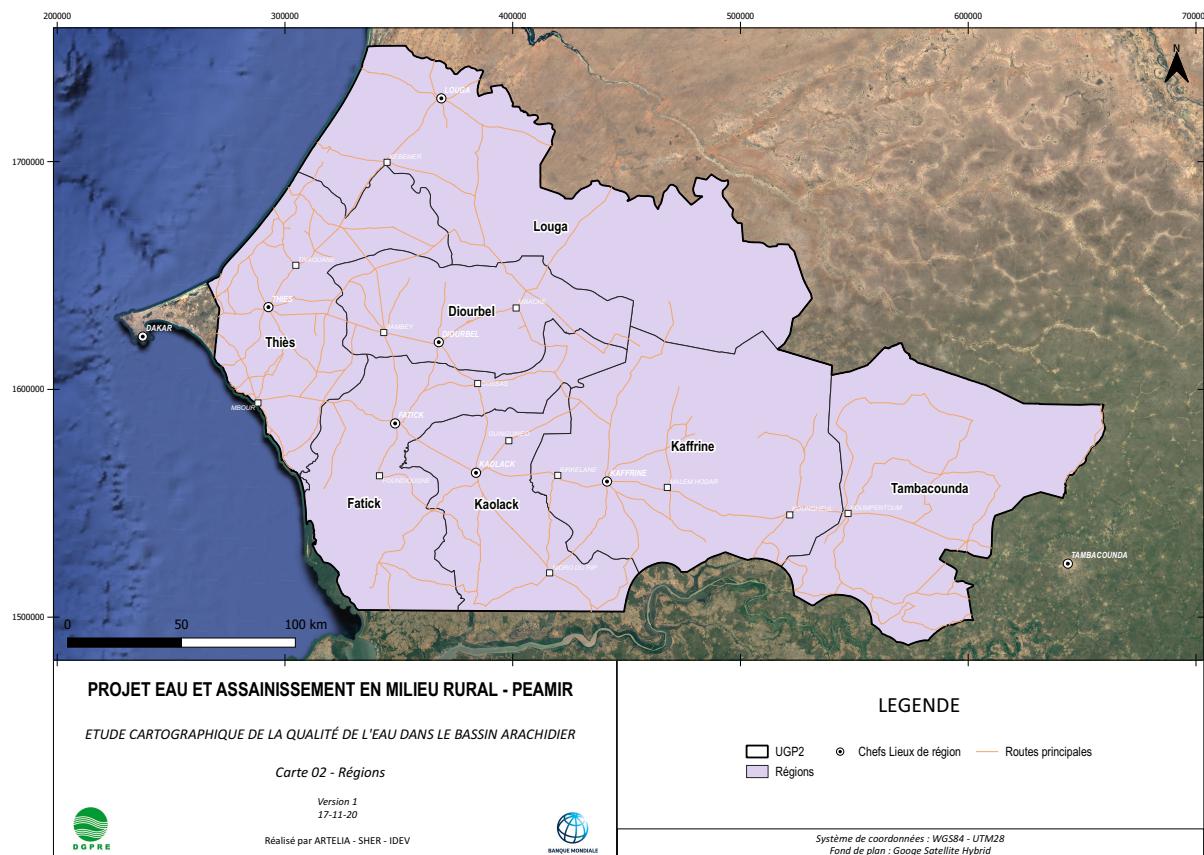


FIGURE 1.2 – Régions présentes dans la zone d'étude (DGPRE, 2020a)

1.2 Relief

Comme illustré par la Figure 1.3¹, la topographie du Bassin Arachidier est relativement plate surtout en aval des fleuves côtiers (Centre de Suivi Ecologique, 2013 ; Agence Nationale de l'Aménagement, 2020). À Thiès, la topographie est la plus élevée et dépasse parfois 80 m.

Au niveau de l'estuaire du Sine-Saloum, les valeurs particulièrement faibles de topographie ont provoqué une remontée d'eau marine salée contaminant ainsi les quelques apports en eau douce du Bassin (DGPRE, 2020b).

1.3 Occupation du sol

Comme présenté à la Figure 1.4, réalisée à partir de la classification des pixels d'images satellites du Sentinel 2 (2016), la grande partie du sol est occupée par des cultures pluviales avec présence éparsse de couverts herbacés, de végétations arbustives et de petites zones de cultures et végétations naturelles (Agence National de l'Aménagement, 2020).

L'eau de surface est représentée à l'ouest par la vallée du Saloum autour de laquelle se distinguent des prairies et zones de végétations inondées. Des cultures irriguées se regroupent principalement le long de la côte. Quant aux zones urbaines, elles sont principalement situées au niveau des chefs-lieux des régions et départements du Bassin (Mbacké, Kaolack, Diourbel, ...).

1. réalisée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) établi lors de la « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM) avec une qualité de résolution à 30 m

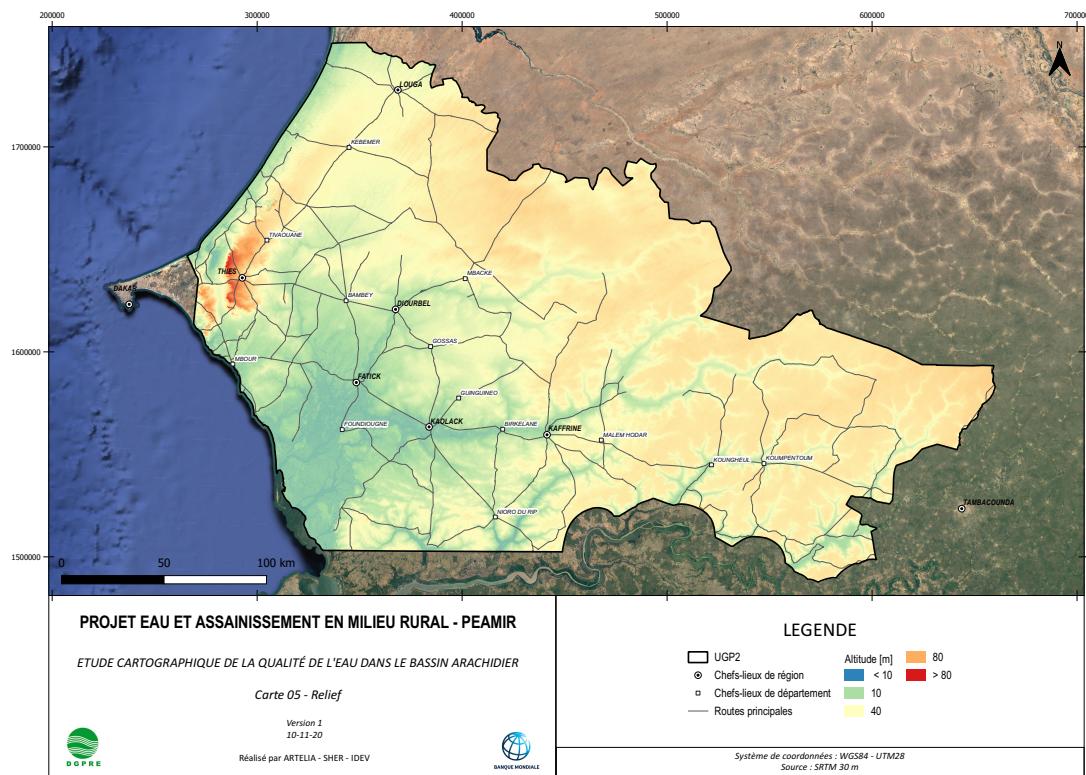


FIGURE 1.3 – Topographie de la zone d'intérêt avec résolution à 300 m (DGPRE,2020a)

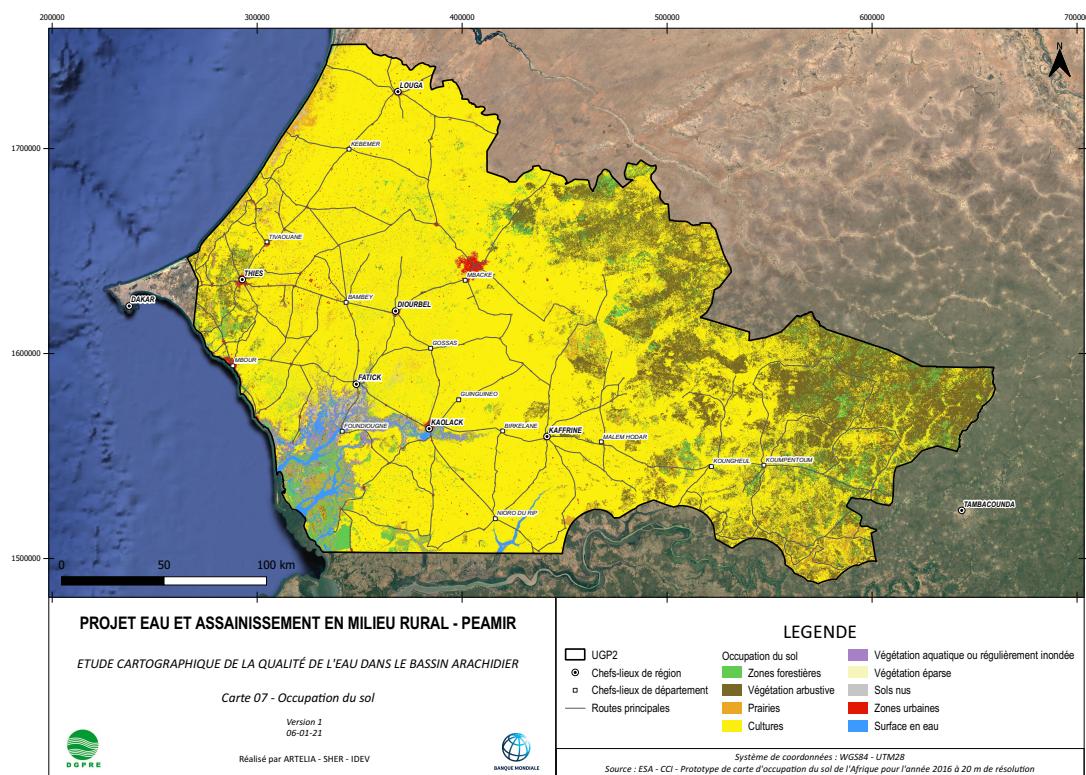


FIGURE 1.4 – Occupation des terres de la zone d'intérêt avec résolution à 20 m (DGPRE,2020a)

1.3.1 Zones agricoles et aquacultures

Situé au centre ouest du Sénégal, le Bassin Arachidier se constitue, comme son nom l'indique, d'une zone de culture arachidière avec présence de cultures vivrières (mil, sorgho, ...) et fruitières (DGPRE, 2020b).

Le Bassin est subdivisé en deux zones agro-écologiques distinctes définies selon des critères biophysiques et socio-économiques : les Bassins Arachidières Nord et Sud. Progressivement, la zone de production a migré vers les régions de Tambacounda, Kolda et Ziguinchor situées plus au nord-ouest du pays (DGPRE, 2020b).

Le long des côtes, les fleuves génèrent des deltas et plaines marécageuses où la pêche est active et se poursuit au niveau des plateaux continentaux plus à l'intérieur des terres (DGPRE, 2011 ; Agence National de l'Aménagement, 2020).

1.3.2 Zones industrialisées

Comme présenté sur la Figure 1.5, les industries se situent principalement en région côtière ainsi que dans le département de Mbacké ; elles sont majoritairement agro-alimentaires, même si des industries pétrolières et d'éléments chimiques ou engrains sont également dénombrées à l'intérieur des terres (Agence National de l'Aménagement, 2020). Leur disposition spatiale est présentée à la Figure 1.6.

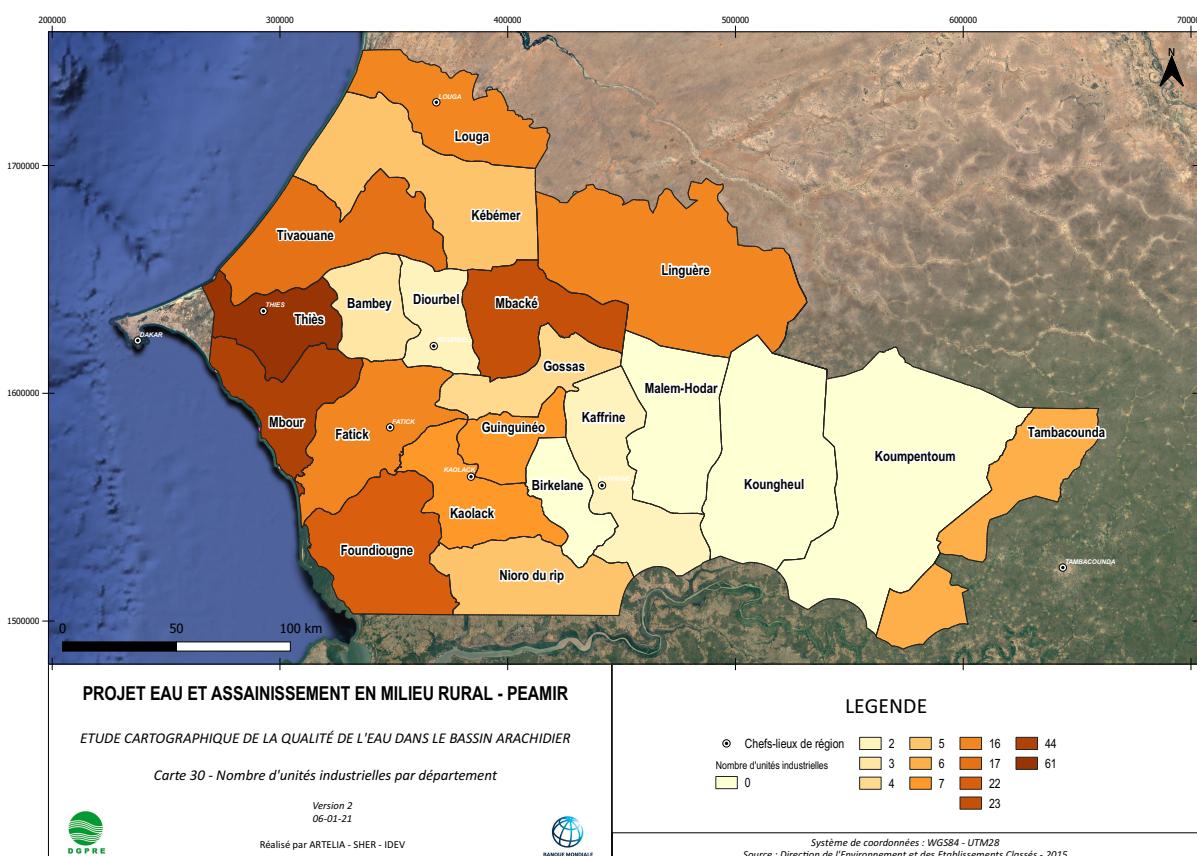


FIGURE 1.5 – Nombre d'unités industrielles par département (DGPRE, 2020a)

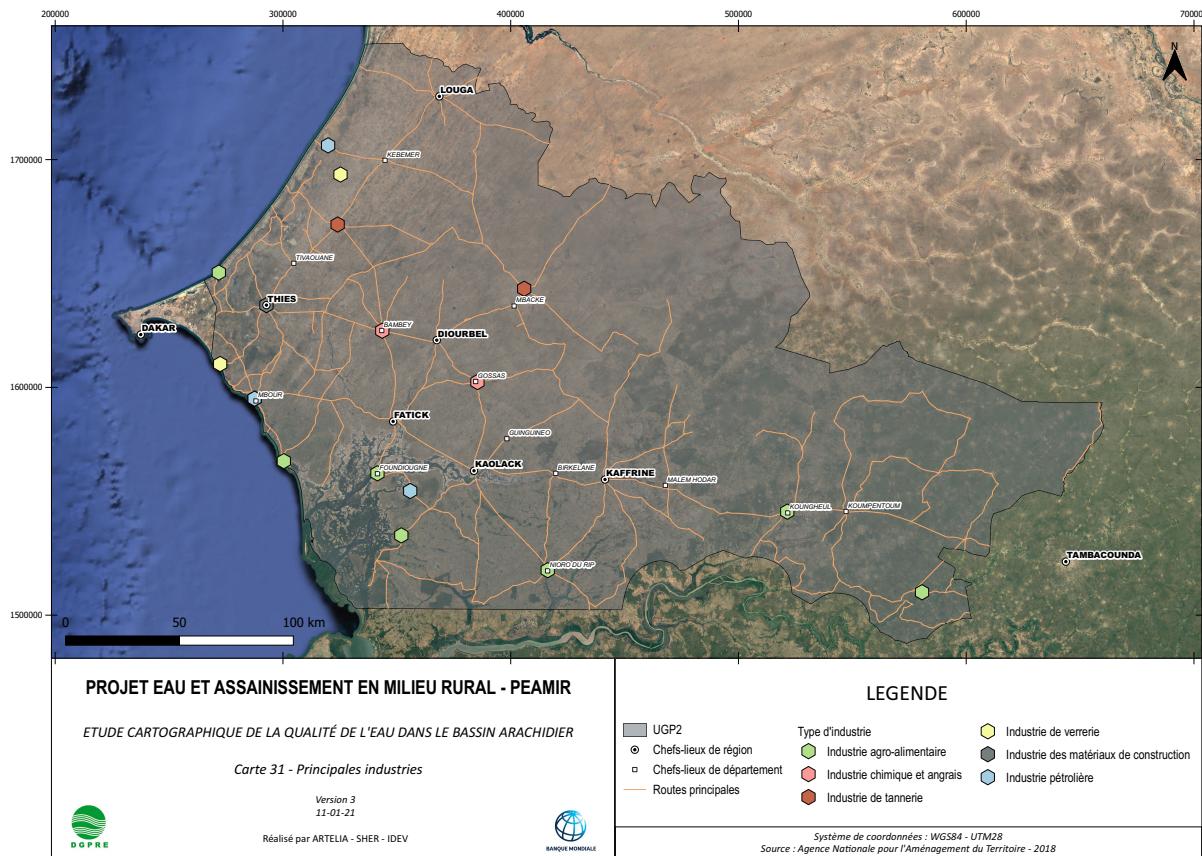


FIGURE 1.6 – Principales industries (DGPRE, 2020a)

1.3.3 Zones urbanisées

Le Bassin Arachidier regroupe approximativement 60 % de la population rurale du Sénégal surtout répartie, comme indiqué par la Figure 1.7, dans les villes Mbacké, Thiès et Kaolack. La zone située à l'est du bassin, reprenant les régions de Tabacounda et Louga, ne compte qu'une très faible densité de population (Agence National de l'Aménagement, 2020).

De plus, de part sa position centrale au niveau du pays, le Bassin Arachidier bénéficie d'axes routiers fonctionnels permettant l'accès à des marchés de consommation agraire (DGPRE, 2020b).

1.4 Climatologie et pluviométrie

Caractérisé par un climat soudano-sahélien de type tropical sec au nord et humide au sud, le cycle saisonnier comporte deux séquences : une période sèche de novembre à juin avec présence d'alizés maritimes et continentaux ainsi qu'une période humide de juin à octobre avec domination de moussons (Agence National de l'Aménagement, 2020 ; Albergel et al., 1996).

La pluviométrie annuelle moyenne est inégale sur la zone et comprise entre 300 et 900 mm avec augmentation des précipitations au sud du pays (Malou, 2004 ; Albergel et al., 1996). Quant à l'évapotranspiration potentielle annuelle, elle est supérieure à 2 m (Agence National de l'Aménagement, 2020). Ainsi, l'exploitation couplée à l'évapotranspiration naturelle contribue à la diminution des ressources (DGPRE, 2011 ; DGPRE, 2020b).

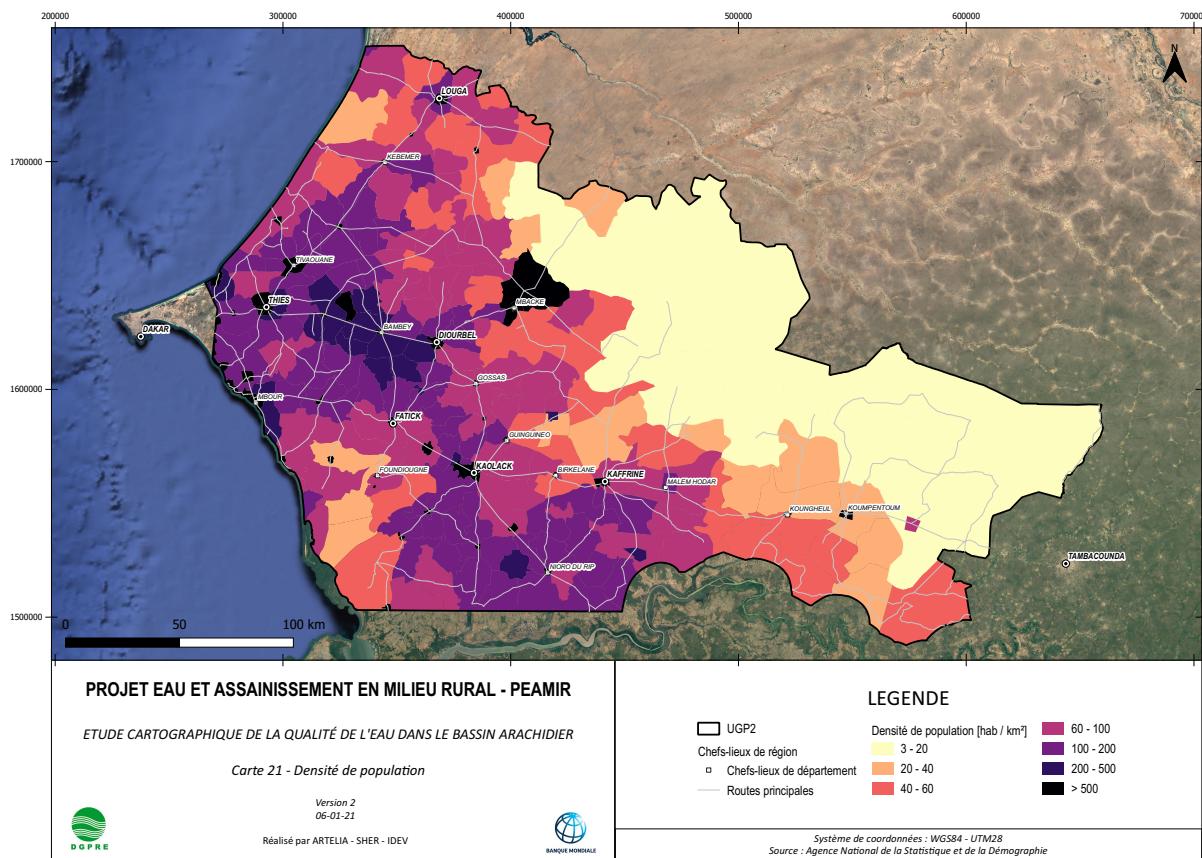


FIGURE 1.7 – Densité de population dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)

En raison du changement climatique ainsi qu'au déplacement des isohêtes, la pluviométrie a considérément diminué depuis les années 1970 provoquant ainsi un appauvrissement de la disponibilité des réserves en eau (DGPRE, 2020b). Le changement climatique aurait alors provoqué la remontée du niveau marin suivie de phénomènes d'érosions côtières avec désertification générale. À cela s'ajoute à la fois une réduction des zones de mangroves couplée avec une dégradation générale des terres ainsi qu'une salinisation des sols et eaux. Le tout provoquant ainsi l'indisponibilité d'accès à une eau propice à la boisson et/ou à l'irrigation (DGPRE, 2020b).

Les Figures 1.8 et 1.9 présentent l'évolution des précipitations moyennes annuelles respectivement à Louga (de 1930 à 2004) et à Bambey (de 1923 à 1986). La diminution des précipitations au cours du siècle dernier est bel et bien observée :

- de 430 mm (1930-1945) à 320 mm (1987-2004) en moyenne à Louga
- de 650 mm (1923-1945) à 500 mm (1987-2010) en moyenne à Bambey

Cette baisse a induit une diminution des niveaux piézométriques des aquifères en présence ce qui a également réduit les remontées d'humidité par capillarité dans les couches superficielles des sols favorisant ainsi leur érosion éolienne (Cochet et al., 2018).

La ville de Bambey présente des valeurs de pluviométrie supérieures à celles de Louga, située plus au nord. Cela reflète l'inégalité Nord-Sud de la pluviométrie dans la zone d'étude.

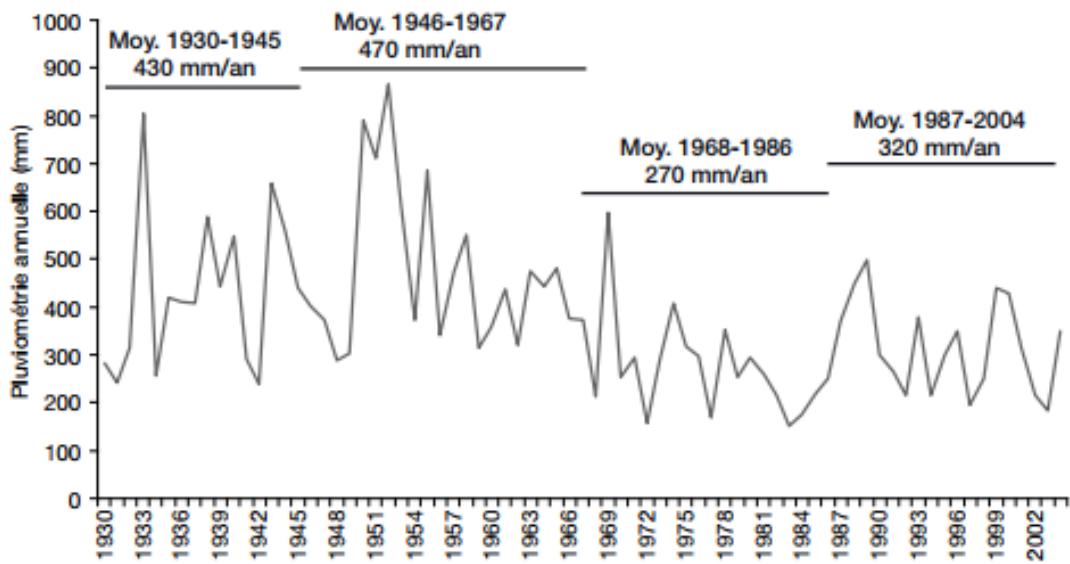


FIGURE 1.8 – Évolution des précipitations annuelles à Louga de 1930 à 2004 (Le Borgne, 1988)

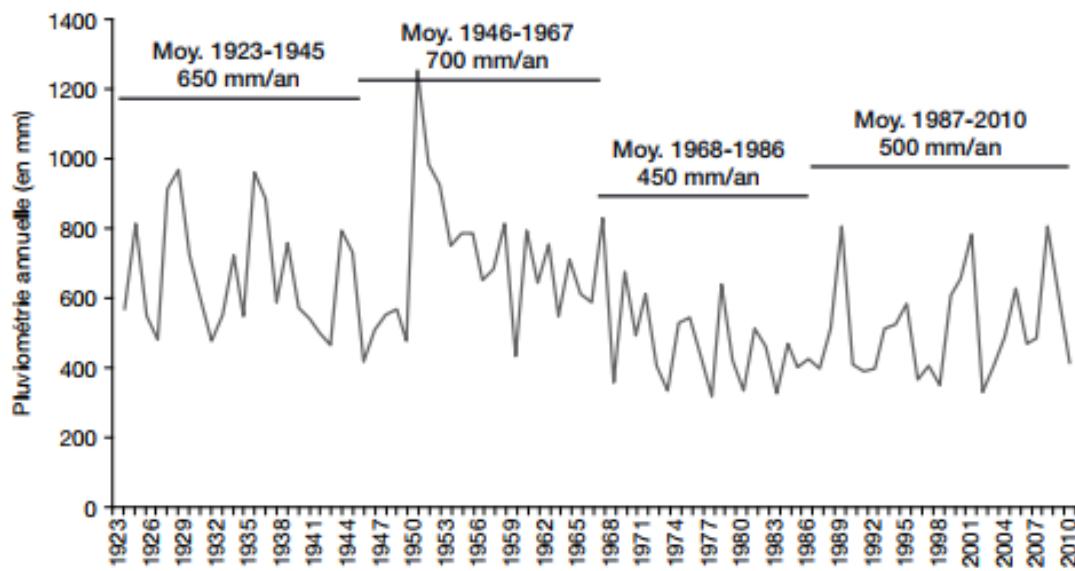


FIGURE 1.9 – Évolution des précipitations annuelles à Bambey de 1923 à 2010 (Le Borgne, 1988)

Ainsi, comme mis en évidence par le rapport du Ministère l'Environnement et du Développement Durable (MEDD, 2012 ; DGPRE, 2011), la ressource en eau est un des secteurs les plus sensibles aux changements climatiques (Unité-Progrès-Justice, 2013). L'analyse des nappes souterraines a montré d'une part que les potentiels hydrostatiques sont affectés à deux échelles (DGPRE, 2011 ; DGPRE, 2020b ; Centre de Suivi Ecologique, 2015) :

- l'échelle **saisonnière** car la majeure partie des précipitations a lieu principalement en été, entre juin et octobre.
- l'échelle **annuelle** car le niveau piézométrique est en baisse continue induisant alors une réduction des ressources souterraines.

Ainsi, l'état des aquifères dépend des paramètres climatiques *i.e* la pluviométrie, l'évapotranspiration et le climat mais également, comme mentionné dans Malou et al. (1992), de la profondeur de la nappe.

1.5 Cadre géologique

Une première ébauche de carte géologique du Sénégal a été réalisée 1962 par le BRGM (Bureau de Recherche pour la Géologie Minière). Une mise à jour de cette carte est disponible en Annexe dans l'Atlas cartographique (Roger et al., 2009)

La géologie sénégalaise peut être divisée en deux grands ensembles : **le socle granito-gneissique** et **le bassin sédimentaire** (DGPRE, 2020b ; Albergel et al., 1996 ; Roger et al., 2009).

Le premier, au sud-est du Sénégal, est constitué de formations anciennes plissées et métamorphiques (Madioune, 2012 ; Roger et al., 2009) tandis que le second, couvrant l'entièreté du Bassin Arachidier, est composé de couches d'épaisseurs variables de sables, grès, argiles, calcaires et marnes déposés de la fin du Secondaire (Maastrichtien) jusqu'au Quaternaire (DGPRE, 2020b ; Roger et al., 2009). Suite à des phases tectoniques, ces formations présentent désormais un réseau de failles avec remontées de produits volcaniques tels que des dolérites, basaltes, ... (DGPRE, 2020b).

Ainsi, les terrains anciens, d'âge birrimien à Paléozoïque, n'affleurent qu'au sud-est du Sénégal. Quant au bassin sédimentaire, il forme un plateau d'altitude généralement inférieure à 50 m (Roger et al., 2009) ; sa tectonique explique la présence de horst et grabens (Roger et al., 2009).

Le substrat sédimentaire sénégalais s'est d'abord formé au Trias suite au début de l'ouverture Atlantique (Roger et al., 2009). Ensuite, au Jurassique, en raison de la rupture entre l'Afrique et l'Amérique du Nord, le bassin sédimentaire s'est mis en place avec présence de dépôts terrigènes et faciès évaporitiques en Casamance (Templeton, 1971). Par après, des épisodes successifs de transgression et régression marines ont modifié les niveaux des océans et ont provoqué le dépôt des premiers carbonates (Madioune, 2012 ; Spengler et al., 1966 ; Castelain, 1965). Lors du Crétacé, le bassin s'est creusé suite à une subsidence active (Roger et al., 2009 ; Spengler, 1966). Le Maastrichtien quant à lui est caractérisé par de nombreux épisodes de transgression combinés à une activité tectonique importante (Roger et al., 2009 ; Castelain, 1965). Ensuite, le Paléocène marque l'arrêt de la sédimentation terrigène avec ralentissement de la subsidence (Roger et al., 2009). Entre l'Éocène et le Miocène, l'horst de Diass s'est fracturé. Cet événement a induit des coulées magmatiques (Madioune, 2012). Les formations superficielles actuelles datent du Quaternaire et présentent, en bordure de l'Océan Atlantique, des faciès continentaux formant le Continental Terminal (Madioune, 2012 ; Michel, 1960 ; Michel, 1973 ; Roger et al., 2009).

De manière générale les différentes formations sont subhorizontales et s'amincent vers le socle tandis qu'elles deviennent plus argileuses et s'épaissent vers le littoral (DGPRE, 2021 ; Spengler et al., 1966 ; Latil-Brun et al., 1986 ; Roger et al., 2009). Les Figures 1.10 et 1.11 présentent une vue en coupe des unités hydrogéologiques traversant la zone d'étude.

Les différentes unités géologiques de la zone d'étude sont détaillées ci-dessous :

- le **Continental Terminal** (CT) couvre l'ensemble du bassin sédimentaire sénégalais et est constitué de formations sableuses et argilo-sableuses d'épaisseur avoisinant la dizaine de mètres. Des variations latérales et verticales sont parfois observées et présentent des grès argileux ainsi que des latérites perméables (DGPRE, 2021). Le Continental Terminal est en discordance avec l'Éocène et est souvent sub-affleurant sous le Quaternaire (DGPRE, 2021).
- Les calcaires de l'**Éocène - Paléocène** ont fait l'objet de mouvements tectoniques entre le Tertiaire et le Quaternaire. Ces mouvements auraient été liés à la subsidence du bassin sédimentaire lors de l'effondrement du socle (DGPRE, 2021). Ainsi, les basaltes du Cap Vert ainsi que le horst de Diass se seraient formés faisant ainsi remonter le Maastrichtien le long des failles, entre les anticlinaux du Paléocène. La base du Paléocène est constituée de formations marneuses et calcaires (Audibert, 1970).

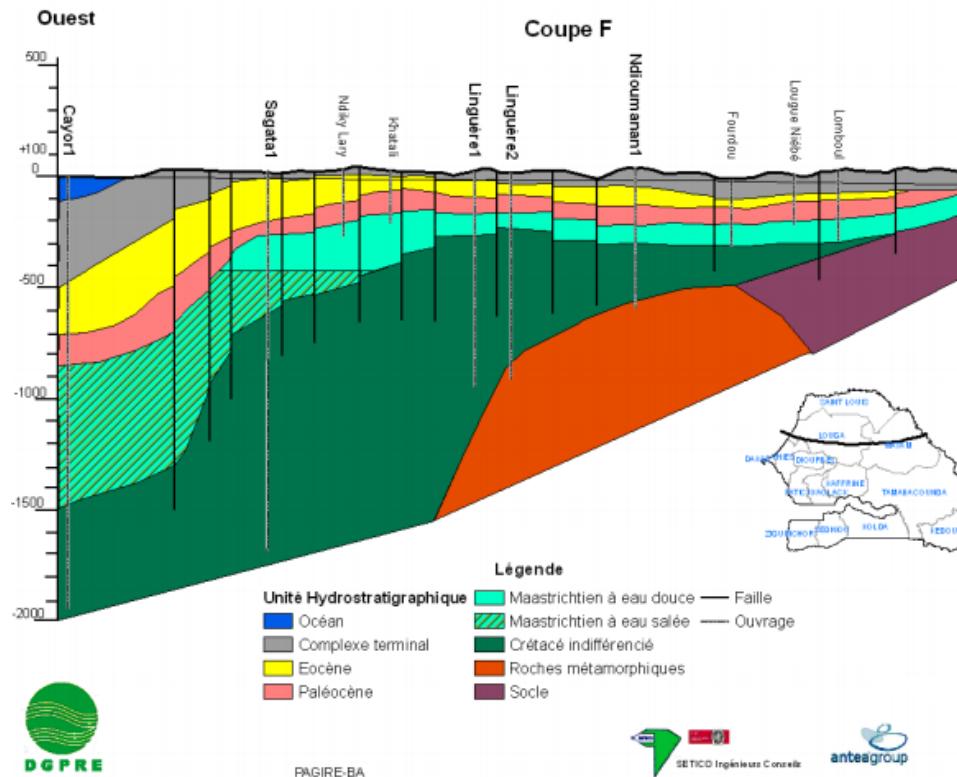


FIGURE 1.10 – Coupe hydrogéologique ouest-est traversant la partie nord de la zone d'étude (modifié d'après DGPRE, 2013)

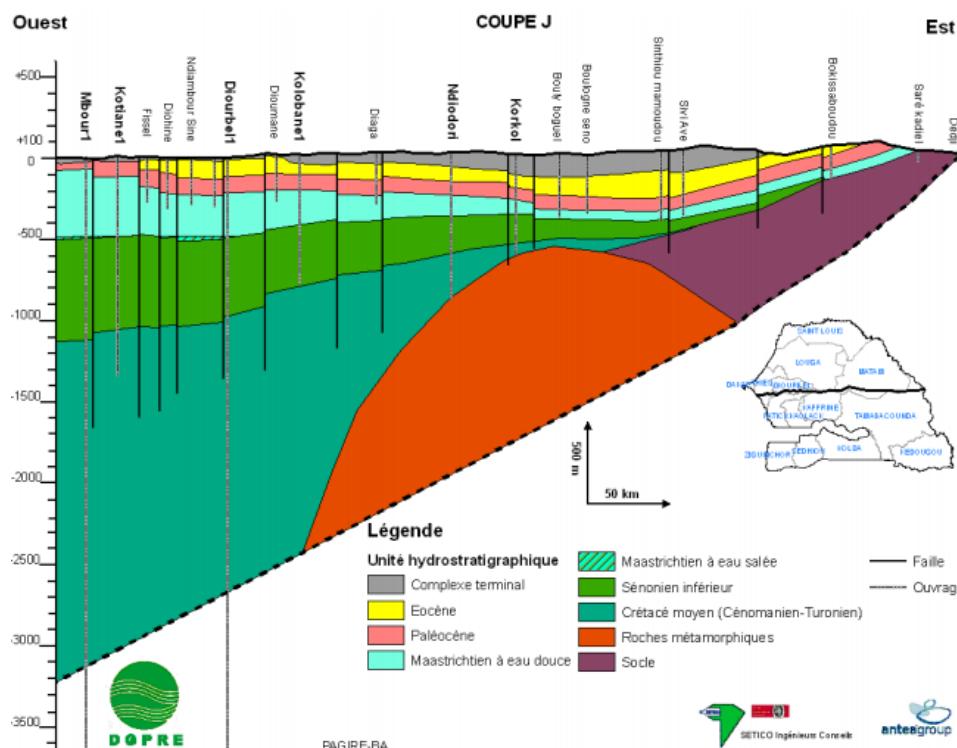


FIGURE 1.11 – Coupe hydrogéologique ouest-est traversant la partie sud de la zone d'étude (modifié d'après DGPRE, 2013)

- Les formations de l'**Oligo-Miocène** sont difficilement distinguées des unités géologiques supérieures et inférieures (*i.e* l'Éocène et le Continental Terminal). Elles seraient plutôt argileuses avec présence de calcaire et de marne surmontées de sable sur une épaisseur de 40 m (DGPRE, 2021).
- Le **Maastrichtien** consiste en une alternance de dépôts argileux et gréseux d'épaisseur variant entre 200 et 300 m (Roger et al., 2009)
- Le **Quaternaire** affleure au Littoral et est constitué de couches superficielles composées de sable avec parfois présence de tourbe notamment dans la zone des Niayes (Sall, 2010 ; DGPRE, 2021)

1.5.1 Unités morphopédologiques principales

Au Sénégal, de manière générale, les conditions dynamiques géomorphologiques et pédoclimatiques ont donné place à une diversification des types de sol (DGPRE, 2011). Ainsi, comme présenté à la Figure 1.12, dans le Bassin Arachidier se retrouvent à la fois des sols ferrugineux tropicaux, des vasières et dunes littorales, des sols hydromorphes, des lithosols, des zones ferralitiques ainsi que quelques parcelles de sols peu évolués. À noter que la faible couverture végétale rend les sols vulnérables aux érosions éoliennes et hydrauliques (DGPRE, 2011 ; Agence National de l'Aménagement, 2020).

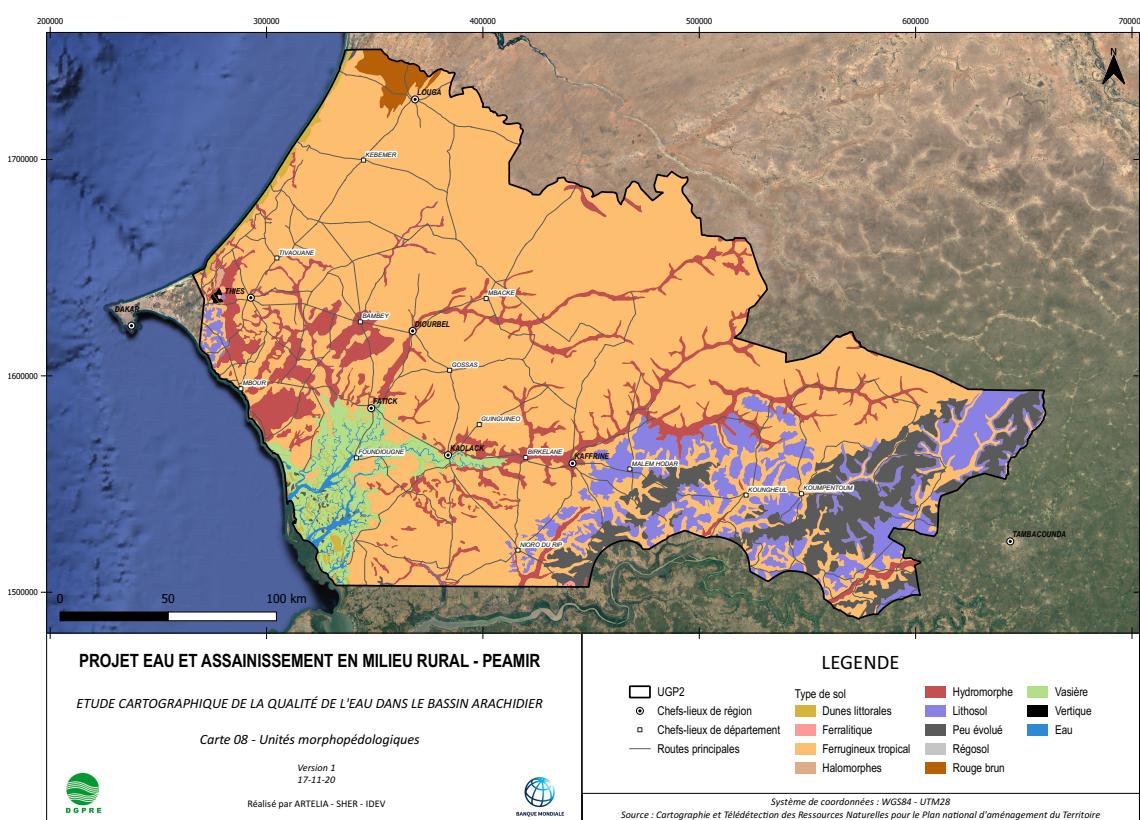


FIGURE 1.12 – Unités morphopédologiques présentes dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)

Les sols ferrugineux tropicaux font partie de la catégorie des lixivisols et sont formés de sables siliceux à granulométrie fine (Diallo et al., 2015 ; Madioune, 2012). Ces derniers occupent la majeure partie du Bassin Arachidier et sont parfaitement adaptés aux cultures de type arachidières, vivrières ou fruitières (DGPRE, 2020b). Ils résistent plutôt bien à l'érosion et se trouvent principalement sur des plateaux. Ils sont généralement de couleur rouge et beige et contiennent de la kaolinite (DGPRE, 2011).

Les sols hydromorphes semblent se disposer selon les branches de topographie équivalentes à 10 m (Figure 1.3). Très riches en matière organique, ils se développent surtout dans les zones inondables, au bord des cours d'eau (Ndiaye et al., 2012). Ces sols sont caractérisés par une texture argileuse et limoneuse et font l'objet d'une fertilité naturelle convenant tout à fait à la culture de riz, maïs, ... En vue d'une protection contre d'éventuelles inondations, ils peuvent se comporter comme des digues de ceinture et des zones de drainages (DGPRE, 2011).

1.6 Cadre hydrographique

Les principaux cours d'eau présents dans le Bassin Arachidier sont, comme l'illustre la Figure 1.13, les systèmes du Saloum et du Sine.

Les eaux de pluie alimentent des vallées fossiles (DGPRE, 2020b). Des zones à haut potentiel pour l'exploitation agricole d'eau de surface sont représentées notamment par les rivières pérennes situées dans la région de Fatick *i.e* la Néma et la rivière Djikoye, mais également par les cours d'eau plus côtiers du département de Mbour comme la Somone par exemple (DGPRE, 2020b).

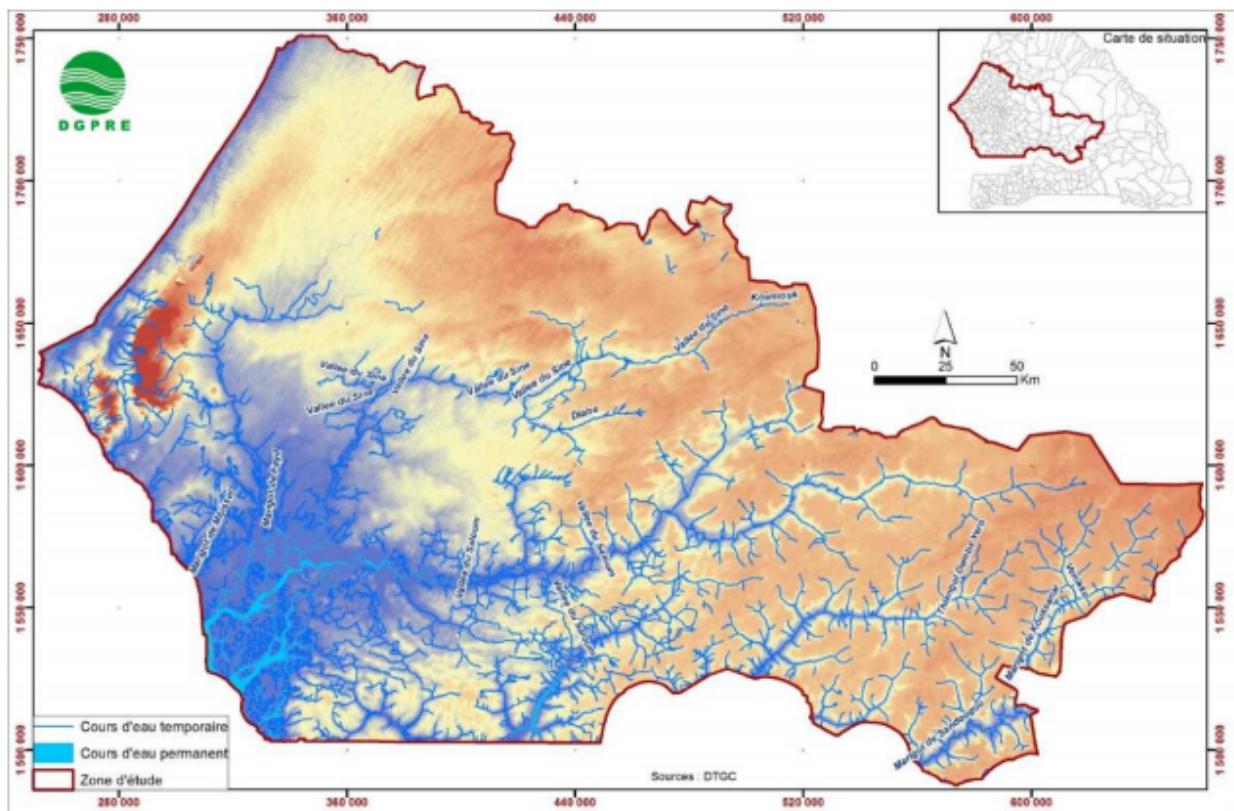


FIGURE 1.13 – Hydrographie de la zone d'intérêt (DGPRE,2020b)

Parce que les lits mineurs de certains fleuves sont endoréiques, *i.e.* ne se déversent pas dans une mer, l'eau s'accumule, s'infiltra et s'évapore plutôt dans les bas-fonds et il est difficile d'évaluer correctement le ruissellement des bassins-versants (DGPRE, 2020b ; DGPRE 2021).

De plus, le Bassin Arachidier ne compte que très peu d'eaux de surface pérennes. Ainsi, ces dernières sont relativement peu exploitées en comparaison avec les ressources souterraines (DGPRE, 2020b). L'eau de surface étant alors principalement exploitée à des fins agricoles durant les saisons humides (DGPRE, 2020b).

1.7 Cadre hydrogéologique

Comme expliqué précédemment, en raison de l'augmentation des demandes en eau liée à l'accroissement démographique dans la région, à la baisse des niveaux piézométriques (entraînée par la diminution de la pluviométrie) et à des faibles quantités d'eaux de surface pérenne ; les eaux souterraines du Bassin Arachidier constituent une réserve importante de plus en plus nécessaire à préserver (Centre de Suivi Ecologique, 2013 ; Albergel et al, 1996).

Comme indiqué par la Figure 1.14, le Bassin Arachidier regroupe ceux du Sine Saloum et du Car-Car débouchant tous deux dans un réseau d'eau salée (Albergel et al., 1996) ; mais aussi celui du Ferlo, des fleuves Sénégal et Gambie, de la Somone et du Littoral.

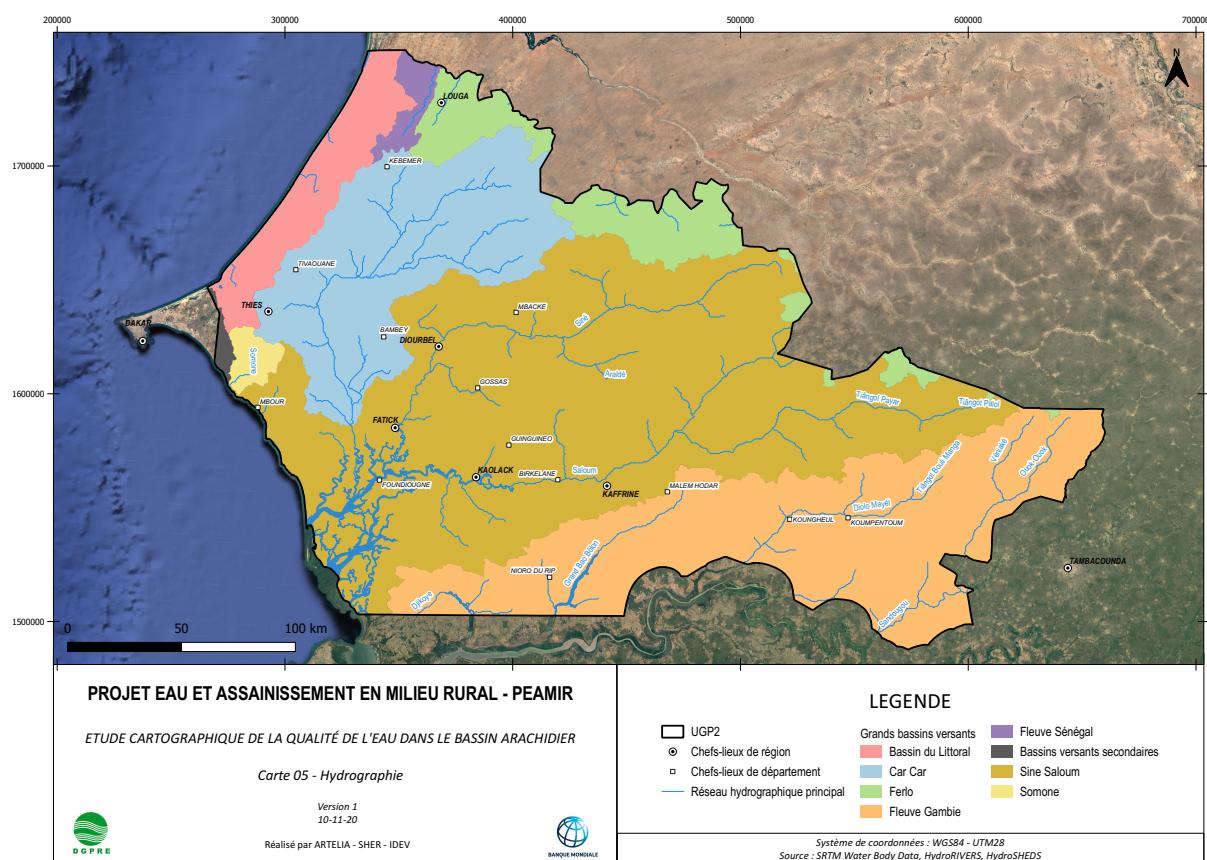


FIGURE 1.14 – Les différents bassins hydrographiques présents dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)

Le système d'aquifère du Bassin Arachidier comprend 3 unités principales décrites ci-dessous (DGPRE, 2020b ; Coopération Technique Belge, 2009 ; Baye, 1976, DGPRE, 2014, Sall, 2010) :

- le **système aquifère superficiel** est constitué de formations sablo-argileuses et sableuses du Quaternaire, du Continental Terminal ainsi que de l'Oligo-miocène. Au niveau des côtes et des basses vallées (Delta de Sine Saloum), l'aquifère superficiel fait parfois l'objet d'intrusions salées d'origine marine suite à la diminution des niveaux piézométriques. L'eau douce ne s'y trouve que sous la forme de lentilles déposées sur des eaux saumâtres et n'est finalement exploitée qu'à faible débit. Sinon, plus à l'intérieur des terres, les eaux de l'aquifère superficiel sont douces et présentent des salinités inférieures à 1 g/L. L'aquifère est libre dans la zone des Niayes.

Ce système présente un potentiel de réserve de l'ordre de 50 à 75 milliards de m^3 d'eau avec un renouvellement saisonnier environnant 1.5 à 2 milliards de m^3 /an² et une exploitation quotidienne comprise entre 15 000 et 20 000 m^3 . Dans le cadre d'une année caractérisée par une faible pluviométrie, les termes négatifs du bilan hydrologique *i.e* l'évapotranspiration, la drainance vers d'autres aquifères sous-jacents, ... réduisent les débits exploitables et peuvent ainsi induire une surexploitation des réserves.

Ainsi, il ressort de cette brève analyse que l'exploitation du système aquifère superficiel dépend fortement des conditions climatiques et qu'il est, en bordure de côte, exposé à des intrusions d'eau salée.

- le **système aquifère intermédiaire** est constitué de formations calcaires et marno-calcaires de l'Éocène et du Paléocène. À noter que les calcaires peuvent, dans le cas d'une karstification comme à l'ouest du pays, donner place à un aquifère libre peu profond, facilement exploitable, souvent en continuité avec les formations sableuses du Continental Terminal. En absence de karstification, l'aquifère est plutôt semi-captif à captif sous la charge des argiles à la base du Continental Terminal.

Des poches de salinité supérieures à 2 g/L sont observées au niveau du delta du fleuve Sine Saloum. En effet, suite à une surexploitation des eaux souterraines dans la zone du Cap-Vert, près de Dakar dans les Niayes, mais également à la faible perméabilité des calcaires karstifiés, l'eau salée marine a contaminé la zone. Ainsi, parce que l'aquifère superficiel ne suffit pas à compenser ces infiltrations, la contamination a progressé vers le sud-est.

À Kaffrine et Mbacké, les calcaires sont compacts et marneux ce qui explique les faibles débits pompés ($25\ m^3/j$).

Ainsi, il ressort de cette brève analyse que, les zones de karstifications (principalement dans les Niayes) sont sujettes à des caractéristiques hydrauliques intéressantes induisant un potentiel d'exploitation cependant limité par la faible recharge annuelle et les risques de propagation d'eaux salées vers le sud. En l'absence de karstification, les calcaires sont plus marneux et donc moins perméables en plus d'être situés en grande profondeur (+/- 200 m). Ainsi, leur exploitation est moins intéressante et plus coûteuse.

- le **système aquifère profond**, l'aquifère le plus largement exploité est constitué de formations épaisses et sableuses du Maastrichtien dont seulement la partie supérieure est captée par les forages capables d'extraire entre 50 et 280 m^3/h . Sous les dépôts marno-argileux du Paléocène, la nappe devient captive et les niveaux piézométriques remontent.

Dans les couches profondes du Maastrichtien, l'eau est fortement salée et pourrait être assimilée soit à des saumures soit à de l'eau de mer résiduelle datant de l'époque de dépôt de la formation non lessivée lors de l'émersion post-Maastrichtienne. Étant donné qu'elles sont en contact avec les eaux douces de la partie supérieure des sables Maastrichtien, ces eaux salées constituent une menace dans le cas d'une exploitation intensive de l'aquifère des sables. Les zones salées caractérisées par des concentrations supérieures à 2g/L sont situées dans le secteur Mbacké-Diourbel et cette contamination originale du delta du Sénégal mais aussi de la zone Mbour et du fleuve Sine-Saloum.

Ce système d'aquifère profond est actuellement le plus exploité avec un total de 44 000 m^3/j sur l'ensemble du Sénégal et des débits unitaires variant entre 50 et 100 m^3/h . La recharge étant notamment assurée par les bordures du Bassin.

Ainsi, il ressort de cette brève analyse que le système aquifère profond constitue, de par son extension spatiale, ses caractéristiques hydrodynamiques et ses réserves considérables en eau de bonne qualité, un aquifère de très bon potentiel pour le Sénégal. Cependant, une surexploitation locale pourrait mener à des contaminations d'eaux salées néfastes pour la qualité du Bassin dans sa globalité.

2. en considérant une pluviométrie moyenne

L'analyse des niveaux piézométriques montre que les systèmes aquifères superficiels et intermédiaires seraient liés entre eux ; l'aquifère profond serait quant à lui indépendant. Les fleuves Sine Saloum et Gambie se comporteraient comme des axes de drainages plutôt que de recharges (DGPRE, 2020b).

La Figure 1.15 présente les différentes unités hydrogéologiques présentes dans le Bassin Arachidier.

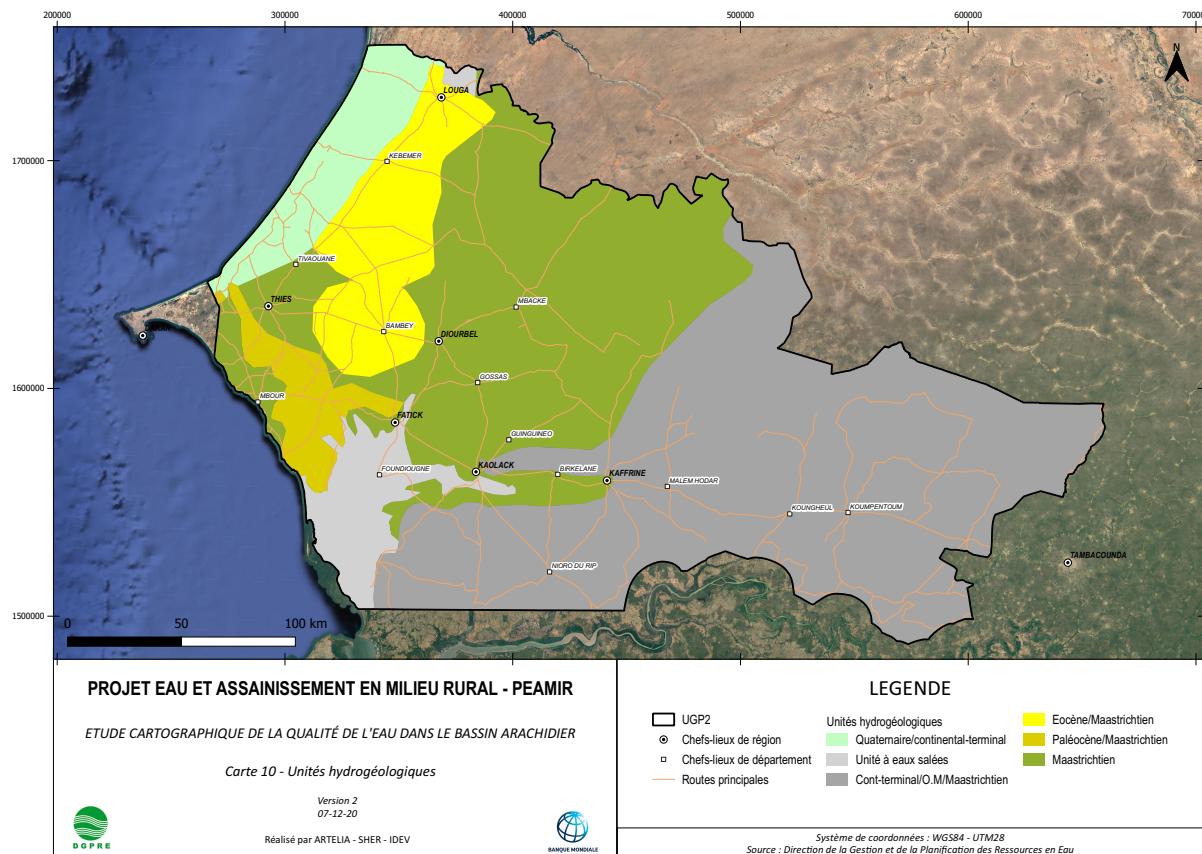


FIGURE 1.15 – Les différentes unités hydrogéologiques présentes dans la zone d'intérêt (DGPRE, 2020a)

1.7.1 Recharge des aquifères, tectonique et origine de la salinité

Les recharges du Continental Terminal, de l'Éocène et du Quaternaire sont verticales par infiltration directe des eaux de pluie et latérales par l'eau d'origine fluviale (DGPRE, 2013).

Concernant le Maastrichtien, la recharge a principalement lieu dans deux endroits (DGPRE, 2013) :

- au niveau du horst de Diass (à l'ouest, près de Thiès), où les formations du Maastrichtien affleurent.
- au sud est du Bassin Arachidier, là où les formations du Maastrichtien sont en contact avec celles du Socle.

La Figure 1.16 présente une version simplifiée de la coupe hydrogéologique du Maastrichtien. Il est observé que les couches sont globalement sub-horizontales avec un pendage vers l'Ouest (DGPRE, 2018b). Localement, les degrés de fracturations des unités hydrogéologiques peuvent être importants. C'est notamment le cas au niveau du Horst de Diass avec la présence des failles « de Sébikotane », « de Pout et Fouloume » et « de Thiès » (DGPRE, 2018b).

Il est également observé sur cette Figure que le système du Maastrichtien présente des eaux souterraines salées voire sur-salées. Leur origine serait naturelle et liée aux mouvements de transgression-régression de la mer lors de la mise en place du bassin. Piégée dans le système, l'eau se serait enrichie par évaporation provoquant une sur-salinité dans le Maastrichtien et créant ainsi la zone dite « centrale salée » (DGPRE, 2013).

Cela reste cependant une hypothèse et des analyses chimiques et isotopiques poussées devraient permettre de mieux définir l'origine de la salinité. L'analyse des rapports Br^-/Cl^- pourrait également améliorer la détermination des limites spatiales de l'étendue des eaux salées (DGPRE, 2013). L'extension de cette bande salée a été délimitée sur le territoire sénégalais par la DGPRE en 2018 comme indiqué sur la Figure 1.17.

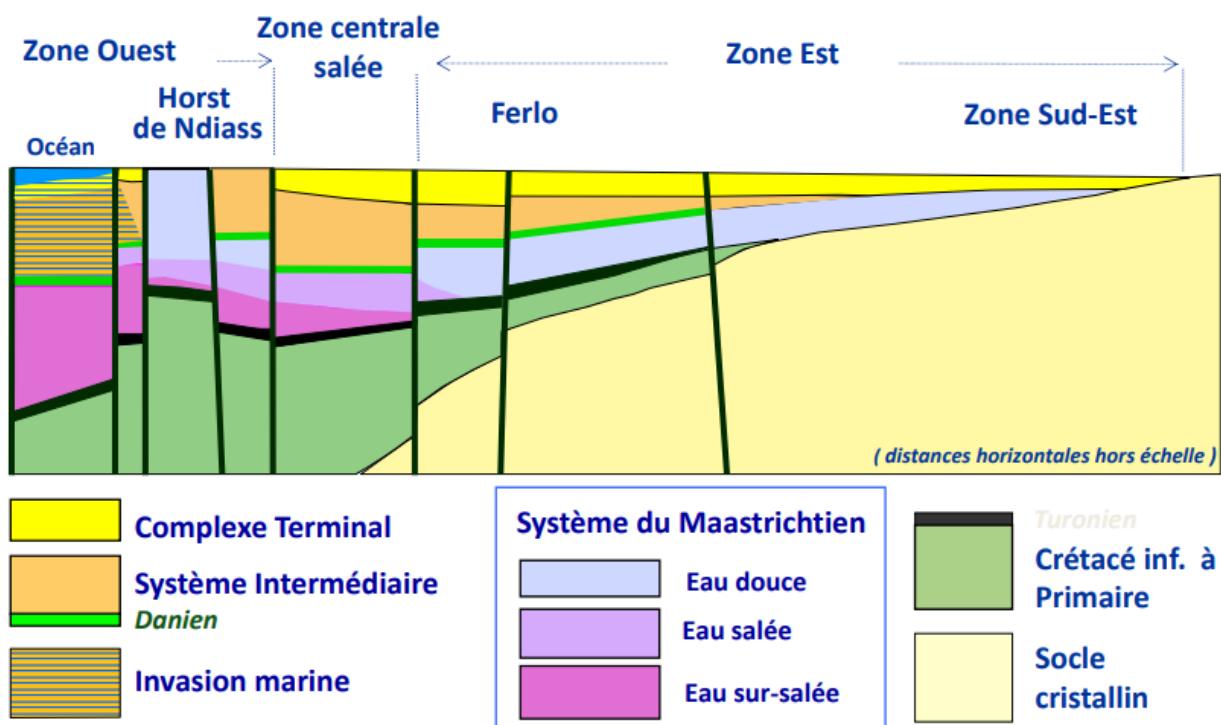


FIGURE 1.16 – Coupe hydrogéologique simplifiée du Maastrichtien (DGPRE, 2012 modifié par la CTB et les Universités de Liège et d'Arlon)

Au Littoral Nord, l'écoulement des eaux souterraines est localement dirigé vers l'intérieur des terres et constitue une zone préférentielle d'intrusions salines (DGPRE, 2018a). Concernant le Littoral Sud, à l'exception du sud de Mbour marqué par une dépression piézométrique, l'eau souterraine se dirige également localement vers l'intérieur du Bassin Arachidier (DGPRE, 2018a). Ainsi, les intrusions d'eau de mer dans l'aquifère libre du Paléocène sont favorisées. Celles-ci se répandraient alors dans le Maastrichtien, système sous-jacent au Paléocène. En effet, en raison de la faible épaisseur des couches les séparant, ces deux aquifères présentent des échanges entre eux (DGPRE, 2018a).

De plus, la surexploitation des aquifères avec rabattement des hauteurs piézométriques pourrait, à long terme, provoquer l'augmentation progressive de la salinité du Bassin Arachidier (DGPRE, 2018a).

Quant aux concentrations élevées en fluor, elles ne seraient pas liées directement à l'état de salinisation des eaux mais plutôt à l'origine marine des réservoirs *i.e.* des argiles marines (DGPRE, 2013). La présence de fluor-apatite, minéral des roches phosphatées, pourrait également jouer un rôle dans l'origine des concentrations élevées en fluor (Travi, 1988).

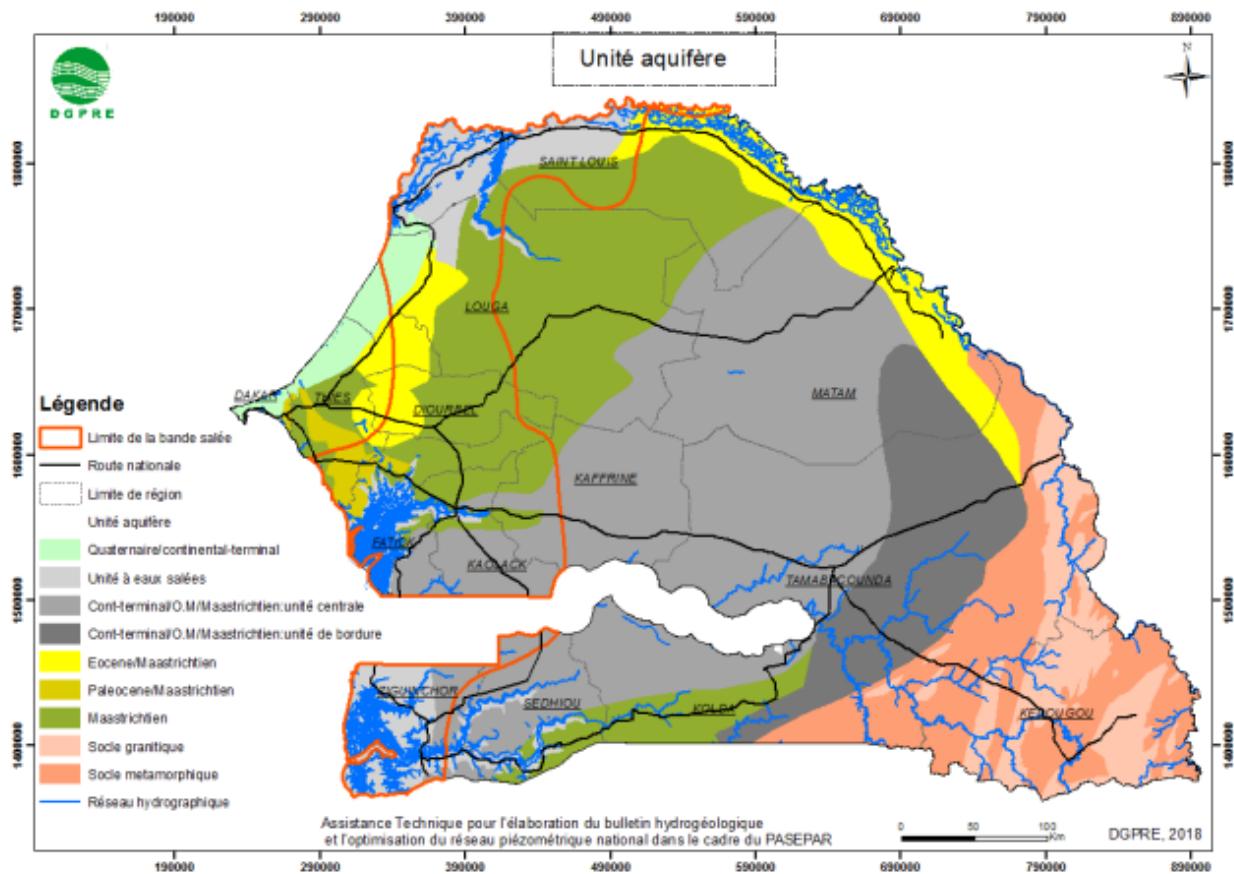


FIGURE 1.17 – Délimitation de la bande saline (DGPRE, 2018c)

Chapitre 2

Description de la base de données généralisée créée

Plusieurs études et campagnes d'échantillonnage se penchent sur le Bassin Arachidier mais elles n'ont jamais été regroupées dans une seule et même base de données. Ainsi, en collaboration avec l'entreprise belge SHER, une base de données généralisée a été créée. Cette dernière, ainsi que les étapes clés de sa création, sont présentées dans ce chapitre.

La base de données créée est statique et fournit, pour chaque ouvrage, sa version la plus récente. Ainsi, au final, ce sont 1 793 ouvrages qui sont représentés par une désignation, des caractéristiques physiques (niveau statique, profondeur, débit exploité, ...) et chimiques (concentrations, résidus secs, pH, ...) propres. Ces données datent de 1949 à 2021 et sont relativement bien réparties sur la zone d'étude. Les plus anciennes seront considérées comme étant moins fiables.

Cependant, les différents objectifs des campagnes d'échantillonnage effectués étant inconnus, il sera parfois délicat d'analyser les résultats. En effet, il est possible qu'une étude ait pour objectif de préciser la contamination d'une certaine zone. Les résultats qu'elle présente ne seraient donc pas représentatifs de l'aquifère mais plutôt témoins d'une éventuelle contamination (naturelle ou anthropique) locale.

Une autre conséquence de la base de données statique¹ est qu'elle ne permet pas une véritable analyse temporelle. Pour ce faire, c'est la base de données *Réseau* qui sera utilisée car elle considère l'évolution des paramètres d'un même ouvrage en fonction du temps.

In fine, l'objectif sera de créer une base de données dynamique permettant la mise à jour automatique de l'Atlas cartographique. Cet objectif n'est pas encore atteint à ce jour et ne fait pas partie de ce travail.

1. « Statique », c'est-à-dire qu'elle a été créée en ne considérant que la version la plus récente de chaque ouvrage. A l'avenir, un des projets de la DGPRE est de la rendre dynamique en l'actualisant au fil des campagnes d'échantillonnage.

2.1 Description des données connues

Plusieurs études et campagnes d'échantillonnage se penchent sur le Bassin Arachidier mais elles n'ont jamais été regroupées dans une seule et même base de données. La Table 2.1 présente les différentes sources d'information mises à disposition. Il est important de noter que la campagne d'échantillonnage *Réseau*, menée par la DGPRE, est la seule à permettre une analyse temporelle des différents ouvrages car elle renseigne pour un même point des informations hydrauliques et/ou chimiques à différents moments.

Source de la base de données	Nombre de données
Ouvrage (PROGRES)	6225
Maastrichtien (PROGRES)	244
Faye (suivi DGPRE)	554
Faye Continental Terminal (Paree 2 2017)	76
Faye Sine Gambie (2016)	53
Faye Pelt (2008)	6
Faye Éocène	37
Faye Paléocène	90
Faye Maastrichtien (Horst)	20
Faye Maastrichtien (Littoral Nord)	51
Faye Maastrichtien (Pelt)	2
Faye Quaternaire Kaba (2008)	24
Faye Maastrichtien (Pagire BA)	54
Réseau	16 635
TOTAL	24 071

TABLE 2.1 – Synthèse de l'ensemble des données disponibles

Dans le but de présenter des cartes de qualité les plus complètes possibles du Bassin Arachidier et de calculer des statistiques fiables, le document Excel « ALL_BDD » (Annexe section A) reprenant l'ensemble des études a été créé. Chaque ligne y représente un ouvrage spécifié par un nom, des coordonnées (X;Y) et, parfois, un code IRH permettant de faire le lien avec la base de données *Réseau* de la DGPRE.

De 1949 à 2020, des données physiques (altitude, profondeur, type et usage de l'ouvrage), hydrauliques (niveau statique, débit, rabattement, transmitivité, ...) et chimiques (température, pH, conductivité, résidu sec, concentrations) sont alors renseignées par aquifère.

Avant de ne conserver que les données utiles et chimiquement interprétables, un tri a dû être effectué. En effet, la nouvelle base de données provenant de plusieurs sources différentes, il est nécessaire de vérifier que :

1. la nomenclature est partout identique (décimales représentées par un point, même format des colonnes, coordonnées données en UTM, même écriture pour les noms d'aquifère, ...)
2. les balances ioniques sont acceptables
3. un même ouvrage n'est pas considéré plus d'une fois
4. les données les plus récentes sont représentées en priorité

Les sections suivantes expliquent les différentes étapes de cette sélection.

Dans un premier temps, seuls les ouvrages issus des campagnes d'échantillonnage *Progres* et des différents travaux du Pr S.Faye² ont été retenus.

2. Directeur du département Hydrogéologie chez Genhy Conseils

Ils seront, dans un second temps, mis en lien avec la base de données *Réseau* de la DGPRE. La section 2.7 reprendra sous forme de Tableau le nombre d'ouvrages validés pour chacune des étapes.

2.2 Uniformisation de la base de données

Dans un premier temps, il est important d'uniformiser le format des analyses chimiques.

Comme observé sur la Figure 2.1, certaines sources de données représentent les concentrations non-mesurées par un zéro alors qu'une case vide aurait été préférée. En effet, donner la valeur nulle à une information influence à la fois les calculs de statistiques mais également les cartes de qualité de l'eau du Bassin. Ces colonnes de zéro ont donc dû être remplacées par des cellules vides.

Ensuite, de manière générale, une valeur négative est donnée si la concentration d'une entité chimique se révèle être inférieure à sa limite de détection. L'usage veut alors que cette valeur négative soit remplacée par la moitié de la valeur absolue (Müller, 2006). Cette approche tire son origine d'une analyse statistique aléatoire non conditionnelle. En effet, les concentrations éventuelles sous la limite de détection sont aléatoires et équiprobables. Ainsi, il vient à ce que la concentration moyenne mesurée sous l'intervalle est égale à la moitié de celui-ci.

TDS	Chlore	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	NO ₃	Fluor	P2O5	Ca	Mg	Na
0	34	33.6	408.8	0	3	1.4	0	88.8	38.8	15.4
362	46.1	8.6	280.7	0	5	1.5	0	65.6	24.3	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
530	35.5	40.8	457.7	0	3	0.8	0	121.4	29.9	16.8
374	47.5	8.2	292.9	0	6	0.6	0	68.9	25.5	20
354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
336	32	3.8	165	0	5	0	0	101.6	6.3	19
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
804	187.9	11.5	472.9	0	4	1.2	0	109.8	46.1	93
500	38.3	-0.5	283.7	0	-2	2.4	0	43.5	32.5	19.2
444	30.5	1	353.9	0	-2	5	0	49.9	41.2	23.2
564	82.3	26.9	357	0	-2	7	0	25.7	54.5	74.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURE 2.1 – Exemple de format de donnée non uniformisée : « Faye suivi DGPRE »

La Table 2.2 reprend l'ensemble des valeurs mesurées sous différents seuils de détection. Étant donné que la base de données provient de sources d'information et de campagnes d'échantillonnage différentes, il est normal que les limites de quantification diffèrent en fonction de la précision du matériel utilisé. Ainsi, il apparaît que le groupement NH₄⁺ est celui qui est le plus souvent mesuré sous la limite de détection suivie de NO₃⁻ et du fer.

Remarque : à noter qu'en l'absence de détails quant au degré d'ionisation du fer (F^{3+} , F^{2+} ou fer total), il a été considéré que les données étaient exprimées sous la forme hydrique majeure *i.e* le F^{2+} (Danel, 2017). Cependant, en raison des conditions sur terrain, il est également possible que ce soit le fer total qui ait été mesuré.

	-5	-2	-1	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.15	-0.1	-0.02	-0.01	% < LQ
SO_4^{2-}	2				13								0.56
CO_3^{2-}		1											0.13
NO_3^-	2	784					24		4	32			30.83
F^-			2				1	1		394			14.81
Na^+				4						3			0.24
K^+						1				6			0.24
NH_4^+					1					1122			88.77
Fe^{2+}	1	1	1	36			1	11	2	422		31	24.17

TABLE 2.2 – Limites de détection des éléments (LQ = limite de quantification)

2.3 Validation des balances ioniques

De nombreuses données ne donnent pas d'information quant à la chimie des eaux souterraines. Elles ne sont donc exploitables que pour des analyses physiques (hauteurs piézométriques, rabattements, quantification des débits exploitables et interprétations d'écoulement d'eau). Dans le cadre de ce travail, qui a pour but de dresser un portrait de la qualité des eaux souterraines du Bassin Arachidier, seulement les données chimiques seront utilisées. La base de données comprend alors 2 712 ouvrages parmi les 7 436 initiaux (36 %) où les concentrations en éléments majeurs et mineurs sont données en mg/L (Table 2.3).

	Éléments majeurs	Éléments mineurs
Cation	$Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Fe^{2+}$	NH_4^+
Anion	$Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, NO_3^-, PO_4^{3-}$	F^-

TABLE 2.3 – Éléments chimiques majeurs et mineurs

Remarque : vu que les ions NH_4^+ et F^- sont souvent détectés sous la limite de quantification (Table 2.2) et qu'ils ne pèsent que très peu dans la balance ionique (Table 2.4), il a été préférable de ne pas les prendre en compte dans le calcul de la balance ionique. Ils sont donc considérés comme éléments mineurs. En effet, le groupement NH_4^+ est de loin le cation le plus souvent sous la limite de détection. Ainsi, pour contrebalancer, un anion a également été considéré comme élément mineur. C'est alors le fluor qui répondait le mieux aux critères de décision.

	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	NO_3^-	F^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	PO_4^{2-}	Fe^{2+}
Nb	2694	2343	2553	117	2421	2248	2621	2549	2608	2525	1247	81	1667
Moy	9.27	1.22	4.40	0.05	0.18	0.05	2.84	1.97	10.20	0.58	0.003	0.0005	0.01

TABLE 2.4 – Moyennes des concentrations en meq (Nb = le nombre de concentrations différentes de 0 ; Moy = la moyenne des concentrations en meq/L)

Dans le but d'assurer la robustesse des données, la balance ionique est calculée pour chaque ouvrage. Pour ce faire, il est nécessaire que les ions majeurs soient exprimés en meq/L tel que

$$[meq/l] = \frac{[mg/l] * charge}{Masse_Molaire}$$

La balance ionique s'exprime en [%] et est calculée de la manière suivante

$$BI = \frac{\sum Cations - \sum Anions}{\sum Cations + \sum Anions} * 100$$

Cette dernière permet de vérifier la neutralité ionique des échantillonnages. En effet, dans des conditions parfaites, la balance ionique est égale à 0 car les charges positives et négatives se compensent (Ollagnier et al., 2017). Cependant, les conditions du laboratoire ainsi que celles du terrain ne permettent pas toujours d'obtenir les résultats attendus. De manière générale, la balance ionique est considérée comme étant admissible si elle est comprise entre -10 et 10 % (Müller, 2006). Hors de cet intervalle, elle indiquerait un défaut dans l'analyse chimique de l'échantillon comme une absence de mesure d'un élément majeur et/ou mineur non négligeable. Il est en effet possible qu'un élément majeur comme le HCO_3^- n'ait pas été pris en compte. Dans ce cas, il est tout de même possible de lier la concentration manquante à l'alcalinité (TA) ainsi qu'à l'alcalinité totale (TAC)

$$[HCO_3^-] = (TAC - TA) * 12.2$$

Cela n'a cependant pas été possible car le jeu de données ne présente pas les mesures du taux d'alcalinité.

Toutefois, en absence à la fois d'une mesure de HCO_3^- et des taux d'alcalinité, il est également envisageable de poser que la balance ionique vaut 0 pour finalement déterminer la concentration idéale de l'ion en question exprimée en meq/L

$$HCO_3^- = \sum Cations - \sum Anions$$

Cependant, vu le peu d'information concernant tant la campagne d'échantillonnage que les conditions de laboratoire, cette méthode n'a pas été utilisée.

Dans le cadre de ce travail, l'intervalle de validité des balances ioniques a été défini en fonction de la Figure 2.2. En effet, celle-ci représente l'évolution du nombre d'analyses chimiquement valides en fonction de l'intervalle de tolérance. Il est observé que l'évolution est rapide jusqu'au seuil de 8 % tandis qu'elle est plus lente pour des valeurs supérieures à ce seuil. Cet intervalle correspond donc à l'intersection des tangentes à cette courbe d'évolution. Parmi les 2 712 ouvrages présentant des analyses chimiques, 2 340 sont conservées (soit 86 %). Les autres seront écartées pour le reste de ce travail mais pourraient éventuellement être valorisées dans le cas d'une étude plus spécifique comme celle des nitrates dans la zone des Niayes par exemple.

Finalement, le taux relativement élevé des balances ioniques dites « validées » permet de qualifier la base de données comme étant fiable.

2.4 Suppression des doublons

Étant donné que les données sont issues de projets différents, il est nécessaire de supprimer les doublons. En effet, conserver deux copies identiques d'un même ouvrage aurait un impact sur les statistiques et surchargerait les cartes et différents diagrammes. Une solution pour écarter les doublons serait de simplement les trier par nom et de conserver la version soit la plus complète³, soit la plus récente.

3. En effet, certains projets du Pr. Faye ne comportent pas les données de concentration du fer par exemple

Cependant, pour les mêmes coordonnées X, Y, la même date, le même aquifère et la même profondeur, il arrive que deux ouvrages de désignations différentes renseignent exactement la même information chimique. Cela est dû tant à des erreurs d'orthographe liées à l'encodage qu'à des désaccords concernant les désignations des ouvrages.

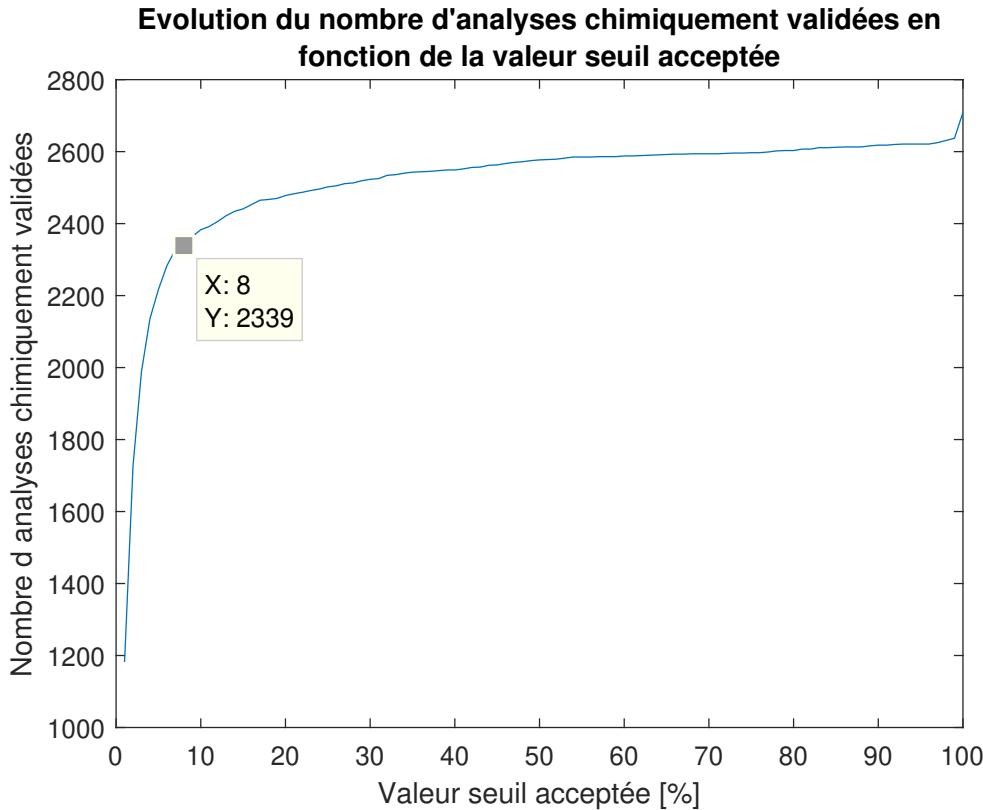


FIGURE 2.2 – Détermination du choix des balances ioniques

Le code MATLAB suivant a donc été mis en place pour contourner ce problème. Les ouvrages de même balance ionique⁴ situés dans un rayon de 100 m l'un par rapport à l'autre sont alors identifiés. La condition pour être considéré comme doublon est donc de se situer à moins de 100 m d'un ouvrage présentant une balance ionique presque identique.

```

1 Tri=Atrier; % Atrier = la table de 2 712 ouvrages BI valides
2 N=max( size(Atrier)); % Tri = la version sans doublon
3
4 i=1;
5 j=1;
6 for i=1:N
7 for j=1:N
8 if Tri.Numrounique(i)^=0 && i^=j
9     if sqrt(((Tri.XUTM(i)-Tri.XUTM(j))^2)+((Tri.YUTM(i)-Tri.YUTM(j))^2))<100 && Tri.BI(i)-Tri.BI(j)<0.05 % Condition SPATIALE + BI
10        Tri.Numrounique(j)=0;
11    end
12 end
13 end
14

```

4. à 0.05 % près

Comme présenté à la Table 2.5, le code a permis de détecter 925 doublons dont la plupart proviennent des projets du Pr. Faye. Après leur suppression, il reste 1 787 ouvrages dont 1 438 sont dotés d'un code IRH spécifique aux bases de données *Progres* et *Réseau*. Ces codes sont importants pour faire le lien entre les deux projets précédemment cités. Dès lors, les ouvrages présentant des codes IRH doivent être conservés en priorité.

	Avec doublons	Sans doublons	Nombre de doublons
Faye Continental Terminal (Paree 2 2017)	73	15	58
Faye Éocène	30	30	0
Faye Maastrichtien (Horst)	20	10	10
Faye Maastrichtien (Littoral Nord)	51	11	40
Faye Maastrichtien (Pagire BA)	35	31	4
Faye Maastrichtien (Pelt)	1	1	0
Faye Paléocène	80	31	49
Faye Pelt (2008)	4	4	0
Faye Quaternaire Kaba (2008)	11	6	5
Faye Sine Gambie (2016)	52	48	4
Faye (suivi DGPRE)	237	82	155
Maastrichtien (PROGRES)	240	119	121
Ouvrage (PROGRES)	1487	1372	115
TOTAL	2340	1787	925

TABLE 2.5 – Mise en évidence des doublons présents dans la base de données

Cette étape a permis de mettre en lumière l'importance de la création de la base de données générale reprenant ces 13 projets. En effet, il est observé que chacun d'entre eux a permis de collecter de nouvelles informations chimiques admissibles. À noter tout de même que c'est la base de données *Progres* qui reste la plus importante.

2.5 Ajout de la base de données *Réseau*

La source *Réseau* peut désormais être facilement ajoutée à la base de données créée. Cette source est, pour rappel, un suivi temporel. Elle a été ajoutée en dernier car il existe plusieurs façons de la considérer : la première considère les moyennes des concentrations sur les 5 dernières années ; la deuxième seulement les données les plus récentes pour chaque ouvrage. C'est la deuxième option qui a finalement été utilisée.

Sachant que *Réseau* renseigne des codes IRH, elle a été utilisée dans le but d'associer ces codes aux ouvrages de la base de données générale qui en étaient dépourvus. Le code MATLAB présenté en Annexe (section B) automatise ce processus. Ainsi, il permet d'associer le code IRH d'un point d'échantillonnage à tout ouvrage situé à moins de 25 m.

Réseau dans son entièreté renseigne 16 636 échantillonnages répartis sur 583 ouvrages. Cette base de données est donc particulièrement intéressante pour analyser l'évolution temporelle des concentrations. Cependant seules les données chimiques admissibles ($BI < |8\%|$) les plus récentes de chaque ouvrage ont été prises en compte dans la base de données générale. Ainsi, 410 sur les 513 possibles ont été ajoutées (soit 79 %).

2.6 Choix des données les plus récentes

Pour rappel, le code MATLAB illustré à la section 2.4 a permis d'éliminer les doublons en fonction d'un critère spatial combiné à la valeur des balances ioniques. Cependant, certaines bases de données ne renseignaient pas la concentration du fer bien que respectant le critère de balance ionique imposé par le code. Dès lors, ces ouvrages ont été supprimés au profit d'analyses plus complètes et récentes issues de la base de données *Progres*.

Ensuite, les analyses provenant de *Réseau* n'ont été conservées que si elles étaient les plus récentes de toutes.

Ainsi, après ces étapes, la base de données généralisée comprend au total 1 922 ouvrages uniques les plus complets et récents possibles. Il reste alors à filtrer ces données sur la zone d'intérêt à l'aide du logiciel QGIS. Au total, 77 points ont été supprimés, la plupart provenant des projets du Pr. Faye. Il faut noter que les 53 ouvrages pour lesquels aucun aquifère n'était référencé ont tout simplement été supprimés. La plupart de ces points provenaient de *Progres*.

2.7 Synthèse

Au final, la base de données reprenant seulement les ouvrages situés dans la zone d'étude en compte 1 793 répartis dans les aquifères comme présenté dans la Table 2.6. Il est observé que 33 % des points d'échantillonnage concernent le Maastrichtien tandis que seulement 2 % sont propres à l'Oligo-Miocène.

Aquifère	Nombre de données
Continental-Terminal	246
Eocène	466
Maastrichtien	627
Oligo-Miocène	55
Paléocène	266
Quaternaire	133
TOTAL	1793

TABLE 2.6 – Répartition des ouvrages par aquifère

Comme présenté sur la Figure 2.3, les ouvrages sont globalement bien répartis dans l'ensemble du Bassin Arachidier. Il est malgré tout observé que les points sont plus fortement concentrés au niveau de la couche hydrogéologique de l'Éocène-Maastrichtien et plus épars au sud-est de la zone d'étude.

Dans le cadre de ce travail, l'ensemble des données sera utilisé et ce peu importe la date des valeurs chimiques. En effet, au vu de la superficie du Bassin Arachidier, il est important de disposer d'un nombre conséquent d'informations dans le but de refléter l'ensemble des conditions géochimiques et hydrochimiques.

Ainsi, comme le montre la Figure 2.4, ne pas prendre en considération les ouvrages dont les analyses chimiques sont antérieures à 2010 aura une influence sur le développement des analyses spatiales. En effet, il est observé que ces données couvrent la zone de manière beaucoup moins homogène.

Une étude temporelle sera menée dans le cadre du chapitre concernant les analyses statistiques. Il faut noter tout de même que les données les plus anciennes seront considérées comme moins fiables.

Finalement, la Table 2.7 reprend l'évolution du nombre d'ouvrages retenus au fur et à mesure des étapes de traitement de la base de données généralisée.

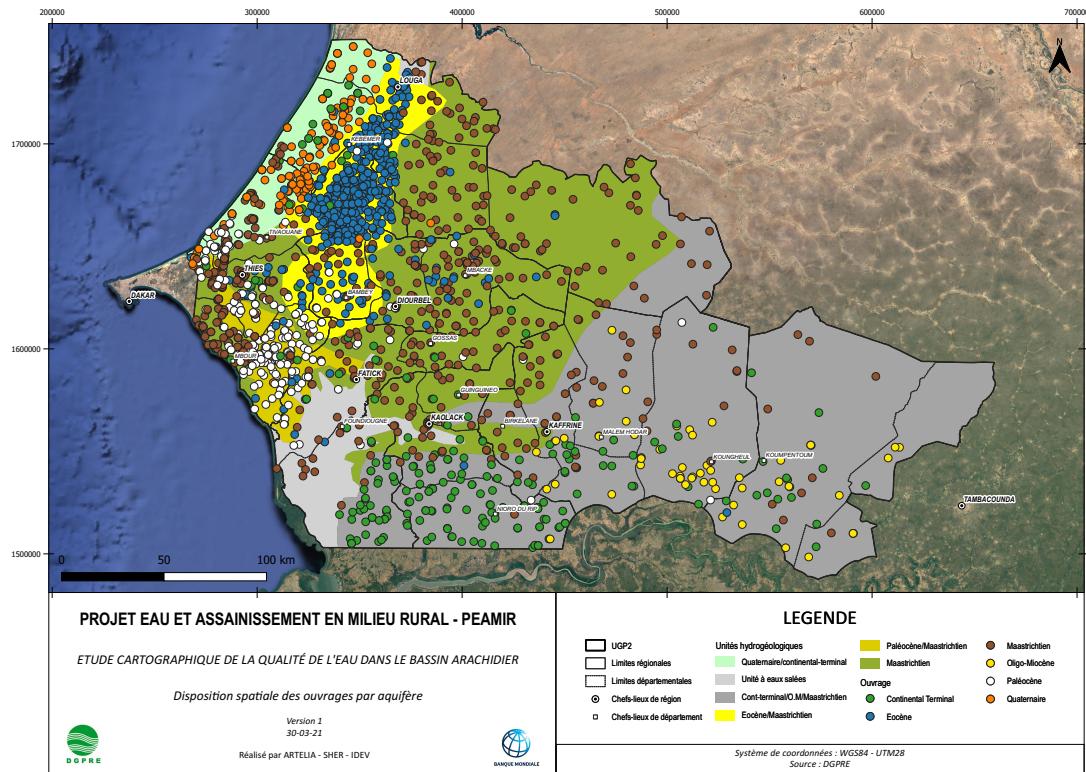


FIGURE 2.3 – Répartition de l'ensemble des données par aquifère

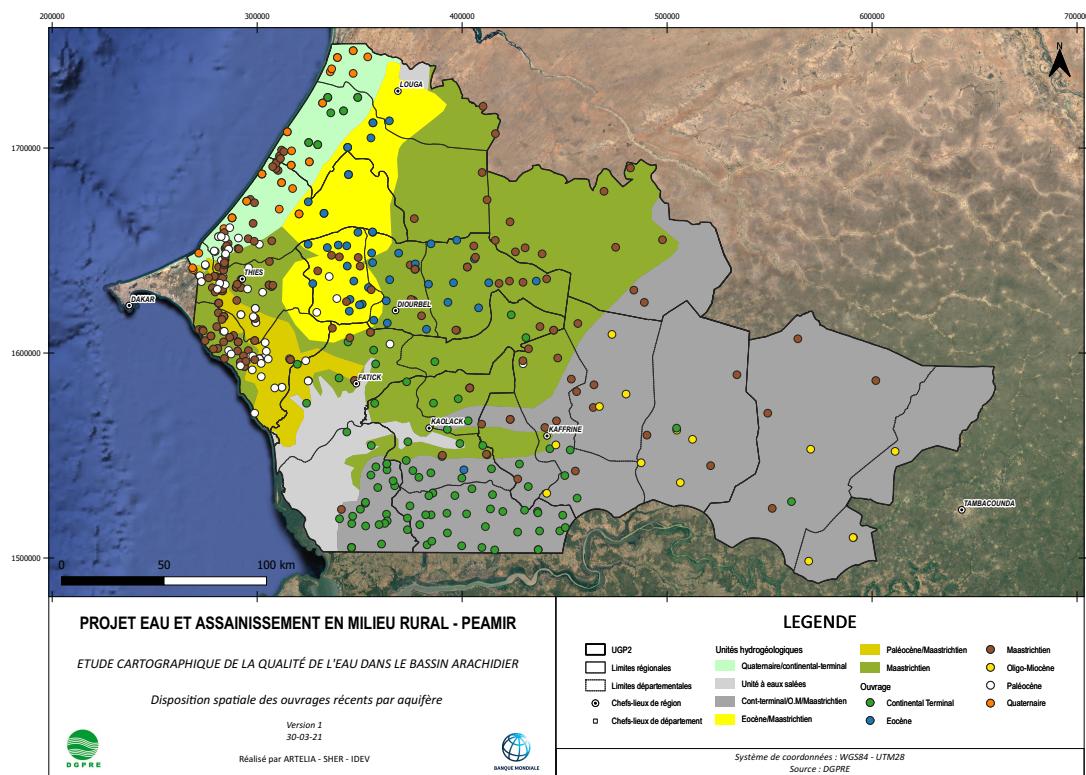


FIGURE 2.4 – Disposition spatiale de l'ensemble des données récentes, après 2010

Source de la base de donnée	Tout	Chimie	BI < 8%	Sans doublon	Ajout de Réseau	Récent	UGP2	Aquifère
PROGRES	6225	1778	1487	1372	1372	1309	1290	1238
Maastrichtien (Progres)	244	244	240	119	119	115	114	114
Faye (DGPRE)	554	277	237	82	82	20	20	20
Faye CT (Paree 2, 2017)	76	76	73	15	15	15	15	15
Faye Sine Gambie (2016)	53	53	52	48	48	48	48	48
Faye Pelt (2008)	6	6	4	4	4	0	0	0
Faye EO	37	37	30	30	30	30	30	30
Faye PAL	90	90	80	57	57	55	55	55
Faye MAAs (Horst)	20	20	20	10	10	10	10	10
Faye MAAs (Lit. Nord)	51	51	51	11	11	11	11	11
Faye Maas (Pelt)	2	2	1	1	1	0	0	0
Faye QUAT (Kaba, 2008)	24	24	11	6	6	4	4	4
Faye MAAS (Pagire BA)	54	54	53	31	31	6	6	6
Réseau (donnée la plus récente)	-	-	-	-	410	266	242	242
TOTAL	7436	2712	2339	1786		2196	1922	1845
								1793

TABLE 2.7 – Tableau synthétique de la base de donnée généralisée

Chapitre 3

Étude statistique des eaux souterraines du Bassin Arachidier

La base de données finalisée, il est désormais possible d'établir les statistiques sur les paramètres physico-chimiques mesurés pour les ouvrages disponibles afin de mettre en évidence les éventuelles tendances majeures et/ou *outliers*. Il est intéressant de présenter ces statistiques de différentes façons : de manière globale par aquifère ; selon des critères temporels et selon le type de l'ouvrage. En fin de section, une comparaison avec les normes de potabilité de l'**Organisation Mondiale de la Santé** (OMS), de l'**Union Européenne** (UE) et du Sénégal sera menée.

Dans le cadre des interprétations statistiques les paramètres tels que les médianes, moyennes, minima et maxima seront considérés. L'analyse des écarts entre les deux premiers permettra de mettre en évidence les paramètres présentant les valeurs les plus extrêmes.

Au vu du contexte géologique et hydrogéologique décrit dans le chapitre 1, il est attendu d'observer d'éventuels *outliers* c'est-à-dire des mesures de concentrations contrastant avec celles normalement observées dans la zone d'étude (Grubbs, 1969 ; Maddala, 1992). Ces valeurs, considérées comme statistiquement aberrantes, reflètent soit une erreur du laboratoire, soit une contamination naturelle ou anthropique. Un des enjeux de ce chapitre est donc de faire correctement la distinction entre ces deux cas de figure afin d'écartier ou de conserver les ouvrages concernés. Pour ce faire, l'approche statistique sera combinée à une analyse spatiale.

Les interprétations de l'influence du temps et du type d'ouvrage seront établies sur base de l'observation de nuages de points et de tableaux statistiques présentés en Annexe. Cependant, la base de données, telle qu'elle a été créée, est statique. Elle ne permet donc pas la mise en place du suivi temporel d'un même ouvrage. Ainsi, la base de données généralisée aura pour but de mettre en lumière l'évolution des concentrations à l'échelle régionale tandis que la base de données *Réseau* sera utilisée dans le but de préciser les suivis temporels de certains ouvrages.

Concernant l'influence du type d'ouvrage, elle sera complétée par une analyse des concentrations en fonction du niveau statique et de la profondeur de l'ouvrage.

Finalement, la comparaison avec les normes de l'OMS, de l'UE et du Sénégal aura pour but de mettre en évidence à quel point les enjeux de la qualité de l'eau souterraine sont importants dans le Bassin.

La base de données créée étant issue de plusieurs sources différentes, l'analyse des statistiques peut être biaisée. En effet, il est possible que certaines campagnes d'échantillonnage n'aient pas eu pour but de caractériser la qualité de l'eau souterraine de manière représentative du Bassin. Par exemple, la stratégie de campagne d'échantillonnage mai-juin 2021, qui sera décrite au Chapitre 5 section 4.4, a pour but de déterminer l'état de contamination d'un panel d'ouvrages potentiellement vulnérables. Les résultats de cette campagne ne seront alors pas représentatifs de la qualité de l'eau souterraine à l'échelle globale. L'interprétation des analyses statistiques est donc délicate et plutôt descriptive.

3.1 Statistiques générales

La Table 3.1, présente par aquifère les minima (*Min*), maxima (*Max*), moyennes (*Moy*) et médianes (*Méd*) des différents paramètres chimiques. Les lignes dénommées *Nb* renvoient au nombre d'ouvrages présentant une donnée réelle pour le paramètre concerné. Il est important de préciser cette valeur car elle permet de définir un degré de fiabilité pour les statistiques. En effet, plus *Nb* est grand, plus les statistiques sont représentatives de l'aquifère étudié. Au contraire, plus *Nb* est petit, plus l'interprétation des chiffres est délicate en raison du faible effectif de la classe.

Les ions et groupements chimiques choisis sont ceux présentant des normes de potabilité.

	RS	TDS	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Fe ²⁺
Unités	[mg/L]	[ppm]	[mg/L]							
CT										
Nb	196	32	246	218	241	196	246	234	246	213
Min	20	37	1.4	0	0	0	2.16	0.1	0.7	0
Méd	192	177	22.285	2.9	1.51	0.155	20	4.52	18.95	0.2
Moy	366.94	385.31	107.54	18.67	13.80	0.29	40.52	10.51	55.69	0.37
Max	4279	4860	1924.1	390.8	320	8	487.4	119	1042	7.1
EO										
Nb	464	13	466	361	463	421	466	465	466	408
Min	62	338	8.9	0.06	0.3	0.01	3.2	1	3.9	0
Méd	469	707	70.9	14.4	15	0.1	87.4	11.66	44.7	0.1
Moy	697.84	833	169.68	49.41	21.72	0.29	97.13	22.33	88.91	0.39
Max	26124	1742	12836	730	344.3	6.5	1218.8	758.8	5783.6	18
MAAS										
Nb	481	61	627	602	578	582	627	603	627	378
Min	51	172	1	0.08	0	0.02	3.98	0.4	2.92	0
Méd	1124	1056	274.3	52.8	1	1.42	15.6	8.4	315.8	0.2
Moy	1266.13	1402.96	406.25	62.60	5.69	1.81	31.96	12.80	363.22	0.37
Max	10112	4770	5248.1	656	354.21	7.5	426.9	294.8	2690	4.7
OM										
Nb	55	9	55	43	53	45	55	51	55	49
Min	24	44	2.6	0.5	0.05	0.01	3.4	0.5	1.4	0.04
Méd	98	285	7.8	5.3	1	0.19	14.8	4.1	18.4	0.3
Moy	172.87	422	25.89	16.39	5.40	1.55	24.14	7.90	26.16	0.81
Max	1234	1128	521.1	184.4	54.4	61	193.2	51.3	138.91	4.63
PAL										
Nb	224	39	266	258	246	232	266	265	266	107
Min	80	250	8.9	0.3	0	0.05	6.8	1.7	3.46	0
Méd	890	717	148.815	33.15	1.16	1.35	68.22	39.2	77.1	0.23
Moy	1328.30	853.56	404.95	104.46	7.52	2.02	86.74	48.67	244.36	0.54
Max	10144	2930	5673.6	730.1	184.1	12	732.7	228.6	3340.7	11.32
QUAT										
Nb	127	24	133	110	130	99	133	131	133	119
Min	68	117	7.01	0.04	0	0.01	1.54	0.2	3.2	0
Méd	199	388	53.2	17.1	1	0.1	20	5.17	33.6	0.49
Moy	274.16	636.33	71.47	38.84	19.98	0.14	30.10	8.63	42.98	2.06
Max	2621	2209	494.4	432.02	634.08	0.8	176.08	113.9	269.8	23.6

TABLE 3.1 – Statistiques des paramètres chimiques par aquifère

Il est intéressant de calculer à la fois la médiane et la moyenne pour chaque paramètre. En effet, la médiane est l'équivalent du P_{50} i.e la valeur centrale de chaque série où les valeurs observées ont été classées dans l'ordre croissant. Ainsi, la médiane permet de donner moins d'importance aux *outliers* car elle partage la série en deux sous-ensembles de même effectif. Un grand écart entre la moyenne et la médiane pourrait signifier la présence d'*outliers* pour les paramètres et l'aquifère concernés. Il apparaît dans la Table 3.1 que c'est souvent le cas notamment pour résidus secs (**RS**), chlorures, sulfates et nitrates.

Sur base des moyennes des résidus secs et TDS (Total Dissolved Solids), il apparaît que les eaux sont plus minéralisées dans le Maastrichtien et le Paléocène. En effet, les concentrations moyennes de chlorures et de sodium les plus élevées y sont observées même si la valeur la plus grande des chlorures se trouve dans l'Éocène. Concernant les sulfates, les concentrations moyennes les plus élevées sont mesurées dans le Paléocène ; celles des nitrates dans l'Éocène et le Quaternaire tandis qu'elles sont plutôt faibles partout ailleurs. Pour les fluorures, les valeurs élevées sont observées dans le Maastrichtien, l'Oligo-Miocène et le Paléocène. Finalement, les concentrations moyennes les plus élevées de fer sont dans le Quaternaire.

La Table 3.2 répertorie les ouvrages présentant les plus hauts taux de résidus secs, chlorures, calcium, magnésium et sodium dans le but de les comparer avec les caractéristiques de l'eau de mer au Sénégal exprimées en [mg/L] (Brouyère, 2019).

	Designation	Prof.	Résidu sec	Cl	Ca	Mg	Na
CT	KOUMBAL	73	2744	1517	487.4	77.8	303.6
EO	NDANGANE	56	13924	7333.1	484.2	426.1	3640
	SOROCOGNE	65	26124	12836	1218.8	758.8	5783.6
MAAS	GANDIGAL	184	10112	5248.1	426.9	294.8	2690
OM	-	-	-	-	-	-	-
EO	TAKHOUUM OUOLOF	26.82	4416	2191	596.4	69.1	726
	NDONDOL SESSENE	36.6	6214	3005	732.7	170.2	1120
	GAGNABOUGOU (SOUSSAN)	57	5130	2603	521	87.6	1078
	FALOKH SERERE	81.5	6840	3340.3	220.4	202.3	1795
	FAYIL	168.5	7272	3687.8	80.2	199.4	2320
	SAMBA DIA 2	175	10144	5673.6	176.3	228.6	3340.7
QUAT	-	-	-	-	-	-	-
-	Eau de mer au Sénégal	-	-	16140	416	1127	9505

TABLE 3.2 – Ouvrages présentant des concentrations extrêmes

Il est observé que « *Ndangane* » présente 45 % de la concentration classique en chlorure. Quant à l'ouvrage « *Sorocogne* », il présente presque trois fois les teneurs en calcium de l'eau de mer, 67 % des taux de magnésium ainsi que 60 % du sodium. De plus, à l'exception du calcium, les concentrations ainsi que les résidus secs augmentent avec la profondeur de l'ouvrage. Ainsi, il semblerait que les eaux soient plus minéralisées en profondeur.

Au premier abord, ces ouvrages pourraient être perçus comme étant soit des erreurs d'encodage dans la base de données, soit des erreurs de mesures au laboratoire (erreur d'unité par exemple). Or, vu les mesures élevées de résidus secs, il se pourrait simplement que ces ouvrages reflètent soit de la forte minéralisation des eaux souterraines soit de la présence d'intrusions d'eaux marines. La disposition spatiale des ouvrages spécifiques à la Table 3.2 est montrée en Annexe section C.

Ainsi, de telles données sont soit dues à la variabilité géologique du Bassin (source de contamination naturelle), soit à la présence de pressions en surface (contamination anthropique), soit à une erreur expérimentale (de laboratoire ou d'échantillonnage) et devraient alors dans ce cas être exclues de la base de données (Grubbs, 1969 ; Maddala, 1992).

Des analyses statistiques et spatiales pourraient permettre de mieux comprendre l'origine de telles concentrations : soit une erreur de laboratoire, soit une contamination.

3.1.1 Origine des *outliers* : point de vue statistique

La Figure 3.1 représente les « *boxplots* » des concentrations de ces entités chimiques pour chaque aquifère. Sur chaque boîte, la marque centrale indique la médiane tandis que les bords inférieurs et supérieurs indiquent respectivement les percentile P_{25} et P_{75} . Les moustaches s'étendent jusqu'aux points qui ne sont pas considérés comme des valeurs aberrantes. Passé les moustaches, les *outliers* sont représentés par des symboles « + » rouges (McGill et al., 1978).

Une concentration sera considérée comme *outlier* si elle n'est pas comprise dans l'intervalle suivant :

$$[P_{25} - 1.5 * (P_{75} - P_{25}); P_{75} + 1.5 * (P_{75} - P_{25})]$$

D'un point de vue des statistiques, il est observé que 551 ouvrages différents (30 % de la base de données)¹ sont considérés comme des *outliers* de chlorures, sulfates, nitrates, fluorures, sodium et de fer.

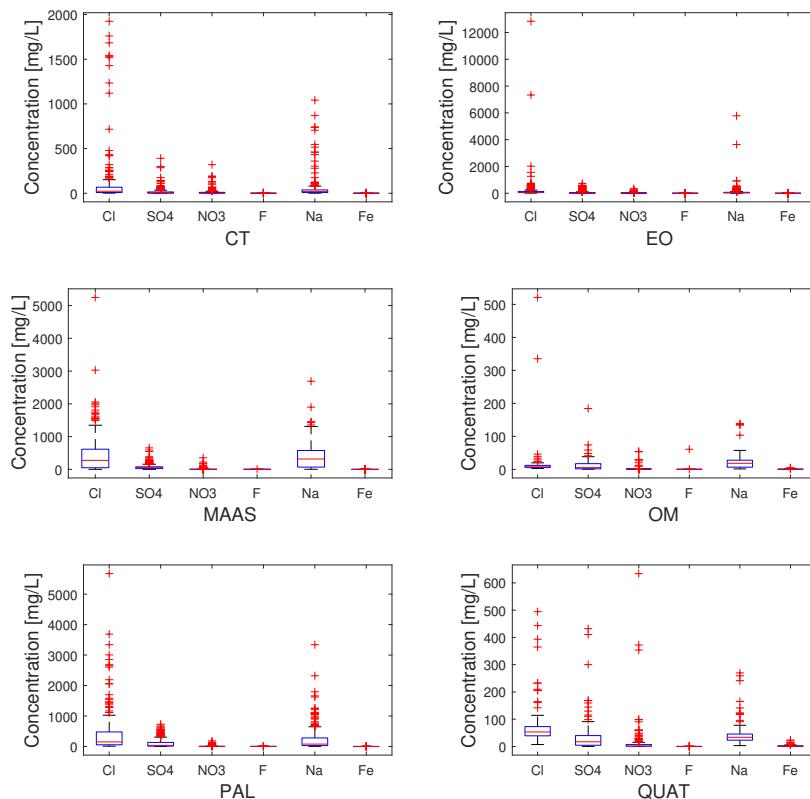


FIGURE 3.1 – Détection statistique des outliers par aquifère

1. Dont 89 sont dans le Continental Terminal, 140 dans l'Éocène, 134 dans le Maastrichtien, 22 dans l'Oligo-Miocène, 126 dans le Paléocène et 40 dans le Quaternaire.

En Annexe section D, la Table D.1 présente par aquifère le nombre d'ouvrages supérieurs à la limite statistique pour être considérés comme *outliers*. Il est observé que la majorité d'entre eux se situent dans l'Éocène, le Maastrichtien et le Paléocène.

Au total, sont considérées comme *outliers* 836 mesures dont 148 de chlorures, 138 de sulfates, 207 de nitrates, 84 de fluorures, 125 de sodium et 134 de fer. La plupart des *outliers* sont donc des concentrations de nitrates (25 %) tandis que 10 % des mesures sont des fluorures.

3.1.2 Origine des *outliers* : point de vue spatial

Il est intéressant de représenter une partie de ces *outliers* sur une carte afin de constater s'ils se regroupent spatialement par aquifère. Ils pourraient dans ce cas témoigner d'une contamination naturelle ou anthropique. Sinon, il est possible de conclure que ces points sont issus d'erreurs lors du processus en laboratoire.

Comme l'illustre la carte 3.2, les ouvrages du Continental Terminal présentant des concentrations élevées en nitrate sont proches l'un de l'autre au sud-ouest de la carte ainsi que dans les alentours de Nioro du Rip. Les concentrations élevées en chlorure et nitrate sont quant à elles observées près de Kaolack près du delta du fleuve Sine-Saloum. Concernant l'Éocène, des ouvrages présentent de grandes concentrations en nitrate et sulfate près de Louga ainsi que des *outliers* à l'est de Titouane. Des concentrations importantes en chlorure, fer et sodium sont détectées dans le Maastrichtien à Louga tandis que des sulfates sont repérés dans la zone de Mbacké. L'Oligo-Miocène présente en particulier des zones fortement concentrées en fer notamment près de Koungheul. Pour le Paléocène, des ouvrages riches en sodium, sulfate, fer et fluor sont regroupés entre Thiès et Fatick. Enfin, les points présentant les plus grandes concentrations en nitrate et en fer semblent s'aligner le long du Littoral pour le Quaternaire.

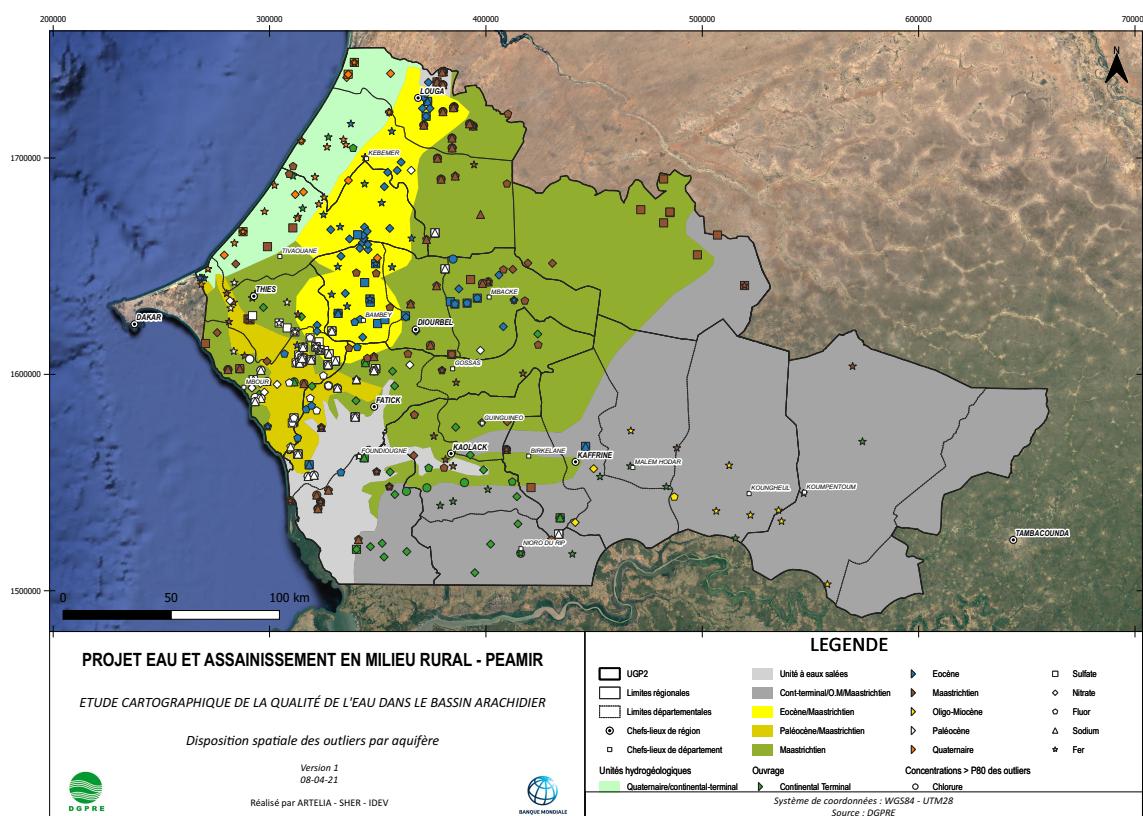


FIGURE 3.2 – Disposition spatiale des outliers

Les limites statistiques pour qu'un ouvrage soit considéré comme un *outlier* varient à la fois en fonction de l'aquifère et de l'entité chimique considérée. Ainsi, seuls les ouvrages présentant des concentrations supérieures au percentile P_{80} des 551 ouvrages considérés comme *outliers* seront représentés². Cela a pour but d'une part de comparer des concentrations de même ordre de grandeur et, d'autre part de refléter les contaminations à l'échelle du Bassin. La Table 3.3 représente les limites supérieures des différents P_{80} .

Chimie	Limite supérieure [mg/L]
Cl^-	975
SO_4^{2-}	201.7
NO_3^-	30
F^-	2.6
Na^+	684
Fe^{2+}	0.9

TABLE 3.3 – Percentile 80 des outliers

Il est donc important dans le cadre de ce travail de ne pas écarter des ouvrages qui, statistiquement, sont considérés comme des valeurs aberrantes mais qui, au sens géologique du terme, sont témoins d'une probable source de contamination naturelle (ex : une intrusion d'eau saline dans le cas des chlorures) ou anthropique (ex : concentrations élevées en nitrates/sulfates suite à l'agriculture intensive).

Le chapitre 4 mettra en évidence le lien entre la disposition spatiale des concentrations élevées avec la présence de pressions en surface ou les phénomènes, connus dans la littérature, d'intrusions salines. Quant au chapitre 5, il permettra de préciser la nature de ces contaminations à l'aide des interprétations des diagrammes de Piper, graphes binaires, ...

3.2 Évolution temporelle

L'ensemble des données étant comprises entre les années 1949 et 2020, il est intéressant d'analyser au fil du temps les statistiques principales dans le but de mettre en évidence d'éventuelles tendances. À noter que la qualité des statistiques dépend des effectifs de chacune des classes repris dans la Table E.2 (Annexe section E). En effet, les différentes classes ne sont pas forcément représentatives de la base de données. Il est dès lors parfois délicat de définir les tendances temporelles. Aussi, plus la donnée est ancienne et moins elle est considérée comme fiable.

Avec pour objectif de visualiser au mieux l'évolution récente des paramètres, les critères de choix pour la réalisation des classes temporelles sont les suivants :

- de larges classes pour les données les plus anciennes ; des classes plus étroites pour les plus récentes
- des effectifs relativement importants pour les classes récentes

En Annexe section E, les Tables E.3 et E.4 montrent que les écarts entre les moyennes et les médianes sont de manière générale importants, surtout pour le Paléocène. Cela témoigne la présence de valeurs extrêmes probablement liées à des contaminations.

La Figure 3.3 présente les évolutions temporelles des médianes et moyennes des concentrations chimiques. Comme attendu, il est observé que les courbes des médianes (en pointillé) sont presque toujours inférieures aux courbes des moyennes car ces dernières donnent plus d'importance aux valeurs extrêmes. Globalement, les courbes se suivent mais que plus l'écart vertical entre elles est grand, plus des ouvrages à forte concentration sont présents (ex : le sodium dans le Paléocène et le fer dans le Quaternaire).

2. Ainsi, les critères précisés à la Table 3.2 sont les limites supérieures, basées sur le percentile P_{80} de l'ensemble des outliers sans distinction par rapport à l'aquifère

Si les courbes présentent des pentes nulles, alors l'évolution de l'entité chimique est dite stable. Si des ruptures de pentes soudaines sont observées, l'évolution du paramètre sera dite instable. Dans le cas d'une pente constante, alors l'évolution sera dite graduelle (BRGM, 1998).

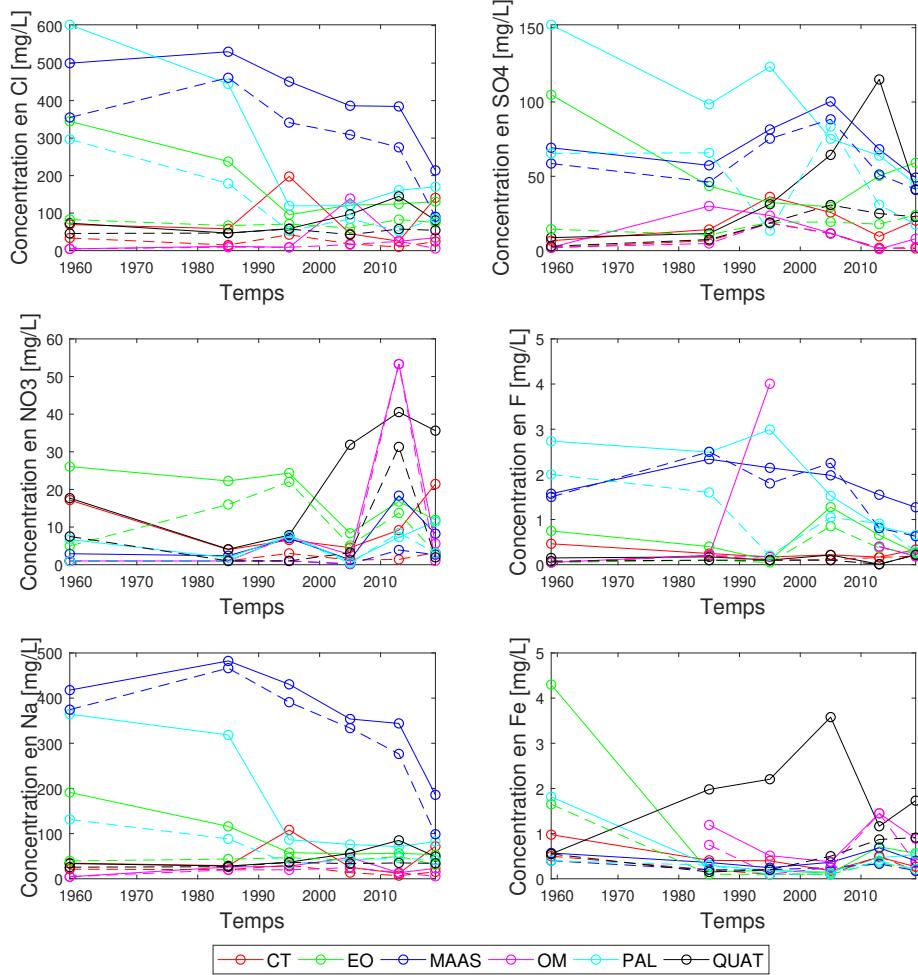


FIGURE 3.3 – Évolution temporelle des concentrations par aquifère des moyennes (traits pleins) et médianes (traits pointillés)

Les évolutions des chlorures et du sodium semblent être corrélées et sont probablement en lien avec l'état de salinité des eaux souterraines. De plus, le fait que les courbes d'évolution du sodium et des chlorures aient la même allure pourrait éventuellement refléter la dissolution de halite, NaCl, car le rapport, exprimé en [meq/L], entre ces ions est théoriquement égal à 1.

Pour certains paramètres tels que les nitrates, les chlorures et ions sodium, il est possible d'envisager une évolution temporelle positive (*i.e* augmentation des concentrations au fil du temps) suite d'une part au développement des cultures irriguées et, d'autre part, à l'aggravation des intrusions marines. Concernant le fluor, les concentrations semblent en baisse, éventuellement en raison d'un phénomène de dissolution ou de lessivage.

Quant aux évolutions des autres paramètres, elles sont délicates à analyser car la base de données n'est pas suffisamment robuste pour permettre de dégager leurs tendances.

À noter que, historiquement, ce sont les formations du Maastrichtien qui présentent les concentrations en chlorure, sodium, fluor et sulfate les plus élevées. De plus, pour le Maastrichtien spécifiquement, les courbes des moyennes et médianes se suivent. Cela pourrait signifier que les concentrations de fonds y sont particulièrement élevées même si elles semblent diminuer au fil du temps.

La Figure 3.4 présente les mêmes informations que la Figure précédente mais sous forme de « *nuages de points* ». Les mêmes conclusions peuvent globalement être tirées. Cependant, cette Figure permet de mettre en lumière le fait que concentrations élevées ont fréquemment été mesurées entre les années 1960-1990. Cela pourrait signifier plusieurs choses :

1. soit les eaux souterraines étaient, de manière générale, plus minéralisées
2. soit les campagnes d'échantillonnage spécifiques à cette période, 1960-1990, sont biaisées en raison
 - du fait qu'elles avaient pour but de peut-être caractériser l'extension d'une contamination spécifique
 - que les données et les mesures sont moins fiables

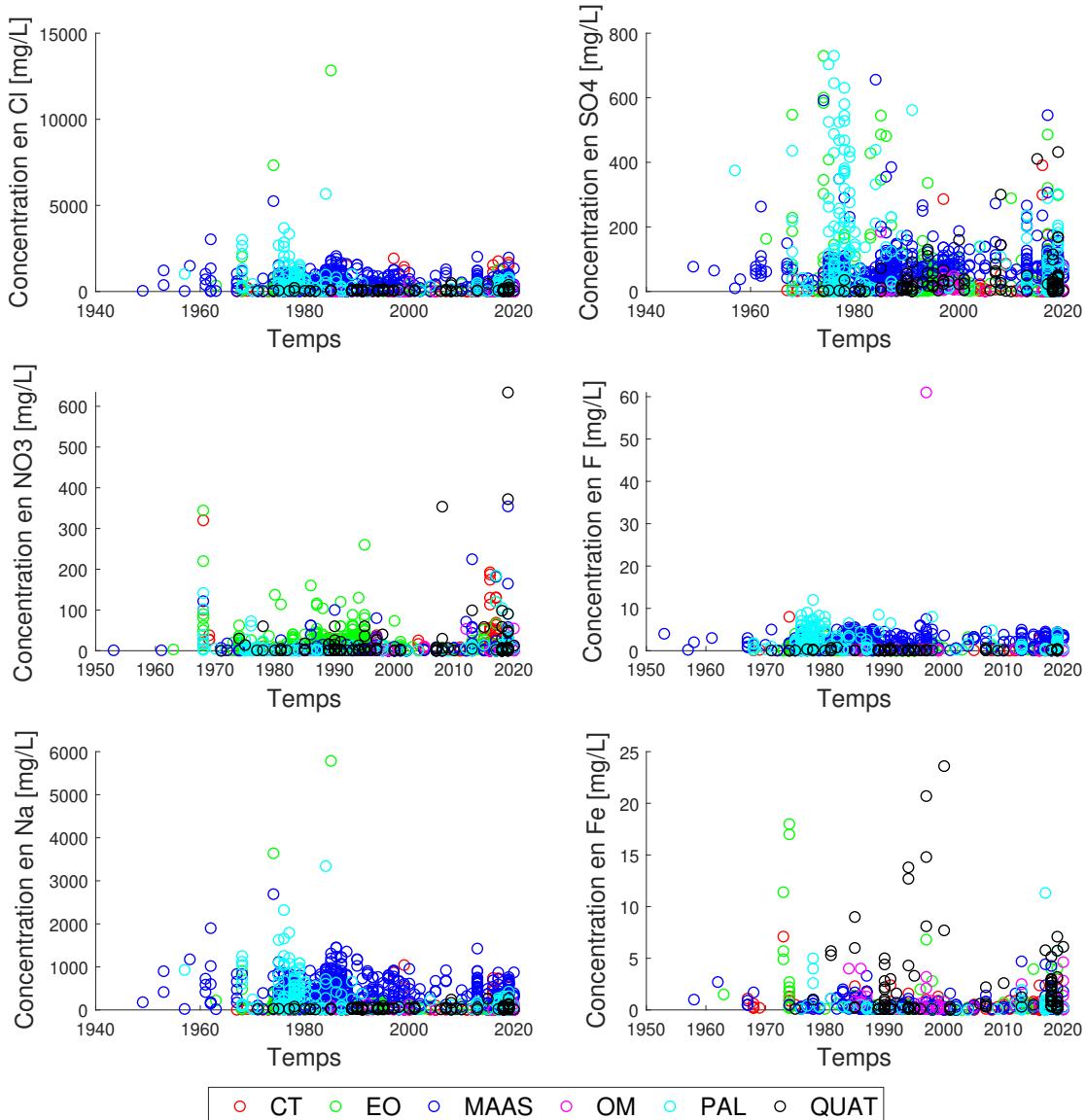


FIGURE 3.4 – Évolution temporelle des concentrations par aquifère : nuages de points

Puisque la base de données est statique, il est difficile d'interpréter les hausses et diminutions des concentrations au fil du temps. De plus, les objectifs des études et campagnes d'échantillonnage propres au Bassin Arachidier sont inconnus. Il se peut que certains se penchent sur la qualité du Bassin de manière représentative ou bien que d'autres soient focalisés sur certaines zones en particulier avec pour but de détecter des concentrations anormalement élevées. Cependant, diverses hypothèses concernant l'évolution des concentrations peuvent être mises en avant :

- Une tendance à la diminution par lessivage
- Une hausse des concentrations suites : à des intrusions marines causées par la surexploitation des aquifères ; à une sur-utilisation de pesticides, fertilisants et autres engrains

La sous-section suivante présente une proposition d'interprétation temporelle de la base de données *Réseau*.

3.2.1 Suivi temporel

Pour une analyse temporelle plus complète, la base de données *Réseau* est utilisée car elle permet de visualiser l'évolution des différents paramètres au fil du temps pour un même ouvrage.

Pour ce faire, un ouvrage par aquifère a été choisi selon les critères de sélection suivants :

- Faire l'objet d'un maximum de suivi.
- Être caractérisé par un résidu sec supérieur à 500 mg/L dans le but de refléter des taux de minéralisation élevés.

La Table 3.4 présente les ouvrages de la base de données *Réseau* sélectionnés pour l'analyse temporelle.

	Nombre de suivis	Le plus ancien	Le plus récent	Aquifère
PASSY	9	01-12-14	01-12-19	CT
GUEOUL ESCALE P56 Pz	14	01-12-13	12-12-19	EO
PATAR	10	01-04-86	03-12-19	MAAS
NGODIBA	9	01-10-85	07-01-20	OM
BANDIA PCP1	6	01-12-97	16-12-19	PAL
THIOUCOUGNE	15	01-06-12	13-12-19	QUAT

TABLE 3.4 – Ouvrages choisis parmi la base de données *Réseau* pour l'analyse du suivi temporel

Les ouvrages concernés font l'objet de minimum 6 suivis répartis entre 1986 et 2019 et sont présentés sur la Carte 3.5. Les ouvrages choisis sont donc ceux qui présentent une conductivité électrique élevée et donc ceux qui ont un intérêt pour l'analyse des évolutions de concentrations au fil du temps.

La Figure 3.6 montre les suivis temporels de ces ouvrages. D'années en années les concentrations sont en hausse avec toutefois des variations soudaines certainement liées au mois et donc potentiellement à la période humide ou sèche. À noter que les ouvrages concernés présentent tous des conductivités électriques élevées. Ils ne sont donc pas forcément représentatifs du Bassin Arachidier.

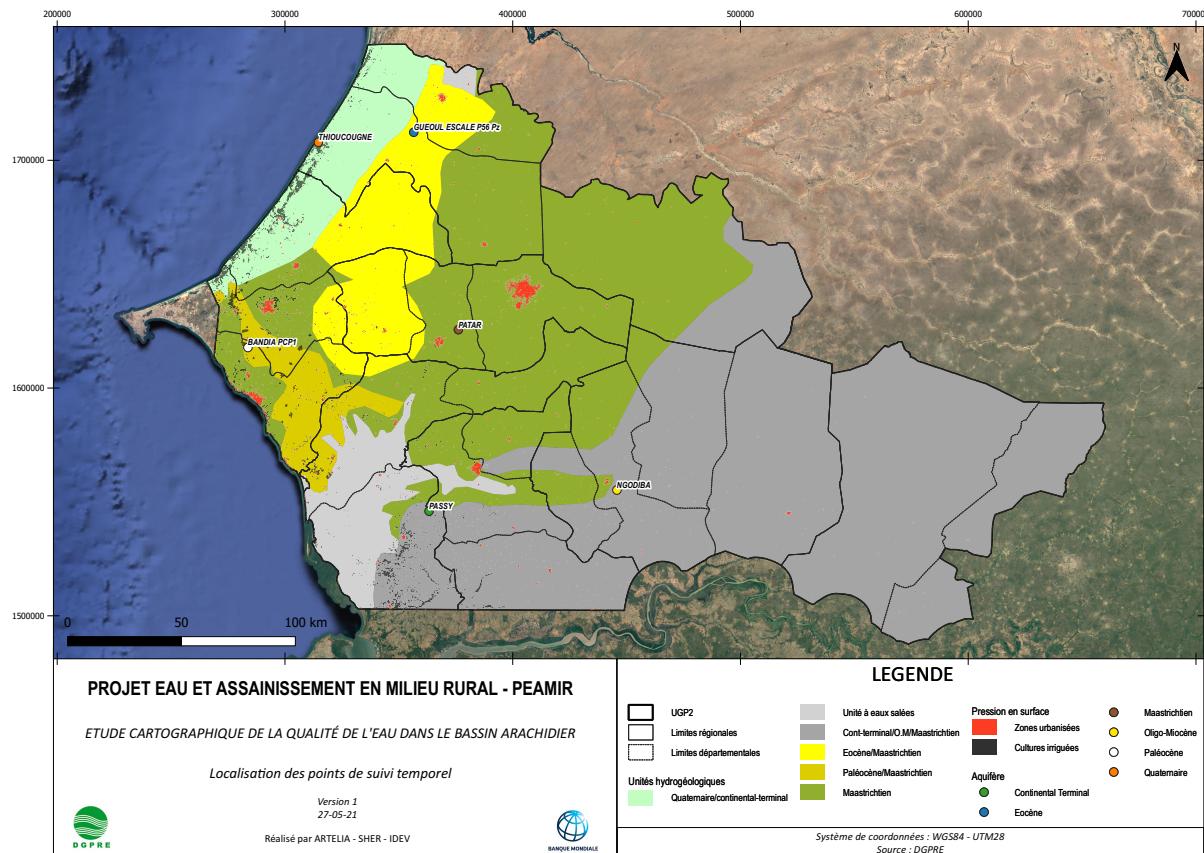


FIGURE 3.5 – Localisation des ouvrages du réseau de suivi temporel et lien avec les pressions en surface

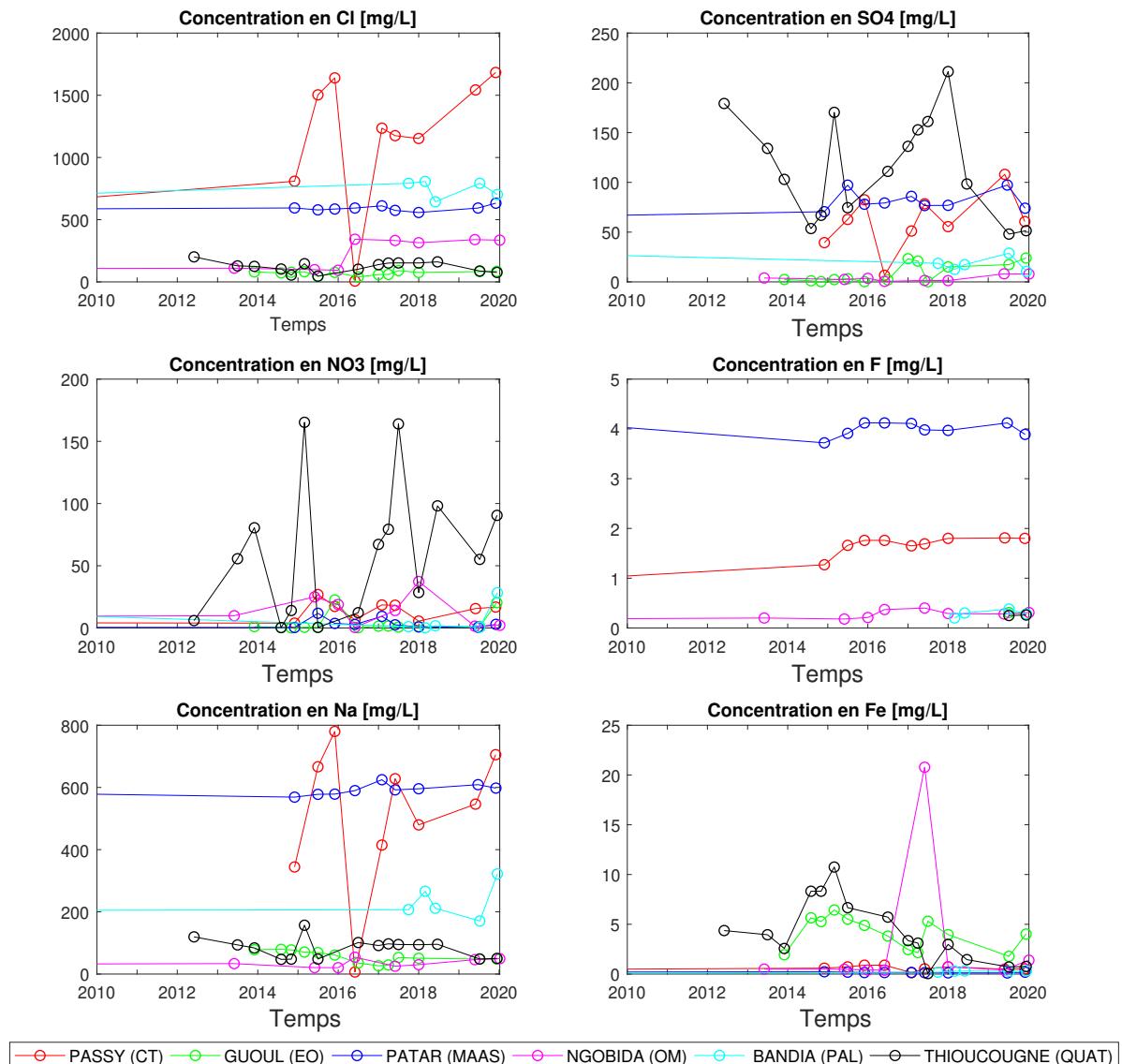


FIGURE 3.6 – Évolution temporelle des concentrations du suivi Réseau depuis 2010

Afin de préciser l'origine des pics de concentrations, la Figure 3.7 met en évidence, pour l'ouvrage *Thioucougne* du Quaternaire, les évolutions de la conductivité électrique et des concentrations en nitrates en fonction du niveau statique. L'application de cartographie de web interactive de la NASA (2021) sera utilisée en vue d'estimer les précipitations dans le but de vérifier si celles-ci ont une influence sur la dynamique de minéralisation et des solutés de la nappe.

Dans le but de présenter l'évolution des paramètres, les enregistrements connus, représentés par un point sur les graphiques, sont reliés entre eux par interpolation linéaire. Il est alors observé qu'aucun des paramètres (*i.e* le niveau statique, les concentrations en nitrates et la conductivité électrique) n'est mesuré lors des périodes humides caractérisées par des taux de précipitations élevées. Dès lors, l'influence des précipitations sur le niveau statique n'étant pas analysable, il est délicat d'interpréter la présence des pics de concentrations.

Cependant, une mesure de niveau piézométrique datant de 2014-2015 est connue lors de la saison humide (*cfr.* graphique du haut). Le niveau piézométrique est alors mesuré un mètre au-dessus du niveau caractéristique à la saison dite sèche. La profondeur de la nappe et les précipitations seraient donc éventuellement liés.

Les courbes de concentrations en nitrates et de conductivité semblent corrélées. En effet, la conductivité augmente avec la concentration en nitrates. Cela est attendu car la zone des Niayes présente une forte densité de cultures irriguées (représentées par des pixels noirs sur la Carte 3.5). Ainsi, l'ouvrage de *Thioucougne* pourrait témoigner de l'usage de fertilisants, d'engrais ou de pesticides.

Finalement, les pics de concentrations pourraient simplement être liés à un usage saisonnier intensif d'intrants agricoles entre les mois de mars et de juillet.

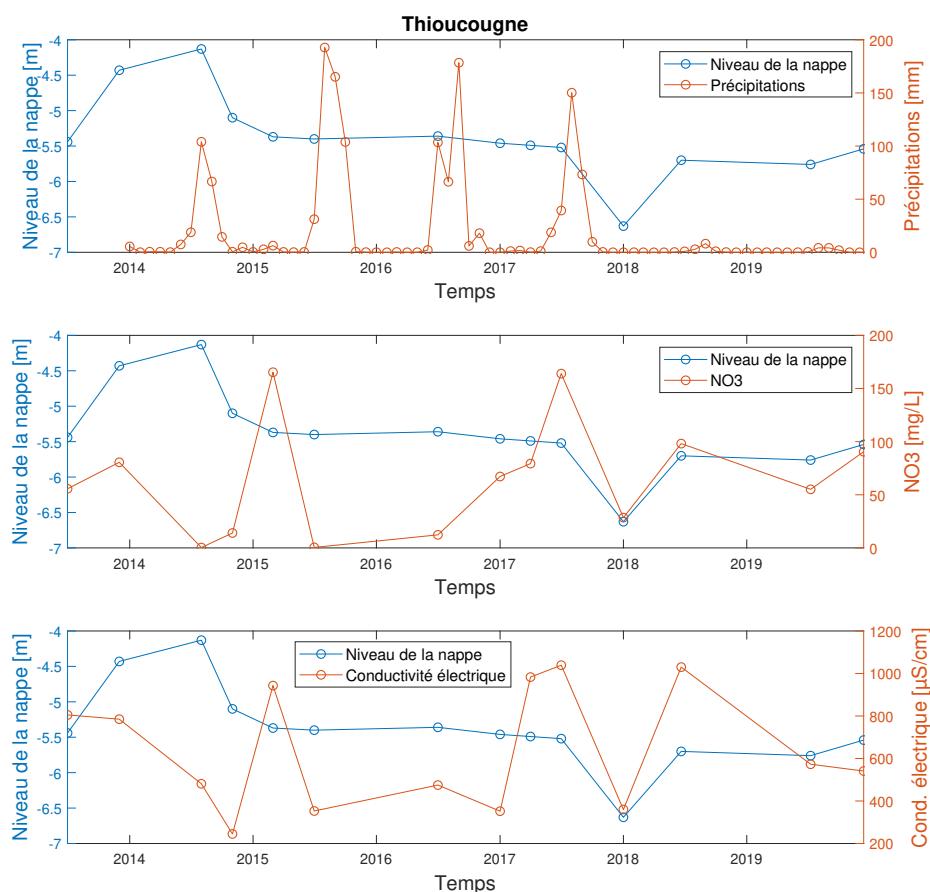


FIGURE 3.7 – Suivi temporel de l'ouvrage Thioucougne (QUAT)

3.3 Influence du type d'ouvrage

La base de données généralisée différencie les ouvrages en fonction de leur type : forage, puits ou piézomètre. Il est donc judicieux de présenter l'évolution des statistiques en fonction de ce critère particulier. Comme précédemment, en Annexe (section F) la Table F.5 reprend le nombre de données réelles pour chaque classe tandis que les Tables F.6 et F.7 en présentent respectivement les moyennes et médianes. De nouveau, plus les effectifs de classe sont réduits, plus les moyennes sont délicates à interpréter. De manière générale, la base de données reprend plus de forages que de puits avec peu de données issues de piézomètres.

Le type d'ouvrage ne semble pas impacter le pH. Cependant, il est observé que des températures plus élevées sont mesurées dans les forages. Cela est certainement dû au fait que l'eau issue des puits est plus exploitée et donc sujette à une fréquence de renouvellement plus élevée que pour les forages ou par l'influence d'un gradient géothermique en profondeur pour les forages. Ce sont les piézomètres qui présentent les valeurs les plus élevées de conductivité, résidus secs et TDS à l'exception du Continental Terminal où elles sont mesurées dans les forages. Les plus grandes concentrations chimiques sont également mesurées dans les piézomètres. Il reste tout même à rappeler que ces observations peuvent être biaisées en raison des faibles effectifs pour ce type d'ouvrage en particulier.

Il est observé que, certainement en raison du fait que ces derniers sont plus profonds, les conductivités électriques sont plus élevées dans les forages que dans les puits pour Maastrichtien. Cela pourrait alors témoigner d'une minéralisation plus importante avec la profondeur pour le Maastrichtien. Concernant l'Éocène et le Quaternaire, c'est l'inverse : les conductivités électriques sont plus élevées dans les puits. Cela pourrait signifier que ces aquifères sont plus sensibles aux pressions en surface.

Les Figures 3.8 et 3.9 présentent l'évolution des concentrations en fonction des profondeurs de la nappe et de l'ouvrage. Il est observé que des concentrations plus élevées sont mesurées quand la profondeur de la nappe est comprise entre 0 et 50 m ; surtout pour les sulfates et nitrates, liés aux pressions en surface (agricultures, cultures irriguées, utilisations de pesticides et/ou fertilisants...). Il apparaît également sur les Figures que les eaux semblent plus minéralisées en profondeur, surtout pour le Maastrichtien, avec des concentrations élevées en chlorures, sodium et sulfates. Les deux premiers seraient liés à l'état de salinisation de la nappe tandis que le second serait en rapport avec la dissolution de gypse. À noter qu'une analyse en fonction de la profondeur de l'ouvrage est délicate car la hauteur des crêpines peut jouer un rôle sur les mélanges d'eau de profondeur différente mais également sur les réactions chimiques entre les eaux superficielles (oxygénées) et profondes (anoxiques).

Concernant les concentrations en fer, il est probablement d'origine particulière dans l'eau.

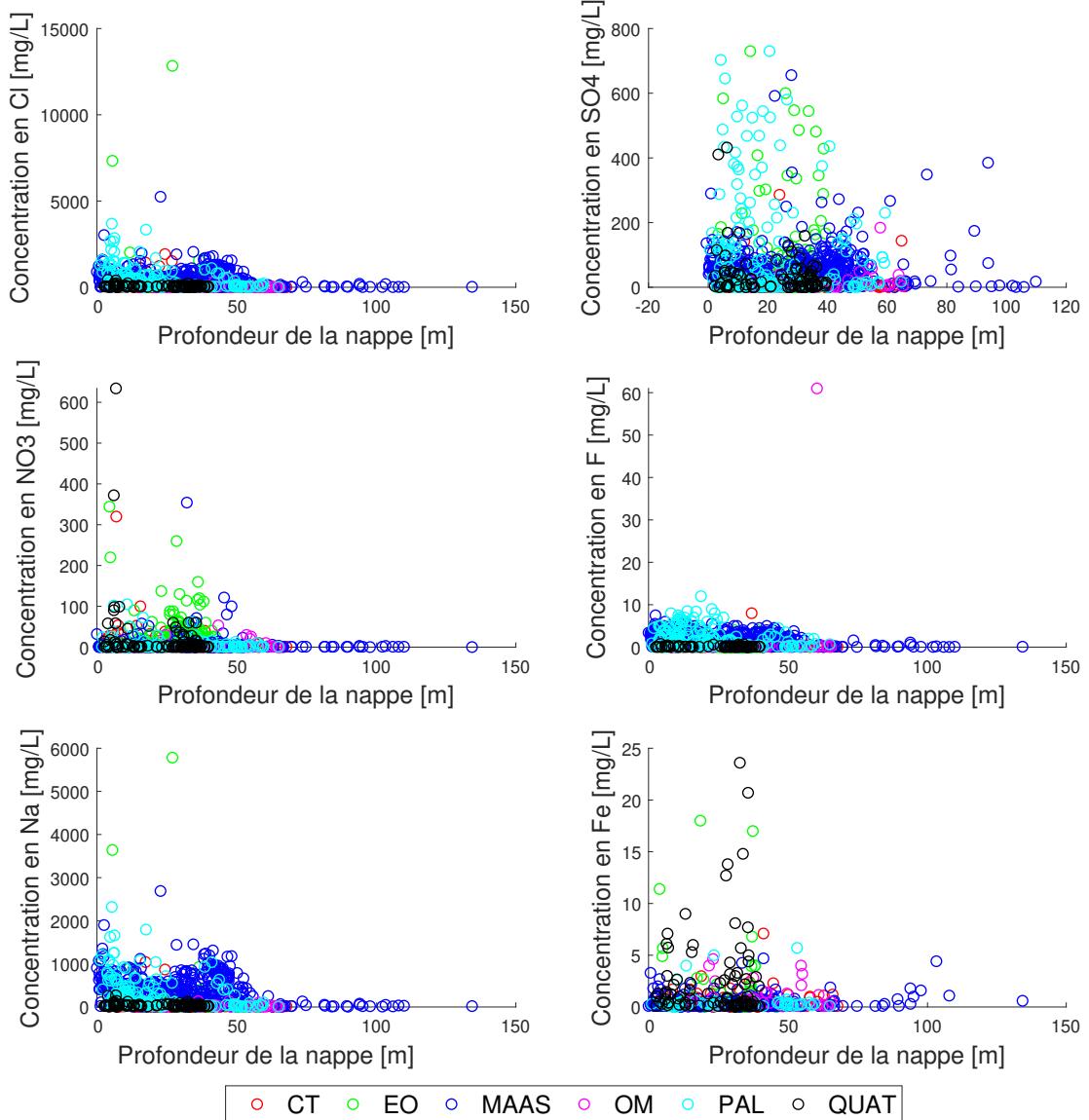


FIGURE 3.8 – Évolution des concentrations en fonction du niveau statique

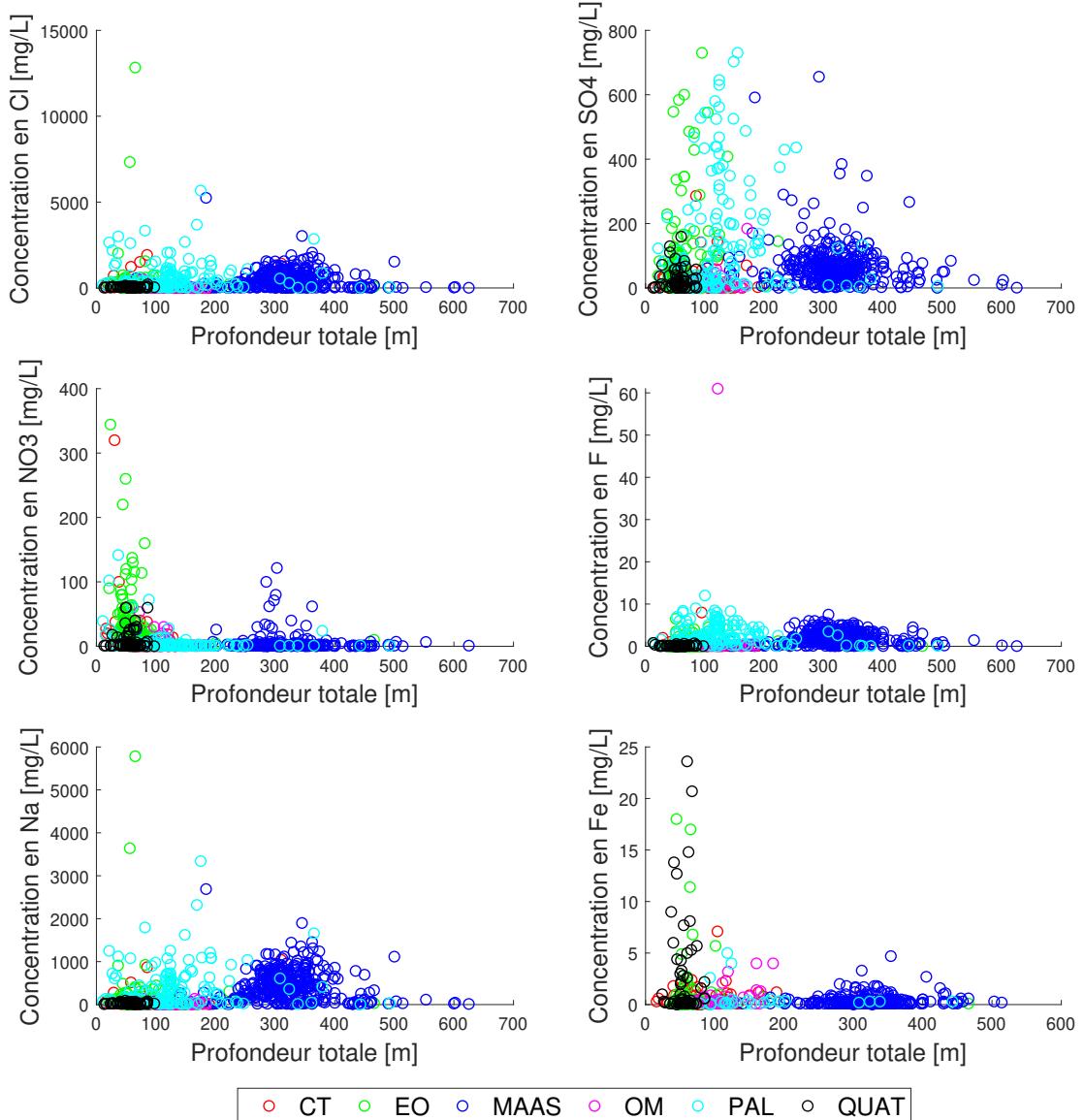


FIGURE 3.9 – Évolution des concentrations en fonction de la profondeur de l'ouvrage

3.4 Normes de potabilité

Cette section a pour but de mettre en évidence les écarts entre les concentrations chimiques mesurées *in situ* et les normes de potabilité définies par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé, 2017), l'Union Européenne (Directive 98/83/CE, 1998) ainsi que le Sénégal (norme NS 05-033 de l'Association Sénégalaise de Normalisation ; Commission Belge, 2010).

À noter que l'OMS présente des indications plutôt que des normes, considérant que les objectifs et normes sanitaires se doivent d'être réalistes en fonction des conditions locales et/ou régionales (Organisation Mondiale de la Santé, 2017).

La Table 3.5 reprend les normes de potabilité de ces trois directives. Il est observé que les normes Européennes sont les mêmes que celles conseillées par l'OMS. Malgré la problématique de contamination par le fluor, les normes de potabilité du Sénégal pour cet élément sont plus strictes que celles des deux organisations précédemment citées.

Normes Unités	Temp. [°]	pH	Cond [µS/cm]	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	K	Fe
OMS	25	8	2500	250	250	50	1.5	270	50	200	-	0.2
EU	-	8	2500	250	250	50	1.5	-	-	200	-	-
Sénégal	-	-	-	-	-	-	0.8	-	-	-	-	0.2

TABLE 3.5 – Normes de potabilité

La Table 3.6 présente les pourcentages de dépassement des différentes normes de potabilité par aquifère (les taux supérieurs à 20% sont indiqués en rouge). Il est observé que c'est le Maastrichtien qui présente les plus hauts taux de dépassement à la fois pour les chlorures, le sodium mais également pour le fluor avec respectivement 52.79, 59.33 et 47.25 % de dépassement par rapport aux indications de l'OMS. Concernant les sulfates et le magnésium, c'est le Paléocène qui présente le plus grand taux de dépassement avec 13.18 et 38.11. Finalement, les plus grands taux de dépassement de normes pour le nitrate et le fer sont identifiés dans le Quaternaire.

	Temp.	pH	Cond	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe	
CT	OMS-EU	98.33	3.28	3.33	7.72	1.38	7.47	3.57	0.81	4.70	5.69	42.72
	Sénégal	-	-	-	-	-	-	5.10	-	-	-	-
EO	OMS-EU	100.00	4.97	2.48	11.59	4.71	7.13	4.75	0.86	8.17	5.15	20.34
	Sénégal	-	-	-	-	-	-	7.36	-	-	-	-
MAAS	OMS-EU	99.15	27.14	20.50	52.79	1.99	2.42	47.25	0.32	1.99	59.33	46.30
	Sénégal	-	-	-	-	-	-	61.86	-	-	-	-
OM	OMS-EU	95.24	0.00	0.00	3.64	0.00	3.77	2.22	0.00	1.96	0.00	55.10
	Sénégal	-	-	-	-	-	-	2.22	-	-	-	-
PAL	OMS-EU	100.00	10.19	5.45	40.60	13.18	3.66	43.53	2.26	38.11	31.58	55.14
	Sénégal	-	-	-	-	-	-	56.03	-	-	-	-
QUAT	OMS-EU	98.61	3.10	1.14	3.01	2.73	8.46	0.00	0.00	2.29	2.26	61.34
	Sénégal	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-

TABLE 3.6 – Taux de dépassement des normes de potabilité

Ainsi, il semble que la qualité de l'eau souterraine pose problème tant pour son utilisation en tant qu'eau de boisson ou d'irrigation. En effet, les taux de dépassement des normes de potabilité sont significatifs (DGPRE, 2020b).

De plus, au vu des faibles réserves d'eau de surface et du traitement des eaux peu efficace, la possibilité d'alternative à l'usage des aquifères est limitée (DGPRE, 2020b).

Le chapitre 4 met en évidence l'impact que le dépassement des normes de potabilité peut avoir sur la santé ou sur l'environnement. Dans ce chapitre seront également proposées les premières hypothèses quant à l'origine des concentrations chimiques élevées mesurées dans le Bassin.

Chapitre 4

Analyses spatiales des eaux souterraines du Bassin Arachidier

Ce chapitre a pour but de représenter sur des cartes les conductivités laboratoire ainsi que les concentrations en nitrates, sodium, chlorures, fluorures, sulfates et fer afin d'analyser leur disposition spatiale. Au total, 42 cartes reprises en format A3 dans l'Atlas cartographique en Annexe ont été produites.

Un système de double symbologie dans la légende permet de représenter par différentes couleurs les classes quantitatives du paramètre basées sur les normes de potabilité et, par différentes formes la date chimique de chaque ouvrage. En effet, au vu de la base de données qui reprend des informations chimiques réparties entre 1949 et 2020, il est important de distinguer les données selon leur âge.

Les cartes ont été réalisées selon le système de coordonnées WGS84-UTM 28N. Les ouvrages décrits seulement par les coordonnées X, Y ont été convertis en UTM en utilisant QGIS ; ceux qui ne présentaient aucunes coordonnées ont été placés par défaut au centre du village/ de la ville/ du « lieu-dit » correspondant à leur désignation.

Dans ce chapitre les différents paramètres étudiés, leurs origines et dangerosité seront également présentés. Leur disposition spatiale dans la zone d'étude sera étudiée et mise en lien avec la présence de pression en surface (ressources minières, industries, zones urbanisées, cultures irriguées) dans le but de proposer diverses hypothèses quant aux modes de contaminations. Ce dernier est soit naturel (intrusion saline, lessivage et érosion des sols, ...) soit anthropique (effluents, rejets d'eaux usées, ...).

Le chapitre suivant précisera l'origine des contaminations par analyse chimique. Il sera dès lors intéressant de comparer les résultats des deux approches proposées : les analyses spatiales d'une part, chimiques d'autre part.

Finalement, dans le but d'améliorer et de compléter la base de données, une campagne d'échantillonnage aura lieu en mai-juin 2021. Cette dernière a été préparée et une proposition d'ouvrages à échantillonner sera illustrée en fin de chapitre.

4.1 Analyse détaillée des paramètres

Dans cette section, les possibles origines naturelles et anthropiques de la conductivité ainsi que des concentrations en nitrates, sodium, chlorures, fluorures, sulfates et fer seront détaillées. Leurs impacts sur la santé humaine et l'environnement seront également mis en évidence. La référence utilisée pour cette section est « La liste des paramètres retenus comme critères de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine » établie par le professeur Vincent Danel à l'université « Grenoble Alpes » en 2017.

4.1.1 Conductivité laboratoire

La relation entre la teneur en sel dissous et la résistance que l'eau oppose au passage d'un courant électrique est liée à la résistivité (Res) ainsi qu'à la conductivité (Cond) tel que

$$Cond = \frac{1}{Res}$$

Comme illustré à la Figure 4.1, la conductivité électrique est proportionnelle au résidu sec et donc au degré de minéralisation de l'eau.

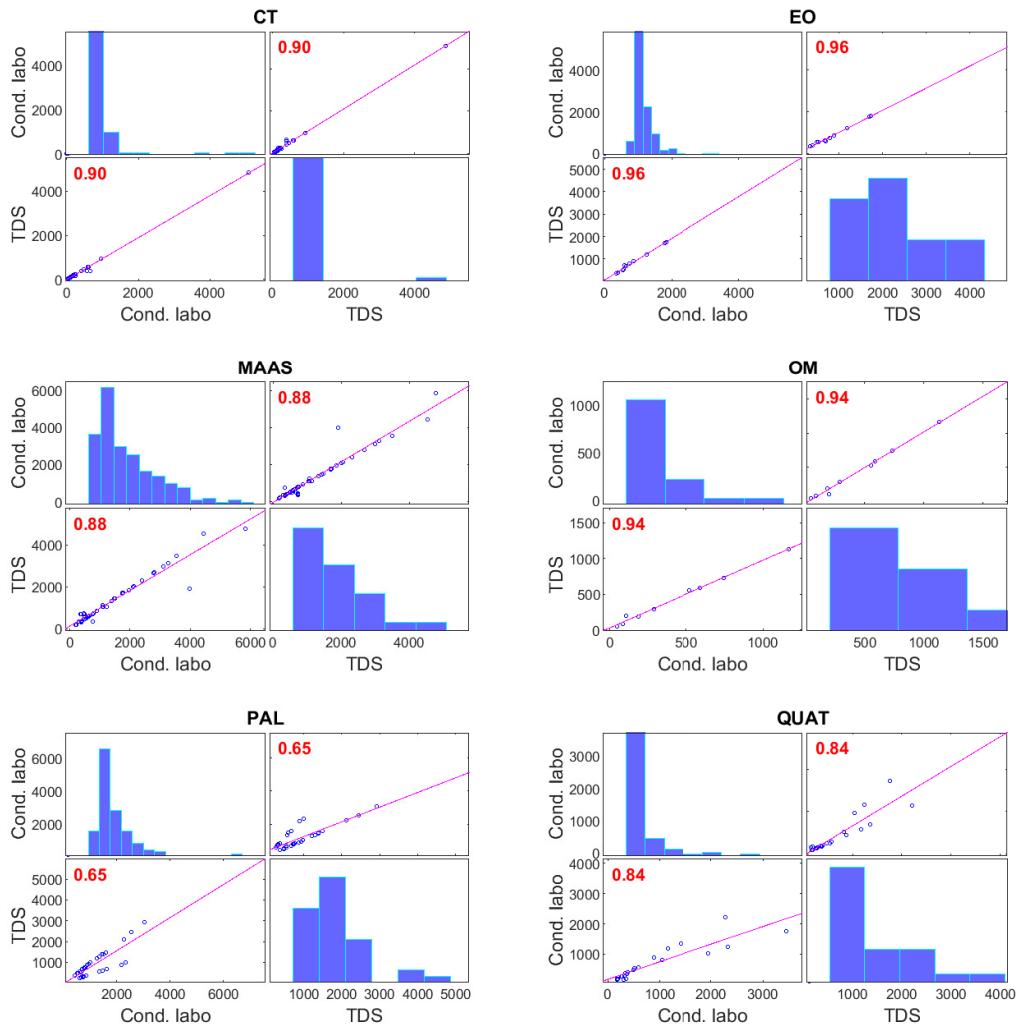


FIGURE 4.1 – Corrélation entre la conductivité électrique (labo) et le TDS

En effet, la conductivité électrique, exprimée en [$\mu\text{S}/\text{cm}$], représente la quantité d'ions présents en solution et est fonction des fractions molaires des différentes entités chimiques en présence. Quant au résidu sec, il correspond à la somme des éléments en solution moins les éléments majeurs perdus lors du séchage d'un litre d'eau à 180° (BRGM, 1998).

La conductivité électrique est donc une mesure indirecte du RS ce qui explique la haute corrélation (0.86 en moyenne) entre ces deux paramètres.

Les variations de la conductivité électrique et du TDS, qui dépendent de la température, sont liées aux changements d'ordre hydrogéologiques. Les ouvrages présentant des conductivités élevées reflètent ainsi une forte minéralisation typiquement liée à la dissolution des sols, à des rejets industriels ou à la présence de poches d'eau saumâtre liées aux anciens épisodes de régressions marines (Danel, 2017). Ces ouvrages présentant des valeurs élevées de conductivité électrique devraient faire l'objet de monitoring (Danel, 2017 ; DGPRE, 2018a).

L'impact de la conductivité sur la santé dépend des ions présents en solution. Une importante minéralisation peut cependant entraîner un goût particulier (souvent salé) et accélérer la corrosion ainsi que la formation de dépôt dans les tuyauteries (Danel, 2017).

Dans la base de données créée, la différence entre la conductivité mesurée en laboratoire ou sur terrain n'est pas toujours précisée. Or, les ions dissous ont tendance à précipiter s'ils ne sont plus en équilibre avec leur milieu. Ainsi, car elle est liée au résidu sec et donc à la quantité d'ions dissous, la conductivité mesurée en laboratoire est attendue inférieure à celle mesurée *in situ*.

La Figure 4.2 montre que les conductivités sont tout de même corrélées.

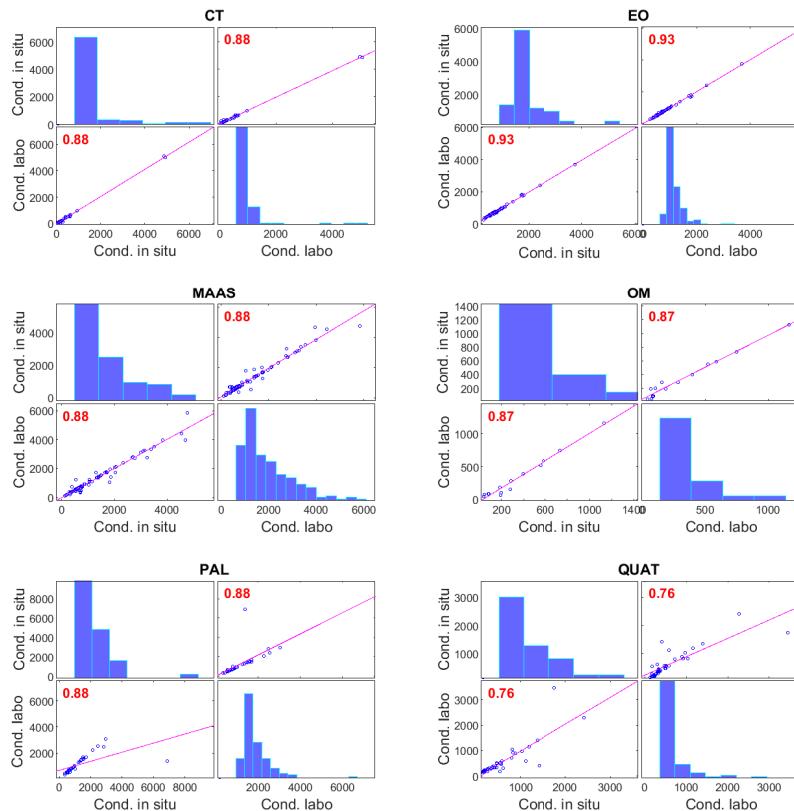


FIGURE 4.2 – Corrélation entre les conductivités *in situ* et laboratoire

4.1.2 Nitrates

Les nitrates sont très solubles dans l'eau et abondamment répandus dans les sols. Même si indispensables au développement des végétaux, ils peuvent devenir, si utilisés en excès, la source de déséquilibres et de contaminations des eaux (Danel, 2017).

L'origine des nitrates est soit naturelle soit anthropique (Danel, 2017) :

- **Origines naturelles** : oxydation de matière organique, décomposition des organismes vivants, lixiviation et érosion des sols, dissolution des minéraux, ...
- **Origine anthropiques** : utilisation d'engrais (surtout dans les zones d'agriculture ou d'élevages intensifs), présence d'effluents industriels ou de rejets d'eaux usées, ...

La présence de nitrate en quantité nocive peut, à long terme, dégrader la qualité des eaux. Même si généralement peu toxiques, les nitrates peuvent, sous l'action de réductases gastriques, muter sous la forme de nitrites toxiques. Lesquels peuvent avoir un effet cancérigène. Ainsi, l'effet des nitrates sur la santé humaine est qualifié d'indirect (Danel, 2017). Au-delà de 15 mg/L, l'eau est à éviter pour la préparation de biberons ; entre 50 et 100 mg/L, l'eau est interdite aux femmes enceintes et aux nourrissons même si elle est sanitairement acceptable ; au delà de 100 mg/L, la consommation comme eau de boisson est interdite (Danel, 2017).

D'un point de vue environnemental, un excès de nitrates combiné à la présence de phosphates peut mener à des phénomènes d'eutrophisation¹ des eaux superficielles (Danel, 2017).

Afin de résoudre la problématique des nitrates, il est possible de diluer les eaux à l'aide d'une ressource saine, de supprimer les captages infectés, de dénitrifier les eaux à l'aide de résines échangeuses d'ions ou par un traitement biologique à base de bactéries consommatrices de nitrates (Danel, 2017).

4.1.3 Sodium

De manière générale, le sodium se présente sous la forme Na⁺ et est associé aux chlorures (Danel, 2017).

Son origine est soit naturelle soit anthropique (Danel, 2017) :

- **Origines naturelles** : lessivage ou percolation de terrains salés, infiltration d'eaux saumâtres
- **Origine anthropiques** : rejets industriels et/ou domestiques (production de soude caustique, ...), utilisation de sel de sodium en vue de limiter la corrosion

La teneur maximale en sodium recommandée dans l'eau est comprise entre 20 et 50 mg/L. Passé 200 mg/L, le goût de l'eau est altéré. Les populations sensibles à cet ion sont les nourrissons (en raison notamment de l'immaturité de leurs reins) mais également l'ensemble de la population atteinte par des troubles cardiaques, rénaux ou vasculaires (Danel, 2017).

Si la teneur en sodium est trop importante dans l'eau, il est possible de la déminéraliser à l'aide de résines échangeuses d'ions (Danel, 2017).

4.1.4 Chlorures

Les ions chlorures sont généralement trouvés sous les formes NaCl et KCl. Ils trouvent leur origine de manière soit naturelle soit anthropique (Danel, 2017) :

- **Origines naturelles** : érosion et lessivation des sols, dissolution des minéraux, intrusions d'eau saline
- **Origine anthropiques** : effluents industriels (mines de potasses, drainages d'irrigation, eaux usées, ...), lixiviation de décharges, utilisation de chlorures dans le cadre du traitement des eaux

1. i.e une prolifération excessive d'algues menant à la raréfaction de l'oxygène présent dans l'eau et donc résultant *in fine* au déclin des espèces vivantes

Même à des concentrations supérieures à 1000 mg/L, les chlorures ne constituent pas en soi une menace pour la santé humaine mais altèrent le goût de l'eau et peuvent entraîner des problèmes de corrosion dans les systèmes de tuyauterie. Cependant, à plus 250 mg/L, ils peuvent déjà être nocifs pour les populations présentant des maladies rénales ou cardio-vasculaires (Danel, 2017 ; Commission Belge, 2010).

Afin de diminuer les concentrations, il est envisageable de diluer les eaux avec une source saine (Danel, 2017).

4.1.5 Fluorures

En solution, les fluorures se trouvent sous la forme d'ions liés au calcium, au sodium, ... Ils tirent leur origine de manière soit naturelle soit anthropique (Danel, 2017) :

- **Origines naturelles** : lessivage des sols, dissolution de minéraux tels que la fluorine ou fluoroapatite
- **Origine anthropiques** : rejets industriels (verreries, métallurgies d'aluminium, fabrication d'engrais et/ou pesticide)

Concernant l'impact des fluorures sur la santé, les carences tout comme les excès sont nocifs. En effet, sous la barre des 0.5 mg/L, les fluorures ne sont pas présents en quantité suffisante pour prévenir les caries dentaires. Entre 1.5 et 4 mg/L, l'excès de fluorures peut causer des fluoroses dentaires ; passé 4mg/L, des risques de fluorose osseuse (c'est-à-dire des douleurs osseuses et articulaires avec parfois des déformations). C'est l'intervalle compris entre 0.5 et 1.5 mg/L qui constitue la dose optimale (Danel, 2017 ; Commission Belge, 2010).

La fluoration volontaire de l'eau est de manière générale déconseillée au vu du risque de dépassement de la norme journalière (Danel, 2017). De plus, dans le cas du Bassin Arachidier, ce procédé n'aurait pas de sens car, comme cela sera détaillé à la section suivante, la zone fait l'objet d'une contamination naturelle forte au fluor (Commission Belge, 2010).

4.1.6 Sulfates

Les sulfates font partie des composés naturels du sol et y sont présents à des teneurs variables. Les ions sulfates sont liés aux cations principaux *i.e* le calcium, le sodium, ... et tirent leur origine de manière naturelle ou anthropique (Danel, 2017) :

- **Origines naturelles** : lessivage ou érosion des sols, dissolution de minéraux (comme la baryte ou le gypse), intrusion d'eau de mer
- **Origine anthropiques** : utilisation d'engrais, rejets d'effluents industriels (tannerie, métallurgie, verreries, mines, ...), utilisation de sulfates d'aluminium et de fer comme agent de flocculation dans le cadre du traitement des eaux

De manière générale, les concentrations de sulfates présentes dans l'eau ne sont pas toxiques pour l'Homme. Cependant, passé 250 mg/L le goût de l'eau est altéré, les risques de corrosion augmentent et la désinfection au chlore est diminuée (Danel, 2017).

L'élimination des sulfates n'est pas une pratique courante. Les principes d'osmose inversée, d'échange d'ions par des résines, d'électrolyse ou de déminéralisation par la chaux peuvent cependant être mis en place (Danel, 2017).

4.1.7 Fer

Dans l'eau, les ions de fer sont le plus souvent trouvés sous la forme Fe²⁺ et souvent liés au manganèse. L'origine des ions ferriques est soit naturelle soit anthropique (Danel, 2017) :

- **Origines naturelles** : composition des sols, lessivage de certains minéraux comme la pyrite, l'hématite ou la magnétite
- **Origine anthropiques** : rejets industriels (métallurgie, sidérurgie, mines, ...), corrosions des canalisations métalliques, utilisation de sel de fer en tant que coagulant

De manière générale, la présence de fer dans l'eau n'est pas toxique pour l'Homme. Cependant, certains troubles bénins peuvent apparaître dans le cas de concentrations particulièrement élevées. Si la teneur dépasse 0.1 mg/L, alors les désinfectants peuvent être neutralisés au profit de la prolifération de ferro-bactéries causant : de la corrosion, la formation de dépôts dans les canalisations avec réductions des débits, une eau de couleur « rouille » accompagnée d'un goût métallique (Danel, 2017).

En vue de diminuer ou d'éliminer les teneurs en fer, celui-ci peut par exemple être oxydé au contact de l'oxygène ce qui le rend insoluble et récupérable sous la forme de précipité. Il est également possible, dans certaines conditions, d'effectuer une oxydation à l'aide de bactéries afin de précipiter le fer dissout et de le filtrer. Finalement, ajouter de la chaux permet également aux ions ferriques de précipiter mais ce procédé produit d'importantes quantités de boues (Danel, 2017).

4.2 Étude spatiale des concentrations

Comme expliqué à la section précédente, des concentrations particulièrement élevées peuvent être d'origine naturelles ou anthropiques. Ainsi, la disposition spatiale des ouvrages sera étudiée et mise en lien avec les différentes pressions en surface (industries, ressources minières, cultures irriguées et zones urbanisées).

Sur la carte 4.3, il est observé que la plupart des ressources minières sont : des carrières de phosphates de chaux à l'intérieur des terres, des tourbes le long du Littoral Nord, des carrières de matériaux de construction à l'ouest de la zone, des phosphates d'alumine dans la région de Thiès. Quant aux industries, elles sont de tout type (verreries, tanneries, production d'engrais, ...) et se situent de manière hétérogène dans l'ensemble de la zone.

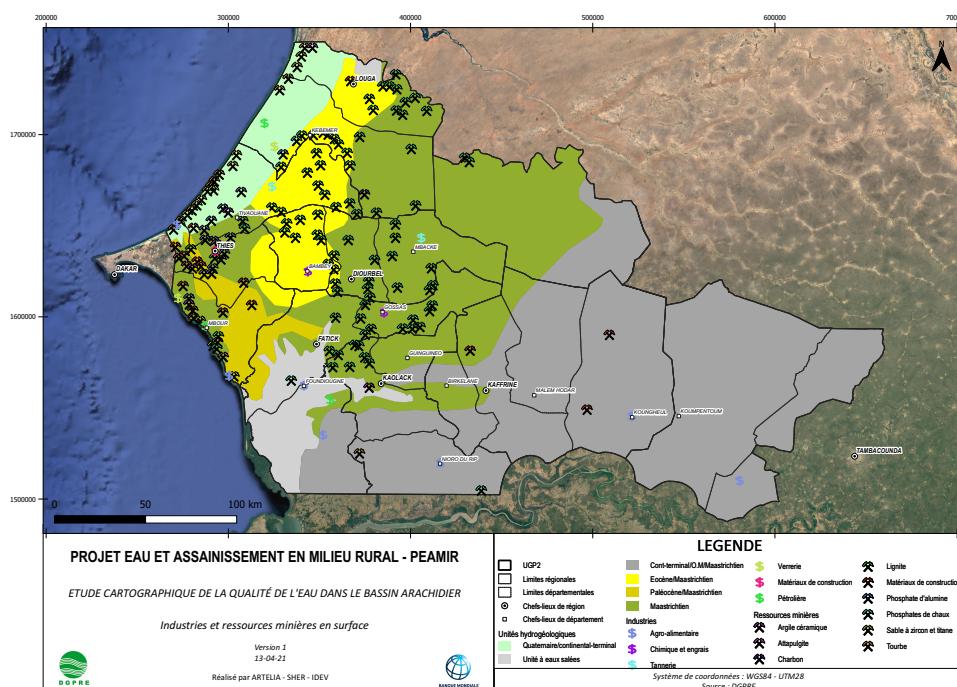


FIGURE 4.3 – Disposition spatiale des pressions en surface : industries et ressources minières

Sur la carte 4.4, il est observé que la plus grande zone urbanisée est située aux alentours de Mbacké et les plus vastes étendues de zones irriguées le long du Littoral Nord ainsi qu'au sud, à la frontière avec la Gambie. Les zones urbanisées et agricoles ont été mises en évidence par un travail de télédétection basé sur des images satellites par la DGPRE. Ainsi, des bandes raster ont été importées dans QGIS afin de mettre en évidence les pixels concernés par des pressions en surface. Ce travail pourrait être amélioré dans le but de préciser au mieux l'occupation du sol.

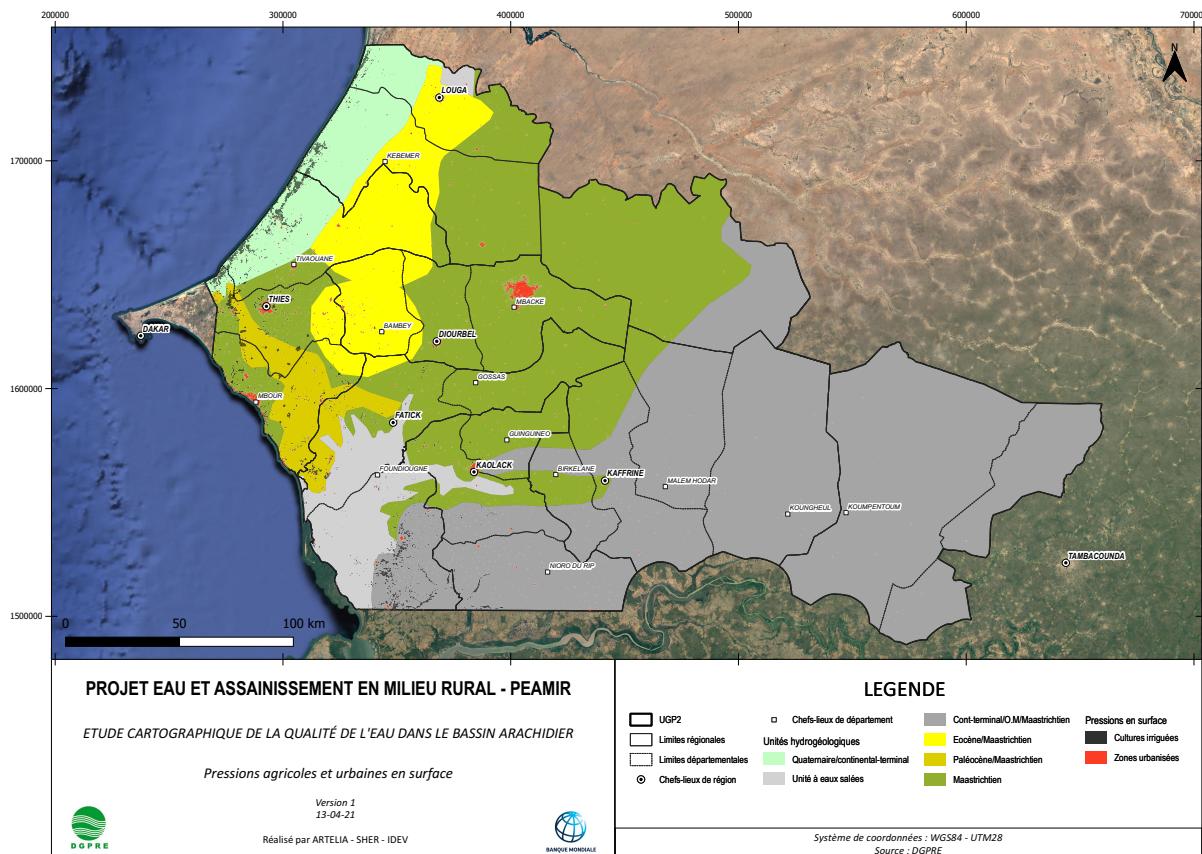


FIGURE 4.4 – Disposition spatiale des pressions agricoles et urbaines en surface

La Figure 4.5 présente par aquifère les différentes profondeurs de la nappe et des ouvrages de la base de données. Il est observé que les ouvrages pour le Maastrichtien sont plus profonds que ceux respectifs des autres aquifères ($\simeq 100$ m). Concernant les profondeurs de nappes, elles oscillent entre 15 et 25 m avec cependant des mesures plus profondes pour l'Oligo-Miocène.

Ces informations sont intéressantes car plus l'ouvrage est profond, plus son origine anthropique est improbable. Ainsi, au Maastrichtien, la présence de concentrations élevées est probablement liée à des phénomènes naturels en rapport avec la géologie plutôt qu'avec les pressions en surface.

Ainsi, les sous-sections suivantes mettent en évidence les analyses spatiales des concentrations pour chaque aquifère et proposent leurs origines possibles. L'ensemble des cartes de concentrations sont reprises en Annexe dans un Atlas cartographique.

Finalement, en vue d'améliorer la connaissance de la zone d'étude, une campagne d'échantillonnage a été organisée et devrait avoir lieu en mai 2021. Le développement des choix d'échantillonnage fera l'objet de la section suivante.

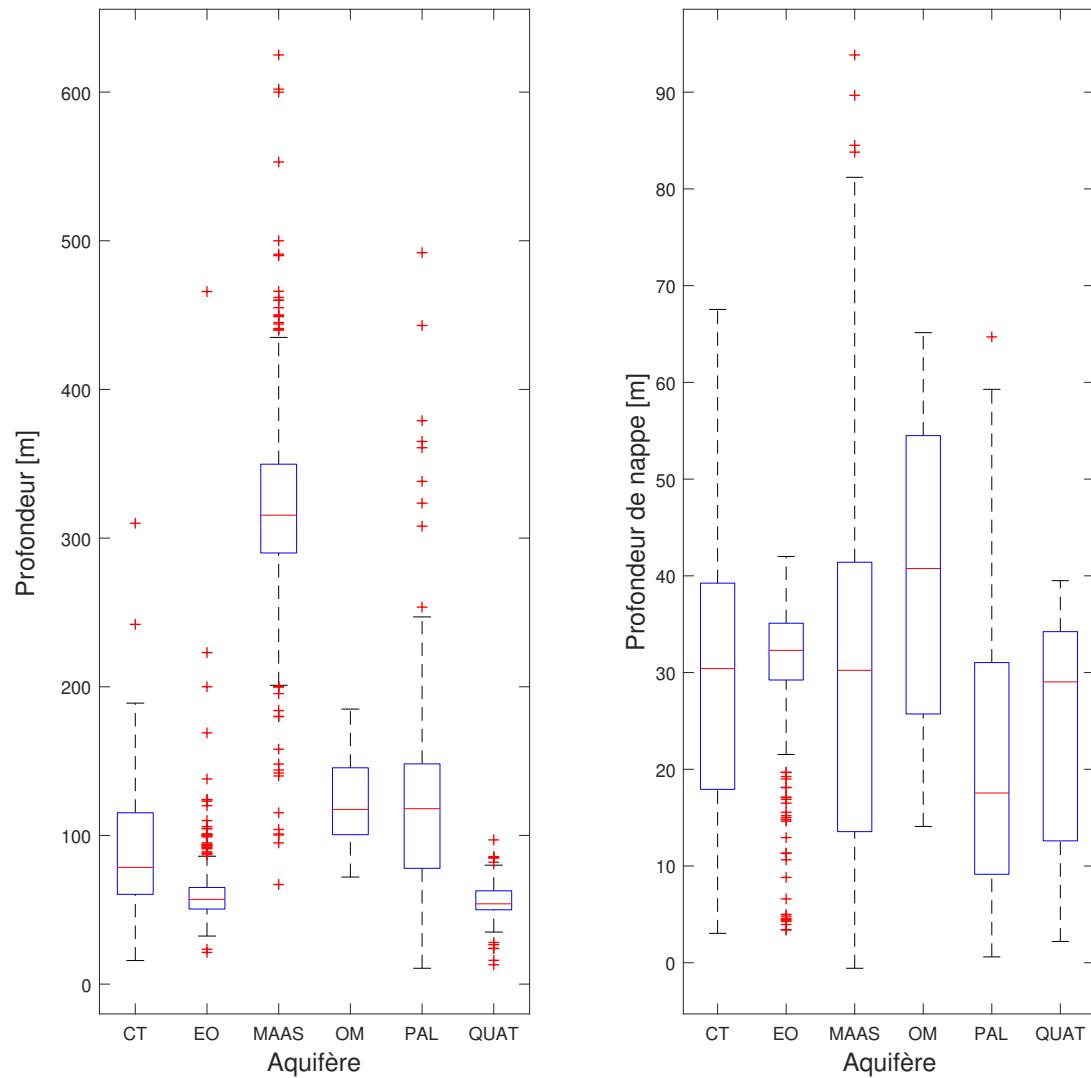


FIGURE 4.5 – Profondeurs des ouvrages et de la nappe en fonction de l'aquifère

4.2.1 Maastrichtien

Les **conductivités électriques** du Maastrichtien semblent s'organiser le long d'un couloir nord-sud passant par les villes de Louga et de Diourbel s'étendant jusqu'à Fatick et Kaolack. Plus la distance avec ce couloir augmente et plus les conductivités mesurées diminuent. À noter tout de même la présence de valeurs particulièrement élevées dans la région de Mbour, sur la côte. Au vu de la profondeur des ouvrages, l'origine de ce couloir nord-sud est probablement naturelle et liée à la dissolution des sols ou à des changements d'ordre hydrogéologiques.

Les concentrations de **nitrates** sont faibles sur l'ensemble de la zone. Cependant, quelques ouvrages comme celui situé à 20 km de Mbacké sont caractérisés par des concentrations plus élevées qui pourraient être liées à un défaut dans le système d'eau usée mis en place.

Les concentrations en **sodium**, **chlorures** et **fluorures** s'organisent, comme les conductivités électriques, le long du couloir nord-sud passant par Louga, Mbacké, Diourbel, Gossas, Fatick et Foudiougne, jusqu'aux unités à eaux salées du sud-ouest.

Ainsi, la présence de ce couloir semble être corrélée avec des origines naturelles telles que des infiltrations saumâtres, la lexivation des sols ou dissolution de certains minéraux comme la fluorine, ... De plus, au vu des concentrations de chlorures plus élevées au nord et au sud de la zone, le phénomène semble s'étendre de ces points cardinaux vers l'intérieur des terres. Concernant les fluorures, des concentrations plus élevées sont également visibles d'une part au Littoral Nord (proches d'une verrerie) et d'autre part dans l'unité géologique de l'Éocène-Maastrichtien (près d'une industrie d'engrais et de pesticides ainsi que des mines de phosphate de chaux). Cependant, au vu de la profondeur des ouvrages, il est difficile de dire si ces pressions en surface sont responsables de ces concentrations si élevées.

Les concentrations en **sulfates** sont faibles sur l'ensemble de la zone avec cependant des valeurs légèrement plus élevées en bordure sud-est. Étant donné que cette région ne comporte ni industries, ni ressources minières et n'est pas particulièrement liée à des pressions urbaines et agricoles, une origine naturelle (lessivage des sols ou dissolution de baryte) semble être la plus probable.

Les concentrations en **fer** ne semblent pas liées les unes avec les autres. En effet, les plus élevées sont observées de manière éparses sur la zone. Vu d'une part la profondeur des ouvrages et d'autre part leur répartition hétérogène, les origines anthropiques et naturelles semblent peu probables. Il se peut cependant que ces concentrations soient liées au puits ou au forage en raison soit de la corrosion des canalisations soit de l'utilisation de sels de fer en tant que coagulant.

4.2.2 Continental Terminal

La majorité des ouvrages propres au Continental Terminal se situent au sud de la zone, près de la frontière avec la Gambie, qui ne compte que très peu de ressources minières ou d'industries. Ainsi, sauf cas particuliers, ces pressions en surface ne sont *a priori* pas à l'origine de contaminations éventuelles. Par contre, la partie sud de la zone est sujette à de vastes étendues de cultures irriguées et compte également quelques zones urbanisées. Ainsi, vu la faible profondeur des ouvrages en général, il est probable que ces pressions soient à l'origine des concentrations élevées observées dans le Continental Terminal.

Les deux ouvrages présentant des valeurs particulièrement élevées pour la **conductivité électrique** ne semblent pas liés à la présence de mines ou d'industries mais plutôt à des zones urbanisées. Un lien avec le rejet d'eaux usées est donc probable et pourrait expliquer de telles valeurs pour ces ouvrages.

Les ouvrages présentant des concentrations élevées de **nitrates** sont souvent observés dans des zones urbanisées et/ou irriguées. Ainsi, leur origine est probablement liée à l'utilisation d'engrais pour l'agriculture et au rejet d'eaux usées dans les villes et villages.

Vu la disposition spatiale des ouvrages présentant des concentrations élevées de **sodium** et de **chlorures**, une origine naturelle est peu probable. En effet, si cela avait été le cas, les ouvrages dits « contaminés » auraient *a priori* été regroupés autour d'un même point. Ainsi, une origine anthropique liée au rejet des eaux usées ou à un phénomène de lixiviation au niveau des décharges est plus vraisemblable.

La majorité des concentrations en **fluorures** est faible pour le Continental à l'exception de quelques ouvrages semblant être liés à des zones urbanisées.

Les concentrations en **sulfates** sont également faibles dans la zone même si parfois plus élevées dans les zones agricoles et/ou urbanisées en fonction de l'utilisation d'engrais, de la gestion et du traitement des eaux usées.

La carte des concentrations en **fer** montre que ces dernières sont souvent plus critiques que les autres entités chimiques vis-à-vis de leurs normes de potabilité respectives. Ainsi, vu l'homogénéité spatiale des concentrations de fer élevées, il est possible que l'origine soit naturelle et liée au lessivage de certains minéraux comme la pyrite ou l'hématite par exemple.

4.2.3 Éocène

L'unité hydrogéologique de l'Éocène-Maastrichtien, où les ouvrages de l'Éocène sont concentrés, n'est pas particulièrement concernée par des zones d'irrigation. Le nord de l'unité compte de nombreuses mines de phosphates de chaux mais peu de villes tandis que la partie sud comporte plus de zones urbanisées mais beaucoup moins de ressources minières et industries.

Une graduation des **conductivités électriques** s'organise du nord au sud avec tout de même quelques points présentant de fortes conductivités électriques au nord à proximité de la ville de Louga. Cette graduation est possiblement liée soit à la présence de nombreuses mines de phosphates, soit à une dissolution des sols vers le sud.

Au centre de l'unité hydrogéologique ainsi qu'au nord (Louga) se situent des zones à concentrations élevées de **nitrates**. Ces dernières sont corrélées avec celles présentant des conductivités électriques élevées ce qui conforte la théorie d'une origine naturelle liée à la lixiviation et l'érosion des sols avec possible dissolution de minéraux.

Les mêmes observations peuvent être menées pour le **sodium** et les **chlorures**, même si le phénomène est moins contrasté pour le premier cité. Ainsi, une contamination naturelle par lessivage des sols ou percolation de terrain salé est envisageable.

Les concentrations de **fluorures** sont globalement faibles dans la zone à l'exception de quelques ouvrages au sud présentant des valeurs de concentrations plus élevées. Celles-ci peuvent être dues tant aux rejets industriels de la compagnie chimique à proximité qu'aux rejets domestiques.

Les concentrations en **sulfates** sont également faibles dans la zone d'étude avec cependant des valeurs plus élevées au centre de l'unité hydrogéologique mais également au sud. Les premières peuvent être liées aux conclusions précédentes *i.e* une origine naturelle basée sur l'érosion et le lessivage des sols ; les secondes seraient possiblement dues à l'utilisation d'engrais.

Globalement les concentrations en **fer** sont faibles mais peuvent s'élever localement, notamment à proximité de l'industrie de tannerie. Il est possible que l'origine des contaminations soit due à la corrosion des canalisations ou à l'emploi de sels de fer en tant que coagulant.

4.2.4 Oligo-Miocène

Dans la zone où se concentrent les ouvrages propres à l'Oligo-Miocène ne sont répertoriés que très peu de zones urbanisées et presque aucune culture irriguée. De plus, ne sont comptées que seulement trois ressources minières de production de matériaux et deux industries agro-alimentaires. Ainsi, *a priori* ce ne sont pas ces pressions en surface qui pourraient expliquer d'éventuelles concentrations élevées mais plutôt une origine naturelle.

Les **conductivités électriques** les plus élevées sont rencontrées dans les villes et villages. Leur origine serait alors liée aux rejets des eaux usées.

La même observation peut être faite pour les **nitrates** et les **chlorures**. Leur présence serait liée aux zones urbanisées et à leurs rejets d'eaux usées.

Les concentrations de **sodium**, de **fluorures** et de **sulfates** sont faibles sur l'ensemble de la zone.

Les concentrations en **fer** paraissent, en comparaison avec les autres entités chimiques, anormalement élevées par rapport à leur norme de potabilité. Et ce, malgré l'absence de pression en surface dues aux industries ou ressources minières. Il semblerait donc que l'origine de telles valeurs de concentration soit naturelle et liée à la composition du sol. Des phénomènes de lessivages de minéraux tels que la pyrite ou l'hématite sont également possibles.

4.2.5 Paléocène

Les ouvrages du Paléocène figurent surtout au nord-ouest, près de Dakar et Thiès. Cette zone compte de nombreuses ressources minières avec production de matériaux de construction, de phosphate d'alumine et d'argile céramique. Des industries agro-alimentaires ainsi que des verreries sont également présentes. Vu les ouvrages peu profonds et les niveaux de nappe faibles, il est possible que l'origine des éventuelles contaminations soit liée à ces pressions en surface. De plus, la zone compte de vastes étendues agricoles ainsi que des sites fortement urbanisés comme Thiès et Mbour.

Les **conductivités électriques** sont particulièrement élevées et probablement dues aux rejets industriels et domestiques.

Les concentrations en **nitrate** sont plutôt faibles malgré la présence de zones agricoles.

Il est observé que les concentrations en **sodium**, en **chlorures**, **fluorures** et **sulfates** sont plus élevées dans la zone au sud de Thiès et à l'est de Mbour. Cependant, les mesures datent des années 1970 et n'ont pas été actualisées. Il est donc possible qu'elles reflètent une ancienne contamination. Il y a donc un intérêt, dans le cadre de la campagne d'échantillonnage mai-juin 2021, à effectuer des mises à jour de ces ouvrages.

Des concentrations élevées en **fer** sont mesurées à l'ouest de la zone. Vu le grand nombre d'industries et de ressources minières, il est possible que leur présence soit due aux rejets de celles-ci.

4.2.6 Quaternaire

La zone du Quaternaire compte des ressources minières de tourbes localisées à l'ouest du Littoral mais aussi une industrie pétrolière, une agro-alimentaire et une verrerie disséminées dans la zone. Le travail de télédétection a permis de mettre en évidence de vastes étendues d'agriculture et d'irrigation le long de la côte mais peu de zones urbanisées. Vu la faible profondeur des ouvrages et les niveaux de nappe peu profonds, ces différentes pressions en surface pourraient tout à fait être à l'origine d'éventuelles contaminations ou concentrations élevées.

Les **conductivités électriques** sont globalement faibles mais leurs valeurs augmentent à proximité de la côte. L'origine peut être naturelle (intrusions salines) ou anthropique (présence de tourbes, de cultures irriguées). Si proche de la côte, il est possible que des pompes (pour l'agriculture) ou rabattements (pour les ressources minières) intensifs de l'aquifère aient provoqué ces potentielles intrusions. Cela sera vérifié lors des analyses chimiques des rapports Na^+/Cl^- de l'aquifère.

Les quelques valeurs plus élevées de **nitrate** sont situées le long de la côte dans les zones particulièrement sujettes à une agriculture intensive. Ainsi, leur présence est probablement due à l'usage d'engrais.

Les concentrations de **sodium** et de **chlorures** sont faibles mais quelques valeurs plus élevées sont observées le long de la côte à proximité des mines de tourbes. Ces dernières pourraient être liées à des intrusions salines. Plus à l'intérieur des terres, au nord près de Louga, les concentrations en chlorures semblent plus élevées. Il est possible que cette zone fasse l'objet d'une dissolution de certains minéraux ou que le traitement des eaux par les chlorures ait été mal exécuté.

Le Quaternaire ne semble pas être touché par des contaminations aux **fluorures**.

Les concentrations en **sulfates** sont globalement faibles mais augmentent dans les zones irriguées le long de la côte. Leur origine est potentiellement agricole ou industrielle en raison de la présence de mines de tourbes.

Les concentrations en **fer** sont anormalement élevées dans la zone comparé aux normes de potabilité. Vu le nombre d'ouvrages concernés, il est peu probable que l'origine soit une corrosion des puits. De plus, étant donné que les points fortement concentrés ne sont pas forcément corrélés avec la présence d'industries ou de mines à l'intérieur des terres, une origine industrielle est également peu probable. Finalement, il se pourrait que la contamination soit naturelle, liée à la composition des sols.

4.3 Synthèse des observations

Au vu de la superficie du Bassin Arachidier ($46\ 387\ km^2$), il est délicat d'interpréter l'agencement spatial des concentrations et conductivités électriques mesurées. En effet, la qualité des eaux souterraine est variable et fonction du contexte hydrogéologique local et régional (DGPRE, 2020b).

Cependant, à l'échelle de la zone d'étude, il apparaît tout de même que la qualité de l'eau tant de surface que souterraine est notamment liée aux facteurs suivants (DGPRE, 2020b) :

- à la présence de zones irriguées et toutes autres activités agricoles (contamination des aquifères par des intrants agricoles tels que des nitrates, sulfates et autres fertilisants, engrains, pesticides, ...)
- le développement de zones urbanisées et la présence d'unités industrielles et/ou de ressources minières (contamination par rejets d'eaux usées, mauvaise gestion des déchets, ...)
- à des intrusions d'eaux salines d'origine diverse

Ainsi, dans l'état actuel des choses et sans aucune analyse chimique, l'interprétation spatiale pourrait témoigner d'une contamination d'ordre plutôt naturelle dans le Maastrichtien avec présence d'une bande salée et teneurs élevées en fluorures certainement liée à la minéralisation des formations. Globalement, les teneurs en fer sont élevées sur l'ensemble de la zone ce qui pourrait également indiquer une contamination géogène en rapport avec le type de sol. À noter également que les concentrations élevées en fer peuvent être dues à des phénomènes d'origine particulière dans l'eau.

Ces hypothèses seront vérifiées dans le chapitre 5 par analyses chimiques.

Dans la continuité du projet mené par la DGPRE visant à cartographier la qualité de l'eau souterraine du Bassin Arachidier, des cartes de vulnérabilité de l'eau seront réalisées. Des études plus locales et détaillées permettront la mise en place de ces cartes.

4.4 Stratégie d'échantillonnage

En vue d'améliorer la connaissance de la zone d'étude, une campagne d'échantillonnage a été organisée et devrait avoir lieu en mai 2021. Les points d'échantillonnage proposés seront explicités dans cette section. La Table 4.1 reprend par aquifère le nombre de points à échantillonner sur terrain. Des analyses de la chimie, des pesticides présents, des éléments traces ainsi que de la bactériologie sont demandés. Les cartes 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9 reprennent les différentes stratégies d'échantillonnage proposées respectivement pour la chimie, les pesticides, les éléments traces ainsi que la bactériologie. Car il est possible que certains ouvrages soient inaccessibles sur terrain, plus de points que prévus à la Table 4.1 sont proposés.

Type d'analyse	MAAS	PAL	EO	OM	CT	QUAT
Physico-chimie	25	25	40	25	35	40
Pesticides	5	5	5	5	15	25
Mineurs et traces (ML)	0	0	0	10	10	0
Bactériologie	0	10	10	5	10	10

TABLE 4.1 – Échantillonnage demandé par la DGPRE

D'un point de vue économique, afin de limiter à la fois les déplacements et le travail sur terrain, les analyses chimiques seront presque toujours effectuées pour les points d'échantillonnage de pesticides, d'éléments traces et de bactéries.

Aussi, d'un point de vue géologique, étant donné que les points sont choisis de manière spécifique, les résultats ne refléteront pas les concentrations de fond de la zone d'étude. En effet, le but de cette campagne est d'identifier, analyser et quantifier les problématiques de contamination.

En fonction du type d'analyse, certains ouvrages sont à privilégier. En effet, les puits destinés à l'**A**limentation en **E**au **P**otable (AEP) sont de manière générale peu profonds avec un faible niveau statique. Ils sont donc plus intéressants dans le cadre d'analyse de pesticides ou de bactéries. Ainsi, pour ces analyses, approximativement 70 % des points choisis sont des puits AEP.

Pour les analyses chimiques, il est préférable d'obtenir un équilibre entre les différents types d'ouvrages (50 % de forages et 50 % de puits peu profonds) afin d'obtenir un jeu de données chimiques homogène.

La disposition spatiale des points d'échantillonnage est également importante. En effet, il est intéressant d'une part d'effectuer les analyses de pesticides dans des zones agricoles et d'autre part celles concernant la bactériologie à proximité des zones urbanisées. Il est également préférable d'effectuer les analyses des métaux en traces près de ressources minières ou d'industries. Finalement, points d'échantillonnage physico-chimiques seront choisis de manière à couvrir au mieux la zone d'étude. À noter qu'il est inutile d'effectuer de telles analyses si une donnée récente est déjà connue.

Des cartes plus précises ont été fournies au personnel sur terrain. Sur ces cartes ont également été représentées des solutions alternatives dans le cas où les ouvrages proposés sont hors services, abandonnés, introuvables, ... Sur terrain, le personnel disposera d'une sonde multi-paramétrique ainsi que du matériel d'échantillonnage standard. Si l'ouvrage proposé est un piézomètre, une pompe devra être utilisée.

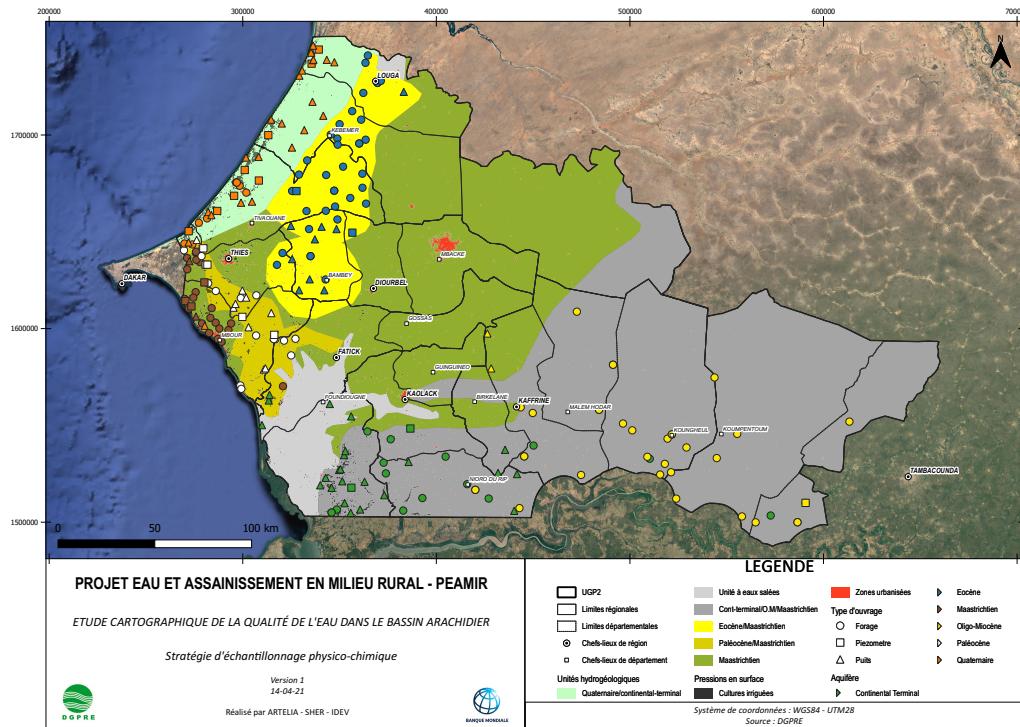


FIGURE 4.6 – Stratégie d'échantillonnage physico-chimique

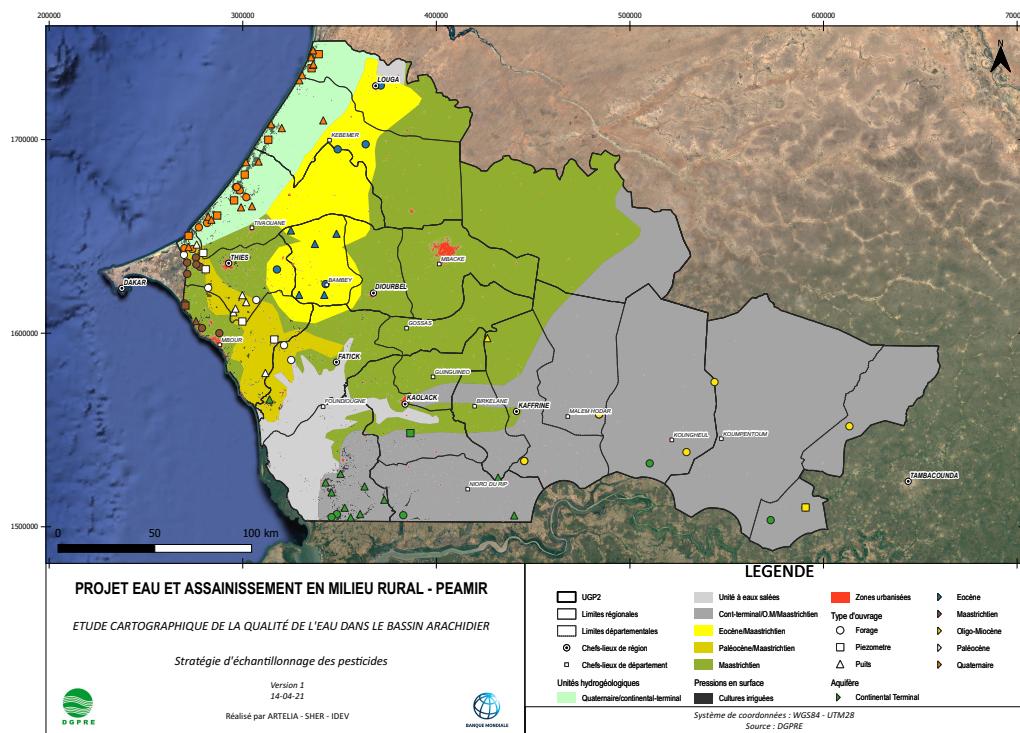


FIGURE 4.7 – Stratégie d'échantillonnage des pesticides

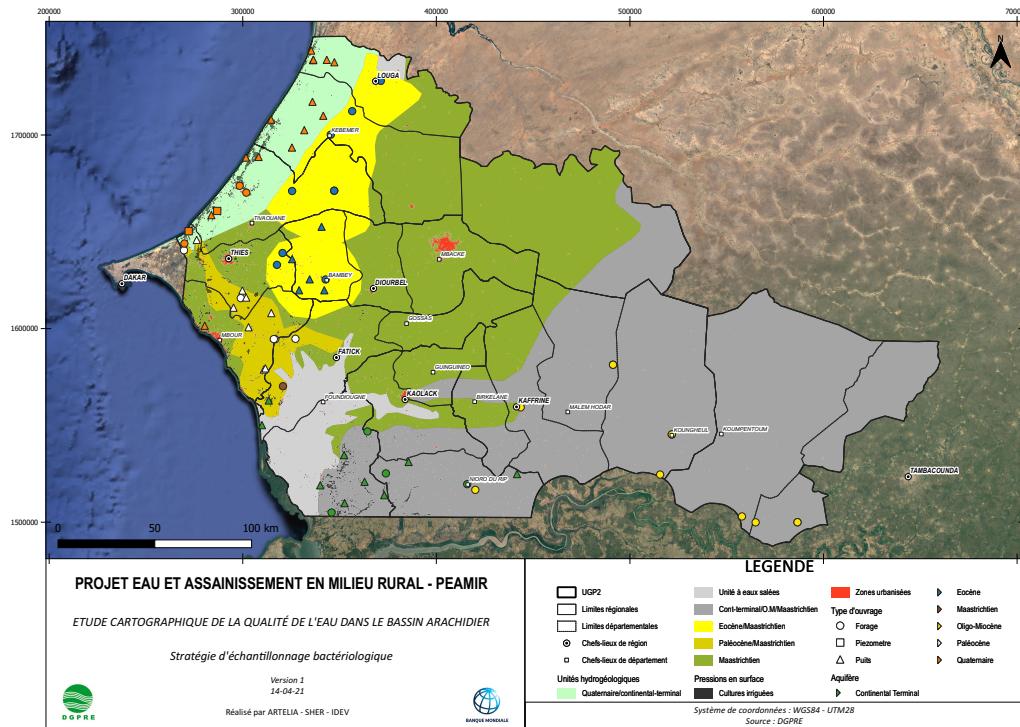


FIGURE 4.8 – Stratégie d'échantillonnage bactériologique

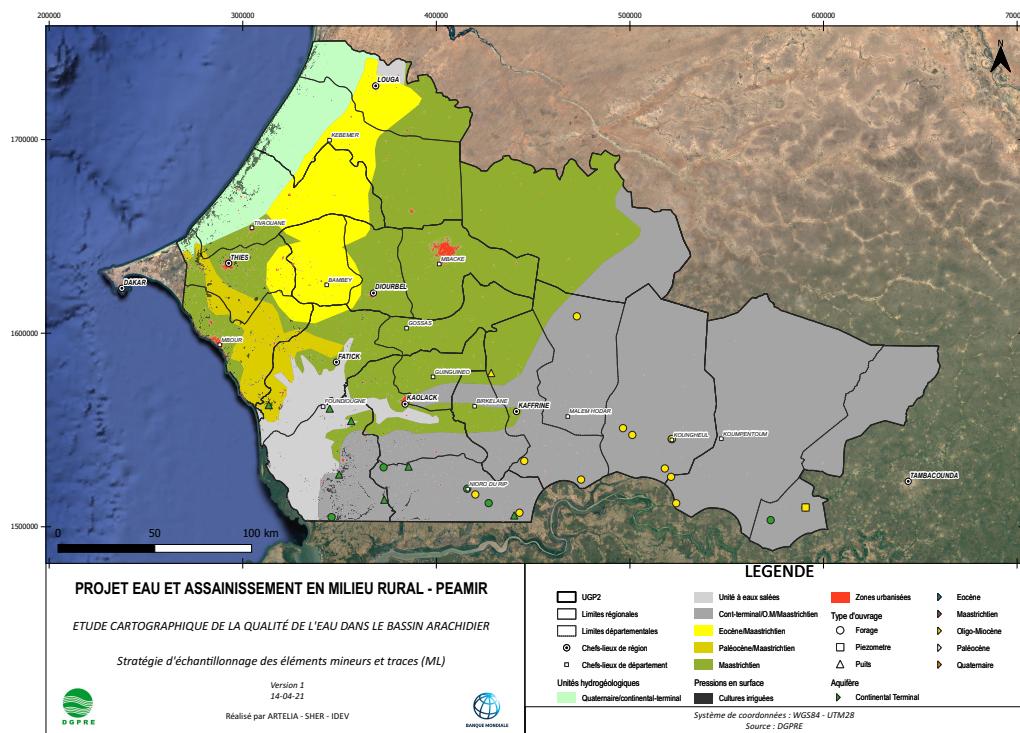


FIGURE 4.9 – Stratégie d'échantillonnage des éléments mineurs et traces (ML)

Chapitre 5

Étude hydrochimique des eaux souterraines du Bassin Arachidier

Ce chapitre a pour but d'introduire et d'interpréter les différentes analyses chimiques par aquifère dans le but d'en retirer des informations quant à la signature hydrochimique des eaux souterraine, l'origine de certains ions, de la salinité, ...

Avant d'analyser les données de concentrations chimiques, l'influence des conditions laboratoire et *in situ* sur le pH ainsi que la conductivité électrique sera discutée. Pour ce faire, des analyses statistiques ainsi que des matrices de corrélation seront mises en place. Comme explicité au chapitre 2, la base de données généralisée créée se base sur différents travaux, études et campagnes d'échantillonnage concernant le Bassin Arachidier. Ainsi, selon la source de données, les conditions laboratoire sont parfois préférées à celles *in situ* (et inversement). En raison des phénomènes de dégazage, les pH et les conductivités électriques diffèrent selon les conditions lors de la mesure. Il est dès lors important de vérifier la corrélation entre ces deux types de mesures afin d'assurer des comparaisons plausibles et vraisemblables.

Après discussion des conditions laboratoire et *in situ*, les analyses chimiques seront alors menées. Les diagrammes de Piper permettront de définir, par aquifère, les différents faciès hydrochimiques de l'eau souterraine. Une approche multi-variée soutenue par le développement de matrices de corrélation ainsi que la mise en place des SOMs (« *Self Organizing Map* ») permettra de grouper les échantillons de chaque aquifère en 4 clusters selon leur signature hydrochimique.

Ensuite, des hypothèses quant à l'origine des intrusions salines (*i.e* intrusions d'eau de mer, mélange avec d'anciennes saumures ou dissolution évaporitique) seront proposées suite à l'analyse des graphes binaires Na^+/Cl^- ainsi que par celle des indices de saturation de la calcite et du gypse. L'analyse des ratios $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ mettra éventuellement en évidence l'occurrence des échanges cationiques ainsi que l'évolution de la signature de l'eau dans le sens de l'écoulement pour le Maastrichtien uniquement. En effet, cet aquifère est celui qui, au vu de sa lithologie argileuse, présente *a priori* le plus d'échanges cationiques. De plus, l'écoulement souterrain du Maastrichtien a pu être approximé grâce à la thèse écrite par Hélène Madioune.

Pour terminer, une proposition d'extension spatiale des intrusions sera présentée.

5.1 Conditions *in situ* vs laboratoires

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre, selon la source de données, le pH ainsi que la conductivité électrique sont soit mesurés dans des conditions *in situ* ou de laboratoire. Cependant, un changement de condition influence ces deux paramètres en raison notamment du phénomène de dégazage qui prend place. En effet, dans les conditions de laboratoire, l'échantillon n'est plus en équilibre avec son milieu. Ainsi s'en suit un phénomène de dégazage du CO₂ avec précipitation de la calcite et libération d'ions H⁺ provoquant alors une acidification ainsi qu'une diminution des conductivités électriques.

Aquifère	Statistiques	pH <i>in situ</i>	pH labo	Cond. <i>in situ</i>	Cond. labo
CT	Nombre de mesures	155	183	103	90
	Minimum	3.99	5.1	37	2
	Médiane	6.89	6.7	233	189
	Moyenne	6.94	6.70	628.14	421.02
	Maximum	10.4	8.9	5350	5080
EO	Nombre de mesures	77	463	46	282
	Minimum	6.2	6.1	308	8
	Médiane	7.6	7.5	776	504.5
	Moyenne	7.63	7.51	939.73	680.94
	Maximum	9.5	8.6	3760	5400
MAAS	Nombre de mesures	392	608	88	200
	Minimum	3	3.2	129	2
	Médiane	7.9	7.9	769	1209.5
	Moyenne	8.01	7.81	1325.92	1552.37
	Maximum	12.6	11.4	4770	6050
OM	Nombre de mesures	28	55	15	23
	Minimum	5.1	5.44	44	45
	Médiane	7.1	6.4	198	187
	Moyenne	7.11	6.44	326	271.13
	Maximum	9.5	7.8	1128	1165
PAL	Nombre de mesures	78	265	38	110
	Minimum	6.7	3.78	328	154
	Médiane	7.8	7.7	856	826
	Moyenne	7.99	7.63	1223.76	1128.29
	Maximum	9.6	9.7	6880	7000
QUAT	Nombre de mesures	47	129	43	88
	Minimum	5.68	3	160	102
	Médiane	7.8	6.6	424	267
	Moyenne	7.74	6.51	591.37	440.35
	Maximum	9.8	9.3	2420	3450

TABLE 5.1 – Statistiques des paramètres physiques par aquifère

La Table 5.1 reflète bien ces phénomènes. En effet, il est observé que les moyennes et médianes du pH et de la conductivité mesurées en laboratoire sont inférieures à celles mesurées *in situ* (à l'exception du Maastrichtien).

Il est également remarqué que la plupart des paramètres sont mesurés en laboratoire certainement en raison des conditions de travail sur terrain. Les valeurs de pH et de conductivité analysées dans ce travail sont donc principalement basées sur des mesures laboratoire et donc inférieures aux valeurs

réelles de l'eau souterraine du Bassin Arachidier. Les minima et maxima des pH ne semblent pas plausibles pour des eaux souterraines. Ces valeurs sont probablement dues à une mauvaise calibration du matériel de terrain ou de laboratoire.

Il est également observé que le Maastrichtien et le Paléocène présentent les conductivités électriques les plus élevées ce qui pourrait refléter la présence d'intrusions salines ou de forte la minéralisation des eaux. Le fait que ces deux aquifères soient caractérisés par des pH plus élevées peut alors signifier que ces intrusions sont à l'origine de la présence de saumures plutôt que d'origine d'eau météorique lessivant les sols (Debieche, 2002 ; Stigter, 2006, Bekkoussa et al., 2013).

5.2 Faciès hydrochimiques

Les diagrammes de Piper permettent une représentation graphique de la chimie des échantillons dans le but de finalement déterminer leur faciès hydrochimique (Piper, 1944). Les principaux cations (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+) et anions (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^-) y sont représentés sous la forme de deux diagrammes ternaires où les entités chimiques dominantes sont mises en évidence. Une fois projetés dans un losange, la position des points détermine le faciès hydrochimique de l'eau souterraine des aquifères. Les diagrammes de Piper peuvent également définir l'origine de certaines contaminations (Haselbeck et al., 2019). En effet, selon la position des ouvrages dans le diagramme, deux comportements sont identifiables : le rafraîchissement ainsi que l'intrusion des eaux salines.

La rencontre de l'eau de mer, riche en ions Na^+ et Cl^- , avec l'eau douce, caractérisée par la présence d'ions Ca^{2+} et HCO_3^- , donne place à des échanges cationiques. Les sites d'adsorption présents sur les sédiments en contact avec ces deux milieux permettent les échanges ioniques entre ces derniers tels que (Thomas et al., 2017) :

- Les sites d'adsorption des eaux douces sont dominés par des ions Ca^{2+} remplacés par des ions Na^+ lors d'une intrusion saline. En solution, il y a donc une augmentation des ions calcium et diminution des ions sodium.
- Les sites d'adsorption des eaux salées sont dominés par des ions Na^+ remplacés par des ions Ca^{2+} lors d'un rafraîchissement. En solution, il y a donc une augmentation des ions sodium et diminution des ions calcium.

À noter que, dans le milieu souterrain, les échanges cationiques prennent naturellement place entre l'eau et l'encaissant géologique (Thomas et al., 2017).

Le phénomène d'intrusion saline est typiquement observé dans les aquifères côtiers comme le Quaternaire où l'équilibre entre les eaux douces et marines est maintenu notamment grâce à leurs densités différentes. Lors de la rencontre entre ces deux milieux, une zone d'eau mixte se forme. Dans le cas d'une surexploitation de l'aquifère côtier, l'équilibre entre les eaux marines et douces est rompu ce qui peut provoquer une dissipation de la zone mixte (Thomas et al, 2017).

Il est également possible que la présence d'eaux souterraines salées soit liée à l'existence de saumures. Ainsi, la forte teneur en sel de ces eaux serait liée à des phénomènes d'évaporation et une intrusion d'eaux météorites pourrait dans ce cas jouer un rôle dans le rafraîchissement de l'aquifère (Thomas et al, 2017).

La Figure 5.1a présente l'ensemble des faciès hydrochimiques possibles des eaux souterraines en fonction de la disposition des points dans le losange. Les phénomènes d'intrusion et de rafraîchissement ainsi que les différents types d'eau y sont également représentés à la Figure 5.1b tel que :

- Les eaux douces, caractérisées par des concentrations élevées en Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-} mais faibles en Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- et NO_3^- , sont donc situés dans les coins inférieurs gauches des triangles.

- Les eaux salées, caractérisées par des concentrations élevées en Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- et NO_3^- mais faibles en Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-} , sont donc situés dans les coins inférieurs droits des triangles.

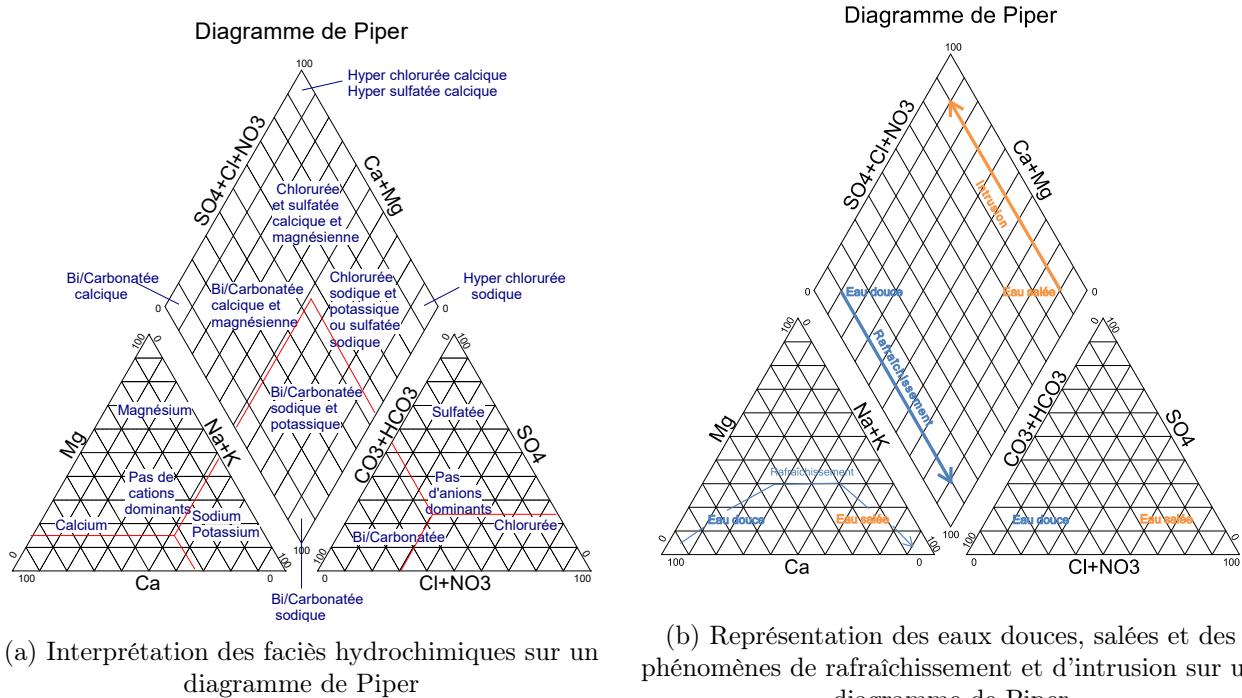


FIGURE 5.1 – Interprétation théorique d'un diagramme de Piper (Piper, 1994)

Dans le cadre de ce travail, les diagrammes de Piper ci-après ont été réalisés à l'aide du logiciel « DIAGRAMMES » mis en place par le Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2013). Il peut être intéressant de distinguer les ouvrages en fonction de leur type (*i.e* forage, piézomètre, puit ou non spécifié) afin de déterminer si ceux-ci ont une influence sur la composition de l'eau.

Il est possible, via ce logiciel, de représenter les valeurs de TDS (Total Dissolved Salts) par des cercles centrés sur les points¹. Cependant, selon la source de la donnée, l'auteur a préféré travailler soit en termes de résidu sec (RS), soit en termes de TDS. Il est dès lors intéressant de faire les liens entre ces deux paramètres afin de vérifier s'ils correspondent l'un avec l'autre.

Le RS est la somme des éléments présents en solution moins les éléments majeurs (majoritairement du HCO_3^-) perdus lors du séchage d'un litre d'eau à 180°C (BRGM, 1998). Le résidu sec est spécifique à une température mais celle-ci n'est que rarement précisée. Quant au TDS, il correspond à la somme de tous les éléments chimiques dissous dans l'eau et s'exprime en ppm.

La Figure 5.2 présente la corrélation entre le RS et le TDS selon l'approche de Kendall. Il est observé que les coefficients de corrélation sont élevés et proches de $1 \simeq 0.95$ ce qui signifie qu'il existe une relation linéaire positive forte entre ces deux paramètres. Cependant, il semble également que cette corrélation soit plus faible pour le Paléocène avec un coefficient égal à 0.63 certainement dû au fait que le Paléocène semble présenter deux populations différentes.

1. Plus les diamètres des cercles sont élevés, plus la valeur de TDS est élevée. Ainsi, le diamètre est proportionnel au TDS. Par souci de visibilité, les valeurs de TDS ont toutes été multipliées par un facteur 10.

Dans le but de vérifier que la corrélation entre ces paramètres est significative, les Valeurs P sont analysées. Si ces dernières sont inférieures à 0.05, alors les corrélations seront considérées comme étant significatives. À noter que les corrélations pour lesquelles les Valeurs P sont inférieures à ce seuil sont mises en évidence par des coefficients rouges sur la Figure 5.2.

Ainsi, il est possible de conclure que le résidu sec et le TDS sont liés. Dès lors, étant donné que la plupart des données sont exprimées en RS ces dernières seront utilisées à la place du TDS comme paramètre d'entrée dans le logiciel « DIAGRAMME ».

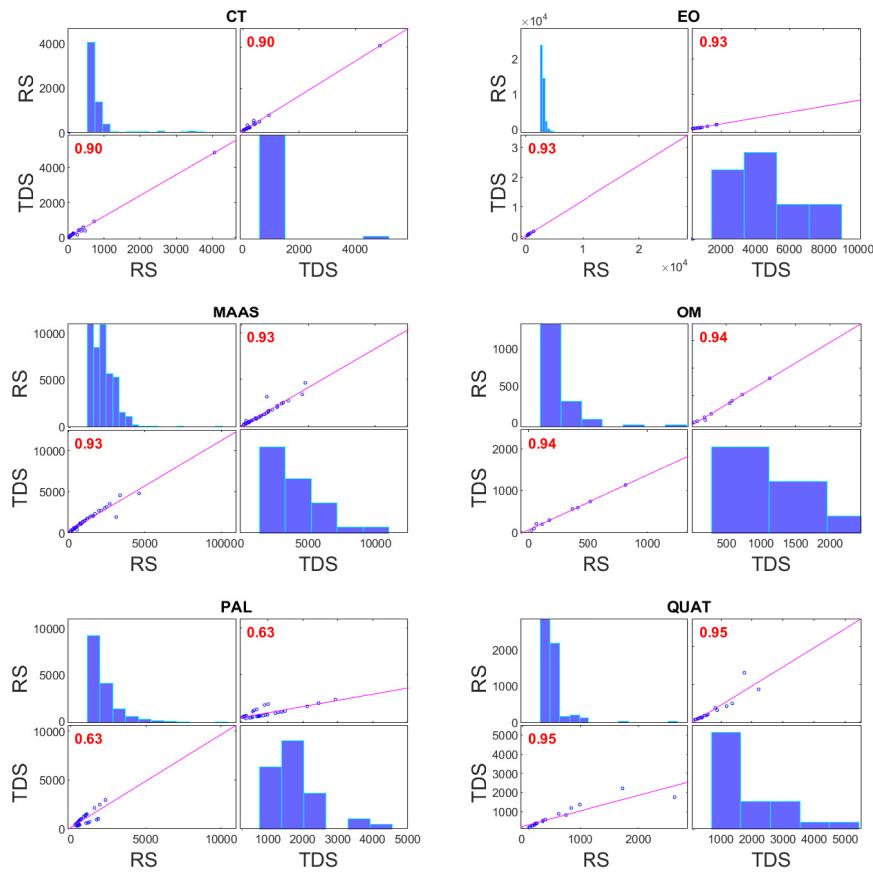
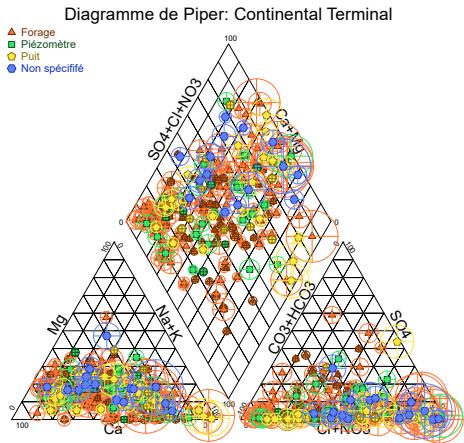
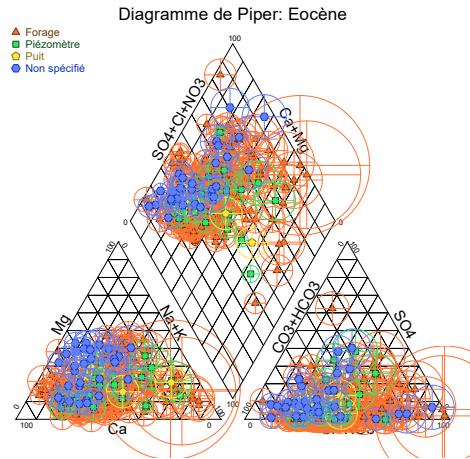


FIGURE 5.2 – Corrélation entre le résidu sec et le TDS

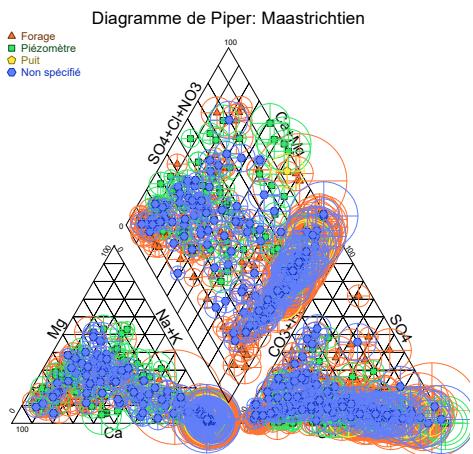
La Figure 5.3 présente les diagrammes de Piper de chaque aquifère. Premièrement, il est observé que le type d'ouvrage ne semble pas influencer les faciès hydrochimiques. Deuxièmement, les plus grandes valeurs de TDS sont caractéristiques des eaux au faciès plutôt chloruré sulfaté calcique propre aux eaux salées. Ainsi, les ouvrages concernés sont susceptibles de présenter une conductivité électrique élevée reflétant le degré de minéralisation des eaux. Ensuite, il est observé que les faciès varient selon les aquifères considérés. Ces faciès sont parfois chlorurés, carbonatés ou mixtes et témoignent des différents processus géochimiques et/ou de salinisation de la zone (DGPRE, 2018a). Pour plus de visibilité, une version des diagrammes de Piper sans mise en évidence des TDS est disponible à la Figure 5.4. Pour facilité la lecture, l'ensemble des diagrammes est repris en version A4 dans la section G de l'Annexe.



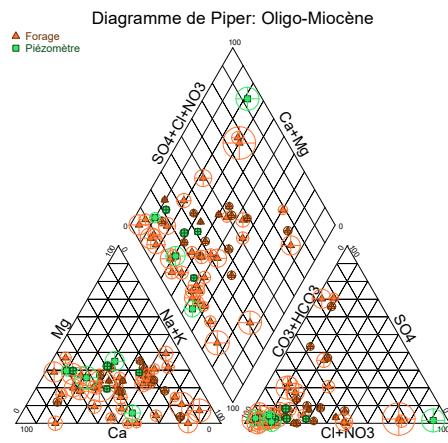
(a) Diagramme de Piper du Continental Terminal



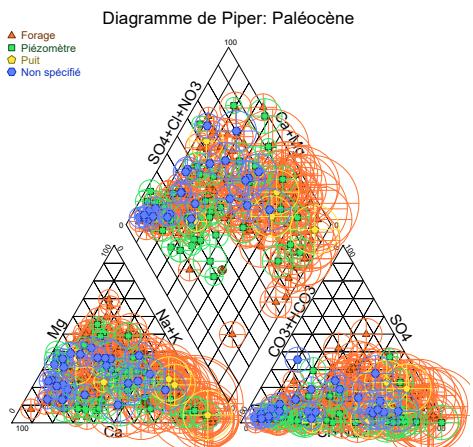
(b) Diagramme de Piper de l'Éocène



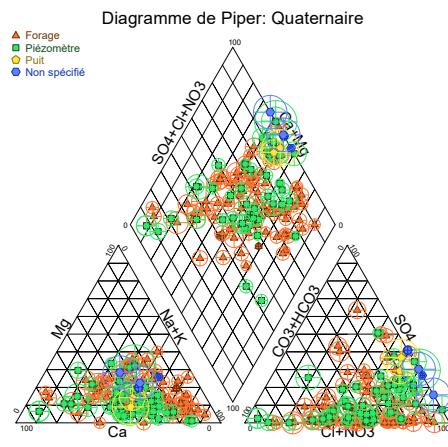
(c) Diagramme de Piper du Maastrichtien



(d) Diagramme de Piper de l'Oligo-Miocène

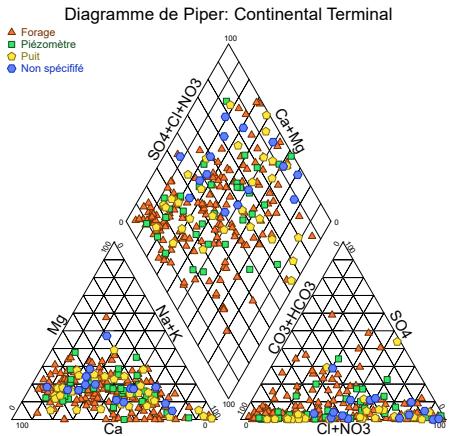


(e) Diagramme de Piper du Paléocène

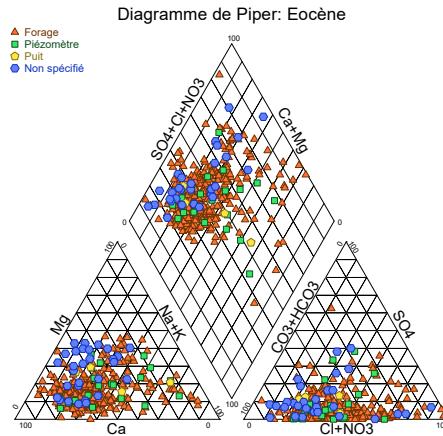


(f) Diagramme de Piper du Quaternaire

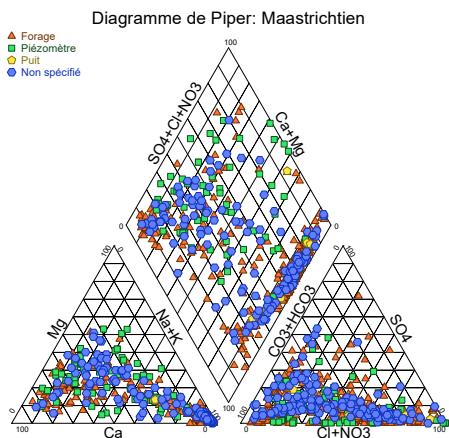
FIGURE 5.3 – Interprétation des faciès hydrochimiques par l'analyse des diagrammes de Piper avec TDS



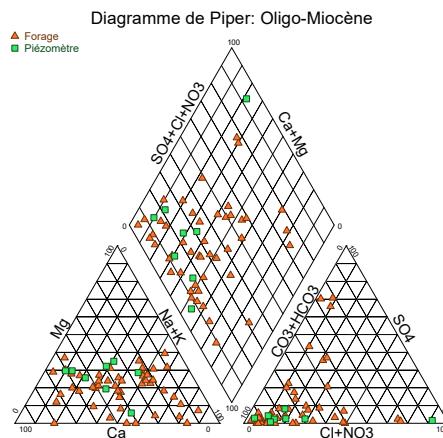
(a) Diagramme de Piper du Continental Terminal



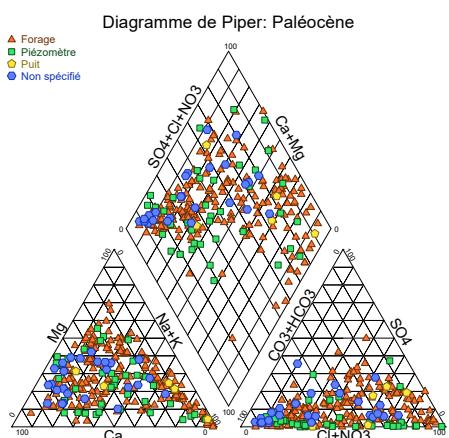
(b) Diagramme de Piper de l'Éocène



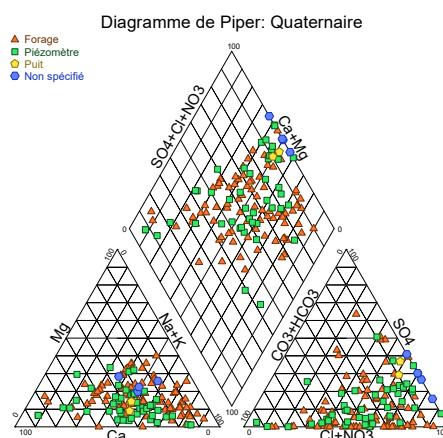
(c) Diagramme de Piper du Maastrichtien



(d) Diagramme de Piper de l'Oligo-Miocène



(e) Diagramme de Piper du Paléocène



(f) Diagramme de Piper du Quaternaire

FIGURE 5.4 – Interprétation des faciès hydrochimiques par l'analyse des diagrammes de Piper sans TDS

Ci-dessous sont répertoriées et identifiées les tendances générales des faciès des différents aquifères :

- Le faciès hydrochimique du Continental Terminal est hétérogène et pourrait refléter de la diversité des processus en place.
- L'Éocène présente un faciès plutôt bi-carbonaté calcique et magnésien reflétant la dissolution des calcaires lors de l'infiltration des eaux. Actuellement, en raison des conditions *in situ*, la calcite a tendance à précipiter (*cfr.* section 5.4.2).
- Le Maastrichtien présente deux tendances. La première au faciès principalement chloruré-carbonaté, sodique et potassique ; la deuxième plutôt bi-carbonaté calcique magnésien.
- L'Oligo-Miocène présente un faciès plutôt bi-carbonaté calcique et magnésien très peu chloruré.
- Le Paléocène à la fois bi-carbonaté calcique magnésien mais également chloruré sodique potassique en raison des concentrations élevées de chlorures mesurées.
- Le Quaternaire est plutôt mixte avec une tendance légèrement chlorurée sodique et potassique.

Au vu du nombre élevé d'échantillons par aquifère et de la superficie de la zone d'étude, il est difficile de tirer des conclusions précises quant aux différents faciès. En effet, les processus géochimiques ainsi que les procédés de salinisation des eaux forment un réseau complexe. Des études plus locales et ciblées pourraient cependant permettre de mieux appréhender ces phénomènes.

De manière générale, les faciès hydrochimiques sont soit à tendance bi-carbonatée soit chlorurée. La première serait liée soit à la dissolution de calcite soit à l'oxydation de matière organique. Cela sera discuté à la section 5.4.2. Quant au faciès chloruré, il serait en relation avec des zones saumâtres ou salées (DGPRE, 2018a). La minéralisation des anions est dominée par les ions Cl^- et la présence de concentrations localement élevées en SO_4^{2-} pourrait indiquer des processus tels que la dissolution d'évaporites (Travi et al., 2017).

Ainsi, il est observé qu'un même aquifère peut présenter un faciès hydrochimique hétérogène. En effet, le jeu de données utilisé est important et la zone d'étude est vaste, ainsi il est attendu que les processus géochimiques en place forment un système complexe à analyser. Ainsi, avant de définir les mécanismes en jeu, il est utile de procéder à une analyse multi-variée, basée sur l'étude de matrices de corrélation, suivie par la définition des groupements de faciès hydrochimiques semblables par les SOMs (« *Self Organizing Map* »).

5.3 Analyses multi-variées

Une analyse multi-variée basée sur la mise en place de calculs de corrélation et de matrices auto-organisantes (**SOMs**) pourrait éventuellement permettre de dégager de nouvelles tendances et caractéristiques pour les aquifères du Bassin Arachidier comme les faciès hydrochimiques ou les conditions d'oxydoréduction (Thomas et al, 2017).

L'établissement des SOMs permettra de diviser l'ensemble des données de la zone d'intérêt en différents groupes en fonction de la ressemblance de leurs paramètres.

Les sections suivantes présentent les matrices de corrélation pour chaque aquifère suivies d'une proposition de matrices auto-organisantes d'abord pour l'ensemble du jeu de données puis par aquifère. Il est intéressant de procéder dans cet ordre car les fortes corrélations observées permettront de choisir au mieux les paramètres d'entrées pour les SOMs.

5.3.1 Matrice de corrélation

La réalisation des matrices de corrélation permet la mise en évidence des relations entre les différentes entités chimiques mesurées dans le Bassin Arachidier.

Selon la distribution des données, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour qualifier ces relations :

- la méthode de Pearson si les relations sont linéaires
- la méthode de Kendall si les relations sont non-linéaires

Dans le cadre de ce travail, au vu de la distribution non-linéaire et asymétrique des données, la méthode de Kendall a été préférée.

En effet, la Figure 5.5 présente les histogrammes pour certaines entités chimiques en considérant l'entièreté du jeu de données. Il apparaît que la distribution des concentrations est asymétrique avec des fréquences d'occurrence plus élevées pour de faibles teneurs².

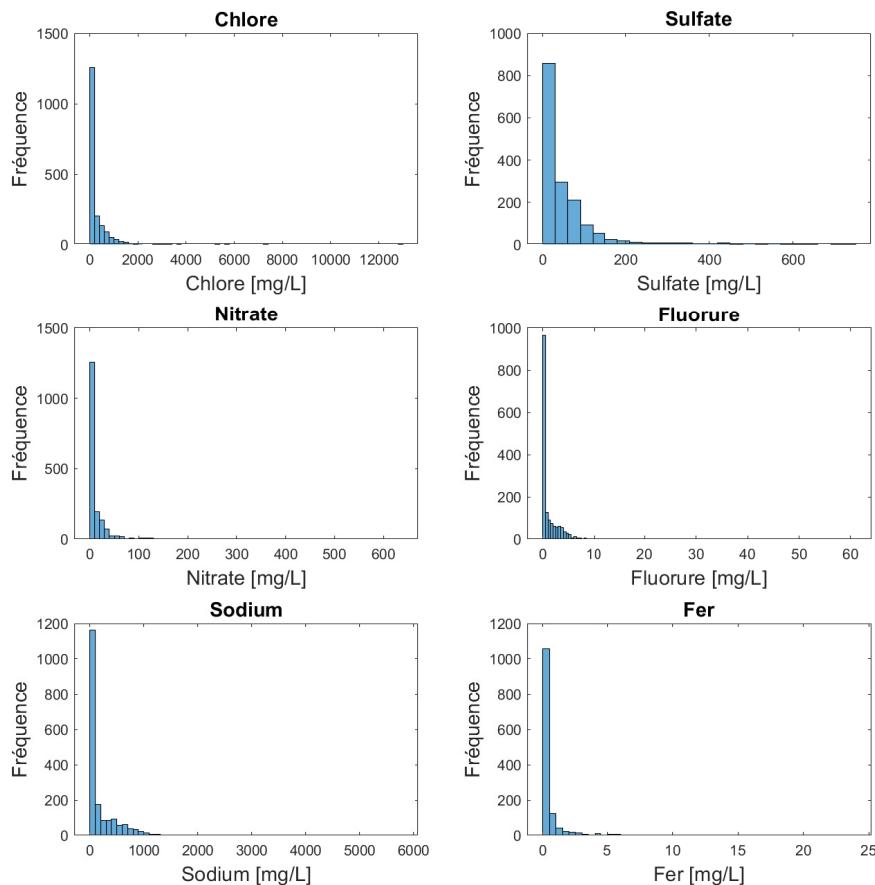
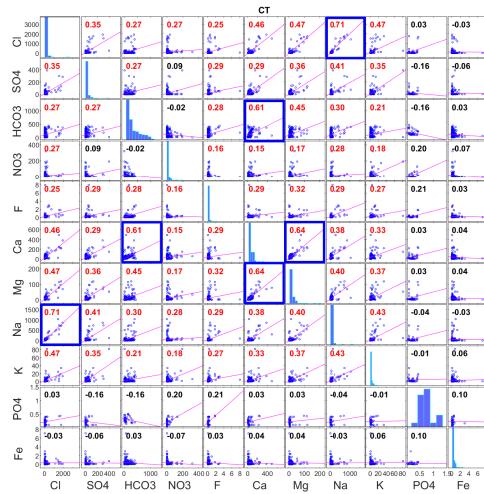


FIGURE 5.5 – Histogrammes de certaines entités chimiques pour l'ensemble du jeu de données

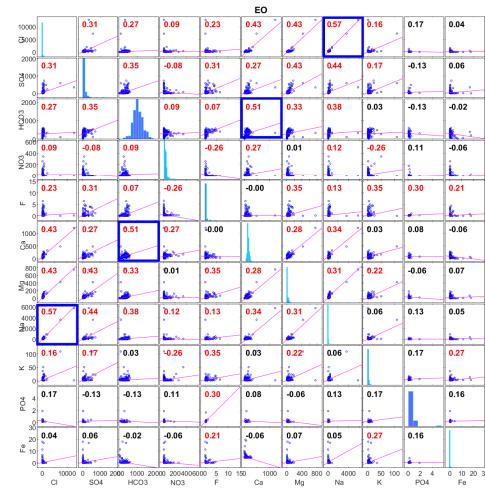
La Figure 5.6 présente par aquifère les matrices de corrélation des éléments chimiques uniquement. Les coefficients inscrits en rouge sont ceux pour lesquels les paires de variables considérées présentent une corrélation significative (*i.e* pour lesquelles la **PValeur** est inférieure à 0.05). Les cases encadrées en bleu sont celles pour lesquelles la corrélation est supérieure à |0.5|. Les relations entre les entités concernées seront donc considérées comme étant fortes.

En Annexe (section H) sont reprises les Figures dans un format plus large. Ces dernières sont également accompagnées d'un tableau récapitulatif distinguant les corrélations fortes, faibles, positives, négatives ou non significatives entre elles.

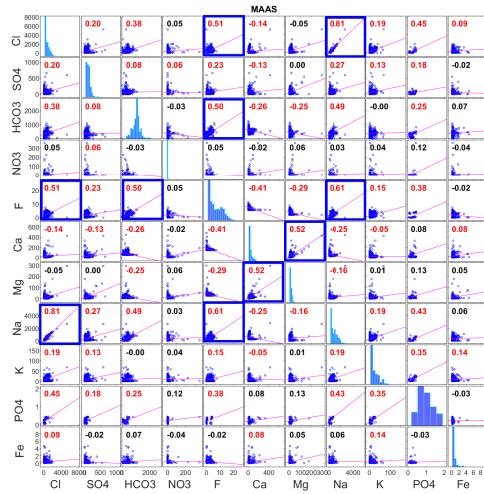
2. A noter que la Figure 3.1 aurait pu suffire pour tirer cette conclusion. En effet, il y est observé que la plupart des données présentent de faibles concentrations à l'exception de quelques *outliers* statistiques.



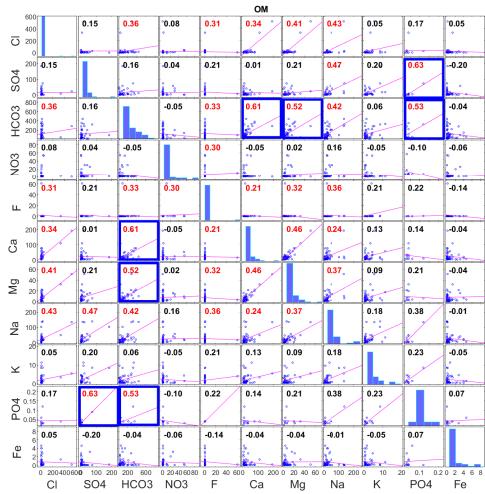
(a) Matrice de corrélation du Continental Terminal



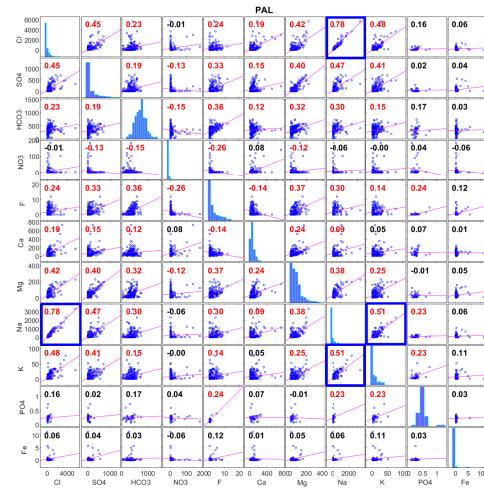
(b) Matrice de corrélation de l'Éocène



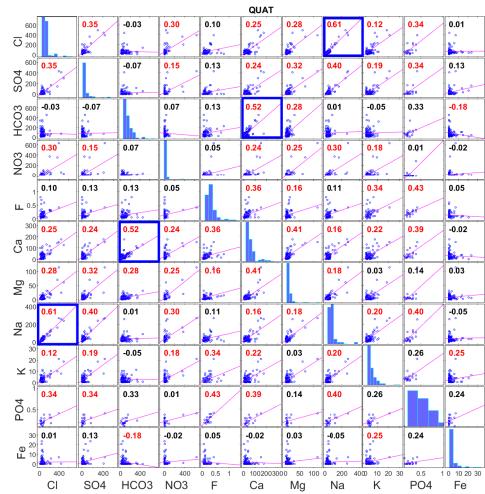
(c) Matrice de corrélation du Maastrichtien



(d) Matrice de corrélation de l'Oligo-Miocène



(e) Matrice de corrélation du Paléocène



(f) Matrice de corrélation du Quaternaire

FIGURE 5.6 – Matrices de corrélation en fonction de l'aquifère

Il est observé que la plupart des corrélations fortes positives sont les relations entre les couples suivants :

- Na^+/Cl^- reflétant le caractère salin de l'eau avec faciès chloruré avec possible dissolution de la halite (Bekkoussa et al., 2013)
- $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$, $\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ relations classiques des faciès bi-carbonaté calcique magnésien (Bekkoussa et al., 2013)

Des corrélations négatives sont également observées entre :

- K^+/NO_3^- , $\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ reflétant un faciès sodique potassique
- $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ reflétant un faciès plutôt potassique

Ainsi, en plus de préparer les paramètres d'entrées pour les SOMs, une étude de corrélations permet également de faire un parallèle avec les diagrammes de Piper. Il est donc attendu, au vu des corrélations, d'observer des liens forts entre Na^+/Cl^- , $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ mais également entre le fluorure avec le sodium et les chlorures. Spécifiquement aux formations aquifères de l'Oligo-Miocène, il est attendu que le phosphate et les sulfates présentent une corrélation forte. Les nitrates et les sulfates sont quant à eux parfois corrélés négativement tout comme les couples $\text{Ca}^{2+}/\text{F}^-$. En raison des faibles échantillons disponibles dans la base de données, les matrices de corrélation ne sont que peu fréquemment significatives pour le fer.

Lors des choix de paramètres d'entrées pour les SOMs, il est dès lors préférable de séparer les ions à forte corrélation dans le but de mieux visualiser les liens avec le reste des ions. Une attention particulière sera donnée aux valeurs non-significatives repérées dans cette section.

5.3.2 SOMs sur l'ensemble du Bassin Arachidier

Les matrices auto-organisantes, aussi appelées SOMs (« *Self Organizing Map* »), ont été réalisées via la SOM TOOLBOX de MATLAB et sont tirées d'une méthode statistique multi-variée non hiérarchique basée sur l'algorithme d'un système neuronal (Kohonen, 2001). Les SOMs se présentent sous forme de matrices bi-dimensionnelles (ici, 20x15) où chaque maille est liée à son voisinage propre. Chaque ouvrage est alors associé à celui dont la composition chimique est la plus semblable. La première matrice est dite « *des composants* », la deuxième est appelée la « *matrice U* » (Vesanto et al., 2000).

La *matrice des composants* permet de définir les corrélations entre les différents paramètres d'entrée. Ainsi, si pour au moins deux paramètres les mêmes zones du maillage sont colorées de la même manière, alors les paramètres en question sont corrélés entre eux.

La *matrice U* représente les distances euclidiennes entre une maille et son voisinage. Plus la distance calculée est grande, plus les noeuds voisins ont des faciès différents et inversement. C'est cette matrice en particulier qui permettra de définir les groupements d'ouvrages semblables.

Dans cette section, les SOMs prennent en compte l'ensemble du jeu de données sans distinction vis-à-vis de l'aquifère. En effet, au vu de la section précédente, les mêmes types de corrélation sont attendus quel que soit l'aquifère considéré. Avant d'effectuer une analyse spécifique à chaque aquifère, il est intéressant d'effectuer les matrices auto-organisantes sur l'ensemble de 1 793 dans le but de définir trois groupements d'échantillons semblables entre eux et éventuellement distinguer les faciès hydrochimiques bi-carbonatés calcique magnésien, mixte et chloruré sodique-potassique ou sulfaté-sodique.

Étant donné que les combinaisons de paramétrage d'entrée sont nombreuses, il est intéressant de procéder par itération de tentatives. Ces dernières sont reprises dans la Table 5.2 et décrites à la page suivante.

Ainsi, les itérations sont les suivantes :

1. dans un premier temps, l'ensemble des concentrations chimiques ainsi que la profondeur de l'ouvrage, le niveau statique et le pH seront considérés comme paramètres d'entrée. Leurs valeurs seront considérées sans approche logarithmique. Le but étant de visualiser de manière globale les corrélations entre l'ensemble des paramètres et de constater lesquels d'entre eux ne sont liés à aucun autre.
2. Ensuite, puisqu'ils ne sont *a priori* pas corrélés avec les autres paramètres, la profondeur de l'ouvrage, le niveau statique et le pH ne seront plus considérés lors de la seconde tentative. Cela permettra de visualiser quels ions sont fortement corrélés entre eux dans le but de ne considérer qu'un des deux par la suite. Pour plus de contraste, une échelle logarithmique sera utilisée.
3. Pour finir, les concentrations chimiques du NH_4^+ , Na^+ et Ca^{2+} ne seront pas considérés. La matrice U de cette tentative sera présentée dans le but de regrouper les ouvrages selon 3 clusters différents. Les différents groupes seront alors présentés sur un diagramme de Piper ainsi que sur une carte.
4. L'analyse des conditions REDOX sera également effectuée en utilisant comme paramètres d'entrée le pH et les ions SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NH_4^+ et le fer.

SOMs	Paramètres d'entrées	Log ?	Objectif
1	Concentrations chimiques Profondeur d'ouvrage Niveau statique pH	✗ ✗ ✗	<ul style="list-style-type: none"> • Première visualisation des données • Définir les entrées qui ne sont corrélées avec aucune autres • Première approche qui sera affinée par itération de tentatives
2	Concentrations chimiques	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Définir les entrées qui sont corrélées fortement avec d'autres
3	Concentrations chimiques <u>SAUF</u> : NH_4^+ , Na^+ et Ca^{2+}	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Faire la distinction entre 3 faciès hydrochimiques • Développer les diagrammes de Piper correspondant et montrer la répartition spatiale
4	pH SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NH_4^+ et le fer	✗ ✓	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en évidence les conditions REDOX

TABLE 5.2 – Description des tentatives d'application des SOMs sur l'ensemble du jeu de données

5.3.2.1 Tentative 1

La Figure 5.7 présente la matrice des composants de l'ensemble des entités chimiques mais également de la profondeur de l'ouvrage, du niveau statique, de la conductivité électrique et du pH.

Premièrement, il ne semble y avoir aucun lien entre la profondeur de l'ouvrage, le niveau statique et le pH avec les concentrations chimiques. Cependant, les Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} ont un impact sur la conductivité électrique.

Deuxièmement, la zone caractérisée par un rapport Na^+/Cl^- élevé correspondant à un rafraîchissement ne présente pas de corrélation franche avec d'autres paramètres. Cependant, les zones correspondant à une contamination anthropique (*i.e* un rapport Na^+/Cl^- faible) sont corrélées avec le nitrate, l'ammonium et les sulfates.

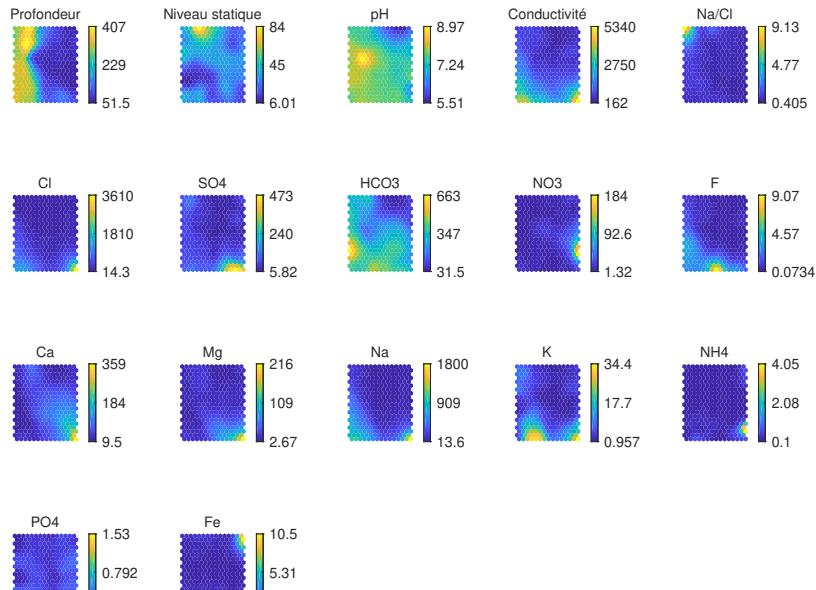


FIGURE 5.7 – Résultats des SOMs pour l'ensemble des paramètres physico-chimiques

5.3.2.2 Tentative 2

Afin de mieux visualiser les liens entre les différents paramètres, la Figure 5.8 présente les entités chimiques exprimées en logarithme base 10 tandis que la profondeur d'ouvrage, le niveau statique et le pH ne sont plus considérés. En effet, ils ne sont *a priori* corrélés avec aucun autre paramètre d'entrée. De nouveau, la corrélation entre Na^+ et Cl^- semble évidente et les zones aux concentrations élevées en nitrate, ammonium et phosphate seraient *a priori* sujettes à des contaminations anthropiques. Dans le coin supérieur gauche de la Figure se présente une zone très faiblement minéralisée et conductrice. La conductivité électrique semble être liée aux chlorures, aux carbonates, aux fluorures, au sodium ainsi qu'au potassium.

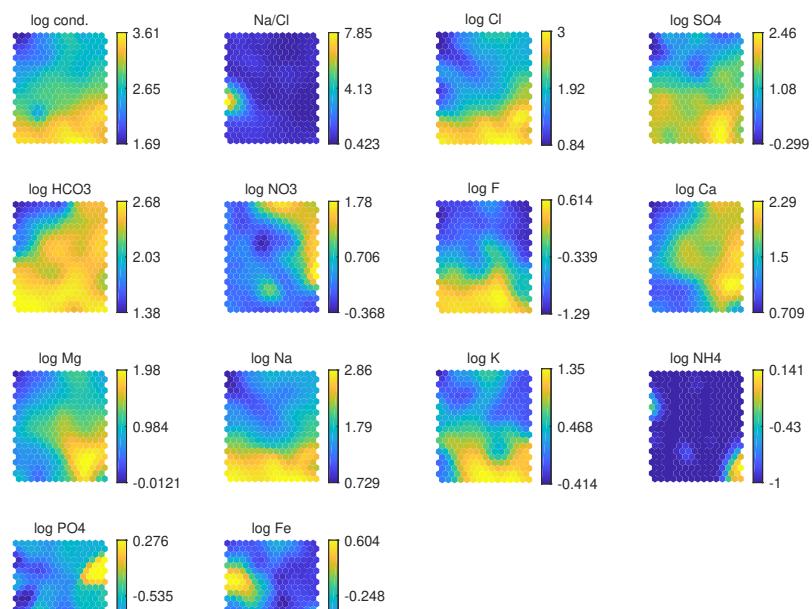


FIGURE 5.8 – Résultats des SOMs pour un ensemble réduit des paramètres physico-chimiques

5.3.2.3 Tentative 3 : influence de la minéralogie

Cette sous-sous-section présente une proposition de groupement d'échantillons présentant des faciès hydrochimiques semblables possiblement dûs aux interactions entre l'eau souterraine et son environnement, à des phénomènes de rafraîchissement ou apports anthropiques divers. Dans le but de visualiser au mieux les liens entre les différentes entités chimiques, certains ions tels que le Ca^{2+} et le Na^+ n'ont pas été représentés car ils sont très fortement liés respectivement au HCO_3^- et Cl^- . De plus, au vu de l'organisation des *matrices des composants* pour le NH_4^+ , ce paramètre ne sera pas considéré car il constituerait un groupement à lui seul. De plus, ce paramètre doit être considéré avec précaution car il demande une certaine rigueur lors des protocoles d'analyses. Rigueur qui, au vu des conditions des campagnes d'échantillonnage, n'a probablement pas été respectée.

La Figure 5.9 illustre la *matrice des composants* pour les paramètres chimiques principaux en vue de présenter trois faciès hydrochimiques différents. Ainsi, dans le but d'analyser l'influence de la minéralogie, les SOMs sont appliquées sur 11 paramètres dont certains éléments majeurs (Cl^- , NO_3^- , K^+ , SO_4^{2-}), le rapport Na^+/Cl^- permettant de mettre en évidence l'origine de la salinité, la conductivité électrique ainsi que des ions tels que F^- , Mg^{2+} , HCO_3^- , PO_4^{3-} et le fer permettant d'indiquer d'éventuelles contaminations d'origine anthropique.

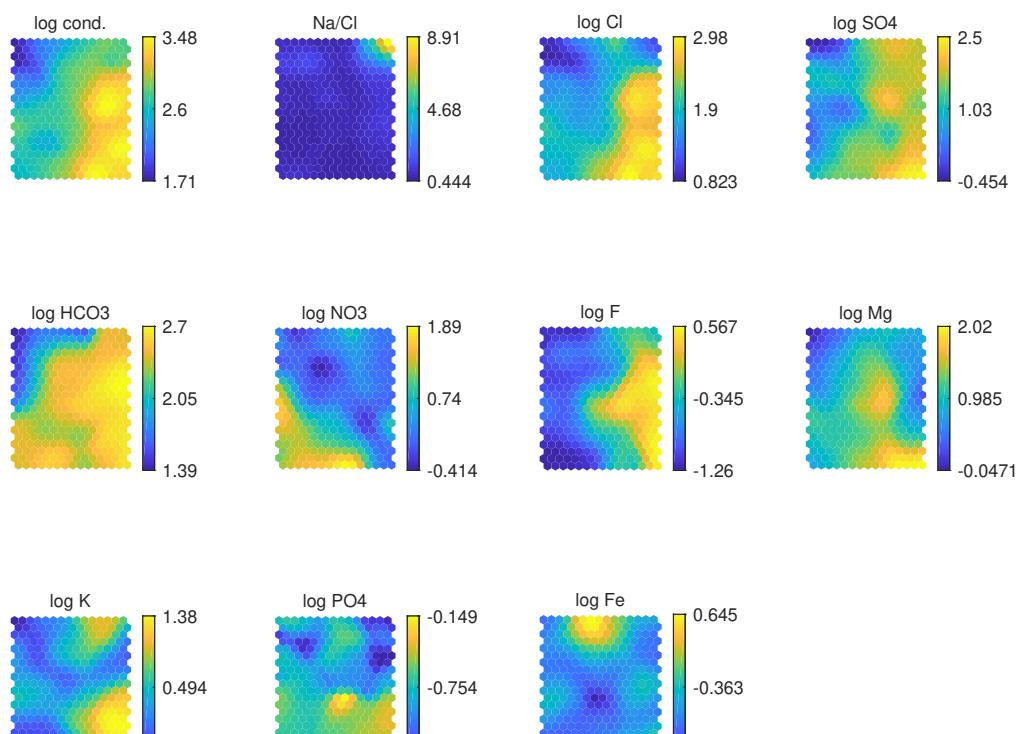


FIGURE 5.9 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques

Globalement, les mêmes observations que précédemment peuvent être faites :

- présence de concentrations élevées en SO_4^{2-} , HCO_3^- et K^+ avec de faibles conductivités électriques là où le rapport Na^+/Cl^- est élevé (rafraîchissement)
- présence d'une zone faiblement minéralisée et conductrice (coin supérieur gauche des matrices)
- corrélation nette entre la conductivité électrique et le Cl^- , HCO_3^-
- corrélation inverse pour le fer et le phosphate
- légère corrélation entre les nitrates et les phosphates

Il est désormais intéressant d'analyser les différents groupes définis grâce à la *matrice U* (Figure 5.10). Le premier groupe, en bleu, correspond aux points d'échantillonnages peu minéralisés et conducteurs qui pourraient s'apparenter à des intrusions d'eau de mer ; le second, en vert, comprend des ouvrages à fortes concentrations notamment en Cl^- , SO_4^{2-} , F^- et K^+ ; le dernier, en jaune, les échantillons *a priori* contaminés en raison des concentrations particulièrement élevées en NO_3^- et PO_4^{3-} .

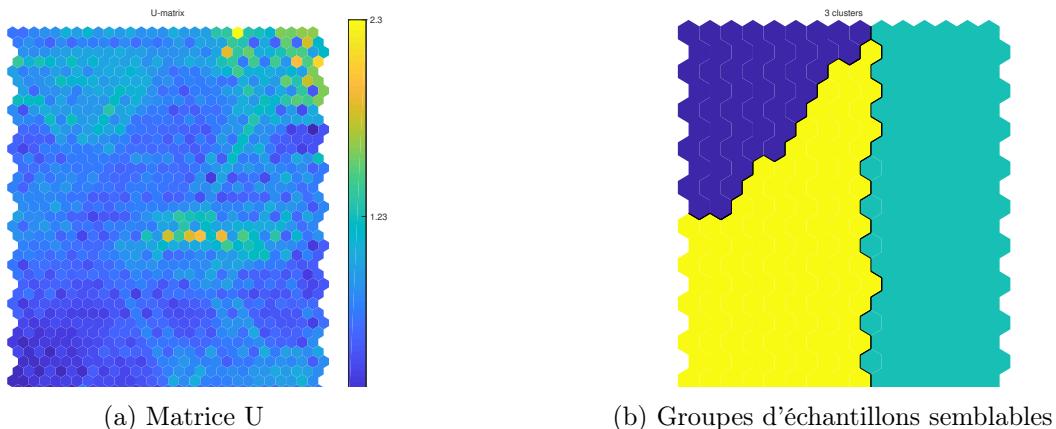


FIGURE 5.10 – Caractérisation du faciès hydrochimique par les SOMs

La Table 5.3 reprend les caractéristiques des trois groupes hydrochimiques proposés par les SOMs selon la légende indiquée à la Table 5.4. Il est observé que le premier groupe présente les concentrations les plus faibles tandis que le groupe 2 est caractérisé par des concentrations élevées ou variées. Quant au dernier groupe, il est lié à des concentrations globalement faibles ou moyennes.

	Cond.	Na/Cl	Cl	SO_4	HCO_3	NO_3	F	Mg	K	PO_4	Fe
Bleu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Vert	++	X	++	X	++	-	++	X	X	O	-
Jaune	O	-	-	-	+	X	-	O	-	O	-

TABLE 5.3 – Caractéristiques des groupes de faciès hydrochimiques

++	Concentrations les plus élevées
+	Concentrations élevées
-	Concentrations les plus faibles
-	Concentrations faibles
O	Concentrations moyennes
X	Concentrations variées

TABLE 5.4 – Légende associée à la Table 5.3

La Carte 5.11 permet de visualiser la disposition spatiale des ouvrages selon leur groupe défini par les SOMs.

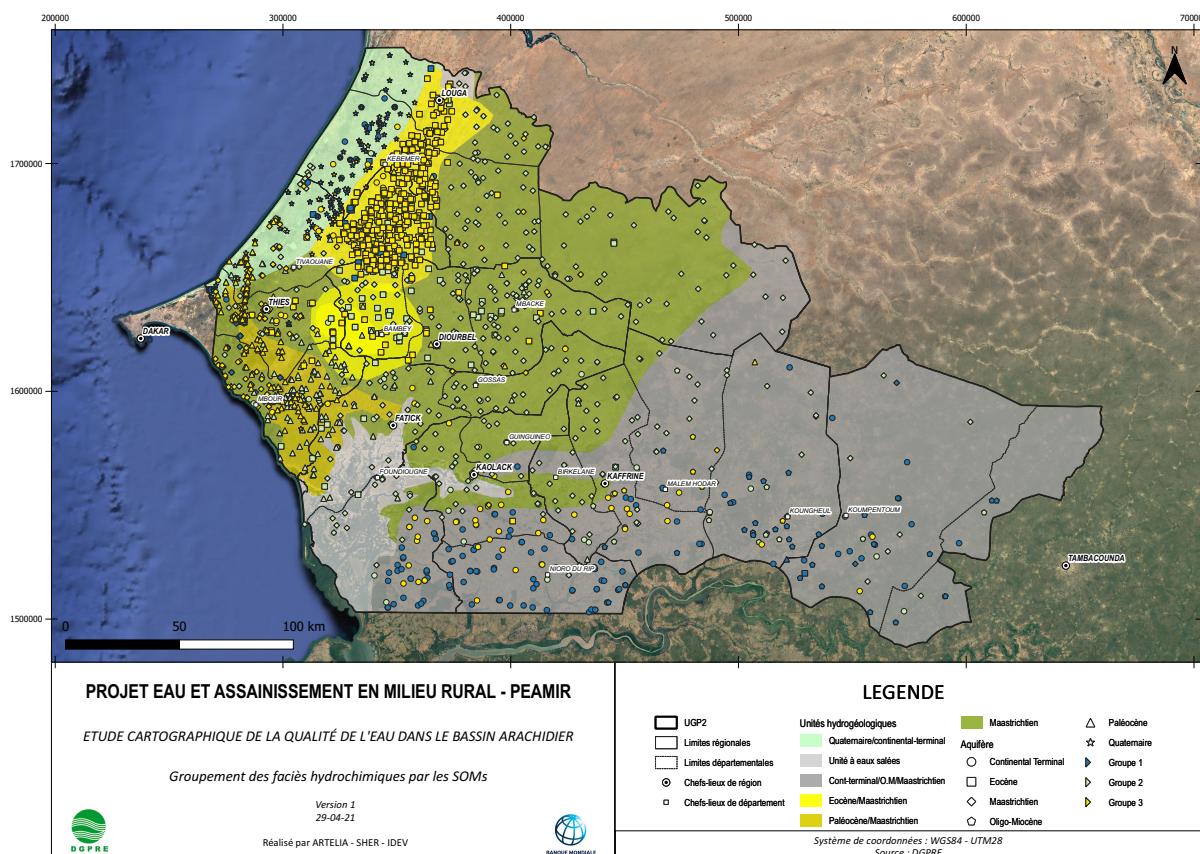


FIGURE 5.11 – Disposition spatiale des ouvrages selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

Il est observé que les ouvrages du premier groupe s'organisent le long du Littoral mais également au nord du fleuve Gambie. Ces positions pourraient témoigner d'intrusions salines.

La plupart des ouvrages du groupe 3, caractérisés par un faciès plutôt bicarbonaté calcique magnésien, font partie des unités hydrogéologiques de l'Éocène et du Paléocène.

Finalement, les ouvrages du second groupe font surtout partie de la zone hydrogéologique du Maastrichtien.

La Figure 5.12 permet d'associer les groupes définis par les SOMs à un faciès hydrochimique sur un diagramme de Piper. Il est observé que le groupe 3 est caractérisé par un faciès hydrochimique à tendance bi-carbonatée calcique magnésien avec comme cation et anion dominants respectivement le calcium et les bi-carbonates. Le groupe numéro 2 est en grande partie chloruré sodique et potassique et pourrait témoigner la présence d'intrusions salines tandis que le premier groupe est plus hétérogène et pourrait refléter d'un mélange entre eaux douces et salées.

Diagramme de Piper: faciès hydrochimique par les SOMs

- ▲ Groupe 1
- Groupe 2
- ◆ Groupe 3

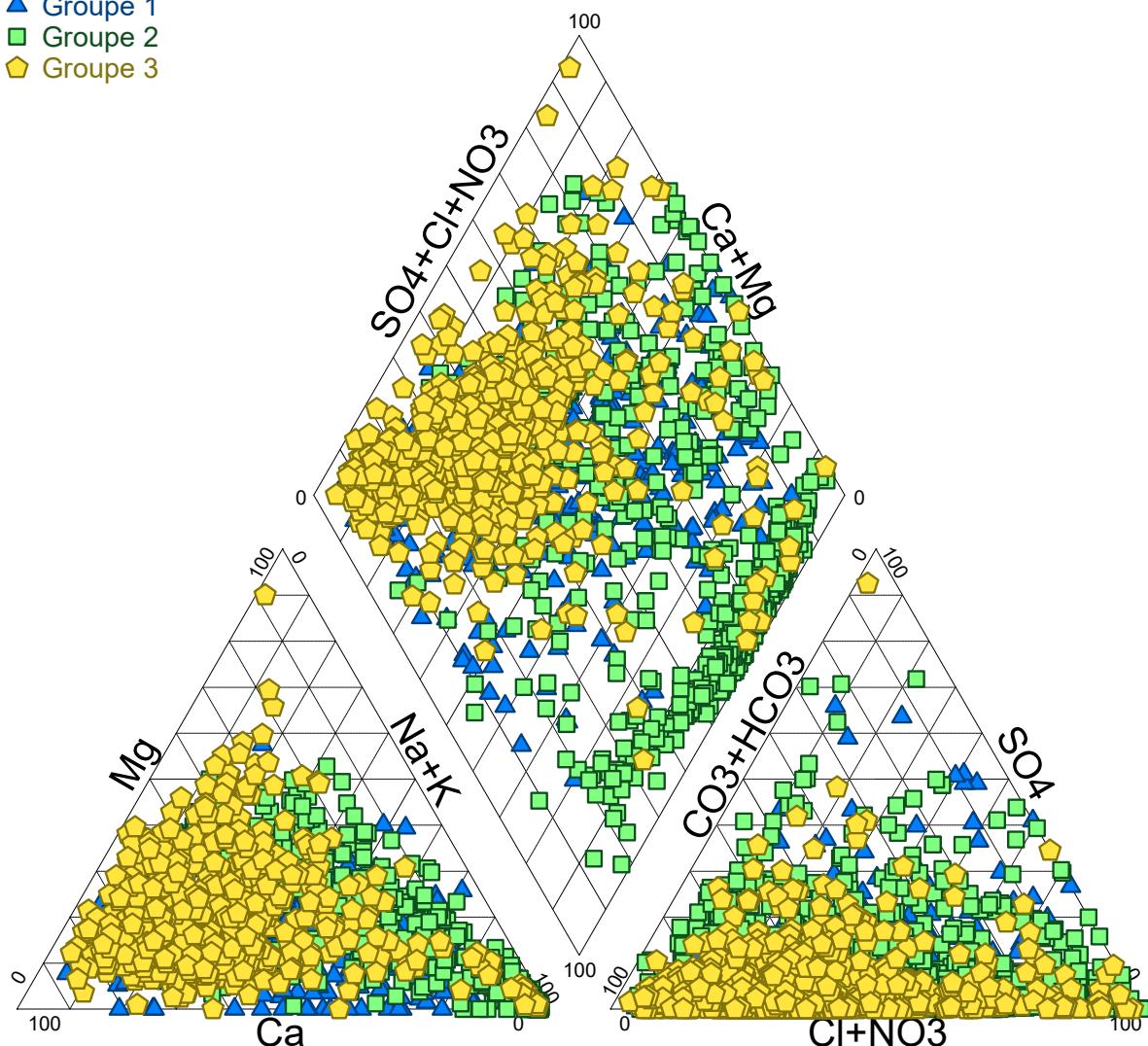


FIGURE 5.12 – Diagramme de Piper selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

5.3.2.4 Tentative 4 : influence des conditions REDOX

Il est également envisageable de réaliser les groupements selon les conditions d'oxydo-réduction. Les paramètres d'entrée sont ceux qui marquent bien où jouent un rôle important sur les conditions REDOX ie. le pH, SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NH_4^+ et le fer (Edmunds et al., 2002). La *matrice des composants* est présentée en Figure 5.13.

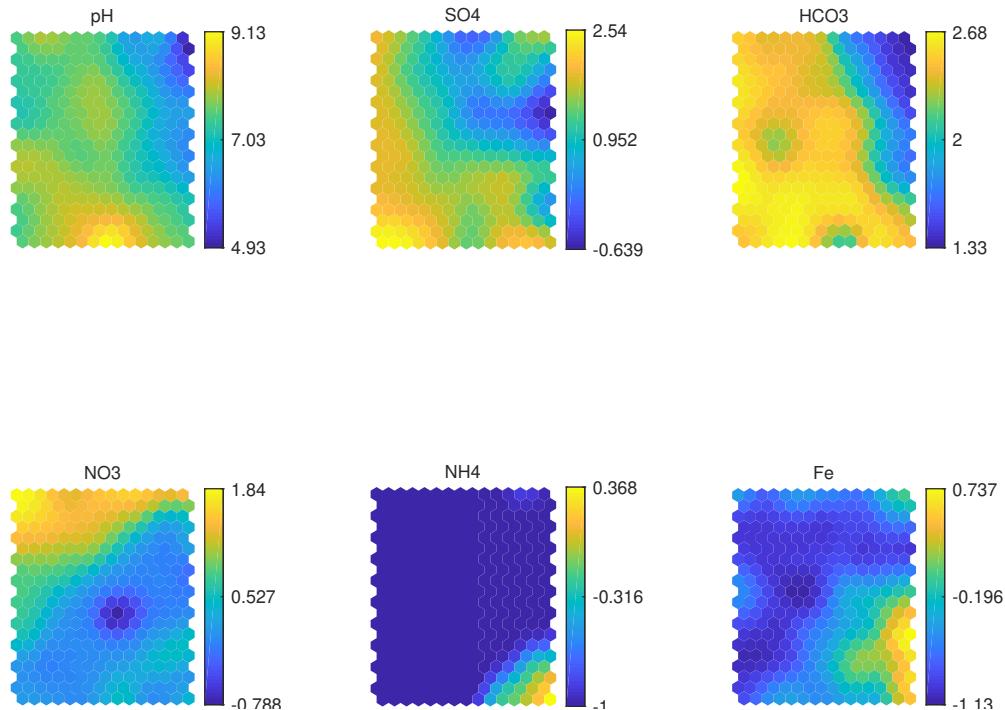


FIGURE 5.13 – Matrice des composants pour les paramètres REDOX

Faisant partie des métaux possiblement liés aux conditions d'oxydo-réduction, le fer est un paramètre important à prendre en considération. Cependant, comme présenté lors de la description du jeu de données, l'origine des concentrations ferriques n'est pas précisée. Ainsi, vu le nombre important de campagnes d'échantillonnage, il est possible que la donnée soit exprimée sous la forme de fer total ou de fer dissout.

De plus, au vu de la quantité importante de concentrations en fer et ammonium mesurées sous la limite de détection (respectivement 25 % et 89 % des données totales), les contrastes de la *matrice U* sont très nets. Cela a donc une influence sur l'organisation des clusters, comme indiqué par la Figure 5.14, où le NH_4^+ se présente comme un groupe à lui seul.

Finalement au vu des facteurs précédemment cités, l'interprétation des groupements par les SOMs pour les conditions REDOX n'est pas fiable. En effet, comme le montre la Carte 5.15 et le diagramme de Piper en Figure 5.16, les tendances ne sont que très peu identifiaables.

Pour analyser l'influence des conditions REDOX, il aurait été souhaité d'une part que le jeu de données soit plus riche en analyse de métaux (ex : Mn^{2+}) et d'autre part que la donnée en fer soit précisée.

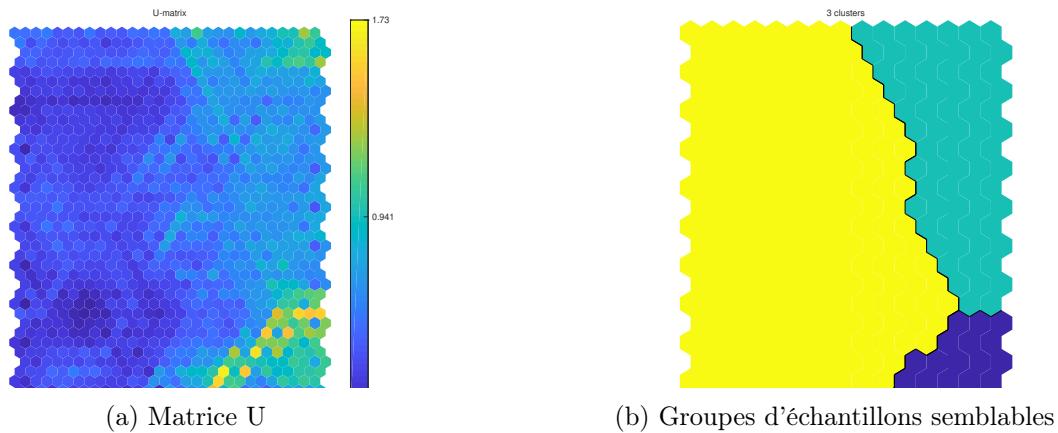


FIGURE 5.14 – Caractérisation des conditions REDOX par les SOMs

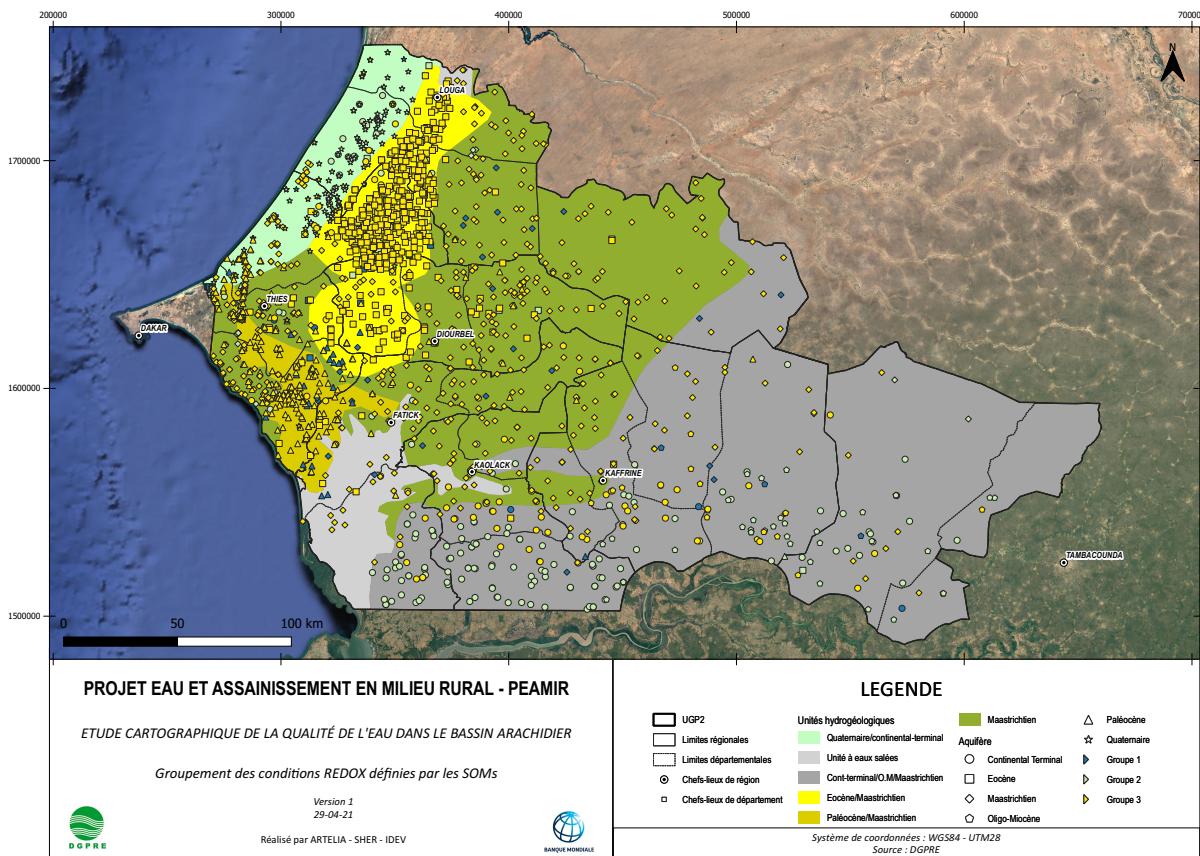


FIGURE 5.15 – Disposition spatiale des ouvrages selon les conditions REDOX définies par les SOMs

Diagramme de Piper: conditions REDOX par les SOMs

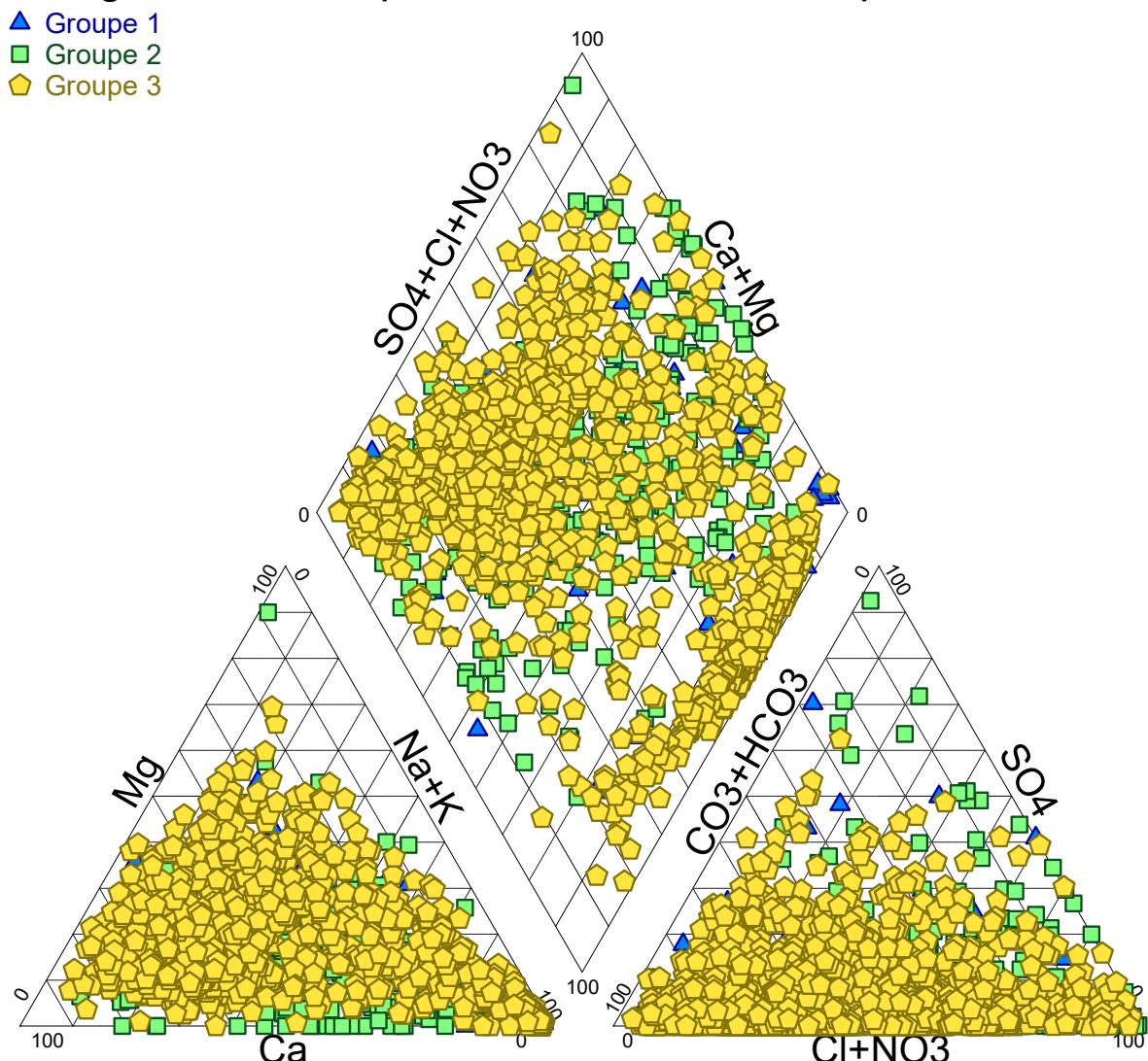


FIGURE 5.16 – Diagramme de Piper selon les conditions REDOX définies par les SOMs

5.3.3 SOMs par aquifère

Dans cette section, l'approche par les SOMs est utilisée pour chaque aquifère dans le but de regrouper les faciès hydrochimiques semblables entre eux. Les matrices des *composants*, U ainsi que les groupes définis sont présentés en Annexe (section I). En raison de la faible quantité de données pour l'Oligo-Miocène (57), l'approche par les SOMs n'est pas utile. Cependant, par souci de continuité et de cohérence avec les autres aquifères, elle a tout de même été utilisée.

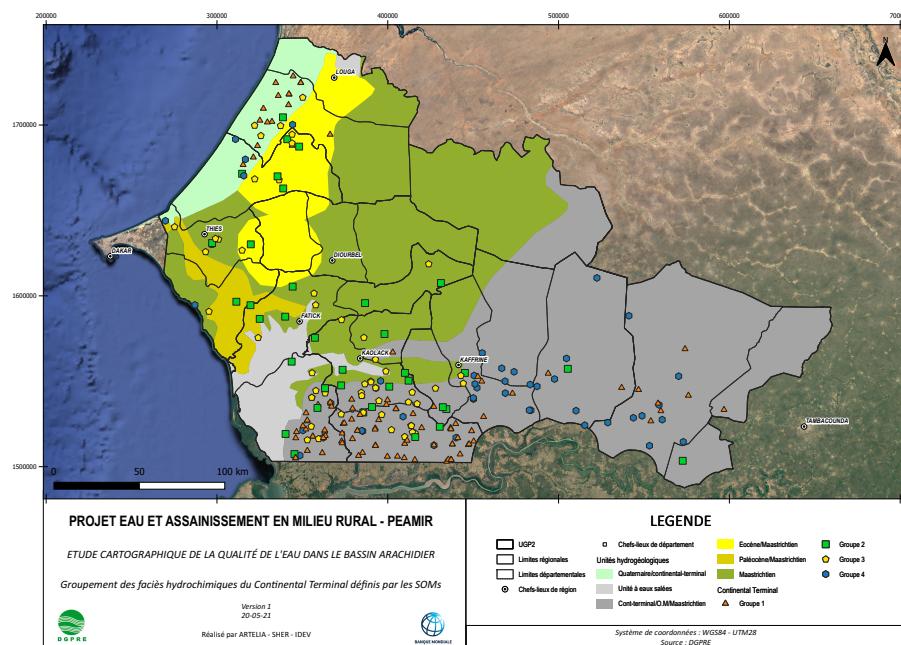
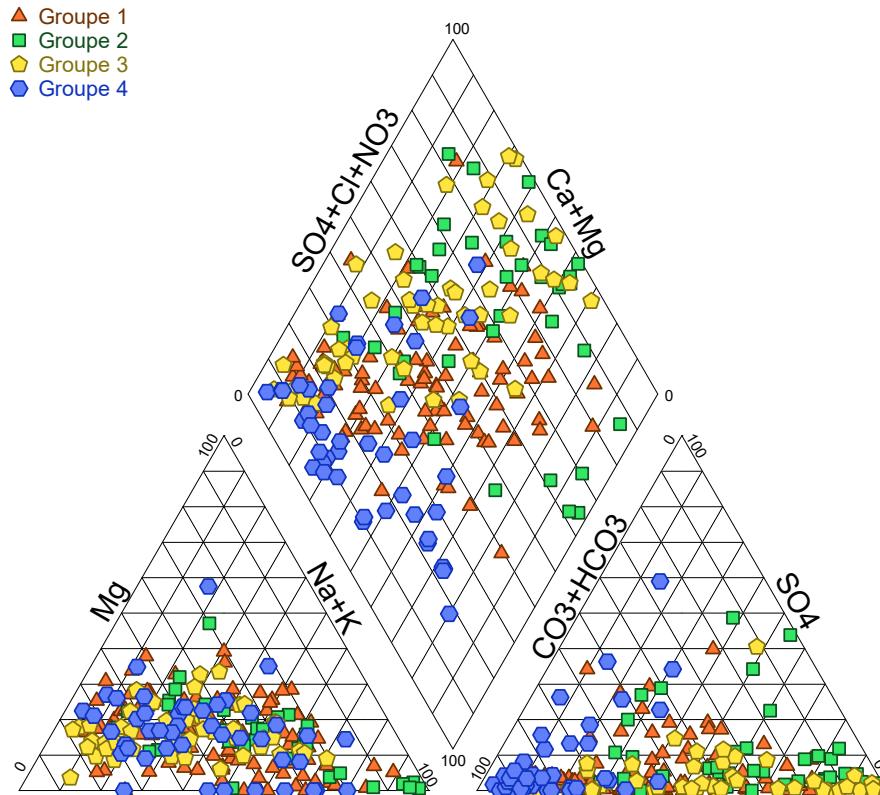
Les diagrammes de Piper spécifiques à chaque aquifère sont illustrés par les Figures 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22a. Étant donné que ces diagrammes permettent de distinguer 4 faciès distincts, ce sont 4 clusters qui ont été effectués par les SOMs. Il apparaît que la zone d'étude fait l'objet d'un système hydrochimique complexe. En effet, il est notamment observé que :

- Les groupes 2 du Continental Terminal, 4 du Paléocène et 3 du Quaternaire semblent s'apparenter au faciès d'intrusions salines.
- Les groupes 1 et 3 du Maastrichtien, 3 du Paléocène et 4 du Quaternaire s'organisent quant à eux sur l'oblique du losange correspondant à des faciès chlorurés sodiques et potassiques.
- Le groupe 4 du Continental Terminal pourrait s'apparenter à un phénomène de rafraîchissement.
- Les groupes 2 et 4 de l'Éocène, 4 du Maastrichtien et 2 du Paléocène sont à tendance forte bicarbonatée,
- Le reste des faciès sont plutôt mixtes et pourraient s'apparenter à des eaux de mélange.

La disposition spatiale des groupes par aquifère est présentée aux Figures 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22b. Il est observé que les faciès chlorurés sodiques potassiques s'organisent le long du couloir nord-sud (Louga-Kaolack) à concentrations élevées en chlorures et fluorures. Les faciès représentant de possibles intrusions salines sont situés au nord du delta Sine-Saloum, au Littoral dans la zone des Niayes ainsi qu'au nord du fleuve Gambie. Ces dispositions spatiales semblent donc concorder avec l'hypothèse des intrusions salines et sont susceptiblement liées à des intrusions d'eau de mer. Concernant les faciès bicarbonatés, une bande fine semble s'organiser à l'est de Dakar. La partie nord de l'unité hydrogéologique de l'Éocène ainsi que la zone est de l'Oligo-Miocène semble également bicarbonatées.

La prochaine section a pour but de préciser l'origine des faciès chlorurés identifiés, souvent témoins d'intrusions salines. Pour ce faire, des ratios molaires et développements des indices de saturation seront effectués. Les résultats obtenus seront combinés avec une analyse spatiale dans le but de proposer une interpolation de l'étendue des intrusions salines dans la zone d'étude.

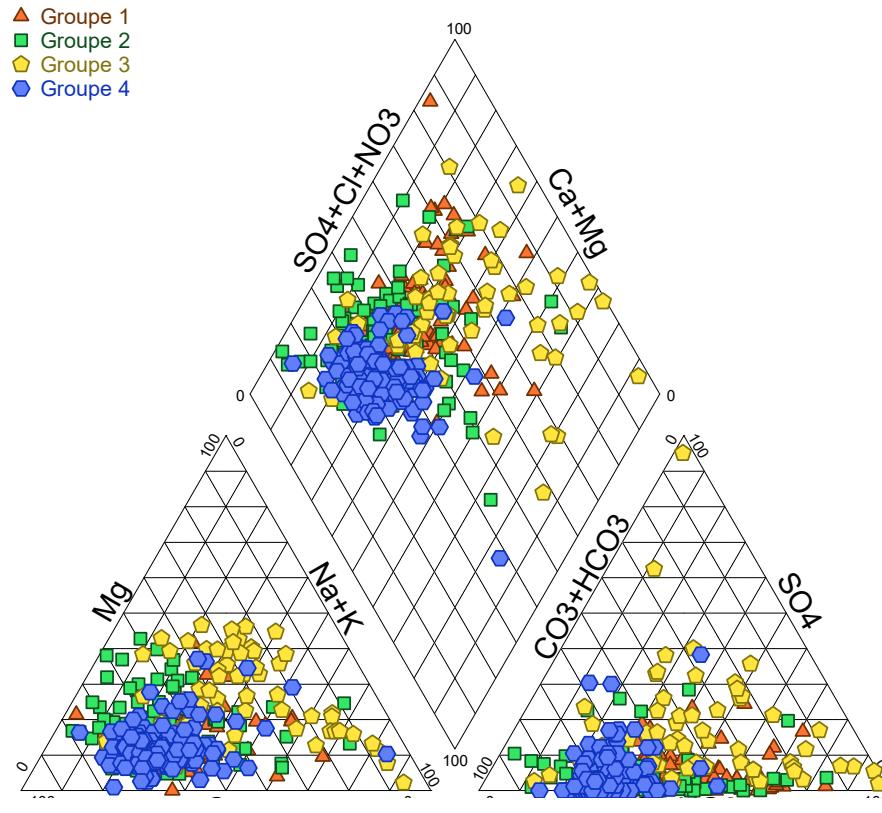
Diagramme de Piper: Continental Terminal (SOMs)



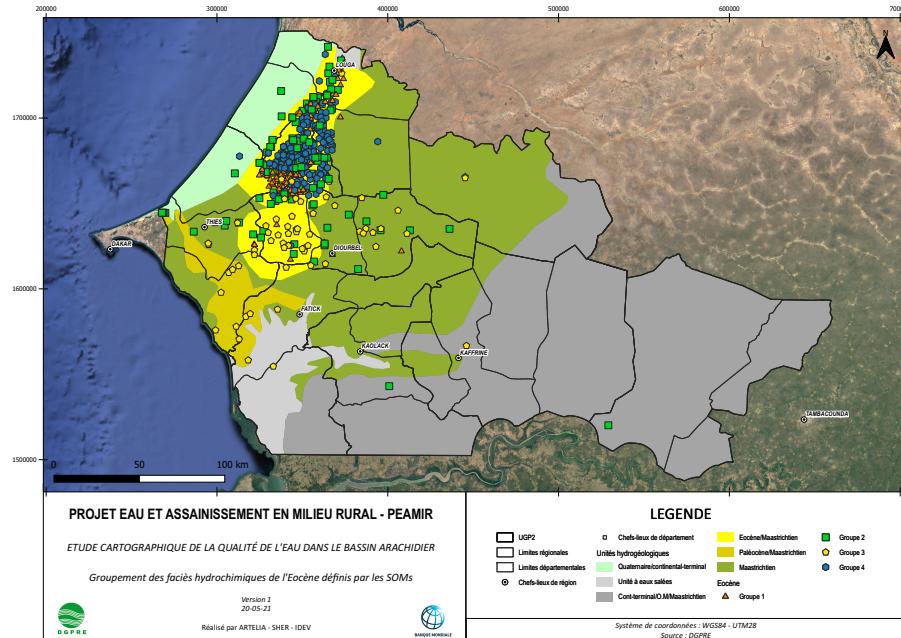
(b) Disposition spatiale des ouvrages du Continental Terminal selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

FIGURE 5.17 – Groupements par les SOMs pour le CT

Diagramme de Piper: Eocène (SOMs)



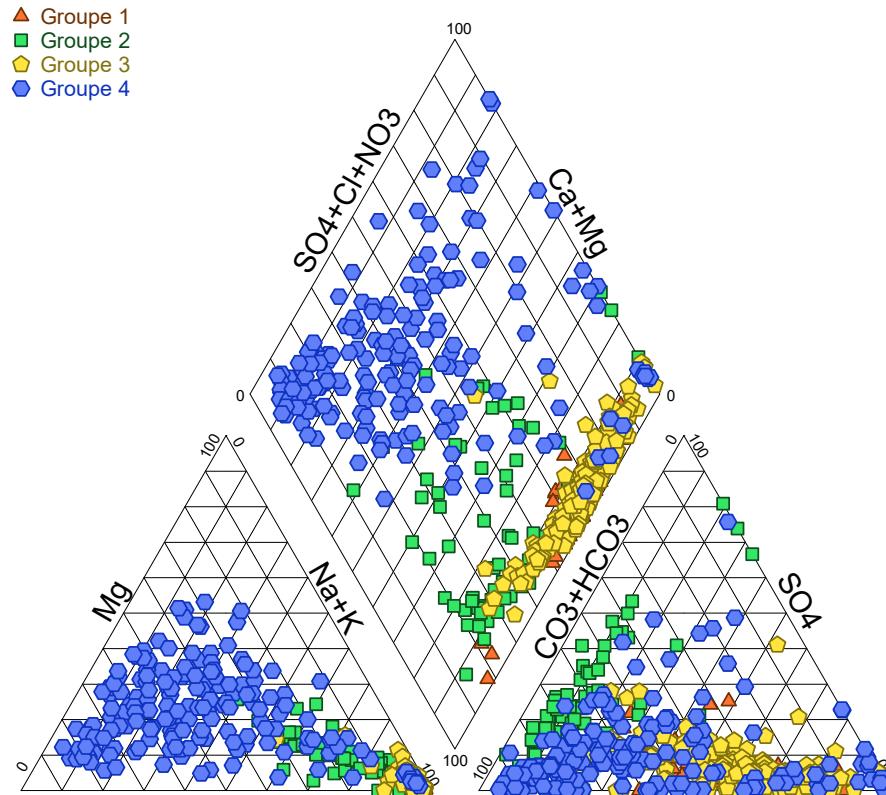
(a) Faciès hydrochimiques de l'EO par les SOMs



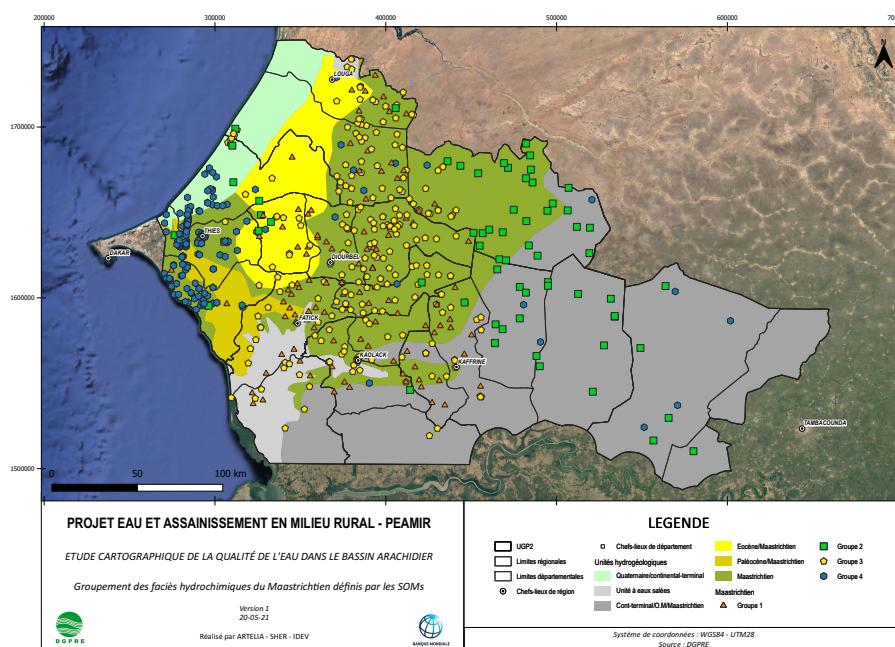
(b) Disposition spatiale des ouvrages de l'Éocène selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

FIGURE 5.18 – Groupements par les SOMs pour l'EO

Diagramme de Piper: Maastrichtien (SOMs)



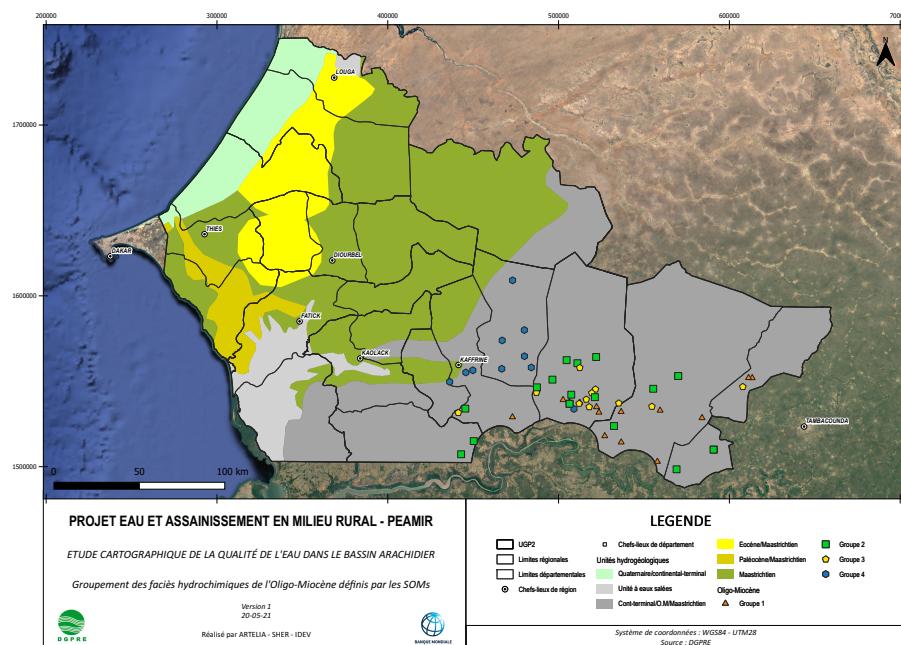
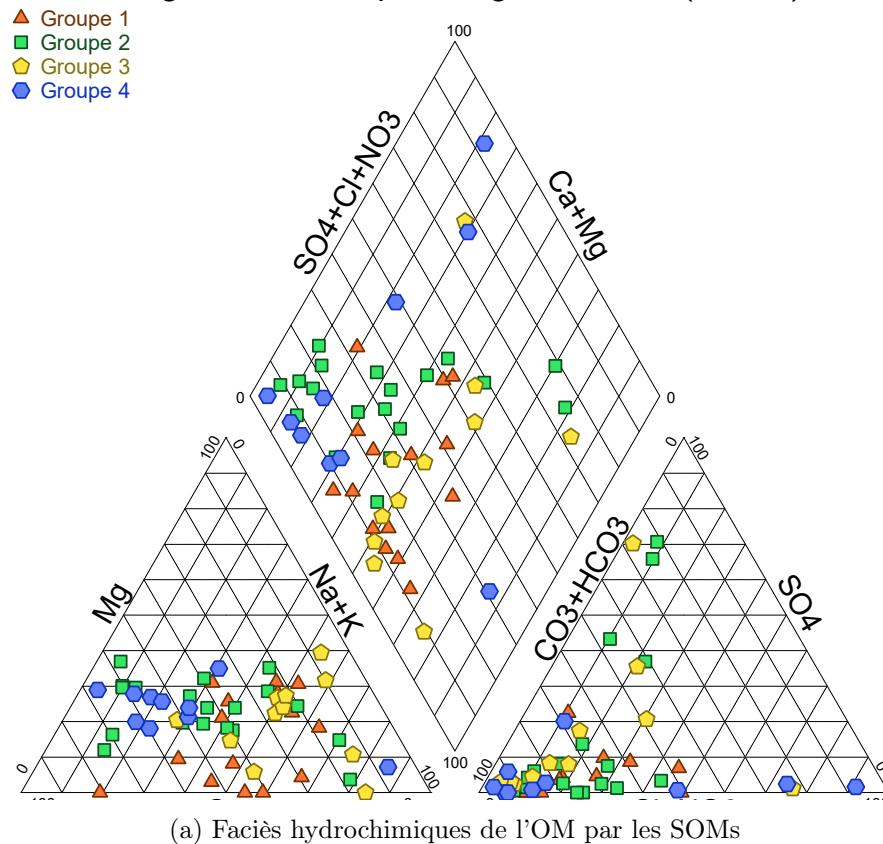
(a) Faciès hydrochimiques du MAAS par les SOMs



(b) Disposition spatiale des ouvrages du Maastrichtien selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

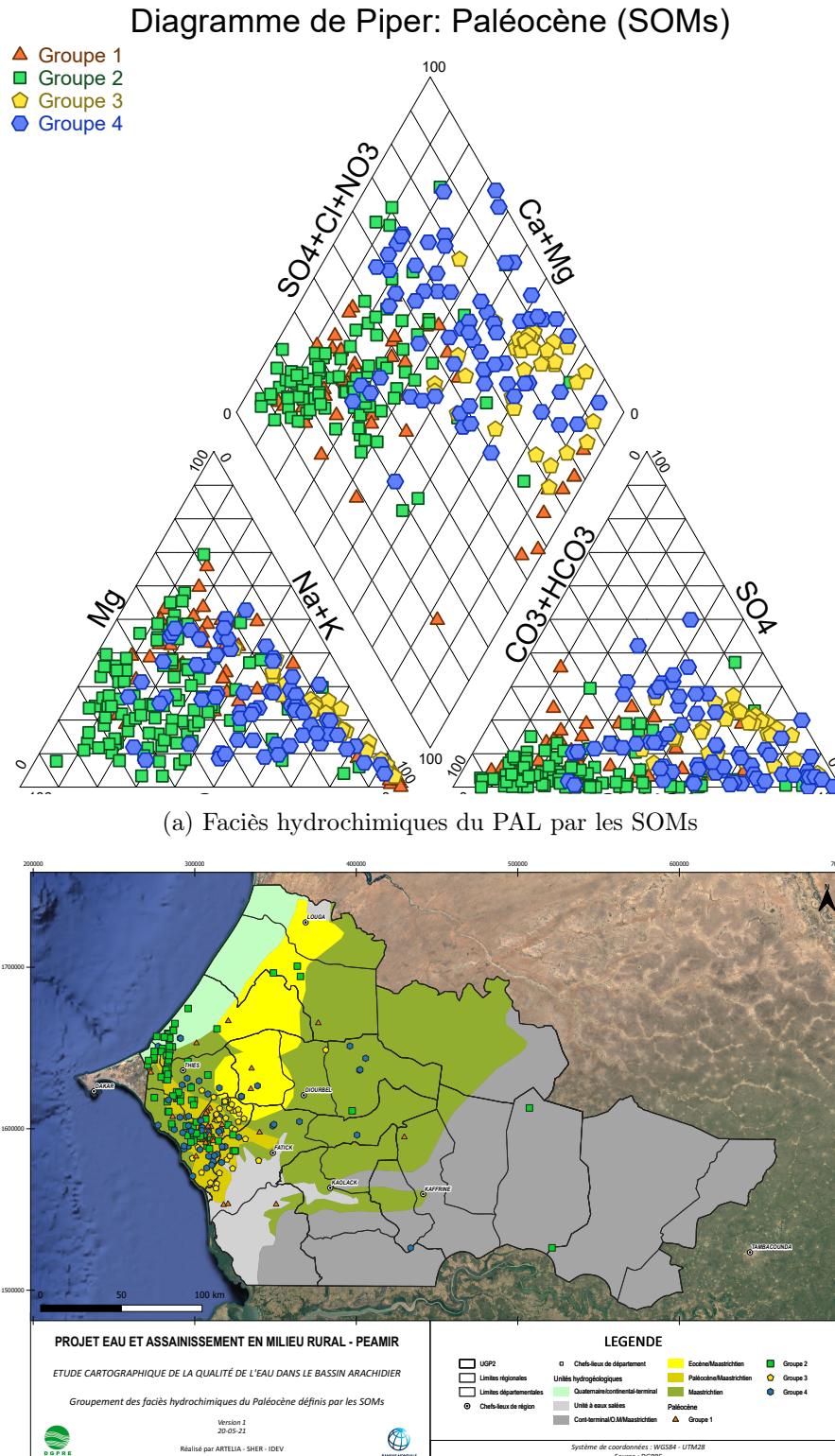
FIGURE 5.19 – Groupements par les SOMs pour le MAAS

Diagramme de Piper: Oligo-Miocène (SOMs)



(b) Disposition spatiale des ouvrages de l'Oligo-Miocène selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

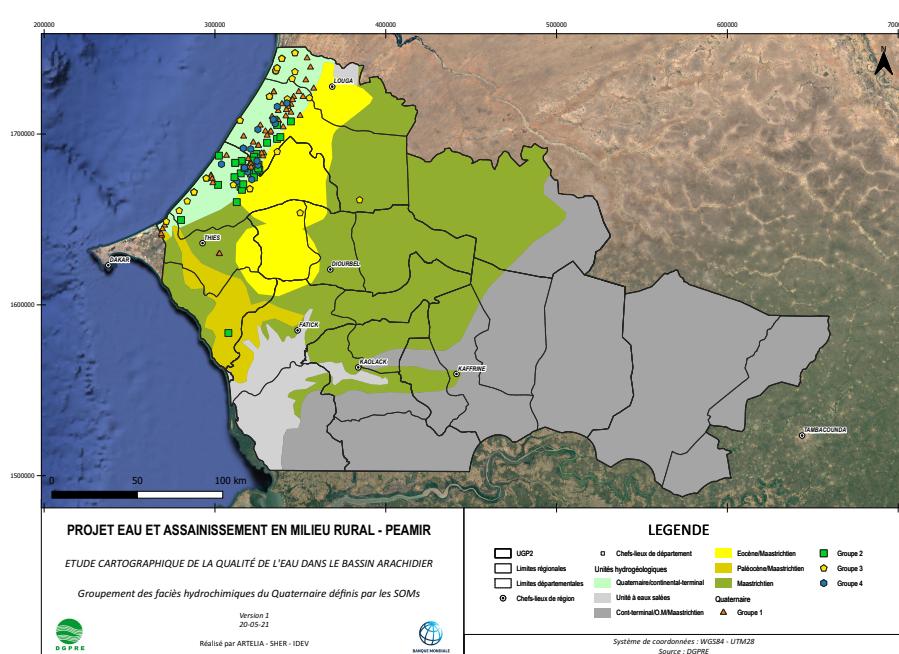
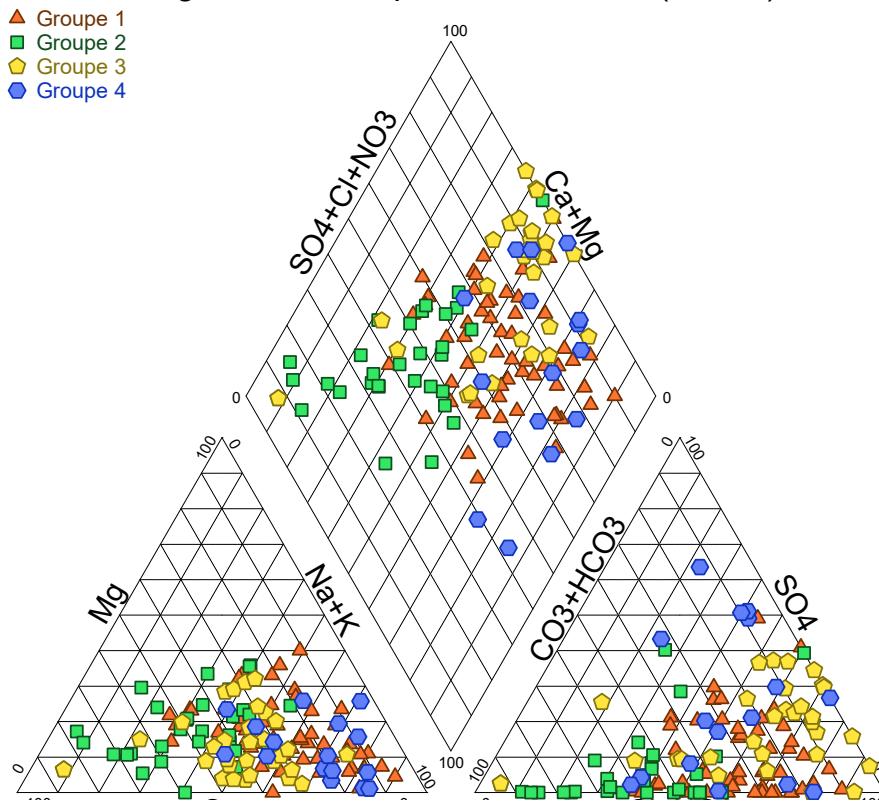
FIGURE 5.20 – Groupements par les SOMs pour l'OM



(b) Disposition spatiale des ouvrages du Paléocène selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

FIGURE 5.21 – Groupements par les SOMs pour le PAL

Diagramme de Piper: Quaternaire (SOMs)



(b) Disposition spatiale des ouvrages du Quaternaire selon les groupes hydrochimiques définis par les SOMs

FIGURE 5.22 – Groupements par les SOMs pour le QUAT

5.4 Origines de la salinité

Le phénomène de salinisation des eaux souterraines est une des causes majeures de la dégradation de la qualité de l'eau et touche principalement les régions arides ou semi-arides (Gning, 2015 ; Kloppmann et al., 2010 ; Williams, 2001). Il est souvent difficile de caractériser l'origine de la salinité car les mécanismes sont liés à différents contextes : géographique, géologique et climatique (Kloppmann et al., 2010).

L'origine de la salinité peut être soit naturelle soit anthropique. En effet, elle peut être due d'une part à des intrusions salines, à un mélange avec d'anciennes saumures ou à la dissolution d'évaporites ; d'autre part à des rejets industriels ou domestiques, à la lixiviation des décharges ou à l'emploi de sels de sodium/chlorures pour le traitement des eaux (Gning, 2015 ; Kloppmann et al., 2011 ; Thomas et al., 2017).

Plus précisément, l'origine naturelle de la salinité peut être subdivisée en deux groupes (Kloppmann et al., 2011) :

1. le **domaine marin** directement ou indirectement en lien avec l'eau de mer.
2. le **domaine continental d'interactions entre l'eau et l'encaissant** où l'origine des sels dissous est liée à l'interaction avec les roches sédimentaires concentrées par évaporation (hors évaporites marines).

Les marqueurs principaux de la salinité sont des concentrations en chlorures et des conductivités électriques élevées (Gning, 2015 ; Vengosh, 2003). Les Figures 5.23 et 5.24 présentent la répartition spatiale de ces marqueurs sur l'ensemble du Bassin Arachidier. Il est observé que les eaux souterraines caractérisées par une salinisation potentiellement élevée s'organisent le long d'un couloir nord-sud.

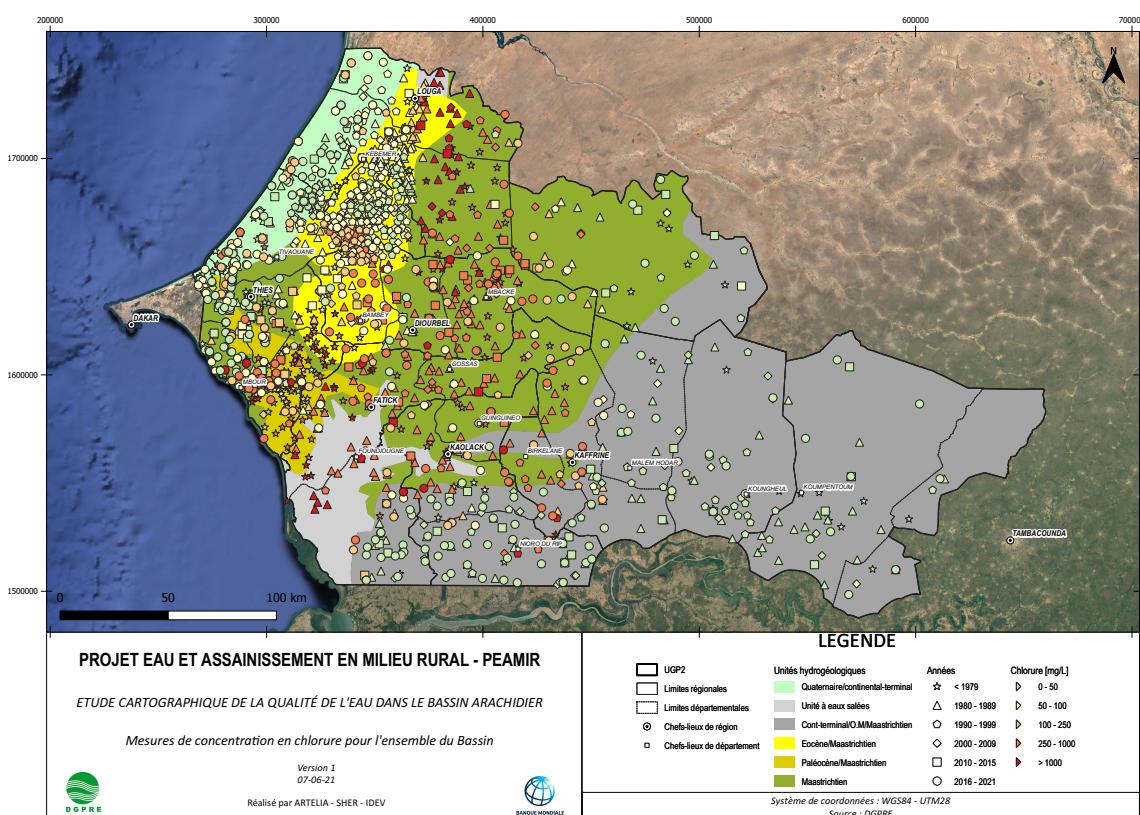


FIGURE 5.23 – Répartition de l'ensemble des concentrations en chlorures dans le Bassin

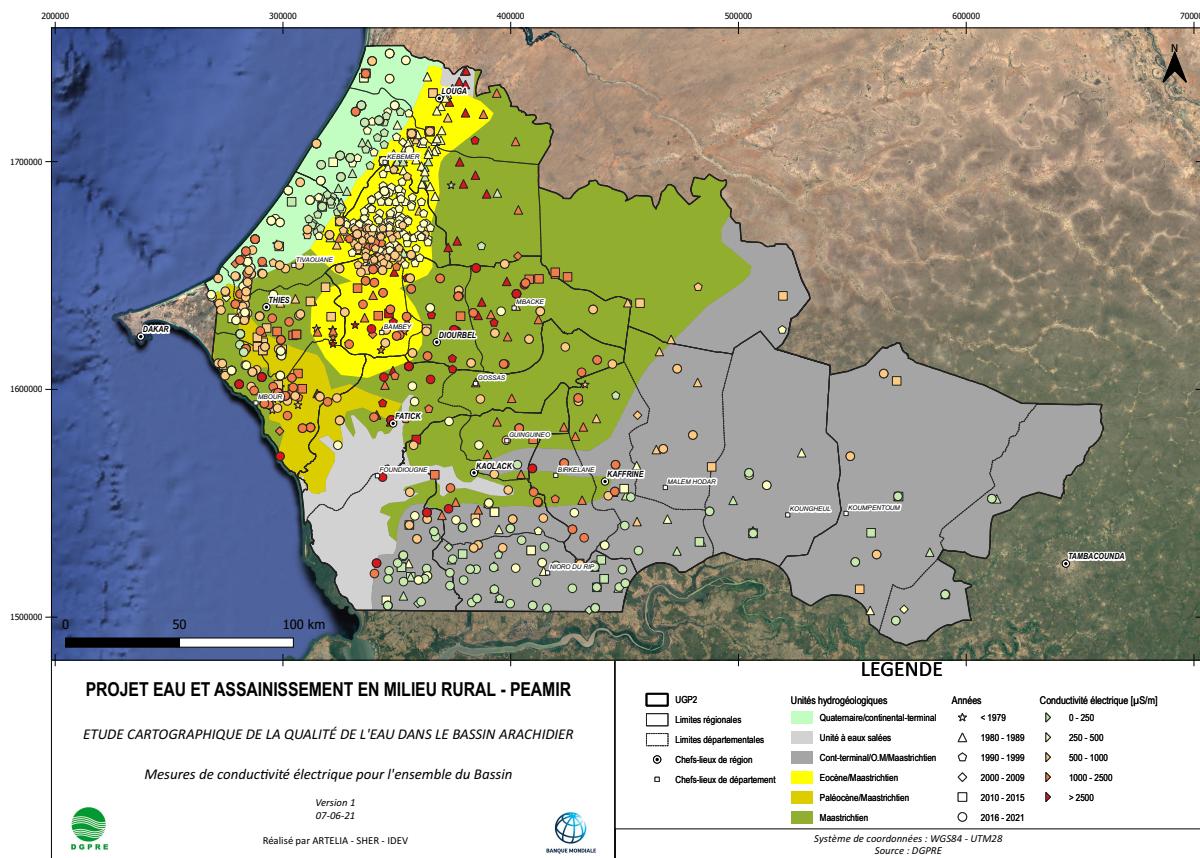


FIGURE 5.24 – Répartition de l'ensemble des conductivités électriques dans le Bassin

Dans le cas du Bassin Arachidier, les intrusions salines observées actuellement sont principalement liées au domaine marin et caractérisées par les phénomènes suivants (Kloppmann et al., 2011 ; DGPRE 2021).

- **intrusions directes d'eau de mer dans les aquifères côtiers** (*i.e* le Quaternaire principalement). Ces intrusions sont naturelles mais accentuées par la surexploitation de l'aquifère provoquant un déséquilibre entre les eaux douces et marines (Gning, 2015 ; Montety et al., 2008).

- **mélanges avec d'anciennes saumures sédimentaires en profondeur du Maastrichtien.** Lors de l'établissement du Bassin, l'évaporation de l'eau de mer combinée à des épisodes de transgression-régression marine aurait probablement résulté dans la mise en place de saumures sédimentaires dites « primaires ». Il est possible que ces dernières, par sur-saturation, aient conduit à la formation d'évaporites. Ainsi, la salinité s'expliquerait soit par la présence d'anciennes saumures soit par une dissolution progressive d'évaporites.

La Notice Explicative du Sénégal par Roger et al. (2009a) indique d'ailleurs la présence d'une flore et microfaune propres au milieu saumâtre dans les calcaires de Louga, les sables du delta du Sénégal et les grès de Yoff (près de Dakar).

Lors de l'évaporation de l'eau de mer, la calcite, puis le gypse et la halite sont sujets à sur-saturation (Gning, 2015 ; Vengosh, 2003). Lors de la dissolution des formations évaporitiques, la halite induit une augmentation des concentrations en Na^+ et Cl^- tandis que le gypse provoque l'augmentation en Ca^{2+} et SO_4^{2-} .

L'analyse spatiale des concentrations ainsi que leur disposition par rapport à la position des mines, industries et zones urbanisées a déjà permis de tirer quelques premières conclusions quant à l'origine des concentrations anormales des ions Na^+ et Cl^- . Les analyses chimiques présentées aux sections suivantes permettent de compléter, confirmer ou infirmer ces précédentes observations. Deux techniques seront utilisées dans le cadre de travail : celle de l'analyse des graphes binaires des concentrations de Na^+ en fonction de celles de Cl^- ; celle de l'analyse des indices de saturation de la calcite et du gypse. En fin de section, une discussion générale au sujet de l'origine de la salinité sera menée.

5.4.1 Graphes binaires du Na^+ et Br^- en fonction du $/\text{Cl}^-$

Les ions Cl^- et Br^- étant conservateurs, ils ne sont que très peu affectés par les différents processus physico-chimiques prenant place dans le milieu souterrain (Abid et al., 2010; Dixon et al., 1992; Kloppmann et al., 2011; Guendouz et al., 2002, Magaritz et al., 1981; Thomas et al, 2017). Selon les ratios molaires entre Na^+/Cl^- et Br^-/Cl^- , il est possible de définir la provenance de la salinisation (Abid et al., 2010; Re et al, 2010, Kloppmann et al., 2011). Malheureusement, la base de données hydrochimique utilisée dans le cadre de ce travail ne comporte que trois entrées pour lesquelles les concentrations en bromures est disponible. La méthode basée sur l'analyse des graphes binaires du Br^- en fonction du Cl^- ne sera donc pas développée.

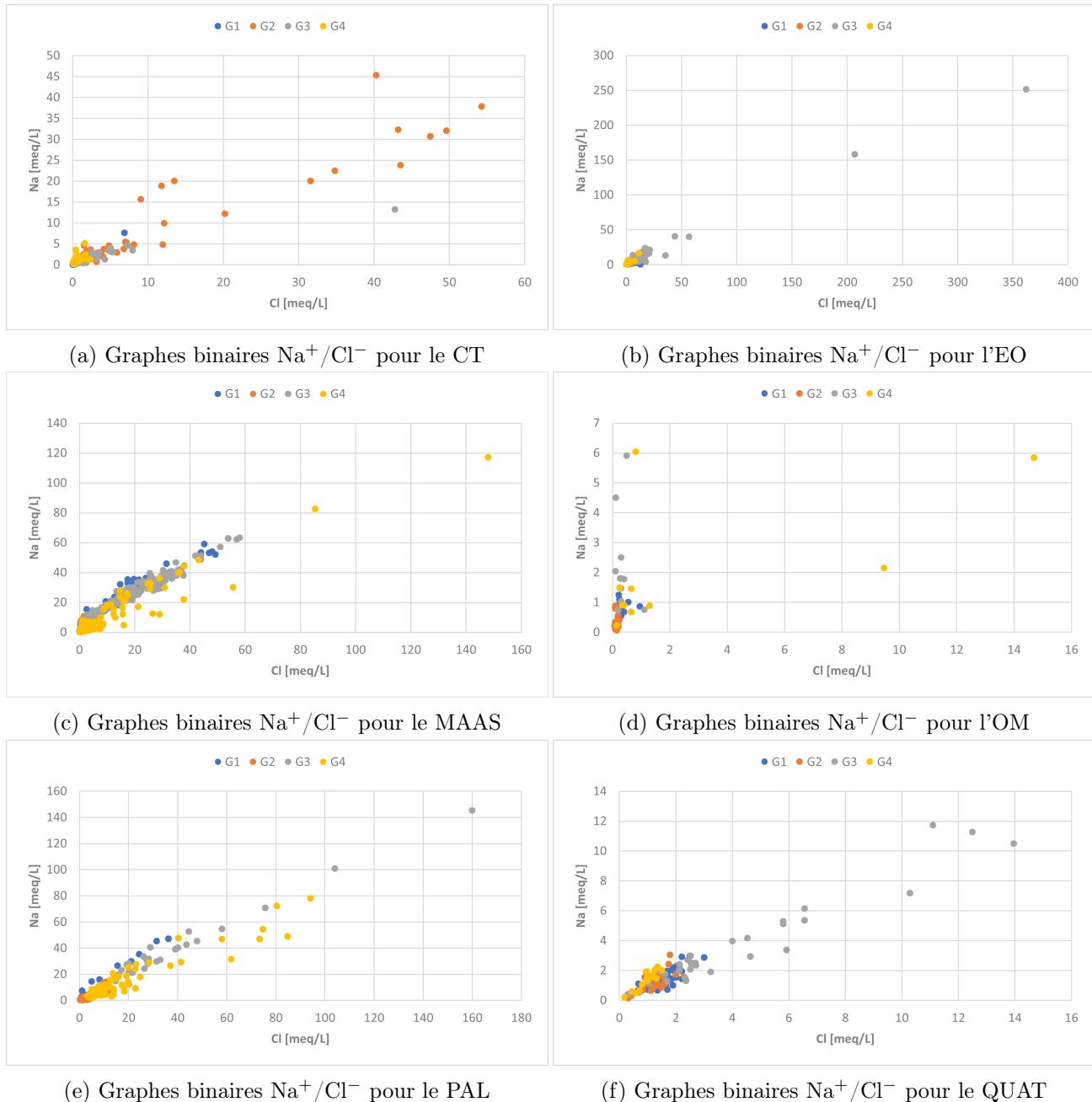
Selon les rapports Na^+/Cl^- , différentes interprétations hydrochimiques peuvent être proposées. Celles-ci sont présentées à la Table 5.5 et se basent sur les écrits suivants : Abid et al., 2010; Hidalgo et al., 1995; Kloppmann et al., 2011; Ma et al., 2014; Meybeck, 1987; Gning et al., 2017; Gning, 2015; Awni, 2008; Thomas et al., 2017; Krimissa et al., 2004.

Rapport Na^+/Cl^-	Interprétation
< 1	Pollution d'origine anthropique
0.86	Origine marine
1	Dissolution de la halite
> 1	Échange ionique ($\text{Na}^+ > \text{Cl}^-$) avec rafraîchissement

TABLE 5.5 – Définition théorique des classes d'interprétation selon le rapport Na^+/Cl^-

Pour chaque aquifère, les ouvrages seront groupés selon les clusters définis par les SOMs à la section 5.3.3 (Tentative 3 : influence de la minéralogie). En effet, comme expliqué précédemment, la zone d'étude est vaste et le système hydrogéologique complexe. Il est alors important de définir des groupes basés sur la ressemblance de faciès hydrochimiques.

Ainsi, la Figure 5.25 présente par aquifère et sous forme de *nuages de points* les graphes binaires des concentrations en Na^+ en fonction de celles en Cl^- exprimées en [meq/L]. Par les différents groupes seront menées des régressions linéaires avec pour but de définir la pente de la droite (m) passant au mieux par ces points. En fonction de la valeur de la pente et de la position spatiale des ouvrages dans la zone d'étude, il sera possible de proposer une interprétation des rapports Na^+/Cl^- . Par souci de lisibilité, les régressions linéaires ne sont pas affichées sur la Figure. Cependant, les valeurs des pentes et des coefficients R^2 seront reprises dans une Table récapitulative.

FIGURE 5.25 – Graphes binaires Na^+/Cl^- selon l'aquifère et les groupes définis par les SOMs

Selon le nombre de points et l'homogénéité des processus hydrochimiques propres au groupe, le degré de fiabilité de la régression varie. Raison pour laquelle le coefficient de détermination de la droite (R^2) sera précisé. Plus ce dernier est proche de 1, plus la régression sera dite fiable (Ma et al., 2014). *A contrario*, si celui-ci est faible alors il en va de même de la qualité de la régression. Ainsi, les valeurs de R^2 inférieures à 0.65 seront mises en évidence dans la Table 5.6 reprenant l'ensemble des valeurs de m et de R^2 calculées pour chaque groupe ainsi qu'une proposition d'interprétation plausible.

		m	R^2	Interprétation
CT	G1	0.87	0.86	Intrusion marine
	G2	0.72	0.87	Intrusion marine
	G3	0.36	0.84	Contamination anthropique
	G4	1.35	0.59	-
EO	G1	0.65	0.86	~
	G2	0.68	0.34	-
	G3	0.71	0.98	Intrusion marine
	G4	1.1	0.89	Halite
MAAS	G1	1.33	0.96	Halite
	G2	2.8	0.65	Rafraîchissement
	G3	1.26	0.97	Halite
	G4	0.9	0.90	Intrusion marine
OM	G1	1.86	0.7	Rafraîchissement
	G2	1.86	0.58	Rafraîchissement
	G3	3.68	0.36	Rafraîchissement
	G4	0.37	0.51	Contamination anthropique
PAL	G1	1.32	0.96	~
	G2	0.83	0.87	Intrusion marine
	G3	0.96	0.98	Halite
	G4	0.75	0.93	Intrusion marine
QUAT	G1	0.91	0.94	Intrusion marine
	G2	0.94	0.88	Intrusion marine
	G3	0.84	0.97	Intrusion marine
	G4	1.45	0.96	~

TABLE 5.6 – Récapitulatif des pentes et des coefficients de détermination des régressions linéaires pour les rapports Na^+/Cl^-

En raison d'un coefficient de détermination trop faible, il est possible qu'aucune interprétation ne se démarque des autres. Alors, elle sera indiquée par le symbole « - ». Si, malgré un coefficient supérieur à 0.65, plusieurs interprétations restent possibles en raison de la disposition spatiale des ouvrages, alors elle sera indiquée par « ~ ».

5.4.1.1 Discussion des analyses spatiales des interprétations

Il est intéressant de grouper les différentes interprétations sur une même carte dans le but de visualiser de manière spatiale l'étendue des phénomènes attendus. Ainsi, la Carte 5.26 présente pour chaque aquifère les hypothèses quant à l'origine de la salinité selon le critère basé sur les régressions linéaires. Il est intéressant de comparer cette carte avec les observations réalisées au Chapitre 4, section 4.2.

Certains des ouvrages, situés à l'ouest de l'unité hydrogéologique du **Continental Terminal**, présentent une origine anthropique. Cela pourrait s'expliquer par la présence de zones irriguées et urbanisées.

Des intrusions d'eau de mer sont observées au niveau du delta du Sine Saloum, le long des cultures irriguées, mais également au nord du fleuve Gambie ainsi que, pour les quelques ouvrages concernés, au Littoral.

Au centre de l'unité hydrogéologique de l'**Éocène**, de nombreux points d'origine évaporitiques sont observés. Ils s'organisent et se concentrent au même endroit *i.e* entre Kebemer et Bambeay.

Des intrusions d'eau de mer sont également observées et semblent s'organiser le long d'un couloir Ouest-Est passant par Tivaouane, Thiès et Mbacké. Quelques ouvrages sont aussi mis en évidence au nord du delta du Sine Saloum.

Un couloir N-S présentant une salinité liée à la possible dissolution d'évaporites se dégage pour les formations aquifères du **Maastrichtien**. Celui-ci est corrélé avec le couloir N-S caractérisé par des concentrations élevées en chlorures et fluorures à faciès chloruré.

A l'ouest de la zone d'étude, près de Dakar, une bande étroite présente des intrusions d'eaux de mer. Finalement, à l'est du Bassin, les ouvrages sont sujets à du rafraîchissement.

Presque l'entièreté des ouvrages de l'**Oligo-Miocène** présente des phénomènes de rafraîchissement à l'exception de quelques points, près de Kaffrine, présentant une origine liée à la pollution. Celle-ci pourrait être due aux zones urbanisées.

Concernant le **Paléocène**, de nombreux points présentent une origine liée à l'intrusion d'eau de mer. Ils sont situés à l'ouest de la zone, dans les zones irriguées et urbanisées avec présence d'industries et de ressources minières.

Au nord du delta du Sine Saloum, sont observées des origines évaporitiques dans l'axe du couloir de l'**Éocène**.

L'ensemble des ouvrages du **Quaternaire** présente des intrusions d'eau de mer.

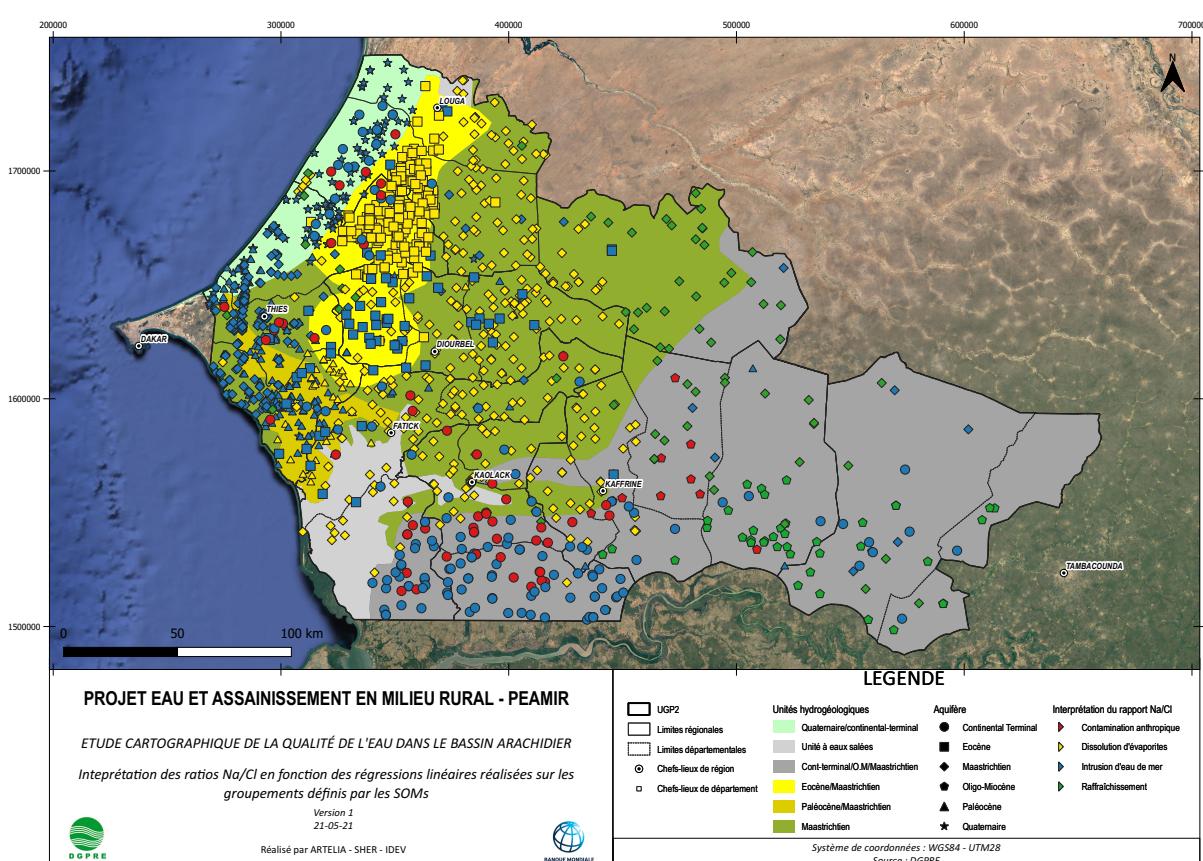


FIGURE 5.26 – Différents types d'intrusions en fonction du ratio Na^+/Cl^-

5.4.2 Indices de saturation

Calculer les indices de saturation permet de mettre en évidence l'influence de certains minéraux sur la minéralisation des eaux souterraines. Ainsi, la formule utilisée pour déterminer ces indices est la suivante où :

- IS est l'indice de saturation
- K est le produit de solubilité à l'équilibre
- PAI est le produit d'activité ionique réel

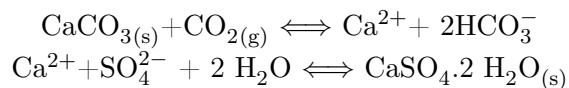
$$IS = \log\left(\frac{PAI}{K}\right)$$

Dans le cadre de ce travail, les indices de saturation de la calcite et du gypse ont été calculés par le module PHREEQC du logiciel DIAGRAMMES.

En raison du caractère sédimentaire du Bassin Arachidier, la calcite est attendue comme étant omniprésente dans le milieu souterrain. La dissolution de minéraux évaporitiques tels que le gypse ou la halite est fréquemment impliquée dans le mécanisme de salinisation des aquifères. D'une part, la dissolution de halite provoque l'augmentation des concentrations en Cl^- et Na^+ ; d'autre part, la dissolution du gypse implique une augmentation des ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} (Thomas et al, 2017).

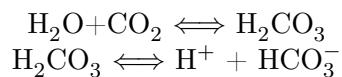
Différentes conclusions peuvent être tirées selon la valeur de l'indice de saturation. En effet, si ce dernier est compris entre -0.5 et 0.5, alors le minéral est en équilibre avec son milieu; s'il est supérieur à 0.5, il est en sursaturation à tendance à précipiter en vue d'approcher l'équilibre tandis que si l'indice est inférieur à -0.5, le minéral est sous-saturé et à une tendance à la dissolution.

Les équations de dilution et de précipitation de la calcite et du gypse sont les suivantes³ :



Ainsi, comme l'indique la réaction, la dissolution de la calcite a un effet tampon neutralisateur de pH.

Plus la profondeur augmente, plus le sol s'enrichit de la matière organique (MO). En se dégradant, cette dernière produit du CO_2 ce qui provoque une diminution du pH tel que :



Ainsi, la concentration des ions H_3O^+ augmente ce qui favorise la réaction de dissolution de la calcite. Ensuite, suite à l'augmentation de la concentration en Ca^{2+} et la précipitation du gypse est favorisée à son tour. Dans leur milieu souterrain, les eaux sont riches en CO_2 mais, dans le but de créer un équilibre avec l'atmosphère, un phénomène de dégazage se produit lorsque l'eau revient en contact avec l'atmosphère.

Les Figures 5.27 5.28 illustrent sous la forme de *nuages de points* les indices de saturation de la calcite et du gypse établis en fonction, respectivement, des teneurs [meq/L] en $\text{Ca} + \text{CO}_3^{2-}$ et $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$.

3. Cependant, pour la calcite, l'équation chimique rigoureuse est la suivante $\text{CaCO}_{3(s)} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ mais, la présence de CO_2 dissout joue un rôle déterminant dans la réaction de telle sorte que l'équation est adaptée sur la forme finale suivante $\text{CaCO}_{3(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

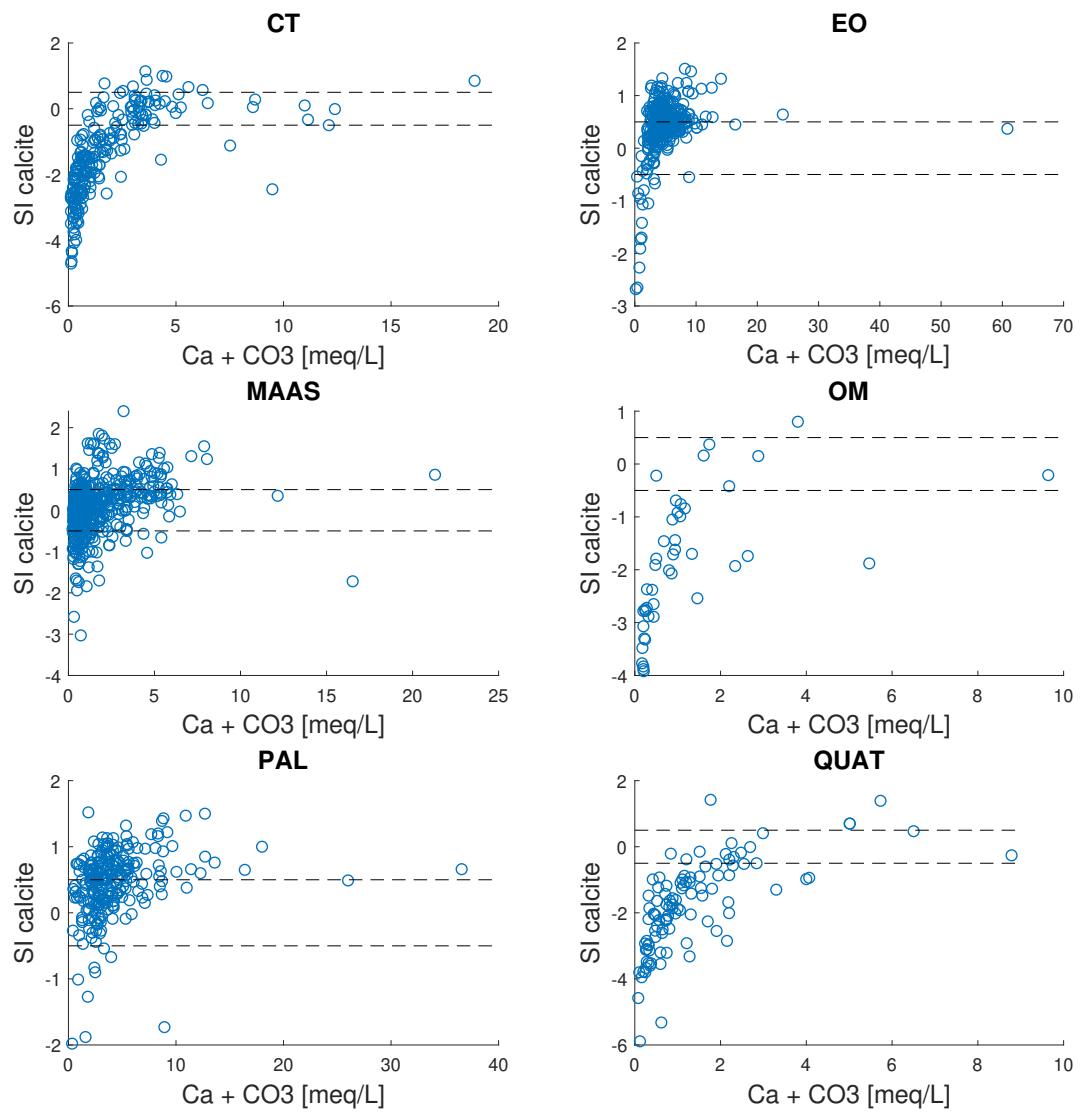


FIGURE 5.27 – Indice de saturation de la calcite par aquifère

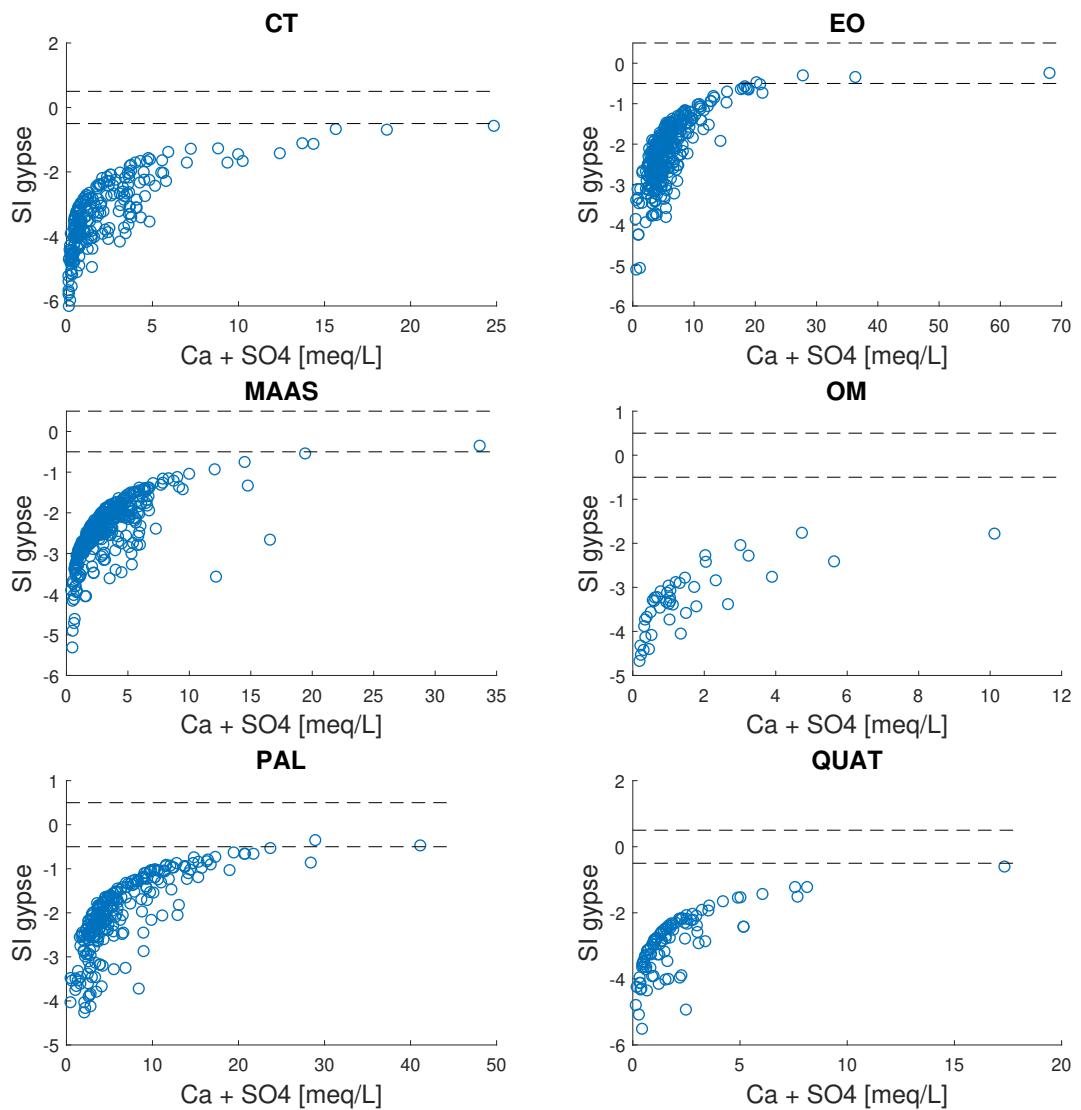


FIGURE 5.28 – Indice de saturation du gypse par aquifère

Il est observé que c'est dans l'Éocène, le Maastrichtien et le Paléocène que la calcite précipite majoritairement. Quant au gypse, il présente une tendance générale à la dissolution. Ainsi, le gypse ne semble pas contrôler la salinité des eaux souterraine. La calcite par contre, semble réactive dans le milieu souterrain et pourrait jouer un rôle dans la minéralisation de l'eau en contrôlant les concentrations en Ca^{2+} (Thomas et al., 2017).

La Figure 5.29 présente la distribution spatiale des interprétations quant à l'indice de saturation de la calcite. La même Figure pour le gypse n'est pas présentée car celui-ci est en sous-saturation dans l'ensemble du Bassin.

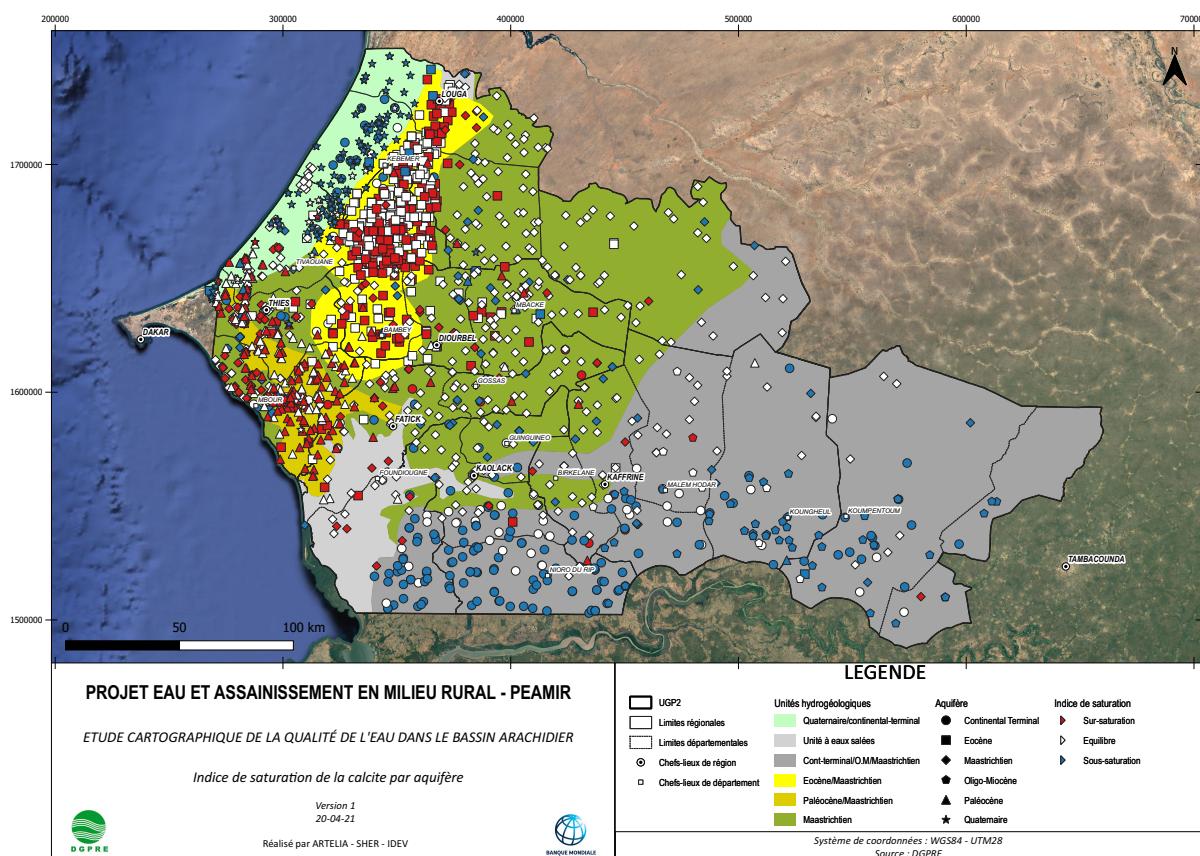


FIGURE 5.29 – Répartition spatiale des indices de saturation de la calcite dans la zone d'étude

La Carte 5.30 présente les pH des ouvrages. Il est observé qu'une partie de ceux du Continental Terminal et du Quaternaire présentent des pH acides qui pourraient s'expliquer par les lithologies particulièrement sableuses de ces formations aquifères. Comme expliqué précédemment, la diminution du pH (*i.e* l'augmentation de la concentration en ions H_3O^+) favorise la dissolution de la calcite. C'est pourquoi les ouvrages de ces aquifères présentant des pH acides correspondent à ceux pour lesquels le SI de la calcite est inférieur à -0.5 (Carte 5.29).

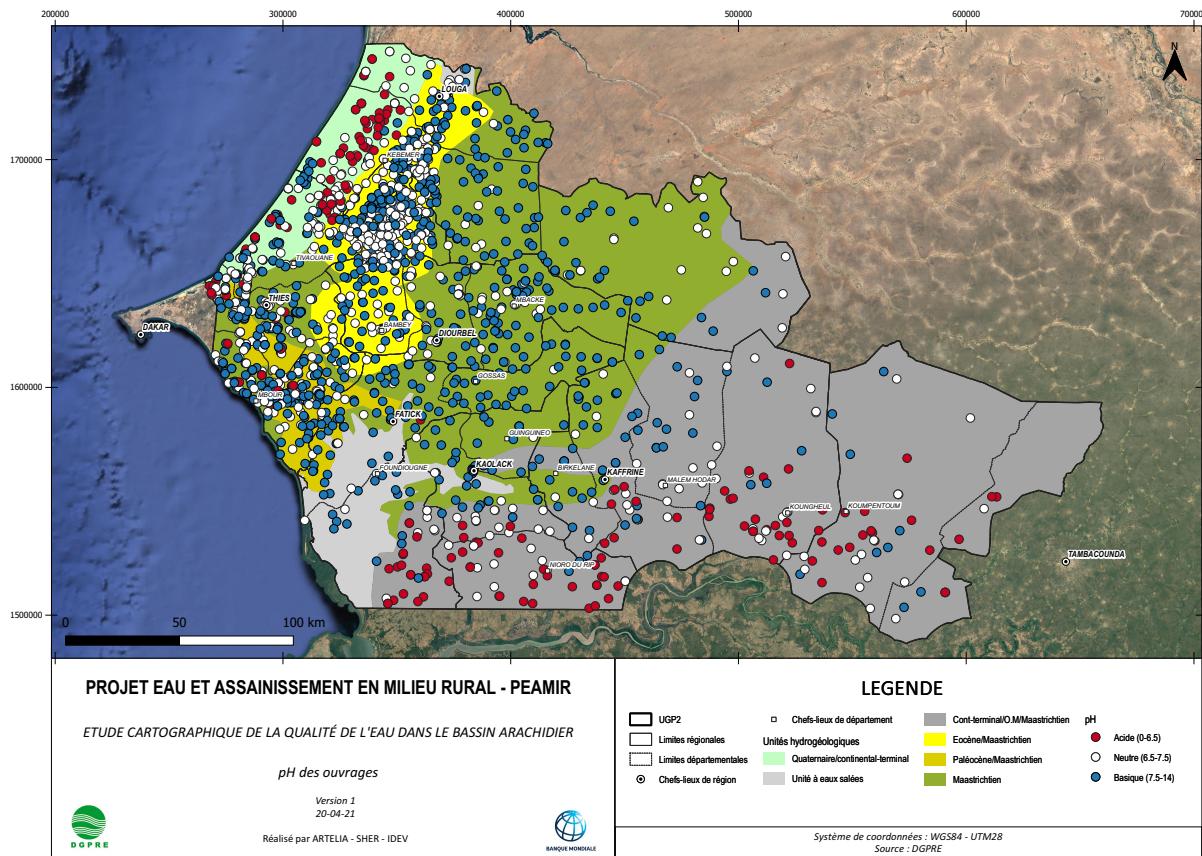


FIGURE 5.30 – Répartition spatiale des pH des différents ouvrages

5.4.2.1 Analyse de l'évolution des indices de saturation dans le sens d'écoulement du Maastrichtien

Il est observé que la calcite est en sur-saturation dans la bande à faciès bi-carbonaté calcique magnésien située à l'est de Dakar. Cette bande est caractérisée par des lithologies calcaires et constitue une zone de recharge pour le Maastrichtien. Dans le sens de l'écoulement, la calcite tend vers l'équilibre avec le milieu mais est également en sous-saturation par endroits. Cela est probablement dû au changement d'ordre lithologique (formations plus argileuses) combiné à des échanges cationiques.

5.4.2.2 Discussion et limites des analyses

Il est à noter que les interactions entre la profondeur de la nappe, la teneur en CO_2 , pH, ... et l'indice de saturation sont complexes car ces paramètres sont intimement liés. De plus, la base de données ne considère que les ouvrages concernant l'eau souterraine. Dès lors, les phénomènes de dégazage ne seraient que superficiellement observables au niveau de la surface piézométrique des puits, forages, ... Les données concernant le $\text{CO}_{2(g)}$ dissous ne sont également pas renseignées. Il est donc délicat de tirer des conclusions plus poussées dans ce domaine.

Aussi, il reste à noter qu'au vu des indices de saturation particulièrement faibles du gypse, il est possible que celui-ci ne soit pas présent en solution.

5.4.3 Discussion générale au sujet de l'origine de la salinité

Il reste assez difficile de qualifier l'origine de la salinité. En effet, la zone d'étude est vaste et présente un réseau hydrogéologique complexe. De plus, il est possible que les mécanismes de salinisation se superposent (*exemple* : dissolution de halite combinée à des phénomènes de rafraîchissement).

Les méthodes utilisées dans le cadre de cette section sont limitées. En effet :

- La qualité des régressions linéaires fluctue. Elle dépend des groupements définis lors de la troisième tentative des SOMs. Ainsi, l'interprétation des ratios Na^+/Cl^- est délicate.
- Les indices de saturation sont faibles et il est possible que le minéral ne soit simplement pas présent en solution. De plus, au vu de la base de données, aucun lien n'a pas été établi entre les indices de saturation et la profondeur de nappe.

À noter également qu'il n'existe que très peu de références bibliographiques concernant l'origine de la salinité du Bassin Arachidier. Cependant l'hypothèse la plus souvent citée pour l'expliquer serait une origine naturelle : le développement d'une zone sur-salée dans les formations anciennes et profondes du Maastrichtien suite aux mouvements de transgression-régression de la mer lors de la mise en place du bassin (DGPRE, 2013).

Les analyses chimiques semblent aller dans ce sens, même s'il reste délicat de distinguer les phénomènes de dissolution d'évaporites et de mélange avec d'anciennes saumures.

Pour synthétiser :

- Au nord du Bassin Arachidier, les intrusions salines seraient principalement observées dans les régions de Thiès, Louga et Diourbel. Au sud du Bassin, des eaux de mer remonteraient le delta du Sine Saloum et longeraient la frontière avec la Gambie.
- Plus à l'intérieur des terres, les ouvrages du Maastrichtien semblent impactés par la dissolution d'évaporites ou par le mélange avec d'anciennes saumures.
- Ainsi, la partie Est du Bassin Arachidier jusqu'à Kaffrine est susceptiblement touchée par une forte salinité des eaux souterraines. La conductivité élevée y reflète alors un taux de minéralisation élevé.
- A l'est du Bassin Arachidier, c'est le phénomène de rafraîchissement qui semble dominer.
- À proximité des cultures irriguées, des contaminations salines d'origine anthropique sont souvent localisées même si généralement peu fréquentes dans le Bassin.

Des études plus locales permettraient de préciser encore davantage l'origine des intrusions et des contaminations ainsi que leur extension spatio-temporelle. Deux interprétations restent envisageables (Baruesseau et al., 2009) :

- Les intrusions d'eau de mer au Littoral seraient dues à des phénomènes de rabattements de la nappe suite à l'exploitation de l'aquifère. Au Sud et au Nord, les intrusions d'eau de mer remontent respectivement les embouchures des fleuves Sine-Saloum et du Sénégal, probablement en raison d'une faible topographie et des remontées du niveau marin.
- La salinité à l'intérieur des terres serait due au faible renouvellement des eaux souterraines lié à :
 1. la décroissance de la pluviométrie
 2. un climat chaud favorisant un phénomène d'évaporation des saumures et d'eaux marines résiduelles anciennes. Ces dernières auraient pris place lors des mouvements de transgression-régression de la mer durant de la mise en place du bassin (DGPRE, 2013)

5.5 Échanges cationiques

La Figure 5.31 présente, par aquifère, les graphes binaires des concentrations molaires, exprimées en [meq/L], de la différence $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ en fonction de $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$.

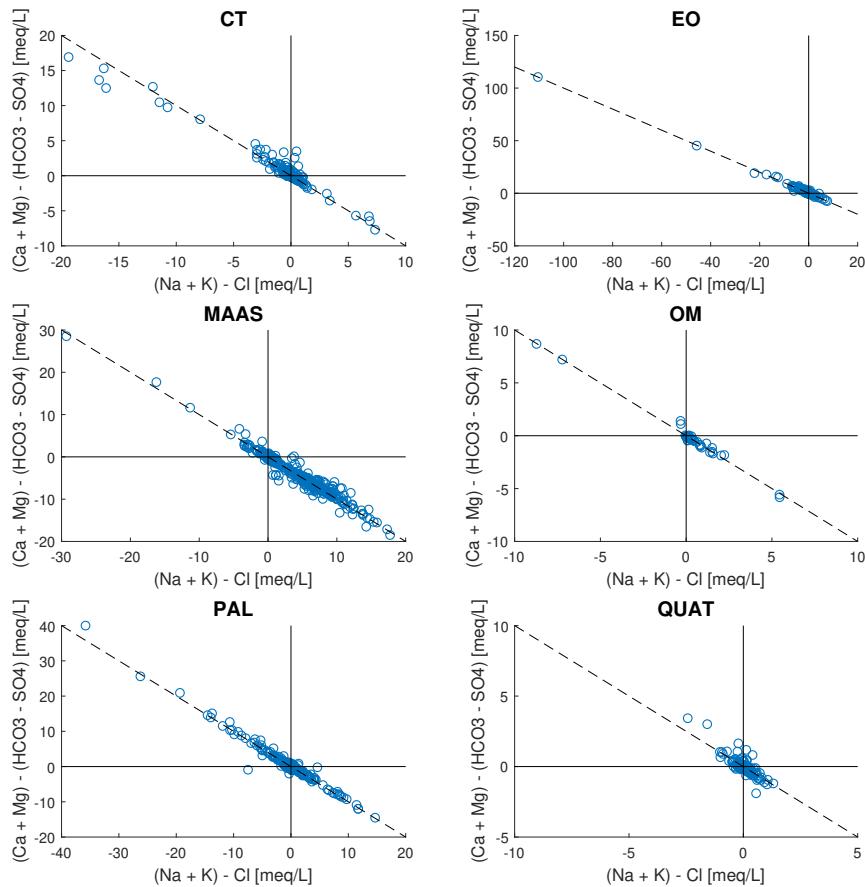


FIGURE 5.31 – Graphes binaires de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ en fonction de $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$

Dans le cas où les *nuages de points* s'alignent et s'étirent sur la droite de pente égale à -1, alors ils reflètent des échanges cationiques (Gning et al., 2017 ; Jalali, 2005 ; Kim et al., 2004 ; Ma et al., 2014). Une concentration des points dans la partie supérieure gauche du graphique indique que les ions Na^+ remplacent le Ca^{2+} présent sur les sites d'absorption ; et inversement si les points sont dans la partie inférieure droite (Gning et al., 2017 ; Thomas et al., 2017).

Il est observé que les différents *nuages de points* s'alignent bien selon une droite de pente -1. À noter également que plus ils s'étaient par rapport à l'origine, plus des échanges cationiques avec une matrice argileuse sont probables (Awni, 2004 ; Farrah, 2011 ; Gning, 2017). Ainsi, il est observé que, en raison de la présence de lithologies sableuses et calcaireuses, les *nuages de points* caractéristiques du Continental Terminal, de l'Éocène, de l'Oligo-Miocène et du Quaternaire sont regroupés autour de l'origine du système d'axes et ne témoignent pas d'échanges cationiques significatifs⁴. Dans le cas du Maastrichtien et du Paléocène, caractérisés par des formations beaucoup plus marneuses et argileuses, les échanges cationiques sont nettement plus perceptibles.

4. Les deux points de l'Éocène dans la partie supérieure gauche du *nuage de points* se situent au niveau du delta du Sine Saloum et à Kaffrine, loin des autres ouvrages propres à l'Éocène.

5.5.1 Échanges cationiques dans le sens d'écoulement du Maastrichtien

L'aquifère du Maastrichtien présentant, *a priori*, le plus de contaminations salines, il est intéressant d'analyser l'évolution des échanges cationiques dans le sens de l'écoulement souterrain.

Selon la thèse d'Hélène Madioune soutenue en 2012 et le rapport de la DGPRE (2020b), le Maastrichtien comprend deux zones de recharges :

1. l'horst de Diass
2. la partie Est du Bassin où les formations du Maastrichtien sont en contact avec celles du socle.

Comme schématisé à la Figure 5.32, les eaux souterraines du Maastrichtien s'écouleraient de ces deux zones de recharges vers l'intérieur des terres, dans la bande saline (Madioune, 2012, DGPRE, 2020b).

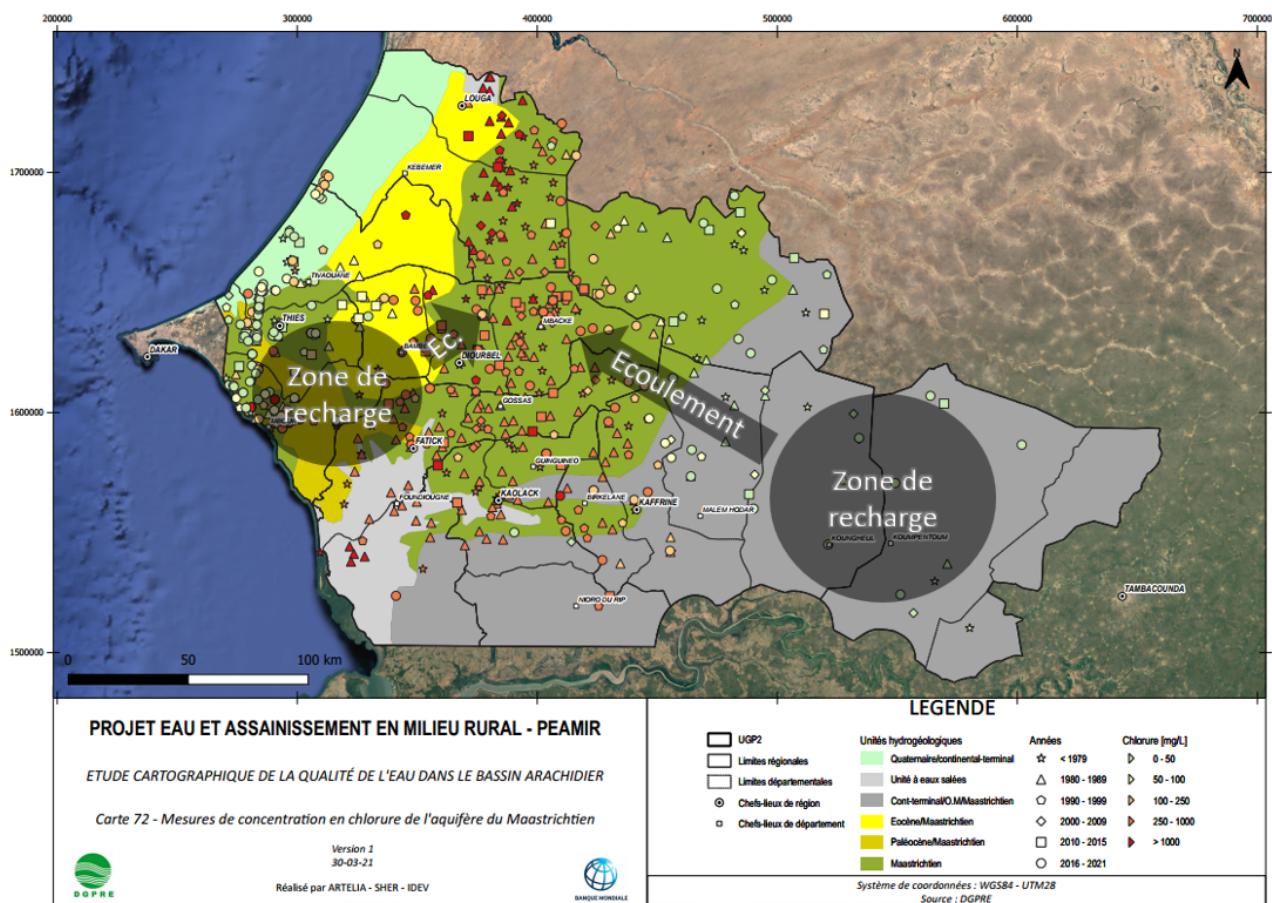


FIGURE 5.32 – Schématisation de l'écoulement de l'eau souterraine et lien avec la bande saline

Il s'avère que les ouvrages correspondant à ces zones de recharges s'organisent dans la partie supérieure gauche des graphes. Le *nuage de points* évolue donc vers le coin inférieur droit du système d'axes comme indiqué à la Figure 5.33. Il y a donc, dans le sens de l'écoulement, un enrichissement en Na^{2+} et un phénomène de rafraîchissement des eaux souterraines.

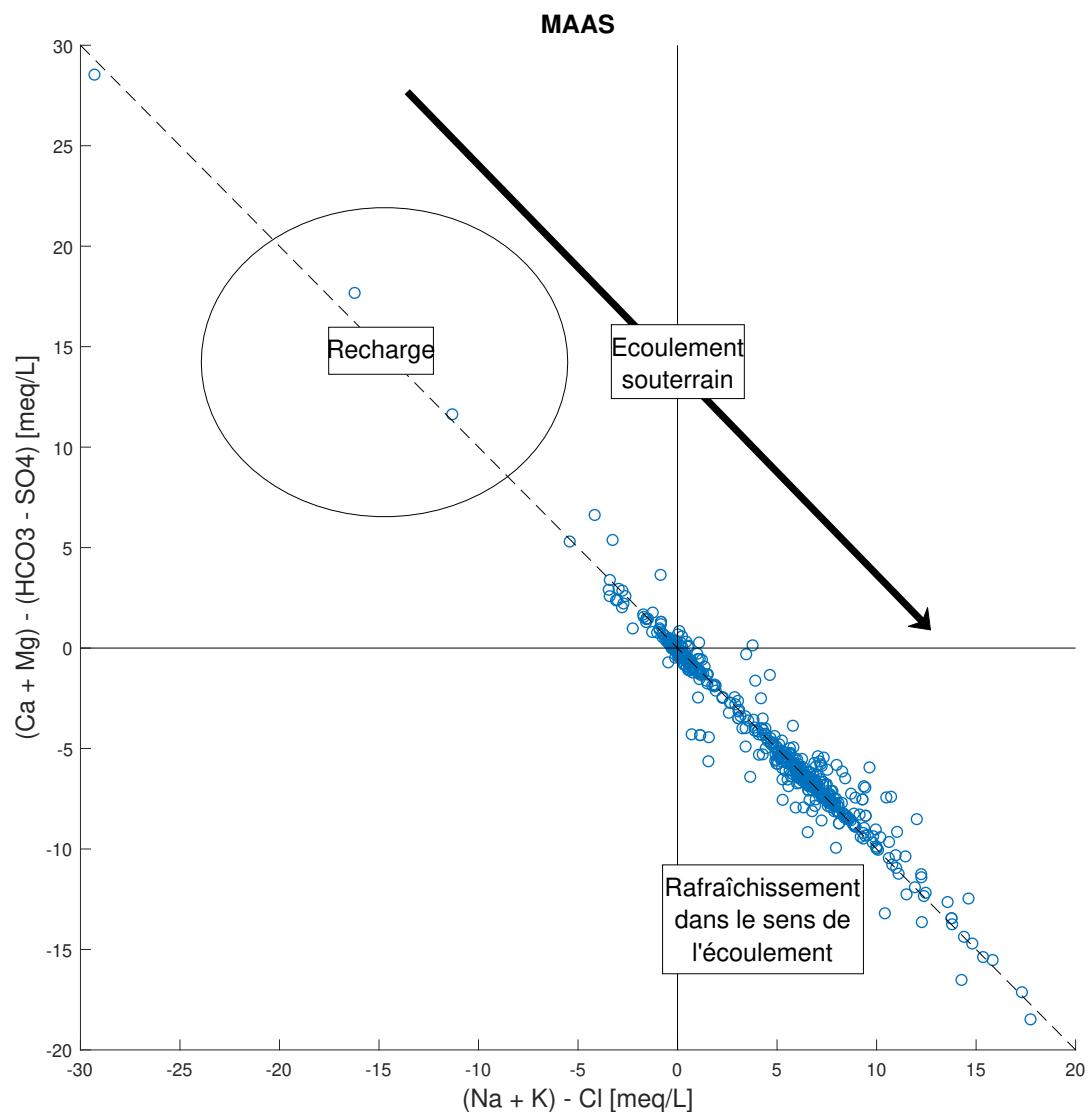


FIGURE 5.33 – Évolution du nuage de points en fonction de l'écoulement

Conclusion et perspectives

Compte tenu de sa superficie ($47\ 387\ km^2$) et de son système hydrogéologique complexe, le Bassin Arachidier fait l'objet de nombreuses variétés géologiques mêlant les procédés hydrochimiques entre eux. Les recherches bibliographiques mettent en évidence plusieurs sources de contaminations naturelles ou anthropiques telles que :

- la présence d'intrusions salines en bordure de Littoral ainsi qu'à l'intérieur des terres, respectivement dues à :
 1. la surexploitation de l'eau souterraine provoquant un rabattement des niveaux piézométriques
 2. la présence d'évaporites et saumures liées aux épisodes de transgression-régression de la mer lors de la mise en place du Bassin
- des concentrations en fer et fluorures élevées dépassant les normes de potabilité en raison de la minéralisation des formations et du type de sol

Dans le but de caractériser la qualité de l'eau souterraine du Bassin Arachidier, une base de données reprenant les campagnes d'échantillonnage et projets récents a été créée. Au vu des contaminations naturelles et anthropiques attendues dans la zone d'étude, il a été important de faire la différence entre les *outliers* liés à des erreurs de mesures ou à des concentrations particulièrement élevées.

Ainsi, après avoir conservé seulement les ouvrages présentant des balances ioniques inférieures à |8 %|, les *outliers* statistiques, mis en évidence par l'établissement de *boxplots*, ont été représentés spatialement dans le Bassin Arachidier. Ces derniers se regroupant par aquifère et un tri sur les balances ioniques ayant déjà été préalablement exécuté ; il a été possible de conclure que ces concentrations particulièrement élevées témoignaient de sources de contamination de différents types.

Par ailleurs, le but de ce travail était de présenter la qualité de l'eau souterraine d'une zone plutôt vaste faisant l'objet d'un complexe réseau hydrogéologique. Il est donc important, à cette échelle régionale, de ne pas s'affranchir des *outliers* statistiques dans le but de représenter au mieux les variétés hydrochimiques du Bassin.

Par aquifère, les faciès hydrochimiques sont variables et témoignent des variations géologiques et hydrogéologiques de la zone d'intérêt. Au vu du nombre important de données, une approche multi-variée a été réalisée et a permis de grouper les faciès similaires entre eux.

Ainsi, par régression linéaire des différents graphes binaires Na^+/Cl^- , il a été possible de déterminer si le groupe faisait l'objet d'une contamination anthropique, de la présence d'eau de mer, de dissolutions de la halite ou de rafraîchissement.

Les analyses chimiques couplées à la mise en place des cartes reprenant la disposition spatiale des ouvrages ont néanmoins permis de dégager plusieurs hypothèses quant à l'origine de la chimie du Bassin. Les ouvrages peu profonds du Continental Terminal et du Quaternaire font *a priori* l'objet de concentrations élevées en nitrates et sulfates potentiellement d'origine anthropique en lien avec la présence de cultures irriguées. Les unités morphopédologiques, principalement ferrugineuses, pourraient expliquer les concentrations élevées en fer mesurées sur l'ensemble de la zone. Les teneurs élevées en fluorures seraient dues à la minéralisation des couches ainsi qu'à la présence d'argiles d'origine marine dans le Maastrichtien.

Concernant la salinité des eaux, elle serait, à l'intérieur des terres, due à la présence d'évaporites et/ou d'anciennes saumures et ; en bordure de Littoral, causée par des intrusions d'eaux de mer suite à une surexploitation des aquifères.

Il ressort également des analyses chimiques que la zone de recharge du Maastrichtien a lieu à l'est du Bassin, dans les formations en contact avec le Socle ; ainsi qu'au niveau du Horst de Diass, à l'ouest. L'écoulement, vers l'intérieur des terres, présente des phénomènes de rafraîchissements avec échanges cationiques. Ces échanges ont principalement lieu en contact avec des formations argileuses caractéristiques du Maastrichtien et du Paléocène. En raison des lithologies plutôt sableuses du Continental Terminal, de l'Éocène, de l'Oligo-Miocène et du Quaternaire, l'analyse du rapport $((\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-) / ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}))$ ne présente finalement que très peu d'échanges cationiques.

Concernant les indices de saturation, il apparaît que la calcite est en sur-saturation surtout dans les unités hydrogéologiques de l'Éocène et du Paléocène tandis qu'elle est en sous-saturation au niveau du Continental Terminal et du Quaternaire. Elle semble en équilibre avec son milieu dans le Maastrichtien et l'Oligo-Miocène. Quant au gypse, il est en sous-saturation dans l'eau souterraine et a tendance à la dissolution dans l'ensemble du Bassin.

Dans le cadre de ce travail, les analyses chimiques de l'eau souterraine sont ponctuelles et dépendent de la disposition spatiale des ouvrages connus et accessibles dans la base de données. Une interpolation spatiale des données pourrait permettre d'étendre les connaissances sur la zone avec pour but d'éventuellement mieux comprendre et visualiser la complexité des conditions géochimiques et hydrogéologiques du Bassin. Cependant, au vu du caractère régional de ce travail, cela n'a pas été effectué. Dans le cadre d'études plus locales, des interpolations spatiales ou campagnes géophysiques dans le but d'étudier la relation résistivité/conductivité pourraient être envisagées (Kloppmann et al., 2011). Aussi, l'obtention de meilleurs suivis temporels et de données isotopiques pourrait permettre d'affiner les analyses. Des analyses supplémentaires concernant les concentrations en bromures et le manganèse auraient permis une meilleure analyse des intrusions salines et des conditions REDOX. De plus, des précisions quant à l'origine des données (pH et conductivité mesurés en laboratoire ou *in situ* ; fer total ou dissous) seraient appréciables à l'avenir.

Du point de vue de l'écoulement, il n'a pas été possible de proposer des cartes de niveaux piézométriques cohérentes. En effet, les données de profondeur de la nappe ne sont pas suffisantes pour couvrir l'ensemble de la zone et ne datent ni des mêmes années ni des mêmes périodes (humides ou sèches). Dès lors, l'étude de l'évolution du faciès dans le sens de l'écoulement n'a été réalisée que pour le Maastrichtien en se basant sur les résultats globaux de la thèse d'Hélène Madioune (2012).

Pour conclure, la base de données utilisée a été créée selon les exigences de l'organisme d'accueil du stage en entreprise, SHER. Ainsi, elle reprend les informations les plus récentes et complètes possibles d'un même ouvrage. Dans le but d'améliorer les analyses statistiques et chimiques, il aurait été préférable de ne pas considérer les mesures trop anciennes afin de mieux rendre compte de la qualité actuelle du Bassin. L'objectif final du projet de la DGPRE étant de rendre cette base de données dynamique en interaction avec différents outils SIG.

Il reste à rappeler que ce travail s'inscrit dans le projet de la DGPRE visant à cartographier la qualité de l'eau souterraine du Bassin Arachidier. Il présente ainsi une vision, à l'échelle régionale, des phénomènes hydrochimiques de la zone. Il est évident que des études locales devraient être menées afin de préciser les différents procédés géologiques en place.

Références

Abid, K., Zouari, K., Dulinski, M., Chkir, N., Abidi, B., 2011. « Hydrologic and Geologic Factors Controlling Groundwater Geochemistry in the Turonian Aquifer (Southern Tunisia) ». *Hydrogeology Journal*, Vol. 19., no. 2, pages 415-427.
<https://doi.org/10.1007/s10040-010-0668-z>

Agence National de l'Aménagement, 2020. « Plan National d'Aménagement et de Développement Territorial (PNADT) : Atlas Cartographique ». Ministère des Collectivités territoriales, du Développement et de l'Aménagement des Territoires, Sénégal.

Albergel, J., Dakosta, H., 1996. « Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal ». Géoscience pour le développement : L'hydrologie tropicale. Article de la conférence de Paris, mai 1995. AHS Publ., no. 238, 1996.

Audibert, M., 1970. « Delta Du Fleuve Sénégal : étude hydrogéologique ». Projet hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal, Vol.3, page 54.

Awni, T.B., 2008. « Weathering process effects on the chemistry of the main springs of the Yarmouk Basin, North Jordan ». *J. Environ. Hydrol.*, Vol. 16, no. 20, pages 1–11.

Barusseau, J-P., Castaigne, P., Duvail, C., Noël, B-J., Nehlig, P., Roger, J., Serrano, O., Banton, O., Comte, J-C., Travi, Y., 2009. « Notice explicative de la cartographie multicouches à 1/50 000 et 1/20 000 de la zone d'activité du Cap-Vert ». Ministère de mines, de l'industrie et des PME & Direction des mines et de la géologie, Dakar.

Baye, J., 1976. « Étude hydrogéologique de la zone des Niayes : ressources en eau ». Rapport technique.

Bekkoussa, M., Jourde, H., Batiot-Guilhe, C., Meddi, M., Khaldi, A., Azzaz, H., 2013. « Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien ». *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 5, no. 5, pages 111–112.

BRGM, 1998. « Élaboration de tests de validation des données analytiques de l'Observatoire National de la Qualité des Eaux Souterraines (ONQUES) ». Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Brouyère, 2019. Cours de « Protection et Qualité des eaux souterraines », jeu de données des travaux pratiques. Université de Liège, Belgique.

Castelain, 1965. « Aperçu stratigraphique et micropaléontologique du bassin du Sénégal occidental. Historique de la découverte paléontologique ». Colloque International de Micropaléontologie, Dakar. Mémoire BRGM, pages 135-159.

Centre de Suivi Écologique, 2013. « Annuaire sur l'environnement et les ressources naturelles du Sénégal ». Ministère de l'Environnement et de Développement Durable.

Centre de Suivi Écologique, 2015. « Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal ». Ministère de l'Environnement et du Développement Durable.

Cochet, H., Ducourtieux, O., Garambois, N., 2018. « Systèmes agraires et changement climatique au Sud : les chemins de l'adaptation ».

ISBN : 978-2-7592-2920-8

Commission Belge, 2010. « Dossier Technique et Financier : Appui à l'amélioration de la qualité de l'eau dans les régions de Diourbel, Fatick, Kaolack et Kaffrine ». DTF PEPAM : SEN 08 021 11.

Coopération Technique Belge (CTB), 2009. « Analyses techniques préalables à la formulation appui à l'amélioration de la qualité de l'eau dans les régions de Diourbel, Fatick, Kaolack et Kaffrine : rapport hydrogéologie ». Senagrosol-Consult.

Danel, V., 2017. « Eau potable destinée à la consommation humaine : liste des paramètres retenus comme critères de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine ». Université Grenoble Alpes, France.

<https://www.sfmu.org/toxin/EAU/DIVERS/LISTPARA.HTM>

Debieche, T.H., 2002. « Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et minéraux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : application à la basse plaine de la Seybouse- Nord-Est Algérien ». Thèse de doctorat, UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, France.

DGPRE, 2011. « Étude du Projet de mise en œuvre du Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en eau du Sénégal : les ressources du milieu physique. Bilan diagnostic des ressources en eau (première partie) ». Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau.

DGPRE, 2012. « Projet de gestion intégrée et durable des ressources en eau en Afrique axé sur les États membres de la région du Sahel (RAF7011) ». Présentation, juillet 2012.

DGPRE, 2013. « Études hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités des ressources en eau ». Projet de mise en œuvre du PAGIRE dans le Bassin Arachidier.

DGPRE, 2014. « Étude du Plan de Gestion des Ressources en Eau de la Sous UGP Niayes ». Rapport provisoire.

DGPRE, 2018a. « Études hydrogéologique des potentialités des nappes superficielles des et intermédiaires en vue d'une dilution et/ou d'un transfert d'eau dans la zone du Bassin Arachidier ». Programme d'amélioration des services d'eau potable et d'assainissement en milieu rural. Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement, Sénégal.

DGPRE, 2018b. « Étude hydrogéologique complémentaire du système du Horst de Ndiass : Projet Sectoriel Eau et Assainissement en Milieu Urbain (PEAMU) ». Financé par l'Association Internationale de Développement (IDA) et réalisé par les groupes TPF-SETICO/ANTEA.

DGPRE, 2018c. « Assistance Technique pour l'élaboration du bulletin hydrogéologique et l'optimisation du réseau piézométrique national dans le cadre du PASEPAR ».

DGPRE, 2020a. « Étude cartographique de la qualité de l'eau dans le Bassin Arachidier ». Projet Eau et Assainissement en Milieu Rural (PEAMIR), réalisé par ARTELIA - SHER - IDEV.

DGPRE, 2020b. « Étude cartographique de la qualité de l'eau dans le bassin arachidier : R1. rapport de démarrage et d'orientation méthodologique ». Projet Eau et Assainissement en Milieu Rural (PEAMIR), réalisé par ARTELIA - SHER - IDEV.

DGPRE, 2021. « Rapport d'état des lieux intermédiaire de la qualité de l'eau et des facteurs environnementaux ». Projet Eau et Assainissement en Milieu Rural (PEAMIR), ARTELIA/IDEV/SHER pour le Ministère de l'eau et de l'assainissement, Sénégal.

Diallo, M-D., Ndiaye, O., Saleh, M, Tine, A., Diop, A., Guisse, A., 2015. « Étude comparative de la salinité de l'eau et des sols dans la zone Nord des Niayes (Sénégal) ». African. Crop. Science Journal, Vol. 23, no. 2, pages 101-111.

Dixon, W., Chiswell, B., 1992. « The Use of Hydrochemical Sections to Identify Recharge Areas and Saline Intrusions in Alluvial Aquifers, Southeast Queensland, Australia ». Journal of Hydrology, Vol. 135., no. 1, pages 259-274.

[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90091-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(92)90091-9).

Duchaufour, P., 1958. « La science du sol : la Pédologie de M. Ph. Duchaufour ». Annales de Géographie, Vol. 67, no. 359.

Edmunds, W., Guendouz, A., Mamou, A., Moulla, A., Shand, P., Zouari, K., 2003. « Groundwater Evolution in the Continental Intercalaire Aquifer of Southern Algeria and Tunisia : Trace Element and Isotopic Indicators ». Applied Geochemistry, no. 6, pages 805-822.

[http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00189-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00189-0).

Gning, A., 2015. « Étude et Modélisation Hydrogéologique des Interactions Eaux de Surface-Eaux Souterraines dans un Contexte d'Agriculture Irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal ». Thèse de doctorat, Université de Liège

Gning, A., Orban, P., Gesels, J., Ngomb, F., Dassargues, A., Maloub, R., Brouyère, S., 2017. « Factors controlling the evolution of groundwater dynamics and chemistry in the Senegal River Delta ». Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.005>

Grubbs, F., 1969. « Procedures for detecting outlying observations in samples ». Technometrics, Vol. 11.

Guendouz, A., Moulla, A., Edmunds, W., Zouari, K., Shand, P., Mamou, A., 2002. « Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara ». Engineering Sciences Faculty, Blida, Algeria, pages 483-495.

Haselbeck, V., Kordilla, J., Krause, F., Sauter, M., 2019. « Self-Organizing Maps for the Identification of Groundwater Salinity Sources Based on Hydrochemical Data ». Journal of Hydrology, Vol. 576, pages 610-619.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.053>

Hidalgo, M., Cruz-Sanjulián, J., Sanroma, A., 1995. « Evolución geoquímica de las aguas subterráneas en una cuenca sedimentaria (acuífero de Baza-Caniles, Granada, España) ». Geochemical Evolution of underground waters in a sedimentary river basin (water-bearing of Baza-Caniles, Granada, Spain).

Tierra Tecnol., Vol. 20, pages 39–48.

Jalali, M., 2005. « Major Ion Chemistry of Groundwaters in the Bahar Area, Hamadan, Western Iran ». Environmental Geology, Vol. 47, no. 6, pages 763–772.

Journal officiel des Communautés européennes : Directive 98/83/CE, 1998. « Directive sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine ». JO L 330 du 5.12.1998, page 32.

Kim, K., Rajmohan, N., Kim, H., 2004. « Assessment of Groundwater Chemistry in a Coastal Region (Kunsan, Korea) Having Complex Contaminant Sources : A Stoichiometric Approach ». Environmental Geology, Vol. 46, pages 763–774.

Kloppmann, W., Bourhane, A., Schomburgk, S., 2010. « Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer ». Rapport BRGM/RP-59496-FR

Kloppmann, W., Bourhane, A., Asfirane, F., 2011. « Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau : emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques ». BRGM et ONEMA, Office Nationale de l'eau et des milieux aquatiques.

Kohonen T., 2001. « Self-Organizing Maps ». Springer Series, Information Sciences, Vol. 30.

Krimissa, S., Michelot, J., Bouchaou, L., Mudry, J., Hsissou, Y., 2004. « Sur l'origine Par Altération Du Substratum Schisteux de La Minéralisation Chlorurée Des Eaux d'une Nappe Côtière Sous Climat Semi-Aride (Chtouka-Massa, Maroc) ». Comptes Rendus Geoscience, Vol. 336., no. 15, pages 1363-1369.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.003>.

Latil-Brun, M., Flicoteaux, R., 1986. « Subsidence de la marge sénégalaise, ses relations avec la structure de la croûte : comparaison avec la marge conjuguée américaine au niveau du Blake Plateau ». Bulletin des Centres de Recherche Exploration - Production Elf Aquitaine, Vol. 10, pages 69-82.

Le Borgne, J., 1988. « La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. Dakar ». Laboratoire de Climatologie, Université Cheikh Anta Diop

Ma R., Shi, J., Liu, J., Gui, C., 2014. « Combined Use of Multivariate Statistical Analysis and Hydrochemical Analysis for Groundwater Quality Evolution : A Case Study in North Chain Plain ». English. Journal of Earth Science, Vol. 25., no. 3, pages 587-597.

<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s12583-014-0446-2>.

Maddala, G., 1992. « Introduction to Econometrics. New York, MacMillan ».
ISBN 0-02-374545-2

Madioune, D., 2012. « Étude hydrogéologique du système aquifère du horst de Diass en condition d'exploitation intensive (bassin sédimentaire sénégalaïs) : apport des techniques de télédétection, modélisation, géochimie et isotopie ». Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique.

Magaritz, M., Nadler, A., Koyumdjisky, H., Dan, J., 1981. « The Use of Na/Cl Ratios to Trace Solute Sources in a Semiarid Zone ». Water Resources Research, Vol. 17., no. 3, pages 602-608.

<http://dx.doi.org/10.1029/WR017i003p00602>.

Malou, R., Diop, F., Dacosta, H., Saos, J-L., Akpo, L., 1992. « Influence du climat sur les ressources

en eau souterraine en zone soudano-sahélienne ».

Malou, R., 2004. « Impact du climat sur les ressources en eau en zones soudano-sahélienne ». Thèse de doctorat d'état. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

McGill, R., Tukey, J., Larsen, W., 1978. « Variations of Boxplots ». *The American Statistician*, Vol. 32, no. 1, 1978

Meybeck, M., 1987. « Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River-Dissolved Loads ». *American Journal of Science*, Vol. 287, pages 401-428.

<http://dx.doi.org/doi:10.2475/ajs.287.5.401>.

Michel, P., 1960. « Recherche géomorphologique en Casamance et en Gambie méridionale ». Rapport BRGM, Dakar.

Michel, P., 1973. « Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique ». Mémoire, Paris.

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD), 2012. « Rapport national sur le développement durable au Burkina Faso (1992-2012) ». Organisation des Nations Unies, 2012. L'avenir que nous voulons. Résultats de la Conférence Rio 20.

Montety, V., 2008. « Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque - cas de la Camargue (delta du Rhône, France) ». Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 280 pages.

Müller D. 2006. « D18 : final proposal for a methodology to setup groundwater threshold values in Europe ». Bridge : Background Criteria for the Identification of Groundwater Thresholds, page 63.

NASA, 2021. POWER Data Access Viewer (NASA/POWER SRB/FLASHFlux/MERRA2/GEOS 5.12.4 (FP-IT) 0.5 x 0.5 Degree Interannual Averages/Sums).

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Ndiaye, O., Diallo, A., Matty, F., Thiaw, A., Fall, R., Guisse, A., 2012. « Caractérisation des sols de la zone des Niayes de Pikine et de Saint Louis (Sénégal) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 6., No. 1.

Ollagnier, S., Vittecoq, B., 2017. « Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2006 : Résultats et interprétation ». BRGM, page 77.

Organisation Mondiale de la Santé, 2017. « Directive de qualité pour l'eau de boisson ». ISBN 978-92-4-254995-9

Pasotti, M., Widmer, N., Sané Niang, A., Diop, M., Dia, E., Leduc, J., Couck, G., 2016. « De l'eau productive pour l'agriculture au Sénégal ». CTB, Belgique.

Piper A., 1944. « A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water ». *Analyses, Trans. Amer. Geophysical Union*, Vol. 25, pages 914-923.

Re, V., Faye, S., Faye, A., Faye, S., Gaye, C-B., Sacchi, E., Zuppi, G-M, 2010. « Water Quality Decline in Coastal Aquifers under Anthropic Pressure : the case of a suburban area of Dakar ». *Environmental*

Monitoring and Assesment.

Roger, J., Noël, B., Barusseau, J., Serrano, O., Nehlig, P., Duvail C., 2009a. « Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest ». Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.

Roger, J., Duvail, C., Barusseau, J.P., Noël, B.J., Nehlig, P., Serrano, O., 2009b. « Carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest ». Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.

Sall, M., 2010. « Transfert de nitrate à travers la zone non saturée du sol vers la nappe phréatique de la zone des Niayes : caractérisation et modélisation ». Thèse de doctorat à l'Université Catholique de Louvain, Belgique.

Simler R. 2013. Logiciel DIAGRAMMES. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon.

<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

Stigter, T.Y., 2006. « Impact of the shif from groundwater to surface water irrigation on aquifer dynamics and hydrochemistry in a semi-arid region in the south of Portugal ». Agricultural Water Management, no. 85, pages 121–132.

Spengler, A., Castelain, J., Cauvin, J., Leroy, M., 1966. « Le bassin secondaire et tertiaire du Sénégal ». Symposium New Delhi, coordination D. Reyre, pages 80-94.

Templeton, R., 1971. « The geology of the continental margin between Dakar and Cape Palmas ». The geology of the east Atlantic continental margin., Inst. Geol. Sci., (London), Vol. 70, no. 16, pages 43-60.

Thomas, C., Orban, P. et Brouyère, S., 2017. « Caractérisation de la concentration de référence de certains paramètres chimiques présents naturellement dans les masses d'eau souterraine captives du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03) en Région de Bruxelles Capitale ». Convention IBGE et HGE-ULg.

Travi, Y., 1988. « Hydrogéochimie et hydrologie isotopique des aquifères fluorures du bassin du Sénégal : origine et conditions de transport du fluor dans les eaux souterraines ». Thèse soutenue en 1988 à Paris, en partenariat avec Université de Paris-Sud. Faculté des sciences d'Orsay (Essonne).

Travi, Y., Fall, M., Fall, N., Hmeyade, B., Bacar, S., 2017. « Rapport du projet régional de coopération technique appuyé par l'AIEA (RAF/7/011) : gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel ». AIEA, Autriche.

Unité-Progrès-Justice, 2013. « Politique nationale de développement durable au Burkina Faso ».

Universalis, 2021. « Atlas : Afrique - Sénégal ». Consulté le 28 mai, 2021.

<https://www.universalis.fr/atlas/afrique/senegal/>

Vengosh, A., 2003. « Salinization and Saline Environments in Treatise un geochemistry ». Elsevier Ltd., Vol. 9, pages 333-365.

Vesanto J., Himberg J., Alhoniemi E., Pearhankangas J., 1999, « Self-organizing map in MATLAB : the SOM Toolbox ». Proceedings of the MATLAB DSP Conference, pages. 35-40, Espoo, Finlande.

Williams, W., 2001. « Anthropogenic salinization of inland waters ». Hydrobiology Journal, no. 466, pages 329-337.

Annexe

A Base de données

TDS	Chlore	SO4	HCO3	CO3	NO3	Fluor	P2O5	Ca	Mg	Na
0	34	33.6	408.8	0	3	1.4	0	88.8	38.8	15.4
362	46.1	8.6	280.7	0	5	1.5	0	65.6	24.3	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
530	35.5	40.8	457.7	0	3	0.8	0	121.4	29.9	16.8
374	47.5	8.2	292.9	0	6	0.6	0	68.9	25.5	20
354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
336	32	3.8	165	0	5	0	0	101.6	6.3	19
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
804	187.9	11.5	472.9	0	4	1.2	0	109.8	46.1	93
500	38.3	-0.5	283.7	0	-2	2.4	0	43.5	32.5	19.2
444	30.5	1	353.9	0	-2	5	0	49.9	41.2	23.2
564	82.3	26.9	357	0	-2	7	0	25.7	54.5	74.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURE A.1 – Représentation de la base de données

B Code MATLAB

```

1 N_all=max( size( Alldata ) );
2 N_reseau=max( size( reseaupoints ) );
3
4 Code_update=Alldata ;
5
6 i=1;
7 j=1;
8 for i=1:N_all
9     for j=1:N_reseau
10         if sqrt((( Code_update.XUTM( i )-reseaupoints.x_utm(j) )^2)+((
11             Code_update.YUTM( i )-reseaupoints.y_utm(j) )^2))<25 % Condition
12             SPATIALE
13             Code_update.IRH(i)=reseaupoints.code(j);
14         end
15     end
16 end

```

C Disposition des ouvrages relatifs à la Table 3.2

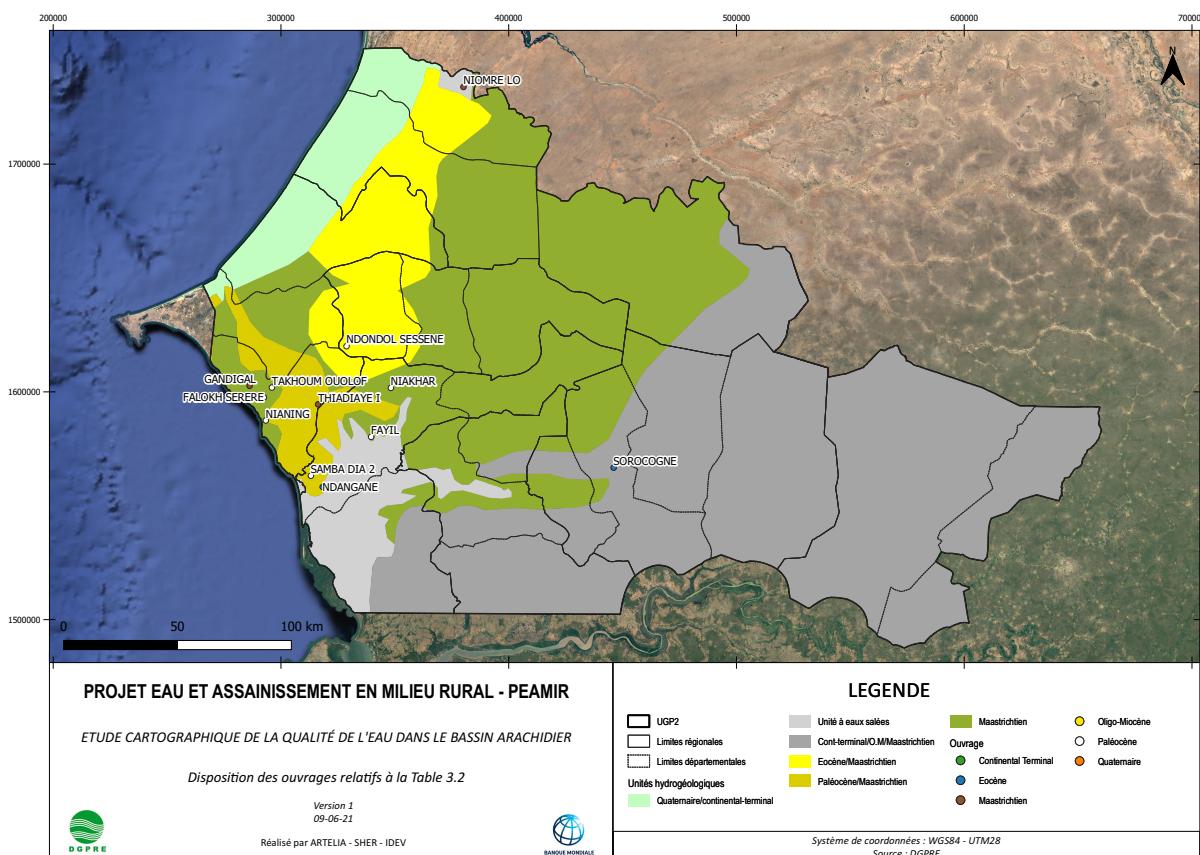


FIGURE C.2 – Distribution spatiale des ouvrages relatifs à la Tables 3.2

D Outliers statistiques

Chimie	Aquifère	Limite supérieure	Nombre d'outliers statistiques
Cl	CT	151.58	28
	EO	232.4	59
	MAAS	1347.5	17
	OM	19.8	8
	PAL	1025	24
	QUAT	114.2	12
SO4	CT	34.6	30
	EO	103.7	38
	MAAS	156.93	27
	OM	38.4	5
	PAL	306.4	27
	QUAT	91.1	11
NO3	CT	22.23	37
	EO	53.8	27
	MAAS	5.96	75
	OM	1.21	14
	PAL	10.86	29
	QUAT	15	25
F	CT	0.6	12
	EO	0.3	55
	MAAS	6	1
	OM	0.5	2
	PAL	7	8
	QUAT	0.33	6
Na	CT	80	28
	EO	124.4	47
	MAAS	1311	6
	OM	57.5	4
	PAL	646	30
	QUAT	77.6	10
Fe	CT	0.82	21
	EO	0.31	49
	MAAS	0.8	35
	OM	1.4	7
	PAL	0.83	8
	QUAT	5.3	14
			TOTAL = 836

TABLE D.1 – Détermination des outliers statistiques

E Statistiques temporelles

	RS	TDS	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe
CT										
1940 - 1979	37	1	38	35	37	31	38	36	38	17
1980 - 1989	43	1	44	26	44	43	44	34	44	35
1990 - 1999	31	0	31	24	31	28	31	31	31	30
2000 - 2009	17	0	17	17	16	6	17	17	17	17
2010 - 2015	17	0	17	17	15	13	17	17	17	17
2016 - 2021	51	30	99	99	98	75	99	99	99	97
EO										
1940 - 1979	52	1	53	51	51	44	53	53	53	16
1980 - 1989	131	1	132	102	132	132	132	131	132	115
1990 - 1999	200	0	200	127	200	194	200	200	200	199
2000 - 2009	25	0	25	25	24	4	25	25	25	22
2010 - 2015	11	0	11	11	11	6	11	11	11	11
2016 - 2021	45	11	45	45	45	41	45	45	45	45
MAAS										
1940 - 1979	101	1	102	101	81	88	102	102	102	27
1980 - 1989	188	1	189	170	188	189	189	166	189	143
1990 - 1999	75	2	78	74	78	69	78	78	78	75
2000 - 2009	26	0	26	26	22	16	26	26	26	26
2010 - 2015	12	0	51	50	31	50	51	50	51	18
2016 - 2021	79	57	181	181	178	170	181	181	181	89
OM										
1940 - 1979	2	0	2	2	2	2	2	2	2	0
1980 - 1989	15	0	16	8	16	16	16	13	16	12
1990 - 1999	18	0	18	14	17	16	18	17	18	17
2000 - 2009	4	0	4	4	4	0	4	4	4	4
2010 - 2015	2	0	2	2	1	1	2	2	2	2
2016 - 2021	14	9	14	14	14	11	14	14	14	14
PAL										
1940 - 1979	121	3	124	120	105	113	124	124	124	7
1980 - 1989	34	1	35	32	35	35	35	34	35	15
1990 - 1999	6	0	6	5	6	5	6	6	6	6
2000 - 2009	6	0	6	6	5	6	6	6	6	4
2010 - 2015	12	11	13	13	13	10	13	13	13	13
2016 - 2021	45	24	82	82	82	63	82	82	82	62
QUAT										
1940 - 1979	6	0	6	5	6	6	6	6	6	2
1980 - 1989	17	0	17	14	17	17	17	16	17	14
1990 - 1999	49	1	50	31	49	50	50	49	50	48
2000 - 2009	10	5	15	15	13	5	15	15	15	10
2010 - 2015	4	1	4	4	4	1	4	4	4	4
2016 - 2021	41	17	41	41	41	20	41	41	41	41

TABLE E.2 – Répartition des données en fonction des classes temporelles

	RS	TDS	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe
CT										
1940 - 1979	314.32	206.00	69.58	6.68	17.18	0.46	38.19	9.53	34.60	0.98
1980 - 1989	242.95	80.00	58.33	14.21	4.00	0.25	37.48	8.51	29.05	0.41
1990 - 1999	573.10	-	197.61	36.20	6.55	0.17	64.14	13.03	108.12	0.40
2000 - 2009	189.53	-	44.84	25.70	4.53	0.22	24.65	5.71	25.30	0.18
2010 - 2015	194.41	-	25.11	9.59	9.18	0.17	32.46	6.71	11.96	0.48
2016 - 2021	501.02	401.47	140.71	20.20	21.45	0.34	39.49	12.25	71.96	0.27
EO										
1940 - 1979	1087.69	340.00	344.77	104.86	26.07	0.75	93.95	41.99	191.10	4.30
1980 - 1989	834.07	1026.00	237.52	43.46	22.24	0.40	100.29	24.83	115.95	0.16
1990 - 1999	529.15	-	95.84	32.34	24.35	0.10	97.55	13.80	58.05	0.18
2000 - 2009	575.84	-	121.26	29.46	8.36	1.28	100.51	16.24	54.85	0.12
2010 - 2015	680.18	-	124.47	50.31	16.78	0.66	82.50	30.02	56.46	0.71
2016 - 2021	672.62	860.27	130.62	59.14	11.91	0.27	91.49	31.38	53.27	0.57
MAAS										
1940 - 1979	1285.93	490.00	499.80	69.21	2.91	1.57	36.16	15.70	417.75	0.57
1980 - 1989	1382.59	1746.00	530.29	57.38	2.37	2.34	23.54	8.99	482.32	0.36
1990 - 1999	1284.15	1698.00	450.66	81.50	7.03	2.15	28.32	11.90	430.60	0.25
2000 - 2009	1187.00	-	386.29	100.32	1.30	1.98	22.38	9.96	353.82	0.37
2010 - 2015	1112.83	-	384.47	68.19	18.33	1.55	28.60	10.99	343.98	0.69
2016 - 2021	995.91	1402.56	213.87	49.15	8.23	1.27	42.30	15.97	185.86	0.40
OM										
1940 - 1979	102.00	-	4.65	2.15	1.00	0.05	21.95	2.75	4.50	-
1980 - 1989	149.73	-	11.43	29.97	1.00	0.21	19.56	5.35	26.01	1.19
1990 - 1999	106.22	-	8.82	23.56	7.48	4.01	14.48	6.90	27.89	0.51
2000 - 2009	445.00	-	138.90	11.75	2.70	-	74.80	20.95	47.20	0.38
2010 - 2015	179.00	-	24.84	1.11	53.30	0.40	28.10	6.00	13.44	1.45
2016 - 2021	214.86	422.00	34.25	7.98	5.61	0.19	26.76	8.58	23.03	0.89
PAL										
1940 - 1979	1657.31	466.67	602.14	151.94	6.70	2.74	97.21	64.44	364.47	1.81
1980 - 1989	1235.09	700.00	444.65	98.51	1.83	2.49	60.11	41.95	318.49	0.30
1990 - 1999	599.67	-	119.37	123.72	7.83	2.99	64.83	41.22	86.48	0.18
2000 - 2009	560.67	-	119.88	75.23	0.86	1.53	59.88	28.77	75.97	0.15
2010 - 2015	861.08	534.18	161.10	63.92	7.29	0.85	99.25	39.08	71.07	0.47
2016 - 2021	838.16	1054.71	170.25	44.70	11.43	0.66	83.87	31.15	82.46	0.53
QUAT										
1940 - 1979	317.00	-	73.17	8.74	17.68	0.15	30.18	9.40	33.67	0.55
1980 - 1989	213.35	-	46.76	11.49	4.12	0.17	29.74	6.64	28.17	1.98
1990 - 1999	206.51	221.00	58.62	31.20	7.86	0.10	19.83	7.29	36.82	2.20
2000 - 2009	193.30	549.20	96.97	64.39	31.87	0.21	32.90	13.26	56.13	3.58
2010 - 2015	592.00	2209.00	144.69	115.17	40.54	0.01	56.22	11.82	85.10	1.16
2016 - 2021	362.68	593.88	80.69	40.86	35.61	0.22	39.19	8.90	49.08	1.73

TABLE E.3 – Moyenne des données en fonction des classes temporelles

	RS	TDS	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe
CT										
1940 - 1979	206.00	206.00	33.65	1.90	1.00	0.05	26.45	3.50	21.20	0.50
1980 - 1989	134.00	80.00	14.90	6.70	1.00	0.20	15.00	5.05	20.20	0.20
1990 - 1999	341.00	-	42.50	18.45	3.00	0.10	48.90	10.40	29.90	0.10
2000 - 2009	166.00	-	17.80	11.50	1.25	0.11	11.30	2.00	13.60	0.10
2010 - 2015	140.00	-	9.80	1.91	1.40	0.16	20.80	5.60	6.90	0.50
2016 - 2021	194.00	177.00	24.20	1.45	3.22	0.19	16.80	4.37	15.29	0.17
EO										
1940 - 1979	573.00	340.00	83.00	14.40	5.00	0.05	75.30	15.30	39.40	1.65
1980 - 1989	440.00	1026.00	66.70	10.60	16.00	0.10	82.30	11.10	43.70	0.10
1990 - 1999	460.00	-	70.90	19.10	22.00	0.05	92.00	10.90	46.70	0.10
2000 - 2009	372.00	-	60.40	19.20	5.10	0.85	83.40	9.70	40.90	0.10
2010 - 2015	520.00	-	82.69	17.80	13.75	0.37	88.60	17.16	49.60	0.36
2016 - 2021	526.00	707.00	75.03	23.97	3.09	0.25	88.56	18.01	31.05	0.21
MAAS										
1940 - 1979	1080.00	490.00	354.95	58.60	1.00	1.50	17.20	9.20	374.40	0.40
1980 - 1989	1294.00	1746.00	461.00	46.10	1.00	2.50	12.40	5.60	466.40	0.20
1990 - 1999	1196.00	1698.00	341.35	75.35	1.00	1.80	14.50	9.20	391.00	0.20
2000 - 2009	1021.50	-	309.10	88.35	0.15	2.25	13.80	9.00	333.60	0.25
2010 - 2015	944.50	-	275.40	51.20	3.90	0.81	15.80	7.27	276.45	0.33
2016 - 2021	590.00	1056.00	90.31	41.26	2.66	0.63	28.84	10.29	98.66	0.18
OM										
1940 - 1979	102.00	-	4.65	2.15	1.00	0.05	21.95	2.75	4.50	-
1980 - 1989	116.00	-	9.20	4.80	1.00	0.20	17.90	3.20	19.80	0.75
1990 - 1999	78.00	-	8.90	18.75	1.00	0.18	8.20	6.10	19.75	0.10
2000 - 2009	245.00	-	15.95	11.55	0.25	-	50.90	15.40	24.80	0.25
2010 - 2015	179.00	-	24.84	1.11	53.30	0.40	28.10	6.00	13.44	1.45
2016 - 2021	102.00	285.00	5.68	2.42	1.06	0.19	14.44	4.82	5.47	0.34
PAL										
1940 - 1979	1032.00	330.00	296.85	65.35	1.00	2.00	68.50	52.80	131.50	0.40
1980 - 1989	968.00	700.00	179.00	65.80	1.00	1.60	55.50	28.55	88.30	0.30
1990 - 1999	328.50	-	52.25	13.40	7.50	0.20	68.90	10.45	33.85	0.10
2000 - 2009	347.00	-	84.55	83.55	0.40	1.05	47.55	15.05	41.00	0.10
2010 - 2015	559.00	545.00	52.12	30.92	8.45	0.91	84.00	23.53	46.05	0.40
2016 - 2021	657.00	817.00	85.50	17.54	3.14	0.29	71.05	24.25	41.32	0.21
QUAT										
1940 - 1979	230.00	-	45.75	2.90	7.50	0.08	24.95	6.80	25.70	0.55
1980 - 1989	210.00	-	46.80	7.45	1.00	0.10	25.60	5.95	26.70	0.15
1990 - 1999	180.00	221.00	57.75	18.70	1.00	0.10	14.30	5.30	36.20	0.20
2000 - 2009	131.00	188.00	42.60	30.70	3.20	0.10	9.60	4.40	33.60	0.50
2010 - 2015	274.00	2209.00	57.56	24.95	31.31	0.01	21.60	10.69	35.10	0.87
2016 - 2021	218.00	397.00	54.14	22.73	1.95	0.22	26.13	4.60	34.19	0.91

TABLE E.4 – Médiane des données en fonction des classes temporelles

F Statistiques selon le type de l'ouvrage

	Temp.	pH	Cond.	RS	TDS	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe
CT													
Forage	35	138	66	141	15	166	138	162	124	166	155	166	138
Puits	13	33	17	33	15	33	33	32	29	33	32	33	28
Piézo	7	7	7	7	2	32	32	32	28	32	32	32	32
EO													
Forage	196	409	238	410	6	412	307	409	372	412	411	412	361
Puits	11	20	12	20	6	20	20	20	15	20	20	20	16
Piézo	2	4	2	4	1	4	4	4	4	4	4	4	2
MAAS													
Forage	181	409	131	415	28	421	398	398	390	421	398	421	310
Puits	40	60	44	57	20	61	60	58	58	61	61	61	52
Piézo	4	9	4	8	2	9	9	9	9	9	9	9	6
OM													
Forage	13	47	15	47	6	47	35	46	40	47	43	47	41
Puits	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piézo	9	9	9	9	4	9	9	8	6	9	9	9	9
PAL													
Forage	18	195	54	172	18	195	188	181	185	195	194	195	51
Puits	29	41	30	40	20	41	40	37	36	41	41	41	32
Piézo	1	3	1	4	1	4	4	3	3	4	4	4	1
QUAT													
Forage	27	82	42	81	1	82	59	79	75	82	80	82	74
Puits	39	45	40	44	17	45	45	45	23	45	45	45	43
Piézo	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2

TABLE F.5 – Répartition des données en fonction des types d'ouvrages

	Temp.	pH	Cond.	RS	TDS	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe
CT													
Forage	31.33	6.66	481.23	351.64	593.53	107.91	18.32	9.34	0.26	41.36	10.40	54.47	0.37
Puits	30.97	6.74	264.53	291.30	204.53	77.83	11.52	1.31	0.45	33.14	7.70	40.57	0.68
Piézo	28.34	6.29	233.43	165.86	179.50	73.66	18.46	35.38	0.35	30.38	7.06	54.09	0.23
EO													
Forage	30.96	7.51	627.10	698.23	711.67	173.87	45.41	22.92	0.28	98.76	20.93	91.26	0.26
Puits	30.40	7.53	686.75	609.35	808.83	119.15	79.95	7.04	0.44	67.76	23.78	84.42	3.65
Piézo	28.10	7.60	1368.00	848.75	1706.00	146.11	57.28	22.45	1.47	90.55	33.09	121.26	0.29
MAAS													
Forage	37.26	7.81	1798.92	1325.26	1609.50	480.61	66.51	3.65	2.14	27.48	11.01	435.97	0.36
Puits	29.92	7.63	1089.95	690.28	1093.00	204.71	39.48	11.62	0.53	66.73	24.80	109.69	0.48
Piézo	36.38	7.83	2225.00	1777.38	2990.00	622.34	70.25	26.55	2.26	24.64	10.88	548.70	0.23
OM													
Forage	29.67	6.40	243.93	165.68	319.83	21.98	19.40	6.09	1.73	23.52	7.67	27.40	0.63
Puits	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piézo	30.80	6.72	307.11	203.78	516.50	43.87	3.20	0.91	0.15	27.09	9.05	17.11	1.57
PAL													
Forage	31.48	7.62	1089.50	1457.50	616.11	475.06	124.45	6.50	2.36	87.60	54.77	291.46	0.52
Puits	29.77	7.65	1127.53	743.38	1003.95	185.55	24.13	8.86	0.44	78.74	25.34	99.32	0.47
Piézo	28.50	7.67	2250.00	2033.50	2120.00	695.31	249.85	3.80	3.29	91.74	69.78	485.58	0.16
QUAT													
Forage	30.17	6.47	242.02	209.28	117.00	55.41	26.52	6.90	0.11	21.30	7.10	34.09	2.48
Puits	30.97	6.59	499.30	344.36	526.59	75.40	36.75	34.65	0.25	38.24	8.52	46.94	1.44
Piézo	30.20	7.00	1842.50	1357.50	1787.00	337.80	289.40	51.75	0.31	128.79	21.94	191.09	0.36

TABLE F.6 – Moyenne des données en fonction des types d'ouvrages

	Temp.	pH	Cond.	RS	TDS	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	Na	Fe
CT													
Forage	31.00	6.60	170.00	156.00	178.00	15.60	3.80	1.00	0.15	19.80	4.20	17.55	0.19
Puits	31.30	6.90	186.00	218.00	176.00	34.87	2.95	1.00	0.11	14.40	5.49	21.02	0.50
Piézo	28.50	6.20	200.00	128.00	179.50	23.99	0.61	14.75	0.16	16.53	3.69	18.40	0.20
EO													
Forage	31.00	7.50	480.50	460.00	608.50	70.90	13.40	16.00	0.05	87.40	11.10	45.35	0.10
Puits	30.30	7.45	633.50	402.00	748.00	71.83	16.04	3.21	0.25	60.50	12.16	48.50	1.71
Piézo	28.10	7.65	1368.00	801.50	1706.00	137.84	48.87	18.71	0.34	88.26	34.38	110.42	0.29
MAAS													
Forage	37.80	7.90	1546.00	1194.00	1572.00	402.70	56.70	1.00	2.00	13.60	7.24	416.00	0.20
Puits	30.10	7.70	737.50	466.00	736.00	71.55	23.58	2.25	0.22	47.68	18.44	48.77	0.25
Piézo	35.45	8.00	2610.00	2205.00	2990.00	525.23	75.40	1.00	2.40	15.05	9.20	641.09	0.19
OM													
Forage	30.00	6.40	200.00	98.00	236.00	8.90	5.80	1.00	0.20	14.80	4.70	18.80	0.20
Puits	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piézo	31.30	6.70	156.00	91.00	375.50	5.74	2.90	0.63	0.15	18.84	4.04	5.98	1.17
PAL													
Forage	31.30	7.60	810.00	972.00	633.50	179.00	44.20	1.00	1.60	68.19	47.70	88.20	0.23
Puits	29.80	7.80	944.00	567.00	817.00	85.67	8.65	3.00	0.23	54.63	22.44	52.87	0.31
Piézo	28.50	7.50	2250.00	1895.00	2120.00	645.40	306.70	3.00	4.50	65.20	77.00	471.00	0.16
QUAT													
Forage	30.00	6.50	212.50	185.00	117.00	51.40	14.90	1.00	0.10	14.80	5.30	32.75	0.30
Puits	31.15	6.70	334.00	224.50	379.00	55.00	16.90	1.72	0.22	26.13	4.60	34.60	0.81
Piézo	30.20	7.00	1842.50	1357.50	1787.00	337.80	289.40	51.75	0.31	128.79	21.94	191.09	0.36

TABLE F.7 – Médiane des données en fonction des types d'ouvrages

G Diagrammes de Piper

Diagramme de Piper: Continental Terminal

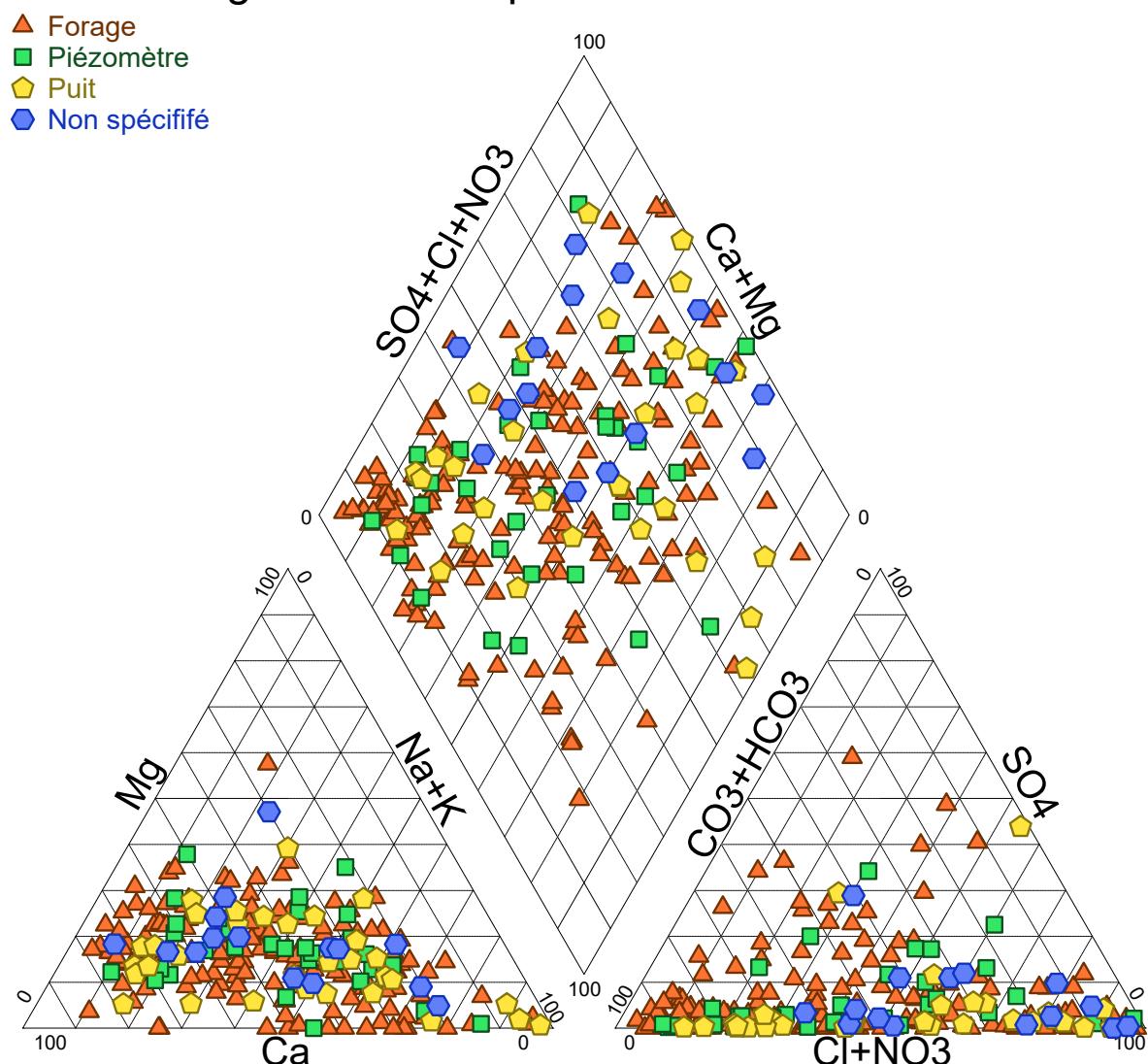


FIGURE G.3 – Diagramme de Piper du Continental Terminal

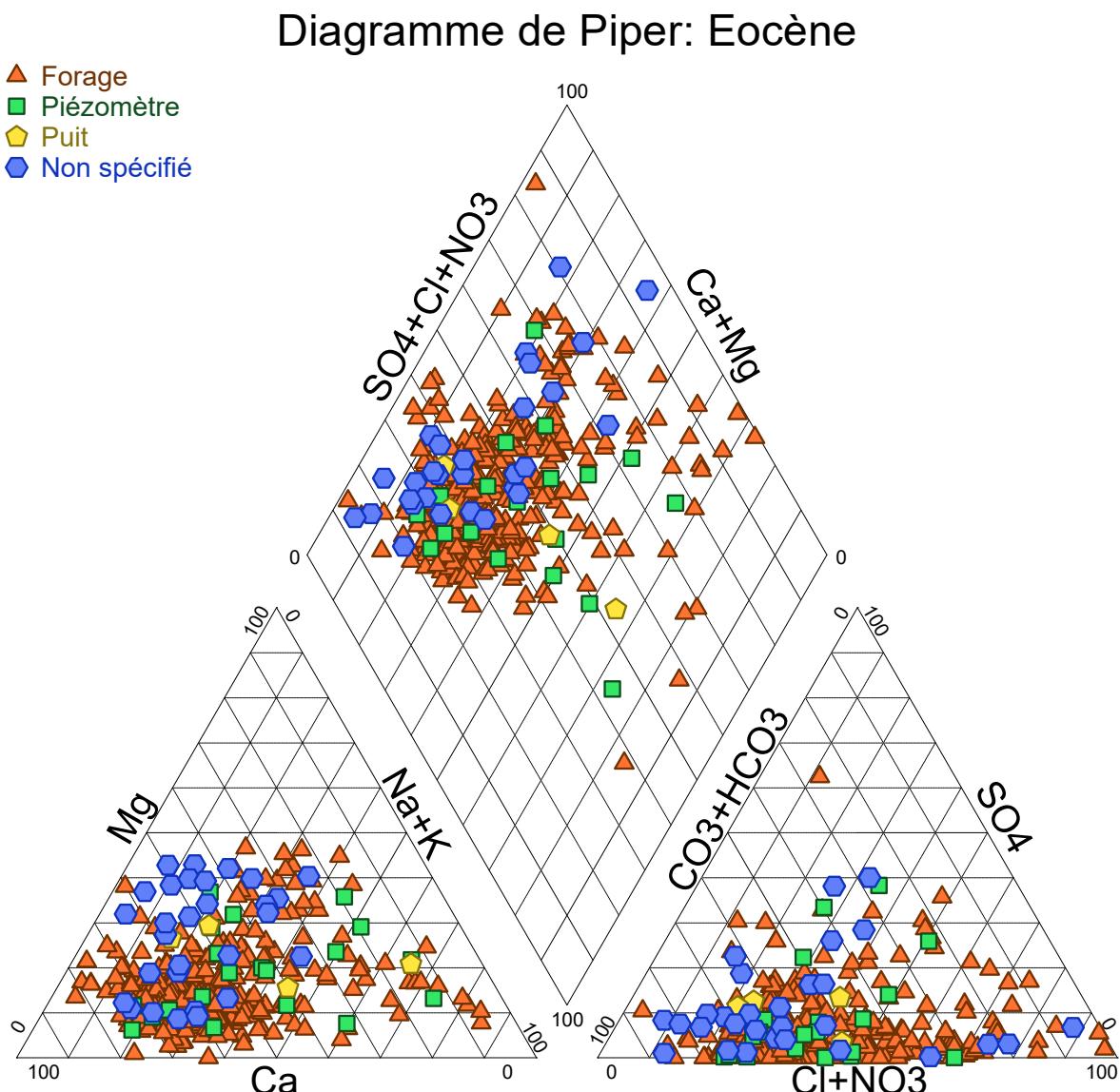


FIGURE G.4 – Diagramme de Piper de l'Éocène

Diagramme de Piper: Maastrichtien

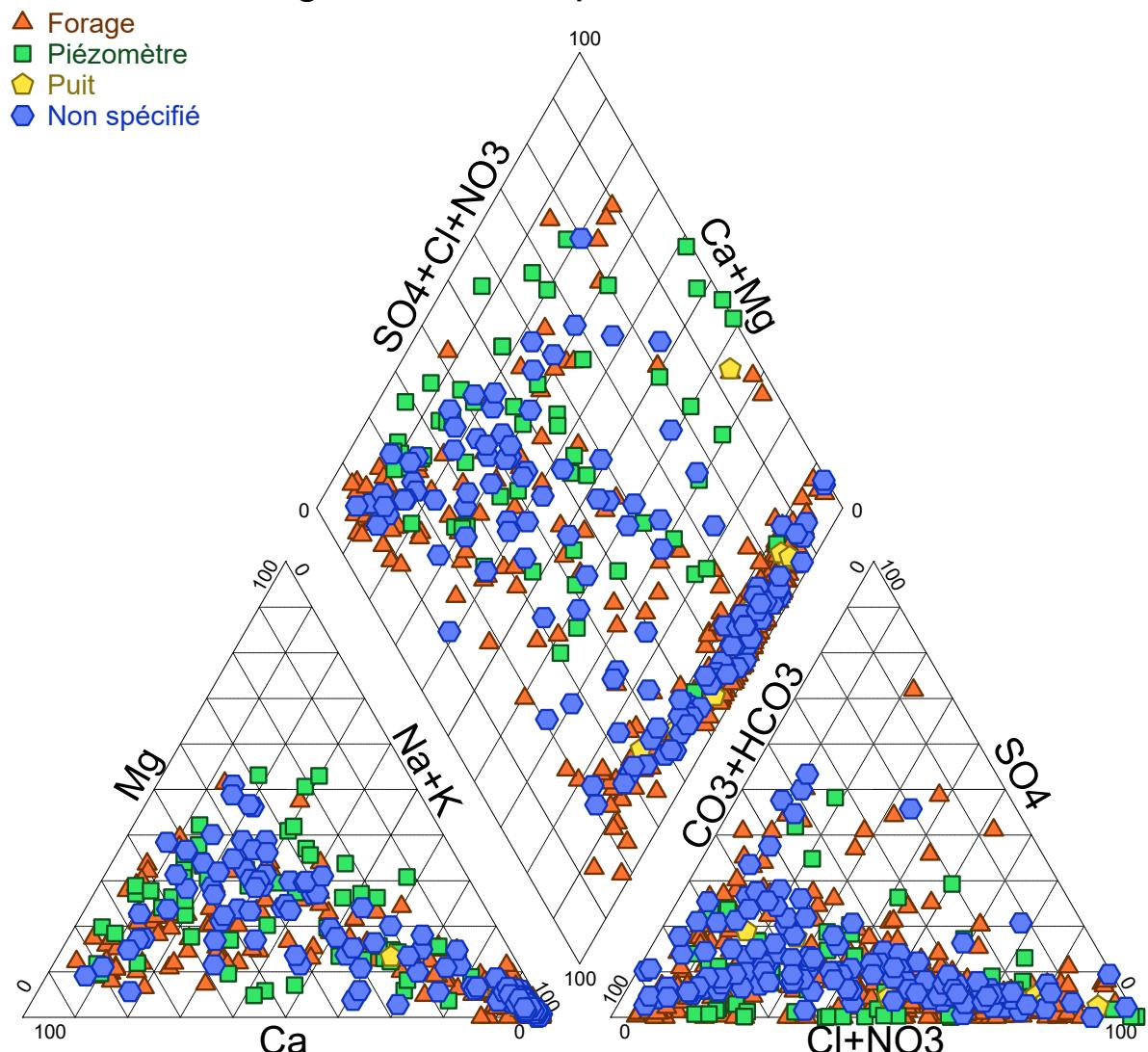


FIGURE G.5 – Diagramme de Piper du Maastrichtien

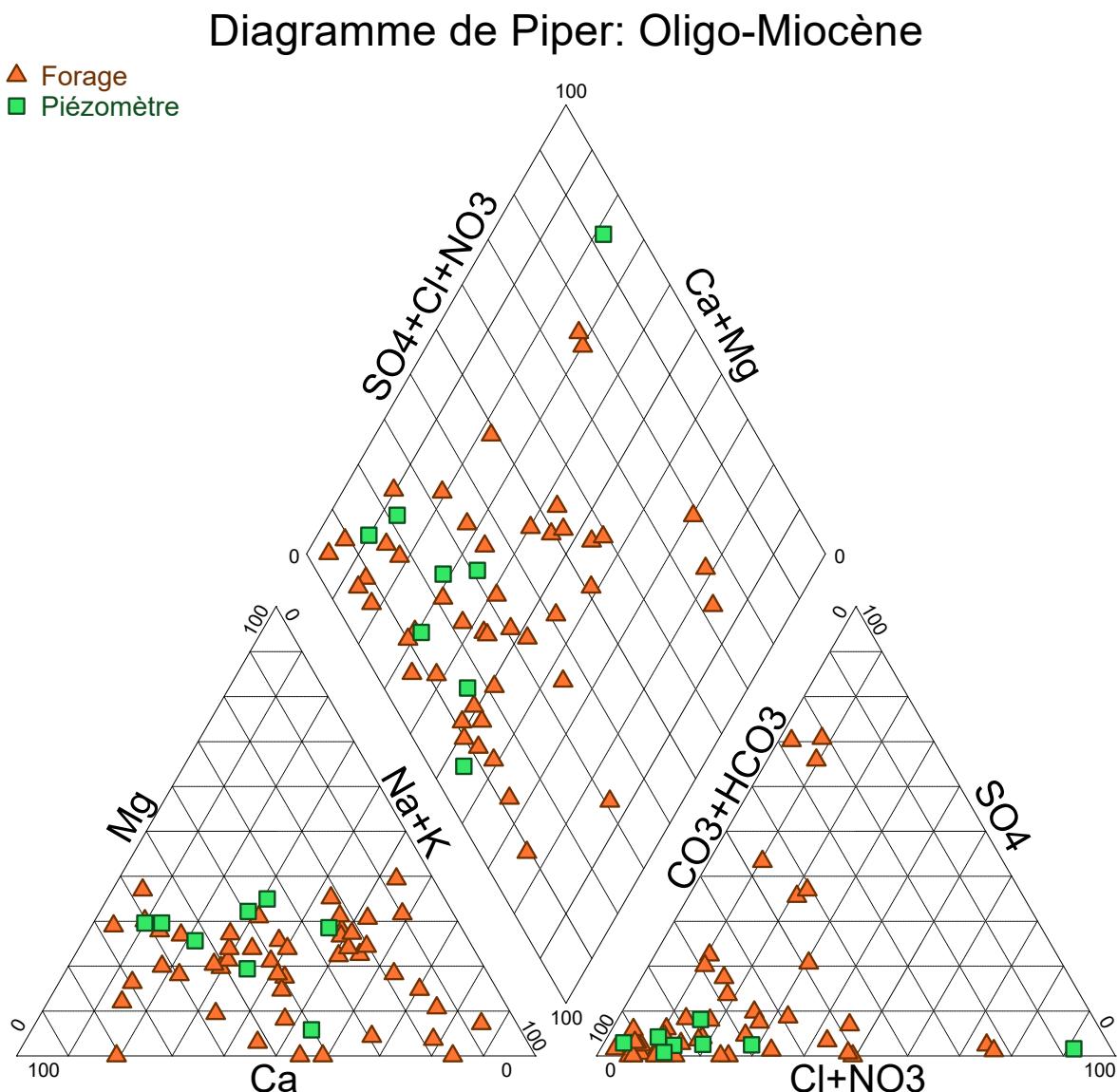


FIGURE G.6 – Diagramme de Piper de l'Oligo-Miocène

Diagramme de Piper: Paléocène

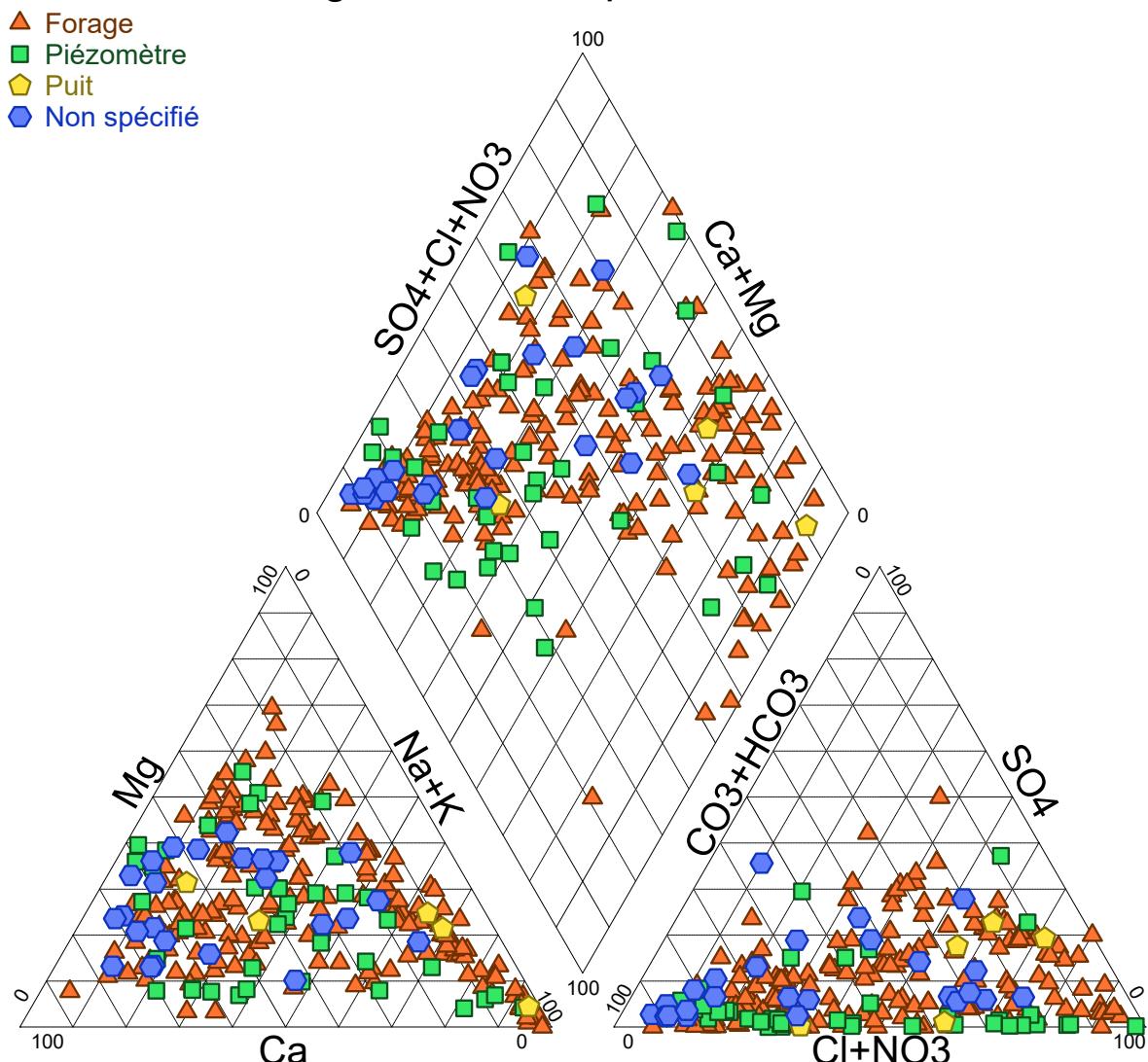


FIGURE G.7 – Diagramme de Piper du Paléocène

Diagramme de Piper: Quaternaire

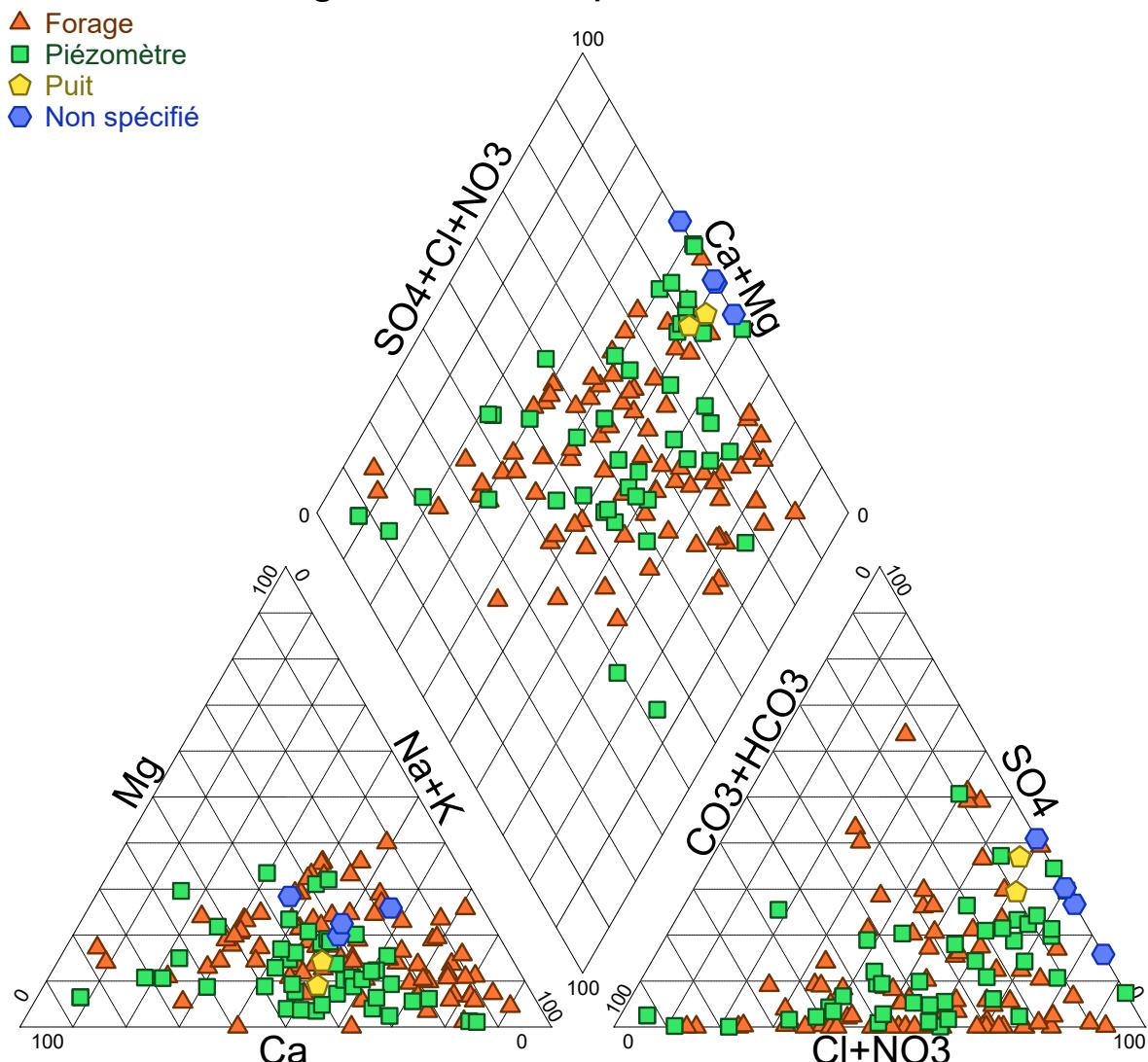


FIGURE G.8 – Diagramme de Piper du Quaternaire

H Matrices de corrélation

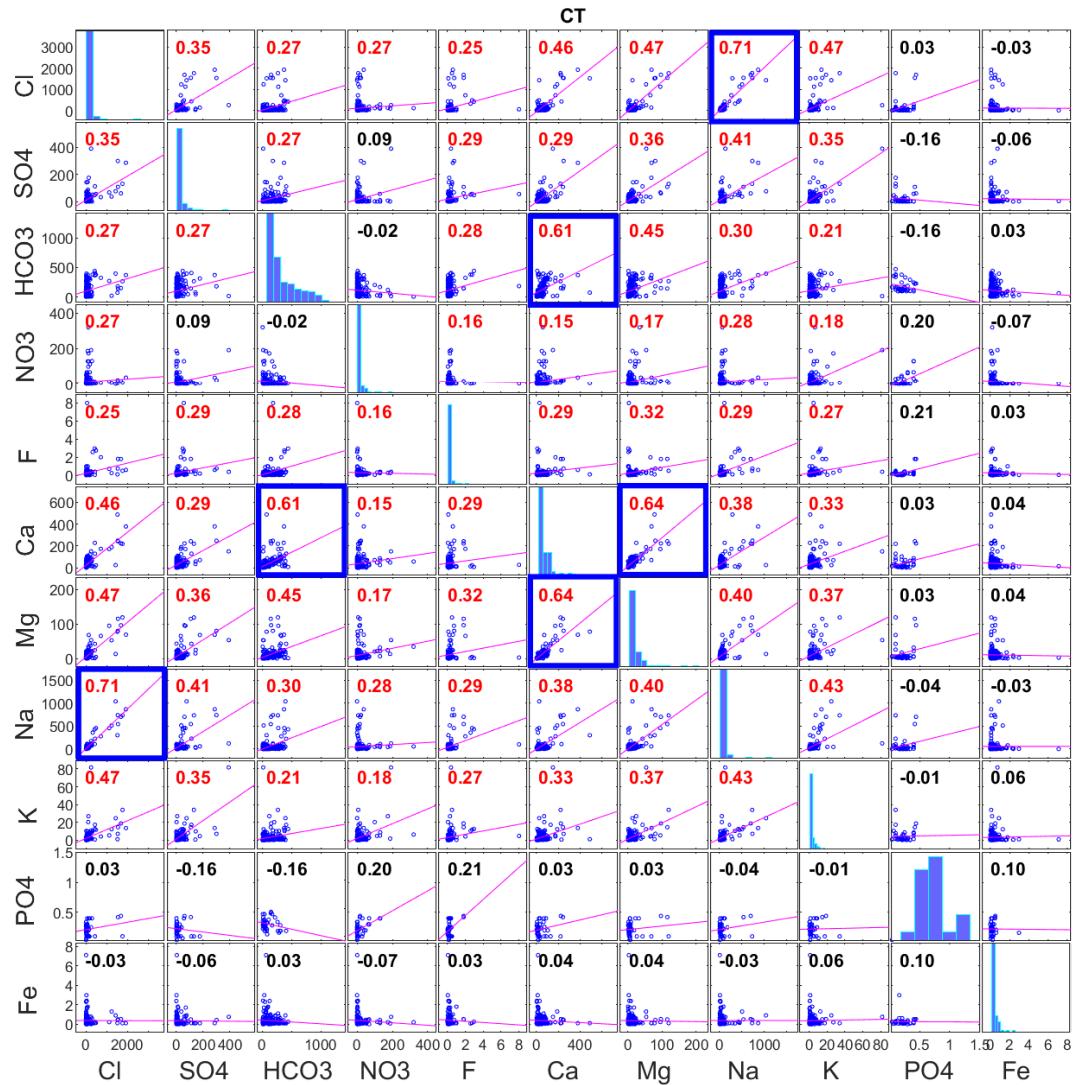


FIGURE H.9 – Matrice de corrélation du Continental Terminal

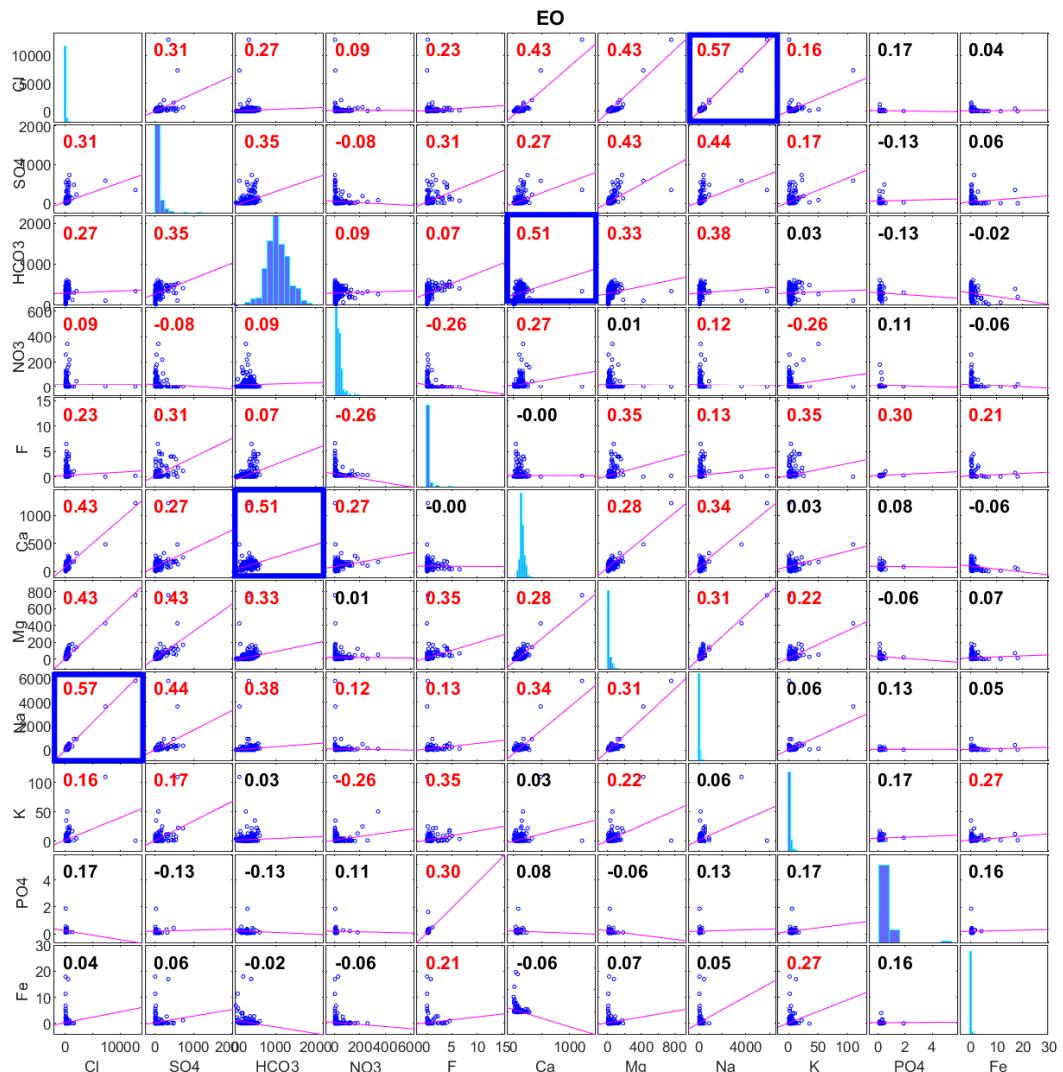


FIGURE H.10 – Matrice de corrélation de l'Éocène

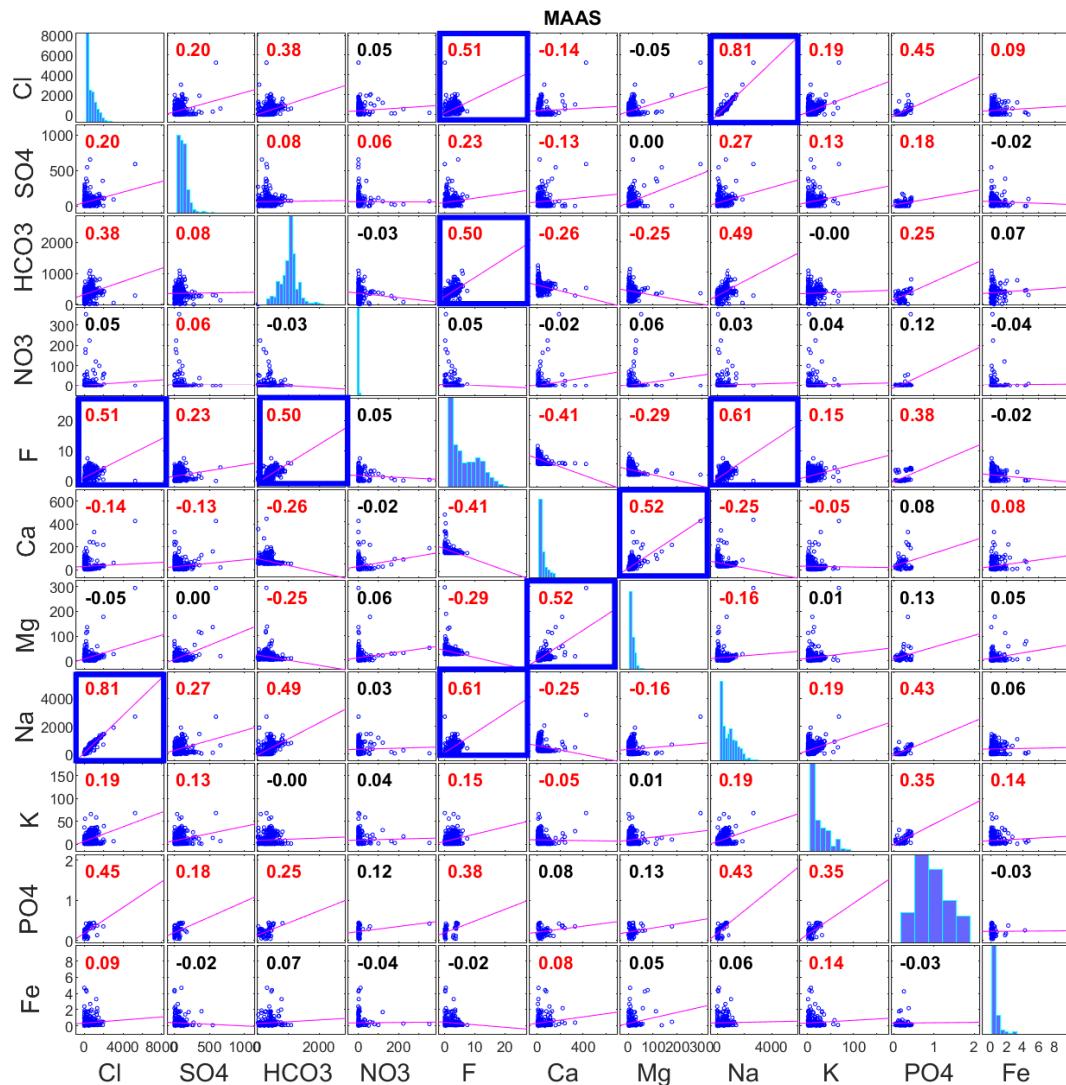


FIGURE H.11 – Matrice de corrélation du Maastrichtien

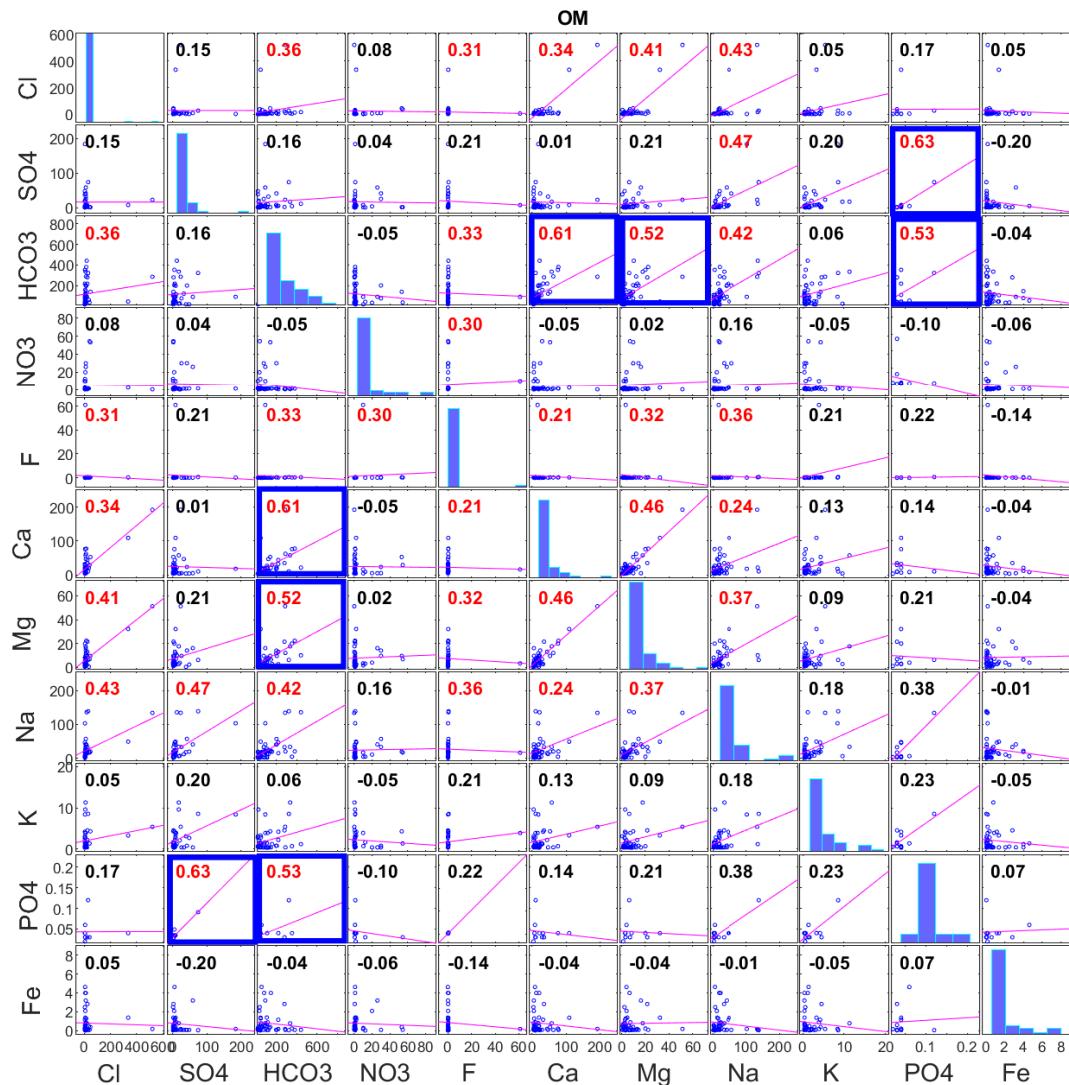


FIGURE H.12 – Matrice de corrélation de l'Oligo-Miocène

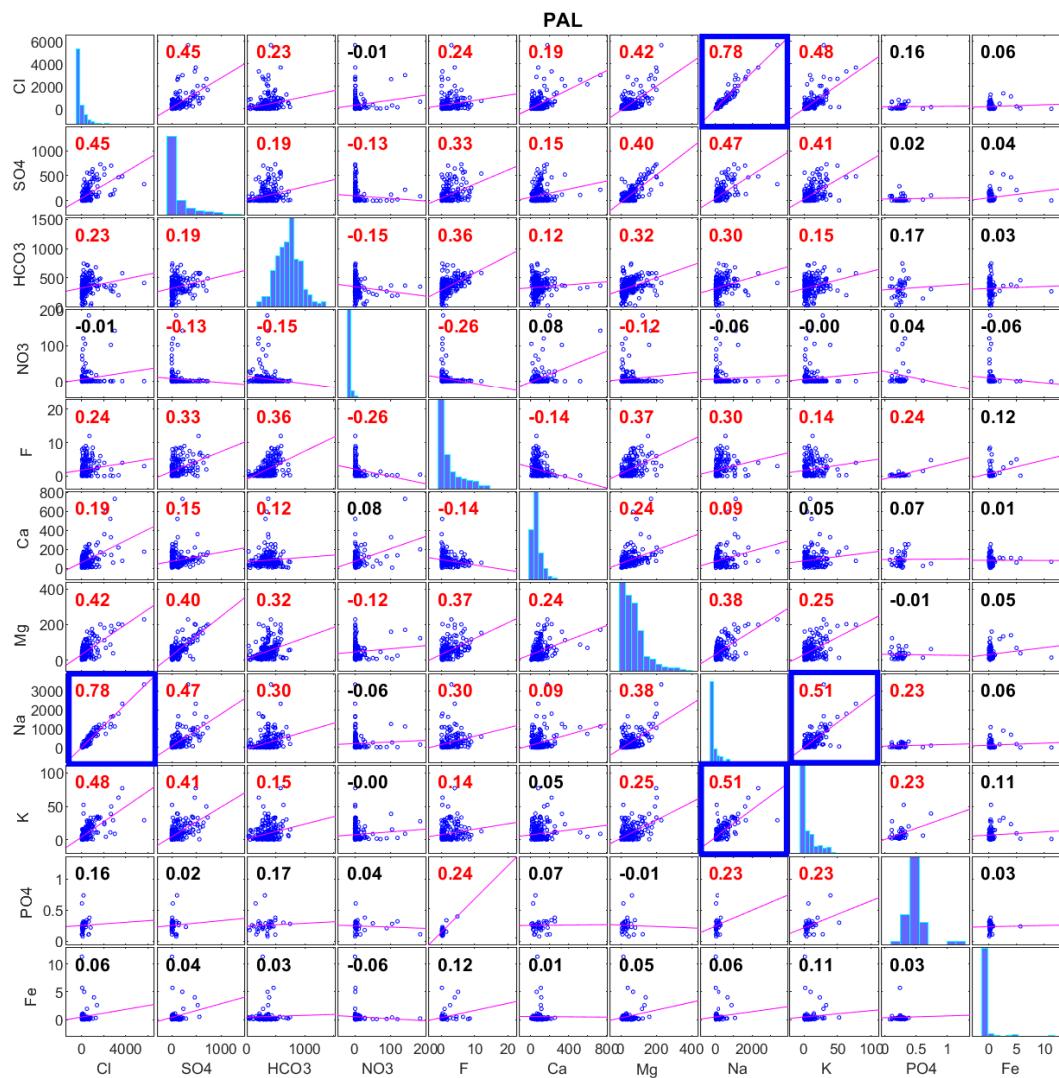


FIGURE H.13 – Matrice de corrélation du Paléocène

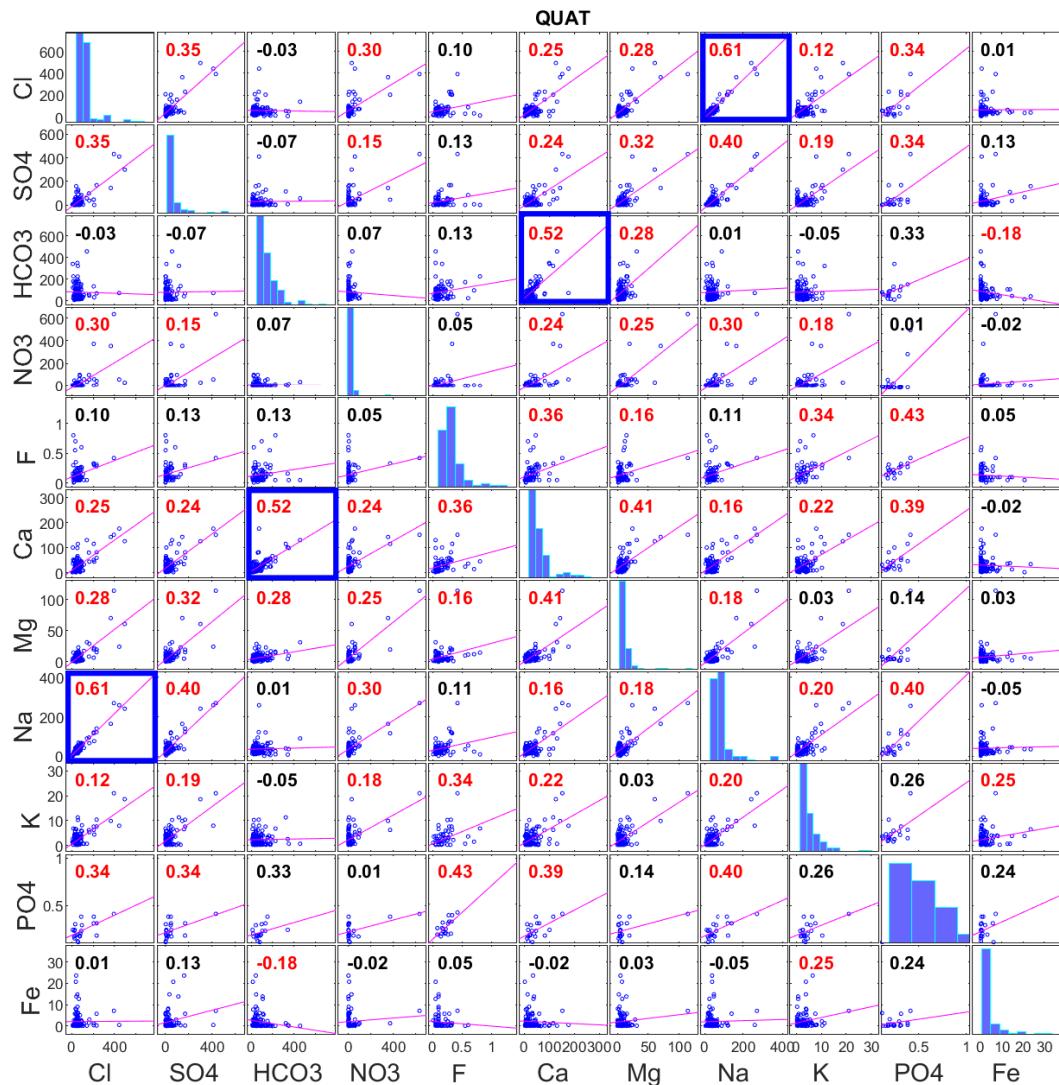


FIGURE H.14 – Matrice de corrélation du Quaternaire

Aquifère	Corrélation >0.5	Corrélation négative	Pas de corrélation significative	
CT	Na/Cl Mg/Ca Ca/HCO ₃		Fe/tout PO ₄ /tout NO ₃ /SO ₄ NO ₃ /HCO ₃	
EO	Na/Cl Ca/HCO ₃	K/NO ₃ F/NO ₃ NO ₃ /SO ₄	Fe/tout (sauf F et K) PO ₄ /tout (sauf F) K/HCO ₃ K/Ca	K/Na Mg/NO ₃ Ca/F
MAAS	Na/Cl Na/F Mg/Ca F/Cl F/HCO ₃	K/Ca Na/Ca Na/Mg Mg/HCO ₃ Mg/F Ca/Cl Ca/SO ₄ Ca/HCO ₃ Ca/F	Fe/tout (sauf Cl, Ca, K) PO ₄ /NO ₃ PO ₄ /Ca PO ₄ /Mg K/HCO ₃ K/NO ₃ K/Mg Na/NO ₃ Mg/Cl	Mg/SO ₄ Mg/NO ₃ Ca/NO ₃ F/NO ₃ NO ₃ /Cl NO ₃ /HCO ₃
OM	PO ₄ /SO ₄ PO ₄ /HCO ₃ Mg/HCO ₃ Ca/HCO ₃		Fe/tout PO ₄ /tout (sauf SO ₄ , HCO ₃) K/tout Na/NO ₃ Mg/SO ₄ Mg/NO ₃	Ca/SO ₄ Ca/NO ₃ F/SO ₄ NO ₃ /tout HCO ₃ /SO ₄ SO ₄ /Cl
PAL	K/Na Na/Cl	Mg/NO ₃ Ca/F F/NO ₃ NO ₃ /SO ₄ NO ₃ /HCO ₃	Fe/tout PO ₄ /tout (sauf F, Na, K) K/NO ₃ Na/NO ₃ Ca/NO ₃	NO ₃ /Cl
QUAT	Na/Cl Ca/HCO ₃	Fe/HCO ₃	Fe/tout (sauf HCO ₃ et K) PO ₄ /HCO ₃ PO ₄ /NO ₃ PO ₄ /Mg PO ₄ /K K/HCO ₃ K/Mg Na/HCO ₃	Na/F F/Cl F/SO ₄ F/HCO ₃ F/NO ₃ NO ₃ /HCO ₃ HCO ₃ /Cl HCO ₃ /SO ₄

TABLE H.8 – Tableau des relations de corrélation

I SOMs par aquifère

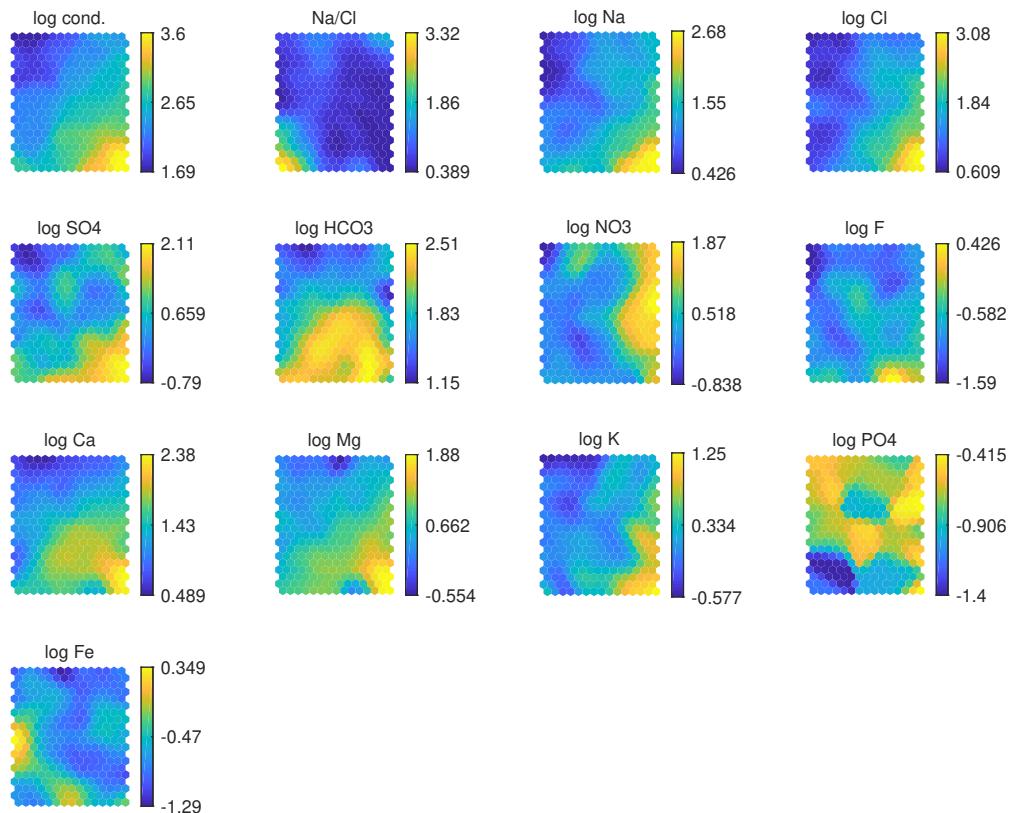


FIGURE I.15 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Continental Terminal

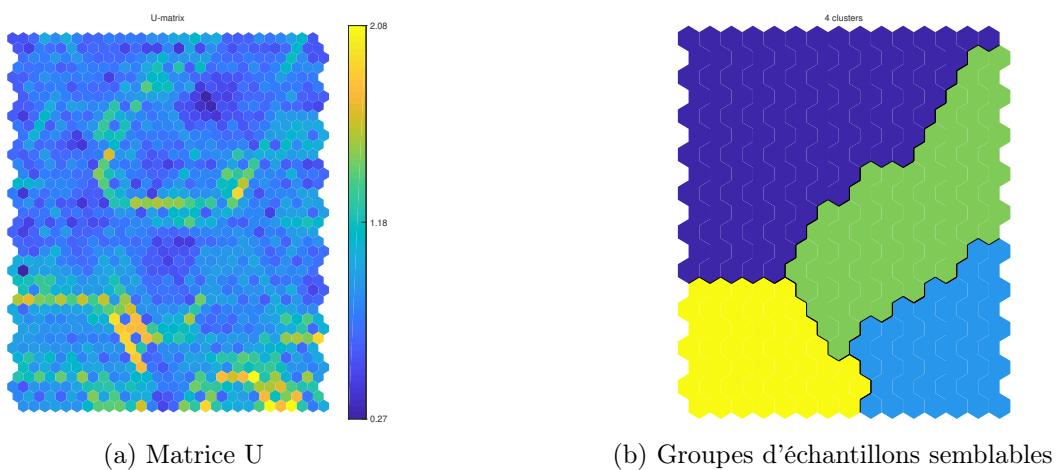


FIGURE I.16 – Caractérisation du faciès hydrochimique du Continental Terminal par les SOMs

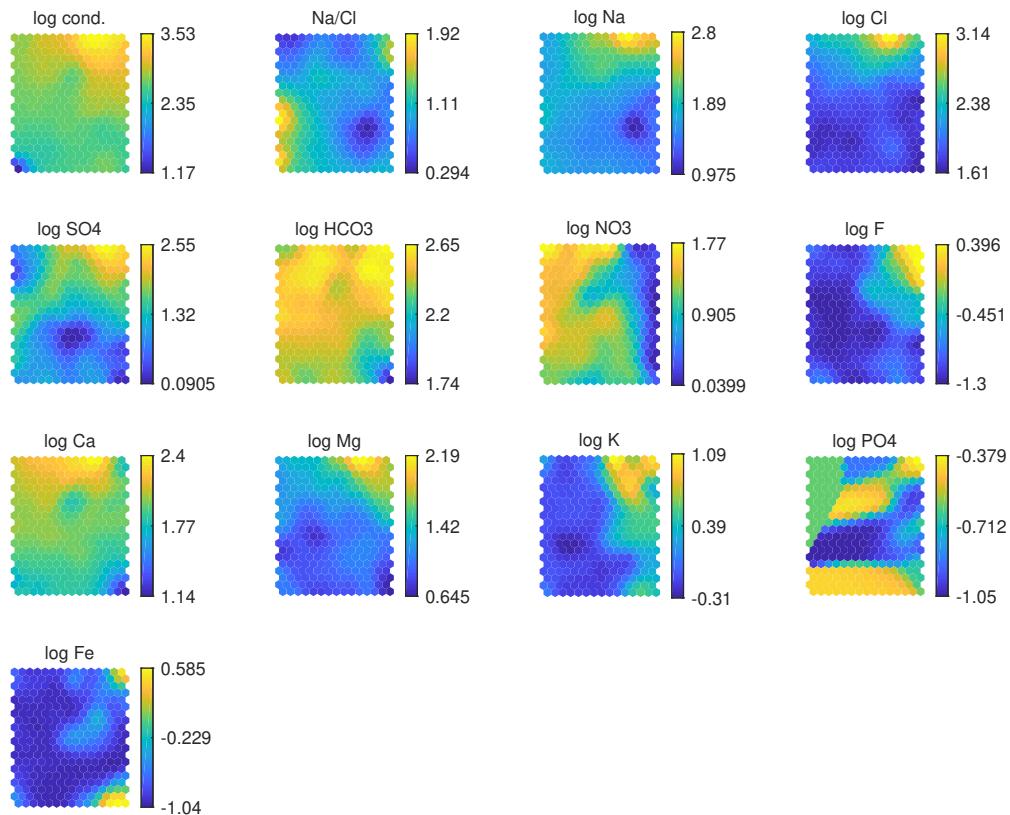


FIGURE I.17 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques de l'Éocène

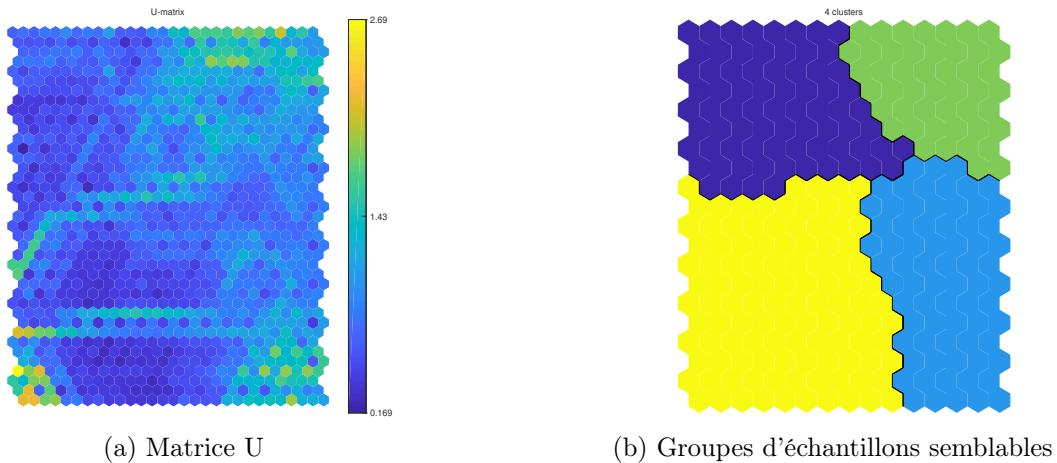


FIGURE I.18 – Caractérisation du faciès hydrochimique de l'Éocène par les SOMs

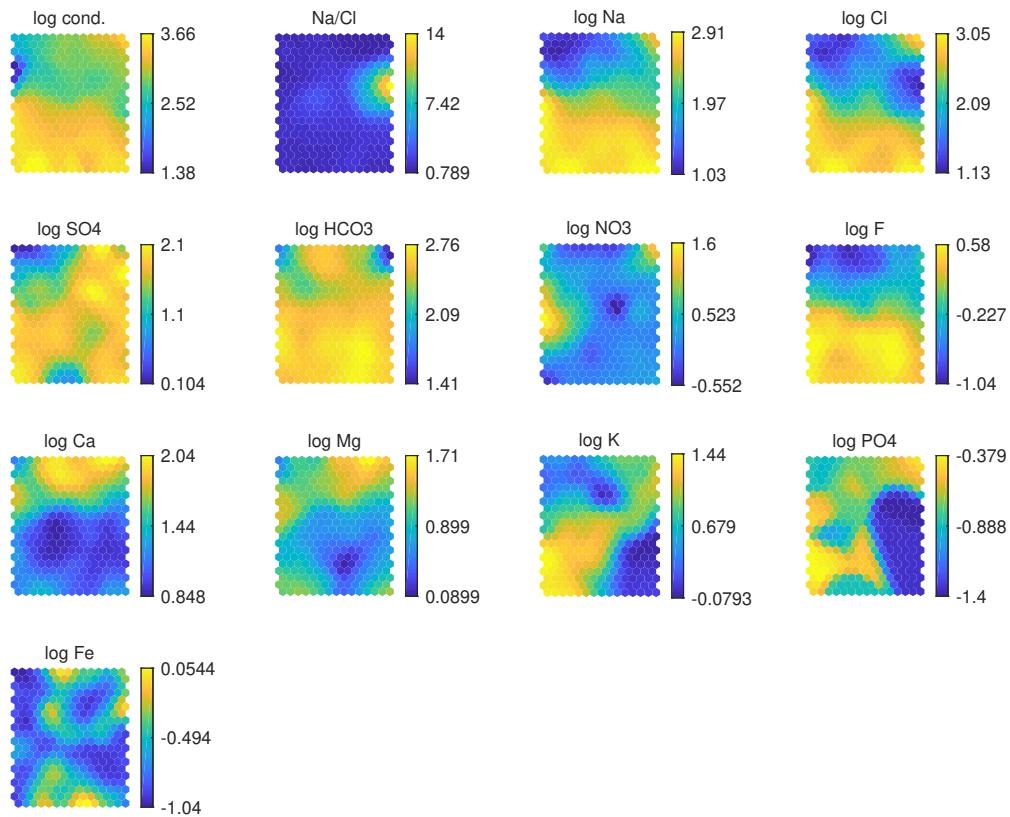


FIGURE I.19 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Maastrichtien

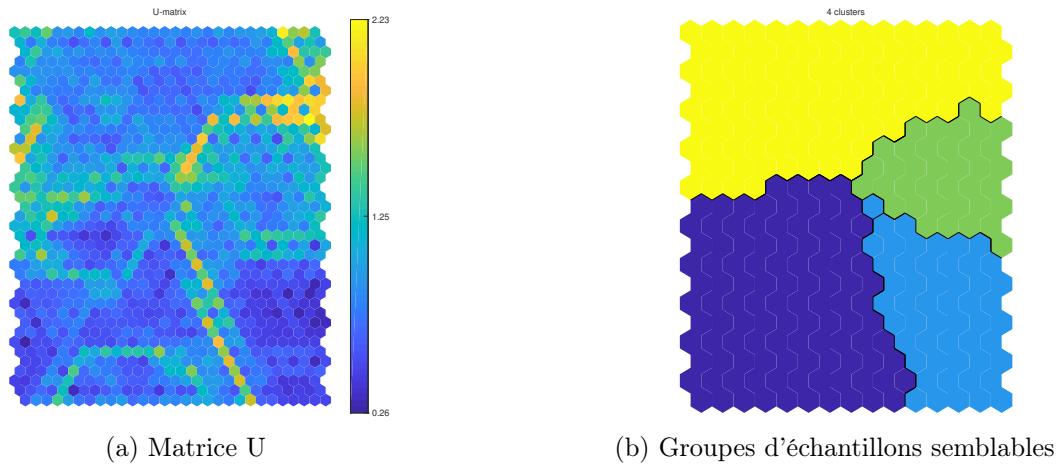


FIGURE I.20 – Caractérisation du faciès hydrochimique du Maastrichtien par les SOMs

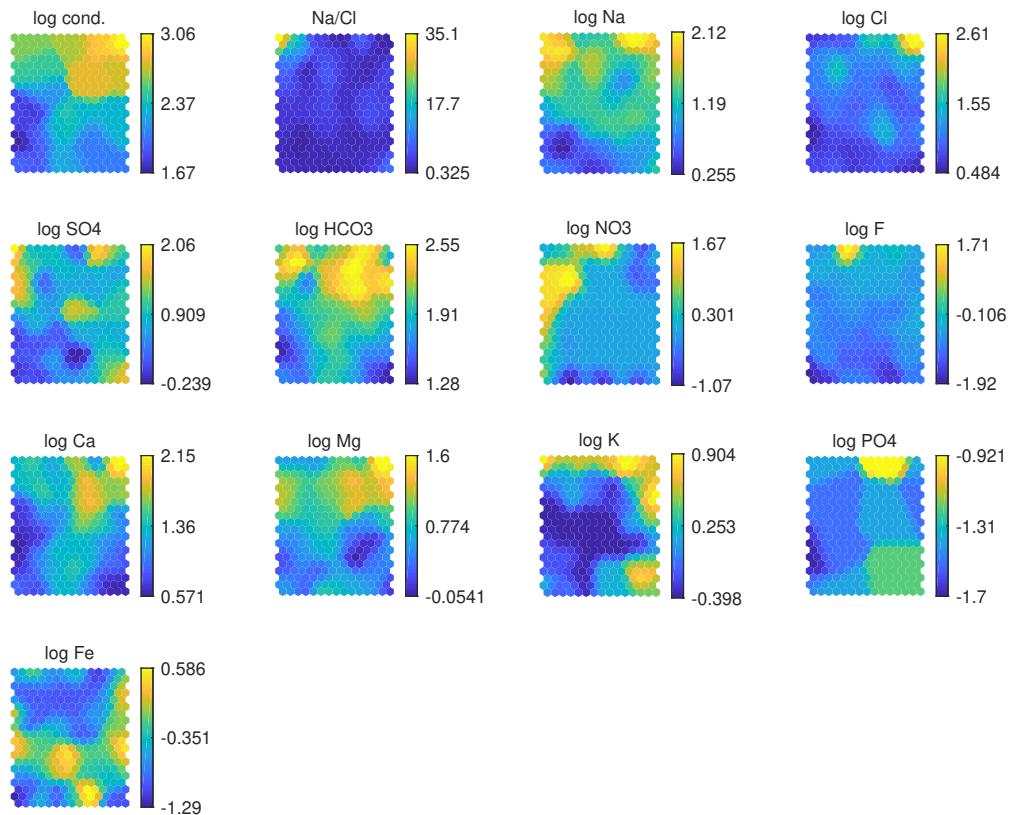


FIGURE I.21 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Maastrichtien

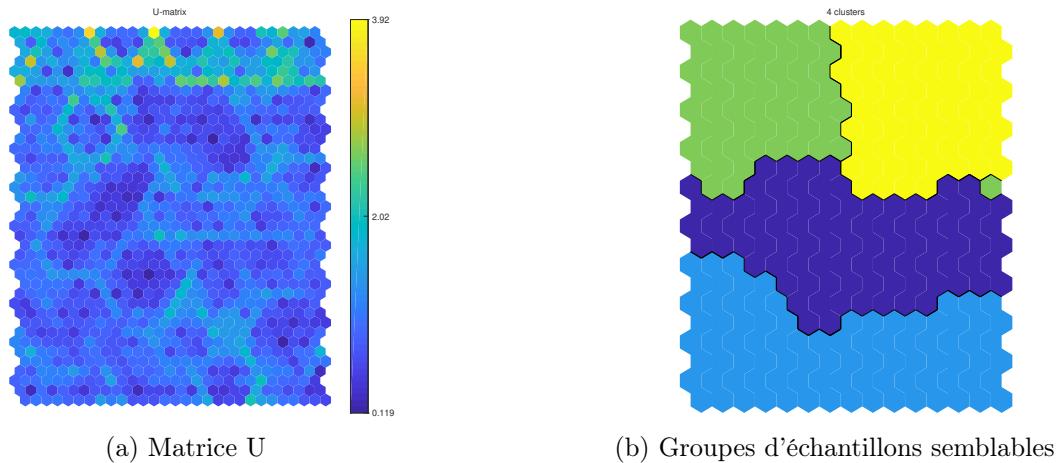


FIGURE I.22 – Caractérisation du faciès hydrochimique de l'Oligo-Miocène par les SOMs

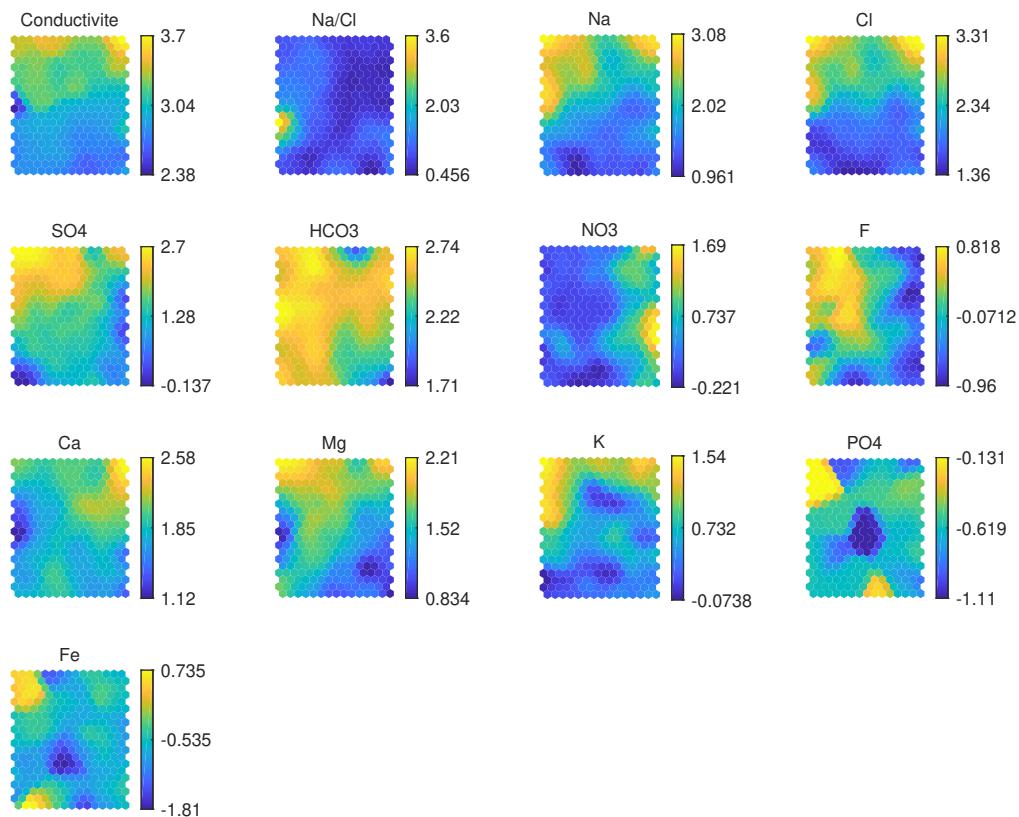


FIGURE I.23 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Paléocène

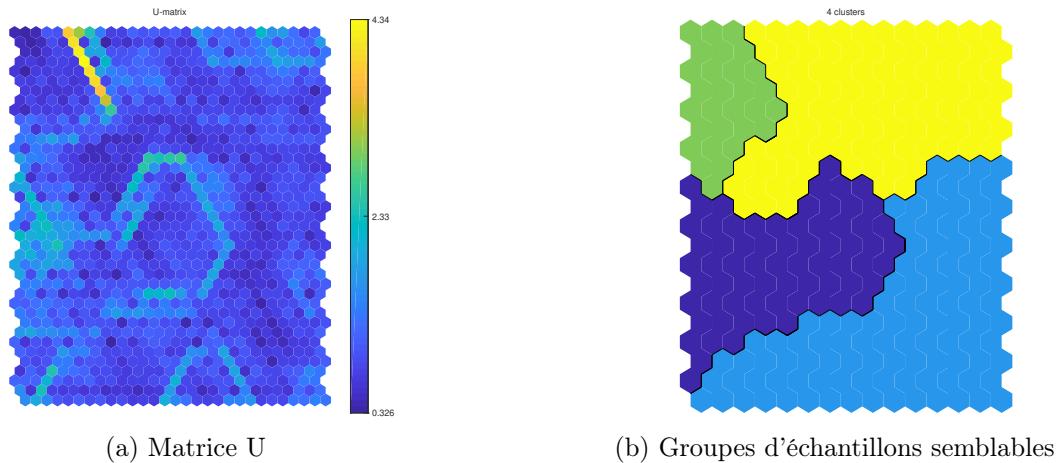


FIGURE I.24 – Caractérisation du faciès hydrochimique du Paléocène par les SOMs

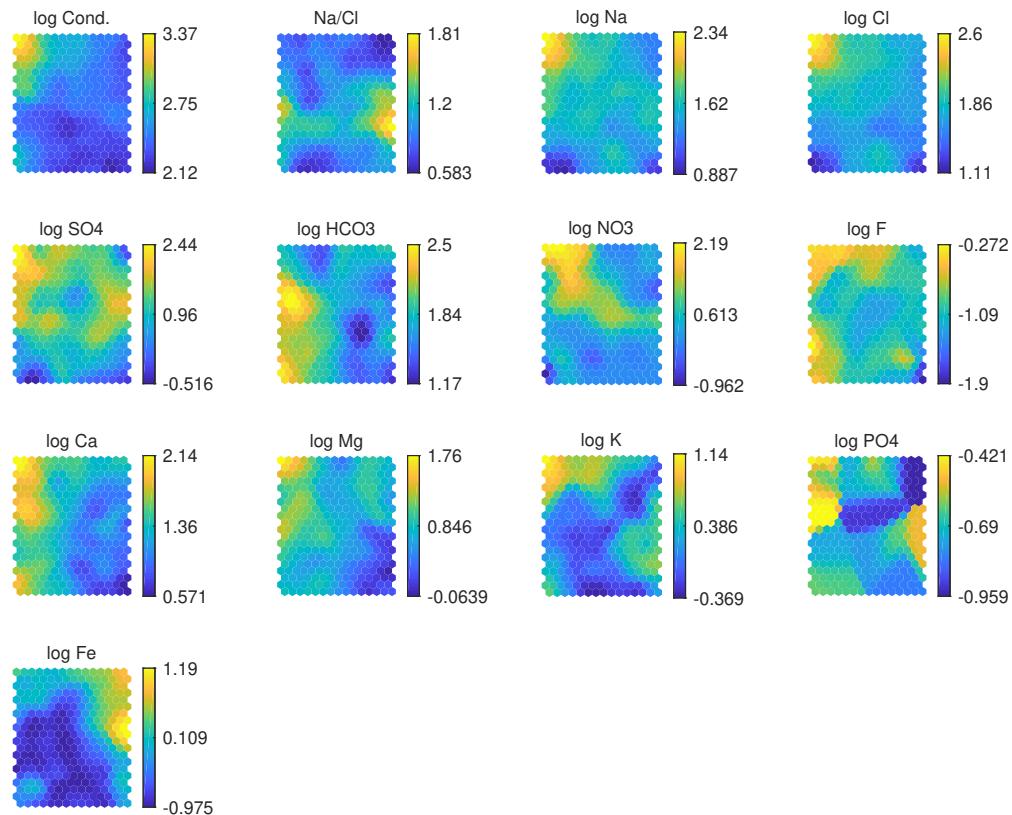


FIGURE I.25 – Matrice des composants pour les paramètres hydrochimiques du Quaternaire

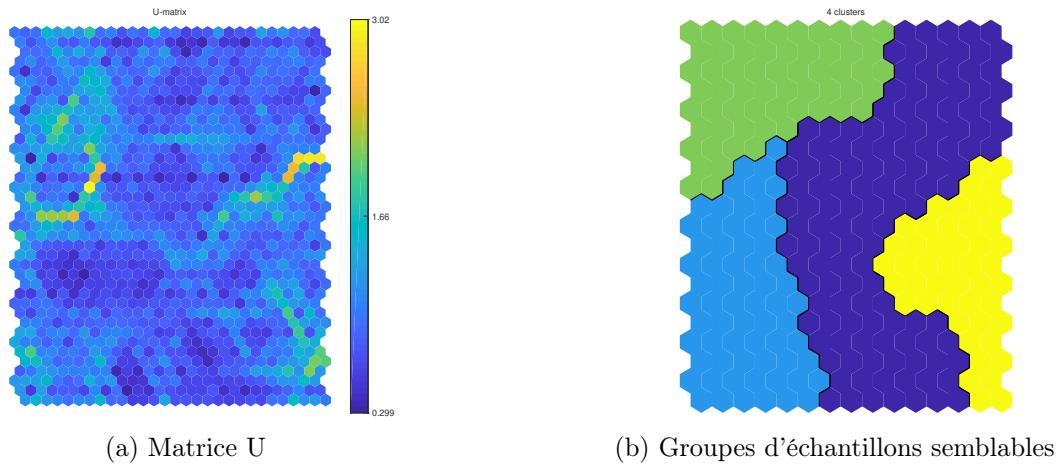


FIGURE I.26 – Caractérisation du faciès hydrochimique du Quaternaire par les SOMs