

Analyse des composantes principales

3.1. Typologie des eaux

3.1.1. Statistique descriptive

L'analyse statistique a été faite afin d'identifier les tendances des paramètres chimiques et leurs évolutions, de même que leur qualité en comparaison avec les normes OMS (tableau 2). La conductivité électrique varie entre 19 et 6480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 1770.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette dernière montre que plus de la moitié de la nappe maastrichtienne ne respecte pas les normes prescrites par l'OMS pour la conductivité électrique (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les cations (Na, Ca, Mg et K) ont des valeurs moyennes de concentration ionique inférieures aux normes de l'OMS à l'exception du sodium dont la moyenne dépasse largement la norme (319,1 mg/L). En outre l'ordre d'abondance des cations est la suivante $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$. Concernant les anions, leurs valeurs moyennes sont inférieures aux normes de l'OMS à l'exception des Chlorures (361,38 mg/L) et du fluor (1,13 mg/L). L'ordre de dominance des anions majeurs est réparti comme suit : $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{NO}_3 > \text{F}$

En somme, une grande partie de la nappe maastrichtienne présente des teneurs en ions majeurs (Ca ; Mg ; K ; HCO_3 ; SO_4 ; NO_3) inférieurs aux normes de l'OMS à l'exception de CE, Na, Cl et F.

Tableau 2 : Résumé statistique des paramètres chimiques de la nappe

Paramètres	Total (N)	Moyenne	Ecart type	Minimum	Médiane	Maximum	Norme
CE	379	1770.8	1478.1	19	1196	6480	1500
Ca	382	27.28	27.64	0.4	19.1	250.8	75
Mg	377	13.74	17.03	0.23	9.7	175.9	30
Na	382	319.13	319.56	1.59	187.2	1453.8	200
K	380	10.8	9.03	0.13	9.4	39.56	12
Cl	382	361.38	444.22	0.6	121.95	2056.7	250
HCO_3	381	295.23	136.89	2	305	768.7	300
SO_4	377	71.48	77.01	0.03	56.3	656	250
NO_3	218	7.5	21.15	0.02	2.1	181.90	50
F	252	1.13	1.16	0.02	0.63	4.49	1.5

3.1.2. Matrice de corrélation

La liaison existant entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (figure 10) qui peut aider à la compréhension des différents processus intervenant dans la minéralisation de la nappe maastrichtienne.

Il en ressort une corrélation significative entre CE/Cl (0.96), CE/Na (0.94) et Na/Cl (0.91). Cette forte corrélation entre CE et Na/Cl montre que la minéralisation des eaux de la nappe serait essentiellement contrôlée par ces paramètres. Il existe également, une bonne corrélation entre d'autres paramètres mais de moindre degré : Na/K (0.83) ; Na/F (0.75) ; HCO₃/F (0.71) ; CE/F (0.61) ; CE/HCO₃ (0.54) ; Mg/Ca (0.68) ; Suggérant que ces ions contribuent aussi d'une certaine manière à la minéralisation de la nappe. Cependant il n'existe pas de corrélation significative entre les autres variables et le nitrate ; qui proviendrait d'une pollution ponctuelle au niveau des ouvrages (puits-forage ou forage puits)

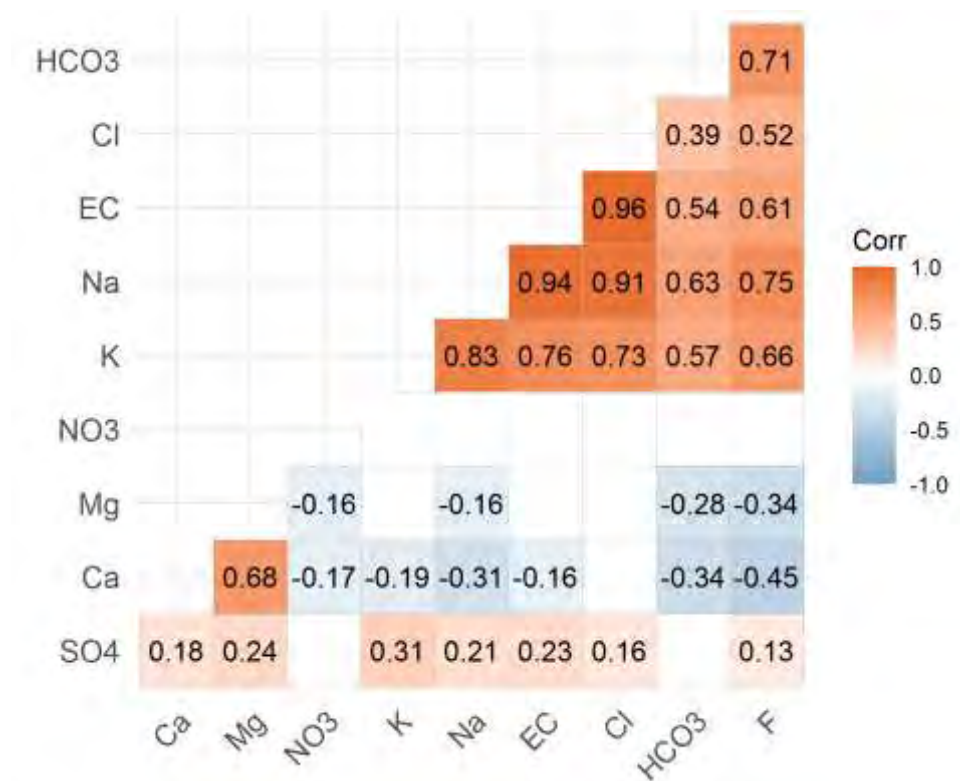


Figure 10: Matrice de corrélation entre les paramètres. Seules les coefficients de Pearson significatifs (p-value <0,05) sont indiqués.

3.1.3. Statistique multivariée

L'application de la méthode statistique multivariée (Analyse des Composantes Principales et la Classification Hiérarchique Ascendante) permet d'identifier les paramètres les plus pertinents qui décrivent la qualité des eaux souterraines et de montrer leur variabilité. Elle a pour but de comprendre les différentes corrélations qui existent entre les différentes variables, de choisir les différentes composantes, la contribution de chaque variable à la constitution des composantes principales et les différents mécanismes qui interviennent dans la minéralisation de la nappe.

Les ACP ont été réalisées sur les 10 variables (CE ; Na ; Mg ; Ca ; K ; SO₄ ; HCO₃ ; NO₃ ; F ; Cl) sur 382 observations. Elle synthétise et classe en nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée, des variables et de leur relation réciproque. Cette analyse a permis de calculer les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque composante principale (CP) et leur cumul. Le tableau 3 suivant présente les valeurs propres, le pourcentage de variance ainsi que le pourcentage cumulé de la variance de l'ACP.

Tableau 3 : variance et cumule de chaque paramètre physico-chimique

	Valeur propre	% de Variance	% cumulé de la variance
1	4.79843	47.98%	47.98%
2	2.29443	22.94%	70.93%
3	1.06166	10.62%	81.55%
4	0.85921	8.59%	90.14%
5	0.41446	4.14%	94.28%
6	0.23832	2.38%	96.67%
7	0.20531	2.05%	98.72%
8	0.10891	1.09%	99.81%
9	0.01722	0.17%	99.98%
10	0.00204	0.02%	100.00%

Le critère de Kaiser qui considère le plus grand nombre de facteurs possibles en ne retenant que ceux aux valeurs propres supérieures à 1, montre que la variance peut être expliquée par trois composantes principales (CP). Ces dernières expriment 81.55% de la variance totale dont 47.98% pour CP1, 22.94% pour CP2 et enfin 10.62% pour CP3.

Le tableau 4 présente la contribution de chaque variable aux 3 composantes. Les valeurs en gras dans chaque colonne correspondent aux variables explicatives de chaque composante principale.

La projection des variables sur les composantes principales (Figure 11) montre que la composante principale 1 contrôle à elle seule 47.98% de la variance. Elle regroupe les variables telles que CE ; Na ; Cl ; K ; F ; HCO₃ qui contrôle la minéralisation de l'eau de la nappe maastrichtienne. Elle est constituée par deux sous-groupes qui dévoilent l'affinité entre CE ; Na ; F ; Cl et d'autre part HCO₃ ; K. La composante principale 2 (CP2) occupe 22.94% de la variance des observations et oppose le couple Ca/Mg au SO₄. Le rassemblement de ces éléments traduit qu'ils seraient mis en solution par la dissolution et /ou l'hydrolyse de la roche encaissante ; c'est-à-dire une interaction eau/roche. Néanmoins la position de Ca-Mg dans le même axe et SO₄ dans l'autre axe explique que leurs mécanismes ne sont pas identiques. Le Couple Ca/Mg est issu du lessivage des minéraux riches en calcite (CaCO₃) ou de la dolomite CaMg (CO₃)₂. Tandis que le SO₄ peut provenir soit de la dissolution du gypse CaSO₄.2H₂O ou de l'eau de mer. La troisième composante (CP3) est composée par le nitrate (10.62%) qui est souvent un marqueur de pollution. Vu la profondeur de la nappe maastrichtienne, le nitrate peut provenir des micro-organismes ou de l'utilisation de certains pesticides. Une origine anthropique peut ne pas être exclue au niveau des zones de recharge de la nappe et au niveau Lac de Guiers.

Tableau 4: Composantes principales et variance explicative

Variables	Coefficients de CP1	Coefficients de CP2	Coefficients de CP3
<i>CE</i>	0.44833	0.13216	0.08244
<i>HCO3</i>	0.36984	-0.16275	-0.01394
<i>Cl</i>	0.43028	0.16263	0.17158
<i>SO4</i>	0.05122	0.35038	-0.53431
<i>Ca</i>	-0.07974	0.61553	0.09125
<i>Mg</i>	-0.01472	0.63231	0.02511
<i>Na</i>	0.46538	0.03223	0.09876
<i>K</i>	0.26819	0.03944	-0.30041
<i>F</i>	0.41699	-0.14272	-0.21491
<i>NO3</i>	0.07413	0.07204	0.72314

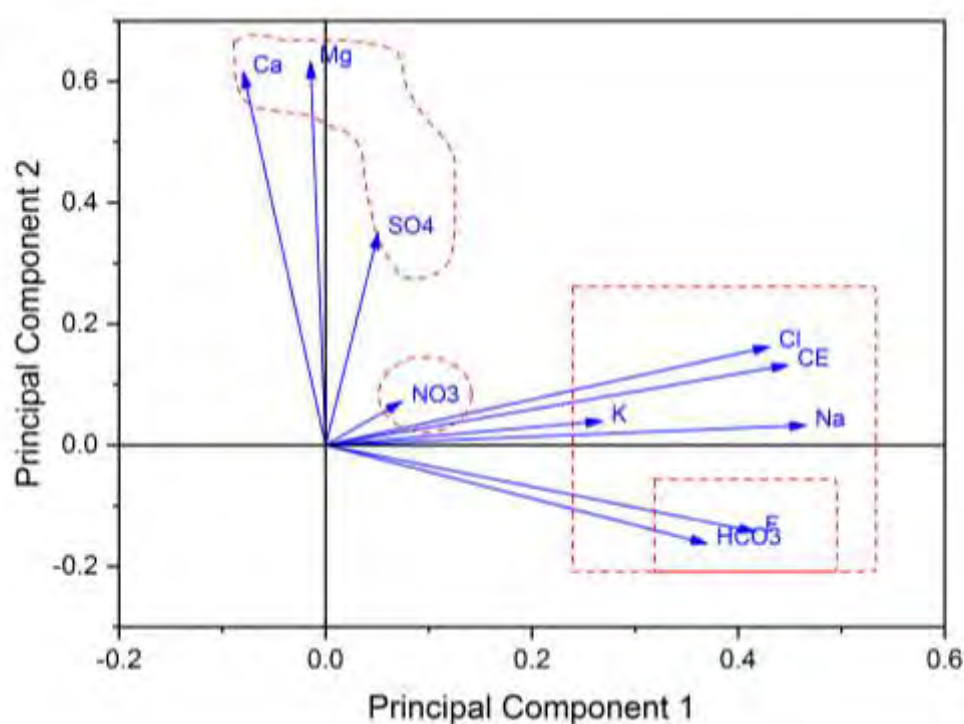


Figure 11: projection des deux premiers composants par ACP

3.1.3.2. Classification Hiérarchique Ascendante

L'analyse hiérarchique ascendante ou analyse hiérarchique en grappe est une technique basée sur la similarité ou non des éléments constituant la base de données analytiques. Le résultat est représenté sous forme de figure nommée dendrogramme. Le dendrogramme pour une faible distance d'agrégation de 10 a distingué trois groupes nommés Cluster 1, Cluster 2 et Cluster 3, avec C1/C2 qui sont liés à une plus grande distance (Figure 12).

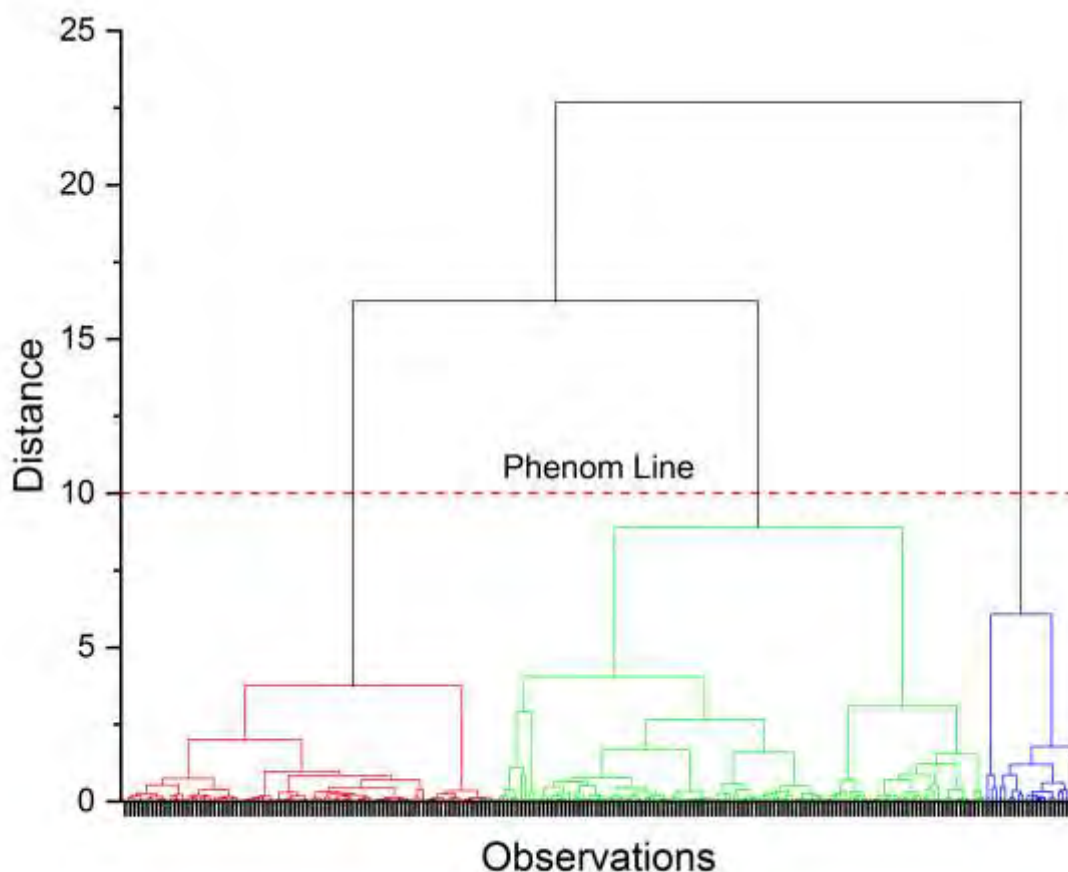


Figure 12: Identification des groupes dans le dendrogramme

La caractérisation des Cluster a été effectuée à travers le diagramme de Piper pour identifier les faciès géochimiques (Figure 13) mais aussi à l'aide de Box-plot pour identifier l'occurrence des ions dans chaque Cluster (Figure 14) :

- C1 est caractérisé par une faible minéralisation (CE moyenne = $465.57\mu\text{s/cm}$) et une dominance des ions Ca et Mg. Elle renferme pour la plupart des eaux très douces qui respectent les normes de l'OMS. Leur faciès est de type bicarbonaté calcique-magnésien (bicarbonaté mixte). Les bicarbonates proviendraient de la dissolution des calcaires du

Paléocène qui surmonte le Maastrichtien.

- C2 est caractérisé par des valeurs de conductivités moyennes de 991.51 $\mu\text{S}/\text{cm}$. C'est un groupe formé par des eaux saumâtres, riche en Na, Cl, HCO_3 , F et SO_4 . Leur faciès est mixte-sodique (bicarbonaté/chloruré- sodique). Ce groupe se confond à C1 pour une plus grande distance d'agrégation (<15). En effet, les processus de dissolution et /ou l'hydrolyse de la roche encaissante qui se produit au C1 serait accompagnée par d'autres processus tel que les réactions d'échange de bases dans C2.
- C3 présente une forte minéralisation (CE moyenne de 3691 $\mu\text{S}/\text{cm}$), regroupant les eaux salées caractérisées par de fortes teneurs en Fluor, potassium et Na/Cl. Il présente un faciès chloruré-sodique qui est typique des évaporites alcalines et alcalino-terreux. En outre, l'enrichissement en Na peut provenir non seulement des réactions d'échanges de bases, mais également de la dissolution de l'halite.

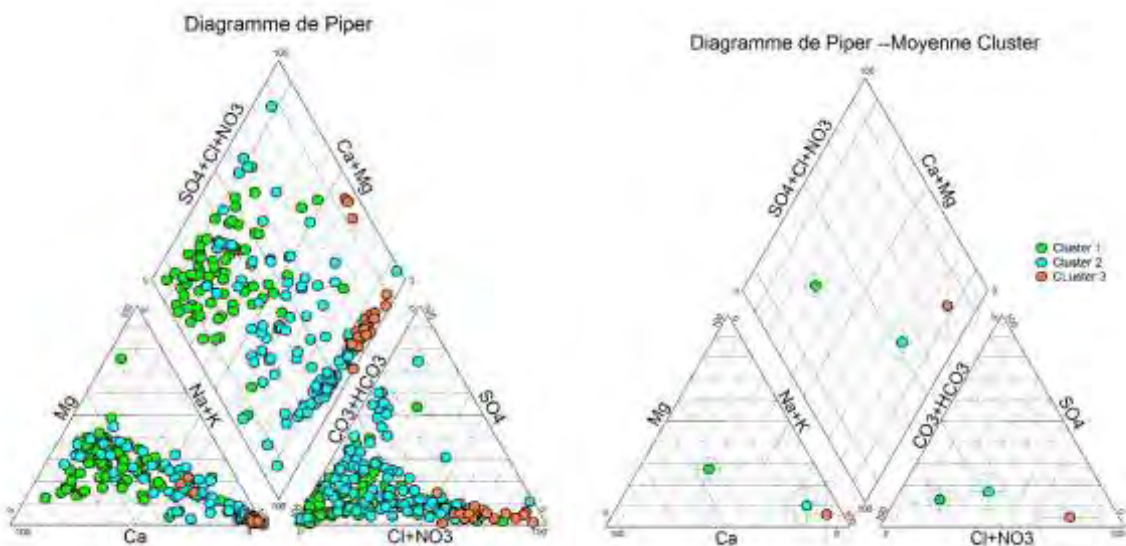


Figure 13: a) Piper de tous les échantillons en fonction des Clusters, (b) Piper de la composition chimique moyenne des Clusters (diamètre des cercles = $\text{TDS} \times 10$)

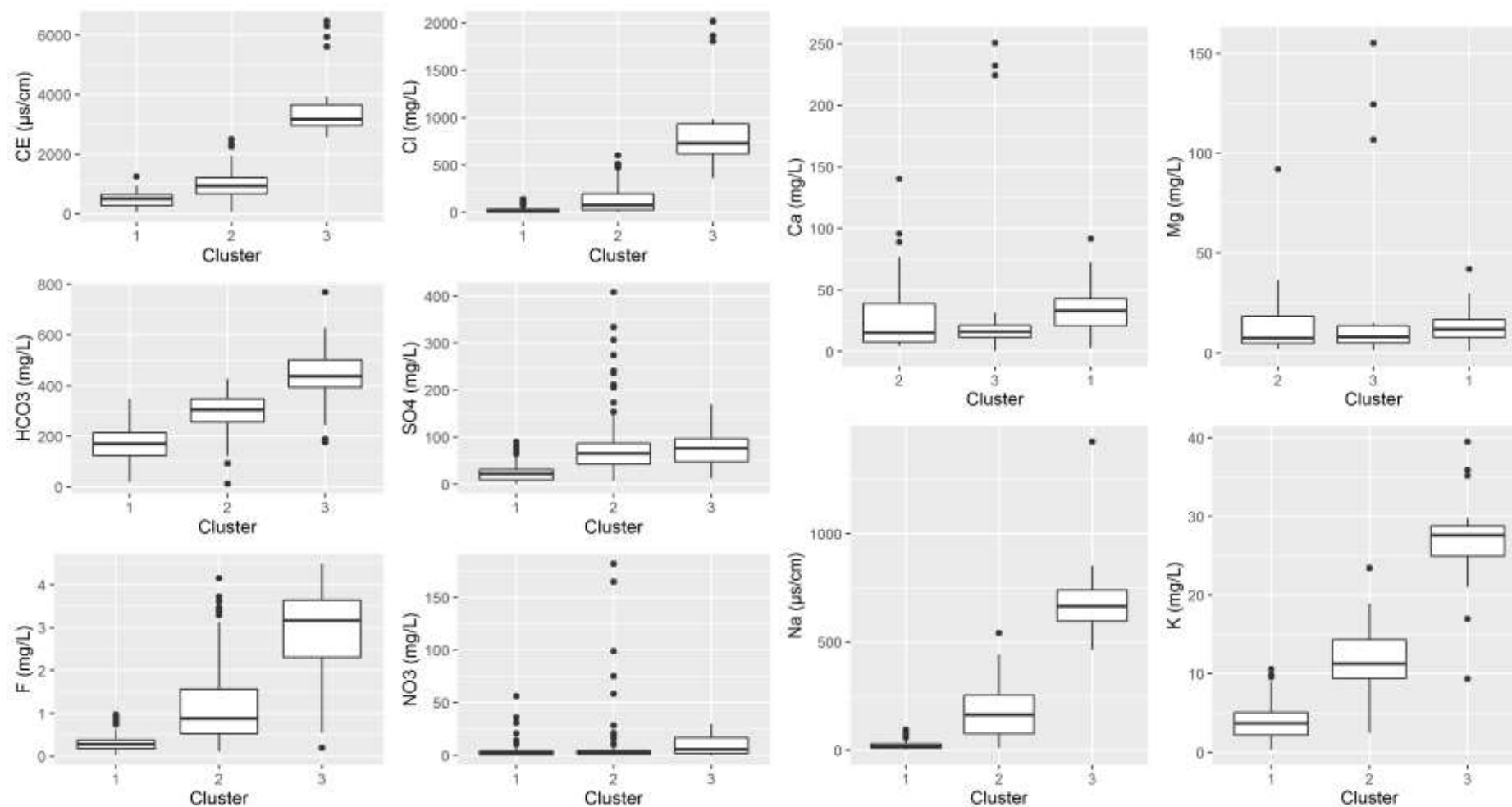


Figure 14: Box plot des paramètres physico-chimiques

3.2 Cartographie de la qualité de l'eau

L'indice de qualité de l'eau (IQE) a été utilisé pour évaluer l'influence composite de chaque paramètre de qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau. Il consiste à résoudre une équation mathématique utilisée pour résumer un grand nombre de données en un seul format compréhensible. Afin d'évaluer la qualité de l'eau de la nappe maastrichtienne par les paramètres physico-chimiques (TDS ; Ca ; Mg ; Na ; K ; Cl ; HCO₃ ; SO₄ ; NO₃ ; F), 4 étapes ont été suivies, comme il a été souligné dans le chapitre méthodologie :

- La génération des couches (Raster) de distribution spatiale des paramètres par interpolation spatiale ;
- Attribution d'un poids à chaque paramètre en fonction de son importance relative dans la qualité globale de l'eau ainsi que leur normalisation ;
- Le calcul de la déviation des paramètres par rapport aux normes, par un indice Q ;
- La génération de la carte spatiale d'IQE par combinaison spatiale (ou superposition) des indices Q.

3.2.1. Interpolation et distribution spatiale des éléments chimiques

La spatialisation des données chimiques a été faite en utilisant la méthode de Krigeage pour tous les éléments chimiques excepté les Nitrates (NO₃) et les potassiums (K) qui ne sont pas adaptés à cette méthode. Ainsi, la méthode d'IWD a été utilisée pour ces derniers. Concernant le Krigeage, différents types de modèles de semi-variogrammes (stable, gaussien, sphérique, exponentiel et circulaire) utilisant le krigeage simple ou ordinaire, ont été examinés pour chaque paramètre afin d'obtenir le modèle le plus approprié. Les performances productives des modèles adaptés ont été vérifiées sur la base de tests de validation croisée. Les valeurs de l'erreur moyenne (Mean Error) et de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square) ont été estimées pour vérifier les performances du modèle adopté (tableau 5).

Tableau 5: Modèle d'interpolation des éléments chimiques

Paramètres	Méthode	Meilleur model	Erreur moyenne	Erreur moyenne quadrique
TDS	Krigeage Ordinaire	Stable	-2.10	596
Ca	Krigeage Ordinaire	Stable	-0.10	20.66
Mg	Krigeage Ordinaire	Stable	-0.35	15.17
Na	Krigeage Ordinaire	Stable	0.46	105.23
K	IDW	-	0.037	8.67
Cl	Krigeage Ordinaire	Stable	0.42	205.02
SO4	Krigeage simple	Gaussien	0.41	61.06
HCO3	Krigeage Ordinaire	Stable	0.78	84
F	Krigeage Ordinaire	Stable	-0.31	9.15
NO3	IDW	-	0.92	22.57

La distribution spatiale des paramètres physico-chimiques de la nappe maastrichtienne, classifié en fonction des normes de l'OMS (figure 15 et 16) montre que :

- La Partie occidentale du bassin (Horst de Diass) est formée par des eaux faiblement minéralisé. Ces eaux douces présentent des paramètres physico-chimiques (TDS ; Ca ; Mg ; Na ; K ; Cl ; HCO3 ; SO4 ; NO3 ; F) qui respectent les normes prescrits par l'OMS. Néanmoins la minéralisation augmente de plus en plus que l'on se rapproche d'une bande centrale de direction Nord-Sud, communément appelé la bande centrale salée.
- La bande centrale salée comme son nom l'indique est une zone à forte charge minérale. Elle est formée par des eaux saumâtres à salées avec des teneurs en ions majeurs qui dépassent largement les normes OMS. Cette forte minéralisation est due à la présence excessive de chlorure de sodium, de fluor, de bicarbonate et de potassium, mais également fortes teneurs en Ca et Mg au Nord.

- La partie centrale est une zone à cheval entre la bande salée et la partie orientale du bassin sédimentaire. Elle est caractérisée par une eau moyennement minéralisée mais qui respecte les normes à l'exception du sulfate qui présente de fortes teneurs dans certaines zones du Ferlo. La minéralisation continue de diminuer graduellement vers l'Est où l'on retrouve des eaux très douces à l'instar de la partie occidentale.

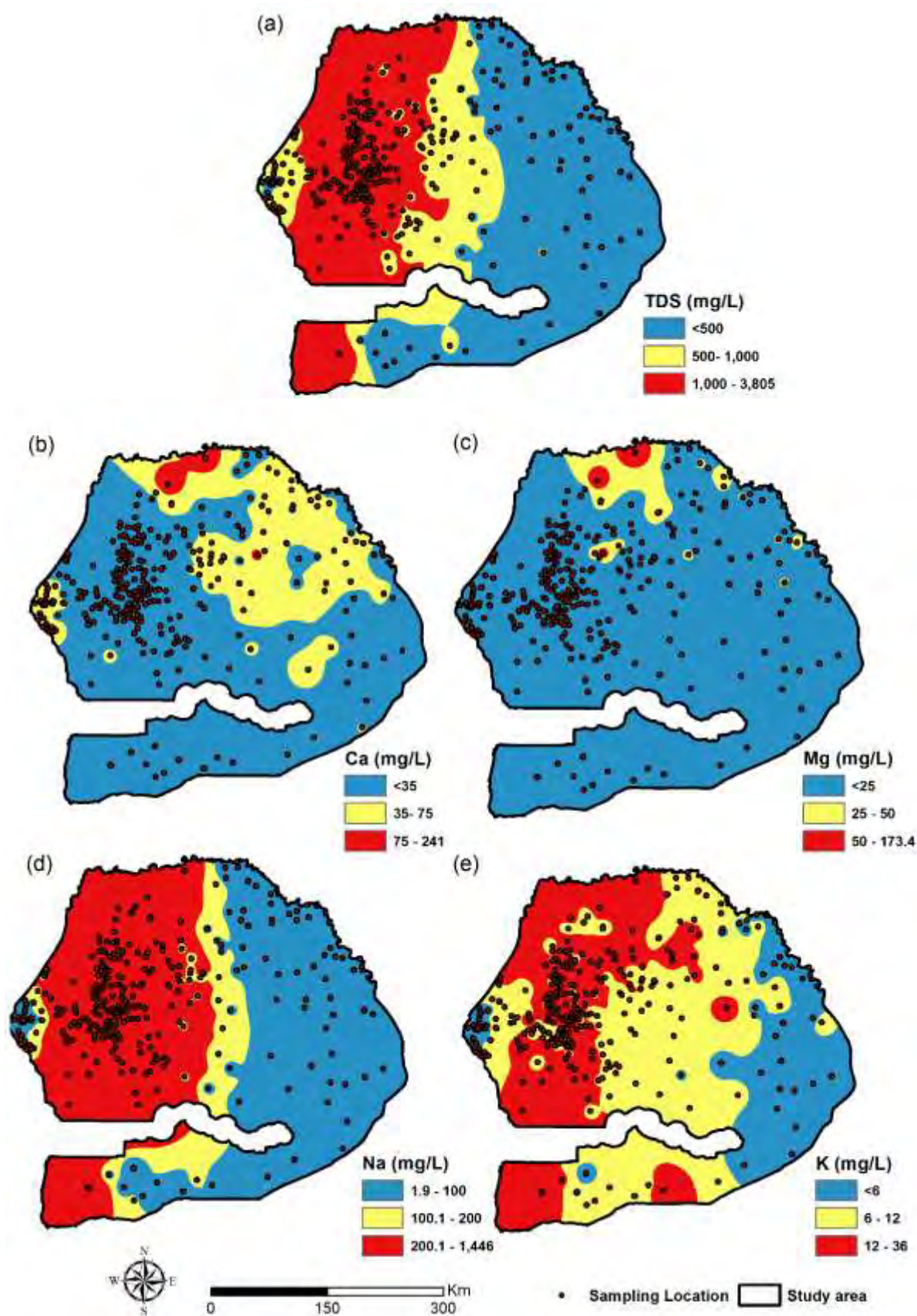


Figure 15: Répartition spatiale du TDS et des cations

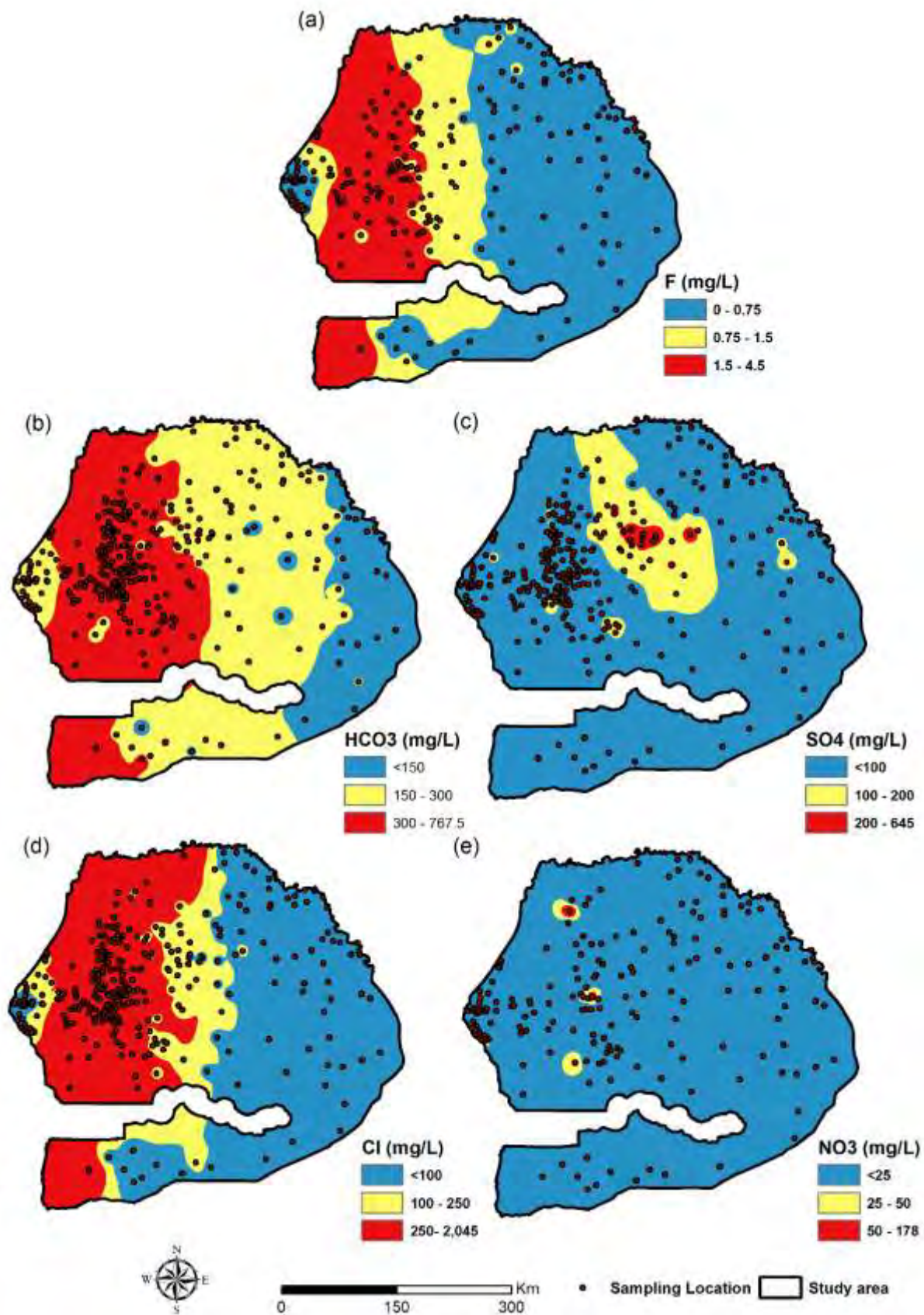


Figure 16: Répartition spatiale des anions

3.2.2. Pondération des critères et normalisation

A chaque paramètre est attribué un poids relatif. Ce dernier reflète son importance relative dans la qualité globale de l'eau potable. Un poids maximum de 5 a été attribué au Fluor et Nitrate qui sont considérés comme les éléments les plus nocifs, suivis de 4 attribué à CE ; Cl ; Na et F, en raison de leur importance dans l'évaluation de la qualité l'eau. Le poids de Ca ; Mg ; SO4 ; K est de 2 car leur excès peut être légèrement toléré dans l'eau de consommation. En fin, le bicarbonate est l'élément le plus toléré avec un poids de 1 indiquant que l'excès de bicarbonatés dans l'eau n'est pas un grand danger.

Le tableau 6 présente le poids absolu de paramètre, normalisé grâce à la formule suivante ;

$$Wi = \frac{w_i}{\sum_1^n w_i}$$

Avec : **Wi** est le poids relatif et **w_i** est le poids de chaque paramètre et **n** est le nombre de paramètre.

Tableau 6: Pondération des paramètres

Paramètres	Norme OMS	Poids	Wi
CE	1500	4	0.13
HCO3	300	1	0.03
Cl	250	4	0.13
SO4	250	2	0.06
Ca	75	2	0.06
Mg	50	2	0.06
Na	200	4	0.13
K	12	2	0.06
F	1.5	5	0.16
NO3	50	5	0.16
	TOTAL	31	1

3.2.3. Calcul de la déviation des paramètres par rapport à la norme (Q)

Il s'agit d'une échelle d'évaluation de la qualité qui consiste à calculer le rapport entre la concentration de chaque paramètre chimique et sa norme OMS. La carte matricielle de distribution de chaque élément chimique a été utilisée à cet effet, en divisant la valeur de chaque élément (dans chaque maille) par la norme OMS dans un environnement SIG (« Raster Calculator ») en utilisant la formule suivant :

$$Q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

Avec : **C_i** la concentration de l'éléments chimique *i* et **S_i** la norme OMS de l'élément *i* en mg/l.

3.2.4. Combinaison des critères et classification des IQE

Afin de générer la carte de l'indice de qualité des eaux de la nappe maastrichtienne en considérant les paramètres chimiques cités dans les sections précédentes, la méthode d'agrégation pondérée a été utilisée sous un environnement SIG (Weighted Sum) à travers la formule suivante :

$$IQE = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i \times W_i$$

Où **IQE** désigne la valeur de l'indice pondérée (carte matricielle du taux d'adéquation de l'IQE) ; **Q_i** l'échelle d'évaluation de la qualité des facteurs *i* ; **W_i** le score de critère des facteurs *i* (poids normalisé de *i*).

La carte IQE générée à travers cette formule, a été reclassifiée suivant les ordres de grandeur est présenté dans le tableau 7.

Tableau 7: Classification des eaux selon leur indice de qualité

Indices de qualité de l'eau	Type d'eau
<25	Excellente
25-50	Bonne
50-75	acceptable
75-100	mauvaise
>100	Très mauvaise à Inapte

La carte de distribution spatiale d'IQE est présentée sur la figure 17. La répartition des indices révèle que la majeure partie (54,3 % de la superficie totale de la nappe) de l'eau de la nappe est potable. Elle respecte tous les critères chimiques définis par l'OMS pour une eau de boisson. En effet on trouve une eau d'excellente qualité au niveau du horst de Diass et dans la zone Est du bassin (24,9 %). Il s'en suit des eaux de bonne qualité (29,3 %) de part et d'autre de la bande salée et dans une partie de la bordure du socle. Cependant au niveau de la bande salée la minéralisation est très importante avec des valeurs de conductivité, de Na-Cl et de Fluor qui dépassent largement les normes. En conséquent, cette zone renferme des eaux impropres pour la consommation (20 % de la superficie totale), circonscrit de part et d'autre par des eaux de qualité acceptable représentant 11,7 % de la superficie total et de qualité mauvaise (14%) inapte à la consommation.

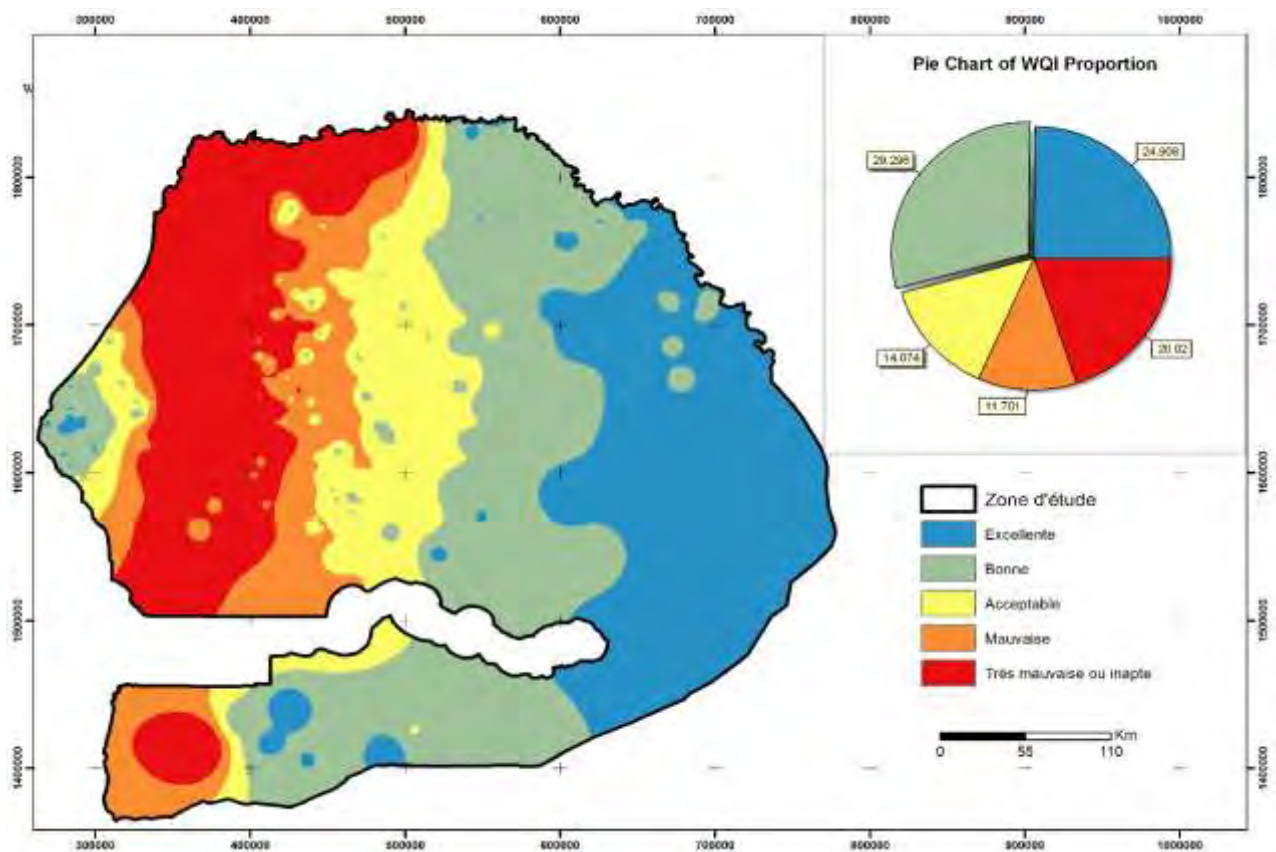


Figure 17: Distribution spatiale de l'IQE de la nappe maastrichtienne