

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : **Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable**

Structure de Recherche : **Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement**

Discipline : **Sciences de la Terre et l'Univers**

Spécialité : **Hydrogéochimie, Géostatistique.**

Typologie et spatialisation des caractéristiques biologiques et physico-chimiques des différentes ressources en eau destinées à la production d'eau potable dans le Sud-Est de la France.

Présentée et soutenue le **21/12/2020** par :

TIOUIOUINE Abdessamad

JURY

NIAZI Saida	PES, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat.	<i>Présidente</i>
KACIMI Ilias	PES, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat.	<i>Rapporteur/Examinateur</i>
MORARECH Moad	PH, Faculté des sciences, Université Abdelmalek Saadi, Tétouan.	<i>Rapporteur/Examinateur</i>
BAHAJ Tarik	PH, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat.	<i>Rapporteur/Examinateur</i>
FURIAN Sonia	PES, Université de SAO PAULO – Brésil.	<i>Examinatrice</i>
LEBLANC Marc	PES, INRAE, Université d'Avignon, Avignon, France.	<i>Examinateur</i>
ZEILIGUER Anatoly	PES, Université d'état d'ingénierie environnemental, Moscou, Russie.	<i>Examinateur</i>
BARBIERO Laurent	PH, IRD CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France	<i>Examinateur</i>
KASSOU Nadia	PES, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat.	<i>Directrice de Thèse</i>
VALLES Vincent	PES, INRAE, Université d'Avignon, Avignon, France.	<i>Directeur de Thèse</i>

Année Universitaire : **2019 – 2020**

*“Et nous avons fait descendre l’eau du ciel avec
mesure * Puis nous l’avons maintenue dans la terre,
cependant que Nous sommes bien capables de la faire
disparaître”*

Sourate 23, Verest 18, Al - Muminoon

Dédicaces

*Toutes les lettres alphabétiques ne sauraient trouver les mots qu'il faut ****

*Tous les mots sont incapables d'exprimer le Respect, l'Amour, la Reconnaissance ****

Je dédie cette thèse

A ceux qui n'ont jamais cessés de nous apporter le courage, l'amour, et le bon sens,

A ma très chère Mère que Dieu la protège

A mes Sœurs, Tibilote et Frère qui ont toujours été présents à mes côtés

A mes professeurs

A mes amis

Et à tous ceux qui nous aiment...

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la patience et la force d'accomplir cette étude.

Le présent travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Géosciences, Eau et Environnement de la Faculté des Sciences de Rabat au Maroc, et le laboratoire d'hydrogéologie, UMR EMMAH, UFR-ip de l'Université d'Avignon en France, sous la direction de Pr. KASSOU Nadia et Pr. VALLES Vincent.

Je remercie mon encadrante Madame **KASSOU Nadia**, PES à la Faculté des Sciences de Rabat. Je la remercie infiniment pour le temps qu'elle a consacré pour la correction et l'améliorations de ce manuscrit, ainsi que pour sa sympathie et ses qualités scientifiques et humaines.

Pour mener à bien ce travail de thèse, j'ai bénéficié de l'encadrement scientifique de Monsieur **VALLES Vincent**, PES et Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, Alimentation et l'Environnement (INRAE) à la l'Université d'Avignon en France. Je le remercie d'avoir accepté de diriger cette thèse premièrement, de m'avoir offert l'opportunité de vivre cette aventure, ainsi que pour les moments de discussions et les stages de terrain dans tout la région PACA. Sans ses précieux conseils et orientations ce travail n'aurait pas peut aboutir. Je le remercie également d'avoir pu me faciliter l'accès aux outils d'analyses hydrogéochimiques et les outils statistiques au sein du laboratoire d'hydrogéologie à la Faculté des Sciences d'Avignon (France). Je lui sais gré de ses investissements et de ses accompagnements tout au long de cette aventure intellectuelle et humaine unique.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Madame la présidente **NIAZI Saida**, PES à la Faculté des Sciences de Rabat. Je la remercie pour ses encouragements depuis ma licence ainsi que pour ses qualités scientifiques et humaines qui m'ont beaucoup marquée. Je la remercie d'avoir présidé le jury de ma soutenance et d'examiner mon travail.

Je remercie également **Mr. KACIMI Ilias**, PES à la Faculté des Sciences de Rabat et chef de département des Sciences de la Terre, rapporteur et examinateur de ma thèse, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire 'LGEE', et d'intégrer son équipe de recherche. L'aventure de ce sujet de thèse a commencé depuis mes études de Master, grâce à laquelle j'ai pu m'intégration dans le laboratoire 'LGEE'. Ce sujet a été initié sous forme d'un mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master.

Je remercie vivement **Mr. MOURARECH Moad**, PH à la Faculté des Sciences, Université Abdelmalek Saadi (TETOUAN), rapporteur et examinateur de ma thèse, d'avoir accepté d'examiner mon travail. Et son déplacement pour ma soutenance, pour ses encouragements depuis mes études en Master.

Mes vifs remerciements vont à **Mr. BAHAJ Tarik**, PH à la Faculté des Sciences de Rabat, rapporteur et examinateur de ma thèse, d'enrichi mon travail par ses conseils et commentaires. En plus, Il m'a beaucoup soutenu et encouragé lors des moments de difficiles durant cette aventure.

Je remercie sincèrement **Mme. FURIAN Sonia**, PES à l'Université de SAO PAULO au BRESIL, pour l'intérêt qu'il a porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail. Je le remercie surtout pour son esprit de partage et ces encouragements.

Je remercie également **Mr. LEBLANC Marc**, PES Directeur du laboratoire d'Hydrogéologie, à l'Université d'Avignon UMR EMMAH (France), d'avoir accepté de relire cette thèse et de me permettre de bénéficier de ses précieuses remarques.

Mes vifs remerciements vont au **Mr. BARBIERO Laurent**, PH, chargé de la Recherche à l'IRD de TOULOUSE, pour l'intérêt qu'il a porté à ma recherche d'accepter d'examiner mon travail et de l'enrichir par ces remarques et ces propositions pertinentes. Il m'a aidé aussi dans la publication des articles.

Je remercie aussi **Mr. ZEILIGUER Anatoly**, PES, Directeur du laboratoire de mathématique appliquée, à l'Université d'état d'Ingénierie Environnemental (Moscou), d'avoir accepté d'examiner mon travail et de l'enrichir par ses remarques et propositions très pertinentes.

Je remercie très vivement l'Ingénieur en génie sanitaire **Mr. DASSONVILLE Fabrice**, Responsable régional du domaine des eaux (PACA), qui m'a beaucoup aidé tout le long de cette période de thèse, surtout pour la base de données traitées. Il n'a jamais ménagé ni de son temps ni de ses efforts pour m'aider à mener à bien cette thèse.

Je ne peux non plus oublier de remercier tous les membres de Laboratoire **LGEE** de Rabat (Maroc) et le laboratoire d'Avignon (France), et particulièrement **Mr. SIMLER Roland**, technicien de laboratoire. Je remercie toutes leurs équipes pour leurs aides précieuses durant ces années de recherche.

Mes chaleureux remerciements vont aux collègues : **Mr. GUIGOU Jean François, JOUTEUX François-Xavier et SACCHETTI Bruno** de l'Agence régionale de santé (ARS) PACA, délégation départementale des Alpes de Haute Provence **04**. Et Mesdames **DELORME Laurianne et GARCIA Stéphanie** de la délégation **84**. Monsieur **VOUTIER Laurence, AUBERC François et aussi Mme AVY Sophie** de la délégation **05**, qui étaient toujours là pour discuter et me conseiller. Ainsi, l'agence de l'eau **RMC** et en particulier **Mr. CADILHAC Laurent**. Je les remercie infiniment pour leurs encouragements et leurs esprits de partage.

Je remercie vivement **Mr. MOULIN Marc**, Ingénieur chez BRGM, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et sa disponibilité pour répondre à toute mes demandes et questions lors de mes années de recherches.

Mes remerciements vont aux membres du **laboratoire d'Hydrogéologie** du Faculté des Sciences d'Avignon, qui m'ont permis de faire les analyses de diffraction des rayons X.

Je remercie **Mme EL HAJJAJI Souad**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et la Responsable du Centre de Recherche '**CERNE2D**', d'avoir accepté ma demande d'intégrer ce centre de Recherche au sein de l'Université Mohammed V - Rabat.

Je remercie tous les **professeurs du Département de géologie**, spéciaux remerciements vont à notre chère **Mme Rachida**, secrétaire du département. Je remercie tous les thésards de la Faculté des Sciences de Rabat et particulièrement mes collègues du département des sciences de la Terre pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux bons moments passés ensembles. Finalement, j'aimerais remercier toute personne qui a cru en moi et qui a contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Finalement, je remercie ma **Famille, Tiblilot**, pour leurs encouragements.

RESUME

L'eau est l'aliment le plus consommé et le plus indispensable à la vie. Pour ceci, il faut assurer, en permanence, sa distribution en quantité suffisante et en qualité respectueuse de la santé publique. Le travail de cette thèse vise à étudier la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), en se basant sur la base de données SISE-Eaux, archivées depuis 1990 par l'Agence Régionale de la Santé (ARS). Un suivi, plus ou moins régulier, sur près de 30 ans et la multiplication des paramètres conduisent, à une matrice clairsemée (observations x paramètres) et à une grande dimension de l'hyperespace de données. Ces caractéristiques rendent difficile l'exploitation de cette base de données pour une cartographie synthétique de la qualité de l'eau, et l'identification des processus responsables de sa diversité dans un contexte géologique complexe et un environnement anthropisé. Une période de 10 ans (2006-2016) a été sélectionnée dans la série des données de la région PACA, Sud-Est de la France. Nous avons extrait 5 295 échantillons d'eau, avec chacun 15 paramètres de leur qualité. Une approche globale à l'échelle régionale est appliquée en premier pour informer sur les grandes lignes des mécanismes responsables de la qualité des eaux. Elle permet une approche synthétique globale de la qualité des eaux, mais elle s'avère inadaptée à une politique de gestion locale. Il apparaît ainsi que le déterminisme de la qualité bactériologique est complexe. L'approche purement mathématique ne suffit pas. Il convient de la croiser avec la cartographie de masses d'eaux souterraines du BRGM. Une méthodologie est proposée, elle consiste en une réduction dimensionnelle de l'information, puis un calcul des caractéristiques moyennes par masses d'eau et enfin leur classification hiérarchique ascendante non supervisée. Des groupes et des sous-groupes de masses d'eau ont été établis sur la base de cette classification. La cartographie du résultat obtenu montre une grande cohérence avec les structures géologiques régionales ; il devient alors possible d'étudier en détail les mécanismes responsables de la qualité des eaux dans ces ensembles cohérents au niveau géologique. L'étude de quelques groupes et sous-groupes de masses d'eau montre la pertinence de cette approche. Enfin, une Analyse Discriminante (AD) et une approche par Machine Learning présentant des résultats remarquablement convergeant, montre que l'échelle pertinente de la gestion de la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine (région PACA) est celle des groupes ou des sous-groupes de masses d'eau et non celle des masses d'eau elles-mêmes. Ce travail montre l'importance de la connaissance et de la cartographie des masses d'eau souterraines pour la gestion de leur qualité.

Mots clés : Hydrogéochimie, Qualité des eaux, Contrôle sanitaire, SIG, Statistique Multivarié, Hydrogéologie, Région PACA, France.

ABSTRACT

Water is the most consumed and essential for life. For this, it must permanently ensure its distribution in sufficient quantity and in quality respectful of public health. The work of this thesis aims to study the quality of groundwater intended for consumption in the PACA region. We are based on the SISE-EAUX database, of water intended for consumption, archived by the French Regional Health Agency (ARS) since 1990. More or less regular monitoring over almost 30 years and the multiplication of parameters leads, to a sparse matrix (observations x parameters) and a large dimension of the hyperspace of data. These characteristics make it difficult to exploit this database for a synthetic mapping of water quality, and to identify of the processes responsible for its diversity in a complex geological context and anthropized environment. A 10-year period (2006 – 2016) was selected from the Provence-Alpes- Côte d’Azur region database (PACA, southeastern France). We extracted 5295 water samples, each with 15 parameters. A global approach on a regional scale is first applied, giving an outline of the mechanisms responsible for water quality. It allows a global synthetic approach to water quality, but turns out to be unsuitable for a local management policy. However, it appears that the determinism of bacteriological quality is complex. A purely mathematical approach is not enough. It should be crossed with the mapping of BRGM groundwater bodies. A methodology is proposed. It consists of a dimensional reduction of the information, then a calculation of the average characteristics by water bodies and finally an unsupervised ascending hierarchical classification of the water bodies. Groups and sub-groups of water bodies then established based on this classification. The mapping of the result obtained shows great consistency with regional geological structures. It then becomes possible to study in detail the mechanisms responsible for the quality of the water in these geologically consistent sets. The study of some groups and subgroups of water bodies shows the relevance of this approach. Finally, a Discriminant Analysis and a Machine Learning approach presenting remarkably converging results, demonstrates that the relevant scale for managing the quality of groundwater intended for human consumption (PACA region) is that of groups or sub-groups of bodies of water and not those of the bodies of water themselves. This work shows the importance of knowledge and mapping of groundwater bodies for the management of their quality.

Keywords: Hydrochemistry, Water quality, Sanitary control, GIS, Multivariate Statistics, Hydrogeology, PACA Region, France.

Sommaire

Dédicaces.....	3
Remerciements	4
Résumé	6
Abstract.....	7
Sommaire.....	8
Liste des Figures.....	12
Liste des Tableaux	15
Liste des annexes	17
Liste des abréviations	18
INTRODUCTION	19

PARTIE 1 : GENERALITES & METHODOLOGIE

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

I. Problématique de la gestion durable de l'eau	24
II. Evolution des approches de l'étude des mécanismes responsables de la qualité des eaux.....	26
III. Evolution des études sur les transferts de micro-organismes dans les sols et dans les cours d'eau	27
IV. Evolution des approches en géographie physique : du descriptif au SIG	28
V. Outils mathématiques et approches modernes en traitement de données dans le Big-Data :	29

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

I. Présentation de la zone d'étude.....	32
I. 1. Cadre et Situation géographique	32
I. 2. Géographie physique	33
I. 3. Contexte hydrologique du PACA.....	37
I. 4. Climat et occupation du sol de la région d'étude	48
I. 5. Population et activités Socio-Economiques	50
II. Les problèmes majeurs de qualité d'eau destinée à la consommation dans la région PACA	52

CHAPITRE 3 : APPROCHES METHODOLOGIQUES

I. Base de données SISE-EAUX	54
II. Approche adoptée	55
III. Présentation du SIG du BRGM : les masses d'eaux souterraines (MESO)	56
IV. Outils utilisés.....	56
IV. 1. Outil mathématique et statistique.....	56
IV. 2. Approche globale (ACP) pour une réduction dimensionnelle	57
IV. 3. Réduction dimensionnelle	58
IV. 4. Synthèse des informations par Axe factoriels ACP	59

IV. 5. Classification hiérarchique ascendante non supervisée	59
IV. 6. Analyse Discriminante.....	59
IV. 7. Machine Learning.....	60
IV. 8. Outils Cartographique.....	61

PARTIE 2 : QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE REGIONALE : RESULTATS

CHAPITRE 1 : MECANISMES RESPONSABLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES SUR L'ENSEMBLE DE LA REGION PACA

I. Présentation des masses d'eaux souterraines traitées	64
II. Approche géochimique de la qualité des eaux à l'échelle régionale	64
III. Calcul de l'ACP sur l'ensemble du bloc 2	67
III. 1. Matrice des corrélations	68
III. 2. Distribution de la variance	69
III. 3. Interprétation des axes factoriels.....	69
III. 4. Plans factoriels	73
IV. Résultats de la rotation Orthomax	75
V. Cartographie des paramètres et des axes factoriels à l'échelle de la région PACA	78
CONCLUSION	

CHAPITRE 2 :..... ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'ETUDE DE MECANISMES RESPONSABLES DE LA QUALITE DE L'EAU A L'ECHELLE REGIONAL

I. Présentation de la méthodologie adoptée.....	85
II. Application de la classification hiérarchique ascendante non supervisée	90
II. 1. Groupe des masses d'eaux souterraines	92
II. 2. Sous-groupes des masses d'eaux souterraines.....	93
II. 3. Synthèse sur la Classification Hiérarchique Ascendante.....	93
III. Faciès chimique des MESO de PACA	94
IV. Cartographie des différents groupes des masses d'eau	96
IV. 1. Brève description des différents groupes de MESO	97
IV. 1. 1. Groupe 1.....	97
IV. 1. 2 Groupe 2.....	98
IV. 1. 3. Groupe 3.....	98
IV. 1. 4. Groupe 4.....	99
IV. 1. 5. Groupe 5	99
IV. 1. 6. Groupe 6	100
IV. 1. 7. Groupe 7	100
IV. 1. 8. Groupe 8.....	108
V. Comparaison des caractéristiques moyennes des différents groupes.....	102
VI. Mesure de l'efficacité de la méthode appliquée au MESO	104
CONCLUSION	

PARTIE 3 : QUALITE DES MESO PAR GROUPES

CHAPITRE 1 : ETUDE DE LA QUALITE DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE DU GROUPE 1

I. Présentation générale des MESO du groupe 1	114
II. Données collectées des MESO du groupe 1	115
III. Hydrochimie	116
IV. Approche géochimique.....	117
IV.1. Diagramme de concentration des éléments majeurs.....	117
IV.2. Diagramme d'équilibre avec la calcite et avec le gypse	119
V. Faciès chimique des MESO du groupe 1	121
VI. Analyse en Composante Principale (ACP)	122
VI.1. Matrice des corrélations	122
VI.2. Distribution de la variance	123
VI.3. Signification des axes factoriels	124
VI.4. Cartes des Axes factoriels	126
VI.5. Diagramme de contribution des Plans Factoriels	130
VII. Distribution spatiale des sous-groupes.....	131
VII. 1. Détermination.....	133
VII. 2. Comparaison	140
CONCLUSION	

CHAPITRE 2 : ETUDE DE LA QUALITE DES MASSES D'EAUX SOUTERRAINES DU GROUPE 2

I. Présentation générale des MESO du groupe 2	143
II. Description des écoulements.....	144
III. Données collectées des MESO du groupe 2	144
IV. Hydrochimie.....	145
V. Faciès chimique des MESO du groupe 2.....	146
VI. Analyse en Composantes Principales (ACP)	147
VI. 1. Matrice des corrélations	147
VI. 2. Distribution de la variance	148
VI. 3. Résultats de l'ACP.....	149
VI. 3. 1. Signification des axes factoriels	149
VI. 3. 2. Cartes des Axes factoriels	151
VI. 3. 3. Plans factoriels	152
VII. Distribution spatiale des sous-groupes	154
CONCLUSION	

CHAPITRE 3 : DIFFERENCIATION DES CARACTERISTIQUES DES GROUPES DES
MASSES D'EAU SOUTERRAINE DE LA REGION PACA

I. Analyse discriminante appliquée sur les MESO régionales et les groupes des MESO.....	165
I. 1 . MESO régionales	165
I. 2 . Groupe des MESO	165
II. Apprentissage automatique (<i>Machine Learning</i>).....	174
II.1. Echelle des groupes de MESO.....	172
II.2. Echelle des MESO	172
II.3. Conclusion sur le Machine Learning	173
Conclusion	
SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE	175
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	182
ANNEXES.....	187

Liste des Figures

Figure 1: Carte de situation de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)	32
Figure 2 : Carte de relief de Provence Alpes Côte d'Azur (Source : MNT de USGS, Modifié).....	33
Figure. 3 : Principaux terrains géologiques de la région PACA	35
Figure 4 : Contexte géologique et structural de la région PACA (Source infoTerre, Modifié).....	38
Figure 5 : Carte des principaux cours d'eau de la région PACA (Source : MNT de USGS, Modifiée).....	39
Figure 6 : Bassin versant de la Durance et ses principaux affluents.	40
Figure 7 : Carte des principaux aquifères de la région PACA (Source : GREC PACA, 2010, modifiée)	45
Figure 8 : Températures annuelles moyennes en Provence-Alpes-Côte d'Azur (CRPF, 2014).....	48
Figure 9 : Distribution de la superficie du territoire de la région PACA	49
Figure 10 : Occupation du Sol en région PACA en 2018 (Source : Images SENTINEL-2 de USGS, Modifier)	50
Figure 11 : Évolution de la population de 2013 à 2030 des 4 systèmes territoriaux selon le scénario de projection centrale (source : INSEE, 2015)	51
Figure 12 : Carte de répartition des prélèvements des eaux souterraines sur l'ensemble de la région PACA.....	55
Figure 13 : Distribution spatiale des masses d'eau souterraines (MSEO) (Source BRGM 2018).....	56
Figure 14 : Diagramme d'équilibre des eaux avec la calcite du bloc 2 de la région PACA.....	66
Figure 15 : Fréquence des index de saturation des eaux avec le gypse du bloc 2 de la région PACA.....	66
Figure 16 : Diagramme d'équilibre des eaux avec le gypse du bloc 2 de la région PACA.....	66
Figure 17 : Pourcentage de la variance expliquée par les différents axes factoriels (histogrammes) et pourcentage cumulé (courbe) de la région PACA.....	67
Figure 18: Diagramme de contribution des Plans Factoriels (F1, F2 et F3) du Bloc2.	72
Figure 19: Diagramme de contribution des Plans Factoriels (F4, F5 et F6) du Bloc2.	73
Figure 20 : Position de l'ensemble des points du bloc 2 (5 294 points) dans les premiers plans factoriels de l'ACP.....	74
Figure 21 : Plans factoriel D1, D2 et D3 des eaux souterraines du bloc 2 après rotation Orthomax.	76
Figure 22 : Position des points dans les plans rotés.	77
Figure 24: Cartographie des paramètres microbiologiques et physicochimiques des eaux souterraines de la région PACA.	81
Figure 25 : Cartographie des Axes Factoriels de l'ACP des eaux souterraines de la région PACA.....	82
Figure 26 : Carte des Axes Factoriels D1 et D2 après rotation Orthomax des axes F1 et F2 des eaux souterraines de la région PACA.	83
Figure 26 : Diagramme des moyennes des masses d'eaux du plan factoriel F1/ F2 de la région PACA.....	87
Figure 27 : Diagramme des Ecarte-Type des masses d'eaux du plan factoriel F1/ F2 de la région PACA. ..	88

Figure 28 : Diagramme des Ecarte-Type des masses d'eaux du plan factoriel F1/ F2 de la région PACA (détaillé).....	89
Figure 29 : Arbre hiérarchique des masses d'eaux souterraines de PACA.	91
Figure 30 : Arbre hiérarchique des masses d'eaux souterraines de groupe1.	92
Figure 31 : Arbre hiérarchique des masses d'eaux souterraines des sous- groupes de groupe 1.....	93
Figure 32 : Diagramme de PIPER de l'ensemble de PACA représentant 5 294 Analyses.	95
Figure 33 : Cartographie des différents groupes des masses d'eaux souterraines de la région PACA issus de la CHA.....	96
Figure 34 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 2 et pour ses sous-groupes.	106
Figure 35 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 2 et pour ses sous-groupes.	107
Figure 36 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 3 et pour ses sous-groupes.	108
Figure 37 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 4 et pour ses sous-groupes.	109
Figure 38 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 5.	109
Figure 39 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 6 et pour ses sous-groupes.	110
Figure 40 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 7 et pour ses sous-groupes.	111
Figure 41 : Cartographie du Groupe 1 de Masses d'Eau Souterraines de la région de PACA.	114
Figure 42 : Position des points des prélèvements dans les MESO du groupe 1 de la région PACA.....	115
Figure 43 : Diagramme de concentration établi pour le groupe 1 (Le traceur choisi est la CE).	118
Figure 44 : Diagramme d'équilibre avec le gypse pour les eaux du groupe 1.	120
Figure 45 : Diagramme d'équilibre avec la calcite pour les eaux du groupe 1.	120
Figure 46 : Report des résultats des analyses chimiques sur le digramme de Piper.	121
Figure 47 : Distribution de la variance selon les axes factoriels de l'ACP pour le groupe 1.	123
Figure 48 : Cartes des Axes factoriels AF1/AF2 du groupe 1 de la région PACA.	126
Figure 49 : Cartes des Axes factoriels AF3/AF2 du groupe 1 de la région PACA.	128
Figure 50 : Carte et coupes de l'aquifère de la molasse miocène du Comtat (MOULIN, 2012)	129
Figure 51 : Contribution des variables aux principaux plans factoriels du groupe 1.....	130
Figure 52 : Distribution spatiale des différents sous-groupes de groupe 1.....	131
Figure 53 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1A.....	134

Figure 54 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1B.....	136
Figure 55 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1C.....	138
Figure 56 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1D.....	139
Figure 57 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1E.....	140
Figure 58 : Cartographie du groupe 2 de Masses d'Eau Souterraines de la région PACA.	143
Figure 59 : Position de points de prélèvement dans les Masses d'Eau Souterraines du groupe2.	145
Figure 60 : Report des résultats des analyses chimiques de groupe 2 sur le digramme de Piper.	147
Figure 61 : Distribution de l'inertie selon les axes factoriels de l'ACP de groupe 2.	149
Figure 62 : Cartes des Axes factoriels F1/F3 du groupe 2.....	152
Figure 63 : Coupe NE - SO à travers la plaine de la Crau (MOULIN, 2012).	153
Figure 64 : Premiers plans factoriels de l'ACP pour l'ensemble du groupe 2.....	154
Figure 65 : Distribution spatiale de sous-groupes de MESO dans le groupe 2.....	155
Figure 66 : Principaux plans factoriels de l'ACP sur le sous-groupe Gr2A.	157
Figure 67 : Relation entre AF2 représentant la charge bactérienne et la minéralité des eaux (AF1) pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2A.....	157
Figure 68 : Principaux plans factoriels de l'ACP sur le sous-groupe Gr2B.	159
Figure 69 : Relation entre la composante AF3 de la charge bactérienne et la minéralité des eaux (AF1) pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B.....	160
Figure 70 : Relation entre la composante AF2 de la charge bactérienne et la minéralité des eaux (AF1) pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B.....	161
Figure 71 : Relation entre les deux composantes microbiologie AF2 et AF3 pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B.....	162
Figure 72 : Distribution de la variance selon les différentes fonctions discriminantes.....	168
Figure 73 : Contribution des différents paramètres aux 5 premières fonctions discriminantes.....	169
Figure 74 : Premier plan factoriel de l'AD effectuée sur les 8 groupes de MESO.	169
Figure 75 : Premier plan factoriel de l'AD effectuée sur les 8 groupes de MESO.	171
Figure 76 : Centroïdes des premiers plans factoriels de l'AD effectuée sur les 8 groupes des MESO.	171
Figure 78 : Centroïdes de F3 et F4 de l'AD effectuée sur les 8 groupes des MESO.	172
Figure 77 : Troisième et quatrième plan factoriel de l'AD effectuée sur les 8 groupes de MESO.	172

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Superficie des entités hydrographiques de la région PACA	40
Tableau 2 : Matrice de corrélations effectuée sur l'ensemble du bloc 2.....	68
Tableau 3 : Valeurs propres, pourcentage de variance expliquée et pourcentage cumulé pour les différents axes factoriels de l'ACP du bloc2.	68
Tableau 4 : Corrélation entre les différents paramètres et les axes factoriels du bloc2.	70
Tableau 5 : Corrélation entre les variables et les plans factoriels après la rotation Orthomax.....	76
Tableau 6 : Liste des MESO par groupe issus de la CHA de la région PACA.	94
Tableau 7 : Liste des MESO constituant le groupe 1 de la région PACA.	97
Tableau 8 : Liste des MESO constituant le groupe 2.	98
Tableau 9 : Liste des MESO constituant le groupe 3.	99
Tableau 10 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 4.	99
Tableau 11 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 5.	100
Tableau 12 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 6 et les sous-groupes.....	100
Tableau 13 : Liste des Masses d'eau constituant le groupe 7 et les sous-groupes.....	101
Tableau 14 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 8.	102
Tableau 15 : Tableau comparatif des moyennes de chaque groupe et de la totalité du bloc 2...102	
Tableau 16 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 1 et ses sous-groupes.....	105
Tableau 17 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 2 et ses sous-groupes.....	106
Tableau 18 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 3 et ses sous-groupes.....	107
Tableau 19 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 4 et ses sous-groupes.....	108
Tableau 20 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 6 et 7 et les sous-groupes.	110
Tableau 21 : Caractéristiques chimiques du groupe 1 de la région PACA.	116
Tableau 22 : Comparaison de valeurs moyennes du bloc 2 (PACA) et du groupe 1	117
Tableau 23 : Matrice des corrélations de groupe 1 des eaux souterraines.	122
Tableau 24 : Distribution de la variance de groupe 1 de la région PACA.....	123
Tableau 25 : Corrélation entre les différents paramètres et les axes factoriels du groupe 1.	124
Tableau 26 : Corrélation entre les différents paramètres et le bloc2, le groupe1 et les sous-groupes de 1 ^{ère} groupe.	132
Tableau 27 : Statistiques univariées pour le sous-groupe 1A.	133
Tableau 28 : Statistiques univariées pour le sous-groupe 1B.	135

Tableau 29: Statistiques univariées pour le sous-groupe 1C.	137
Tableau 30 : Statistiques univariées pour le sous-groupe 1D.	139
Tableau 31 : Tableau de synthèse sur les axes factoriels des sous-groupes du groupe 1.	141
Tableau 32: Statistiques univariées pour le groupe 2	145
Tableau 33 : Comparaison entre les moyennes du groupe 2 et les moyennes régionales.....	146
Tableau 34: Corrélation entre les différents paramètres et les axes factoriels de groupe 2.	150
Tableau 35 : Signification des principaux axes factoriels du groupe2.	151
Tableau 36 : Comparaison entre sous-groupe pour les différents paramètres.....	155
Tableau 37 : statistiques univariées pour le sous-groupe Gr2A.....	156
Tableau 38 : statistiques univariées pour le sous-groupe Gr2B.....	159
Tableau 39 : Matrice de confusion de simple estimation des masses d’eaux souterraine de la région PACA.	166
Tableau 40 : Matrice des confusions pour les groupes de MESO.	167
Tableau 41 : Distribution de la variance selon les différentes fonctions discriminantes.	168

Liste des annexes

Annexe 1 : Description des masses d'eau souterraine de la région PACA.....	188
Annexe 2 : Répartition des 8 groupes de MESO dans la région PACA.....	196

Liste des abréviations

AD : Analyse Discriminante.

ACP : Analyse en Composantes Principales.

ADES : Portail National d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

ARS : Agence Régional de Santé.

BDRHF : Base de Données sus le Référentiel Hydrogéologique Français.

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

CE : Conductivité Electrique.

CHA : Classification Hiérarchique Ascendante.

GWQI : Indice de Qualité des Eaux Souterraines.

IFEN : Institut de Formation d'Educateurs de Normandie.

IQE : Indice de Qualité des Eaux.

E. Coli : Escherichia Coli.

Entéro : Entérocoques.

MNT : Modèle numériques de Terrain.

MESO : Masse d'Eau Souterraine.

PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur.

SIG : Système D'information Géographique.

SISE-EAU : Système d'Information Santé Environnement-EAU.

ZNS : Zone Non Saturée.

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

INTRODUCTION

Depuis le développement de l'informatique, la puissance de calcul a permis le recours à la modélisation thermodynamique dès la fin des années 70 pour simuler les interactions Eau-Roche. De nombreux travaux ont essaimés alors étudiant de grands ensemble géographiques.

En France, la dynamique de l'équipe dirigée par Yves TARDY, multipliait des études thermodynamiques croisées avec des bilans d'altération notamment tropicale, à partir d'analyses dans de grands fleuves, ou bien des études de systèmes évaporatoires (cas du lac Tchad) également à partir de bilans sur de grands fleuves et de grands ensembles géographiques. Des mécanismes de distribution spatiale des processus latéritiques sont alors décrits et expliqués par la thermodynamique. Dans le cas du lac Tchad GAC et TARDY (1980), ont montré l'importance des différences de fonctionnement selon de grandes unités du paysage.

Le lien entre la distribution des sols dans le paysage, les approches thermodynamiques et les approches bilan, a fortement fait progresser la pédologie dans les décennies qui ont suivi. Cependant, même si les pédologues excellent dans la compréhension des variations locales des formations superficielles, la compréhension des mécanismes de variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des eaux à l'échelle Hecto-kilométrique sur une grande région a peu ou pas été tentée. Par ailleurs, ces dernières années les études sur le transfert de micro-organismes dans les sols et dans les cours d'eau se sont multipliés dans de nombreux pays, et en particulier dans des pays tropicaux (Backman et al, 1998 et Saeedi et al, 2010).

Le but de ce travail est d'étudier les mécanismes de la variabilité spatiotemporelle de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines à l'échelle de la région Provence d'Alpes Côte d'Azur, en France, pour une meilleure élaboration d'une politique de surveillance et de protection de la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale.

Les eaux souterraines véhiculent l'information acquise lors de leur trajet depuis leur départ du sol, en effet ; leur composition est le reflet des interactions avec le couvert végétal, la surface du sol souvent marquée par l'activité agricole ou industrielle, les caractéristiques des sols et celles des formations géologiques qui les abritent. De ce fait la composition chimique et bactériologique des eaux constitue une source d'information qui peut aider à la caractérisation des différentes unités du paysage.

En France, le suivi sanitaire de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine est important. Les résultats sont alors archivés sous forme d'une base de données nommée SISE-EAUX qui peut aider à la caractérisation des entités paysagères d'autant plus que le géoréférencement des prélèvements permet un traitement spatialisé.

Cette base de données sur la qualité des eaux est informatisée depuis de nombreuses années et le nombre important ne cesse de croître. Si le nombre d'analyses d'eau est très important, il en va de même pour le nombre de paramètres qui s'élève à plusieurs centaines pour certains échantillons d'eau. De ce fait, l'utilisation de la cartographie de la qualité des eaux peut s'avérer compliquée et conduire à de nombreuses redondances entre paramètres.

La notion de qualité de l'eau est complexe, le développement des moyens analytiques a conduit à plus de précision, des limites de détection plus basses et surtout à la multiplication des paramètres mesurés. Il en résulte une information dans un hyper-espace possédant de nombreuses dimensions. La cartographie de chacun des paramètres conduit rapidement à une impasse méthodologique du fait de leur multiplicité. Dans ce contexte, traiter la qualité des eaux de manière synthétique pour accéder à la typologie et à la cartographie des milieux s'est avérée difficile. Et le recours aux méthodes mathématiques synthétisant l'information, semble être utile. En effet, avec un grand nombre d'échantillons analysés sur tout le territoire et le nombre croissant de paramètres suivis, la base de données devient rapidement complexe et la redondance de certaines informations est inévitable. Malgré cette contrainte, cette source d'information potentiellement très riche devrait permettre d'enrichir les connaissances sur la diversité des facteurs (lithologiques, hydrogéologique, pédologiques, ...) responsables de la qualité des eaux souterraines. Cette eau traversant les couches de surface, parfois même très superficielles, enregistre également des informations liées à l'usage des territoires.

Cette base de données devrait apporter des informations sur les processus d'interaction eau-roche dans leur diversité au sein de cette région qui intègre une grande diversité de milieux naturels tels que les Alpes du Sud, les plaines alluviales, les plaines littorales, les massifs karstiques, les zones cristallines littorales, ... A ce jour, le traitement des données par l'ARS a consisté en l'établissement de cartes des différents paramètres de qualité. Ce travail est habituellement conduit pour quelques paramètres du fait du risque de redondances pour des paramètres corrélés (Cadilhac, 2009).

Le but de ce travail consiste alors en une approche multi-paramètres combinant différentes méthodes mathématiques dans le but de préciser la diversité des processus responsables de la qualité des eaux. Cependant, le traitement de ce type de données est difficile pour plusieurs raisons :

- ▲ Plusieurs types d'analyses sont réalisées et correspondent chacune à un jeu de paramètres spécifiques. Il en résulte un jeu de données en matrice creuse.
- ▲ Les analyses sont effectuées avant ou bien après le traitement de désinfection de l'eau qui peut affecter la qualité de l'eau ; seules les analyses en eau brutes doivent être utilisées.
- ▲ A l'échelle de la région PACA, la multiplicité des milieux et des usages requiert un grand nombre d'informations, tant en termes de nombre d'analyses d'eau que de nombre de

paramètres, pour avoir une vision détaillée des différents milieux et de leur signature chimique. La multiplication des paramètres se heurte alors à « la malédiction des grandes dimensions » (Mallat, 2017). Dans cette base de données, le nombre de paramètres peut atteindre plus d'une centaine pour certains échantillons d'eau (Bellman, 2010).

Pour ces différentes raisons, il est nécessaire de définir une méthodologie adaptée au traitement de ce jeu de données à la fois important et complexe. L'approche consiste alors à croiser plusieurs techniques statistiques et une spatialisation par SIG en intégrant les masses d'eaux souterraines définies par le BRGM. La cartographie de chacun des paramètres conduit rapidement à une impasse méthodologique du fait de leur multiplicité. En conséquence, l'utilisation de la cartographie de la qualité de l'eau peut être compliquée, complexe et conduire inévitablement à de nombreuses redondances entre les paramètres. L'utilisation des méthodes mathématiques synthétisant l'information devient indispensable (Helena et al., 2000 ; Liu et al., 2003).

Le présent travail est basé sur des méthodes statistiques classiques dérivées de l'algèbre linéaire et vise à réduire la dimensionnalité de la base de données SISE-EAUX pour identifier, discriminer, cartographier les grands ensembles hydro-chimiques et les relier aux unités paysagères. Une méthode, qui concentre les informations pour alléger le traitement d'un grand ensemble de données et permettre une cartographie synthétique. Elle est appliquée à la région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA) dans le sud-est de la France, région à la lithologie complexe et variée, associée à un gradient altitudinal important et une pression démographique à fort caractère saisonnier.

Le présent travail est organisé, en plus de l'introduction générale, en trois parties avec huit chapitres :

Première partie comprend 3 chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à clarifier la problématique de la gestion durable des eaux et l'évolution des approches des études des mécanismes responsables de la qualité des eaux souterraines. Ainsi qu'un résumé sur l'évolution des études sur les transferts de micro-organismes dans le sol et dans les cours d'eaux et sur les approches géographiques et outils mathématiques modernes de traitement de données pour les Big-Data.

Le second chapitre exposera les caractéristiques générales de la zone d'études (région Provence Alpes Côte d'Azur) et les problèmes majeurs liés à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine dans la région PACA.

Le troisième chapitre sera focalisé sur la méthodologie adoptée pour le traitement des masses d'eaux souterraines à l'échelle régionale et les outils mathématiques et statistiques utilisés principalement l'analyse en composante principale pour une réduction dimensionnelle à l'échelle

régionale. Ainsi qu'une présentation de la base de données SISE-EAUX et l'ensemble des masses d'eaux souterraines de la région PACA.

Deuxième partie comprend deux chapitres :

Le premier chapitre de cette seconde partie traitera l'approche géochimique des eaux souterraines et les mécanismes responsables de la qualité de ces eaux sur l'ensemble de la région PACA en se basant sur la méthode de l'ACP pour aider à l'interprétation de l'information de la base de données SISE-EAU au niveau régional.

Le second chapitre sera consacré à l'élaboration d'une méthodologie adaptée pour l'étude des mécanismes responsables de la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale en se basant sur la Classification Hiérarchique Ascendante pour identifier les différents ensembles sous forme de groupe et sous-groupes à caractères homogènes.

Troisième partie comprend trois chapitres

Le premier et le deuxième chapitre ont pour objet l'étude de manière plus spécifique des caractéristiques et des mécanismes responsables de la qualité des eaux souterraines pour chaque groupe issu de la Classification Hiérarchique Ascendante. Le regroupement des données cohérentes au niveau géologique et hydrologique devrait faciliter l'étude des masses d'eaux souterraines.

Le troisième chapitre accomplira l'étude de la différenciation des caractéristiques des groupes de masse d'eaux souterraines, dans l'objectif de caractériser, la qualité d'un échantillon d'eau et permet de savoir à quelle MESO ou groupe de MESO appartient-il ? Cette étude va se faire par les traitements de l'Analyse Discriminante (AD) et de la Machine Learning.

A la fin une synthèse et conclusion générale récapitule les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche et qui se termine par des recommandations formulées susceptibles de rendre cette méthodologie qui croise les outils mathématiques, SIG et géologie comme des outils de surveillance et de gestion de la qualité des eaux souterraines partout au monde.

PARTIE 1 : GENERALITES & METHODOLOGIE

- **ETAT DE L'ART**
- **ZONE PACA**
- **APPROCHES ADOPTEES**

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

I. Problématique de la gestion durable de l'eau

'Au cours du siècle que nous vivons, l'eau est en phase de devenir la clé de l'avenir de la planète. L'alimentation en eau sera une menace pour la stabilité du monde entier', a déclaré Anna TIBAIJUKA (sous-secrétaire générale des Nations Unies, responsable du programme des Nations Unies pour les établissements humains, organisme coordonnateur des questions d'établissements humains, des déchets solides et eaux usées), lors de l'ouverture de la 17^{ème} Semaine Mondiale de l'Eau qui s'est déroulée du 12 au 18 août 2007 à Stockholm. En quelques années, la prise de conscience des problèmes de l'approvisionnement et de la qualité de l'eau s'est accélérée, et ces problématiques sont devenues cruciales et mondiales.

La pauvreté en eau d'un pays peut avoir plusieurs explications. Il peut arriver que l'eau soit en quantité insuffisante par rapport au besoin des habitants. Aujourd'hui, selon les estimations de l'UNICEF dans le monde, près de 900 millions de personnes n'ont pas accès à de l'eau potable et 2,5 milliards de personnes à des installations d'assainissement amélioré. Du fait de son importance stratégique (alimentation en eau potable, irrigation...) le partage de l'eau, en cas de pénurie, est à l'origine de certains conflits dans le monde (OFEV, 2019).

En France, la première loi sur l'eau, relative au régime, à la répartition des eaux et à la lutte contre la pollution (article L.211 du code de l'Environnement), a été instaurée en 1964, elle se base sur une gestion par bassin hydrographique. Depuis la seconde loi sur l'eau de 1992, l'eau fait partie du patrimoine de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et son utilisation sont d'intérêt général. Cela signifie qu'une ressource en eau de bonne qualité et en quantité suffisante est nécessaire au développement économique et au bien-être des populations. Cette loi reconnaît l'unité physique et l'interdépendance en quantité comme en qualité de toutes les eaux superficielles et souterraines : il s'agit toujours de la même eau, sans cesse entraînée par l'énergie du soleil et la gravité dans un cycle fermé qui constitue un continuum aquatique essentiel pour la survie de toutes les espèces vivantes.

L'Europe a mis en place le 22 décembre 2000, la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE), qui met le cycle de l'eau au centre de la politique de l'eau. Cette directive a pour objectif la restauration et la préservation de la qualité des ressources en eaux superficielles, souterraines et littorales.

Cette directive, transposée en France par la loi n° 2004-338 du 21 avril 2004, reconduit les principes de gestion par bassin hydrographique et fixe une obligation de résultats, à savoir le bon état des eaux superficielles et souterraines en 2015. Un récent rapport de l'IFEN (Janvier 2008) révèle qu'en France, 91 % des points de contrôles des eaux de surface et 55 % des eaux souterraines sont contaminées par au moins un pesticide. Par ailleurs, la France prépare une troisième loi sur l'eau et les milieux aquatiques pour prendre en compte notamment les exigences de cette directive, et les insuffisances des précédentes lois sur l'eau (1964 et 1992), afin de parvenir à une exploitation durable de la ressource en eau (Belle, 2008).

Les eaux souterraines ne se renouvellent que lentement, si bien que les analyses y décèlent aujourd'hui encore, du fait de leur faible biodégradabilité, des substances interdites depuis de nombreuses années, à l'instar de l'Atrazine, un herbicide prohibé depuis 2007. Il importe donc d'identifier très tôt les évolutions problématiques et de prendre des mesures préventives pour protéger les eaux souterraines des substances étrangères et nuisibles provenant de l'agriculture, de l'artisanat, de l'industrie ou encore des zones résidentielles. Il faut également observer avec attention l'impact des changements climatiques sur la quantité et la température des eaux souterraines afin de pouvoir réagir en temps opportun (OFEV, 2019).

L'évaluation de la qualité de l'eau à usage spécial est l'objectif principal de toute étude de surveillance de la qualité de l'eau. L'indice de qualité de l'eau (WQI) est un instrument mathématique utilisé pour transformer de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en un nombre unique qui représente le niveau de qualité de l'eau. En fait, le développement de l'Indice de Qualité des Eaux (IQE) dans une région est un processus fondamental dans la planification de l'utilisation des terres et de la gestion des ressources en eau. Une méthodologie simple basée sur une analyse multivariée est développée, dans la province de Qazvin au centre ouest de l'Iran, pour créer un indice de qualité des eaux souterraines (GWQI), dans le but d'identifier les endroits avec la meilleure qualité pour boire (Saeedi et al, 2010). Elle est basée sur la définition de GWQI en utilisant la valeur moyenne de huit paramètres cationiques et anioniques pour 163 puits au cours d'une période de 3 ans. La proportion des concentrations observées à la concentration maximale autorisée est calculée comme la valeur normalisée de chaque paramètre dans les puits d'observation. Les indices finaux pour chaque puits sont calculés en tenant compte du poids de chaque paramètre. Afin d'évaluer la qualité des eaux souterraines, les indices dérivés sont comparés à ceux des eaux minérales bien connues et en utilisant des indices développés, une carte des iso-indices des eaux souterraines et la carte des zones dont les indices sont proches des eaux minérales ont été dessinées. La carte GWQI a révélé que la qualité des eaux souterraines dans deux zones était extrêmement proche de la qualité de l'eau minérale. La carte d'index crée a fourni une image complète facilement interprétable pour

les décideurs régionaux pour une meilleure planification et gestion (Saeedi et al, 2010 et Fitts, 2013). Une seconde méthodologie appliquant l'indice de contamination, est présentée par Backman et al. 1998, pour évaluer et cartographier le degré de contamination des eaux souterraines.

II. Evolution des approches de l'étude des mécanismes responsables de la qualité des eaux

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) a souffert historiquement de la sécheresse, des glaciers des Alpes aux villes des franges côtières, l'eau circule, non pas dans un continuum naturel mais grâce à de nombreux aménagements, dont certains peuvent être datés de l'époque romaine. Les derniers grands aménagements hydrauliques de la Durance et du Verdon dans les années 1960-70 (barrages de Serre-Ponçon et de Sainte Croix ; canal usinier EDF et canal de Provence) ont sécurisé l'accès à la ressource pour une grande partie de la région. C'est donc grâce à un long et laborieux affranchissement des conditions naturelles du territoire par les sociétés locales que la région peut aujourd'hui se féliciter d'une disponibilité largement suffisante de la ressource en eau pour les différents usages régionaux. Ces aménagements ont fortement réduit les inégalités territoriales d'accès à la ressource en eau et ont permis, grâce aux stockages, de s'affranchir d'une partie des contraintes saisonnières. Certaines années, les tensions restent toutefois perceptibles durant la période estivale la plus consommatrice en eau. Pour certains territoires de la région hors des périmètres desservis par ces transferts, en particulier sur le littoral, les ressources souterraines jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable des usagers (Cadilhac, 2009).

Depuis la loi sur l'eau de 1992, un nouvel « usager » est apparu : le milieu. En effet, cette loi dans son préambule, précise : « la répartition de la ressource doit être équilibrée entre les usagers et le respect du fonctionnement des milieux aquatiques ». Cette déclaration concrétise le passage de la gestion de l'eau à la gestion des milieux.

En région PACA plus qu'ailleurs, la détermination des débits biologiques a fait l'objet de discussions longues et âpres, où souvent le besoin du milieu apparaît comme un frein au développement économique. Dans certains cas, les compromis trouvés sont difficilement acceptés par toutes les parties, et de ce fait sont souvent fragiles et susceptibles d'être remis en cause lors de sécheresses exceptionnelles. Les changements climatiques qui s'annoncent, seront potentiellement source de nouvelles tensions sur la répartition de la ressource.

Ainsi, la grande variété de cours d'eau, les complexités climatique, géologique et topographique de la région associée à l'anthropisation évolutive du système et aux incertitudes liées à l'évolution des précipitations dans le futur, rendent difficiles les exercices de prospectives concernant l'évolution de la ressource en région PACA. Dans le contexte de changement climatique, les efforts de la

recherche concernant l'instrumentation des cours d'eau. L'étude et la modélisation des hydro-systèmes, les études d'impact et les simulations climatiques sont plus que jamais nécessaires pour mieux prévoir et anticiper l'évolution future de la ressource en eau au cours des prochaines décennies.

Au début des années 1990, les Agences de l'Eau et le Département de l'Environnement français ont souhaité harmoniser, moderniser et enrichir les systèmes d'évaluation de la qualité des milieux aquatiques. Aujourd'hui, un outil national de référence est proposé pour les eaux souterraines. Il permet de définir l'aptitude d'une eau à satisfaire différentes utilisations ou fonctions, sélectionnées en fonction de leur importance, et en plus, d'exprimer l'amplitude des modifications physico-chimiques d'une eau dans son logement sous la pression des activités humaines ("Etat patrimonial"). La qualité de l'eau est déclinée par classes selon la représentation traditionnelle avec 5 couleurs : Bleu, Vert, Jaune, Orange et Rouge (Cadilhac, 2009 et Simler, 2014).

III. Evolution des études sur les transferts de micro-organismes dans les sols et dans les cours d'eau

La modélisation des processus microbiens, d'une part, leurs interactions avec la réactivité géochimique abiotique du milieu et leurs transferts, d'autre part, est plus ou moins une des problématiques spécifiques. Au vu de la multiplicité des processus impliqués et de leur complexité, le caractère opérationnel d'un modèle dépend notamment de la possibilité de le renseigner correctement et simplement ; ce qui suppose de privilégier des modèles de complexité minimales et une détermination de méthodes permettant d'éviter des confusions entre processus, et être adaptées aux besoins de précision requise.

La compréhension des couplages entre processus microbiens d'un côté, transformations géochimiques abiotiques et transferts de l'autre côté, peut bénéficier de la confrontation d'approches expérimentales et de modélisation, les écarts entre modèle et expériences permettraient souvent de mieux cerner les processus (et les enchaînements de processus) mal décrits. Il serait illusoire de prétendre proposer des modèles quantitatifs à vocation prédictive pour de multiples raisons notamment les incertitudes sur les paramètres des modèles, l'évolution dans le temps de ces mêmes paramètres, la dépendance au type de sols des processus entre autres. Il apparaît plus réaliste de penser à des modèles dont le caractère semi-quantitatif pour aider à étudier l'effet de différents facteurs, à proposer des typologies de situations « à risques » pour mieux évaluer les effets de l'intervention de l'Homme, voire intervenir sur les cycles biogéochimiques des éléments majeurs et des polluants (Lafolie et al., 2005).

De multiples problèmes environnementaux ayant trait au sol, à ses effets sur la zone non saturée profonde et à la nappe résultent d'activités microbiennes conditionnées par la distribution des caractéristiques physico-chimiques du milieu, résultant de transferts et de réactivité géochimique du milieu. La compréhension et la prévision des activités microbiennes dans les sols nécessitent ainsi très souvent de prendre en compte explicitement les couplages existants entre les processus microbiens, réactivité géochimique abiotique et les transferts.

Plus concrètement, cette nécessité tient pour partie (i) au caractère cinétique de la plupart des réactions microbiennes et de bon nombre de réactions géochimiques abiotiques, (ii) aux différents déterminants et aux effets biologiques sur ceux géochimiques et *vice versa*, et (iii) à la distribution dans l'espace et dans le temps des propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques du sol (Lafolie et al., 2005 et Gaffet, 2010).

IV. Evolution des approches en géographie physique : du descriptif au SIG

Le système d'information géographique (SIG) est un cas particulier des systèmes d'information (SI). Au sens large du terme, un système d'information est une collection de données et d'outils qui les manipulent. Selon la norme ISO 5127-1-1983, un SI est « un système de communication permettant de communiquer et de traiter l'information » (Denegre et Salge, 1996).

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques, en tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde.

La représentation physique des données qui peuvent être subjectives ou normées est un modèle des phénomènes perçus (Laurini et Thompson, 1992). Une collection de données est donc un dépôt matérialisé de notre connaissance à un moment donné pourvu d'outils de traitement des données. Suivant cette approche, il convient de distinguer entre les termes donnés et l'information.

La particularité des SIG tient à la nature des données traitées. Ces dernières sont géoréférencées, c'est-à-dire que leur position est connue dans un référentiel spatial et que le SI dispose d'outils spécifiques au caractère spatial des données. L'analyse spatiale fort utile en hydrogéologie, peut être utilisée dans la recherche des sources d'approvisionnement en eau potable à partir des eaux souterraines et aussi dans la cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine pour évaluer et de prévenir les risques de contamination. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection permettent d'augmenter la précision de la cartographie principalement en ce qui concerne l'occupation du sol.

Les paramètres couplés avec le modèle mathématique EvaRisk permettent une évaluation des quantités d'eau, d'azote et d'atrazine infiltrées dans le sol. Par la suite, les calculs de concentrations peuvent être faits et une cartographie peut être réalisée. Puis, une carte représentant les épaisseurs d'argile est superposée aux cartes de concentrations et à la carte d'infiltration des eaux permettant une cartographie plus précise des concentrations risquant de se retrouver dans les eaux souterraines. (Duchaine et Doris, 1998).

Depuis juillet 2013, une nouvelle version du SIGES Seine-Normandie est en ligne, intégrant de nombreuses améliorations concernant aussi bien l'apparence générale du site web que ses fonctionnalités (Comte et al., 1996). Plus clairs, mieux structurés, le graphisme et l'ergonomie du nouveau SIGES facilitent la navigation et renforcent la lisibilité. La consultation des informations est simple, intuitive et attractive. L'objectif étant de :

- Rendre disponible l'information sur les eaux souterraines du bassin ;
- Aider et dynamiser leur gestion ;
- Mettre en place un outil constitué de bases de données géoréférencées et de documents cartographiques associés ;
- Faciliter l'accès à ces données pour aider à la gestion des eaux souterraines, en favorisant les consultations et les traitements de ces informations ;
- Favoriser l'exploitation des données dans le cadre de bilans, diagnostics...

Les informations contenues dans cette rubrique concernent principalement les données de suivi de la qualité des nappes (données de la banque nationale ADES), des informations sur l'état qualitatif des masses d'eau souterraine au sens de la DCE, les critères de qualité et les problématiques de qualité des eaux souterraines (Comte et al., 1997).

V.Outils mathématiques et approches modernes en traitement de données dans le Big-Data

Pour déterminer comment analyser correctement toute collecte de données, la première considération doit être pour les caractéristiques des données elles-mêmes. On gagne peu en utilisant l'analyse des procédures qui supposent que les données possèdent des caractéristiques qu'elles ne possèdent pas. Le résultat de ces fausses hypothèses peut être que les interprétations fournies par l'analyse soient incorrectes ou inutilement non concluantes. Les caractéristiques communes des données, détermineront la sélection des procédures appropriées de leur analyse, l'une des tâches les plus fréquentes consiste à décrire et à résumer ces données qui transmettent leurs caractéristiques les importantes (Helsel et Hirsch, 2002).

Depuis les années 1960, la géographie physique a connu de multiples évolutions qui ont brouillé ses limites disciplinaires. De nombreux chercheurs se sont rapprochés de la géographie humaine au travers des études environnementales. De l'autre côté, en se rapprochant des sciences de la Terre, la géographie physique s'est divisée en de nombreuses spécialités sous-disciplinaires, correspondant notamment aux milieux étudiés. Aujourd'hui, les recherches les mieux financées sont soit proches des sciences de la Terre, soit environnementales, soit axées sur la géochimie, paléogéographie et la géoarchéologie (JEGOU et al., 2013).

Une introduction à la programmation dynamique a été présentée par le scientifique qui a inventé le terme et développé la théorie à ses débuts. *Richard Bellman*, présente sa théorie révolutionnaire et fournit un nouvel outil mathématique polyvalent pour le traitement de nombreux problèmes complexes (Bellman, 2010). C'est une nouvelle méthode d'analyse de l'optimisation de forme des modèles couplés, qui est formulée en termes de fonctions caractéristiques définissant le support du contrôle. La construction d'une solution ε -optimale d'un tel problème peut être obtenue en résolvant les conditions ε -optimales suffisantes (Lipnicka et Nowakowski, 2019).

L'analyse Big Data joue un rôle clé en réduisant la taille des données et la complexité des applications Big Data. La visualisation est une approche importante pour aider Big Data à obtenir une vue complète des données et découvrir leurs valeurs. De nombreuses méthodes de visualisation ont été analysées et classées en fonction de critères de données, on distingue :

- **Treemap** : Il est basé sur la visualisation de remplissage d'espace de données hiérarchiques. Qui est acquise par cette méthode et ne peut montrer que deux facteurs de données. Le premier est celui utilisé pour un calcul de volume de forme. Et le second est une couleur, il est utilisé pour grouper les formes. En outre, les facteurs utilisés pour l'estimation du volume doivent être présentés par les types de données calculables, de sorte que la variété de données soit ou ne soit pas satisfaite.
- **Emballage Cercle** : C'est une alternative directe à Treemap. Outre le fait qu'il soit une forme primitive, il utilise des cercles, qui peuvent également être inclus dans des cercles à partir d'un niveau hiérarchique plus élevé.
- **Rayon de soleil** : Il utilise la visualisation Treemap, convertie en système de coordonnées polaires. La principale différence est que les paramètres variables ne sont pas la largeur et la hauteur, mais une longueur de rayon et de l'arc.
- **Coordonnées parallèles** : Permet à tout une analyse visuelle d'être étendue à de multiples facteurs de données pour différents objets.
- **Treamgraph** : C'est un type de graphique à zones empilées qui se déplace autour d'un axe central résultant dans un courant et la forme organique.

- **Schéma de réseau circulaire** : C'est l'objet de données placées autour d'un cercle et reliés par des courbes en fonction du taux de leur relativité. La différence de largeur de la ligne ou de la saturation des couleurs est généralement utilisée pour mesurer la relativité d'objet (Gorodov et Gubarev, 2013).

L'importance de l'utilisation des données n'étant plus à prouver, les entreprises et les chercheurs se trouvent désormais face à un défi de taille : traiter plus de données, plus rapidement et à moindre coût. Les dernières études se basent essentiellement sur l'utilisation de techniques robustes et résistantes, qui permettent de traiter des nombreuses données. Comment sont gérés actuellement les projets d'accès aux données et comment faire pour améliorer cette gestion au quotidien ?

Actuellement, plusieurs pays ont mis en œuvre des bases de données sous forme de big-data. C'est l'exemple de la version du SIGES Seine-Normandie, et celle de NAQUA qui constitue une base de référence importante pour la protection des eaux souterraines à l'échelle de la Suisse (OFEV, 2019 et GTSQES, 2017).

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE : PROVENCE ALPES-COTE D'AZUR (FRANCE)

I. Présentation de la zone d'étude

I.1. Cadre et Situation géographique

La Provence-Alpes-Côte D'azur (PACA) est une région administrative créée dans les années 1960-1970 comme circonscription d'action régionale à la faveur du mouvement de décentralisation et de rééquilibrage du territoire français. Cette région fut dotée à partir de 1982, comme les autres régions françaises, de statut de collectivité territoriale. Elle incluait la Corse jusqu'en 1970, et s'appelait alors Provence-Côte d'Azur-Corse, et prend son nom définitif en 1976. La réforme territoriale, adoptée le 16 janvier 2015, a fait passer le nombre des régions métropolitaines de vingt-deux à treize par des regroupements, à compter du 1^{er} janvier 2016, n'affecte pas la région PACA (INSEE, 2015). PACA est située dans le Sud-Est de la France, est délimitée à l'Ouest par le Rhône, à l'Est par les Alpes Occidentales (frontalières avec l'Italie), au Nord par les Préalpes et les Alpes, et au Sud par la mer Méditerranée (Figure 1). Elle couvre six départements dont trois sur le littoral méditerranéen : le Var '83' (d'une superficie 5973 km²), les Alpes-Maritimes '06' (4299 km²) et les Bouches-du-Rhône '13' (5973 km²) ; quatrième département en remontant sur le sillon rhodanien, le Vaucluse '84' (3567 km²) ; deux autres alpins : les Alpes-de-Haute-Provence '04' (6 925 km²) et les Hautes-Alpes '05' (5549 km²). La région PACA d'une superficie de plus de 31400 km² représente 5,8 % de la superficie nationale. Elle porte le numéro 93, est composée de 18 Arrondissements, 236 Cantons et 963 Communes (INSEE, 2015).

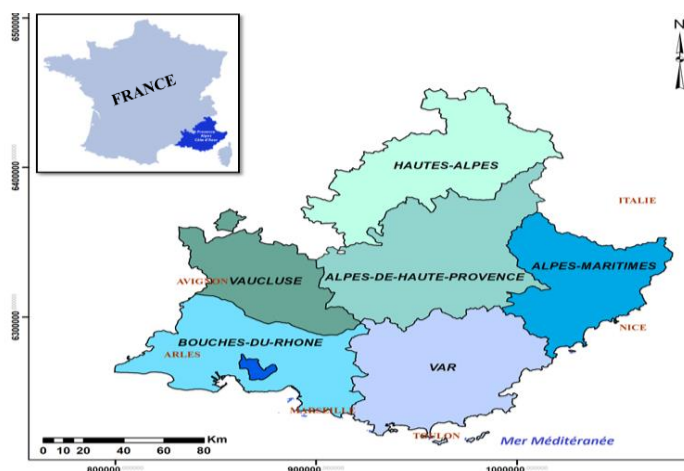


Figure 1: Carte de situation de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)

I.1.1 Géographie physique

-Relief de la région PACA

Le relief de la région PACA est très marqué, il passe rapidement des faibles altitudes du littoral à des altitudes plus élevées jusqu'aux Alpes (Figure 2). On distingue :

- ✎ **Le littoral**, composé de plaines alluviales au niveau de la Camargue. Le littoral rocheux forme régulièrement de hauts massifs calcaires plongeant dans la mer comme les Calanques, dus au plissement Pyrénéo-Provençal.
- ✎ Les anciens **massifs littoraux** et les plateaux calcaires, apparaissent dans le massif des Maures (780 m), l'Estérel (618 m), essentiellement fait de roches cristallines, et la montagne Sainte-Victoire (1 011 m) ou la Sainte-Baume (1 147 m), essentiellement composées de roches calcaires.
- ✎ **Les Préalpes**, créées par le plissement alpin, forment une zone de transition avant les hauts sommets de l'arc alpin. De nombreux sommets s'étendent de 500 à 1900 m d'altitude : le Mont Ventoux (1 909 m), la montagne de la Lure (1 826 m), le Luberon (1 125 m), etc.
- ✎ Les Alpes, présentant une dizaine de sommets de plus de 3000 mètres d'altitude, jusqu'au point culminant atteignant 4102 m : la Barre des Écrins (Réseau de transport et d'électricité, 2014).

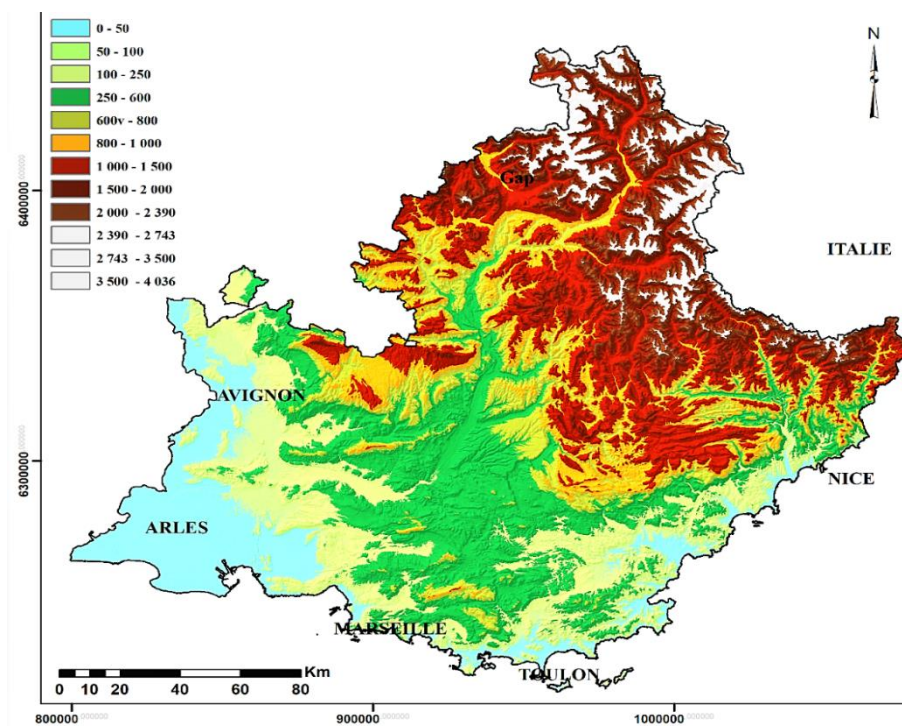


Figure 2 : Carte de relief de Provence Alpes Côte d'Azur (Source : MNT de USGS, Modifié).

-Contexte Géologique

Le contexte géologique de la région PACA a fait l'objet de nombreuses études depuis le XIX^e siècle. Bien qu'extrêmement troublée, son histoire géologique est désormais bien connue et la région regorge de richesses minérales, paléontologiques et paysagères. Son passé minier reflète la diversité de ses terres, notamment le charbon briançonnais, le lignite de Gardanne, la bauxite, le cuivre, le plomb, l'argent et la fluorite du Var et des Alpes. Son sous-sol a livré et livre encore de nombreux matériaux, à savoir l'argile (terre cuite, argiles vertes et argile réfractaire), le marbre, le gypse, les alluvions. Des mouvements tectoniques, parfois de grande amplitude, d'âge et de nature différents, ont façonné ses paysages (Vallée du Rhône, Alpes, Massifs provençaux, Massif des Calanques ...). La grande diversité des terrains peut être divisée en trois types principaux (Fig. 3) :

- **Terrains cristallins**, situés principalement dans les massifs côtiers des Maures et de l'Estérel et dans les Alpes (du nord au nord-est de la région, en particulier le massif du Mercantour), comprenant des granites, des gneiss, des micaschistes, des phyllades, des diorites.
- **Terrains sédimentaires**, Occupent la plus grande partie de la région d'étude. Ils sont formés par des formations marines et lacustres de nature très variées (argiles, marnes, schistes, calcaires marneux, calcaires, dolomites, grauweekes, conglomérats, grès, sables, mélasse, marnes pyriteuses, lignites et anciens et récents gisements alluviaux de limon, texture argileuse, sableuse ou graveleuse avec des galets).
- **Terrains volcaniques**, principalement représentés dans le massif côtier de l'Estérel, avec des basaltes, des rhyolites et des cendres volcaniques.

Une variété lithologique s'accompagne d'interactions eau-roche très différentes répartie dans l'espace comme suit : Dans la partie Nord-Est de PACA, elle est dominée par des faciès alternant gneiss, granite, schiste-grès, ophiolite. Les préAlpes sont essentiellement recouvertes d'un complexe de marnes calcaires-pyriteuses. La partie centrale de la région est constituée d'une alternance de marnes calcaires-gypse et de grès. Au Sud-Ouest, le faciès lithologique des marnes calcaires prévaut sur les trois départements, associés dans le Vaucluse au sable, aux grès et aux argiles. Ces différents terrains, qui apparaissent en masses ou en couches, présentent des variations rapides de la nature (verticalement et souvent latéralement). Ils ont été affectés par une très grande pression tectonique du sud, entraînant des pendages variables, des failles de poussée et des chevauchements d'échelles très variables, des zones de cisaillement et des fractures très développées, d'où une sensibilité fréquente aux tremblements de terre.

La région PACA comporte du point de vue géologique, une grande diversité de terrains (Fig.3), se répartissant en plusieurs domaines géologiques :

❖ Le domaine Alpin :

Ce domaine est présent dans les deux départements alpins. Au niveau des Alpes-de-Haute- Provence le domaine alpin est composé par plusieurs secteurs :

La partie Sud et Sud-Est du département est caractérisée par des plis synclinaux et anticlinaux de style jurassien. Le secteur de Saint-André-les-Alpes et de Colmars, correspond à des barres calcaires surmontées de calcaires marneux (Jurassique supérieur, Crétacé) ; les hauts plateaux de Couradour et Méailles Fugeret sont constitués de grès d'Annot. Le domaine des « collines des terres noires » est constitué de marnes du Jurassique soumises à l'érosion (col du Labouret) ; les montagnes d'Allos, Séolane, Bachelard correspondent à une zone de Flyschs de l'Autapie (calschistes, schistes noirs et calcaires gréseux) ; le Lauzanier, le Parpaillon situés sur des Flyschs à Helminthoides ; le domaine col de Vars, Ubaye Fouillouse, Larche constitué par une bande étroite de flyschs de base dont les marnes caractérisent le paysage ; le secteur nord-est de l'Ubaye (Chambeyron, la Motrice) où l'on retrouve des gypses, des dolomies ou des quartzites du Trias ; la zone septentrionale de l'Ubaye (col de Longet) qui correspond à des schistes lustrés intercalés de roches vertes (Ballan et Les Ateliers Azimuts, 2003).

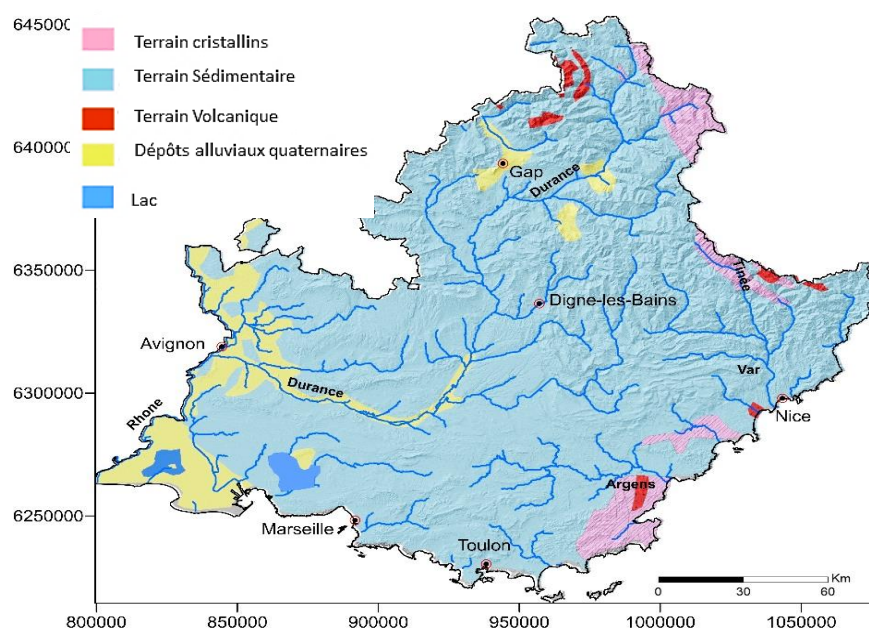


Figure. 3 : Les Principaux terrains géologiques de la région PACA

Pour le département des Hautes-Alpes, il est constitué par la zone dauphinoise qui couvre cependant les 2/3 Ouest du département. Elle représente la partie externe des Alpes et est constituée de terrains de socle granitique, gneissique et micaschisteux du Massif des Écrins-Pelvoux, et de terrains de

couverture sédimentaire constitués principalement de dolomies, calcaires, marnes, et schistes mésozoïques et de flyschs (alternances de grès et schistes) cénozoïques (Paléogène).

Les trois premières constituées généralement par des sédiments +/- carbonatées du Mésozoïque (incluant des dolomies triasiques développées, des calcaires et des calcschistes) et des sédiments détritiques de type flysch du Cénozoïque (Paléogène). Les unités de la zone liguro-piémontaise sont constituées de péridotites et serpentinites, gabbros, basaltes, radiolarites et calcaires d'âge jurassique moyen-supérieur à Crétacé inférieur, et d'épais flyschs qui forment la plus grosse partie des nappes de l'Embrunais-Ubaye.

L'ensemble des terrains décrits-ci-dessus ont subi une déformation alpine souvent intense (chevauchements et failles), avec un métamorphisme de haute-pressure dans les zones internes.

Les formations superficielles **quaternaires des Hautes-Alpes** constituées principalement de dépôts d'origine glaciaires (moraines...), alluvionnaires (alluvions torrentielles de cônes de déjection et alluvions fluviales de vallée ou de plaine), ou purement gravitaire (éboulis et terrains glissés, écroulés ou tassés). S'ajoutent des colluvions, des tufs, des dépôts lacustres et tourbeux, et des terrains d'origine mixte qui sont également distingués (alluvions fluvioglaciaires bien développés, cônes mixtes...) (Egal, 2008).

❖ Le domaine subalpin :

Ce domaine est principalement constitué d'une série très épaisse de calcaires dont un faciès particulier, les calcaires urgoniens, joue un grand rôle morphologique, tectonique et hydrogéologique. Essentiellement il recouvre les reliefs de l'est du Vaucluse :

- **Mont Ventoux-Montagne de Lure** : représentés par des calcaires d'âge Crétacé inférieur.

- **Plateau d'Albion - Saint Christol - Monts de Vaucluse** : essentiellement constitués de calcaires bédouliens (faciès urgonien et faciès de transition). Cette unité, bordée à l'ouest par la faille nord-sud de Fontaine-de-Vaucluse, est parcourue par des failles subméridiennes engendrant des fossés remplis de Crétacé moyen et surtout d'Oligocène. L'ensemble de cette zone est affecté d'importants phénomènes karstiques liés à la tectonique dont l'aboutissement se manifeste par l'existence de l'exutoire de Fontaine-de-Vaucluse.

- **Massif du Luberon** : ce massif crétacé sépare le bassin synclinal d'Apt, du synclinal dissymétrique de Cucuron (pays d'Aigues) et délimite les domaines subalpins et provençaux (Gonzalez, 1994 et Rivet, 2015).

❖ Le domaine provençal :

Il est constitué par les secteurs suivants : le plateau du Vaucluse dont les calcaires francs subissent des phénomènes karstiques typiques d'âge Crétacé inférieur ; la région de Forcalquier dont les terrains se caractérisent par des marnes et des calcarénites poreuses (Oligocène et début du Miocène)

; la Durance et ses alluvions ; le Plateau de Valensole qui formé de galets issus de la très forte érosion des Alpes (Mio-pliocène), (Ballan et Les Ateliers Azimuts, 2003).

❖ **Le couloir rhodanien :**

Il est largement occupé par les alluvions récentes ou anciennes du Rhône, de la Basse-Durance et de leurs affluents (Lez, Aigues, Ouvèze, Sorgues, Coulon) (Dominici et Paloc, 1968), qui reposent généralement sur des terrains miocènes ou oligocènes. Ceux-ci constituent des bassins (bassins de Carpentras, Valréas) principalement détritiques : argiles, marnes, sables, molasses avec deux faciès particuliers à la région (la pierre du Midi, molasse miocène et le safre, sable marneux miocène). A l'intérieur du couloir rhodanien, on peut distinguer des grandes unités structurales correspondant aux bassins néogènes de Valréas-Vaison, Carpentras et aux massifs d'Uchaux et de Suzette (Gonzalez, 1994).

La géologie de la région PACA qui a connu une histoire extrêmement tourmentée, foisonne de richesses minérales, paléontologiques et paysagères. Son passé minier témoigne de la diversité des terrains qui la composent : charbon (houiller du Briançonnais, lignite de Gardanne), bauxite, cuivre, plomb, argent, fluorine du Var et des Alpes. Son sous-sol a livré et livre encore une quantité de matériaux : argiles (terres cuites, argiles vertes, argiles réfractaires), marbres, gypse, alluvionnaires. Des mouvements de l'écorce terrestre (tectonique) parfois de grandes amplitudes, d'âges et de natures diverses ont façonné ses paysages (fossé rhodanien, Alpes, massifs provençaux, Calanques...). (BRGM, 1989) et (GEOFLA-IGN et BD ALTI, 2013).

Du point de vue hydrogéologique, on peut se trouver en présence de grands aquifères (réservoirs de calcaires fracturés ou nappes d'alluvions grossières), ou de nappes d'extension très variables, du fait des variations rapides de nature et donc de perméabilité des terrains.

I.3. Contexte hydrologique du PACA

A. Contexte général

La variabilité des écoulements résulte de nombreux facteurs. Des facteurs d'origine climatique bien sûr, tels que les précipitations, la température, l'évapotranspiration, etc.

Mais aussi d'autres facteurs physiques tels que le relief, la nature des sols, leur occupation, etc. Dans PACA, la variabilité de ces facteurs est grande. Un bassin versant peut se situer dans un secteur sous influences multiples (climat méditerranéen, montagnard ou continental, configuration de plaines ou de montagnes, présence de zones plus ou moins anthropisées, zones karstiques, etc.) qui se combinent avec la variabilité spatio-temporelle des écoulements dans les cours d'eau.

. La variabilité temporelle hérite pour une grande partie de celle présente dans le climat auquel le bassin versant est soumis, est résumée souvent par la notion de régime hydrologique. Cette notion permet de classer les cours d'eau en fonction de la saisonnalité des écoulements, et donc de la répartition des débits au cours de l'année, fonction de différents processus, qu'ils soient d'origine climatique (pluie, évaporation, neige...) ou par échanges nappes rivières...

De nombreux cours d'eau ont marqué le territoire de la région PACA (Figure 5), les plus emblématiques étant le Rhône et la Durance.

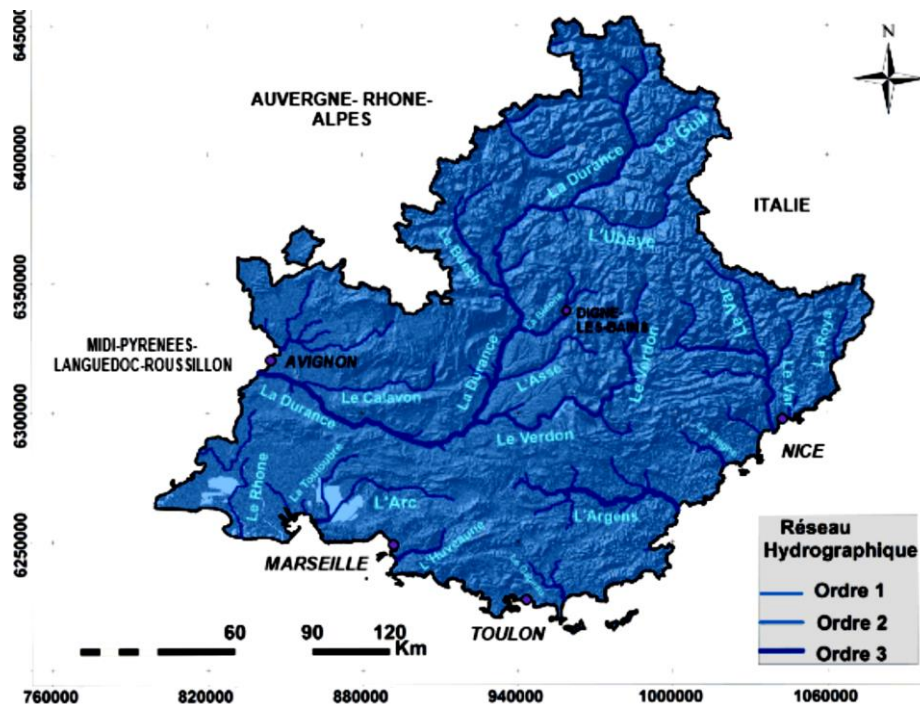


Figure 5 : Carte des principaux cours d'eau de la région PACA (Source : MNT de USGS, Modifiée)

B. Caractéristiques hydrologiques des principaux cours d'eau

La région PACA ne manque pas d'eau, c'est parce qu'elle a bien souffert historiquement de la sécheresse. Des glaciers des Alpes aux villes des franges côtières l'eau circule, non pas dans un continuum naturel mais grâce à de nombreux aménagements, dont certains peuvent être datés de l'époque romaine. Les derniers grands aménagements hydrauliques de la Durance et du Verdon dans les années 1960-70 (barrages de Serre-Ponçon et de Sainte Croix ; canal usinier EDF et canal de Provence), ont sécurisé l'accès à la ressource pour une grande partie de la région.

Le territoire de PACA peut être sectorisé en quatre grandes entités hydrographiques (Tableau 1) (DREAL PACA, 2019) :

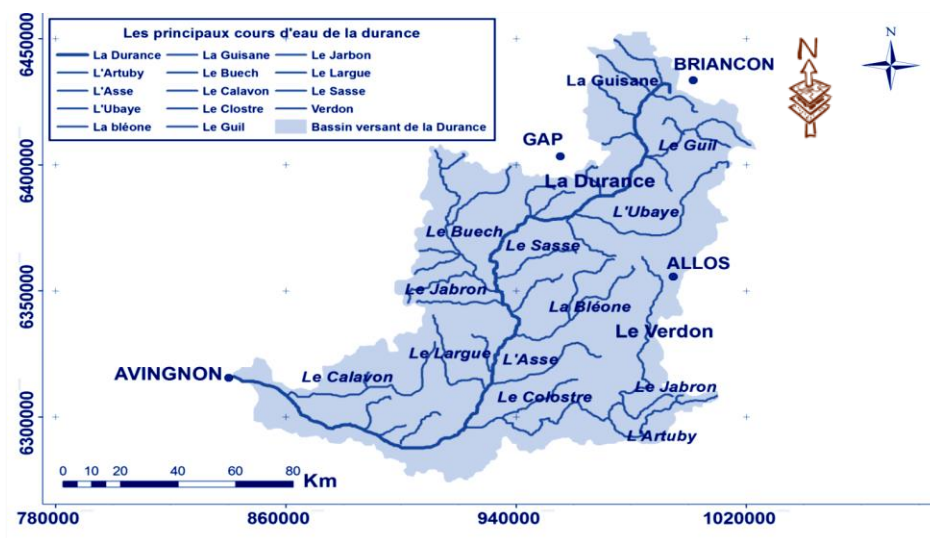
- Le Rhône et ses affluents directs Lez, Aygues et Ouvèze,
- Le bassin de la Durance,
- L'ensemble des cours d'eau côtiers, dont les deux plus importants sont le Var et l'Argens,
- Le quatrième bassin, de taille modeste, qui englobe les bassins du Drac et de la Romanche, affluents de l'Isère.

Tableau 1 : Superficie des entités hydrographiques de la région PACA

Nom	Superficie en km ²	% du territoire régional
Durance	14 300	45%
Fleuves côtiers	12 000	38%
Rhône et Lez, Aygues, Ouvèze	4 400	14%
Drac et Romanche	1 100	3%

1. Bassin de la Durance

La Durance prend naissance au col de Montgenèvre et se rejette dans le Rhône 305 km plus loin. Son bassin versant représente une superficie d'environ 14 280 km², soit la moitié de la superficie de la Région PACA et s'étend sur les six départements de la région (le 04, 05, 06, 13, 83 et le 84) et sur une petite partie du département de la Drôme (Figure 6) (HYDROFIS et BRL, 2014).

**Figure 6 : Bassin versant de la Durance et ses principaux affluents.**

▪ La Haute Durance

De la source (à 4100 m d'altitude) jusqu'à Serre-Ponçon, la Haute Durance se comporte comme un torrent alpestre, de même que ses affluents le Guil et l'Ubaye. Le climat, de type «alpin atténué», induit un régime hydrologique de type nival, qui se traduit notamment par un

étiage hivernal marqué par des écoulements maximums au printemps et faibles en hiver. L'eau de la fonte des neiges et les apports plus tardifs des petits glaciers et névés fournissent l'essentiel des débits de printemps et d'été (DREAL PACA, 2019).

▪ **La Moyenne Durance**

De Serre-Ponçon au Pont Mirabeau, la moyenne Durance traverse le territoire préalpin ; les vallées de la Durance et de ses affluents le Buech, la Bléone et l'Asse sont plus larges et moins pentues ; ces affluents nourrissent la Durance en matériaux détritiques (marnes noires très friables), ce qui accentue la problématique de gestion des apports sédimentaires dans tout le système durancien et dans l'Etang de Berre. Le climat y est de type « méditerranéen d'altitude », et le régime hydrologique pluvio-nival. La baisse des eaux apparaît en juillet et s'accroît en août et septembre ; les apports les plus importants sont au printemps et les pluies d'automne constituent un maximum secondaire (DREAL PACA, 2019).

Cette ressource subit cependant d'importantes pressions, notamment en aval de l'usine chimique Arkema à Saint-Auban (pollution historique aux COHV et aux PBT, 2014) et au niveau du captage de l'Hippodrome à Oraison (pollution aux nitrates et aux pesticides). L'évolution de l'occupation des sols représente également un risque pour le maintien des champs captant existants et pour la préservation de zones potentiellement intéressantes pour la satisfaction des besoins futurs en eau (RMAJ, 2014).

La nappe alluviale de la moyenne Durance est classée comme ressource patrimoniale et stratégique pour l'AEP et elle est identifiée à enjeu aussi pour l'eau potable dans le SDAGE. Cette nappe constitue une ressource particulièrement importante pour l'alimentation en eau potable de ce territoire puisqu'elle est sollicitée par une série de puits et champs captant le long du linéaire de la Durance.

▪ **La Basse Durance**

La Basse Durance est une terre de contrastes, un havre de verdure entre les collines sèches et boisées. La rivière, vagabonde et sinueuse, parcourt le lit majeur, vaste et caillouteux.

A l'aval du Pont Mirabeau, la basse Durance s'inscrit dans une large plaine alluviale, traversée par des plissements calcaires. Le Verdon, qui rejoint la Durance à Cadarache, est son principal affluent. Le climat est de type méditerranéen, avec des étés et des hivers secs, et des pluies d'automne et de printemps. L'étiage est observé en août et septembre et, de façon moins marquée, en hiver (DREAL PACA, 2019).

C. Fleuves côtiers

Le territoire côtiers-Est est un territoire au relief contrasté situé entre les hauts-reliefs du Mercantour et la Méditerranée. Il est composé de fleuves côtiers à régime méditerranéen comme le Var, l'Argens, le Loup ou la Siagne.

Le littoral est constitué d'une alternance d'avancées rocheuses et de golfes ; largement urbanisé, il est soumis à une très forte pression foncière compte tenu de l'importance de l'activité touristique. L'activité industrielle est centrée notamment sur la production hydroélectrique et la parfumerie. L'activité agricole est également bien présente, principalement l'horticulture, la viticulture et le maraîchage.

Par rapport aux autres cours d'eau régionaux, les fleuves côtiers se caractérisent par un écart plus important entre les apports du mois de pointe et ceux du mois d'étiage (juillet ou août). Les cours d'eau côtiers les plus intéressants du point de vue de la ressource en eau se situent plutôt sur la partie Est du littoral : Var, Siagne, Argens, Roya (DREAL PACA, 2019).

- ☞ **Le Var** est le plus important fleuve côtier de la région, avec un bassin d'environ 2900 km² presque entièrement montagneux ; le régime du haut bassin et des principaux affluents est de type pluvio-nival, présentant une pointe en mai et deux étiages équivalents en mars et novembre.
- ☞ **La Siagne** draine un bassin versant d'environ 600 km², tandis que celui du Loup est de 280 km². Les deux bassins sont constitués aux 2/3 de leur surface par les massifs karstiques de Calern et de l'Audoubert. Les régimes de la Siagne et du Loup sont fortement influencés par l'ensemble des prises d'eau et des dérivations pour l'alimentation du réservoir de St Cassien (30 Mm³) et des canaux de la Siagne et du Foulon destinés à divers usages (DREAL PACA). Les débits spécifiques moyens sont élevés dans la partie karstique du bassin de la Siagne de l'ordre de 40 l/s/km².
- ☞ **L'Argens** est le fleuve principal du département du Var. Son bassin versant est entièrement situé dans le département du Var dont il en couvre la moitié du territoire. Le bassin versant possède une forme sensiblement rectangulaire d'une longueur d'environ 70 km dans le sens Est-Ouest et d'une largeur de l'ordre de 40 km dans le sens Nord-Sud. Sa superficie totale est de 2721 km².

La longueur du fleuve est de l'ordre de 115 km. L'Argens possède un grand nombre d'affluents répartis de façon assez régulière tout au long de son linéaire. (DDTM du Var, Mars 2014).

Ce fleuve est fortement marqué par la nature karstique des formations qu'il traverse. Les valeurs de débits spécifiques sont hétérogènes sur le bassin, du fait de l'influence des circulations souterraines : le module varie entre 4 et 12 l/s/km². Certains affluents de l'Argens ont des étiages très sévères voire un assèchement en période estivale. En revanche, dans les secteurs calcaires, les débits d'étiage sont bien soutenus et le cours principal de l'Argens bénéficie d'une bonne hydraulité en période estivale, pour un fleuve méditerranéen. La retenue de Carcès, d'une capacité de 8 Mm³, est située au confluent de deux affluents : Issole et Caramy. Elle sert à l'alimentation en eau potable de l'agglomération toulonnaise (DREAL PACA et Agence de l'eau RMC).

✎ **Les Paillons** constituent un bassin de près de 300 km² qui débouche dans l'agglomération de Nice. Les écoulements sont permanents à l'étiage sur la partie amont, mais s'affaiblissent sur la partie aval ; des assecs sont observés dans les élargissements du lit en particulier en septembre.

✎ **Le Loup** draine un bassin versant d'environ 208 km². Ce bassin, comme celui de la Siagne est constitué aux 2/3 de sa surface par les massifs karstiques de Calern et de l'Audoubert. Les débits spécifiques moyens sont plus faibles sur la partie aval de l'ordre de 15 l/s/km². Les débits spécifiques d'étiage sont compris entre 2 et 5 l/s/km². Le régime du Loup est fortement influencé par l'ensemble des prises d'eau et des dérivations pour l'alimentation du réservoir de St Cassien (30 Mm³) et des canaux de la Siagne et du Foulon destinés à divers usages.

✎ **La Roya** prend sa source en France à 1800 m d'altitude puis passe en Italie, il reçoit son principal affluent la Bevera et débouche en mer près de Vintimille. Son bassin de 580 km² du côté de la France est montagneux et son régime est pluvio-nival. L'hydraulité est bonne, avec un module de l'ordre de 15 m³/s au niveau de la frontière avec l'Italie et les étiages sont situés en période hivernale (DREAL PACA, 2019).

D. Rhône et ses affluents directs : Lez, Aygues, Ouvèze

Le Rhône puis le petit Rhône dessinent la limite ouest du territoire régional. Les débits du Rhône sont sans commune mesure avec ceux des autres cours d'eau de la région. Le débit moyen interannuel est de 1700 m³/s, alors qu'il est inférieur à 25 m³/s pour la grande majorité des cours d'eau régionaux (CEREG, 2013, 2014). Par rapport aux autres cours d'eau de la région, les variations saisonnières et interannuelles sont faibles : les débits moyens mensuels fluctuent entre 1000 et 2070 m³/s, du fait de la très grande étendue du bassin (121 000 km²) et aussi de la diversité des régimes hydrologiques de ses nombreux affluents. L'étiage estival

moyen est peu prononcé mais le débit d'étiage en année sèche demeure conséquent (CEREG, 2013, 2014).

Ses affluents **Le Lez**, **l'Aygues** et **l'Ouvèze** sont à cheval sur les départements de la Drôme et du Vaucluse. Leurs débits sont typiques d'un régime méditerranéen, avec des étiages sévères et des crues violentes. Les valeurs de débits spécifiques d'étiage sont très faibles, de l'ordre de l/s/km², et les écoulements tarissent périodiquement dans les moyennes ou basses vallées, du fait de pertes naturelles (DREAL PACA et Agence de l'eau RMC, 2019).

E. Bassins Drac et Romanche

Les hauts bassins du Drac (affluent de l'Isère) et de son principal affluent la Romanche se situent sur le territoire des Hautes-Alpes. Ces deux cours d'eau se caractérisent par un régime nival, plus marqué sur la Romanche. L'étude hydrologique réalisée en 1998 fournit des estimations des débits caractéristiques ; les modules spécifiques sont élevés, de l'ordre de 30 l/s/km² pour le Drac, et 35 l/s/km² pour la Romanche. Sur le Drac, les apports les plus faibles ont lieu de décembre à février et les périodes de hautes eaux se situent en mai et juin (DREAL PACA, 2019).

I.3.1. Contexte hydrogéologique

Les roches dans lesquels circulent les eaux souterraines sont dites '**Aquifères**', et relèvent, en première approximation, soit des milieux 'continus', 'discontinus'. Dans les premiers, où se rangent les aquifères sédimentaires des plaines de Provence, notamment les aquifères alluviaux, l'eau circule en nappes, à travers des pores de dimensions variables, à raison de quelques centimètres par jours (cm/j). Les débits peuvent y être importants, mais, même s'il existe des hétérogénéités, il est souvent possible de 'régionaliser' la productivité des nappes. Le renouvellement de la ressource s'effectue soit par infiltration directe de précipitations, soit par alimentation provenant d'autres aquifères (sous-jacents et/ou latéraux).

Dans les seconds, où sont classées les roches massives (dites « de socle » et les roches calcaires (karsts), l'eau circule pour l'essentiel à travers des fissures, des fractures, voire des conduits, parfois structurés et hiérarchisés, entre lesquels la roche n'est pas (ou peu) aquifères (Moulin, 2012).

La région PACA possède une grande diversité de terrains, qui ont imprimés aux paysages la grandeur et la beauté qu'on leur connaît. Le corollaire à cet état de fait est une complexité géologique du sous-sol, et singulièrement une grande compartimentation des terrains aquifères. Selon la notice des Atlas, les grands réservoirs naturels que constituent les bassins sédimentaires français à l'image des bassins parisiens ou aquitains sont donc absents de la région. Il sera difficile de trouver des secteurs dans lesquels les structures géologiques visibles

depuis la surface, pourront être suivies sur de grandes profondeurs (Moulin, 2013), (Nicod, 1980).

Les aquifères restent néanmoins une source importante pour l’approvisionnement en eau potable et constituent localement une source importante dans les territoires non irrigués par des écoulements de surface et pourraient constituer un levier d’adaptation essentiel aux changements climatiques. Les différents aquifères de la région PACA sont caractérisés par (Figure 7) :

En région PACA, les prélèvements d’eau souterraine sont trois fois moins importants (14 % des besoins) que la moyenne française (DREAL PACA, 2019). Ceci est le résultat d’une situation particulière marquée par les transferts amont - aval du système Durance - Verdon. Les aquifères restent néanmoins une source importante pour l’approvisionnement en eau potable dans les territoires non irrigués par des écoulements de surface. Ils pourraient constituer un levier d’adaptation essentiel aux changements climatiques.

Les aquifères en PACA sont relativement morcelés avec des dimensions variables (Figure 7) et en moyenne inférieures à la moyenne nationale. Leurs conditions structurelles engendrent une diversité de comportements aux regards des aléas climatiques et des pressions anthropiques.

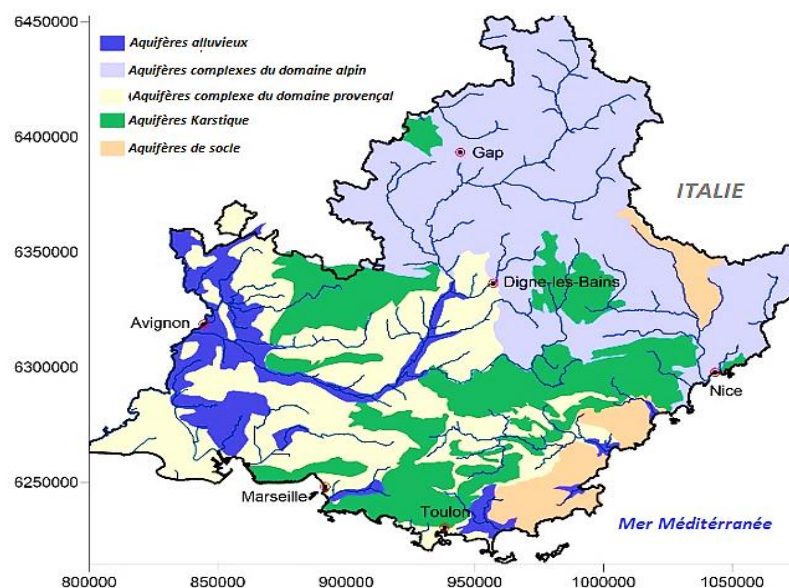


Figure 7 : Carte des principaux aquifères de la région PACA (Source : GREC PACA, 2010, modifiée)

Dans la région, on distingue quatre types d’aquifères :

- 🔍 **Un morcellement important :** 107 domaines ou systèmes non captifs identifiés par la BDRHF, d’une superficie moyenne de 300 km² ce qui est faible si l’on considère l’étendue de certains domaines de la région, qui dépassent les 1500 km² ;

- 🦋 **Des fluctuations saisonnières** : l'étiage estival est sensible sur l'ensemble du territoire, sauf sur les secteurs bénéficiant de surplus d'irrigation. L'étiage hivernal, en montagne, conduit parfois à recourir aux prélèvements directs en rivière ;
- 🦋 **Une répartition inégale** : la quasi-totalité des systèmes aquifères se trouve dans la zone méridionale tandis que les zones alpines, qui alimentent les cours d'eau les plus importants, apparaissent démunies (DREAL PACA, 2019).

★ Les aquifères alluviaux

Les principales nappes alluviales de la région PACA, assurent 60% des prélèvements et représentent moins de 10 % de la superficie régionale. On note les nappes alluviales des :

- **Grands cours d'eau structurants** notamment du Rhône, de la Durance et de leurs principaux affluents (Drac, Bléone, Asse, Calavon, Sorgues, Aigues, Touloubre...)
- **Cours d'eau côtiers** principalement le Var et ses affluents, le Môle – le Giscle, l'Argens, le Gapeau, l'Huveaune, l'Arc de Berre...

Quant aux formations fluviatiles, elles sont généralement constituées par : (i) un niveau grossier, à la base, correspondant à des graviers et à des galets entremêlés de sable plus ou moins argileux et (ii) un horizon superficiel à granulométrie plus fine, venant recouvrir le précédent ; il est caractérisé par des argiles et/ou des limons. Toutefois, le degré d'altération de ces dépôts fluviatiles conditionne la perméabilité de ces réservoirs. Les plus anciennes terrasses contenant des nappes sont souvent peu développées et d'extension réduite (Figure 7).

Les relations nappes-rivières peuvent dans certains cas se produire dans un même sens, le drainage de la nappe par le cours d'eau : c'est le cas de la figure où la rivière repose directement sur un substratum imperméable. Toutefois, lorsque les conditions géologiques sont favorables avec un cours d'eau n'ayant pas entaillé le substratum imperméable, la rivière peut drainer et être drainée directement par la nappe en fonction des saisons (Moulin, 2012) et (Corroy, 1957). Il convient cependant de noter que la composition des alluvions varie fortement sur des distances très courtes. Cela peut s'expliquer par la présence de paléo chenaux des cours d'eau. Ainsi ses descriptions doivent être considérées avec prudence.

Ces nappes soutiennent le débit des cours d'eau et permettent un soutien d'étiage en période estivale. Selon les endroits et en fonction du degré d'encaissement des cours d'eau dans la molasse, les rivières peuvent temporairement recharger la nappe en période de crue. L'alimentation de la nappe est assujettie aux apports pluviométriques et dans une moindre mesure au déversement des nappes des terrasses sus-jacentes. De ce fait, le potentiel de recharge

du système est particulièrement sensible aux variations climatiques annuelles. Et les oscillations de cette nappe sont importantes et les basses eaux très marquées en fin d'été et en automne.

Les nappes situées en bordure du littoral doivent en outre faire face à l'intrusion d'eau marine, phénomène complexe, naturel mais bien souvent amplifié par une gestion des ressources en eau qui doit répondre à une demande très variable au cours de l'année (Moulin, 2012).

★ Les aquifères karstiques

Les aquifères karstiques constituent une ressource en eau pour une grande partie du territoire de PACA, sont irrégulièrement répartis en fonction du contexte géologique et assurent également 25% des prélèvements en eau. La karstification s'est développée pour l'essentiel dans les calcaires triasiques et jurassiques, ainsi que dans les calcaires gréseux.

Plusieurs unités aquifères ont été individualisées, l'importance des mouvements tectoniques et des rejets de faille permet d'expliquer des relations hydrologiques entre elle, sauf entre le Jurassique basal et le Muschelkalk supérieur où le Keuper argileux très épais forme généralement un écran imperméable rarement franchi par les eaux (Gilli et al., 2006 et Blavoux, 2006).

Le débit des sources est cependant fluctuant et en étroite interaction avec la pluviosité. Cependant ses aquifères représentent un fort potentiel globalement sous-exploité. Les principaux aquifères sont les Monts de Vaucluse (peu sollicités), ainsi que le Jurassique de la Sainte-Victoire, du Cheiron, de la Sainte-Baume et du Beausset qui sont exploités de façon inégale. La faible exploitation s'expliquerait en particulier par l'éloignement des centres de consommation et l'irrégularité du débit aux exutoires, seuls points de captages facilement accessibles.

★ Les aquifères cristallins

Les aquifères fissurés au sein des massifs cristallins sont peu représentés au sein de la région, (6% de la surface), et il représente moins de 0,3 % des prélèvements en eaux, car ces terrains étaient autrefois considérés comme imperméables, mais ils peuvent jouer localement un rôle important.

Les aquifères formés de roches métamorphiques constitués en grande partie par des schistes, des quartzites et des gneiss correspondent à la catégorie « zone cristalline », se situent essentiellement dans le sud du Var, dans le massif des Maures (GREC PACA, 2017).

★ Les aquifères sédimentaires molassiques

Les aquifères composés des formations sédimentaires du Trias sont composés en grande partie du gypse ; ils correspondent à la catégorie « zones gypseuses » présentes dans le 83 et le

06 ainsi que ponctuellement dans les autres départements à l'exception du 13 (GREC-PACA 1, 2017). Ces formations sédimentaires détritiques sont de forte épaisseur et de grande porosité permettent de stocker de grands volumes d'eau. Les principales d'entre elles font partie des ressources stratégiques de la région.

I.4. Climat et occupation du sol de la région d'étude

- Climat

La géographie et le relief de la région PACA lui valent la présence de deux types de climat un climat méditerranéen pour les plaines, le littoral, et à l'intérieur des terres qui occupe une bande d'une centaine de kilomètres autour de la mer éponyme, depuis les Pyrénées jusqu'au Var. Il est caractérisé par un nombre d'heures d'ensoleillement très important, des températures chaudes et peu tempérées, (parfois bien plus élevées en plaine), des hivers doux, des sécheresses estivales et des pluies souvent torrentielles à l'automne. Un climat Montagnard : Au-delà des 900 m d'altitude, les températures sont bien plus fraîches avec des écarts de température importants. Les précipitations y sont plus abondantes, et les chutes de neige variables d'une année sur l'autre (CRPF, 2014 et GREC PACA, 2010).

L'été est chaud, les moyennes de juillet dépassent 23 °C sur la côte et atteignent 18 à 20 °C dans la majeure partie des PréAlpes ; les bassins de la Provence intérieure et la vallée de la Durance subissent des journées torrides avec plus de 35 °C (Figure 8).

Le climat est ensoleillé dans la majeure partie de l'année avec une durée d'ensoleillement qui s'élève à 2 700 heures par an, y compris dans les Alpes, et même elle peut atteindre 3 000 heures dans les zones privilégiées du littoral, sur la Côte d'Azur (CRPF, 2014).

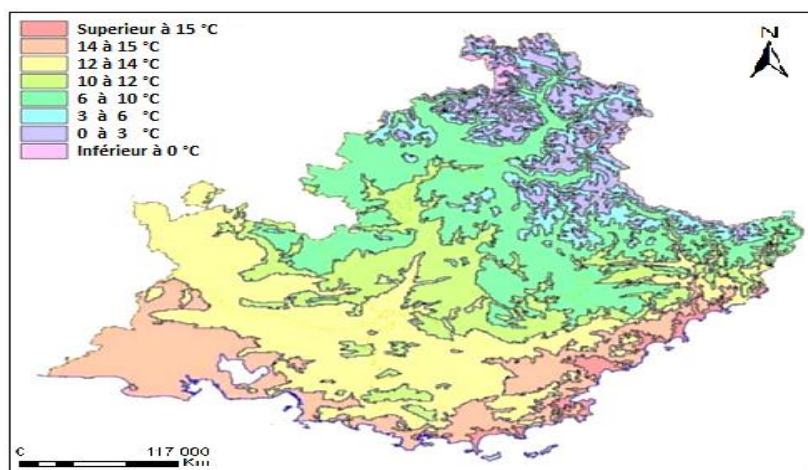


Figure 8 : Températures annuelles moyennes en Provence-Alpes-Côte d'Azur (CRPF, 2014).

Les hivers peuvent être rudes et neigeux en montagne, ils ne sont réellement doux que sur le littoral. Les moyennes de température de janvier varient entre 0 °C en haute Durance, 4 °C dans les plaines du Vaucluse et 6 à 7 °C sur la côte, le gel n'est pas exclu avec en moyenne 20 jours par an à Marseille. La vallée du Rhône et une partie de la côte sont fréquemment balayées par le mistral, vent froid et violent qui vient du nord (CRPF, 2014).

Les précipitations annuelles, faibles sur le delta du Rhône (moins de 600 mm), s'élèvent à 800mm sur le littoral montagneux et à 1 000 mm dans les Alpes (CRPF, 2014). La sécheresse estivale est nettement marquée (en juin, juillet et août); ils reçoivent, suivant les stations, entre 9 et 15 % du total annuel des précipitations. Le littoral connaît moins de 50 jours de pluie, le reste de la Région moins de 100 selon les résultats du Centre National de la Propriété Forestière.

-Occupation du sol

Le Centre Régional de l'Information Géographique (CRIGE-PACA) coordonne et développe depuis plus de 10 ans l'acquisition et l'usage de données et référentiels géographiques à l'attention des acteurs du territoire publics et privés. Cet instrument d'analyse des territoires comporte les occupations du sol (CRIGE, 2016). Ainsi, PACA est parmi les régions les plus urbanisées et les plus naturelles de France (Figure. 9) elle est composée à plus de 50% d'espaces naturels, contre 34% en France, du fait de la présence de grands massifs forestiers. Les espaces artificialisés représentent 7% du territoire, en raison de sa forte population (5 millions d'habitants). Quant aux terres agricoles, elles occupent une place moindre en PACA de l'ordre de 21%, alors que sur l'ensemble du territoire français elles sont de l'ordre de 60%.

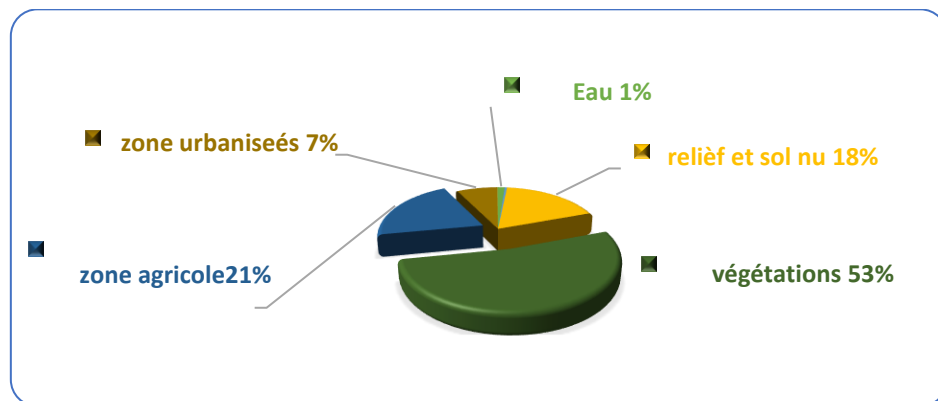


Figure 9 : Distribution de la superficie du territoire de la région PACA

La région PACA offre une agriculture riche grâce à un territoire s'étendant du littoral à la haute montagne. La viticulture est dominante, surtout dans le Var et dans le Vaucluse, alors que l'élevage est prépondérant dans les départements de montagne (Figure 9 et 10). Les productions végétales représentent les 2/3 du revenu agricole régional. L'agriculture de la région PACA

présente 78 % des exploitations qui ont une orientation exclusivement végétale, contre 42 % sur le plan national ; 17 % avec une orientation exclusivement animale (35 % sur le plan national) et 5 % un profil mixte culture-élevage alors que sur le plan national il est de 23 % (AGRESTE, 2016 et DREAL PACA, 2019).

En région PACA, selon l'agence régionale pour l'environnement (ARPE) l'artificialisation des sols est de 7 % alors qu'elle est de 8,9 % en moyenne nationale. Cet écart s'explique par le relief marqué de la région qui limite l'urbanisation dans certains secteurs. Mais, en parallèle, les grands pôles urbains sont particulièrement urbanisés et denses. L'artificialisation des sols se concentre essentiellement sur le littoral, à elles seules, les cinq plus importantes villes (Marseille - Aix-en-Provence, Nice, Toulon et Avignon) accueillent 78% de la population (INSEE, 2015). La figure 10 illustre clairement les conflits entre l'extension des espaces urbains et le maintien des espaces agricoles au sein desquels ils se sont implantés.

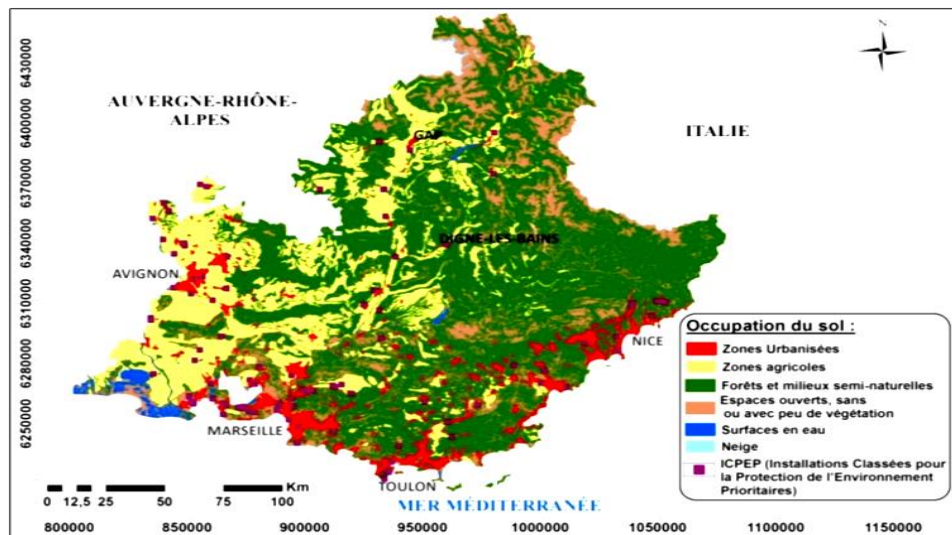


Figure 10 : Occupation du Sol en région PACA en 2018 (Source : Images SENTINEL-2 de USGS, Modifier)

I- 5. Population et activités Socio-Economiques

I-5. 1. Population

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) constitue l'extrémité Sud-Est du territoire français métropolitain. Elle couvre une superficie de plus de 31 400 km² et pourrait compter 5 165 000 habitants en 2030. La population continuerait d'augmenter, sur la période 2013-2030, dans chacun des quatre grands territoires qui structurent la région (Figure 11).

Plus de 80% de la population vit et travaille dans les trois départements littoraux (Bouches-du-Rhône, Var, Alpes-Maritimes). Les deux départements alpins (Alpes-de-Haute-Provence et

Hautes-Alpes) ne comptaient au total que 304 000 habitants. Mais ils connaissent, depuis 1975, un regain démographique assez sensible après plus d'un siècle d'exode rurale, selon INSEE, 2015.

La densité de population variée selon les départements ; (i) celle du système alpin portée par les migrations serait en plus forte croissance avec + 0,4 % soit plus de 1400 habitants par an. (ii) Dans le système azuréen, la hausse serait plus modérée que dans le reste de la région avec plus de 0,2 %, soit plus de 2200 habitants par an. (iii) Le système rhodanien, pourtant deux fois moins peuplé, gagnerait autant de population avec plus de 2100 annuellement. La croissance y serait de plus 0,3 % par an, comme dans le système provençal. Pour ce dernier, l'excédent naturel serait l'unique moteur démographique et permettrait à la population de s'accroître en moyenne de 7 100 personnes chaque année. Alors le nombre d'habitants se stabiliserait sur le littoral notamment dans les zones englobant les grandes agglomérations régionales : Marseille, Nice et Toulon (INSEE, 2015).

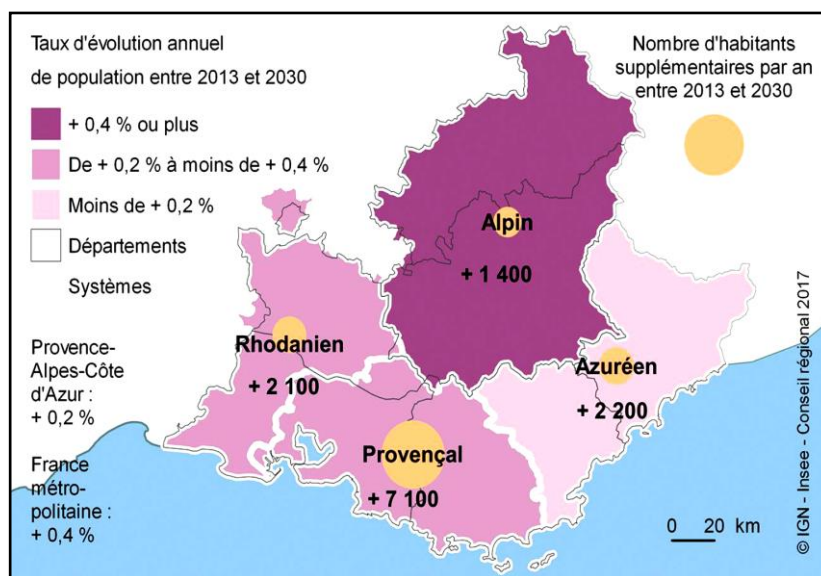


Figure 11 : Évolution de la population de 2013 à 2030 des 4 systèmes territoriaux selon le scénario de projection centrale (source : INSEE, 2015)

I-5. 2. Activités socio-économiques

Les établissements industriels régionaux emploient 15% des actifs (*DREAL PACA, 2019*). Les deux tiers de ces établissements sont implantés dans les Bouches-du-Rhône (aire métropolitaine marseillaise) et les Alpes-Maritimes (Grasse, Nice, Sophia Antipolis). Le département des Bouches du Rhône représente près de la moitié des emplois industriels de la région toute entière. Les principales activités sont :

- ✎ la chimie de base, concentrée dans le triangle Fos-Berre-Lavéra, qui traite un tiers du pétrole raffiné en France,

- ✂ la chimie fine, implantée autour de Grasse (dans les Alpes-Maritimes) avec le pôle parfumerie, huiles essentielles et arômes artificiels ; un pôle arômes et senteurs regroupent également des entreprises dans les Alpes de Haute Provence,
- ✂ les industries agro-alimentaires sont localisées dans le Vaucluse, le Nord-Ouest des Bouches-du-Rhône et le territoire marseillais. Certaines productions sont leaders sur le marché national (77% de l'huile d'olive, 63% des dérivés de la tomate, 48% des semoules de blé dur). Une présentation des usages hydroélectriques sera développée dans un volet spécifique consacré aux aménagements hydrauliques et hydroélectriques (*DREAL PACA, 2019*).

II. Problèmes majeurs de qualité d'eau destinée à la consommation dans la région PACA

L'eau distribuée par les collectivités publiques à la population de la région PACA est étroitement surveillée par un contrôle, de la ressource jusqu'aux robinets des consommateurs, est une compétence de l'Etat qui est organisé et exercé par l'ARS PACA, et ses Délégations Territoriales.

Bien que la région ait souffert historiquement de la sécheresse, aujourd'hui, elle ne manque pas d'eau. Des glaciers des Alpes aux villes des franges côtières, l'eau circule, non pas dans un continuum naturel mais grâce à de nombreux aménagements, dont certains peuvent être datés de l'époque romaine. Faire dériver l'eau, la conduire là où elle faisait défaut, a été l'œuvre des différentes sociétés locales. Les procédés utilisés ont été aussi ingénieux que nécessaires, tels que le captage de sources, le creusement de puits et de galeries souterraines, la construction de restanques et surtout l'édification de canaux utilisés d'abord pour les moulins puis pour l'agriculture et l'énergie électrique (ARS, 2014).

L'ensemble des aménagements hydrauliques, principalement à partir de l'axe Durance-Verdon, a permis un transfert d'eau de l'arrière-pays, historiquement rural, vers des espaces littoraux fortement urbanisés. Ceci pose la question des capacités d'approvisionnement pour les usages domestiques, le développement économique et industriel ainsi que le maintien des activités touristiques et agricoles dans les territoires situés en amont (GREC PACA 1, 2017).

L'état des lieux montre que l'eau distribuée dans la région est globalement de bonne qualité tout en mettant, une fois de plus, en relief d'importantes disparités géographiques. Néanmoins, les problèmes de qualité bactériologique identifiés dans les départements alpins soulignent la nécessité de poursuivre la protection des captages et si nécessaire de mettre en place des stations de désinfection pour les réseaux en zone de montagne. Si la problématique des nitrates et de

minéralité est peu préoccupante dans la région, la vigilance doit rester de mise sur certains bassins versants sensibles aux contaminations par les produits phytosanitaires.

Les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoient, au cours du siècle à venir, une modification des précipitations, une diminution de la couverture neigeuse et de l'eau stockée dans les glaciers, ainsi qu'une altération de la qualité des eaux. En région PACA, ces prévisions viennent s'ajouter à une forte pression liée à la période de sécheresse estivale qui caractérise le climat méditerranéen, mais aussi aux évolutions démographique, économique et urbaine qui conduisent à un partage de la ressource (GREC PACA, 2017).

Les eaux destinées à la consommation humaine sont soumises à des exigences de qualité. Comme le prévoit le code de la santé publique française, « elles ne doivent pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de toutes autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes ». On distingue selon l'ARS, 2014 deux niveaux d'exigences de qualité :

- **Limite de qualité** : il s'agit de paramètres microbiologiques et d'une trentaine de substances chimiques considérées comme indésirables ou toxiques (Arsenic, Nitrates, Plomb, Pesticides, etc...), leurs présences peuvent induire des risques immédiats pour la santé du consommateur.
- **Références de qualité** : il s'agit de substances n'ayant pas d'incidence directe sur la santé des consommateurs mais qui peuvent mettre en évidence un dysfonctionnement des installations de production et de distribution des eaux ou être à l'origine d'inconfort ou de désagréments pour le consommateur (Chlorures, Fer, Manganèse, Sulfates, etc.) (ARS, 2014).

CHAPITRE 3 : APPROCHES METHODOLOGIQUES

En France, le contrôle sanitaire concerne les eaux brutes souterraines issues de captages des sources ou bien de forages et puits ainsi que des prises d'eau de surface. Les eaux distribuées sont également analysées, mais ces eaux ont été traitées (désinfection par rayonnement U.V. ou désinfection par traitement chimique tel que l'eau de javel, chloration, ...).

Dans ce travail, seules les eaux brutes d'origine souterraine seront étudiées car leur qualité n'est pas influencée par le traitement.

I. Base de données SISE-EAUX

SISE-EAUX constitue l'outil national de gestion du suivi de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Elle a été mise en place par le Ministère chargé de la santé en 1994. Cette base de données est alimentée à partir des données recueillies par les Délégations Territoriales de l'ARS dans le cadre du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine et stocke des données administratives, techniques et analytiques. Cette base de données est alimentée par les analyses d'eau effectuées dans le cadre du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine. Elle est informatisée depuis 2006.

Avec le développement des moyens analytiques, la baisse des concentrations limites de détection et des coûts analytiques, le nombre de paramètres et d'analyses et l'abondance des archives en papier rendent la base de données SISE-EAUX d'une grande utilité (SIE, 2020).

L'adoption d'un modèle de données national unique permet une exploitation à différents échelons géographiques : départemental, régional, par bassin hydrographique et national (ARS, 2014).

Ainsi, actuellement les analyses dites de première adduction comportent plusieurs centaines de paramètres sur les pesticides et leurs métabolites. Cependant le nombre d'analyses disposant d'un tel nombre de paramètres est limité. A l'opposé, lorsque le contrôle sanitaire montre une situation saine, le contrôle simplifié avec très peu de paramètres (bactériologie et physicochimie des éléments majeurs) est réalisé. Ainsi, la base SISE-EAU dispose d'un très grand nombre d'analyse avec un nombre réduit de paramètres. Entre ces deux extrêmes, la base SISE-EAU comporte plusieurs types d'analyses, chacune ayant son nombre de paramètres.

II. Approche adoptée

L'ensemble des données est issu d'une extraction de la base de données de l'agence régionale de la santé de PACA, toutes ces données ont été acquises par des laboratoires prestataires de l'ARS PACA et agréés par le ministère de la Santé ; des laboratoires dotés de toutes les certifications internationales de qualité analytique.

L'extraction a concerné toutes les données concernant les analyses d'eau brute, c'est-à-dire avant tout traitement. Elle peut donc aider à la caractérisation des entités paysagères d'autant plus que le géo-référencement des prélèvements permet un traitement spatialisé.

L'étude réalisée est axée sur l'utilisation d'une énorme base de données, notamment de **16 139** prélèvements répartis comme suit :

4793 prélèvements dans les Alpes-de-Haute-Provence.

1245 prélèvements dans les Hautes-Alpes, 1069 au Vaucluse.

3220 prélèvements dans les Alpes Maritimes.

2760 prélèvements dans le Var.

3052 prélèvements dans les Bouches du Rhône.

Sur la base de données comprenant environ **32** paramètres physico-chimiques et microbiologiques, fournis par l'Agence Régionale de Santé de la région PACA. Après le triage et le filtrage des données, **10933** prélèvements des eaux souterraines sont utilisés avec **27** paramètres environ et **5158** prélèvements d'eaux de surface dont **23** paramètres sont analysés.

La localisation des points traités montre qu'on a une répartition inégale des points de prélèvements dans l'ensemble de la région étudiée (Figure 12).

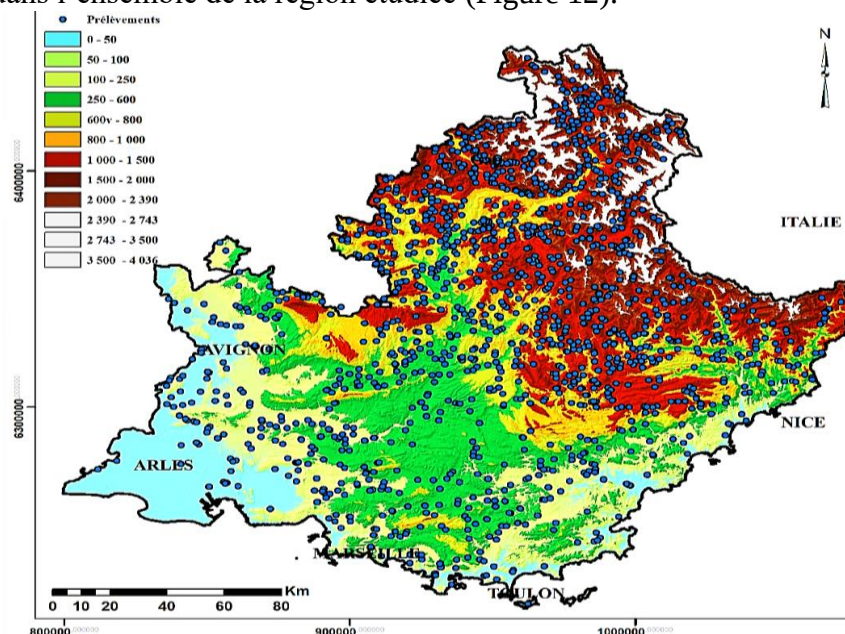
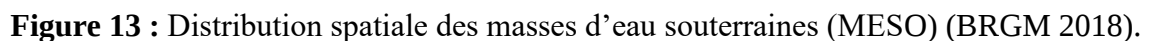


Figure 12 : Carte de répartition des prélèvements des eaux souterraines sur l'ensemble de la région PACA

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a défini les masses d'eau souterraines (MESO) à l'échelle nationale par un code unique FRDGXXX, XXX étant un nombre entier compris entre 000 et 999. Chaque masse d'eau, constitue une entité hydrogéologique qui est décrite par une notice géologique, et dont le contour géographique est délimité par un polygone sur SIG (Figure 13). Toutes les masses d'eau souterraines de PACA appartiennent au bassin versant Rhône Méditerranée et la majeure partie d'entre elles se situent dans le bassin versant de la Durance affluent du Rhône drainant les Alpes du sud.



IV-1. Outil mathématique et statistique

P. 56

affectera sa teneur en chlorure et en sodium. Par ailleurs, un paramètre physicochimique peut subir l'influence de divers facteurs. En effet, la teneur en nitrate pourra être significativement tributaire de la fertilisation, mais aussi du processus de dénitrification ou de l'intensité de l'activité microbologique dans la minéralisation de l'humus qui dépend elle-même de la température et de l'altitude.

Pour déterminer ces différents paramètres nous utilisons la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), très efficace pour l'analyse de données multi-variées ; elle se présente sous la forme de tableaux avec un nombre d'observations (M) par rapport au nombre de variables(N). Le calcul de l'ACP repose sur toutes ces corrélations partielles ou non, résumées dans la matrice des corrélations. Elle permet de déterminer les sources indépendantes de variabilité dans l'hyper-espace des données. Ces sources étant classées, hiérarchisées et indépendantes les unes des autres, ce qui permet d'éviter une redondance dans le traitement de données. Ainsi, visualiser et analyser les nombres d'observations(M) initialement décrites par nombre des variables(N) sur un graphique à deux ou trois dimensions, construit de manière à ce que la dispersion entre les données soit aussi bien préservée que possible.

IV-2. Approche globale (ACP) pour une réduction dimensionnelle

Lorsque nous étudions simultanément un nombre important de variables, la difficulté vient de ce que les individus étudiés ne soient plus représentés dans un plan, mais dans un espace de dimension plus importante (exemple 4D). L'objectif de l'ACP est de revenir à un espace de dimension réduite (par exemple 2D) en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales. Ce résumé est alors réalisable grâce à la matrice des variances-covariances (ou celle des corrélations) puisque c'est la dispersion des données considérées qui est analysé. De cette matrice, seront extraits, par un procédé mathématique adéquat, les facteurs en petit nombre que l'on recherche. Ils vont permettre de réaliser les graphiques désirés dans cet espace de petite dimension (le nombre de facteurs retenus), en déformant le moins possible la configuration globale des individus selon l'ensemble des variables initiales (ainsi remplacées par les facteurs).

L'ACP est un grand classique de "l'analyse des données" pour l'étude exploratrice ou la compression d'un grand tableau $n \times p$ de données quantitatives en détail tous les aspects et utilisations de façon exhaustive (Jolliffe, 2002). Elle est introduite comme estimation des paramètres d'un modèle, afin de préciser la signification statistique des résultats obtenus.

L'ACP est illustré dans cette thèse à travers l'étude de données de la base SISE-EAU. Elle est effectuée sur l'ensemble de la région PACA, en utilisant toutes les analyses mais avec les

15 plus importants paramètres. Cette méthode sert de fondement théorique aux autres méthodes de statistique multidimensionnelle dites factorielles. Elle est donc étudiée en détail et abordée avec différents niveaux de lecture.

D'un point de vue plus "mathématique", l'ACP correspond à l'approximation d'une matrice ($n; p$) par une matrice de même dimensions mais de rang $q < p$ (rappels d'algèbre linéaire) ; q étant souvent de petite valeur 2 ou 3 pour la construction de graphiques facilement compréhensibles (Jolliffe, 2002).

IV-3. Réduction dimensionnelle

Le développement des approches statistiques d'aide à la décision à partir de l'instrumentation de systèmes artificiels ou naturels met en évidence un processus de création de connaissances qui, après avoir recueilli des données, procède à leur réduction pour les transformer en information puis en connaissances.

La variance est significativement répartie sur un grand nombre d'axes factoriels. De AF2 à AF4, le pourcentage de variance expliquée est presque similaire autour de 10%, suggérant que l'ensemble de données représente un environnement complexe, où les paramètres ne sont pas liés par des relations évidentes. Cela s'explique notamment par la grande diversité lithologique, des altitudes et de l'utilisation des sols à l'échelle de la zone étudiée. En d'autres termes, il existe de nombreuses sources de variabilité d'importance comparable, ce qui justifie a posteriori l'utilisation de méthodes d'analyses multi-variées pour le traitement des données, afin d'identifier, de discriminer et de classer les sources de variation de la qualité de l'eau. La multiplication des paramètres enrichit la base de données mais complique leur traitement en augmentant le nombre de dimensions et les distances entre les observations dans l'hyperespace. La réduction dimensionnelle avec l'ACP réduit cet inconvénient, en combinant des informations redondantes en composants principaux uniques. La valeur propre associée au premier axe factoriel est 5.1, ce qui signifie que cette composante principale à elle seule véhicule, synthétiquement, plus d'informations que 5 variables originales (Mallat, 2017).

Le passage d'un hyperespace de données de 15 à 8 dimensions constitue sa forte réduction facilitant ainsi le traitement de l'information. Le traitement par l'ACP met en évidence les sources de variabilité classiquement observées en hydrochimie, en particulier la charge minérale hydrique, les interactions eau-roche, les processus redox et les altérations possibles souvent d'origine anthropique.

IV-4. Synthèse des informations par Axe factoriels ACP

Pour un système réel et des mesures de données, des structurations différentes peuvent conduire à des connaissances contradictoires. Nous nous intéressons en particulier à la phase de constitution d'informations et nous remarquons que le passage des informations aux connaissances pourrait également engendrer ses propres contradictions.

Le logiciel XLSTAT permet de réaliser les ACP et créer une matrice des vecteurs propres. Pour cela il détermine les paramètres affectant le plus de variation des eaux et les rangent par facteur F. Ces axes factoriels sont des combinaisons linéaires de paramètres initiaux et ils se comportent comme des macro-paramètres synthétisant l'information. Il indique ensuite le poids des différents facteurs sur la variance ; chaque axe possède un poids (Variabilité en %). Plus celui-ci est grand et plus les paramètres composant cet axe ont un impact sur la variabilité des eaux.

Dans ce travail, nous nous proposons de les cartographier au même titre qu'une minéralité d'une eau ou qu'une teneur en pesticide qui fluctuent le plus dans la région PACA.

IV-5. Classification hiérarchique ascendante non supervisée

La classification hiérarchique ascendante (CHA) est l'une des techniques statistiques visant à partitionner les masses d'eaux en différentes classes ou sous-groupes. Nous cherchons à ce que les masses d'eaux regroupés au sein d'une même classe (homogénéité intra-classe) soient le plus semblables possibles tandis que les classes différentes soient le plus dissemblables (hétérogénéité inter-classe).

Le principe de la CHA est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable, qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, montrant la distance existante entre chaque individu deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante.

CHA va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La classification est dite **ascendante** car elle part des observations individuelles ; elle est dite **hiérarchique** car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie nous produirons la partition désirée (Chessel et al, 2004).

IV-6. Analyse Discriminante

Après la classification hiérarchique ascendante établie à l'aide de XLSTAT, une autre méthode abordée est l'analyse discriminante (AD). C'est un outil conventionnel souvent utilisé pour étudier les groupes d'observations qui peuvent avoir des caractéristiques différentes. Cette

analyse linéaire est une généralisation de la méthode discriminante linéaire de Fisher, une méthode utilisée en statistique, pour trouver une combinaison linéaire des caractéristiques qui sépare deux ou plusieurs classes d'objets ou événements. La combinaison résultante peut être utilisée comme un classificateur linéaire ou, plus communément, pour réduire la dimensionnalité entre avant et après la classification hiérarchique ascendante.

L'analyse discriminante étudie des données provenant des groupes connus, elle vise essentiellement deux critères :

-La description : ceci se fait en répondant à la question suivante : Parmi les groupes connus, quelles sont les principales différences que l'on peut déterminer à l'aide des variables mesurées ?

-Le classement : Peut-on déterminer le groupe d'appartenance d'une nouvelle observation uniquement à partir des variables mesurées ?

Cette méthode permet d'y parvenir en formant un ou des combinaisons plus linéaires des variables discriminantes. Ainsi les fonctions discriminantes sont de la forme suivante :

$$D_i = d_0 + d_1Z_1 + d_2Z_2 + \dots + d_pZ_p$$

Où D_i est le score de la fonction discriminante i , les d sont des coefficients d'échelle ou de pondération, et les Z sont les valeurs standardisées des p variables discriminantes utilisées dans l'analyse.

Les fonctions sont formées de manière à maximiser la séparation des groupes tout en minimisant les variations au sein des groupes. Une fois que la combinaison de variables est trouvée, elle va fournir une discrimination satisfaisante pour les masses d'eaux dont l'appartenance à un groupe est connue. Un ensemble de fonctions de classification peut être dérivé qui permet de classer les nouveaux cas dont l'appartenance est inconnue. La procédure de classification utilise une combinaison distincte des paramètres discriminants pour chaque groupe. Celles-ci produisent une probabilité d'appartenance au groupe respectif et le cas est attribué au groupe ayant la probabilité la plus élevée (Wilson et al. 2018).

La Classification hiérarchique sur les masses d'eaux souterraines (MESO) indique le degré de dissemblance et l'ordonnée le code de la MESO. Par ailleurs, chaque groupe fait apparaître des sous-groupes de MESO.

IV-7. Machine Learning

Le Machine Learning ou « apprentissage automatique » en français est un concept qui fait de plus en plus parler de lui dans le monde de l'informatique, et qui se rapporte au domaine de l'intelligence artificielle. Encore appelé « apprentissage statistique », ce terme renvoie à un processus de développement, d'analyse et d'implémentation conduisant à la mise en place de

procédés systématiques. Pour faire simple, il s'agit d'une sorte de programme permettant à un ordinateur ou à une machine un apprentissage automatisé, de façon à pouvoir réaliser un certain nombre d'opérations très complexes.

L'objectif visé est de rendre la machine ou l'ordinateur capable d'apporter des solutions à des problèmes compliqués, par le traitement d'une quantité astronomique d'informations. Cela offre ainsi une possibilité d'analyser et de mettre en évidence les corrélations qui existent entre deux ou plusieurs situations données, et de prédire leurs différentes implications (DIGITAL INSIDERS, 2020). Le Machine Learning révèle tout son potentiel dans les situations où des insights (tendances) doivent être repérés à partir de vastes ensembles de données diverses et variées, appelés le Big Data. Le Machine Learning est réellement la science idéale pour tirer profit du Big Data et de ses opportunités. Cette technologie est en effet capable d'extraire les données de valeur parmi d'immenses sources d'informations complexes (Rougier, 2020).

Pour analyser de tels volumes de données, le Machine Learning se révèle bien plus efficace en termes de vitesse et de précisions que les autres méthodologies traditionnelles.

Dans cette étude, on a utilisé le Machine Learning pour mesurer à quel niveau la variabilité de la qualité des internes à chaque MESO ou à chaque groupe de MESO, afin de pouvoir affecter chaque masse d'eaux à la MESO correspondante.

IV-8. Outil Cartographique

L'outil cartographie nous permet de réaliser des représentations graphiques particulières qui traduisent les relations spatiales entre les différents paramètres. Les caractéristiques chimiques et bactériologiques synthétisées sous forme d'axes factoriels, permettent de différencier les différents types de ressources en eau à l'échelle régionale. Ceci malgré la variabilité temporelle des caractéristiques en chaque point de prélèvement et la variabilité spatiale interne à chaque masse d'eau.

Ainsi, les masses d'eau ayant une définition territoriale avec un contour défini sur SIG, permettent de représenter l'extension spatiale de chaque groupe de masses d'eau sous Arcgis. La méthode suivie permet de classer les points de prélèvements par groupes de masses d'eau souterraines ayant chacun leur spécificité en termes d'interactions Eau-Roche.

Les résultats montrent la robustesse de cette approche et ouvre la voie vers la possibilité d'utiliser cette typologie des masses d'eaux souterraines pour étudier les sources de variabilité de leur qualité de manière spécifique à chaque ensemble de masse d'eau. Il sera alors possible de proposer une gestion de la surveillance de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, adaptée à chaque ressource (Touiouine et al. 2020).

Les principaux composants fournissent des macro-paramètres, c'est-à-dire des données synthétiques qui véhiculent des informations fortes et significatives. Ils sont particulièrement adaptés et pertinents pour le suivi dans le temps la cartographie numérique et l'analyse spatiale, tout comme les paramètres originaux (Touiouine et al. 2018, Barbel-Perineau, 2019 ; Bouramtane et al., 2020 ; Helena et al., 2000 ; Rezende-Filho et al., 2015). Les scores des échantillons le long des principaux composants ont été utilisés pour la cartographie des principales sources de variation de la qualité de l'eau identifiées dans l'étude. Des cartes ont été créées à l'aide de Variogrammes ajustés pour le Krigeage à l'aide de traitement sur le logiciel SURFER 12.

**PARTIE 2 :
QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES A L'ECHELLE
REGIONALE. RESULTATS**

CHAPITRE 1

MECANISMES RESPONSABLES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES SUR L'ENSEMBLE DE LA REGION PACA

I. Présentation des masses d'eaux souterraines traitées

Parmi les informations extraites de la base de données ayant été triées, vérifiées et classées, il y a plusieurs blocs dont le plus intéressant semble être le bloc avec 5 294 échantillons réalisés sur 15 paramètres chimiques, biologiques et organiques, notamment les Entérocoques, Escherichia Coli, conductivité électrique, HCO_3^- , H^+ , Ca^{++} , Cl^- , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , SO_4^- , Fe, Mn, NO_3^- , As. Le nombre de paramètres important exclut l'étude de paramètres par paramètre ou de corrélation deux à deux. Pour cette raison, ce chapitre sera consacré à une approche globale de l'information.

A l'aide du logiciel AQUA, une approche géochimique sur toute la région PACA a été appliquée en premier afin de définir l'hétérogénéité de la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale. Ensuite, l'analyse ACP a été effectuée puisqu'il s'agit d'une méthode d'algèbre linéaire très robuste, elle travaille sur la matrice des corrélations, particulièrement sur des variables centrées réduites.

II. Approche géochimique de la qualité des eaux à l'échelle régionale

Les 5 294 analyses d'eau du bloc 2 de données a fait l'objet d'un calcul de spéciation avec le logiciel AQUA qui fût développé en 1993 développé au laboratoire hydrogéologie à l'UMR EMMAH (VALLES et al. 1993). Au préalable, la balance ionique des résultats d'analyses a été vérifiée, généralement d'environ 5 à 6 % ce qui qualifie les analyses de bonne qualité. Elle a été corrigée au *prorata* des concentrations de sorte à obtenir une balance parfaite. Une fois cette préparation terminée, un calcul d'activité chimique et de spéciation a été réalisé. Ensuite les diagrammes de Piper et d'équilibre des eaux avec la calcite et le gypse ont été représentés (Figure 14, 15 et 16).

II.1. Equilibre des eaux avec la calcite

Le diagramme d'équilibre des eaux avec la calcite (Figure 15), montre que la grande majorité des eaux est en équilibre avec ce minéral ; ce qui s'explique la présence de calcaire sur la majorité du territoire régional PACA. Cependant, certains groupes d'eau qui seront définis dans

les chapitres suivants, sont nettement sous saturés par rapport à ce minéral. C'est le cas notamment d'une partie du groupe 8, et dans une moindre mesure d'une petite partie des groupes 4, 5 et 7. Ainsi, pour le groupe 8 (Figure15), plusieurs ensembles de points se distinguent. Un de ces ensembles est fortement sous-saturé par rapport à la calcite, ce qui le distingue de la grande majorité des analyses d'eaux régionales. Les index de saturation sont inférieurs à -2, ce qui ne laisse aucun doute sur l'état de sous-saturation. Celui-ci ne s'explique pas uniquement par la charge en CO₂ qui est assez forte, mais aussi par les eaux peu minéralisées. Par ailleurs, la pression partielle équilibrante en CO₂ (pCO₂) présente une variabilité importante ; les valeurs varient de 10⁻¹ à 10^{-3.7}, ce qui traduit une forte variabilité spatiale des conditions d'aération, des conditions d'écoulement ou à l'opposé de stagnation de nappe voire de l'activité biologique.

II.2. Equilibre avec le gypse

Les eaux souterraines de la base de données (Bloc2) sont généralement sous-saturées par rapport au gypse (Figure 16). L'indice de saturation (IS) varie entre - 5.18 et - 0.317. Les eaux les plus minéralisées sont quasiment en équilibre avec le gypse présentant des indices de saturation compris entre -2.3 et -0.9 ce qui indique une minéralité plutôt importante (Figure 17).

Conclusion

Les résultats montrent une forte hétérogénéité de la qualité des eaux souterraines à l'échelle de la région PACA. L'étude des mécanismes responsables de cette qualité ne peut être menée de manière globale, il conviendra de déterminer une meilleure méthode pour pouvoir ordonner cette étude de manière géologiquement cohérente. L'étude géochimique des eaux ne pourra être conduite qu'à l'échelle de ses zones géographiques présentant une certaine unité de fonctionnement hydrochimique, objet des prochains chapitres.

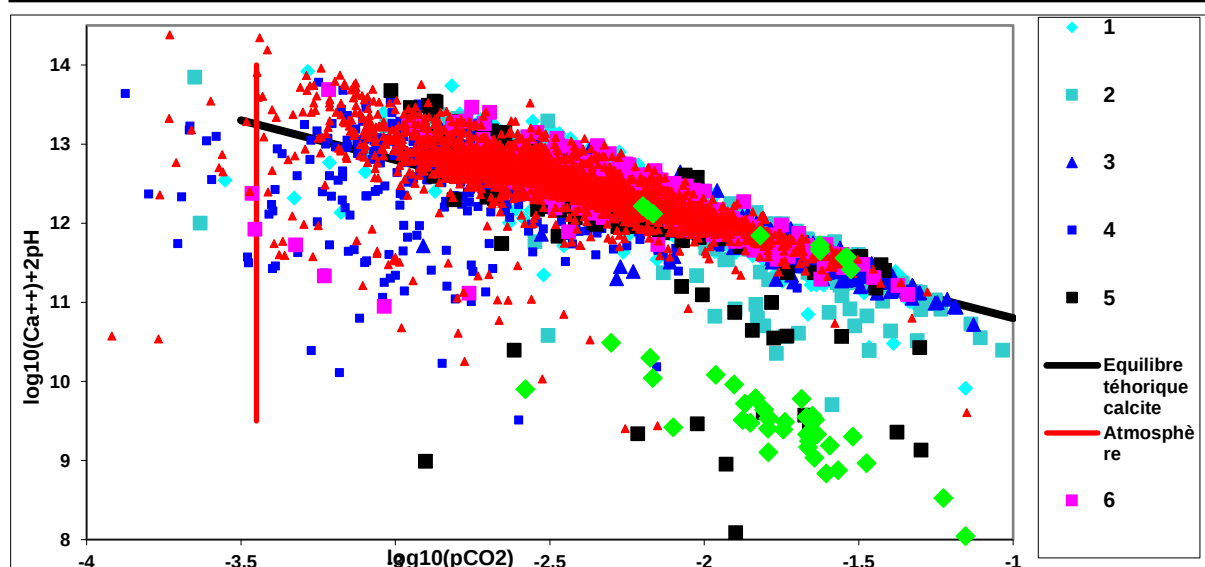


Figure 14 : Diagramme d'équilibre des eaux avec la calcite du bloc 2 de la région PACA.

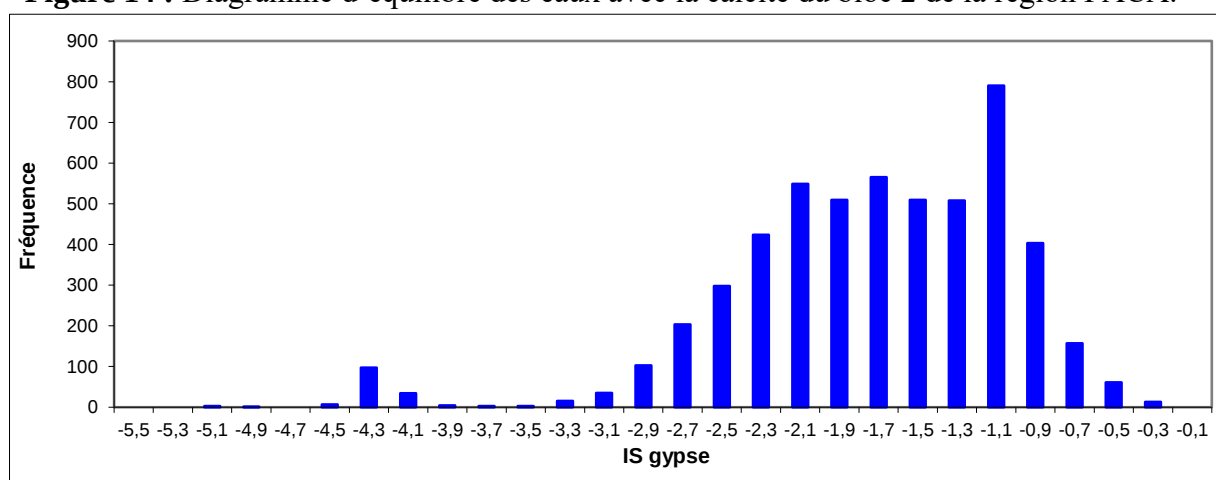


Figure 15 : Fréquence des index de saturation des eaux avec le gypse du bloc 2 de la région PACA.

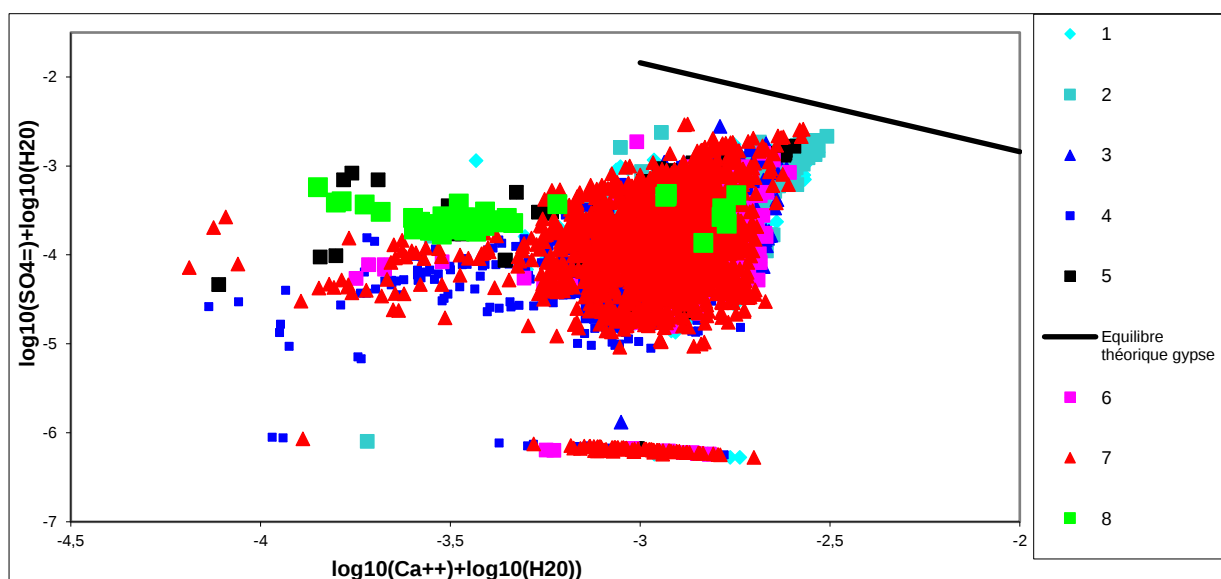


Figure 16 : Diagramme d'équilibre des eaux avec le gypse du bloc 2 de la région PACA.

III. Calcul de l'ACP sur l'ensemble du bloc 2

Le calcul de l'ACP repose sur la matrice des corrélations, celle-ci présente une majorité de coefficients de corrélations très faibles (Tableau 2). La plupart d'entre eux sont compris entre -0.5 et +0.5. Ce résultat indique qu'à l'échelle globale de la région PACA, il n'existe pas de généralité sur les relations liant les paramètres entre eux. Dans le meilleur des cas, ces relations sont plus locales, ce point sera développé ultérieurement. Les coefficients de corrélation significativement différents de zéro concernent la conductivité électrique et les éléments majeurs solubles. Ceci traduit le fait que lorsque les eaux sont plus minéralisées du fait d'un temps de contact Eau-Roche plus long ou bien de la présence de roches plus solubles, la conductivité électrique et celle des éléments majeurs augmentent simultanément. Avec un niveau de corrélation moins bien marqué apparaissent les deux paramètres de contamination fécale (*Escherichia coli* et *Entérocoques fécaux*). Ce résultat s'explique par le fait que quelle que soit l'échelle, les sources de contamination sont communes aux deux paramètres et que la vulnérabilité des ressources en eaux par rapport à ces deux types de germes est identique (Tableau 2).

Pour ce qui est du pourcentage de variance expliquée par chacun des axes factoriels (Figure 17 et tableau 3), le premier axe factoriel représente 35% de la variance tout paramètre inclus et toutes analyses confondues.

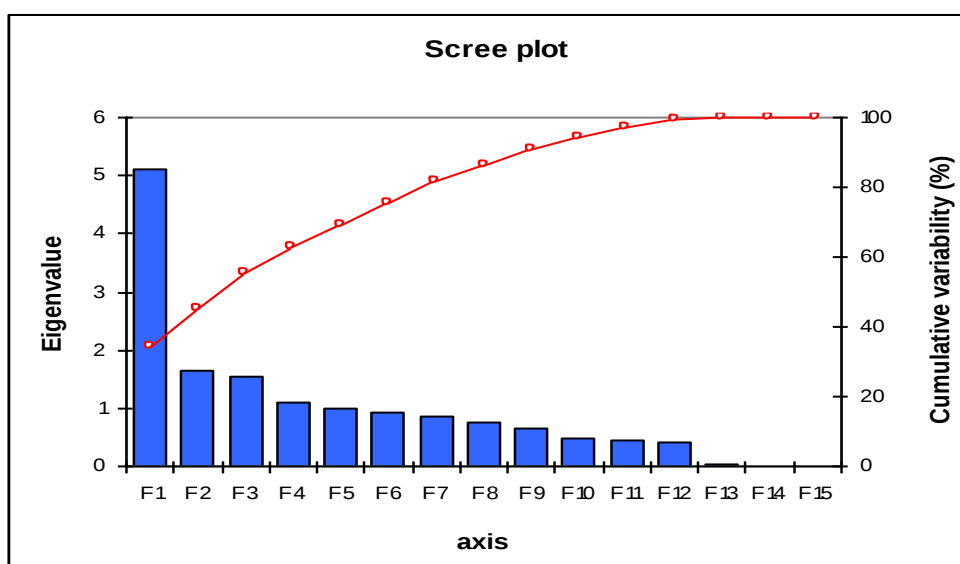


Figure 17 : Pourcentage de variance expliquée par les différents axes factoriels (histogrammes) et pourcentage cumulé (courbe) de la région PACA.

III.1. Matrice des corrélations

La matrice des corrélations montre des coefficients de corrélation généralement importants, surtout entre le Chlorure et le Sodium, ensuite la Conductivité électrique, le Calcium, le Chlorure, le Sodium et avec les Sulfates. Ainsi, entre les Hydrogénocarbonates et le Calcium, et entre les Sulfates et le Calcium (Tableau 2). Généralement la corrélation n'est pas bien marquée, grâce aux grandes diversités des lithologies, des altitudes de l'ensemble de PACA et des différents types des ressources...Ceci justifie l'importance d'utilisation d'une approche multi variée telle que l'ACP pour identifier, séparer, hiérarchiser les différentes sources de variation de la qualité des eaux.

Tableau 2 : Matrice de corrélations effectuée sur l'ensemble du bloc 2.

Variables	Entéroc.	E. Coli	EC	HCO ₃ ⁻	H ⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ⁼	Fe	Mn	NO ₃ ⁻	As
Entéroc.	1														
E. Coli	0.594	1													
EC	-0.006	-0.006	1												
HCO ₃ ⁻	0.009	0.032	0.653	1											
H ⁺	-0.016	-0.013	0.221	0.116	1										
Ca ⁺⁺	-0.007	0.002	0.861	0.766	0.150	1									
Cl ⁻	-0.010	-0.018	0.753	0.197	0.221	0.405	1								
Mg ⁺⁺	0.006	0.004	0.669	0.557	0.161	0.519	0.327	1							
K ⁺	-0.011	-0.008	0.617	0.293	0.165	0.448	0.604	0.339	1						
Na ⁺	-0.011	-0.019	0.743	0.193	0.203	0.382	0.971	0.311	0.615	1					
SO ₄ ⁼	-0.016	-0.031	0.748	0.241	0.126	0.712	0.428	0.614	0.442	0.439	1				
Fe	-0.002	-0.003	0.025	0.020	0.047	0.027	0.015	0.015	0.050	0.023	0.029	1			
Mn	0.006	-0.011	0.143	0.048	0.144	0.050	0.183	0.073	0.157	0.221	0.083	0.114	1		
NO ₃ ⁻	0.007	0.040	0.447	0.357	0.175	0.509	0.236	0.251	0.275	0.196	0.314	0.011	-0.029	1	
As	-0.006	-0.011	-0.107	-0.169	-0.022	-0.140	-0.023	-0.079	-0.031	-0.014	-0.036	0.030	0.030	-0.045	1

Les valeurs moyennes de chacun des 6 premiers axes factoriels ont été calculées pour chacune des masses d'eau souterraines sur le territoire régional qui comporte au moins une analyse d'eau (Tableau 3).

Tableau 3 : Valeurs propres, pourcentage de variance expliquée et pourcentage cumulé pour les différents axes factoriels de l'ACP du bloc2.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
Valeur propre	5.111	1.650	1.558	1.099	0.990	0.940	0.874	0.755	0.652	0.482	0.431	0.403	0.036	0.013	0.008
Variabilité (%)	34.072	11.002	10.387	7.324	6.599	6.269	5.823	5.031	4.349	3.211	2.872	2.686	0.241	0.084	0.050
% cumulé	34.072	45.073	55.460	62.784	69.383	75.652	81.475	86.507	90.855	94.066	96.938	99.625	99.866	99.950	100.000

III.2. Distribution de variance

L'importance et la distribution de la variance selon les axes factoriels de l'ACP et la corrélation entre les différents paramètres de qualité sont représentées sur la figure 19. La variance se répartit de manière significative en un grand nombre d'axe factoriels notamment plus de 8 axes factoriels qui portent un pourcentage supérieur à 5%. Ce qui indique un jeu de données très complexe avec de nombreuses sources de variation d'importance comparable. La diversité des milieux naturels, des altitudes et des occupations par l'homme est responsable en grande partie de cette forte hétérogénéité et de la multiplicité des sources de variations. Ceci justifie a posteriori l'utilisation de méthodes d'analyses multi-variées comme l'ACP. En effet, le calcul de l'ACP du Bloc2 confirme la complexité des sources de variabilité de la qualité des eaux. La variance se distribue selon un grand nombre d'axes factoriels d'importance comparable. Les deux premiers axes portent respectivement 34.07 % et 11 % de la variance, pour toutes les analyses et presque les 15 paramètres. Un premier plan factoriel à 85% permet de visualiser plus de la moitié de l'information totale. Ensuite viennent le troisième et le quatrième axe factoriel avec respectivement 10.38 % et 7.3 % de variance expliquée. Les cinquième et le sixième représentent respectivement 6.59 % et 6.26 %. A ce niveau et avec des pourcentages peu significatifs, il est généralement difficile d'interpréter la signification.

Par la suite, seuls les 8 premiers axes factoriels seront retenus. Ils portent 86% de l'information, pour toutes les analyses et tous les paramètres confondus. Les 14% restants incluent notamment du bruit statistique (Touiouine 1 et al. 2020).

Le passage d'un hyperespace à 15 dimensions à un hyperespace à 8 dimensions constitue une forte réduction dimensionnelle de l'information, facilitant ainsi le traitement et la classification de l'information. En effet le ratio entre les volumes de l'hypersphère (sphère des équidistances) et de l'hypercube qui la contient (enveloppe des valeurs maximales) est **de 10^{-2} pour 8 dimensions alors** que ce même ratio est de **10^{-6} pour 15 dimensions.**

III.3. Interprétation des axes factoriels

Les principaux Axes Factoriel de cette ACP comportent la majorité de l'information, surtout les quatre premiers, avec une variance répartie d'une manière significative. Les 6 premiers axes factoriels portent un pourcentage supérieur à 7 %.

Le tableau 4 illustre la signification et les corrélations entre les différents axes factoriels. Cette corrélation nous permet d'identifier l'impact de chaque paramètre sur les différents axes factoriels. La négativité et la positivité des valeurs mettent en avant respectivement les éléments

qui s'opposent et ceux qui accentuent la variance. Plus une valeur est proche de zéro est moins d'influence sur le facteur F il y a.

Tableau 4 : Corrélation entre les différents paramètres et les axes factoriels du bloc2.

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>
Entéroco.	-0.010	0.571	0.684	-0.006	0.013	-0.018	0.026	-0.052	-0.022	-0.014	-0.106
E. Coli	-0.007	0.597	0.664	-0.006	0.006	0.015	-0.015	-0.001	0.008	0.018	0.085
EC	0.983	0.028	-0.022	-0.050	0.026	-0.051	0.021	-0.010	0.047	-0.098	-0.066
HCO₃⁻	0.630	0.431	-0.321	0.155	-0.083	-0.039	0.115	0.221	0.462	-0.006	-0.039
H⁺	0.286	-0.130	0.090	0.394	-0.317	0.705	-0.012	-0.352	0.080	0.043	-0.090
Ca⁺⁺	0.839	0.303	-0.258	0.040	0.066	-0.020	0.007	0.103	-0.017	-0.024	-0.329
Cl⁻	0.759	-0.412	0.350	-0.201	-0.073	-0.020	-0.132	0.022	0.106	-0.205	0.047
Mg⁺⁺	0.686	0.223	-0.187	0.072	0.100	-0.100	0.291	-0.356	0.057	-0.001	0.445
K⁺	0.698	-0.222	0.191	-0.085	0.006	-0.049	-0.127	0.108	0.038	0.621	0.038
Na⁺	0.750	-0.435	0.367	-0.188	-0.068	-0.056	-0.100	0.026	0.104	-0.183	0.028
SO₄⁼	0.750	0.047	-0.092	-0.055	0.232	-0.104	0.112	-0.327	-0.451	0.017	-0.168
Fe	0.046	-0.079	0.068	0.732	0.200	-0.367	-0.508	-0.122	0.045	-0.038	0.012
Mn	0.187	-0.294	0.268	0.529	-0.179	-0.122	0.553	0.356	-0.215	-0.017	0.017
NO₃⁻	0.503	0.263	-0.166	0.051	0.091	0.406	-0.342	0.418	-0.339	-0.080	0.240
As	-0.117	-0.224	0.172	0.069	0.850	0.313	0.194	0.076	0.189	-0.007	-0.034

▲ **Le premier axe factoriel** est corrélé à la conductivité électrique et aux éléments majeurs (Tableau 4). Il traduit l'augmentation globale de la concentration en éléments majeurs lorsque les eaux sont plus minéralisées. En d'autres termes, cet axe oppose les eaux peu minéralisées des zones de haute montagne, où les températures froides ralentissent la vitesse d'altérations des roches et où les roches sont peu solubles, aux eaux plus minéralisées sur roches solubles (gypse et terres noires riches en sulfures et dont l'altération produit de forte teneur en sulfate) ou affectées par une salinité d'origine marine au niveau du littoral.

Les valeurs basses de l'axe factoriel F1 se localisent dans le massif du Pelvoux, dans le Valgaudemar c'est à dire en haute altitude, les valeurs les plus fortes de ce premier axe factoriel se localisent sur la côte, à Hyère, Puget sur Argens, Roquebrune sur Argens.

La majorité de ces masses d'eaux prélevées dans différentes formations variées de PACA, fréquemment dans les Conglomérats du plateau de Valensole, dans les Molasses miocènes du Comtat, dans les formations variées et calcaires Fuvéliens et jurassiques du bassin de l'Arc, au Massifs calcaires des Bouches du Rhône, et dans les formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires dans le bassin de la Durance et au Poudingues pliocènes de la basse vallée du Var. Ainsi, Le domaine marno-calcaire marqué par les faciès jurassique est marqué par une prédominance des Terres Noires faciès réputé imperméable.

A la forte variabilité des structures géologiques et des faciès concorde une forte variabilité des unités aquifères.

▲ **Le second et le troisième axe factoriels** représentent la contamination fécale représentée par la présence d'*Escherichia Coli* et des Entérocoques. Comme se sont deux axes factoriels, l'information véhiculée par ces deux axes indépendants est différente. Le second axe factoriel associe les germes aux carbonates de calcium et magnésium et aux nitrates. Il s'agit de la contamination bactérienne en zone karstique. Dans cet environnement, les eaux circulent aisément et sont oxygénées. De ce fait la dénitrification ne peut avoir lieu. De plus l'origine des nitrates et des germes est la même, elle est d'origine superficielle, ce qui explique la corrélation.

▲ **Le troisième axe factoriel** associe les germes au chlorure et au sodium. Il s'agit donc des contaminations plus spécifiques aux zones littorales. En effet la Côte d'Azur se caractérise par une très forte densité de population et donc une forte pression polluante, et un milieu vulnérable à la pollution bactériologique car les sols sont caillouteux. Les Alpes arrivent en zone littorale et les torrents déposent des alluvions caillouteuses sans aucun pouvoir filtrant face au risque de contamination bactérienne.

Pour le troisième axe factoriel, un autre environnement associe les germes, le chlorure et le sodium, il s'agit de zones impactées par les rejets de station d'épuration. Celles-ci sont importantes en vallées alluviales, en particulier en zone littorale.

La différenciation entre le second et le troisième axe factoriel en fonction du faciès chimique apparaît bien sur le plan factoriel F3/F2 (Figure 18). Ces deux axes représentant deux aspects de la contamination bactérienne, montrent une variance totale de 21.4% pour l'ensemble des analyses et paramètres. Il s'agit donc d'un aspect majeur de la qualité des eaux brutes destinées à la consommation humaine en PACA.

Ce résultat est tout à fait conforme à l'expérience de l'ARS PACA qui considère le risque de contamination fécale comme le problème le plus fréquent au niveau qualité des eaux brutes.

▲ **Le quatrième axe factoriel** est lié aux métaux fer et manganèse. Comme lors du protocole de prélèvement à des fins sanitaires les échantillons ne sont pas microfiltrés, la présence de ces métaux peut s'expliquer par leur solubilisation ou bien par le transport d'oxydes à l'état colloïdal : Pour le quatrième axe factoriel, le fer et le manganèse ne sont pas opposés au nitrate, comme c'est le cas pour la dénitrification. Pour le quatrième axe factoriel, il représente plutôt le transport solide de colloïdes métalliques, et ne représente que 7.3% de la variance totale. Il s'agit d'un processus mineur à l'échelle régionale.

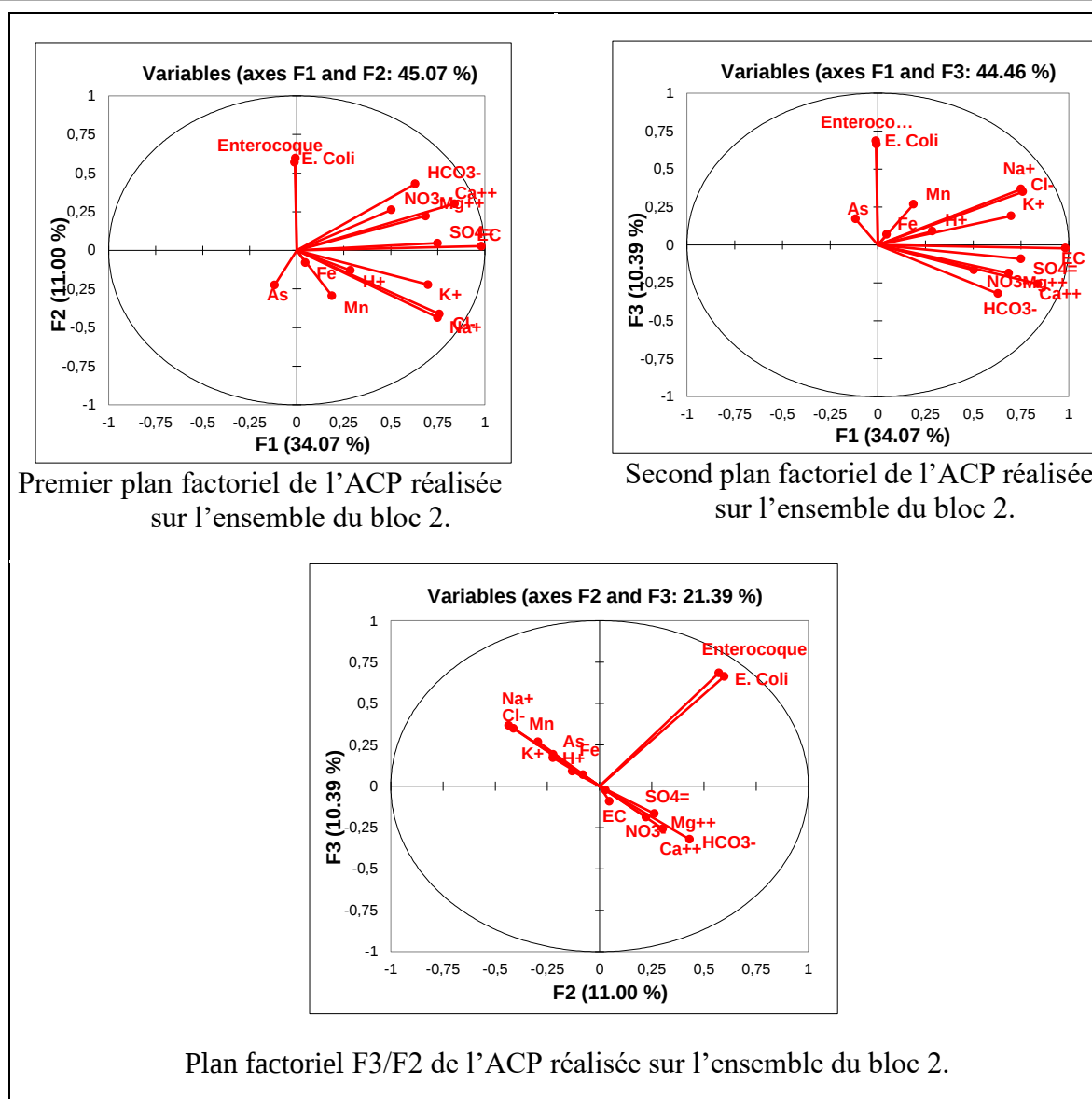
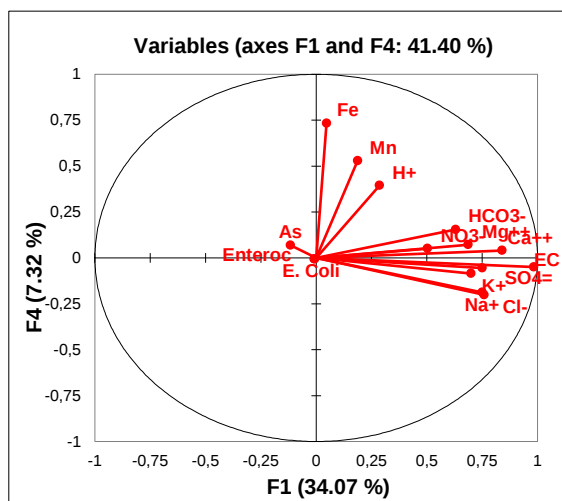


Figure 18: Diagramme de contribution des Plans Factoriels (F1, F2 et F3) du Bloc2.

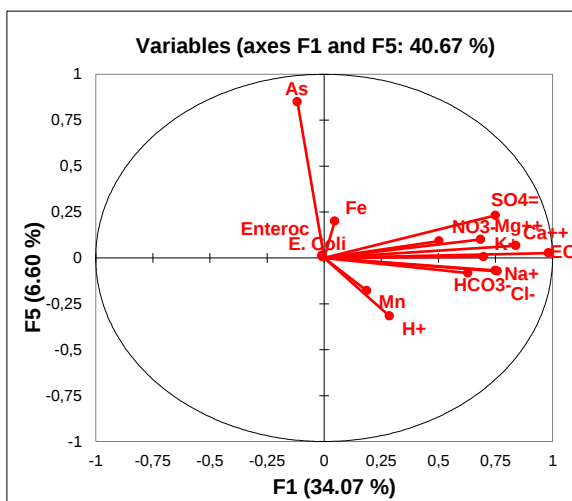
▲ **Le cinquième axe factoriel** représente la présence d'arsenic ; celle-ci étant plutôt liée aux sulfates. Il s'agit de l'altération d'Arseno-Pyrites, minéral rare dans la région, ce qui explique le faible pourcentage (6.6%) de variance notée dans cet axe.

▲ Avec 6.3%, **le sixième axe factoriel** classe dans l'ordre nitrate-manganèse-fer, le nitrate étant opposé au manganèse et au fer. Il s'agit de la séquence caractéristique des réactions redox. Le nitrate stable dans des conditions oxydantes dans lesquelles le manganèse et le fer ne sont pas solubles, disparaît par dénitrification lorsque les conditions deviennent anoxiques puis réductrices favorables à la solubilisation du manganèse puis du fer.

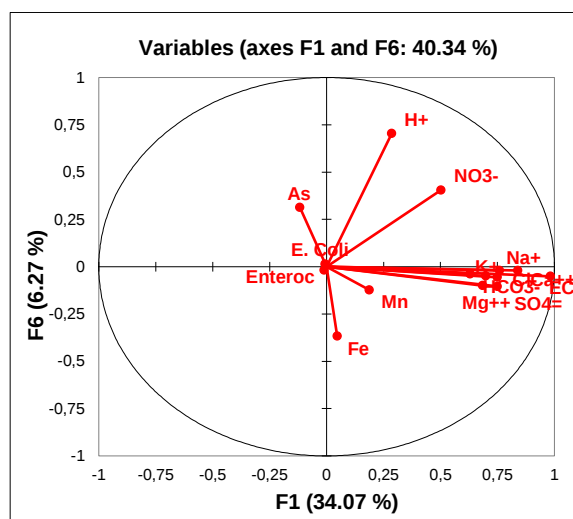
Les autres axes factoriels sont extrêmement faibles et représentent moins de 5% de la variance totale.



Quatrième plan factoriel de l'ACP réalisée sur l'ensemble du bloc 2.



Cinquièmes plans factoriels de l'ACP réalisée sur l'ensemble du bloc 2.



Sixième plan factoriel de l'ACP réalisée sur l'ensemble du bloc 2.

Figure 19: Diagramme de contribution des Plans Factoriels (F4, F5 et F6) du Bloc2.

III. 4. Plans factoriels

L'un des avantages de l'ACP est qu'elle fournit à la fois une visualisation optimale des variables et des données, des diagrammes (*biplots*) mélangeant les deux (Figure 19). Néanmoins, ces représentations ne sont fiables que si la somme des pourcentages de variabilité associés aux axes de l'espace de représentation, est suffisamment élevée. Si ce pourcentage est élevé on peut considérer que la représentation est fiable.

Les résultats de l'ACP permettent de représenter simultanément dans l'espace à la fois les observations et les variables, comme il est illustré sur le diagramme de contribution des plans factoriel **AF1/AF2** reliant la relation entre la minéralité et le faciès chimique des eaux.

Pour les **premiers plans factoriels**, l'ensemble des échantillons d'eau forme un nuage avec des allongements qui ne sont pas dans la direction des axes factoriels (Figure 20a, b et c).

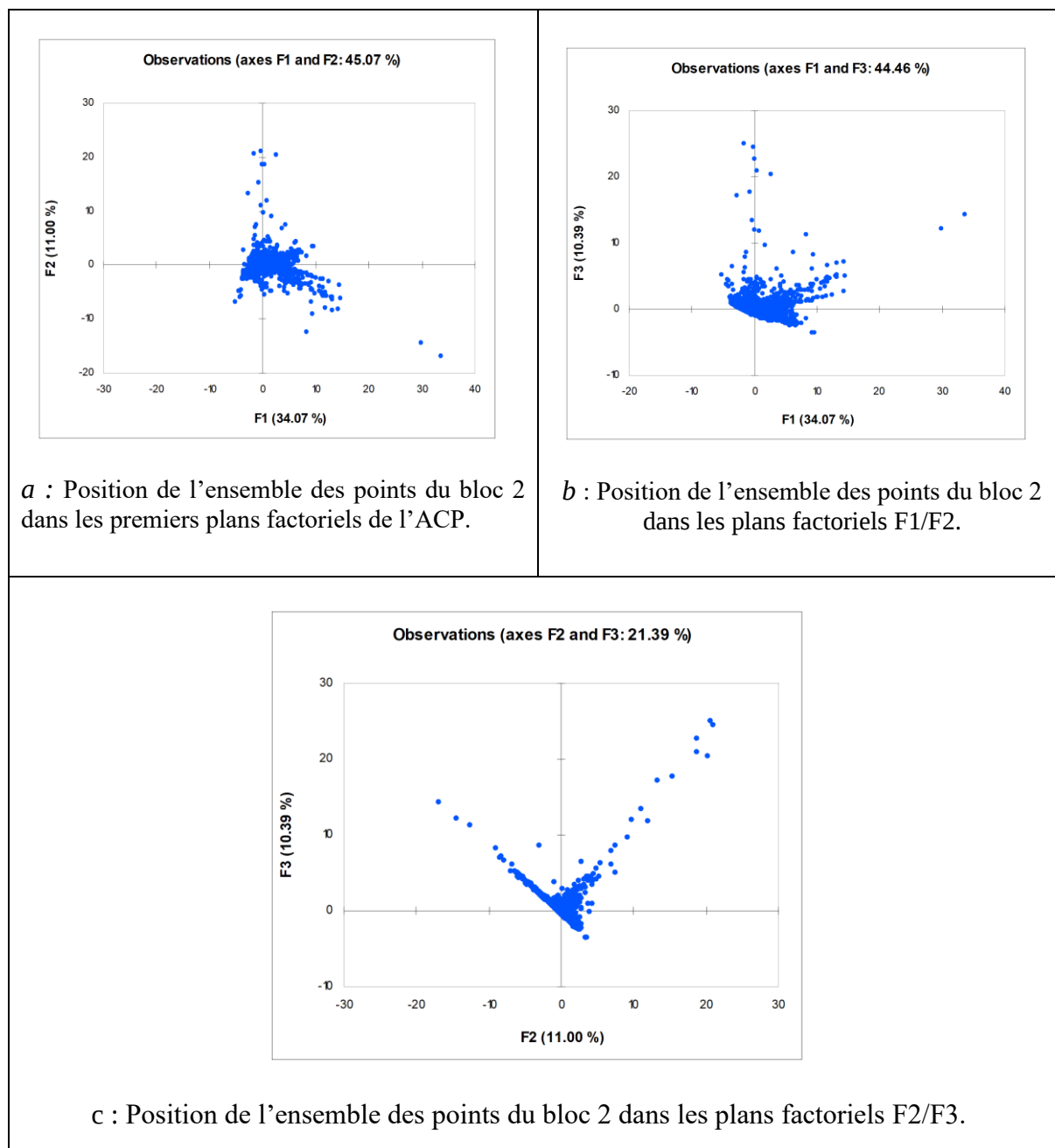


Figure 20 : Position de l'ensemble des points du bloc 2 (5 294 points) dans les premiers plans factoriels de l'ACP.

La minéralité exposée en axe factoriel 1 est généralement liée à la nature lithologique de la région PACA et au temps de contact entre l'eau et la roche. Ainsi, la variation de la pluie et de

la sécheresse durant les dernières années a un impact sur la charge bactérienne fécale selon la ressource d'eau et les nappes. Ceci permet de guider la surveillance selon la situation climatique.

Le diagramme de contribution des plans factoriels F1/F2, expose l'hétérogénéité de la minéralité dans différents prélèvements de PACA. Son augmentation dans les eaux souterraines s'explique par plusieurs mécanismes :

- ✎ Le temps de séjour de l'eau dans la roche : plus une eau est en contact avec une roche pendant longtemps, plus elle la dissout et augmente sa teneur en éléments chimiques, et par conséquent, sa minéralité.
- ✎ La solubilité des minéraux : certains minéraux sont plus solubles que d'autres, et se dissolvent donc bien plus rapidement, ce qui implique que même pour un temps de séjour faible, la minéralité d'une eau passant par des zones très solubles augmentera très fortement et rapidement.

Ce résultat provient du fait que des ensembles de points ont leur propre relation entre les paramètres et donc leur propre direction des axes factoriels, alors que les relations globales entre les différents ensembles de points présentent une relation différente et donc une direction différente pour les axes factoriels.

Les méthodes de calculs de l'ACP permettent de modifier, au sein d'un plan factoriel, les directions soit en maximisant l'orthogonalité, soit en minimisant les distances, ... Ces calculs restent uniquement dans le cadre d'un plan factoriel ; le pourcentage de variance expliquée par ce plan factoriel reste constant, mais le pourcentage de variance expliqué par chacun des nouveaux axes change du fait de la rotation.

Dans ce travail, il est indispensable de maintenir l'indépendance des sources de variation de la composition chimique afin d'être certain que le même processus n'est pas comptabilisé deux fois. De ce fait, la méthode *Orthomax* est choisie car elle assure l'orthogonalité des vecteurs propres et donc l'indépendance des processus représentés par l'axe factoriels rotés (tournés).

IV. Résultats de la rotation Orthomax

Après rotation Orthomax, les axes factoriels rotés sont nommés D1, D2 et D3. La contribution des différents paramètres aux axes rotés est reportée dans le tableau 5, et représentée au niveau des plans factoriels dans les figures 22 (a, b et c).

Tableau 5 : Corrélation entre les variables et les plans factoriels après la rotation Orthomax.

	D1	D2	D3
Entéroco.	-0.435	-0.196	0.753
E. Coli	-0.413	-0.219	0.761
EC	0.628	0.570	0.498
HCO₃⁻	0.709	-0.034	0.427
H⁺	0.085	0.297	0.106
Ca⁺⁺	0.767	0.207	0.481
Cl⁻	0.129	0.873	0.297
Mg⁺⁺	0.605	0.194	0.390
K⁺	0.246	0.647	0.306
Na⁺	0.106	0.891	0.286
SO₄⁼	0.541	0.391	0.357
Fe	-0.037	0.108	0.008
Mn	-0.141	0.414	0.044
NO₃⁻	0.482	0.061	0.336
As	-0.242	0.147	-0.114

Le premier axe factoriel nommé D1 illustre la minéralité des eaux moins profond, le deuxième et le troisième axes factoriel (D2, D3) représentent la relation entre les paramètres micro-bactériologique et ceux physico-chimiques. On marque que cette contamination fécale 'Entérocoque et Escherichia Coli' dépend de la variation de minéralité des eaux.

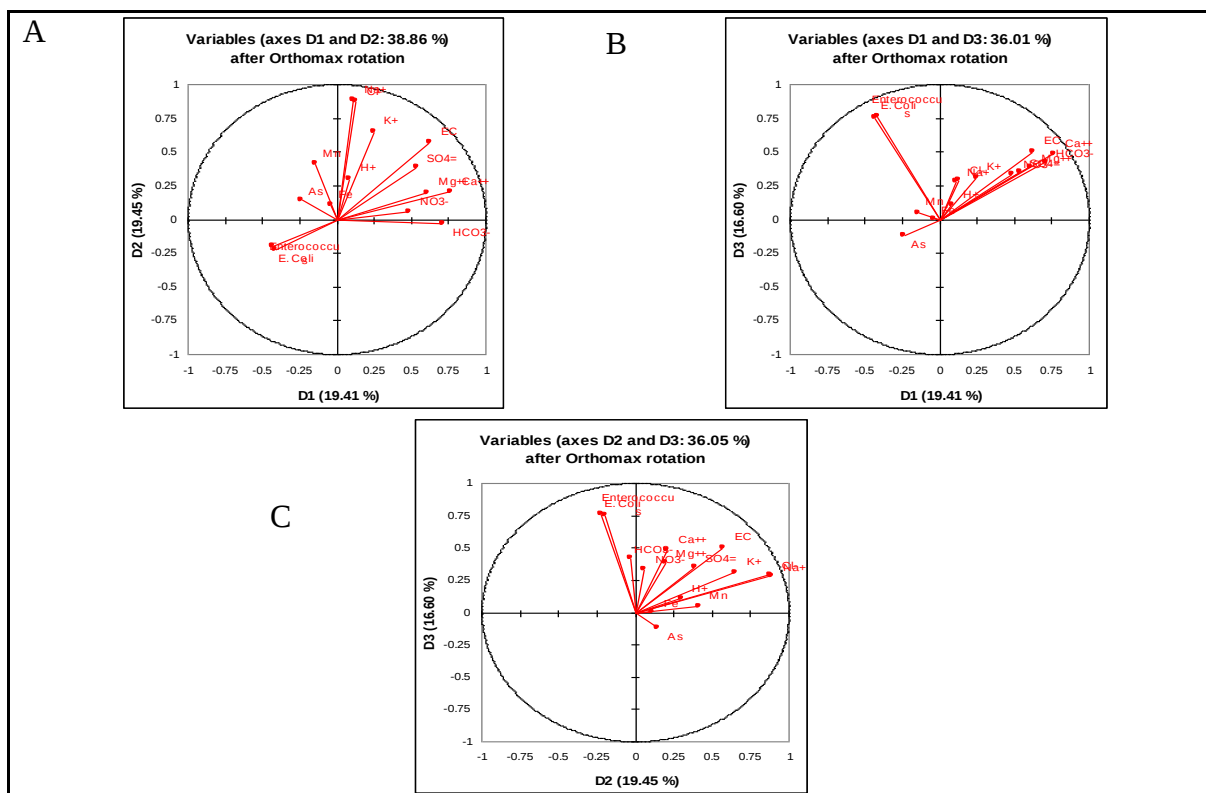


Figure 21 : Les plans factoriels D1, D2 et D3 des eaux souterraines du bloc 2 après rotation Orthomax

Le diagramme de contribution des plans factoriel **AF3/AF1** illustre la relation entre les paramètres micro-bactériologique et ceux physico-chimiques (Figure 20 et Figure 21(a et b)). D'après ces plans Factoriels, la zone d'étude présente généralement des eaux souterraines très peu marquée par la contamination fécale, en raison essentiellement aux eaux de ruissellement (surtout en système karstique). Par contre, elle se caractérise par une forte variation de minéralité (Figure 22). Ces nouveaux axes factoriels seront traités par la suite de ce travail de la même manière que les axes factoriels avant rotation.

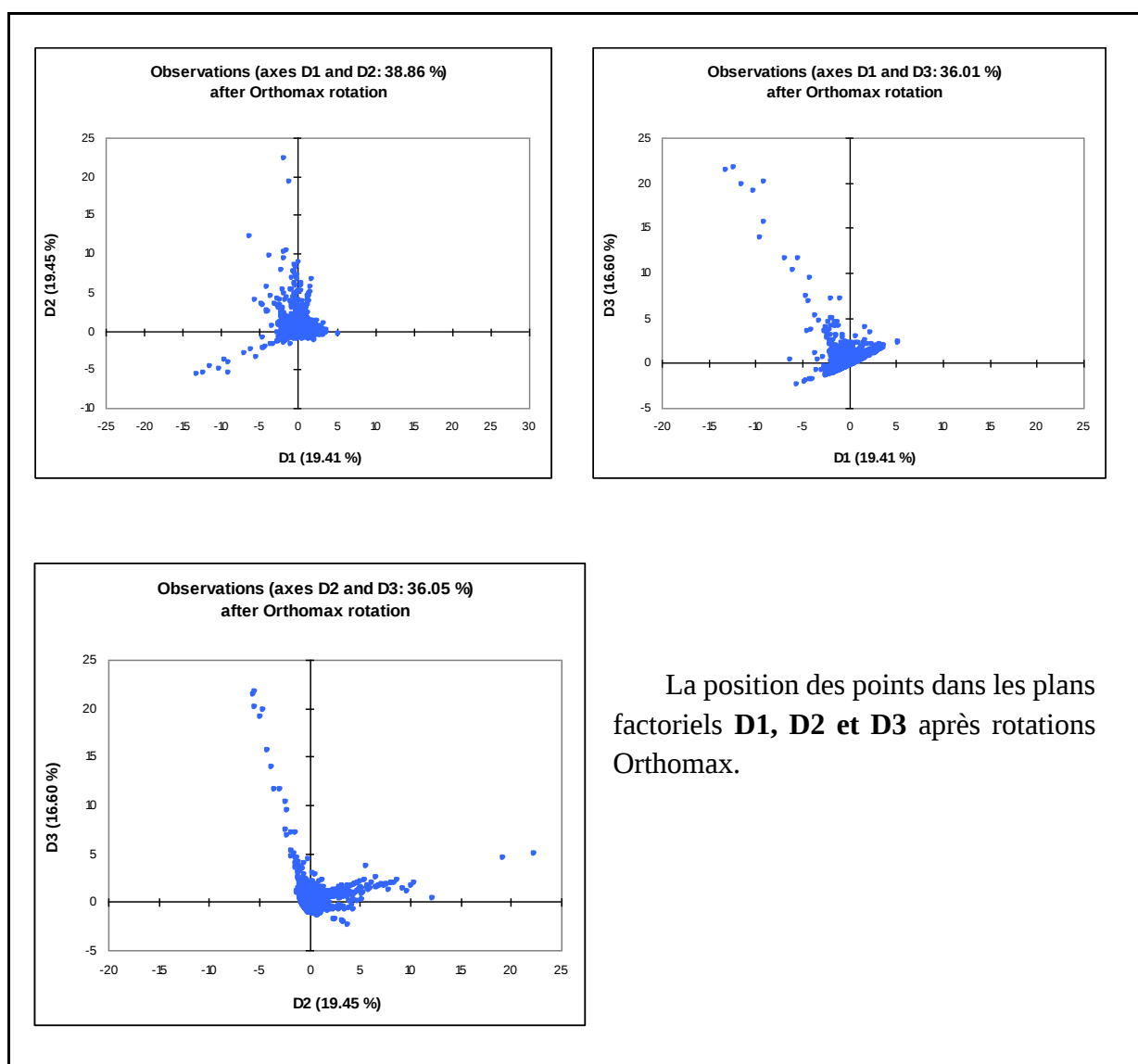


Figure 22 : Position des points dans les plans rotés.

V. Cartographie des paramètres et des axes factoriels à l'échelle de la région PACA

L'agence régionale de santé ARS PACA produit des cartes de distribution spatiale de la qualité des eaux, en particulier des eaux distribuées. En général, ces cartes concernent le taux de conformité avec les normes de potabilité. Ceci permet d'avoir une appréciation globale de la répartition régionale des zones où les efforts de protection doivent être effectués. La comparaison de la situation tous les 5 ans permettent d'autre part de suivre l'amélioration de la qualité des eaux distribuées.

Il est possible de représenter les cartes de qualité des eaux brutes pour les différents paramètres du bloc 2. L'observation de ces cartes montre de fortes ressemblances (Figure 23).

Ainsi, les cartes de la conductivité électrique, de Ca, Mg et SO₄ présentent de fortes similitudes (Figure 23). Les fortes teneurs correspondent aux zones basses, notamment dans les zones littorales, et à l'aval des vallées alluviales, alors que les faibles valeurs correspondent aux hautes montagnes, en particulier dans les massifs du Mercantour et les sommets des Hautes Alpes.

Ainsi, il existe une redondance de l'information de ces paramètres qui jouent un rôle important dans le premier axe factoriel. La cartographie de ce dernier montre une similitude avec les cartes de ces différents paramètres. Elle synthétise l'information globale de la minéralisation des eaux et peut remplacer les différentes cartes des éléments majeurs en constituant une carte de synthèse. Dans ce cas l'axe factoriel regroupe l'information de plusieurs paramètres de qualité des eaux (Figure 24).

Les vallées alluviales se dessinent au milieu des montagnes, notamment pour la Durance et ses principaux affluents comme la Bléone, le Buech... de même que les fleuves côtiers de la Côte d'Azur. En effet, dans ces vallées, les eaux sont nettement plus minéralisées que sur les versants voisins ; la pente est plus faible que sur les versants, la vitesse d'écoulement plus lente et le temps de contact eau-roche peu important ; ce qui favorise une altération plus poussée et une minéralisation plus importante.

De la même manière, les cartes des deux paramètres microbiologiques sont tout à fait similaires. Les zones de contamination bactériologique sont toujours ponctuelles, formant de petites taches sur les cartes. Toutefois, leur nombre est important dans les vallées alpines du fait de l'élevage, mais aussi sur la côte d'azur, en zone littorale du fait de la forte densité de population et de la vulnérabilité du milieu.

Les cartes du second et du troisième axe factoriel montrent la même distribution avec ses différentes composantes expliquée dans le paragraphe précédent. Dans ce cas, apparaît un autre

intérêt de la cartographie des axes factoriels. Du fait du calcul de l'ACP à partir de la matrice de corrélations, ce calcul sépare différentes sources de variabilité affectant les variations d'un paramètre, ici la bactériologie. La contamination bactérienne est liée à plusieurs facteurs (élevage, densité de population, vulnérabilité du milieu). L'ACP permet de distinguer les différentes composantes des variations d'un paramètre.

De même, les cartes de concentration en Na et Cl présentent de fortes similitudes (Figure 24) avec de fortes valeurs en zone littorale du fait de l'influence marine. L'arsenic est localisé au contact des massifs cristallins et métamorphique voisin. Les nitrates sont essentiellement présents dans les massifs calcaires karstiques dans lesquels l'eau circule rapidement et elle est oxygénée, ce qui limite le processus de dénitrification.

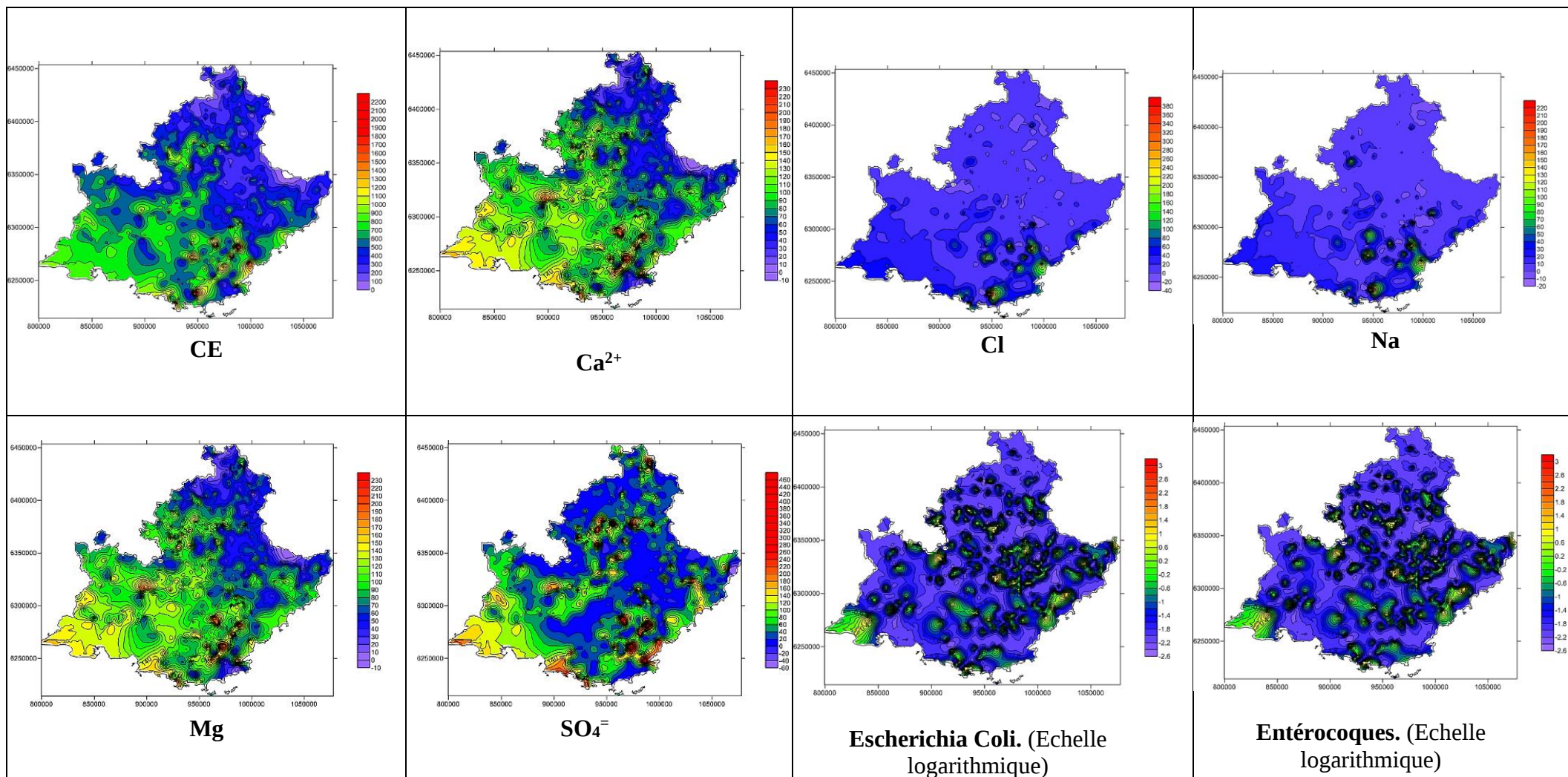
Le manganèse est essentiellement présent dans la nappe d'accompagnement des cours d'eau, plus particulièrement en zone basse où la pente est faible, où les eaux stagnent favorisant des processus de réduction qui permettent la solubilisation de cet élément. Il est à noter que la plaine des Sorgues et la basse-moyenne vallée de la Durance sont particulièrement sensibles à ce processus.

La distribution spatiale de teneurs en fer présente quelques similitudes avec celle du manganèse, avec une légère différence. En effet, les zones basses sont marquées par de fortes valeurs en fer mais il existe aussi des zones basses comme le contact entre la nappe de la Crau et la Camargue où les conditions sont très anoxiques et les processus redox permettent la solubilisation du manganèse et du fer. En revanche dans les zones karstiques, il s'agit des colloïdes ferriques très abondants en surface et pouvant être entraînés par le ruissellement qui contamine parfois les sources dans cet environnement.

La carte de l'axe factoriel 5 est tout à fait comparable à celle de l'Arsenic, les valeurs élevées étant localisées au contact entre les massifs cristallins et métamorphique voisin.

Les cartes de 5 premiers axes factoriels synthétisent ainsi plus de 69 % de l'information des 15 paramètres bactériologique et physico-chimiques. Ceci constitue une concentration de l'information en un nombre réduit de cartes.

Par ailleurs, l'Approche par ACP permet de distinguer plusieurs sources de variation spatiales affectant les concentrations d'un même paramètre en utilisant les corrélations avec les autres paramètres. Concernant les axes rotés, la comparaison entre la carte de l'axe factoriel 1 traduisant la minéralité des eaux et l'axe D1 roté, montre de fortes similitudes (Figure 23). La carte D1 donne une meilleure distribution des eaux peu minéralisées des zones montagneuses, notamment dans le bassin versant du Verdon. La carte de l'axe roté D2 ressemble à la carte de l'axe factoriel 2, mais elle traduit mieux le caractère ponctuel des contaminations fécales.



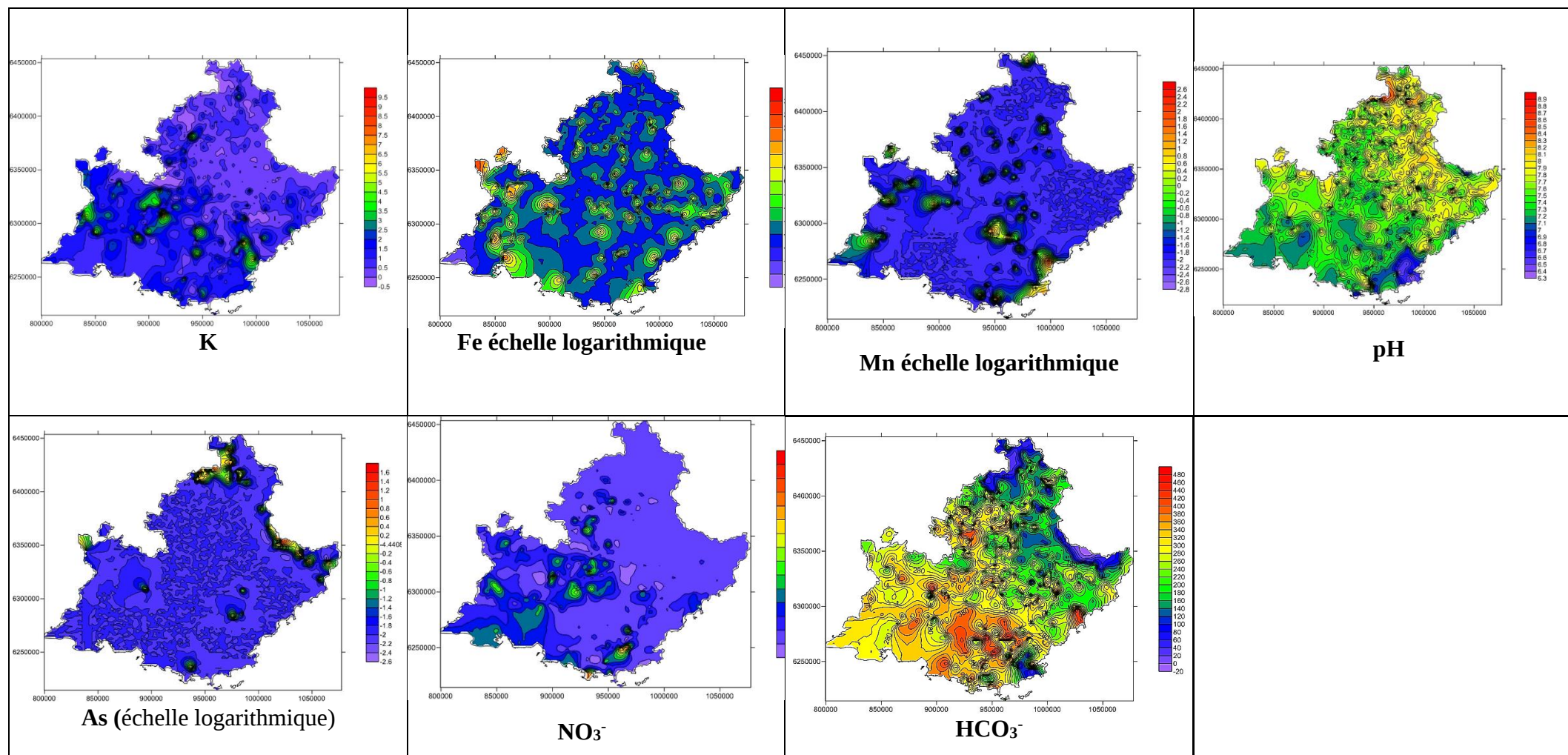


Figure 23: Cartographie des paramètres microbiologiques et physicochimiques des eaux souterraines de la région PACA.

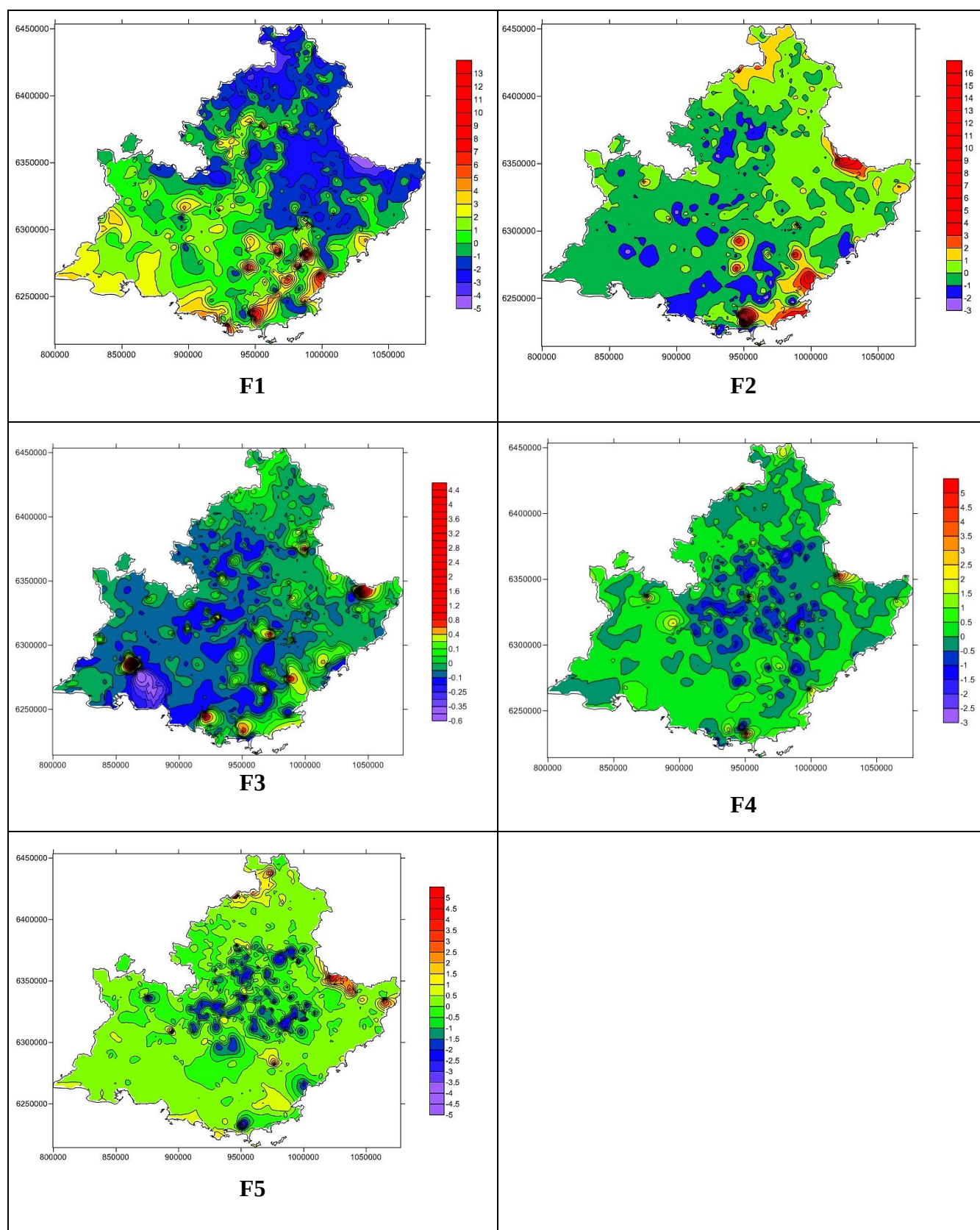


Figure 24 : Cartographie des Axes Factoriels de l'ACP des eaux souterraines de la région PACA.

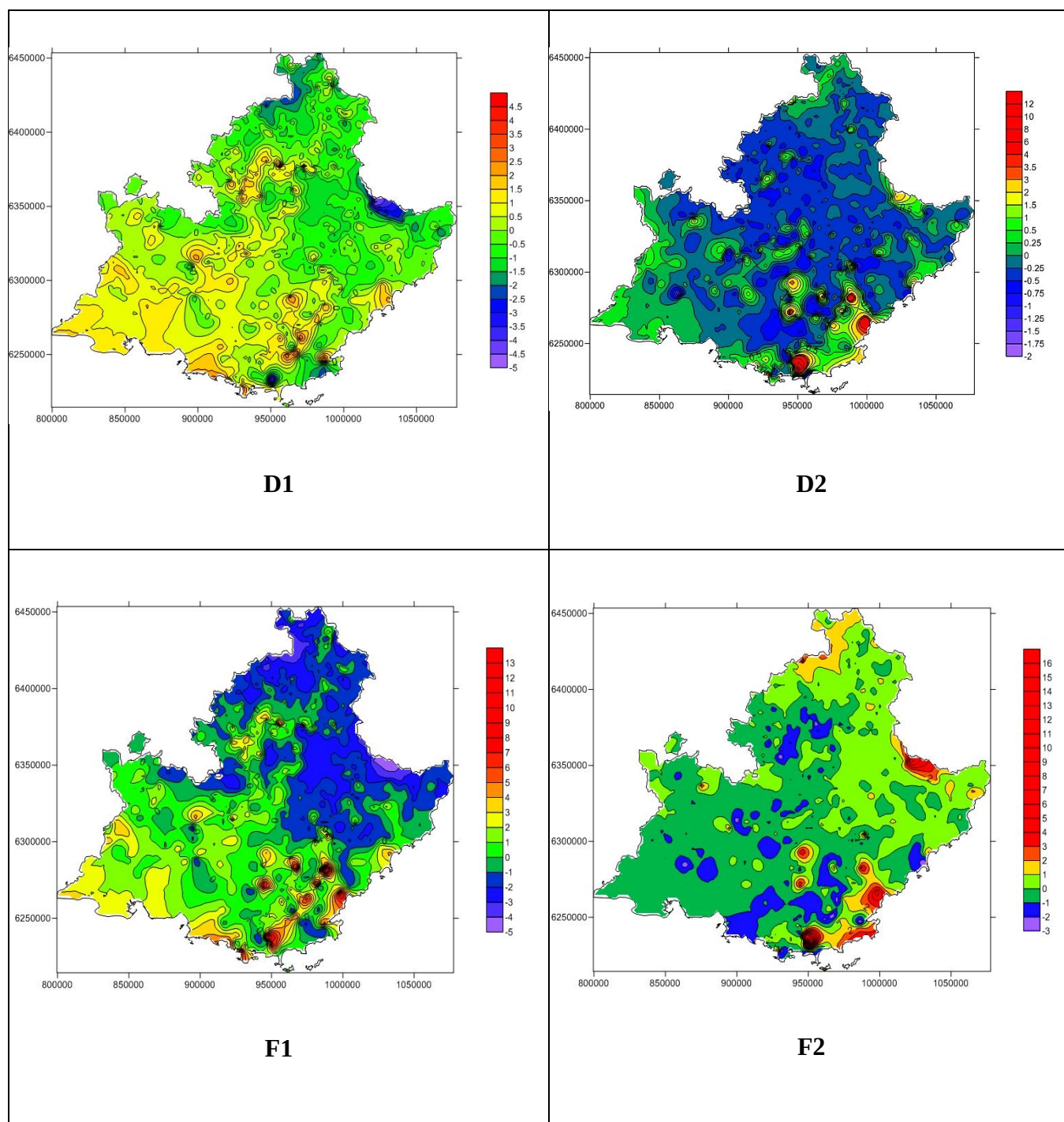


Figure 25: Carte des Axes Factoriels D1 et D2 après rotation Orthomax des axes F1 et F2 des eaux souterraines de la région PACA.

CONCLUSION

Les eaux souterraines destinées à la consommation humaine dans PACA présentent une forte variabilité spatio-temporelle de faciès, de charge en CO₂ et de la minéralité. La forte variabilité et le nombre important de paramètres a conduit à choisir des approches synthétiques pour l'étude de l'information. Le calcul de l'ACP effectuée sur 15 paramètres physico-chimiques et bactériologiques des 5284 analyses a permis de dégager des informations suivantes :

- ★ De nombreuses informations sont redondantes. Elles peuvent être synthétisées en un nombre plus réduit de macro paramètres que constituent les axes factoriels. Ainsi les 15 paramètres peuvent être réduits à 11 axes factoriels en conservant 97% de l'information ou 9 axes factoriels synthétisant plus de 90% de cette information.
- ★ Les axes factoriels sont des macro-paramètres et peuvent être cartographiés au même titre qu'une conductivité électrique ou une abondance en Entérocoques fécaux.
- ★ Les axes factoriels permettent de séparer deux ou plusieurs sources de variation spatiale d'un paramètre. Ils permettent alors d'aller plus loin dans la cartographie des mécanismes responsables des caractéristiques chimiques ou biologiques des eaux.
- ★ Ainsi si un processus est capable d'influencer les concentrations de plusieurs éléments, chacun à un degré divers, la concentration d'un élément peut elle-même être influencée par plusieurs processus. L'ACP permet de séparer les mécanismes indépendants de variabilité.
- ★ La région PACA est vaste, ses milieux naturels sont nombreux et très différents comme le sont ses grands ensembles géologiques. De ce fait chacun de ces milieux possède ses propres lois de distribution spatiale, ses propres mécanismes abiotiques, biologiques ou anthropiques pouvant affecter la qualité des eaux. De ce fait, le calcul sur l'ensemble des données, c'est-à-dire sur des milieux très différents, mélange les différentes sources de variabilité spatiale. Un processus important localement voit son importance diluée dans la masse des données et il peut même faire disparaître des résultats de calcul de l'ACP effectuée sur toute la région. De ce fait un mécanisme représenté par un axe factoriel fort à l'échelle locale peut arriver en dernier ordre dilué dans le bruit statistique au niveau régional.

Bien que la méthode de l'ACP revêt un intérêt indéniable dans l'aide à l'interprétation de l'information de la base de données SISE-EAU au niveau régional par la synthèse d'informations, elle montre de fortes limitations qui sont liées à un effet de taille lors du travail à l'échelle régionale. Cependant une approche plus fine, plus adaptée à la réalité hydrogéologique de la région doit être développée. C'est ce que nous développerons dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 2 :

ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'ETUDE DE MECANISMES RESPONSABLES DE LA QUALITE DE L'EAU A L'ECHELLE REGIONALE.

Le chapitre précédent a montré la possibilité de synthétiser l'information dispersée dans de nombreux paramètres en un nombre plus réduit de macro-paramètres constitué par des axes factoriels. Il s'agit d'une réduction dimensionnelle.

Les avantages sont évidents de par le caractère synthétique de l'information mais aussi par la séparation d'informations mélangées au sein de chaque paramètre. Cependant une limite importante est apparue. Il s'agit du fait que le travail sur un mélange d'unités naturelles très différentes, ayant chacune leur propre mécanisme responsable de la qualité des eaux, conduit à diluer l'information lorsqu'elle est traitée à l'échelle de la région. De ce fait, elle devient difficile à déceler, ou à étudier lorsqu'elle ne disparaît pas dans le bruit statistique. Il convient de mettre au point une méthodologie moins globalisante que dans le chapitre précédent.

Il faudrait traiter l'information par de grandes unités fonctionnelles de la région PACA pour avoir une approche plus spécifique, moins globale. Cependant le problème est de définir objectivement, sans a priori, ces grands ensembles afin d'avoir une approche la plus objective possible.

Il reste à définir une méthodologie adaptée ne faisant pas appel à une connaissance préalable de la géographie régionale, de sorte à pouvoir ultérieurement être généralisée à d'autres régions. Ce sera l'objet de ce chapitre.

I. Présentation de la méthodologie adoptée

La méthodologie proposée dans ce travail combinera une approche mathématique et la cartographie SIG de différentes masses d'eau souterraines définies par le BRGM.

✎ **La première étape** consiste en une réduction dimensionnelle. Le calcul de l'ACP sur l'ensemble du bloc étant effectué, les 11 premiers axes factoriels sont retenus, totalisant 97% de l'information. Les 4 derniers axes factoriels sont exclus car ils concentrent le bruit statistique.

✎ **Deuxième étape** se base sur la sélection des analyses de données selon la Masse d'Eau Souterraine (MESO) dans laquelle elle a été extraite.

Chaque analyse est identifiée par une date de prélèvement, mais aussi par un code d'installation qui correspond au point de prélèvement. Pour les eaux brutes, il s'agit en général du captage ou du forage, plus rarement d'un bassin collecteur de plusieurs sources voisines.

La plupart du temps, les coordonnées géographiques de ce point de prélèvement sont connues, avec parfois des confusions entre les différents systèmes de coordonnées métriques. Un travail de vérification a été réalisé et dans le cas d'absence de coordonnées, un travail de recherche et de croisement avec les données du Géoportail (IGN, 2020) ; (Infoterre, 2020) a permis de localiser les coordonnées manquantes.

Pour des raisons de sécurité évidentes, aucune coordonnée ne sera explicitée dans cette thèse. Chaque point de prélèvement est positionné sur un SIG contenant les polygones délimitant chacune des masses d'eau souterraines de la région PACA. Il est alors possible de sélectionner automatiquement la masse d'eau concernée et d'affecter cette information à chaque point de prélèvement (Code Installation) et donc à chaque analyse d'eau (Touiouine et al. 2020).

Quelques difficultés peuvent apparaître car dans certains cas, tel le cas où la profondeur de forages n'est pas précisée et plusieurs masses d'eau peuvent être superposées en un même point, il peut y avoir un doute sur la masse d'eau concernée. Ces cas sont très peu nombreux.

Au total 70 masses d'eau souterraine de la région PACA ont été concernées par ce travail. La liste et la dénomination de chaque masse d'eau est donnée en annexe (Tableau 46).

Au niveau européen, les masses d'eau sont identifiées par un code. En France il s'agit d'un code de type FRDGXXX, avec XXX un nombre à trois chiffres. Pour plus de commodité, et compte tenu que tout le travail se situe en France, seuls les trois chiffres seront retenus pour identifier la masse d'eau souterraine. Ainsi, la FRDG355 « alluvions de la Bléone », sera identifiée par le code 355.

Troisième étape : Calcul des caractéristiques moyennes de chaque masse d'eau.

Pour chacune de 70 masses d'eau, les valeurs moyennes et les écarts types des 11 premiers axes factoriels ont été calculées. Ainsi, chaque masse d'eau est caractérisée par ces 11 valeurs. Le tableau de valeurs moyennes est donné en annexe (Tableau 45).

Afin d'apprécier la dispersion des caractéristiques des différentes MESO, un diagramme en croix représentant les moyennes et écart types dans le premier plan factoriel est représenté sur la figure 26.

Il est important de noter qu'il s'agit là uniquement d'une projection de **l'hyper-espace à 11 dimensions** dans un plan, en l'occurrence le premier plan factoriel.

L'examen de la distribution spatiale des moyennes des masses d'eau dans le premier plan factoriel fait apparaître des regroupements entre masses d'eau. Quelques ensembles de

masse d'eau s'individualisent. Cependant, *les diagrammes en croix*, traduisant non seulement les caractéristiques moyennes mais aussi la variabilité, montre que la variabilité des caractéristiques chimiques au sein d'une même masse d'eau souterraine et qui sont très importante, en particulier au regard de la différence entre les valeurs moyennes des MESO. Ce résultat doit conduire à la prudence dans la possibilité de classer les MESO à partir des valeurs moyennes des axes factoriels.

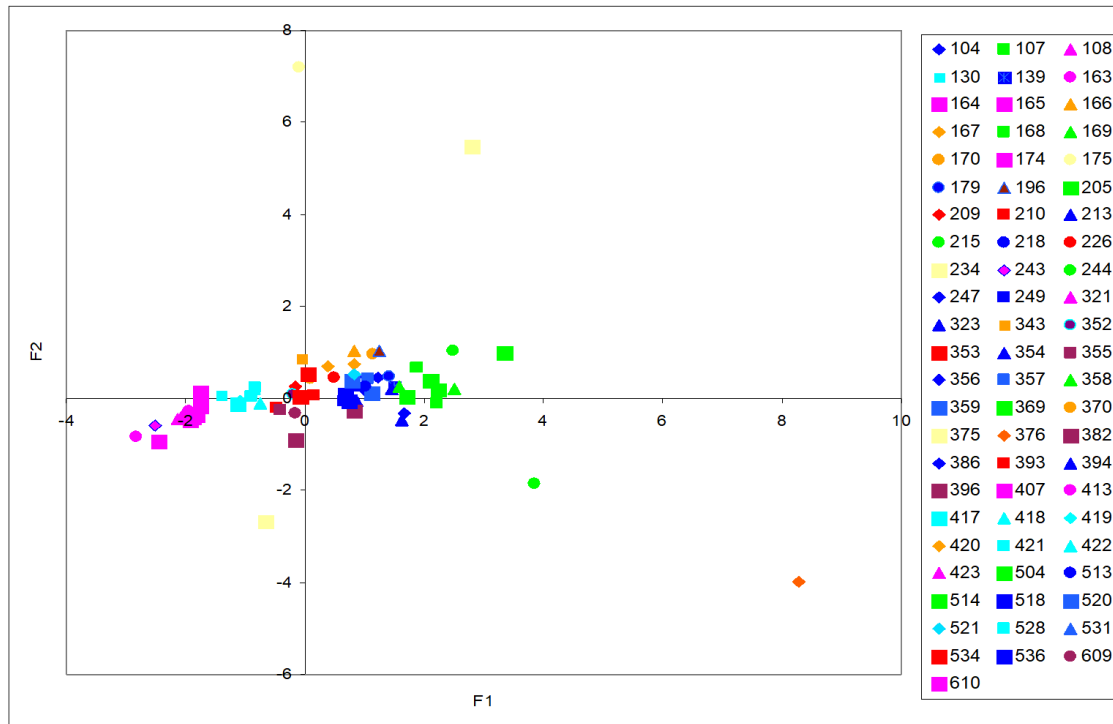


Figure 26 : Diagramme des moyennes des masses d'eaux du plan factoriel F1/ F2 de la région PACA.

Cette forte variabilité au sein de chaque masse d'eau s'explique par plusieurs facteurs. D'une part la variabilité temporelle pour chaque point de prélèvement d'eau, notamment pour les sources. Ainsi, selon que le prélèvement soit effectué en période sèche ou après de fortes pluies, les résultats d'analyse seront différents, aussi bien pour la physico-chimie que pour la bactériologie.

Ensuite, il convient de considérer que les différents points de prélèvement d'eau, même s'ils sont situés dans une même masse d'eau, ont leur spécificité, par exemple liée à la pression anthropique de leur aire d'alimentation, pression qui est propre à chaque point d'eau (Figure 27 et 28).

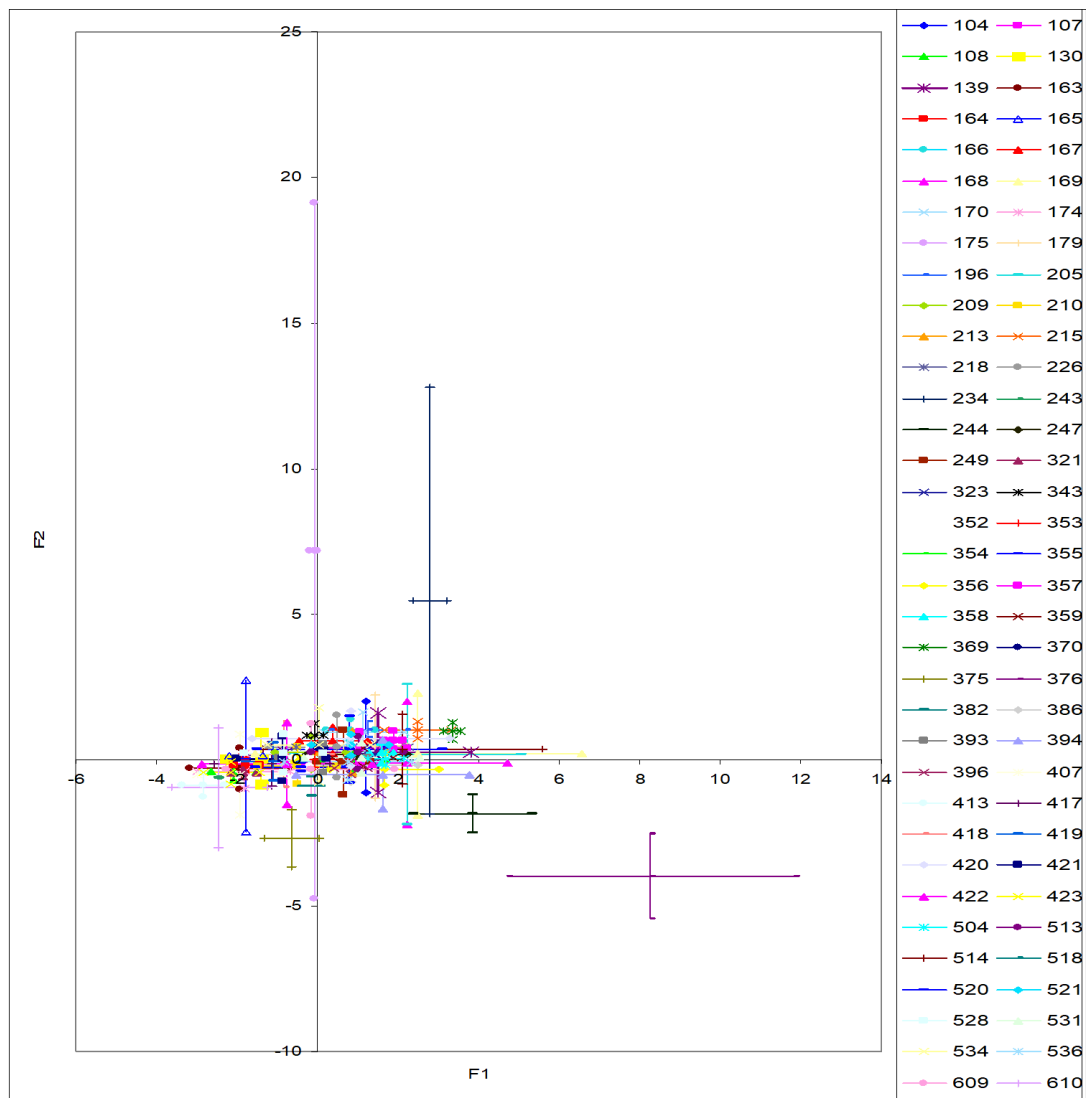


Figure 27 : Diagramme des Ecarte-Type des masses d'eaux du plan factoriel F1/ F2 de la région PACA.

Enfin, au sein d'une même masse d'eau souterraine, des variations de composition sont habituelle, si l'on considère l'amont et l'aval de nappe d'accompagnement de cours d'eau par exemple. Aussi, compte tenu de tout ceci, il est décidé de ne pas utiliser uniquement le premier plan factoriel pour mesurer le degré de similitude entre masse d'eau, mais l'ensemble des 11 axes factoriels, c'est-à-dire la quasi-totalité de l'information disponible afin d'avoir une appréciation plus globale. Ce choix est critiquable, une étude comparative avec des calculs sur un nombre moins important d'axe factoriels pourrait être envisagée, mais elle n'a pu être menée à bien faute de temps.

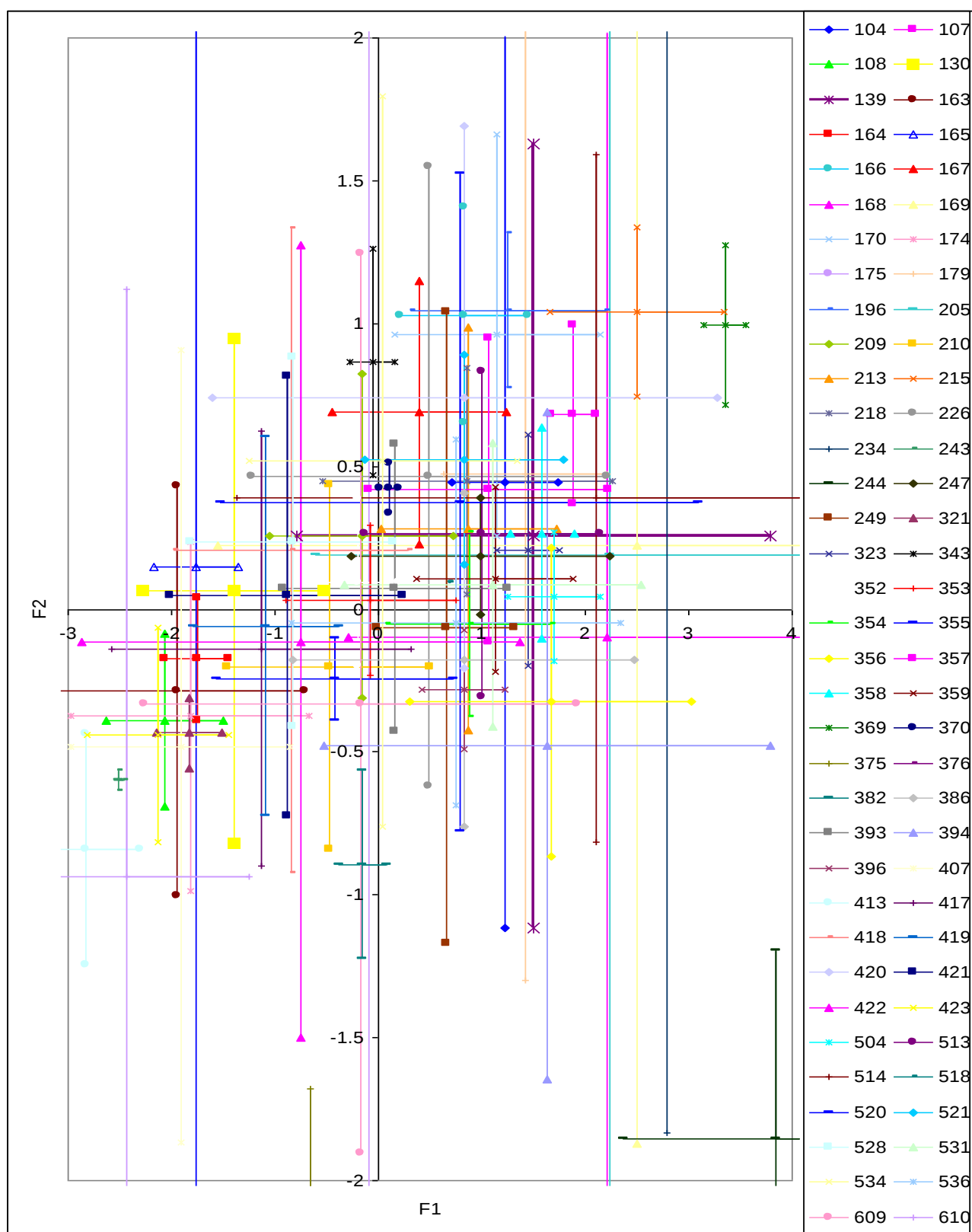


Figure 28 : Diagramme des Ecarte-Type des masses d'eaux du plan factoriel F1/ F2 de la région PACA (détaillé).

Pour mesurer le degré de ressemblance ou de dissemblance entre les différentes masses d'eau à partir des valeurs moyennes des 11 premiers axes factoriels, une approche intégrant ces 11 dimensions peut être mise en œuvre.

Il est important de noter que ces 11 premiers axes factoriels totalisent plus de **97% de la variance**, c'est-à-dire de l'information, et que les valeurs des analyses sur chacun des axes factoriels intègrent en pondération la racine carrée de la valeur propre correspondante. Ainsi, l'importance relative des différents axes factoriels entre eux est automatiquement prise en compte.

II. Application de la classification hiérarchique ascendante non supervisée

La classification hiérarchique ascendante (**CHA**) est une méthode de classification qui permet de dissimiler entre les axes que l'on veut regrouper.

🔗 **La quatrième étape** de la méthodologie utilisée dans cette étude est la classification des MESO (Masses d'Eau Souterraine) selon leurs caractéristiques moyennes. Pour ceci, les valeurs moyennes pour chaque masse d'eau souterraine des 11 premiers axes factoriels ont été utilisées pour réaliser une classification hiérarchique ascendante non supervisée, afin de classer les 70 MESO par degré de ressemblance.

Une arborescence est ainsi générée en fonction du degré de dissemblance, des 11 axes factoriels confondus. Le résultat de cette classification hiérarchique ascendante non supervisée est représenté sur la figure 30.

Le résultat fait apparaître des groupes de MESO présentant des caractéristiques proches, tous paramètres confondus. Chaque groupe se différencie des autres groupes de MESO. Cependant, quelques masses d'eau se retrouvent isolées entre deux groupes. Ce sont des singularités.

C'est par exemple le cas de la **FRDG244** Poudingues pliocènes de la basse vallée du Var, située entre les groupes 2 et 3, mais pouvant dans la pratique être associée aussi bien à l'un comme à l'autre de ces deux groupes. C'est aussi le cas de la **FRDG376** Alluvions de l'Argens qui est isolé, mais rattachable de loin au groupe 3. D'un point de vue géologique, ceci est cohérent. Enfin, la **FRDG249** Sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron est isolé du groupe 1, mais se rattache à celui-ci. Encore une fois, ce rattachement (et cette distance avec les autres masses d'eau du groupe 1) est cohérent avec la géologie

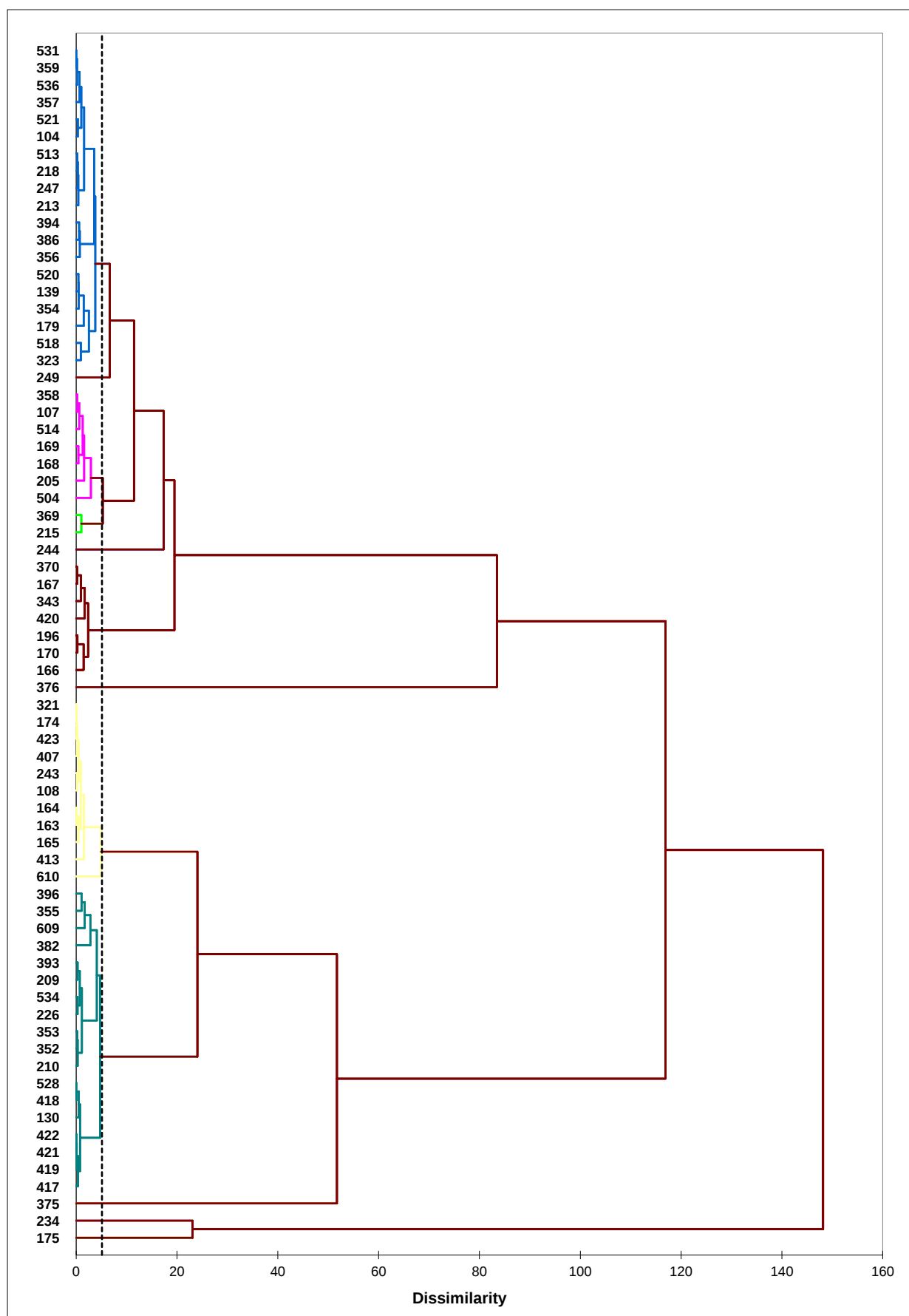


Figure 29 : Arbre hiérarchique des masses d'eaux souterraines de PACA.

II. 1. Groupe des masses d'eaux souterraines

Dans le but de partitionner les masses d'eaux souterraines en différents groupes et sous-groupes, la technique statistique de classification hiérarchique ascendante a été appliquée. On cherche à ce que les masses d'eaux regroupées au sein d'une même classe (homogénéité intra-classe) soient le plus semblables possibles tandis que les classes différentes soient le plus dissemblables (hétérogénéité inter-classe).

La figure 31 expose le dendrogramme de l'ensemble des masses d'eaux souterraines du premier groupe, issu de la CHA de l'ensemble des données de MESO traitées de PACA (Figure 29). L'abscisse indique le degré de dissemblance et l'ordonnée le code de la masse d'eau souterraine. Par ailleurs, chaque groupe fait apparaître des sous-groupes de MESO, ces derniers seront cartographiés ultérieurement mais non étudiés dans le détail.

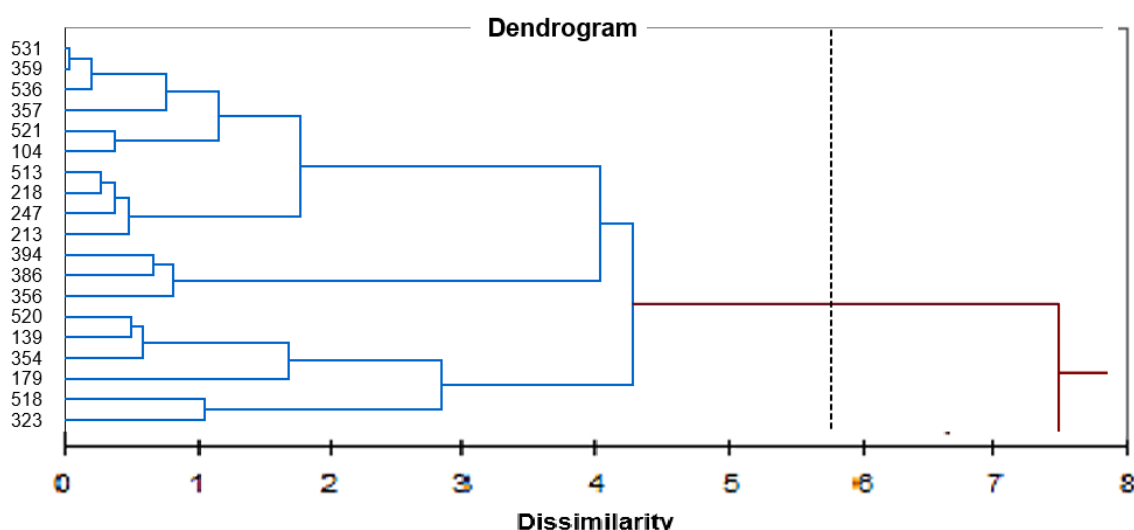


Figure 30 : Arbre hiérarchique des masses d'eaux souterraines de groupe1.

🔗 **Cinquième étape :** la définition des groupes des MESO.

A partir des résultats de la classification hiérarchique ascendante non supervisée, **8 groupes de MESO** ont été définis (Figure 32). Et chaque groupe présente une certaine homogénéité, et il peut être étudié de manière indépendante, avec une ACP spécifique à ce groupe. Par ailleurs, au sein de chaque groupe, des sous-groupes peuvent être également identifiés au sein de certains de ces groupes.

II.2. Sous-groupes des masses d'eaux souterraines

Après la détermination des différents groupes des masses d'eaux souterraines sur l'ensemble de PACA, il est possible d'identifier les sous-groupes en diminuant le découpage de dissimilarité selon la cohérence souhaitée.

Une vue partielle du dendrogramme sur un groupe de Masses d'Eaux Souterraines avec mise en évidence des sous-groupes est exposée sur la figure 31. L'étude détaillée des sous-groupes fait l'objet des chapitres 6 et 7 suivant.

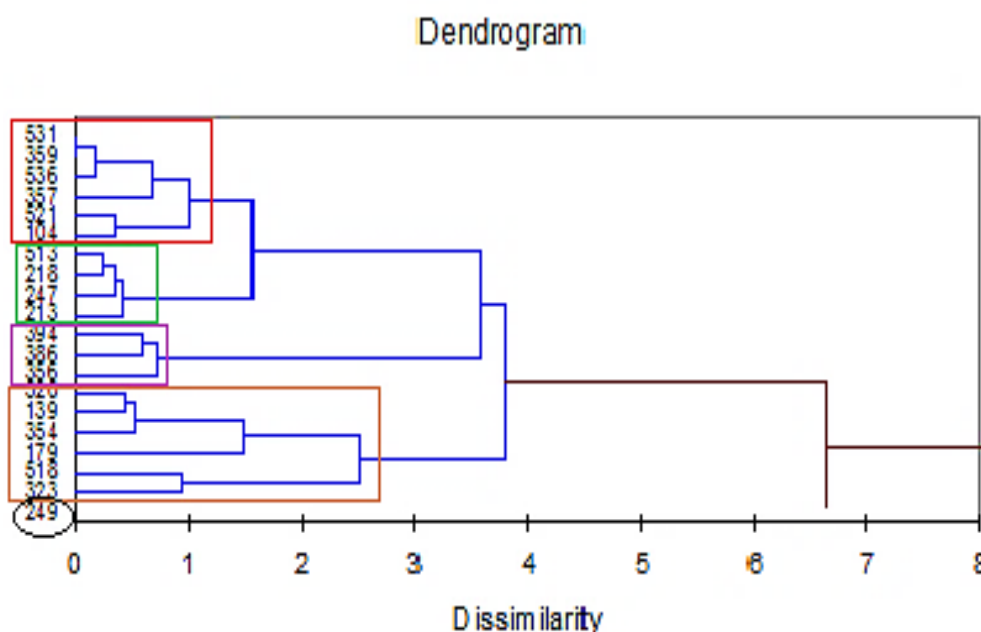


Figure 31 : Arbre hiérarchique des masses d'eaux souterraines des sous- groupes de groupe 1.

II.3. Synthèse sur la Classification Hiérarchique Ascendante

La cartographie des différents groupes de MESO est reportée sur la figure 34 ci-dessous. Les MESO de chaque groupe apparaissent regroupées et elles semblent avoir une certaine cohérence en termes d'entités géologiques.

La liste des MESO de chaque groupe sera précisée ci-dessous, mais l'étude détaillée de chaque groupe fera l'objet d'un chapitre à part. La Classification hiérarchique Ascendante non supervisée a permis de former 8 groupes de masses d'eau souterraines, représentés en détail ci-dessous avec une description de chacune (Tableau 6), (Annexe 2) :

Tableau 6 : Liste des MESO par groupe issus de la CHA de la région PACA.

Groupe	Sous-groupe	MESO					
1	1a	104	357	359	521	531	536
	1b	213	218	247	513		
	1c	356	386	394			
	1d	139	179	323	354	518	520
	1e (isolé)	249					
2	2a	107	358	514			
	2b	168	169				
	2c	205	504				
	2d isolé	215	369				
	2e très isolé	244					
3	3a	370	167	343			
	3a	420					
	3b	196	170				
	3b	166					
	Très Isolé	376					
4	4a	321	174	423	407		
	4b	243	108				
	4c	163	164	165			
	4d	413					
	4e	610					
5		396	355	609	382		
6	6a	393	209	534	226		
	6b	353	352	210			
7	7a	528	418	130			
	7b	422	421	419	417		
8	Isolé	375					
	Isolé	234					
	Isolé	175					

Selon la description de chaque groupe détaillé, les différents groupes de masses d'eaux sont bien corrélés aux lithologies et à la nature hydrogéologique des zones d'étude. En plus, les groupes de masses d'eaux souterraines de chaque ensemble présentent des similitudes entre eux. L'étude détaillée de chaque groupe et sous-groupe fait l'Object des prochains chapitres.

III. Faciès chimique des MESO de PACA

▪ Diagramme de PIPER

Le diagramme de Piper est l'outil le plus habituellement utilisé pour attribuer les faciès chimiques des eaux en utilisant les éléments majeurs. Il est basé sur les concentrations

équivalentes et relatives par rapport à la somme des cations voire anions. Le report des résultats des prélèvements des eaux souterraines de PACA sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure 32), met en évidence l'impact du faciès lithologique sur la qualité des eaux et permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.

La figure 32 expose l'ensemble des analyses des MESO de PACA. 5 294 Analyses sont reportées sur le diagramme, elle montre qu'il existe une forte hétérogénéité de la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale (région PACA). Néanmoins la grande quantité d'analyse rend la lecture et la détermination des faciès chimique plus difficile. Donc, le traitement des mécanismes responsables de cette qualité ne peut être mené de manière globale.

L'étude géochimique des eaux souterraines ne pourra s'effectuer qu'à l'échelle de ces zones géographiques présentant une certaine unité de fonctionnement hydro-chimique. Elle sera traitée dans le prochain chapitre.

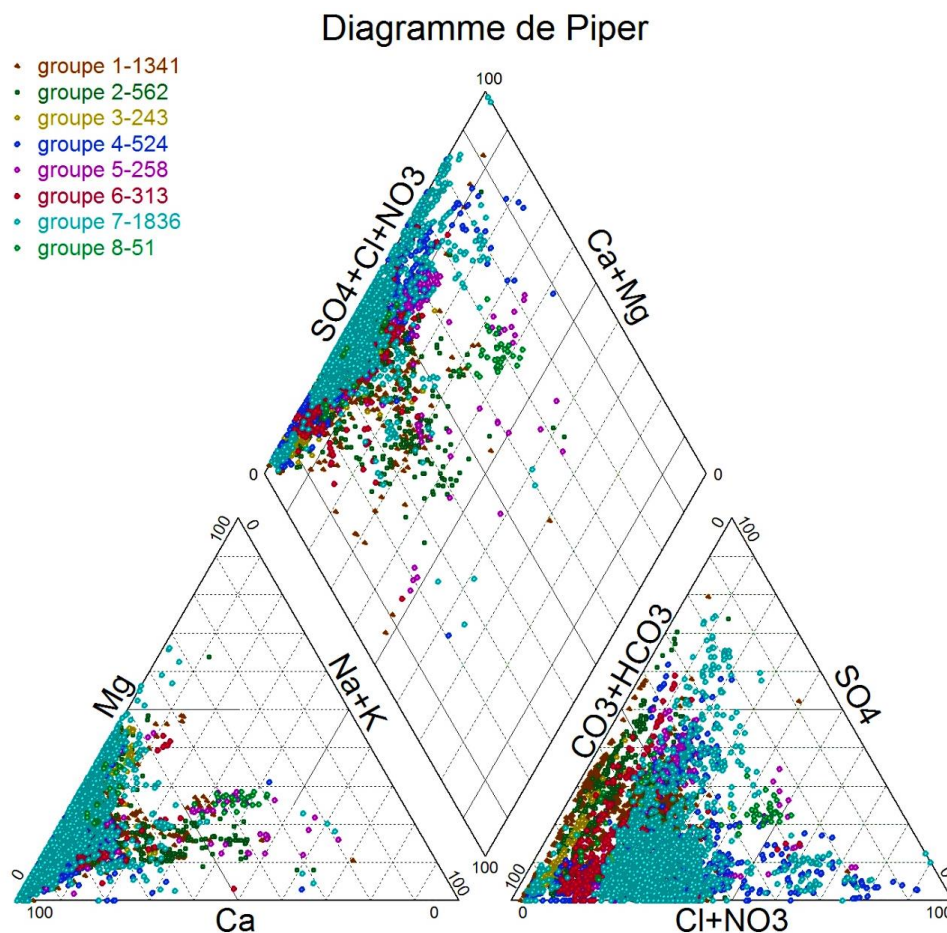


Figure 32 : Diagramme de PIPER de l'ensemble de PACA représentant 5 294 Analyses.

IV. Cartographie des différents groupes des masses d'eau

La Classification Hiérarchique Ascendante non supervisée a permis de former des masses d'eau souterraines, sont toutefois rassemblées comme l'illustre le Tableau 7. Ces masses d'eaux ayant une définition territoriale avec un contour défini sur SIG, il est possible de représenter l'extension spatiale de chaque groupe de masses d'eau sous SIG.

La carte suivante présente les différents groupes de masses d'eaux souterraines obtenus par la classification hiérarchique ascendante non supervisée. Chaque groupe est représenté par une couleur (Figure 34).

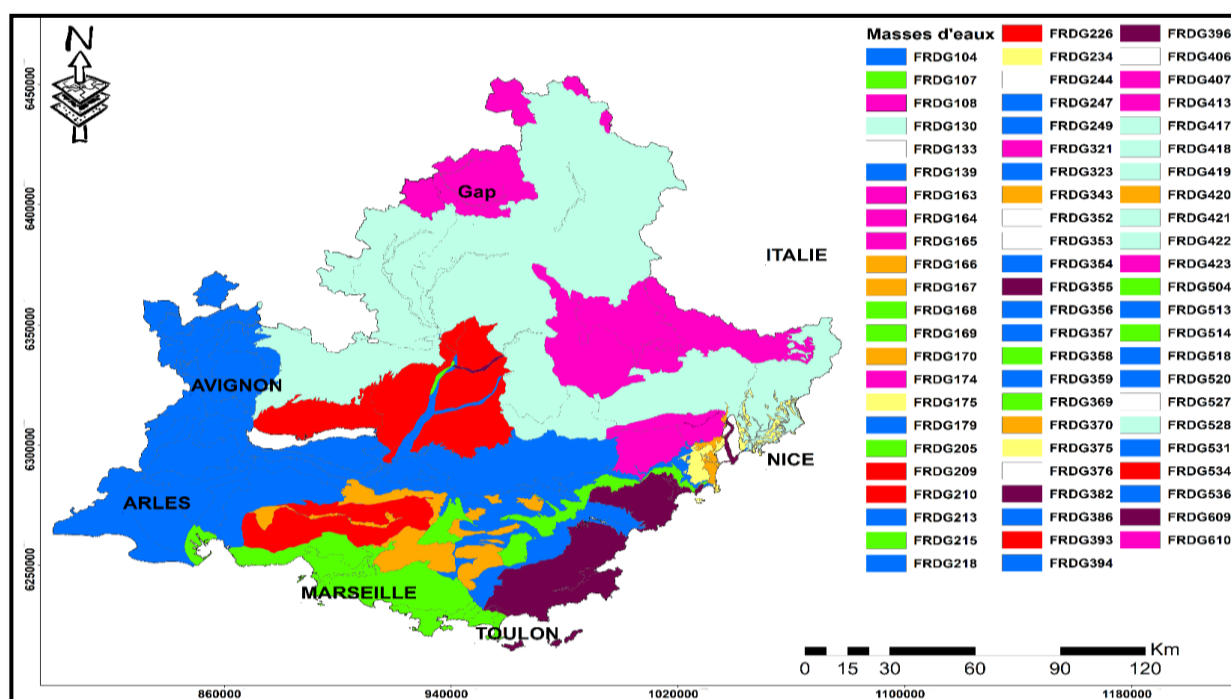


Figure 33 : Cartographie des différents groupes des masses d'eaux souterraines de la région PACA issus de la CHA

La cartographie des groupes de la figure 33 présente de fortes similitudes avec la cartographie des grands aquifères régionaux de la figure 7 (chapitre 2).

La méthode suivie permet de classer les points de prélèvements par groupes de masses d'eau souterraines ayant chacun leur spécificité en termes d'interactions Eau-Roche. De ce fait, les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques synthétisées sous forme d'axes factoriels, permettent de différencier les différents types de ressources en eau à l'échelle régionale, malgré la variabilité temporelle des caractéristiques en chaque point de prélèvement

et malgré la variabilité spatiale interne à chaque masse d'eau. Ce résultat montre la robustesse de cette approche et ouvre la voie vers la possibilité d'utiliser cette typologie des masses d'eaux souterraines pour étudier les sources de variabilité de leur qualité de manière spécifique à chaque ensemble de masse d'eau.

Il sera alors possible de proposer une gestion de la surveillance de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, adaptée à chaque ressource.

IV. 1. Brève description des différents groupes de MESO

IV. 1. 1. Groupe 1

Ce groupe est représenté par la couleur bleue sur la carte des groupes (Figure 41). Il s'agit principalement de nappes d'accompagnement de rivières. La liste des Masses d'Eaux Souterraines du groupe1 est reportée sur le tableau 7. Cet ensemble important à l'échelle régionale, présente une certaine diversité, depuis des nappes de zones basses (basse Durance, nappes des plaines du Comtat, nappe d'accompagnement du Rhône entre la confluence de la Durance et Arles,) jusqu'à la nappe d'accompagnement de la moyenne Durance et de l'Asse (Tableau 7). Les sous-groupes sont également détaillés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Liste des MESO constituant le groupe 1 de la région PACA.

Groupe	FRDG	Description
1A	104	Cailloutis de la Crau
	357	Alluvions de la moyenne Durance
	359	Alluvions basse Durance
	521	Calcaires et marnes crétacées du BV Drôme, Roubion, Jabron
	531	Argiles bleues du Pliocène inférieur de la vallée du Rhône
	536	Marno-calcaires et grès Collines Côte du Rhône rive gauche et de la bordure du bassin du Comtat
1B	213	Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires dans BV Basse Durance
	218	Molasses miocènes du Comtat
	247	Massifs calcaires du nord-ouest des Bouches du Rhône
	513	Formations variées du bassin versant de la Touloubre et de l'étang de Berre
1C	356	Alluvions de l'Asse
	386	Alluvions des basses vallées littorales des Alpes-Maritimes (Siagne, Loup et Paillon)
	394	Alluvions Durance amont
1D	139	Plateaux calcaires des Plans de Canjuers, de Tavernes-Vinon et Bois de Pelenq
	179	Unités calcaires Nord-Ouest varois (Mont Major, Cadarache, Vautubière)
	323	Alluvions du Rhône du confluent de la Durance jusqu'à Arles et Beaucaire et alluvions du Bas Gardon
	354	Alluvions des plaines du Comtat (Sorgues)
	518	Formations variées côtes du Rhône rive gardoise
1E (Isolé)	520	Formations gréseuses et marno-calcaires de l'avant-Pays provençal
	249	Sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron

IV. 1. 2. Groupe 2

Ce groupe est représenté par une couleur verte fluorescente sur la carte des groupes (Figure 33). Il est localisé sur des formations calcaires en zone littorale. Seule une toute petite masse d'eau ne se localise pas en zone littorale, il s'agit de la MESO FRDG358. Cette anomalie peut probablement s'expliquer par l'impact de la contamination de cette petite entité par l'activité industrielle située juste en amont.

La liste de ces masses d'eaux souterraines constituant le groupe 2 est reportée sur le tableau 8. Les sous-groupes sont également détaillés dans cette étude.

Tableau 8 : Liste des MESO constituant le groupe 2.

Groupe	FRDG	Description
2A	107	Calcaires crétacés des chaînes de l'Estaque, Nerthe et Etoile.
	358	Alluvions de la Durance moyenne en aval de St Auban (emprise du panache de pollution historique).
	514	Formations variées de la région de Toulon.
2B	168	Calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques.
2C	205	Alluvions et substratum calcaire du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier.
	504	Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue.
2D (isolé)	215	Formations oligocènes de la région de Marseille.
	369	Alluvions de l'Huveaune.
2E (isolé)	244	Poudingues pliocènes de la basse vallée du Var.

A noter que FRDG244 est isolée du groupe 2 et se situe entre le groupe 2 (vert) et le groupe 3 (orange). Géologiquement ceci correspond à une réalité de terrain.

IV. 1. 3. Groupe 3

Il s'agit de masses d'eaux souterraines localisées dans des formations calcaires en zones littorales essentiellement centrées sur le Sud-Ouest de PACA. Elles s'étirent sur un axe reliant Sud-Ouest du Var- Marseille-Etang de Berre. Les sous-groupes de groupe 3 sont également détaillés.

Tableau 9 : Liste des MESO constituant le groupe 3.

Groupe	FRDG	Description
3A	370	Alluvions de l'Arc de Berre.
	167	Massifs calcaires de la Sainte-Baume, du Mont Aurélien et Agnis.
	343	Alluvions du Gapeau.
	420	Formations diverses à dominante marneuse du Crétacé au Pliocène moyen du SW des Alpes-Maritimes.
3B	196	
	170	Massifs calcaires jurassiques du centre Var
3C	166	Massif calcaire de la Sainte-Victoire.
Isolé	376	Alluvions de l'Argens.

IV. 1. 4. Groupe 4

Le groupe 4 obtenue d'après la CHA du Bloc 2, constitue un bloc de **5 293 analyses** avec 15 paramètres (Entérocoques, Escherichia Coli, HCO₃, pH, Ca, Cl, Conductivité électrique, Mg, K, Na, SO₄, Fe, Mn, NO₃, As). Ceci constitue une matrice pleine de **16 272** valeurs.

Les masses d'eau souterraine de ce groupe sont des formations de haute montagne dans des aquifères discontinus, parfois cristallins et avec une activité biologique réduite (Tableau 10).

Tableau 10 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 4.

Groupe	FRDG	Description
4B	243	Multicouche pliocène du Roussillon
	108	Massif calcaire crétacé du Dévoluy
4C	163	Massif calcaire du Cheiron
	164	Massif calcaire de Tourette-Chiers
	165	Massif calcaire Mons-Audibergue
4D	413	Formations variées des bassins versants Cenise et Pô
4E	610	Socle des massifs Mercantour, Argentera, dôme de Barrot

IV. 1. 5. Groupe 5

Le groupe 5 formé d'un bloc de **258 analyses** extrait à partir de traitement et de filtration des données depuis la Classification Hiérarchique Ascendante du Bloc2, avec **15 paramètres**. Ceci constitue une matrice pleine de **11 393** valeurs (Tableau 11).

Il s'agit de nappes d'accompagnement des cours d'eaux torrentiels aux alluvions caillouteuses et très vulnérables aux pollutions bactériennes, ainsi que l'aquifère de socle, également vulnérable à ces pollutions. La géolocalisation de tous les échantillons permet de relier chacun des points de prélèvement à la Masse d'Eau Souterraine (MESO) qui le correspond.

Tableau 11 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 5.

MESO	Description
396	Alluvions de la basse vallée du Var
355	Alluvions de la Bléone
609	Socle des massifs de l'Estérel, des Maures et Iles d'Hyères
382	Alluvions du Rhône du défilé de Donzère au confluent de la Durance et alluvions de la basse vallée Ardèche

IV. 1. 6. Groupe 6

Le groupe 6 admet un bloc de **259** analyses avec 15 paramètres, ce qui engendre une matrice pleine de 7 797 valeurs. Les ressources d'eau de ce groupe sont évidemment localisées dans les Conglomérats du plateau de Valensole, dans les formations variées du bassin de l'Arc, au Alluvions du Buëch et dans les formations de la moyenne Durance.

Comme le groupe précédent, il s'agit de masses d'eau vulnérables car situées dans des matériaux grossiers. C'est le cas du sous-groupe 6b dans les alluvions de l'Ouvèze et de l'Aigues atteintes par des pollutions de xénobiotiques. Le groupe 6a se distingue du 6b par des caractéristiques moins vulnérables.

Tableau 12 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 6 et les sous-groupes.

Groupe	FRDG	Description
6A	393	Alluvions du Buëch
	209	Conglomérats du plateau de Valensole
	534	Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires en rive droite de la moyenne Durance
	226	Calcaires urgoniens sous couverture du synclinal d'Apt
6B	353	Alluvions des plaines du Comtat (Ouvèze)
	352	Alluvions des plaines du Comtat (Aigues Lez)
		Formations variées et calcaires fuvéliens et jurassiques du bassin de l'Arc
	210	

IV. 1. 7. Groupe 7

Le groupe 7 est constitué d'un bloc de **1837** analyses avec **15 paramètres**, crée une matrice pleine de 56 944 valeurs. Tous les échantillons sont géolocalisés, chacun des points de prélèvement est rattaché au MESO correspond. Toute la surface du territoire local est couverte, mais certaines zones présentent des densités inférieures qui s'expliquent par la rareté de l'eau ou bien une eau très superficielle et de trop mauvaise qualité.

La majorité de ces ressources en eau sont évidemment localisées dans le département du Hautes Alpes, la majorité des masses d'eaux des Alpes Maritimes et les Alpes de Hautes Provence.

Dans le cadre du contrôle sanitaire, plusieurs échantillons peuvent être prélevés sur le même point, à des dates différentes, en particulier pour les AEP importantes telles que celles qui alimentent les grandes villes.

Le groupe 7 recoupe un important territoire de PACA, s'étend sur près de 9 000 km². Il présente une forme digitalisée qui s'étire du nord vers le sud depuis les bassins versants de la Clarée et de la Guisane jusqu'aux bassins versants amont de l'Asse et de la Bléone à l'Est du Plateau de Valensole.

Les altitudes en général varient de façon importante. On distingue dans la partie interne des Alpes les zones montagneuses au droit desquelles les sommets dépassent 2000 m (montagne de Céüse) et parfois même 3000 m (sommets du Pelvoux et des Ecrins). Ailleurs, pour les zones dites de plaine, l'altitude reste plus modérée et de l'ordre de 500 m en moyenne.

Tableau 13 : Liste des Masses d'eau constituant le groupe 7 et les sous-groupes.

Groupe	FRDG	Description
7A	528	Calcaires et marnes crétacés et jurassiques du BV Lez, Eygues/Aigue et Ouvèze.
	418	Formations variées du bassin versant du Buëch.
	130	Calcaires urgoniens du plateau de Vaucluse et de la Montagne de Lure.
7B	422	Formations variées du bassin versant du moyen Verdon.
	421	Formations variées du Secondaire au Tertiaire du bassin versant du Var.
	419	Formations variées du Crétacé au Tertiaire des bassins versants du Paillon et de la Roya.
	417	Formations variées du haut bassin de la Durance.

IV. 1. 8. Groupe 8

Le groupe 8 est composé d'un bloc de **5 294 analyses** avec **15 paramètres**. Ceci engendre une matrice pleine de 164 142 valeurs.

Il s'agit d'une juxtaposition de Masses d'Eau Souterraine isolées, aux caractéristiques atypiques.

La majorité des ressources des masses d'eaux de ce groupe sont évidemment localisés dans le Sud-Est des Alpes Maritimes. Dans le cadre du contrôle sanitaire, plusieurs échantillons peuvent être prélevés sur le même point, à des dates différentes, en particulier pour les AEP importantes telles que celles qui alimentent les grandes villes.

Tableau 14 : Liste des Masses d'eaux constituant le groupe 8.

MESO	Description
375	Alluvions de la Giscle et de la Môle
234	Calcaires jurassiques de la région de Villeneuve-Loubet
175	Massifs calcaires jurassiques des Préalpes niçoises

V. Comparaison des caractéristiques moyennes des différents groupes

Le tableau comparatif des moyennes de chaque groupe et de la totalité du bloc 2 (Tableau 15) montre des caractéristiques très différentes selon les groupes, ce qui est normal car ils ont été construits sur le critère de dissemblance sur les valeurs moyennes des axes factoriels.

Tableau 15 : Tableau comparatif des moyennes de chaque groupe et de la totalité du bloc 2.

	Totalité	Groupe1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 5	Gr 6	Gr 7	Gr 8
Variable	Moyenne	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy
Entéroco	2.61	1.98	3.72	2.37	3.07	2.52	1.57	2.12	17.71
E. Coli	3.55	1.40	5.90	3.77	3.48	2.59	4.08	3.33	31.16
CE	548.34	672.32	807.72	667.33	312.46	627.24	558.38	422.38	484.18
HCO ₃ ⁻	252.28	299.10	310.96	378.32	158.85	225.98	281.27	215.91	175.05
H ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ⁺⁺	86.78	107.20	117.75	103.07	54.34	90.19	96.75	70.29	57.81
Cl ⁻	17.48	24.53	47.73	14.46	2.29	31.78	9.99	4.29	29.07
Mg ⁺⁺	13.00	15.72	18.98	23.76	5.55	14.53	10.14	10.28	15.78
K ⁺	1.05	1.57	1.77	0.82	0.40	1.63	1.14	0.55	1.49
Na ⁺	11.02	14.45	27.09	7.09	2.48	20.54	7.21	4.12	17.13
SO ₄ ⁼	59.96	79.83	102.56	35.71	29.57	97.31	51.31	42.33	58.23
Fe	8.28	15.12	7.60	2.14	1.83	11.11	19.18	3.08	50.35
Mn	2.66	3.32	3.55	0.31	0.13	9.72	0.65	0.25	29.78
NO ₃ ⁻	4.67	7.11	10.21	5.52	1.64	3.86	7.45	1.84	6.56
As	0.24	0.10	0.06	0.06	1.20	0.02	0.20	0.20	0.06
Nombre d'analyses	5294	1314	562	243	524	258	313	1836	51

★ Le groupe 1

Le groupe 1 comprend un grand nombre d'analyse. Il se caractérise par une forte conductivité électrique, notamment liée aux Sulfates, Chlorure et Sodium. Peu affecté par la contamination fécale, il présente en revanche des teneurs significatives en métaux (Fe et Mn). Ce dernier point suggère des conditions réductrices tout au moins pour une partie seulement des points de prélèvements, car la moyenne de teneur en nitrate est également élevée, ceci suggère des conditions oxydantes pour une part des points de prélèvement et probablement une activité agricole développée.

★ Le groupe 2

Le groupe 2 est riche de 562 analyses d'eau, se caractérise par une contamination fécale légèrement supérieure à la moyenne régionale, une forte conductivité électrique liée aux sulfates, chlorure, sodium et magnésium. Peu affecté par les processus de solubilisation des métaux, il présente en revanche une teneur en nitrates supérieure à la moyenne régionale. Ces deux derniers traits suggèrent des caractéristiques plutôt oxydantes et de températures clémentes favorables à l'activité biologique.

★ Le groupe 3

Le groupe 3 ne comprend que 243 analyses d'eau. C'est donc un groupe assez pauvre en information. Il est proche sur la plupart des paramètres de la moyenne régionale. Très peu affecté par la solubilisation de métaux, il est marqué par des valeurs légèrement supérieures à la moyenne régionale pour les bicarbonates, le Calcium et le Magnésium.

★ Le groupe 4

Le groupe 4 dispose de 524 analyses d'eau. Pour la plupart des paramètres, il présente des valeurs nettement inférieures à la moyenne régionale. Les eaux sont peu minéralisées, et peu concernées par la solubilisation des métaux. Seul l'arsenic présente un léger de la moyenne régionale. Donc il s'agit d'un groupe d'eaux peu minéralisées, et peu polluées.

★ Le groupe 5

Le groupe 5 est constitué de 258 analyses d'eau. Ses caractéristiques sont proches de la moyenne régionale. La teneur en sulfate et en sodium est légèrement supérieure à la moyenne régionale. La teneur en métaux Fer et Manganèse est en revanche au-dessus de la moyenne régionale. Il s'agit donc d'un groupe aux caractéristiques proche du standard régional, mais avec une signature sulfatée, sodique et des métaux.

★ Le groupe 6

Le groupe 6 comprend 313 analyses d'eau. Ses caractéristiques sont proches de la moyenne régionale, exception faite de forte teneur en Fer et en Nitrate. La faible teneur en Manganèse suggère que le Fer n'est pas solubilisé par des conditions réductrices mais transporté sous forme de colloïdes, ce que confirmerait une teneur en Nitrate supérieure à la moyenne régionale. Tout ceci suggère donc des conditions plutôt oxydantes et des aquifères vulnérables aux arrivées d'eau de surface par ruissellement.

★ **Le groupe 7**

C'est est le plus abondant puisqu'il comporte **1 836 analyses** d'eau souterraine. Ses eaux sont peu minéralisées et présentent de faibles teneurs en Fer, Manganèse et en Nitrate.

★ **Le groupe 8**

Le groupe 8, de 51 analyses seulement, est atypique car constitué de 3 MESO très différentes. Il est marqué par une forte contamination fécale qui le distingue de tous les autres groupes d'eau, par la présence de métaux et des teneurs en Na et Cl supérieures à la moyenne régionale.

. **Synthèse**

Les groupes de MESO présentent des caractéristiques différentes ce qui confirme l'intérêt de la méthode de classification. Cependant, il est important de remarquer, en particulier à partir du diagramme en croix qui représente les moyennes et les écarts types de chaque MESO, que la variabilité interne à chaque masse d'eau souterraine est très importante. De ce fait l'étude de la qualité des masses d'eau souterraine doit non seulement se baser sur la comparaison des moyennes, mais aussi (et surtout) sur l'étude de la variabilité. Par ailleurs, celle-ci peut être un moyen d'étude des mécanismes qui déterminent cette qualité de l'eau.

Pour cette raison, l'étude des groupes et des sous-groupes reprendra rapidement la comparaison des moyennes des différents paramètres, mais elle concernera surtout l'étude de la variance, à partir d'une approche multivariée principalement par des ACP.

VI. Mesure de l'efficacité de la méthode appliquée au MESO

Si on considère le bloc 2 de **5 294 analyses** avec ses **15 paramètres**, un tirage aléatoire qui extrairait un ensemble d'analyses présentant la même diversité de mécanismes responsables des variations de concentration donnerait un calcul d'ACP proche de celui obtenu pour l'ensemble du bloc. La distribution de la variance selon les axes factoriels serait sensiblement la même.

En revanche, l'extraction d'un ensemble d'analyse pour lesquelles uniquement un tout petit nombre de mécanismes sont impliqués donnerait une distribution de la variance selon les axes factoriels très différente. Les premiers axes factoriels cumuleraient la quasi-totalité de la variance à partir d'un faible nombre de ces axes.

Dans le paragraphe suivant, la distribution de la variance cumulée portée par les axes factoriels sera étudiée pour l'ensemble du bloc et pour chacun des groupes et chacun des sous-groupes.

Pour de raisons pédagogiques, l'étude commencera par le second groupe puis abordera successivement les différents blocs dans l'ordre.

1) Groupe 1

Le groupe 1 contient **1 314 analyses** d'eau ce qui constitue une forte proportion du bloc 2 (5 294 analyses).

Le nombre d'analyses du groupe 1 et de ses sous-groupes est reporté dans le tableau 16.

Tableau 16 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 1 et ses sous-groupes.

	Nombre d'analyses
Totalité	5294
Gr1	1314
Gr1 A	607
Gr1 B	196
Gr1 C	101
Gr1 D	398
Gr1 E	12

La distribution de la variance pour le groupe 1 et le sous-groupe 1A, celui qui contient le plus d'échantillons d'eau, est sensiblement identique à celle de l'ensemble des 5 294 analyses du bloc 2. Ainsi, le groupe 1 présente une hétérogénéité des milieux probablement aussi importante que pour l'ensemble des analyses. Il n'y a pas de gain en termes d'homogénéité du milieu.

En revanche pour les sous-groupes, exception faite de 1A, celui qui comporte le plus d'échantillon analysés, le gain est important.

Ceci montre l'intérêt de considérer les sous-groupes de masses d'eaux souterraines pour étudier les mécanismes responsables de la qualité de l'eau et les mesures de la protection spécifique à ses unités géographiques.

Le cas du sous-groupe 1E est particulier. En effet, il contient peu d'analyses d'eau, certains paramètres présentent une valeur constante, ce qui concentre la variance sur un nombre d'axes factoriels plus réduit (Figure 34).

A l'inverse, le groupe 1A comportant **1 314 analyses**, intègre probablement une grande diversité de Masses d'Eau Souterraines (MESO). De ce fait, bien que les MESO soient classées comme présentant des caractéristiques proches, il existe clairement une hétérogénéité spatiale des mécanismes impliqués dans la variation spatiale de la qualité de l'eau.

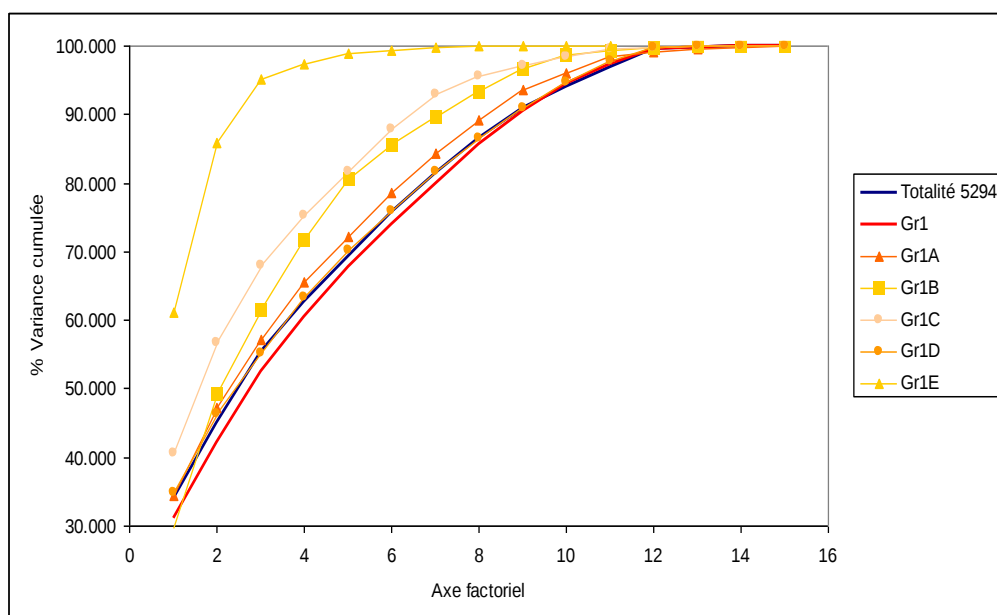


Figure 34 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 2 et pour ses sous-groupes.

2) Groupe 2

Le groupe 2 comprend 562 analyses d'eau soient environs **10%** de la masse de données du bloc 2 qui en comporte 5 294 analyses. Quarts sous-groupes ont été définis comprenant chacun de 24 à 330 analyses d'eau (Tableau 17).

Tableau 17 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 2 et ses sous-groupes

	Nombre d'analyses
Totalité	5294
Grp2	562
Grp2A	165
Grp2B	330
Grp2C	43
Grp2D	24

Pour l'ensemble du bloc 2, les 4 premiers axes factoriels cumulent 62.8% de la variance, contre 67.2 % pour le groupe 2 (Figure 35). Ainsi, le groupe 2 présente un nombre de processus moins important, probablement dû à une moindre hétérogénéité de unités fonctionnelles.

Pour les sous-groupes 2A, 2B, 2C et 2D, les pourcentages montent respectivement à 72.2%, 66.8%, 89.6% et 87.9%.

Ainsi, pour le sous-groupe 2C, la quasi-totalité de la variance s'explique par 4 mécanismes responsables des variations de qualité de l'eau, tous paramètres confondus. Ceci est lié au fait qu'il s'agit d'une zone homogène au niveau du fonctionnement hydrochimique et du risque de contamination biologique.

En revanche au niveau de la région PACA, chaque unité naturelle ayant ses propres mécanismes, le calcul au niveau de l'ensemble des 5 294 analyses présente une variabilité influencée par un grand nombre de mécanismes et il faut un nombre d'axe factoriels plus important pour atteindre un fort pourcentage de variance expliquée.

Il est important de noter que le fait d'extraire le bloc 2 constitue déjà une nette diminution de l'hétérogénéité des processus impliquée par rapport à l'ensemble de la région PACA.

Au vu de ces résultats, les objectifs de la méthode de regroupement des Masses d'Eau Souterraine (MESO) en groupes et en sous-groupes aient été atteints.

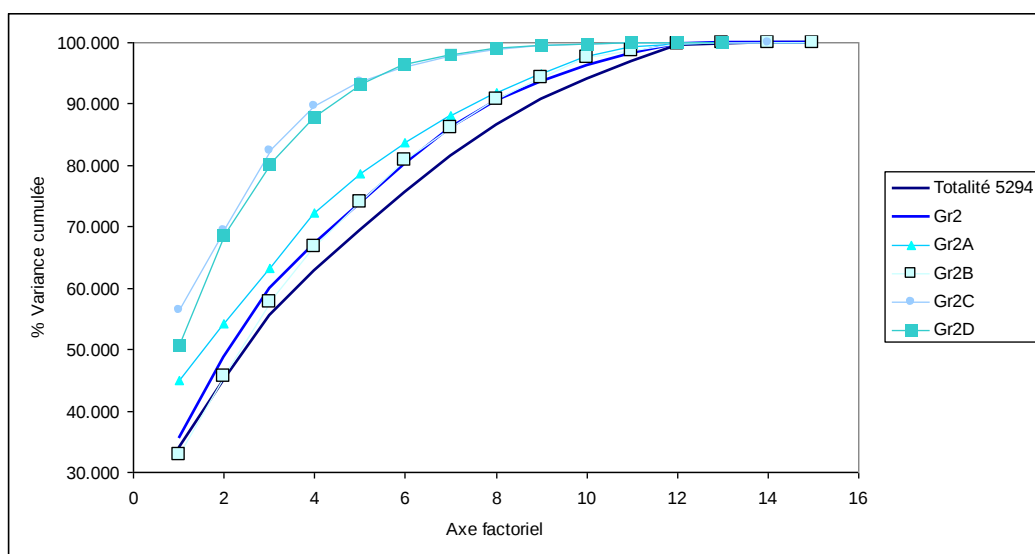


Figure 35 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 2 et pour ses sous-groupes.

3) Groupe 3

Pour le groupe 3 les résultats sont tout à fait conformes à ceux obtenus pour le groupe 1 et les conclusions sont donc identiques (Tableau 18). Le fait de considérer le sous-groupe, apporte plus d'homogénéité que pour le groupe 1 (Figure 36).

Tableau 18 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 3 et ses sous-groupes.

	Nombre d'analyses
Totalité	5294
Groupe 3 totalité	243
3A	74
3B	44
3C	105
3D	20

La figure 36 expose la distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 3 et pour ses sous-groupes.

Le passage de groupe à sous-groupe est très important pour ce groupe, ce qui montre l'intérêt de considérer les sous-groupes de masses d'eau souterraine pour étudier les mécanismes responsables de la qualité des eaux souterraine de PACA et les mesures de protection spécifique à ses unités géographiques.

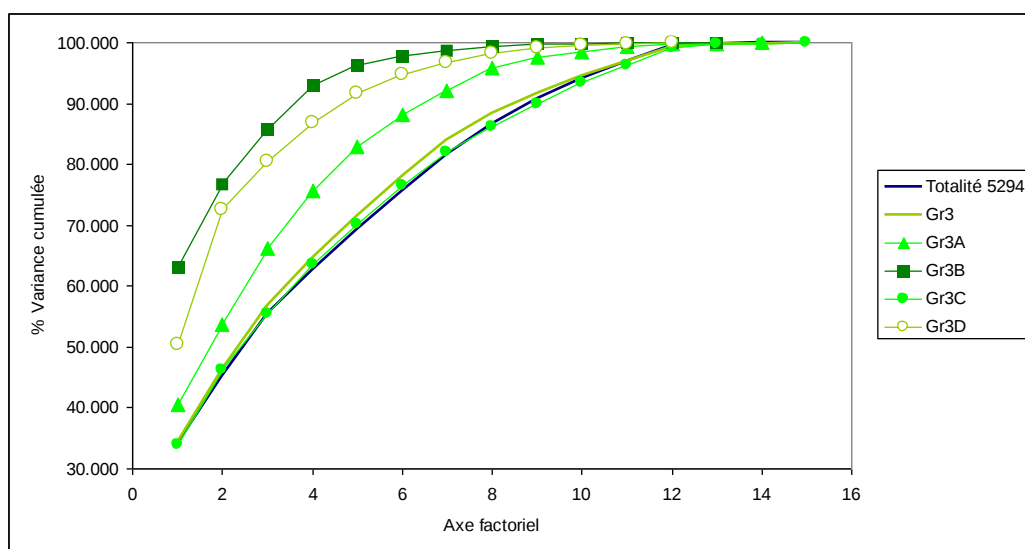


Figure 36 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 3 et pour ses sous-groupes.

4) Groupe 4

Pour le groupe 4 (Tableau 19), le fait de considérer le groupe dans son ensemble constitue une amélioration par rapport à l'ensemble des **8 294 analyses** du bloc 2.

Le gain est très important pour le passage aux sous-groupes, et ceci quel que soit le sous-groupe. Commune illustre la figure 37 la distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 4 et pour ses sous-groupes de la région PACA.

Tableau 19 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 4 et ses sous-groupes.

	Nombre d'analyses
Totalité	5294
Gr4 totalité	524
Gr4A	388
Gr4B	31
Gr4C	144
Gr4D	14
Gr4E	91

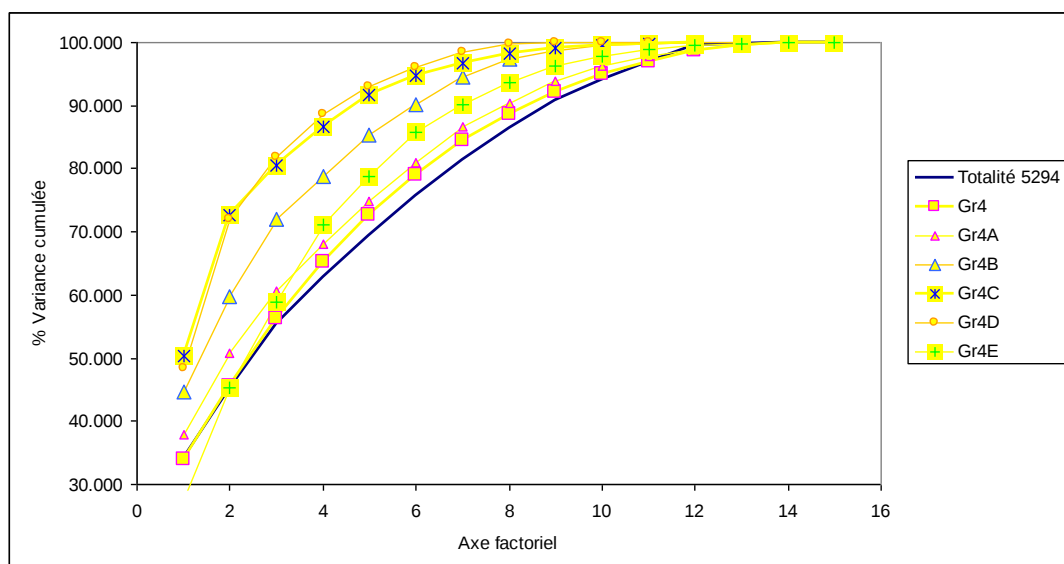


Figure 37 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 4 et pour ses sous-groupes.

5) Groupe 5

Compte tenu du nombre réduit de masses d'eau et du nombre d'analyses (258) contenus dans ce groupe, il n'a pas été distingué de sous-groupe de MESO.

Tableau 19 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 5 et ses sous-groupes.

	Nombre d'analyses
Totalité	5294
Groupe5 totalité	258

La distribution du pourcentage de variance cumulée (Figure 38) montre un gain substantiel d'homogénéité de ce groupe par rapport à l'ensemble du bloc 2 de la région PACA.

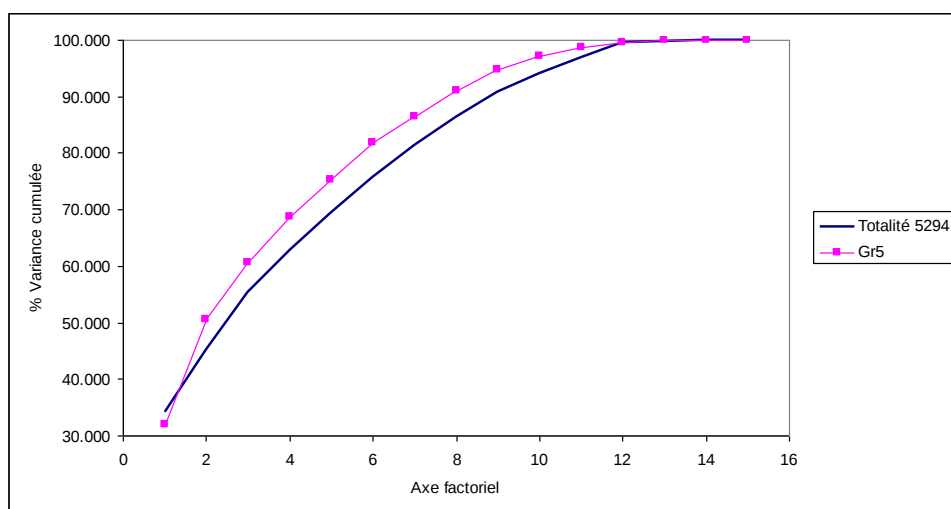


Figure 38 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 5.

6) Groupes 6 et 7

Le groupe 6, de petite taille en termes de masse de données présente une distribution de la variance comparable à celle du bloc 2 en son entier (Figure 39), de même que le sous-groupe 6A qui constitue l'essentiel des analyses d'eau (Tableau 20).

Tableau 20 : Nombre d'analyses d'eau pour le groupe 6 et 7 et les sous-groupes.

	Nombre d'analyses
Totalité	5294
Groupe 6	313
6A	253
6B	60
Groupe 7	1836
7A	280
7B	1556

En revanche, le sous-groupe 6B présente un nombre plus restreint de mécanismes responsables des variations de qualité de l'eau. Il en est de même pour le groupe 7.

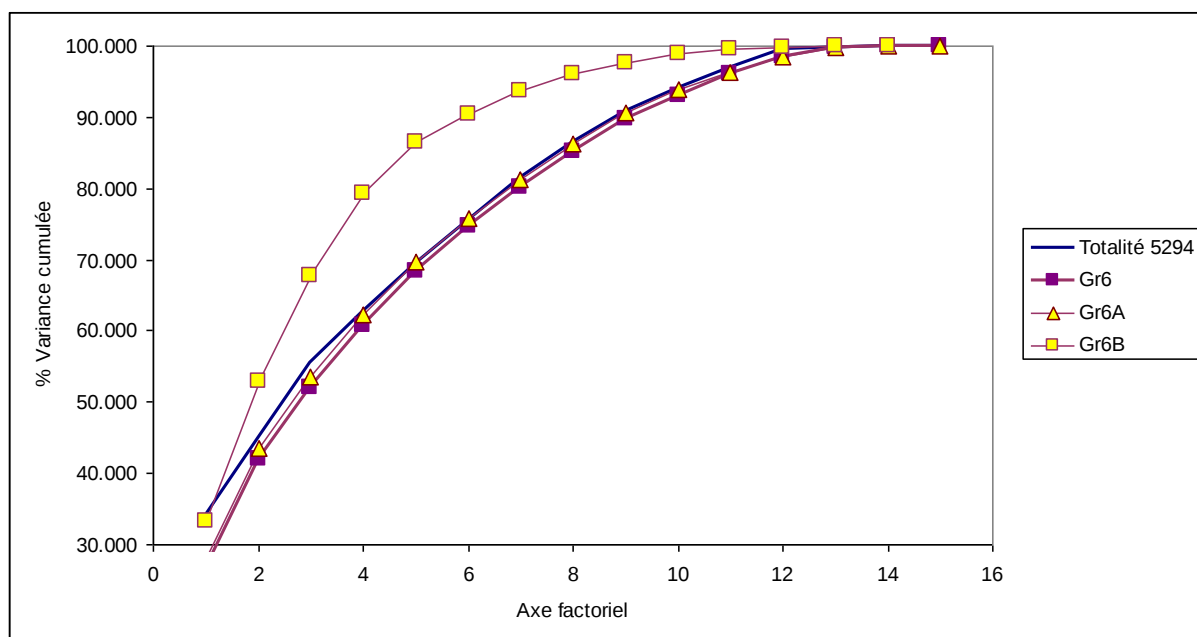


Figure 39 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 6 et pour ses sous-groupes.

Ainsi, Le sous-groupe 7B expose un nombre plus restreint de mécanismes responsables des variations de qualité de l'eau (Figure 40).

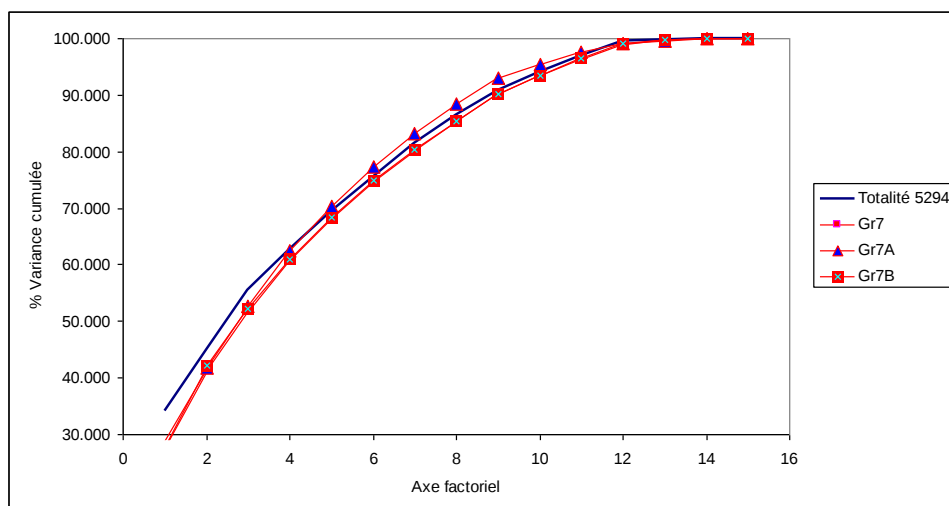


Figure 40 : Distribution du pourcentage de variance cumulée expliquée par les différents axes factoriels pour le bloc 2, pour le groupe 7 et pour ses sous-groupes.

CONCLUSION

Dans le chapitre précédent, le calcul de l'ACP a montré que l'approche sur l'ensemble des données de la région PACA est trop globale. Les différents mécanismes responsables de la variation de la qualité des eaux propres à chaque unité du paysage sont dilués dans la masse d'information régionale, ce qui complique l'étude.

Une démarche différente a été proposée dans ce chapitre. Elle consiste tout d'abord en une réduction dimensionnelle en ne gardant que les 11 premiers axes factoriels de l'ACP régionale. Ceci revient à éliminer le 3 % d'information essentiellement constituées par du bruit statistique. Dans un second temps, les analyses sont rassemblées par masse d'eaux souterraines grâce à leur positionnement sur le SIG du BRGM indiquant le contour de ces masses d'eau. Il devient alors possible de calculer les valeurs moyennes à chaque masse d'eau pour chacun des 11 premiers axes factoriels.

L'étude de la distribution de ces valeurs moyennes et de la variabilité dans le premier plan factoriel a montré que des ensembles des masses d'eaux se dessinent dans le premier plan factoriel, mais la forte variabilité des caractéristiques au sein de ces masses d'eau rend difficile une classification à partir des seules informations des deux premiers axes factoriels.

Pour cette raison, les valeurs moyennes des différentes masses d'eau pour chacun des 11 premiers axes factoriels ont été utilisées pour faire une classification hiérarchique ascendante non supervisée. Le résultat montre des regroupements des Masses d'Eau Souterraine (MESO). huit groupes ont ainsi été définis dont la plupart se structurent en sous-groupes.

La cartographie des groupes montre une cohérence géographique et géologique au sein des groupes et des sous-groupes, y compris pour les 3 masses d'eaux se situant entre deux groupes. L'analyse de la distribution de la variance cumulée par les différents axes factoriels montre que l'hétérogénéité du milieu, la diversité des mécanismes mis en jeu, diminuent fortement lorsque l'on passe de l'ensemble des analyses d'eau, aux groupes et surtout aux sous-groupes de MESO définis par la classification hiérarchique ascendante. Ceci valide l'intérêt de la méthode proposée.

Il convient maintenant d'étudier de manière plus spécifique chacun de ces groupes, leurs caractéristiques ainsi que les mécanismes responsables de la qualité des eaux. Ce sera l'objet du prochain chapitre. Le regroupement de données cohérentes au niveau géologique devrait faciliter cette étude des données.

En toute rigueur, le travail d'étude de grands ensembles de masses d'eau devrait être conduit au niveau des sous-groupes et non de groupe car il a été démontré que c'est à ce niveau que l'intérêt de notre méthode s'exprime pleinement. C'est à cette échelle que devront être émises les politiques de surveillance et de protection de la qualité de l'eau. Cependant, compte tenu du nombre de sous-groupes, ceci dépasse largement le cadre d'une thèse et devra être poursuivi dans le cadre d'un développement des conclusions de cette thèse.

PARTIE 3 : QUALITE DES MESO PAR GROUPES

CHAPITRE 1 :

ETUDE DE LA QUALITE DES MASSES D'EAUX SOUTERRAINES DU GROUPE 1

Les chapitres précédents n'avaient qu'un objectif : établir une méthode objective, non supervisée, permettant de scinder la base de données régionale en sous-ensembles ayant une signification en termes de fonctionnement et d'unité géologique. Des ensembles à la taille des moyens de gestion de la ressource en eau souterraine. La méthode élaborée a permis de dégager huit groupes de masses d'eau souterraines.

Ce chapitre est consacré à l'étude détaillée du premier groupe. Cependant pour ne pas alourdir le manuscrit, l'étude des autres groupes sera moins détaillée que celui-ci. Ce chapitre sert d'exemple sur la manière de traiter en détail les autres groupes.

I. Présentation générale des MESO du groupe 1

Ce groupe de MESO est principalement constitué de nappes d'accompagnement de rivières situées dans l'ouest et le sud de la région PACA. Il s'agit d'un ensemble important à l'échelle régionale, car il couvre une part importante du territoire régional (Figure 41). Le groupe 1 présente une certaine diversité, depuis des nappes de zones basses (basse Durance, nappes des plaines du Comtat, nappe d'accompagnement du Rhône entre la confluence de la Durance et Arles), jusqu'à la nappe d'accompagnement de la moyenne Durance et de l'Asse.

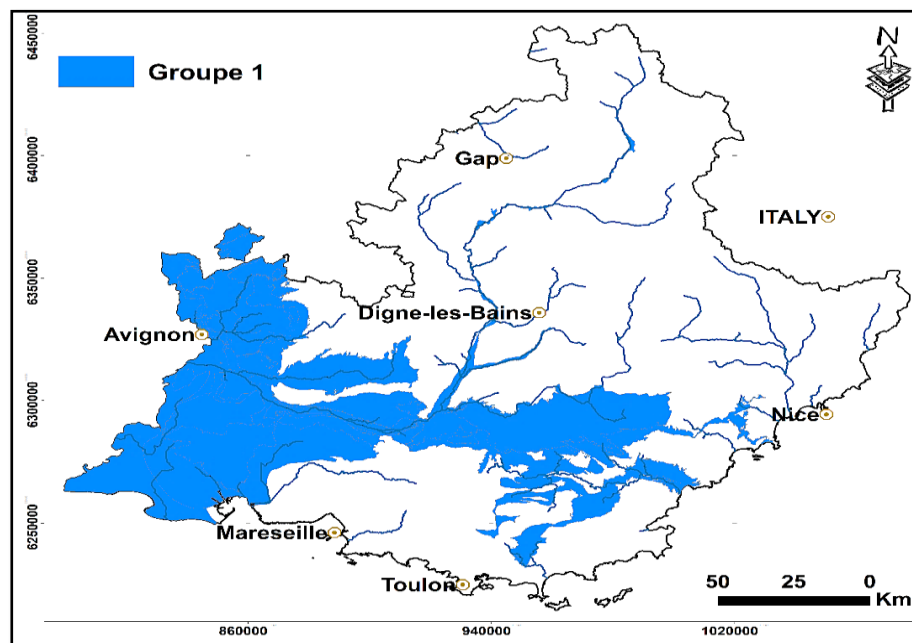


Figure 41 : Cartographie du Groupe 1 de Masses d'Eau Souterraines de la région de PACA.

Ce groupe contient **20 MESO** différentes sur les 70 MESO de PACA concernées par ce travail. De plus, ce groupe totalise 251 points différents de prélèvement, dénommés Code Installation par l'ARS. Sur la période étudiée, 1314 prélèvements ont été effectués et analysés, soient un quart de la base de données constituant le bloc 2. Il s'agit donc d'un des principaux groupes de MESO à l'échelle PACA.

II. Données collectées des MESO du groupe 1

Un bloc de **607** analyses a été engendré suite au traitement et filtration des données extraites depuis la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) de Bloc2, avec **15** paramètres : *Entérocoques*, *Escherichia Coli*, *Conductivité Electrique*, HCO_3 , *pH*, *Ca*, *Cl*, *Mg*, *K*, *Na*, SO_4 , *Fe*, *Mn*, NO_3 , *As*. Ceci constitue une matrice pleine de **18 845** valeurs. La position des points de prélèvements de ce groupe est reportée sur la Figure 42. La géolocalisation de tous les échantillons permet de relier chacun des points de prélèvement à la masse d'Eau Souterraine. Ils sont inégalement répartis sur le territoire couvert par ces MESO. En effet, si certains secteurs présentent une forte densité de points de prélèvement, en revanche d'autres sont moins bien couverts.

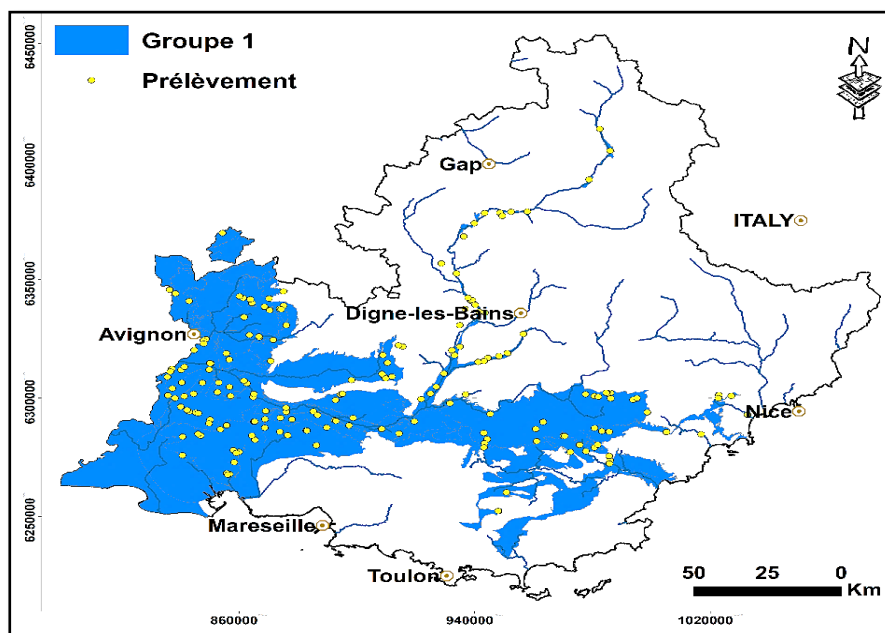


Figure 42 : Position des points des prélèvements dans les MESO du groupe 1 de la région PACA.

Il s'agit en particulier des zones basses (Camargue, Plaine des Sorgues) où l'eau est souvent superficielle, vulnérable et présente un caractère anoxique voire réducteur poussé conduisant à de fortes teneurs en métaux lourds, ce qui conduit à ne pas les utiliser. Ces secteurs présentent

également une faible densité de points de prélèvements suite à des problèmes de disponibilité saisonnière particulièrement la vallée du Calavon.

III. Hydrochimie

Ce groupe se caractérise par des eaux assez minéralisées, avec une moyenne de 672 μ S, mais avec une forte variabilité de la composition chimique en particulier au niveau des teneurs en Na et Cl (Tableau 21).

Il est important de noter la présence de métaux dissous comme le manganèse et le fer, ce qui traduit des conditions anoxiques voire réductrices sur tout au moins une partie de ce territoire. La teneur en fer et manganèse présente une forte variabilité spatiale des conditions d'oxydoréduction. La teneur en nitrate est faible avec une moyenne de 7.1 mg/l, ce qui est cohérent avec des caractéristiques anoxiques favorable à la dénitrification, tout au moins sur une partie des MESO concernées. La présence de contamination fécale (moyenne de l'ordre de 1 à 2 bact/100 ml) montre une certaine vulnérabilité probablement liée à une faible profondeur de la nappe.

Tableau 21 : Caractéristiques chimiques du groupe 1 de la région PACA.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-Type	Coefficient de Variation
Entéroco.	0.0	650.0	1.98	23.93	1205
E. Coli	0.0	350.0	1.40	13.15	938
EC	88.0	2750.0	672.32	207.87	31
HCO₃⁻	27.4	539.0	299.10	61.28	20
H⁺	0.0	0.0	0.00	0.00	58
Ca⁺⁺	14.3	259.5	107.20	28.11	26
Cl⁻	0.0	574.0	24.53	35.57	145
Mg⁺⁺	0.0	42.9	15.72	7.96	51
K⁺	0.0	43.0	1.57	1.59	101
Na⁺	0.0	342.6	14.45	19.27	133
SO₄⁼	0.0	400.0	79.83	53.46	67
Fe	0.0	5820.0	15.12	187.02	1237
Mn	0.0	1038.0	3.32	37.42	1128
NO₃⁻	0.0	72.7	7.11	7.35	103
As	0.0	49.0	0.10	1.45	1442

III.1. Comparaison avec les moyennes régionales

La comparaison entre les moyennes du bloc 2, c'est-à-dire des moyennes sur la région PACA et du groupe 1, fait apparaître quelques spécificités de ce groupe (Tableau 22).

Tableau 22 : Comparaison de valeurs moyennes du bloc 2 (PACA) et du groupe 1

Variable	Totalité bloc 2	Groupe 1
Entéroco.	2.6	2.0
E. Coli	3.5	1.4
EC	548.3	672.3
HCO ₃ ⁻	252.3	299.1
H ⁺	0.0	0.0
Ca ⁺⁺	86.8	107.2
Cl ⁻	17.5	24.5
Mg ⁺⁺	13.0	15.7
K ⁺	1.0	1.6
Na ⁺	11.0	14.4
SO ₄ ⁼	60.0	79.8
Fe	8.3	15.1
Mn	2.7	3.3
NO ₃ ⁻	4.7	7.1
As	0.2	0.1

La charge bactérienne est plus faible dans ce groupe comparé au niveau régional. La conductivité électrique en revanche est plus élevée, ce qui s'explique par le fait que ce groupe concerne des MESO alluviales situées en aval du réseau hydrographique. De même, la contamination par les Nitrates est plus importante, ceci pouvant être lié à une pression agricole plus importante qu'au niveau régional car la proportion de terres cultivées y est plus importante. La teneur en métaux (Fe et Mn) est plus remarquable, probablement parce qu'il est situé en position basse dans le paysage. Les MESO du groupe 1 sont plus sujet aux processus de réduction et de solubilisation de ces métaux. Les teneurs en Nitrates également plus importantes, s'expliquent par la forte proportion de terres cultivées dans ce secteur, mais aussi aux températures notées plus élevées. La contamination fécale, est moins importante qu'à l'échelle régionale, probablement à cause de la faible densité de l'élevage dans ce secteur.

IV. Approche géochimique

Avec plus de **1 000 échantillons** d'eau souterraine, le groupe 1 constitue l'un des groupes les plus importants de la base de données traitée. Plusieurs approches ont été utilisées.

IV.1. Diagramme de concentration des éléments majeurs

Premièrement, un diagramme de concentration a été établi. Il consiste à classer par salinité croissante. L'échantillon le moins minéralisé est pris comme référence. Sa Conductivité

Electrique (CE min) et pour chaque échantillon, un Facteur de Concentration (FC) est calculé à partir de la conductivité électrique de cet échantillon de la manière suivante :

$$FC = CE / CE_{min.}$$

Les concentrations varient beaucoup dans le cas général, les diagrammes de concentrations expriment le log de concentration en fonction de **log (FC)**.

Les nuages représentatifs des ions majeurs montrent une très forte dispersion, ce qui traduit une hétérogénéité de conditions d'aération, mais aussi des lignes de flux d'eaux souterraines, ce qui est cohérent avec l'échelle de travail régionale (Figure 43).

La forte dispersion pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité des conditions d'aération avec des pressions partielles en CO₂ extrêmement variable, ce qui induit une hétérogénéité dans la solubilisation de la calcite notamment.

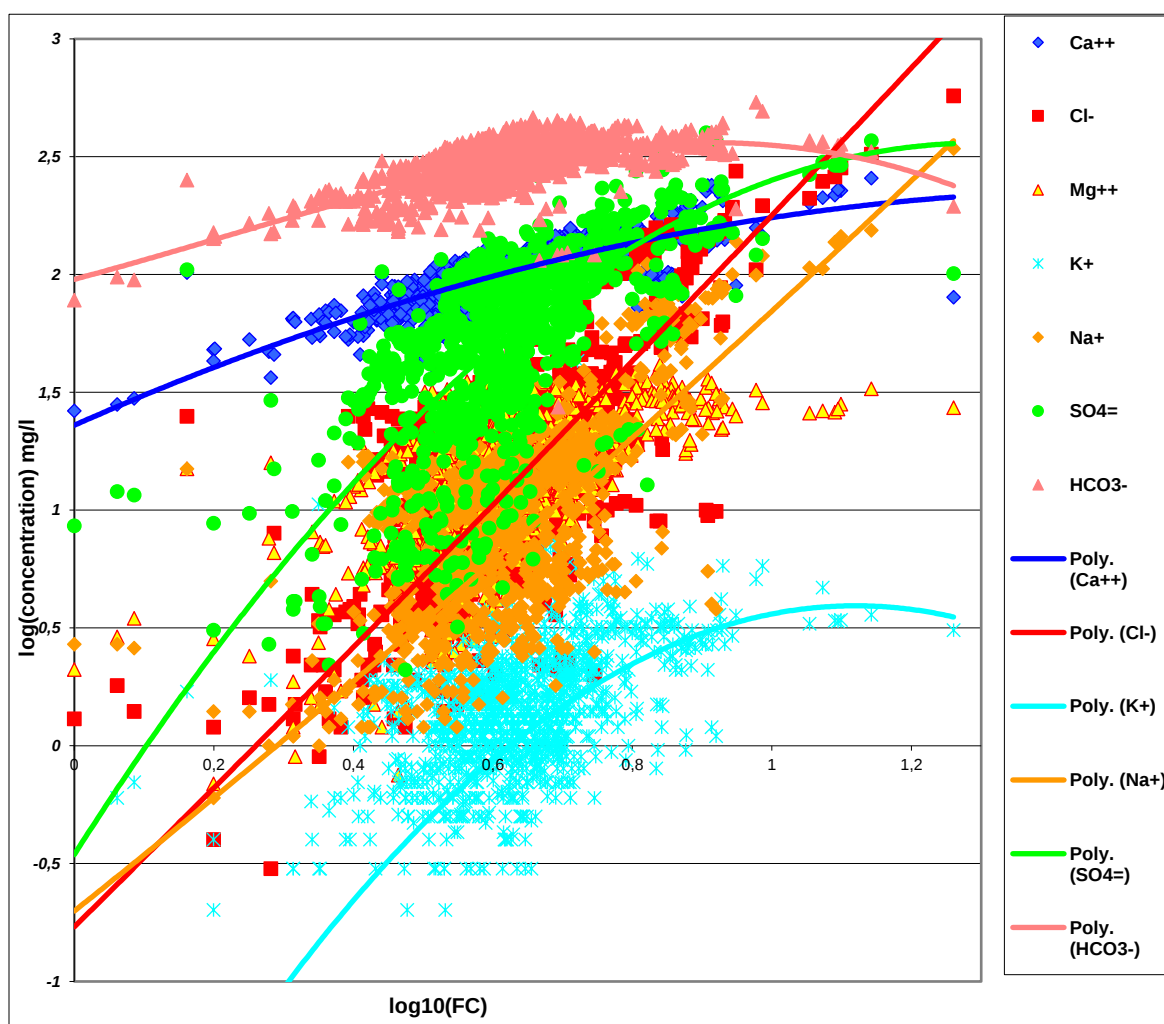


Figure 43 : Diagramme de concentration établi pour le groupe 1 (Le traceur choisi est la CE).

La concentration en **potassium** augmente dans les eaux diluées, mais à partir de $\log_{10}(FC)=0.7$, les teneurs plafonnent mettant en évidence un processus qui contrôle la concentration. Il s'agit très probablement de la fixation par le complexe argilo-humique. En effet, cet élément présente une forte affinité avec les argiles qui adsorbent préférentiellement cet élément. De la même manière, la concentration en **sodium** augmente moins rapidement que celle du chlorure pour la même raison, à savoir la fixation par les argiles. Pour des raisons thermodynamiques, la concentration des solutions favorise l'adsorption de monovalents (Na^+ et K^+) au détriment des divalents (Ca^{++} et Mg^{++}). La concentration en **Calcium** augmente moins vite que celle du chlorure, ce qui traduit l'existence d'un mécanisme contrôlant sa concentration. Il s'agit de la précipitation de la calcite. En effet, le calcaire est présent sur presque tout le territoire de la région PACA et les eaux atteignent très facilement l'équilibre avec la calcite. Au niveau stœchiométrique (en non en milligramme par litre comme sur le diagramme de concentration), le calcium domine l'alcalinité carbonatée, avec une alcalinité résiduelle calcite négative. De ce fait la teneur en calcium augmente lors du processus de concentration, mais moins rapidement que le chlorure car une partie du calcium est perdue par la précipitation de la calcite. L'alcalinité carbonatée, dominée stœchiométriquement par le calcium, voit sa concentration stagner et même diminuer pour les eaux les plus minéralisées.

En fin pour le **sulfate**, la concentration augmente globalement avec le facteur de concentration. Cependant pour les eaux les plus minéralisées, les teneurs en sulfate ont tendance à s'infléchir légèrement traduisant probablement que l'équilibre avec le gypse est atteint pour les eaux les plus minéralisées (Figure 44).

IV.2. Diagramme d'équilibre avec la calcite et avec le gypse

La balance ionique des résultats d'analyses en ion majeur a été vérifiée. Elle est bonne à très bonne sur l'ensemble des échantillons, ce qui s'explique par le fait que toutes ces analyses ont été effectuées par des laboratoires de qualité ayant reçu toutes les accréditations européennes. Une légère correction de balance ionique a été effectuée avant de calculer les activités chimiques et la spéciation chimique avec le **modèle AQUA** (Valles et al. 1993).

Le diagramme d'équilibre avec la calcite (Figure 44) montre que toutes les eaux, à de rares exceptions près sont en équilibre avec la calcite, ce qui confirme l'interprétation du diagramme de concentration (Figure 45). Par ailleurs, il est à noter une très forte dispersion des teneurs en CO_2 , puisque le $\log_{10}(p\text{CO}_2)$ varie de -1.2 à -3.6. Ceci concerne tous les sous-groupes du groupe 1. Ce résultat montre la forte hétérogénéité spatiale des conditions d'aération des eaux à l'échelle de ce groupe et de ses sous-groupes.

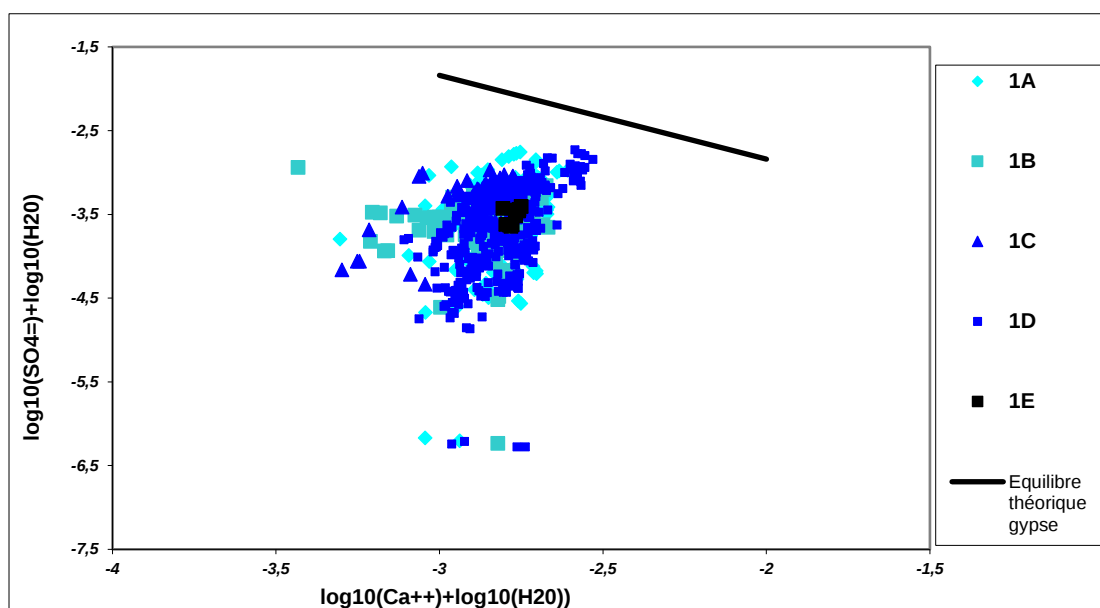


Figure 44 : Diagramme d'équilibre avec le gypse pour les eaux du groupe 1.

Concernant l'équilibre avec le gypse, toutes les eaux sont sous-saturées par rapport à ce minéral (Figure 45), mais il est important de noter que les eaux les plus minéralisées sont très proches de cet équilibre, avec un Index de Saturation (IS) inférieur à 0.5.

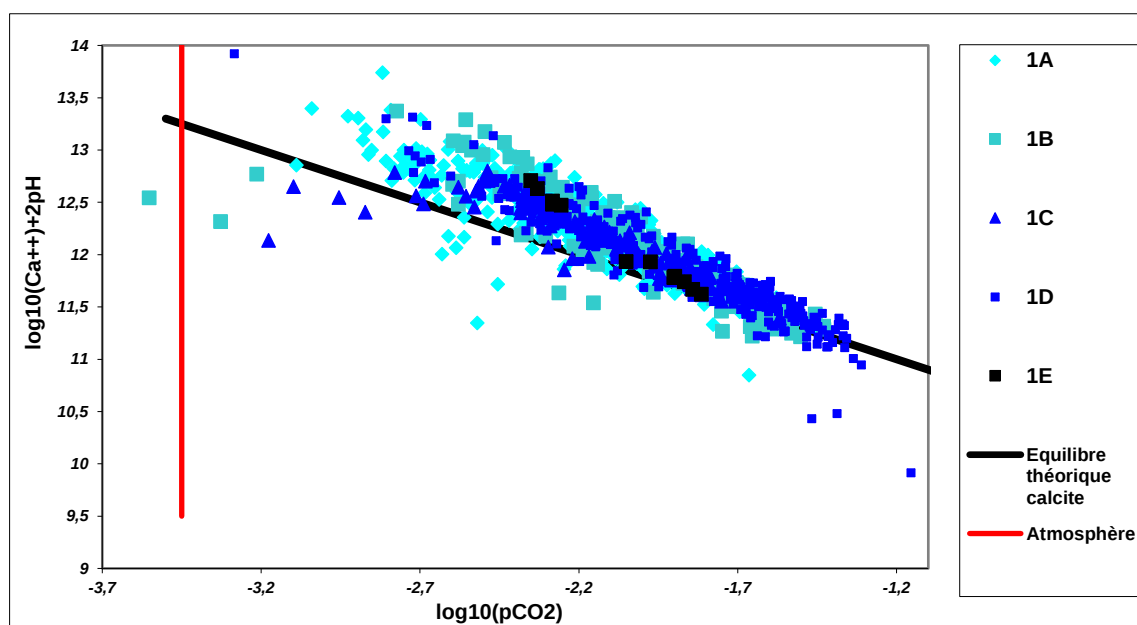


Figure 45 : Diagramme d'équilibre avec la calcite pour les eaux du groupe 1.

En résumé, la composition chimique des eaux du premier groupe évolue avec des conditions extrêmement variables de charge en CO_2 , ce qui induit une forte variabilité de la dissolution de calcite. L'ensemble des eaux est en équilibre avec ce minéral et ce dernier précipite lorsque la minéralité de ces eaux augmente. Par ailleurs, les teneurs en sodium et en potassium sont

contrôlées par des phénomènes d'échange ionique et leur teneur augmente plus vite que le facteur de concentration. Les eaux les plus minéralisées s'approchent de l'équilibre avec le gypse. Du fait de ces processus géochimiques contrôlant l'évolution de la composition lorsque la minéralité des eaux augmente globalement d'amont vers l'aval, le ratio entre les ions majeurs évolue et le faciès chimique change quelque peu, ce qui se traduit par une évolution dans le diagramme de Piper (Figure 46).

V. Faciès chimique des MESO du groupe 1

▪ Diagramme de PIPER

Le report des résultats des analyses des eaux souterraines de PACA sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure 46), met en évidence l'incidence du faciès lithologique sur la qualité des eaux et permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.

On remarque sur le diagramme de Piper que les MESO de groupe1 appartiennent essentiellement aux deux familles des eaux :

- ❖ Bicarbonatée calcique et magnésienne (presque pour la totalité des prélèvements).
- ❖ Chlorurée et sulfatée calcique (quelques prélèvements).

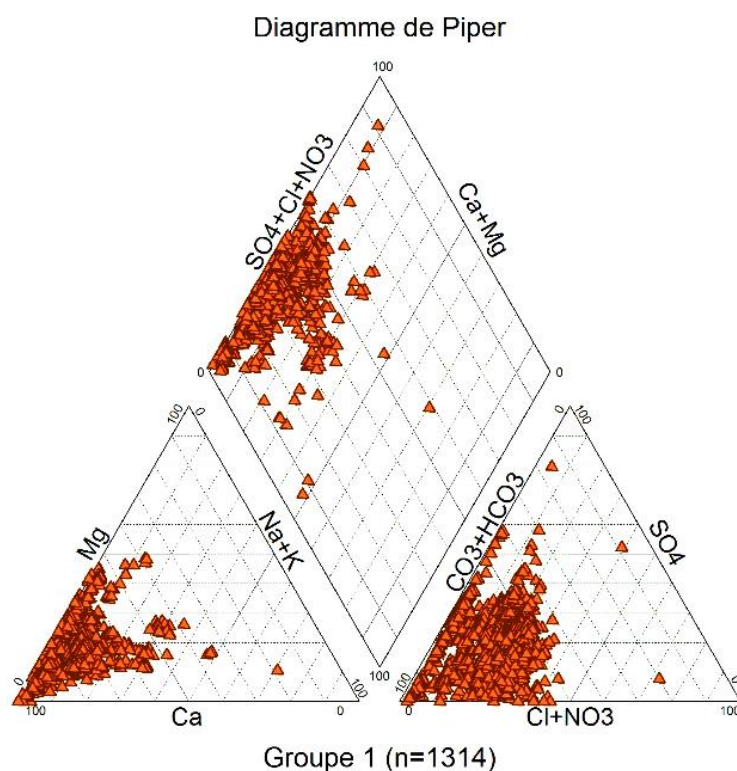


Figure 46 : Report des résultats des analyses chimiques sur le digramme de Piper.

Les masses d'eau souterraine de ce groupe présentent une dominance de faciès Bicarbonaté-calciqne et magnésienne. La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique et hydrogéologique de l'aquifère.

VI. Analyse en Composante Principale (ACP)

L'Analyse en Composante Principale a été effectuée sur les **607** analyses et les **15 paramètres**. Ce nombre important assure une bonne fiabilité des calculs.

VI.1. Matrice des corrélations

La matrice de corrélation utilisée en cette analyse en composantes principales indiquant le degré de similarité entre les variables pour calculer des matrices permettant la projection des variables dans le nouvel espace. Il est commun d'utiliser comme indice de similarité le coefficient de corrélation de **Pearson**, ou la **covariance**. Dans la présente étude, la corrélation de Pearson a été utilisée, elle présente l'avantage de donner des matrices semi-définies positives dont les propriétés sont utilisées en ACP (Tableau 23).

Tableau 23 : Matrice des corrélations de groupe 1 des eaux souterraines.

Variables	Entéro	E. Coli	CE	HCO ₃ ⁻	H ⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ⁼	Fe	Mn	NO ₃ ⁻	As
Entéro	1														
E. Coli	0,646	1													
EC	-0,038	-0,041	1												
HCO ₃ ⁻	-0,037	-0,006	0,523	1											
H ⁺	-0,028	0,001	0,484	0,486	1										
Ca ⁺⁺	-0,038	-0,028	0,795	0,595	0,495	1									
Cl ⁻	-0,017	-0,022	0,801	0,144	0,300	0,392	1								
Mg ⁺⁺	-0,018	-0,038	0,555	0,536	0,276	0,297	0,306	1							
K ⁺	-0,022	-0,026	0,350	0,127	0,046	0,263	0,311	0,148	1						
Na ⁺	-0,019	-0,027	0,779	0,119	0,273	0,349	0,980	0,287	0,330	1					
SO ₄ ⁼	-0,033	-0,063	0,728	0,154	0,258	0,755	0,407	0,419	0,279	0,396	1				
Fe	-0,003	-0,002	-0,021	-0,018	-0,028	-0,022	-0,004	-0,017	0,032	-0,002	-0,019	1			
Mn	0,004	-0,008	0,131	0,118	0,034	0,045	0,131	0,061	0,124	0,188	0,027	0,079	1		
NO ₃ ⁻	-0,008	0,002	0,389	0,192	0,213	0,471	0,213	0,046	0,198	0,187	0,311	-0,017	-0,051	1	
As	-0,006	-0,007	-0,084	-0,129	-0,046	-0,105	-0,021	-0,047	-0,021	-0,018	-0,039	0,098	0,066	-0,029	1

La matrice des corrélations montre des coefficients de corrélation généralement important, surtout entre la CE et le Calcium, Chlorure, l'hydrogénocarbonate, Mg, K, Na, SO₄, le Sulfate et entre Chlorure et Sodium, aussi entre HCO₃ et Calcium. L'apparition de plusieurs corrélations est généralement liée aux diversités de lithologie des différentes masses d'eau, ainsi à la variation de types de ressource et des occupations du sol...

VI. 2. Distribution de la variance

L'importance de chaque axe factoriel est reportée sous forme graphique sur la figure 48, et sous forme de tableau de données (Tableau 24).

Tableau 24 : Distribution de la variance de groupe 1 de la région PACA.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	4,673	1,644	1,551	1,192	1,094	0,946	0,886	0,864
Variabilité (%)	31,154	10,960	10,342	7,949	7,295	6,306	5,910	5,758
% cumulé	31,154	42,114	52,456	60,405	67,701	74,006	79,916	85,674

Avec respectivement **31%, 11%, 10% et 8%** de variance expliquée (Figure 47), **les 4 premiers axes factoriels** représentent ce qui suit :

- L'axe factoriel 1 représente la minéralité des eaux avec une opposition entre les eaux moins minéralisées en amont et peu minéralisées en aval ;
- L'axe factoriel 2 représente la contamination fécale des eaux ;
- L'axe factoriel 3 représente les faciès chimiques des eaux avec une opposition de faciès chimiques entre les eaux carbonatées calciques et les eaux plus chlorurées sodiques ;
- L'axe factoriel 4 représente la dénitrification des eaux opposant le NO_3 au Fe et au Mn.

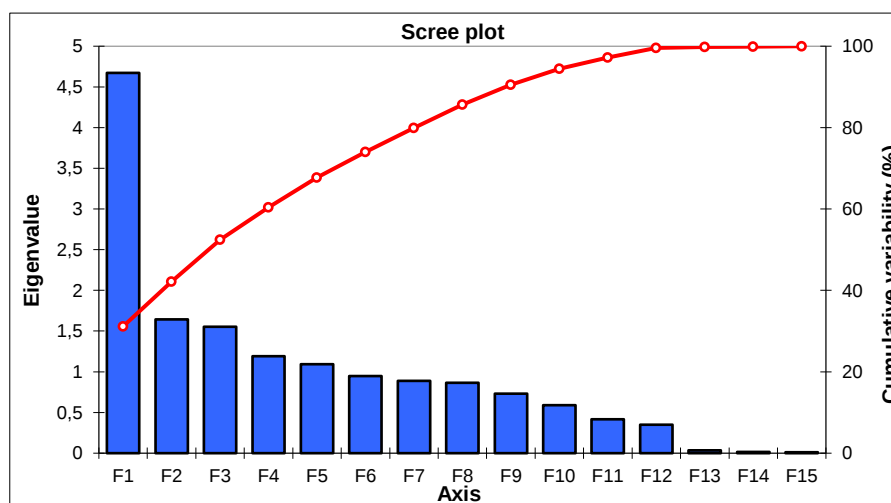


Figure 47 : Distribution de la variance selon les axes factoriels de l'ACP pour le groupe 1.

Le calcul de l'ACP confirme la complexité des sources de variabilité de la qualité des eaux. La variance se distribue selon un grand nombre d'axes factoriels d'importance comparable.

Les deux premiers axes portent respectivement 31,15 % et 11 % de la variance, toutes les analyses des 15 paramètres, et donc un premier plan factoriel à 82%. Celui-ci permet de visualiser presque la moitié de l'information totale. Viennent ensuite le troisième et quatrième axe factoriel avec 10,34% et 7,94% de variance expliquée. Quant aux cinquième et sixième

axes factoriels, ils représentent respectivement 7,9% et 7,2%. A ce niveau, il est généralement difficile d'interpréter la signification d'axes aussi peu significatifs.

VI.3. Signification des axes factoriels

La corrélation présentée dans le tableau 25 permet d'approuver la signification et l'impact de chaque paramètre sur les différents axes factoriels. La négativité et la positivité des valeurs mettent en avant respectivement les éléments qui s'opposent et ceux qui accentuent la variance. Les principaux axes factoriels de l'ACP1 sont exposés sur le tableau 25 :

Tableau 25 : Corrélation entre les différents paramètres et les axes factoriels du groupe 1.

	F1	F2	F3	F4	F5
Entéroc	-0,059	0,904	-0,007	0,003	0,013
E. Coli	-0,060	0,905	0,027	0,006	0,020
CE	0,982	0,021	-0,059	-0,002	-0,041
HCO₃⁻	0,562	0,009	0,591	0,387	-0,014
H⁺	0,560	0,030	0,368	0,171	-0,019
Ca⁺⁺	0,820	0,008	0,330	-0,176	0,217
Cl⁻	0,764	0,044	-0,535	-0,008	-0,220
Mg⁺⁺	0,571	-0,008	0,231	0,394	-0,188
K⁺	0,419	-0,007	-0,290	-0,116	0,188
Na⁺	0,742	0,040	-0,580	0,020	-0,222
SO₄⁼	0,729	-0,024	0,027	-0,259	0,160
Fe	-0,023	-0,013	-0,159	0,320	0,633
Mn	0,154	0,013	-0,271	0,587	0,129
NO₃⁻	0,443	0,034	0,159	-0,507	0,394
As	-0,099	-0,028	-0,263	0,206	0,527

L'étude précise des principaux Axes Factoriels fera l'objet des prochaines pages, mais pour faciliter la lecture, un résumé est présenté dans le tableau 26.

Tableau 26 : Représentation significative des quatre premiers axes factoriels des eaux souterraine du groupe 1.

AF	Inertie	Signification	Résumé
F1	31	Minéralité : CE, HCO ₃ , Ca, Mg, k ...	Minéralité
F2	10.9	Entérocoques + Escherichia Coli	Paramètre Bactériologique
F3	10.3	HCO ₃ contre Sodium et Chlore	Faciès chimique
F4	7.9	Métaux contre les Nitrates	Oxydo-réduction aération des nappes

Le premier Axe Factoriel présente nettement la variabilité de la minéralité des eaux. L'apparition de la minéralité sur le premier plan factoriel marque l'importance de minéralité de ces eaux.

La masse d'eau des alluvions de la moyenne Durance s'étend entre les cluses de Sisteron et de Mirabeau, dans le département des Alpes-de-Haute-Provence. Les alluvions récentes ont été déposées en fond de vallée par la Durance.

Ces masses d'eaux forment en général des nappes alluviales homogènes et continues au sein des alluvions récentes. Elle présente un caractère libre, qui peut devenir localement semi-captif lorsque les alluvions sont recouvertes par des limons (plus ou moins argileux) (Infoterre, 2020). La nappe est en liaison hydraulique avec la Durance. Elle s'écoule parallèlement au cours d'eau. D'une manière générale, elle est drainée par la Durance, en particulier dans les secteurs de la confluence avec la Bléone, et de la cluse de Mirabeau.

L'épaisseur de la zone non saturée est généralement faible. De plus, la couverture limono-sableuse superficielle, généralement peu épaisse lorsqu'elle est présente, ne constitue pas un horizon suffisamment protecteur même si elle peut rendre la nappe localement captive (Infoterre, 2020).

Le second Axe Factoriel présente les paramètres bactériologiques (Entérocoque et Escherichia Coli). L'apparition des paramètres bactériologiques en deuxième axe indique l'importance de la contamination fécale de ces masses d'eaux. La nappe étant peu profonde, l'épaisseur de la zone non saturée est généralement faible. Elle peut être toutefois relativement importante (de l'ordre de 10m) sur les zones de terrasses alluviales. Compte tenu de la perméabilité relativement élevée, la vulnérabilité de la zone non saturée (ZNS) est importante. En effet, la perméabilité importante des strates et la faible profondeur de la nappe, rendent les eaux souterraines fortement vulnérables aux éventuelles pollutions de surface.

Le troisième Axe Factoriel expose le faciès chimique de ces eaux souterraines : Bicarbonatés. Elle présente les Bicarbonate contre le Sodium, le Chlorure, le Manganèse et le Fer. On marque aussi la présence de Nitrate, ce qui indique que ces masses d'eaux sont moins profondes.

De manière générale, la vulnérabilité de la nappe alluviale du Rhône vis-à-vis des pollutions de surface est faible à modérée sous recouvrement limoneux. Elle peut être localement forte dans les zones de faible recouvrement.

Ces masses d'eau présentent un intérêt écologique majeur. Elle participe en deux nombreux secteurs à la suralimentation du cours d'eau, notamment en période estivale (Infoterre, 2020).

La quatrième Axe Factoriel expose les métaux contre les Nitrates, ce qui illustre l'Oxydo-réduction et l'aération des nappes. Elle marque aussi le transport solide des métaux lourds.

Ces eaux se caractérisent par la richesse en Manganèse et Fer ; contre les Nitrates, ce qui indique que ces eaux sont plus anciennes et moins aérées.

Les alluvions reposent en majorité sur des terrains appartenant au Pliocène (argiles) et au Miocène (marnes, argiles sableuses et molasse). La zone protégée Rhône aval correspond au lit majeur du Rhône et dépend fortement de la nappe alluviale du Rhône. La qualité des eaux de la nappe et le niveau piézométrique sont d'une importance majeure pour la conservation de la zone humide (Infoterre, 2020).

La recharge de ces masses d'eaux se fait généralement par la recharge pluviale prépondérante, par les eaux de surface et recharge locale par les formations encaissantes aquifères drainées par les alluvions.

VI.4. Cartes des Axes factoriels

AF1/AF2 :

Après traitement de l'ACP, une typologie de ressources peut être réalisée selon les moyennes de toutes les analyses de chacune des masses d'eau ainsi que les valeurs moyennes de chaque point de prélèvement pour ce groupe, ce qui permet de visualiser la relation entre les paramètres bactériologiques exposés sur l'axe factoriel 2 et sur AF1 les variations de minéralité comme il est illustré sur la figure 48. Cette relation revêt un intérêt important des variations bactériologiques. Comme déjà noté le premier plan factoriel permet de visualiser 31 % de l'information comprise dans les 607 données traitées dans ce groupe.

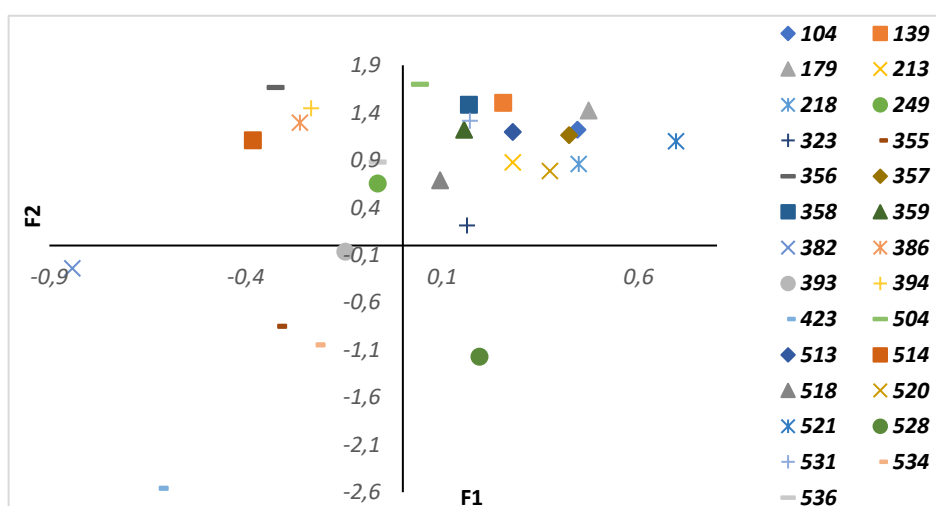


Figure 48 : Cartes des Axes factoriels AF1/AF2 du groupe 1 de la région PACA.

Les masses d'eaux constituant ce groupe sont des nappes alluviales, se situent dans les départements du Vaucluse, Bouche de Rhone et dans les Alpes de Haute province.

Les fortes valeurs marquées sur *l'Axe Factoriel 2*, sont les mauvaises caractéristiques bactériologiques apparues au commune Drap (Source Font de Cristal), la Cagnes-Sur-Mer (Source Font de Cristal), Sisteron (Source Saint Jerome), la commune Roque-Esclapon (Source des Hauts Varnins).. La minéralité importante exposée sur *l'Axe Factoriel 1* est remarquée essentiellement sur la commune Hyeres au source Forage P2 Plaine Ferme Porquerolles, commune Trans-En-Provence (Source Puits De Maurin 2), commune Saint-Etienne-Du-Gres et la commune Trans-En-Provence. La masse d'eau 355 située dans le bassin versant de la Bléone se trouve dans le département des Alpes-de-Haute-Provence, à l'Est de la vallée de la Durance. Au passé géologique complexe, laisse apparaître de nombreux témoignages du retrait de la mer du Bassin de Digne-Valensole et de la subsidence qui a suivi. Les dépôts Mio-Pliocènes de conglomérats constituant notamment le plateau de Valensole (en aval de Digne) en sont le plus bel exemple (Infoterre, 2020). Cette masse d'eaux est moins impactée par la contamination fécale comme illustre la Figure 49 ce qui peut être expliqué par les relations nappe et rivière qui sont étroites et continues sur l'ensemble du cours de la rivière. L'étude de la piézométrie indique des fluctuations dans ces échanges (drainage ou alimentation de la nappe par la rivière) en fonction des secteurs et en fonction de l'hydrologie de la rivière. De nombreux adoux sont présents dans la zone la plus large de la vallée, révélant les variations locales de perméabilité des alluvions ou la présence d'apports latéraux provenant des versants.

La masse d'eau souterraine 356 se situe en bordure sud-ouest de l'Arc alpin, correspondant à la couverture méso-cénozoïque de la zone externe des Alpes, désignent une forte minéralité liée premièrement à son type de nappe alluviale peu profonde (2 à 5 m / sol) et en liaison hydraulique avec la rivière (échanges variables selon les secteurs et les périodes). Bien que moins aquifère, le mur constitué par les poudingues et marnes Mio-Pliocènes de Valensole peut présenter une perméabilité essentiellement par fracturation.

🌀 **AF2/AF3 :**

Selon les axes factoriels **AF2 et AF3** une typologie est accomplie de ressources par rapport aux problèmes de qualité affectant les ressources en eau de cette groupe (Processus rédox et bactériologie). Les valeurs moyennes sur toutes les analyses de chacune des masses d'eau ainsi que les valeurs moyennes de chaque point de prélèvement pour ce groupe ont été représentées sur la figure 49.

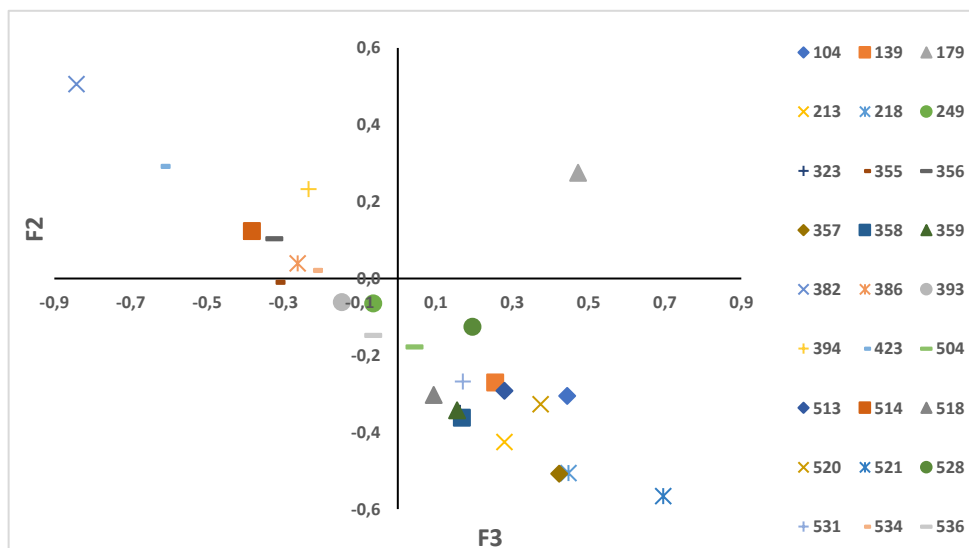


Figure 49 : Cartes des Axes factoriels AF3/AF2 du groupe 1 de la région PACA.

L'analyse en composante principale désigne en deuxième axe factoriel une contamination fécale avec **10.9 %** de la variance. Tandis que le troisième axe factoriel expose les variations de Redox et le faciès chimique avec **10.3 %**.

On remarque selon les résultats de l'ACP que la variabilité de minéralité et de contamination fécale est plus importante que le faciès chimique puisqu'ils apparaissent en troisième axe factoriel. Suivant les plans factoriels F2 et F3, on remarque que les masses d'eau '521, 218, 357 et 213' sont infectées par une contamination fécale (Entérocoque et Escherichia Coli) et moins minéralisées. Du fait de la nature de l'aquifère (alternance de niveaux perméables aquifères et niveaux argileux), la nappe miocène est « théoriquement » peu vulnérable (Figure 50).

C'est notamment le cas dans la partie Ouest de la masse d'eau 218, où la nappe se trouve sous couverture pliocène et présente un caractère captif (Infoterre, 2020).

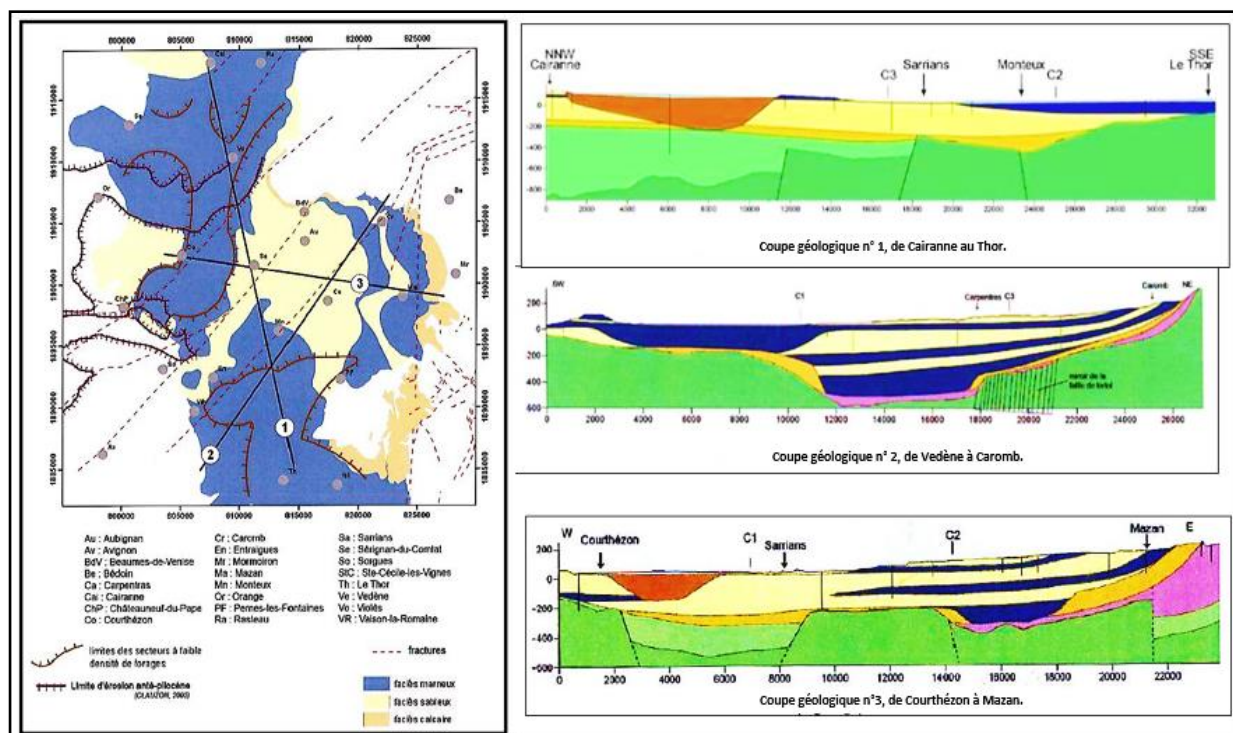


Figure 50 : Carte et coupes de l'aquifère de la molasse miocène du Comtat (MOULIN, 2012)

L'aquifère miocène regroupe les safres helvétiques, ainsi que la molasse Bourdigalienne sous-jacente (formations du Miocène). Les formations helvétiques, dites « safres », sont constituées par une molasse sablo-gréseuse dans laquelle sont intercalés des bancs de marnes sableuses. De nombreuses et rapides variations latérales de faciès caractérisent cette formation. Une particularité du réservoir miocène est la très bonne cohésion des sables qui sont plus ou moins indurés, et qui facilitent la réalisation de forages.

Sur sa majeure partie, l'aquifère des molasses miocènes est recouvert par des formations quaternaires se composant de placages d'alluvions anciennes déconnectées des cours d'eau, et d'alluvions récentes en liaison avec les principaux cours d'eau. Leurs épaisseurs sont variables et peuvent atteindre dans le meilleur des cas environ 30m. En bordure Ouest, le Miocène est souvent recouvert par les marnes pliocènes peu perméables.

Le réservoir miocène présente une structure d'aquifère multicouche, ou lenticulaire (variations latérales de faciès). La perméabilité de l'aquifère dépend essentiellement de la porosité efficace des passées sableuses, et de la fissuration éventuelle des formations. La molasse présente des caractéristiques hydrodynamiques plutôt modestes (1.10^{-5} à 1.10^{-6} m/s), toutefois, le réservoir présente par endroits des transmissivités plus importantes grâce à son épaisseur (10^{-4} voire 10^{-3} m²/s) (Moulin, 2012).

Les masses d'eaux souterraines **382 et 423** ont un processus rédox important et moins infecté par la contamination fécale comme c'est illustre par les plans factoriels. Elle correspond à des alluvions récentes du Rhône et celles présentes à l'aval de ses affluents tels que l'Ardèche : graviers et galets de nature variée (calcaires, quartzites, roches éruptives ou métamorphiques). La masse d'eau est principalement alimentée par les eaux de surface : le vieux Rhône et son canal d'alimentation, ses affluents, les canaux et les apports des versants. Le substratum étant constitué essentiellement par des formations argileuses pliocènes (peu perméables), les échanges sont négligeables. Cette partie de la vallée du Rhône est particulièrement intéressante d'un point de vue écologique : pérennité d'espèces rares, forte valeur patrimoniale.

VI.5. Diagramme de contribution des Plans Factoriels

Suite à l'ACP, il est possible de représenter simultanément dans l'espace des facteurs à la fois les observations et les variables, comme l'illustre le diagramme de la contribution des plans factoriels **F1/F2** sur la figure 51, ils relient la relation entre les paramètres bactériologique (AF2) et la minéralité des eaux (AF1). *

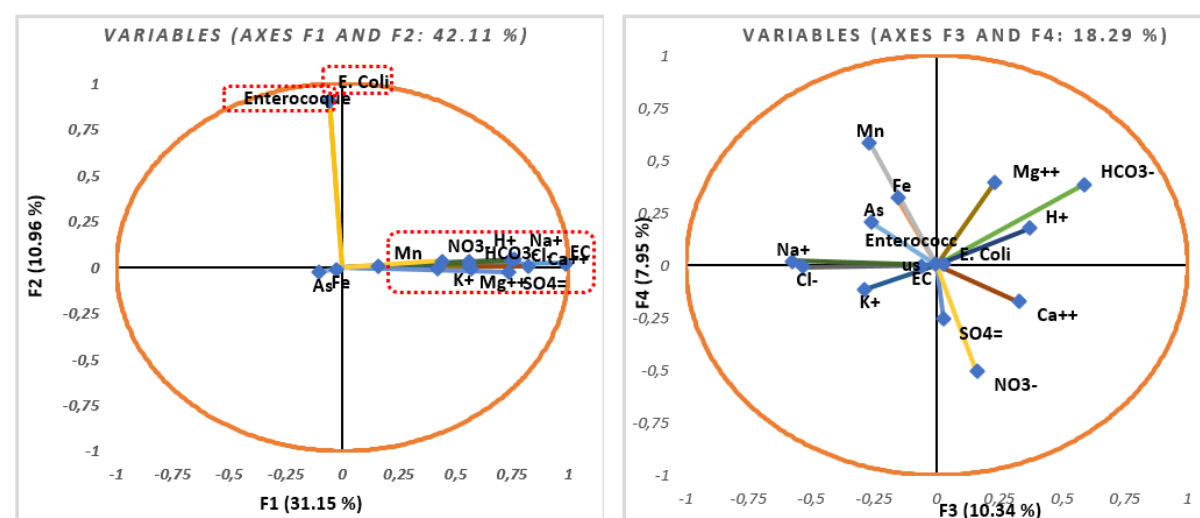


Figure 51 : Contribution des variables aux principaux plans factoriels du groupe 1.

Les pollutions bactériologiques 'Entérocoque et Escherichia Coli' dépend de la dissolution et la variation de minéralité des eaux. Comme l'illustre la figure 51, plus la minéralité augmente plus la contamination fécale diminue et vice versa. La variation de pluie et de sécheresse durant les dernières années a eu un impact sur la charge bactérienne fécale selon la ressource et les nappes. Ceci permet de guider la surveillance selon la situation climatique.

La minéralité exposée en axe factoriel **1** est généralement attaché à la nature de la lithologie et au temps de contact entre eau et roche. La plupart de ces masses d'eaux prélevées dans les

différentes formations variées, fréquemment dans la plaine d'Orange, plaine des Sorgues, la Crau, Grand Plan de Canjuers. Ainsi, dans les Cailloutis de la Crau, Molasses miocènes du Comtat et dans les Alluvions de la Bléone, de l'Asse, de la moyenne Durance et basse Durance, de l'Huveaune et les Alluvions Durance amont, dans les formations variées du Haut Verdon et Haut Var et des formations variées de la région de Toulon.

En résumé, le groupe 1 se caractérise par 4 processus bien marqués et hiérarchisés :

- L'augmentation amont aval de minéralité des eaux ;
- La contamination fécale ;
- L'opposition de faciès chimique Na Cl contre Ca HCO₃ ;
- La dénitrification,

Ils représentent 60% de l'information contenue dans cette partie de la base de données.

VII. Distribution spatiale des sous-groupes

Lors de la classification hiérarchique ascendante non supervisée ayant conduit à l'identification de ce groupe, 5 sous-groupes ont été identifiés et nommés de 1A à 1E. Ce dernier constituant un groupe à part avec une seule MESO FRDG249 Sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron.

La distribution spatiale de sous-groupes montre une cohérence certaine entre la classification en sous-groupes et la position des MESO correspondantes (Figure 52).

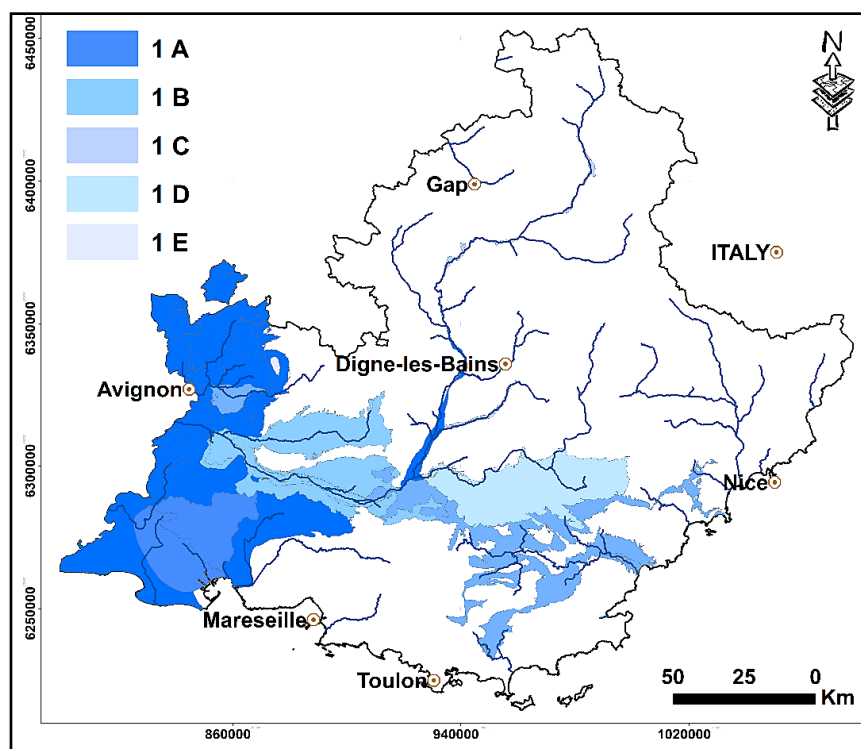


Figure 52 : Distribution spatiale des différents sous-groupes de groupe 1.

Le **sous-groupe 1A** contient l'essentiel des échantillons du groupe 1. De ce fait, ses caractéristiques sont proches de celles du groupe 1, en particulier un faible niveau de contamination fécale. Il est à noter cependant une teneur en nitrate plus élevée, notamment si on la compare avec la moyenne du bloc 2 (Tableau 26).

Tableau 26 : Corrélation entre les différents paramètres et le bloc2, le groupe1 et les sous-groupes de 1^{ère} groupe.

Variable	Bloc 2	Grp 1	Grp 1A	Grp 1B	Grp 1C	Grp 1D	Grp 1E
Entéroc.	2.61	1.98	1.55	0.41	2.05	3.47	0.00
E. Coli	3.55	1.40	1.29	0.78	1.05	2.00	0.00
EC	548.34	672.32	668.80	648.79	652.63	697.62	561.58
HCO ₃ ⁻	252.28	299.10	286.34	318.56	252.45	321.97	260.67
H ⁺	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ⁺⁺	86.78	107.20	110.86	104.71	89.92	107.27	105.46
Cl ⁻	17.48	24.53	22.40	21.35	36.47	26.74	10.48
Mg ⁺⁺	13	15.72	13.25	16.11	17.43	19.24	3.41
K ⁺	1.05	1.57	1.71	1.82	1.65	1.17	2.40
Na ⁺	11.02	14.45	14.10	12.38	21.18	14.56	5.74
SO ₄ ⁼	59.96	79.83	90.24	59.01	85.04	73.59	56.20
Fe	8.28	15.12	16.16	41.18	9.58	2.54	0.83
Mn	2.66	3.32	1.19	1.25	4.06	6.29	40.00
NO ₃ ⁻	4.67	7.11	8.67	8.37	3.87	4.59	19.00
As	0.24	0.10	0.11	0.03	0.17	0.10	0.00
Nombre Ech.	5294	1314	607	196	101	398	12

Le groupe 1B est marqué par une forte teneur en Fer et en Nitrate. Ceci est probablement dû à une contribution d'eau de surface car le manganèse est peu abondant. La teneur en bactéries fécales est cependant très faible (Tableau 26).

Le sous-groupe 1C présente une concentration en Cl, Na et SO₄ plus forte que l'ensemble du groupe 1 et que l'ensemble du bloc 2.

Le groupe 1D a une minéralité élevée si on la compare au groupe 1 mais aussi à l'ensemble du bloc 2, du fait d'une teneur en Na et Cl plus élevée.

Le sous-groupe 1E ne comporte que peu d'analyses et les statistiques sont peu fiables. Toutefois, il est à noter une forte teneur en nitrates et en manganèse, ce qui est peu habituel (Tableau 26).

VII. 1. Détermination

▲ Le sous-groupe 1A :

Le sous-groupe 1A est constitué des MESO suivantes :

FRDG104 Cailloutis de la Crau.

FRDG 357 Alluvions de la moyenne Durance.

FRDG 359 Alluvions basse Durance.

FRDG 521 Calcaires et marnes crétacés du BV Drôme, Roubion, Jabron.

FRDG 531 Argiles bleues du Pliocène inférieur de la vallée du Rhône.

FRDG 536 Marno-calcaires et grès Collines Côte du Rhône rive gauche et de la bordure du bassin du Comtat.

Ce sont des MESO situées à l'aval du réseau hydrographique du système Rhône-Durance. La composition chimique et bactériologique montre une forte variabilité pour la plupart des paramètres (Tableau 27), ce qui atteste d'une forte variabilité spatiale.

Les axes factoriels sont identiques à ceux de l'ensemble du groupe 1 (Figure 51) et dans le même ordre en termes de hiérarchisation des processus. Ils représentent 65% de la variance totale, c'est à une part légèrement plus importante que pour l'ensemble du groupe 1A. Ceci pouvant s'expliquer par le fait que ce sous-groupe est plus homogène en termes d'unités géologiques que le groupe 1 en son entier.

Tableau 27 : Statistiques univariées pour le sous-groupe 1A.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-type	CV (%)
Entéro.	0.0	650	1.549	26.597	1717
E. Coli	0.0	350	1.295	15.375	1187
EC	88.0	1341	668.797	143.501	21
HCO ₃ ⁻	27.4	428	286.335	52.099	18
H ⁺	0.0	0	0.000	0.000	60
Ca ⁺⁺	14.3	193	110.860	23.317	21
Cl ⁻	0.0	275	22.397	14.861	66
Mg ⁺⁺	0.0	34	13.252	5.064	38
K ⁺	0.0	43	1.711	1.871	109
Na ⁺	0.0	138	14.100	8.025	57
SO ₄ ⁼	0.0	240	90.235	38.605	43
Fe	0.0	3200	16.157	139.770	865
Mn	0.0	206	1.189	10.159	854
NO ₃ ⁻	0.0	49	8.669	7.165	83
As	0.0	49	0.114	2.012	1767

Les axes factoriels sont les suivants :

AF1 : L'augmentation amont aval de minéralité des eaux souterraines.

AF2 : La contamination fécale (Escherichia Coli + les Entérocoques).

AF3 : L'opposition de faciès chimique Chloruré-Sodique (NaCl) contre le Bicarbonaté-Calcique (Ca HCO_3), les nitrates étant associés à ces eaux carbonatées calciques de manière plus forte que pour le groupe 1 entier.

AF4 : La dénitrification.

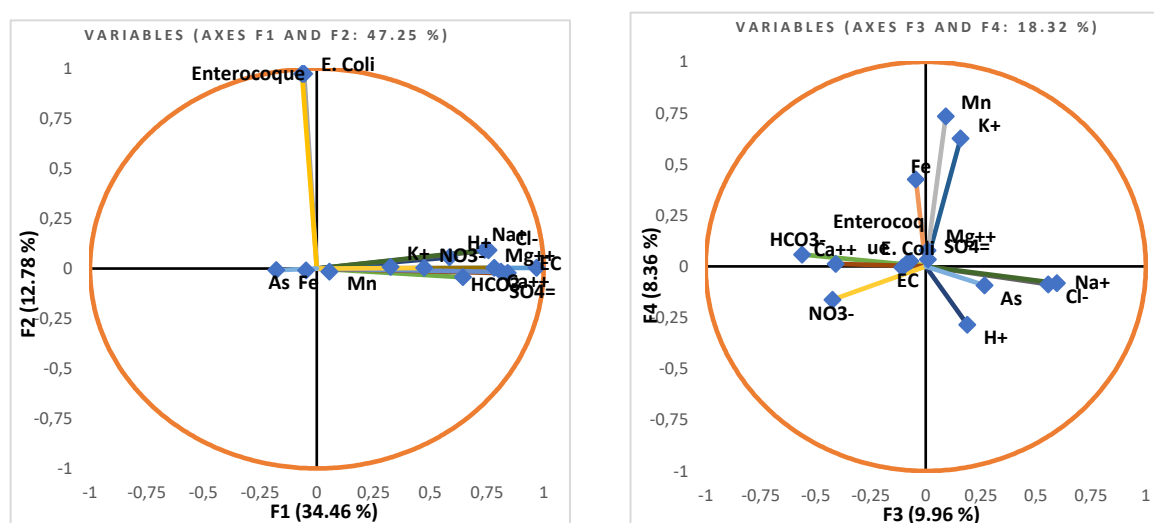


Figure 53 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1A.

▲ Le sous-groupe 1B :

Le sous-groupe 1B est constitué des MESO suivantes :

FRDG 213 Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires dans BV Basse Durance.

FRDG 218 Molasses miocènes du Comtat.

FRDG 247 Massifs calcaires du nord-ouest des Bouches du Rhône.

FRDG 513 Formations variées du bassin versant de la Touloubre et de l'étang de Berre.

Il s'agit d'aquifères dans des formations molassiques, calcaires localisés à basse altitude. Elles se localisent aux environs de la confluence Rhône-Durance, autour de l'étang de Berre et dans les plaines vaclusiennes. Ce sont pour certaines (et pas toutes) des aquifères non superficiels

et donc moins vulnérables aux pollutions bactériennes. Ce sont des aquifères à circulation naturelle plutôt lente du fait de la topographie et de faibles gradients.

Tableau 28 : Statistiques univariées pour le sous-groupe 1B.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-Type	CV (%)
Entérocoque	0.000	9.0	0.4	1.5	372
E. Coli	0.000	38.0	0.8	4.1	530
EC	226.0	900	648.8	122.9	19
HCO ₃ ⁻	139.1	429	318.6	49.6	16
H ⁺	0.000	0.0	0.0	0.0	49
Ca ⁺⁺	40.80	153	104.7	23.2	22
Cl ⁻	0.000	78.0	21.3	12.5	58
Mg ⁺⁺	0.000	39.3	16.1	7.7	48
K ⁺	0.000	10.6	1.8	1.5	84
Na ⁺	0.000	35.3	12.4	6.4	51
SO ₄ ⁼	0.000	158	59.0	35.9	61
Fe	0.000	5820	41.2	416.1	1010
Mn	0.000	115	1.2	8.9	712
NO ₃ ⁻	0.000	27.9	8.4	6.9	82
As	0.000	6.2	0.0	0.4	1400

Les axes factoriels sont identiques à ceux de l'ensemble du groupe 1 et le sous-groupe 1A (Figure 53) mais dans un ordre différent en termes de hiérarchisation des processus. Ils représentent **72% de la variance totale**, c'est à une part nettement plus importante que pour l'ensemble du groupe 1 ou le sous-groupe 1A.

Ce sous-groupe présente une diversité des processus et probablement une hétérogénéité du milieu nettement plus faibles que pour le groupe 1 ou le sous-groupe 1A.

Les axes factoriels sont les suivants :

AF1 : L'augmentation amont aval de la minéralité des eaux souterraines.

AF2 : La présence de Fer, de Manganèse et des traces d'arsenic (Empreinte des métaux lourds).

AF3 : L'opposition de faciès chimique Chloruré-Sodique (Na Cl) contre les bicarbonates, les bactéries fécales étant associées aux eaux carbonatées Calcique-Magnésiennes.

AF4 : La contamination fécale dans les eaux à faciès plutôt Chloruré-Sodique.

Ainsi, plusieurs points remarquables se détachent. La contamination fécale n'est plus le second processus en importance, mais se divise en deux composantes : la contamination en eau Carbonate et la contamination en eau Chlorurée-Sodique.

Le second processus par ordre d'importance est ici lié aux métaux. Ceci est tout à fait cohérent par rapport aux unités naturelles qui présentent de faible gradient et donc des vitesses de circulation faibles. Ceci favorise la solubilisation des métaux.

Par ailleurs, les nappes étant moins superficielles que pour le sous-groupe 1A, tout au moins pour certaines d'entre elles, il est tout à fait normal que la contamination fécale ne soit qu'en troisième position (et quatrième) et non en seconde comme pour l'ensemble du groupe 1 et du sous-groupe 1A.

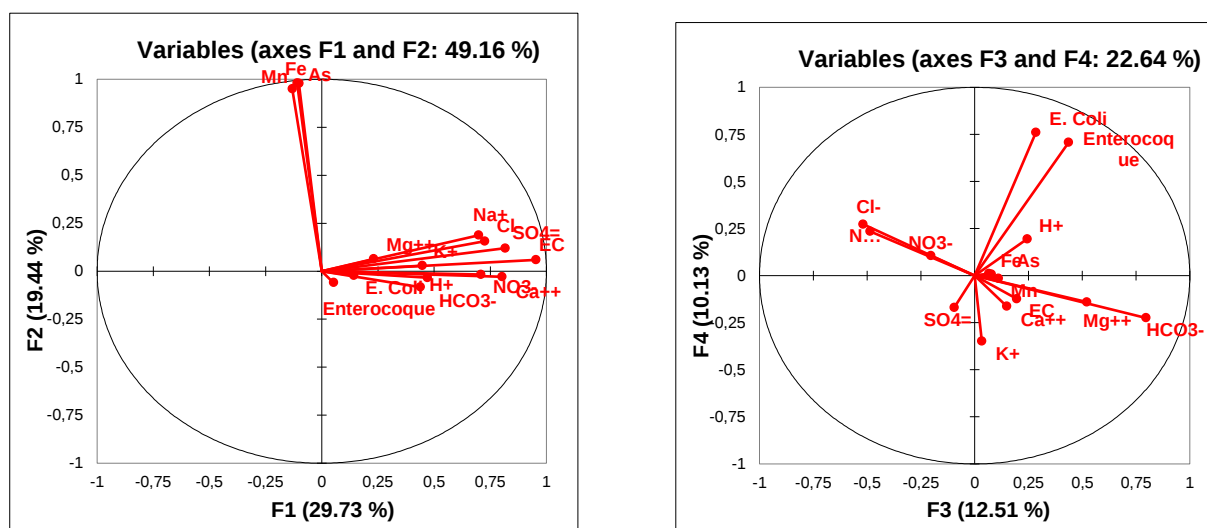


Figure 54 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1B.

▲ Le sous-groupe 1C :

Le sous-groupe 1C est constitué des MESO suivantes :

FRDG 356 : Alluvions de l'Asse.

FRDG 386 : Alluvions des basses vallées littorales des Alpes-Maritimes (Siagne, Loup et Paillon).

FRDG 394 : Alluvions Durance amont.

Il s'agit de nappes d'accompagnement de cours d'eau à forte énergie, avec des alluvions très grossières. De ce fait, il s'agit d'environnement très vulnérable à la contamination par les eaux de surface et en particulier vulnérable aux contaminations fécales.

Comme pour les précédents sous-groupes, la variabilité est très forte sur la plupart de paramètres. Les moyennes de charge bactérienne sont légèrement plus élevées que pour les sous-groupes 1A et 1B, ce qui pourrait confirmer la plus grande vulnérabilité de ces environnements (Tableau 29).

Tableau 29: Statistiques univariées pour le sous-groupe 1C.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-type	CV (%)
Entéroco.	0.0	130.0	2.0	13.5	660
E. Coli	0.0	86.0	1.0	8.6	821
EC	174.0	1123.0	652.6	218.7	34
HCO ₃ ⁻	97.7	359.0	252.5	57.5	23
H ⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	47
Ca ⁺⁺	28.1	139.2	89.9	18.9	21
Cl ⁻	0.0	163.0	36.5	47.9	131
Mg ⁺⁺	2.9	35.0	17.4	9.0	52
K ⁺	0.0	4.1	1.7	0.9	57
Na ⁺	1.5	84.4	21.2	23.6	112
SO ₄ ⁼	7.6	247.0	85.0	45.0	53
Fe	0.0	173.0	9.6	28.5	297
Mn	0.0	140.0	4.1	17.4	428
NO ₃ ⁻	0.0	21.4	3.9	3.4	87
As	0.0	7.0	0.2	0.8	505

Les axes factoriels sont les suivants :

AF1 : L'augmentation amont aval de minéralité des eaux.

AF2 : La contamination fécale (Entérocoque + Escherichia Coli).

AF3 : L'opposition de faciès chimique Chloruré-Sodique (Na Cl) contre le Sulfaté-Calciq (Ca SO₄), le Fer, le Manganèse, l'Arsenic et la charge bactérienne étant associée au faciès Sulfaté-Calciq.

AF4 : L'opposition Fer/Manganèse (processus rédox).

Les quatre premiers axes factoriels cumulent **75.2%** de la variance totale, ce qui est largement plus important que pour la totalité du groupe 1 (60% pour l'ensemble du groupe 1).

Comme pour les sous-groupes précédents, ceci s'explique par le fait que le sous-groupe constitue un ensemble plus homogène en termes d'unités géologiques (Figure 55), ce qui réduit les différentes sources de variabilité, et facilite l'étude en vue de la protection.

Par ailleurs, le fait que la contamination fécale soit le second mécanisme de variation de la qualité des eaux montre l'importance de ce risque dans ce sous-groupe. Ce résultat est conforme à la nature du milieu naturel de ce sous-groupe.

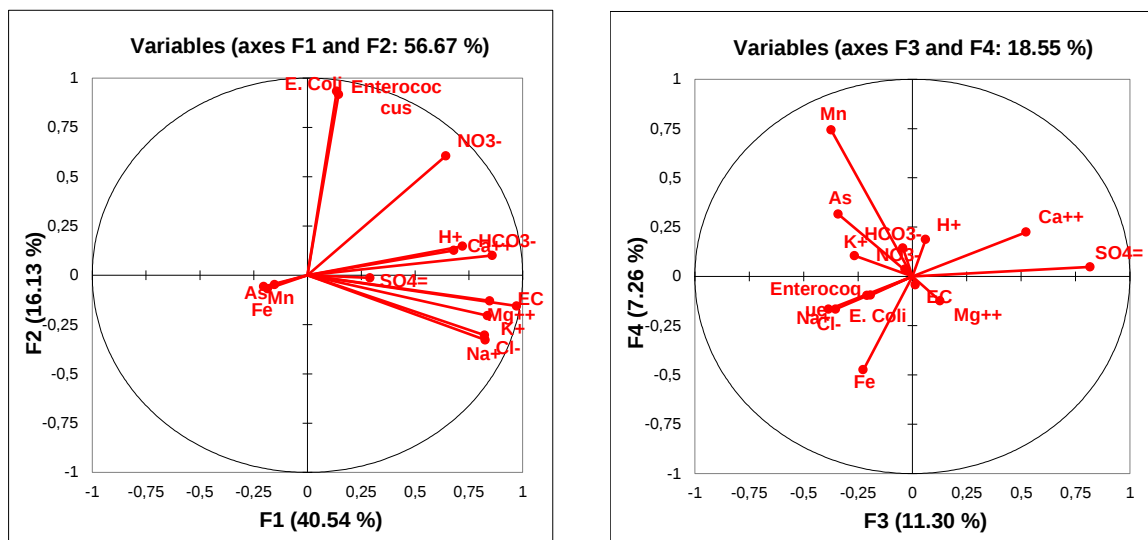


Figure 55 : contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1C.

▲ Le sous-groupe 1D :

Ce sous-groupe est assez différent des sous-groupes 1A, 1B et 1C.

FRDG 139 : Plateaux calcaires des Plans de Canjuers, de Tavernes-Vinon et Bois de Pelenq.

FRDG 179 : Unités calcaires Nord-Ouest varois (Mont Major, Cadarache, Vautubière).

FRDG 323 : Alluvions du Rhône du confluent de la Durance jusqu'à Arles et Beaucaire et alluvions du Bas Gardon.

FRDG 354 : Alluvions des plaines du Comtat (Sorgues).

FRDG 518 : Formations variées côtes du Rhône rive gardoise.

FRDG 520 : Formations gréseuses et marno-calcaires de l'avant-Pays provençal.

Le sous-groupe 1D est constitué de nappes sous formations alluviales mais de nature variable. Il y a d'une part les plaines des Sorgues dans lesquelles la nappe est proche de la surface, mais un très faible gradient et des processus d'anoxie, des nappes d'accompagnement peu profondes sur alluvions du Rhône, mais aussi la partie aval du bassin versant du Verdon, avant sa confluence avec la Durance.

Tableau 30 : Statistiques univariées pour le sous-groupe 1D.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-Type	CV (%)
Entéroc.	0.0	500.0	3.47	27.6	796
E. Coli	0.0	162.0	2.00	13.5	676
EC	269.0	2750.0	697.62	300.9	43
HCO ₃ ⁻	165.0	539.0	321.97	68.4	21
H ⁺	0.0	0.0	0.00	0.0	57
Ca ⁺⁺	47.1	259.5	107.27	36.5	34
Cl ⁻	0.0	574.0	26.74	56.0	209
Mg ⁺⁺	0.0	42.9	19.24	9.7	50
K ⁺	0.0	10.6	1.17	1.2	98
Na ⁺	0.0	342.6	14.56	30.9	212
SO ₄ ⁼	0.0	400.0	73.59	74.7	102
Fe	0.0	69.0	2.54	10.1	397
Mn	0.0	1038.0	6.29	62.1	988
NO ₃ ⁻	0.0	72.7	4.59	7.4	162
As	0.0	12.0	0.10	0.7	713

Les axes factoriels sont les suivants (Figure 56) :

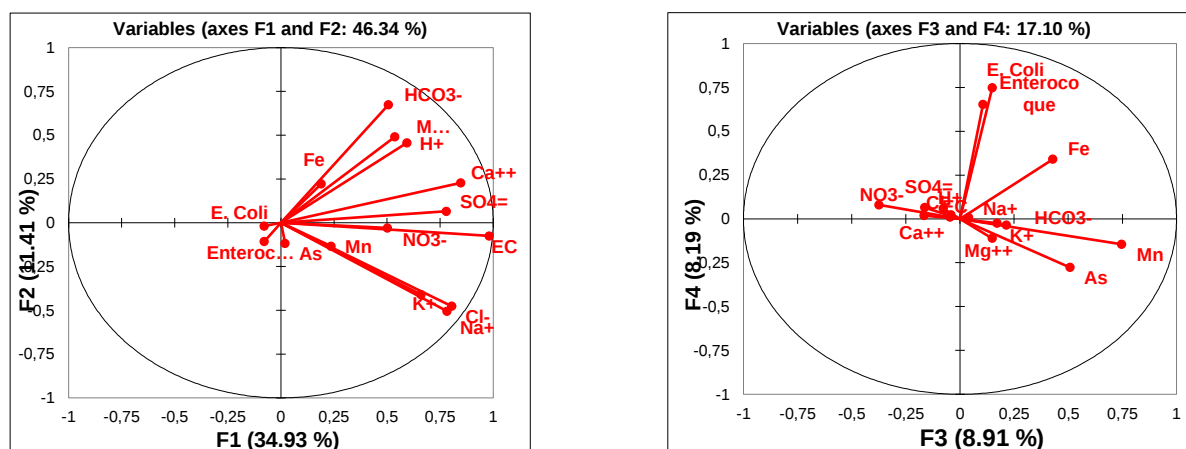
AF1 : L'augmentation de la minéralité de l'amont vers l'aval des eaux.

AF 2 : L'opposition entre les faciès Chloruré-Sodique et Bicarbonaté-Calci-Magnésien.

AF 3 : La solubilisation du Fer, du Manganèse et de l'Arsenic, avec une légère opposition avec les Nitrates, ce qui suggère une dénitrification.

AF 4 : La contamination bactérienne (Entérocoque + Escherichia Coli).

Ces quatre axes factoriels ne cumulent que 63.4% de la variance, ce qui est juste au-dessus de la valeur pour l'ensemble du groupe. Ceci montre une hétérogénéité moindre que pour l'ensemble du groupe 1, mais une hétérogénéité malgré tout plus importante que pour les sous-groupes 1A, 1B et 1C. Ceci doit être attribué à la liste des MESO qui est plus hétérogène de part leur nature géologique que ne l'étaient celles des sous-groupes précédents.

**Figure 56** : contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1D.

▲ Le sous-groupe 1 E :

Ce sous-groupe n'est constitué que d'une Masse d'Eau Souterraine. Le nombre des analyses disponible est faible (seulement 12 analyses d'eau). De ce fait, de nombreux paramètres sont nuls pour ces quelques analyses, ce qui réduit le nombre de paramètres pertinents et par voie de conséquence le nombre d'axes factoriels. Le pourcentage de variance expliquée par chacun des axes ne peut être comparé à celui des autres groupes.

Au niveau de la classification hiérarchique ascendante, il se distingue nettement des autres sous-groupes, il est à part. De ce fait il ne sera décrit que sommairement.

Les axes factoriels sont les suivants (Figure 57) :

AF1 : L'augmentation amont aval de minéralité des eaux.

AF 2 : La solubilisation du fer, du manganèse, opposée aux nitrates (dénitrification et processus redox).

AF 3 : Le pH.

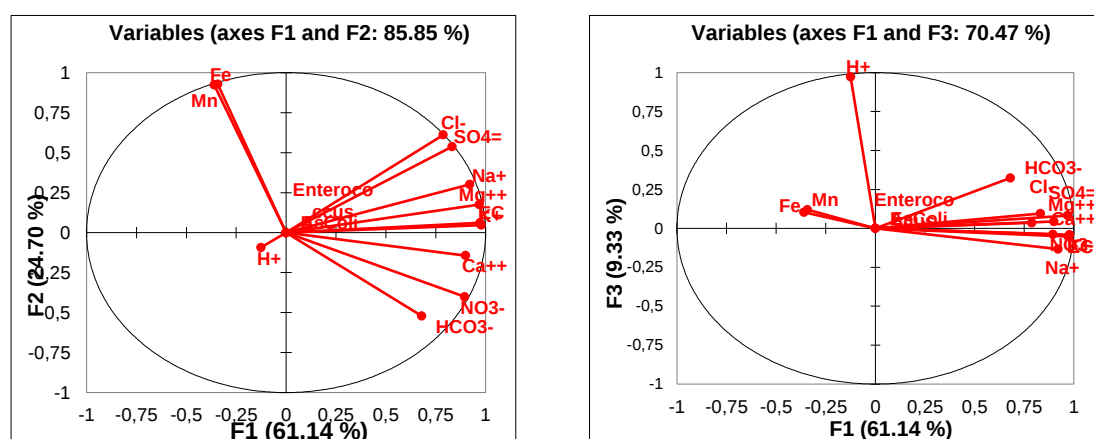


Figure 57 : Contribution des différents paramètres aux premiers plans factoriels de sous-groupe 1E.

VII. 2. Comparaison

Les mécanismes contrôlant la variabilité de la qualité des eaux sont à peu de chose près les mêmes pour les différents sous-groupes, mais leur importance relative change selon le sous-groupe (Tableau 31). Ceci illustre ce qui se passe lors de l'agrégation de données issues de milieux naturels différents. Les sources de variations se mélangent, se diluent dans l'information générale et il devient difficile de les mettre en évidence.

Tableau 31 : Tableau de synthèse sur les axes factoriels des sous-groupes du groupe 1.

Groupe & Sous-groupe	Gr1	Gr1 A	Gr1 B	Gr1 C	Gr1 D	Gr1 E
Nombre d'Echant.	1314	607	196	101	398	12
AF1	Minéralité	Minéralité	Minéralité	Minéralité	Minéralité	Minéralité
AF2	Contamination fécale	Contamination fécale	Présence de Fe et Mn	Contamination fécale	Opposition NaCl/CaMgHCO ₃	Dénitrification
AF3	Opposition de faciès NaCl/CaHCO ₃	Opposition de faciès NaCl/CaHCO ₃ et NO ₃	Opposition CaMgCO ₃ (+fécale)/ NaCl	Opposition NaCl/CaSO ₄ (+Fe, Mn Bactério)	Fe et Mn / NO ₃) dénitrification	
AF4	Dénitrification solubilisation Me et Fe	Dénitrification solubilisation Me et Fe	Fécale associé à NaCl	Opposition Fe/Mn	Contamination fécale	

CONCLUSION

Avec un quart des analyses du bloc 2, ce groupe de MESO couvre une part importante du territoire de PACA. Il s'agit du groupe le plus important de cette étude.

Constitué de 20 MESO, il couvre essentiellement des vallées alluviales et il concerne les nappes d'accompagnement.

Les processus majeurs mis en évidence sont :

- ✓ L'augmentation de concentration en éléments majeurs avec la minéralité, qui généralement augmente vers l'aval.
- ✓ La contamination fécale, surtout lorsque les nappes sont proches de la surface ou lorsque les alluvions sont de granulométrie très grossière. Cette contamination fécale pouvant être liée à un faciès chimique, ou bien à deux faciès, démontrant ainsi la complexité des milieux concernés.
- ✓ Des processus Redox qui se développent lorsque les eaux s'écoulent peu du fait d'une topographie plane. Les nitrates sont dénitrifiés et le manganèse puis le fer sont alors solubilisés.
- ✓ Une opposition entre des faciès chimiques des éléments majeurs lorsqu'il existe des MESO de nature quelque peu différente.

La comparaison avec les moyennes régionales confirme que les processus redox affectant les teneurs en fer et en manganèse sont particulièrement importants pour ce groupe de MESO. Les teneurs en nitrates également plus importantes s'expliquent par la forte proportion de terres cultivées dans le secteur correspondant, mais aussi aux températures plus élevées du fait de la position basse dans le paysage.

La contamination fécale, quoique moins importante qu'à l'échelle régionale, probablement à cause de la faible densité de l'élevage dans ce secteur, joue cependant un rôle majeur dans la variabilité spatiale.

La classification hiérarchique ascendante a montré que les MESO se subdivisent en groupes et en sous-groupes. L'étude des sous-groupes montre une homogénéité plus grande qu'au sein du groupe 1. Pour chaque sous-groupe, les processus impliqués sont souvent les mêmes que ceux rencontrés au niveau du groupe, mais leur ordre varie. Ainsi, la solubilisation de métaux ou bien la contamination fécale peut apparaître en seconde comme en quatrième position par ordre d'importance. Ceci confirme une légère hétérogénéité au sein du groupe 1, hétérogénéité liée à de légères différences entre sous-groupes. De ce fait, la distribution de la variance au niveau du groupe 1 est affectée par cette légère hétérogénéité.

Enfin, lors de la description des différents milieux naturels et des mécanismes correspondants quantifiés par l'ACP, il a été constaté une cohérence remarquable, ce qui renforce l'intérêt de la méthode suivie.

Ainsi, dans les zones à faible gradient, le processus redox semble prendre le pas sur les autres sources de variation de la qualité. Dans les environnements à texture très grossière, la contamination fécale apparaît comme processus majeur de dégradation de la qualité des eaux. Les autres groupes étant moins importants en termes de quantité d'information, de surface de territoire couvert, leur étude sera plus réduite que pour le groupe 1. Elle fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 2 :

ETUDE DE LA QUALITE DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE DU GROUPE 2

Les chapitres précédents n'avaient qu'un objectif : établir une méthode objective, non supervisée, permettant de scinder les bases de données régionales en sous-ensembles ayant une signification en termes de fonctionnement et d'unité géologique. Des ensembles à la taille des moyens de gestion de la ressource en eau souterraine.

La méthode élaborée a permis de dégager huit groupes de masses d'eau souterraines. Ce chapitre est consacré à l'étude détaillée du second groupe. Le premier groupe étant étudié en détail, celui-ci sera abordé de manière plus simple afin de ne pas alourdir de trop le manuscrit.

I. Présentation générale des MESO du groupe 2

Les masses d'eaux formant ce groupe se localisent essentiellement au Sud du département de Bouche de Rhône et du département de Var. Avec notamment 9 masses d'eaux et 106 points de prélèvements (Figure 58). Le traitement a été effectué sur 562 analyses d'échantillons prélevés à l'Est dans les limons et les alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue, au Sud dans les Calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques et plus à l'Ouest, dans les Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal. Ce groupe concerne des Masses d'Eaux souterraines situées dans des formations calcaires proches du littoral.

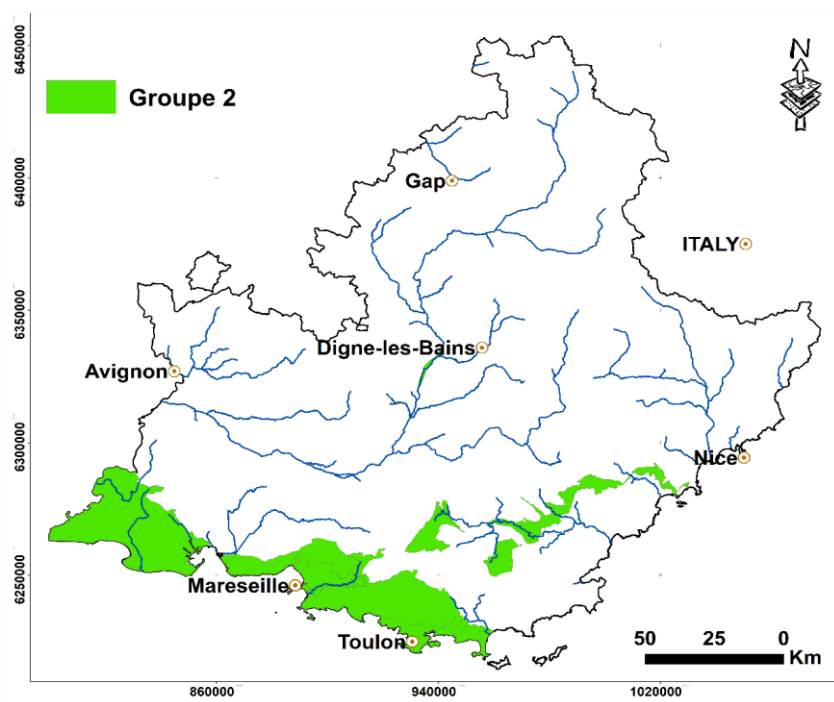


Figure 58 : Cartographie du groupe 2 de Masses d'Eau Souterraines de la région PACA.

II. Description des écoulements

Le tableau suivant représente les différentes masses d'eaux souterraines du groupe 2, avec la description des formations géologiques correspondantes.

Tableau 32 : Masses d'eau souterraines du groupe 2 et les formations géologiques correspondantes.

FRDG	Description
FRDG107	Calcaires crétacés des chaînes de l'Estaque, Nerthe et Etoile
FRDG168	Calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques
FRDG169	Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal
FRDG205	Alluvions et substratum calcaire du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier
FRDG215	Formations oligocènes de la région de Marseille
FRDG358	Alluvions de la Durance moyenne en aval de St Auban (emprise du panache de pollution historique)
FRDG369	Alluvions de l'Huveaune
FRDG504	Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue
FRDG514	Formations variées de la région de Toulon
FRDG423	Formations variées du Haut Verdon et Haut Var

III. Données collectées des MESO du groupe 2

Il a été possible de générer un bloc de **562** analyses suite au traitement et filtration des données extraites depuis la Classification Hiérarchique Ascendante de Bloc, avec les mêmes paramètres : *Entérocoques*, *Escherichia Coli*, HCO_3 , *pH*, *Ca*, *Cl*, *Conductivité électrique*, *Mg*, *K*, *Na*, SO_4 , *Fe*, *Mn*, NO_3 , *As*. Ceci constitue une matrice pleine de **17 450** valeurs.

La géolocalisation de tous les échantillons a permis de relier chacun des points de prélèvement à la masse d'Eau Souterraine (MESO). La figure 59 illustre la localisation de tous les points de prélèvement de ce groupe.

La surface du territoire local n'est pas complètement couverte, mais certaines zones présentent des densités inférieures qui s'expliquent par la rareté de l'eau ou bien une eau très superficielle où les superficies des masses d'eaux très petites.

Le nombre de points de prélèvement étant de 106, il est nettement inférieur à celui du groupe 1. De ce fait, même si l'extension des MESO concernée par le groupe 2 est bien inférieure à celle du groupe 1, la densité est faible.

Aussi, certaines MESO ne comptent que peu d'analyses, ce qui limite la portée statistique des zones correspondantes.

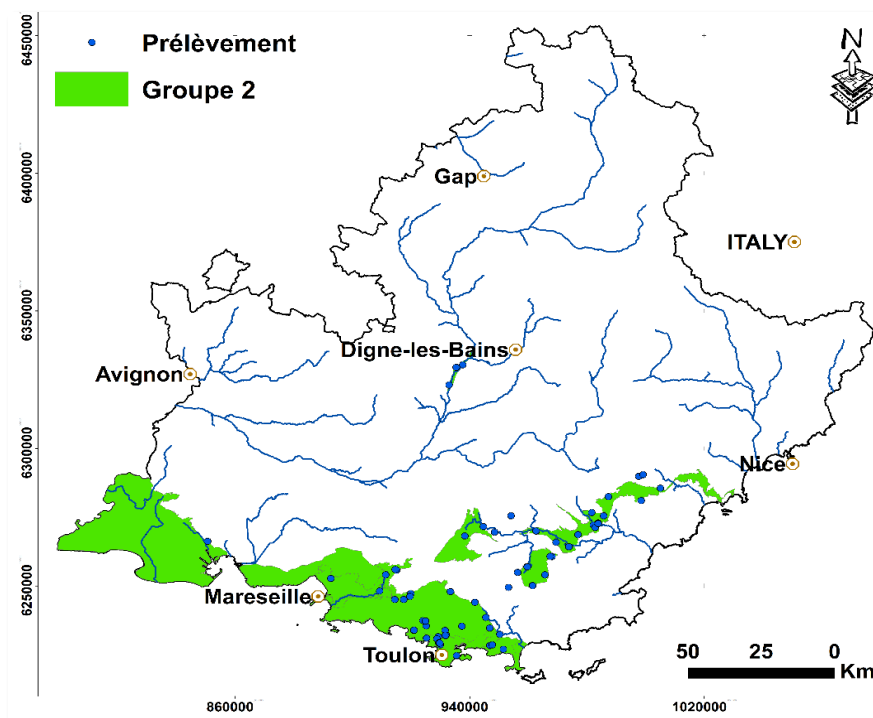


Figure 59: Position de points de prélèvement dans les Masses d’Eau Souterraines du groupe2.

IV. Hydrochimie

Avec une moyenne de 808 μS , les eaux du groupe 2 présentent une minéralité importante (tableau 33), caractéristique des MESO littorales ou proche du littoral, et des nappes situées en position basse dans le paysage. De ce fait les teneurs en Na, Cl et SO_4 sont plus importantes que la moyenne régionale.

Ce groupe contient aussi des masses d’eau circulant dans des massifs calcaires, ce qui permet une oxygénation des eaux et ce qui explique une teneur en nitrate importante mais de faibles teneurs en métaux dissous.

Tableau 32: Statistiques univariées pour le groupe 2

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-type	Coefficient de Variation
Entéroc.	0.0	560.0	3.722	26.726	718
E. Coli	0.0	400.0	5.902	26.375	447
CE	116.0	4980.0	807.721	406.358	50
HCO_3^-	42.0	500.0	310.961	74.763	24
H^+	0.0	0.0	0.000	0.000	76
Ca^{++}	9.8	286.0	117.751	44.818	38
Cl^-	0.0	1087.0	47.728	83.755	175
Mg^{++}	0.0	54.9	18.978	9.959	52
K^+	0.0	16.5	1.767	1.691	96
Na^+	0.0	705.0	27.091	48.942	181

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-type	Coefficient de Variation
SO ₄ ⁼	0.0	572.0	102.565	91.892	90
Fe	0.0	1800.0	7.599	88.533	1165
Mn	0.0	1194.0	3.552	52.206	1470
NO ₃ ⁻	0.0	94.4	10.212	13.262	130
As	0.0	10.0	0.057	0.582	1023

VI.1. Comparaison avec les moyennes régionales

La comparaison avec les moyennes régionales (Tableau 33) confirme une minéralité plus forte que la moyenne régionale. La teneur en nitrate est plus élevée, liée à une activité biologique plus forte dans ces secteurs littoraux aux températures douces que sur le reste de la région PACA qui comporte des zones de haute montagne où l'activité biologique est faible et l'agriculture est peu développée.

Tableau 33 : Comparaison entre les moyennes du groupe 2 et les moyennes régionales.

Variable	Totalité Bloc 2	Groupe 2
Entérocoque	2.6	3.7
E. Coli	3.5	5.9
CE	548.3	807.7
HCO ₃ ⁻	252.3	311.0
H ⁺	0.0	0.0
Ca ⁺⁺	86.8	117.8
Cl ⁻	17.5	47.7
Mg ⁺⁺	13.0	19.0
K ⁺	1.0	1.8
Na ⁺	11.0	27.1
SO ₄ ⁼	60.0	102.6
Fe	8.3	7.6
Mn	2.7	3.6
NO ₃ ⁻	4.7	10.2
As	0.2	0.1

V. Faciès chimique des MESO du groupe 2

▪ Diagramme de PIPER

Le report des résultats des analyses des eaux souterraines de PACA sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure 60), met en évidence l'incidence du faciès lithologique sur la qualité des MESO et permet aussi d'évaluer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.

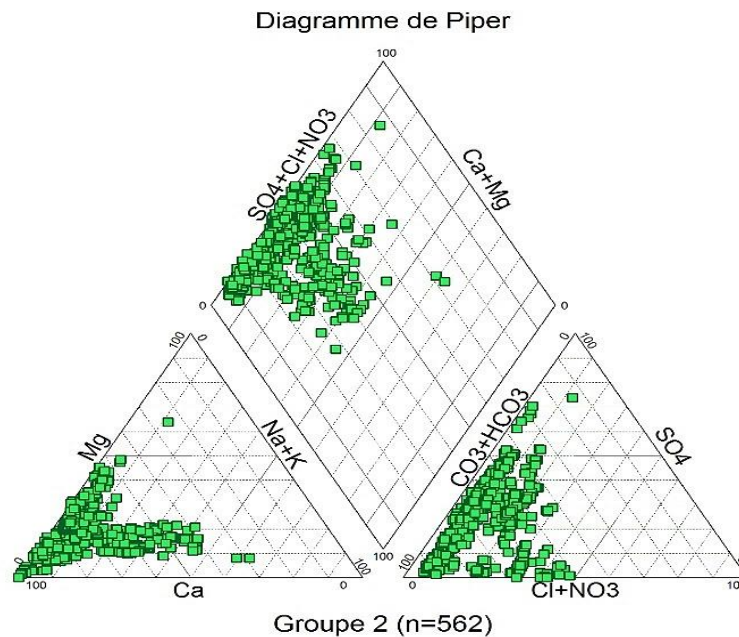


Figure 60 : Report des résultats des analyses chimiques de groupe 2 sur le digramme de Piper.

D'après le diagramme de Piper, les prélèvements de groupe2 appartiennent principalement aux deux familles des eaux :

- ❖ Bicarbonatée calcique et magnésienne (Englobe la plupart des prélèvements de groupe2.).
- ❖ Chlorurée et sulfatée calcique (quelques analyses).

Les analyses d'eaux souterraines de ce groupe présentent une dominance de faciès Bicarbonaté-calcique et magnésienne. La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge.

VI. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse ACP a été exécutée sur *les 15 paramètres des 562 analyses*. Ce nombre important assure la fiabilité des calculs.

VI. 1. Matrice des corrélations

L'Analyse en Composantes Principales utilise une matrice indiquant le degré de similarité entre les variables pour calculer des matrices permettant la projection des variables dans le nouvel espace. Il est commun d'utiliser comme indice de similarité le coefficient de corrélation de **Pearson**, ou la **covariance**. On utilise la corrélation de Pearson qui présente l'avantage de donner des matrices semi-définies positives dont les propriétés sont utilisées en ACP (Tableau35).

Classiquement, on utilise un coefficient de corrélation (Pearson) et non la covariance car l'utilisation du coefficient de corrélation permet de supprimer les effets d'échelle : ainsi une variable variante entre 0 et 1 ne pèse pas plus dans la projection qu'une variable variant entre 0 et 1000.

La matrice des corrélations montre des coefficients de corrélation couramment importants, surtout entre la CE et le Sodium, l'hydrogénocarbonate, le calcium, le Chlorure, le Magnésium et le Sulfate. Entre les Entérocoques et l'Escherichia Coli, entre le Chlorure et le Potassium et entre le Chlorure et le Sodium (tableau 35).

Compte tenu de la grande diversité des lithologies des masses d'eau, des différents types de ressources, des occupations du sol..., il est normal que plus de corrélations apparaissent.

Tableau 35 : Matrice de corrélations de groupe 2 de la région PACA.

Variables	Enteroc	E. Coli	EC	HCO ₃ ⁻	H ⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ⁼	Fe	Mn	NO ₃ ⁻	As
Enteroc	1														
E. Coli	0,719	1													
CE	-0,061	-0,103	1												
HCO ₃ ⁻	-0,007	-0,060	0,436	1											
H ⁺	-0,052	-0,096	0,314	0,317	1										
Ca ⁺⁺	-0,062	-0,099	0,806	0,624	0,404	1									
Cl ⁻	-0,043	-0,071	0,863	0,080	0,133	0,442	1								
Mg ⁺⁺	-0,028	-0,086	0,575	0,594	0,255	0,536	0,296	1							
K ⁺	-0,044	-0,087	0,787	0,193	0,152	0,476	0,797	0,391	1						
Na ⁺	-0,042	-0,067	0,850	0,066	0,116	0,415	0,990	0,278	0,810	1					
SO ₄ ⁼	-0,081	-0,112	0,812	0,333	0,326	0,884	0,508	0,609	0,554	0,494	1				
Fe	-0,012	-0,017	0,047	0,040	0,021	0,098	-0,001	0,095	-0,002	-0,006	0,119	1			
Mn	-0,007	-0,015	0,048	-0,052	0,093	-0,015	0,097	0,053	0,048	0,072	0,003	0,064	1		
NO ₃ ⁻	0,039	0,031	0,376	0,285	0,339	0,546	0,131	0,289	0,152	0,112	0,449	0,050	-0,021	1	
As	-0,014	-0,016	0,020	-0,020	-0,033	-0,017	0,053	-0,036	0,092	0,054	-0,019	-0,008	0,036	-0,050	1

VI. 2. Distribution de la variance

L'importance de chaque axe factoriel est reportée sous forme graphique sur la figure 61, et sous forme de tableau de données (Tableau 36).

Tableau 36 : Distribution de la variance selon les différents axes factoriels pour le groupe 2.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	5,340	1,951	1,714	1,076	0,991	0,970	0,865	0,670
Variabilité (%)	35,602	13,004	11,428	7,176	6,606	6,470	5,768	4,464
% Cumulé	35,602	48,606	60,034	67,210	73,816	80,286	86,054	90,518

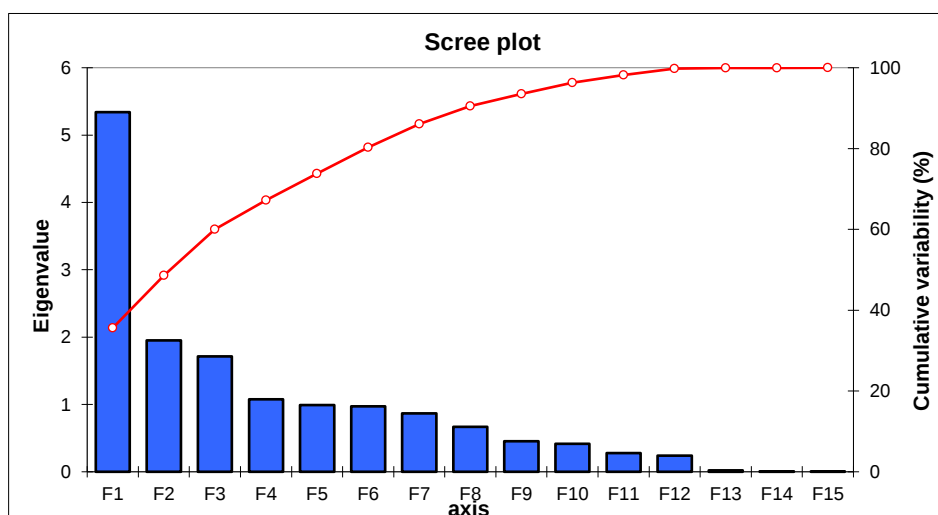


Figure 61 : Distribution de l'inertie selon les axes factoriels de l'ACP de groupe 2. Courbe : pourcentage cumulé.

Le calcul de l'ACP confirme la complexité des sources de variabilité de la qualité des eaux de grande diversité des lithologies. La variance se distribue selon quelques axes factoriels d'importance comparable

Les deux premiers axes étaient respectivement de 35 % et de 13 % de la variance, toutes analyses et presque tous paramètres confondus (15 paramètres), et donc un premier plan factoriel à 81% se distingue. Ce premier plan factoriel permet de visualiser la totalité de l'information globale. Viennent ensuite le troisième et le quatrième axe factoriel avec 11 % et 7 % de variance expliquée. Les cinquième et sixième axes factoriels représentent respectivement 6,6% et 6,4%. A ce niveau, il est fréquemment difficile d'interpréter la signification d'axes aussi peu significatifs.

VI. 3. Résultats de l'ACP

VI. 3. 1. Signification des axes factoriels

Les tableaux (34 et 35) suivants figurent les principaux Axes Factoriel d'ACP de ce groupe, avec les variations de chaque paramètre et leur signification.

Le tableau 34 présente les quatre principaux Axes Factoriel de l'ACP de ce groupe 2, avec les variations de chaque paramètre. Le premier axe factoriel présente la minéralité des eaux, le deuxième axe factoriel montre le processus d'oxydoréductions de ces eaux, le troisième illustre la contamination fécale et le quatrième expose le transport des métaux lourds (Tableau 35).

Tableau 34: Corrélation entre les différents paramètres et les axes factoriels de groupe 2.

	F1	F2	F3	F4
Entérocoque	-0,096	-0,033	0,918	0,038
E. Coli	-0,147	-0,011	0,914	0,028
CE	0,981	0,132	0,045	-0,033
HCO ₃	0,499	-0,580	0,008	-0,090
H ⁺	0,403	-0,408	-0,065	0,162
Ca ⁺⁺	0,850	-0,365	0,016	-0,044
Cl ⁻	0,787	0,566	0,059	-0,003
Mg	0,657	-0,349	0,006	0,039
K	0,786	0,422	0,042	-0,040
Na	0,773	0,588	0,062	-0,026
SO ₄	0,853	-0,181	-0,001	-0,004
Fer	0,079	-0,146	-0,026	0,595
Mn	0,058	0,116	-0,025	0,803
NO ₃	0,458	-0,476	0,131	-0,019
As	0,019	0,190	-0,031	0,186

Le premier Axe Factoriel présente nettement la minéralité des eaux avec une opposition entre les eaux peu minéralisées et les eaux minéralisées. Généralement cette minéralité est liée à la solubilité des roches et au temps de contact entre eau et roche. Elle apparaît en premier plan factoriel ce qui empreinte l'importance de minéralité de ces eaux (Tableau 34).

La recharge de ces masses d'eaux se fait généralement par les moyens suivants :

- Recharge pluviale prépondérante (notamment sur les versants et aux endroits où l'épaisseur des limons est faible voire nulle).
- Recharge par les eaux de surface (irrigations dans la plaine de Gémenos).
- Recharge locale par les formations encaissantes aquifères drainées par les alluvions.

Le substratum imperméable de l'Oligocène fait écran entre la nappe alluviale et l'Urgonien sous-jacent. En revanche, sur les bordures où les alluvions sont directement en contact avec l'Urgonien, il peut se produire des échanges dans un sens ou dans l'autre (Infoterre, 2020).

Le second Axe Factoriel montre une opposition entre les faciès chloruré sodique et Carbonaté Calci-Magnésien. Les Nitrates étant liées au faciès carbonaté, c'est à dire karstique. Ces eaux se caractérisent par la richesse en chlorure, potassium et Sodium, qui se pose contre les Nitrates, Magnésium, calcium et les Bicarbonates. Les masses d'eau les moins chargées en métal sont en revanche affectées par une contamination bactérienne significative.

Les écoulements de ces masses d'eaux sont drainés généralement vers la mer, et sont donc orientés Nord-Sud. Ils alimentent de nombreux exutoires drainant les aquifères. En allant d'Est en Ouest, on peut ainsi distinguer différentes unités hydrogéologiques selon les sources qu'elles alimentent (Infoterre, 2020).

Le troisième Axe Factoriel expose les paramètres bactériologiques (Entérocoque et Escherichia Coli) et les Nitrates. L'apparition des paramètres bactériologique en deuxième axe désigne l'importance de la contamination fécale de ces masses d'eau.

Généralement les nappes étant peu profondes, l'épaisseur de la zone saturée est généralement faible. Ainsi, la valeur des nitrates indique que ces eaux sont aérées et moins profondes.

En effet, la perméabilité importante des strates et la faible profondeur de la nappe, rendent les eaux souterraines fortement vulnérables aux éventuelles pollutions de surface. Les fortes pressions anthropiques sur son impluvium (industrialisation et urbanisation) induisent de nombreux points d'infiltration vers la nappe (réseaux, tranchées, travaux souterrains, ...) (Infoterre, 2020).

La quatrième Axe Factoriel expose la solubilisation des métaux (Fer, Manganèse et Arsenic), assure un transport des métaux lourds, ces eaux sont moins aérées et plus anciennes. En raison de leur caractère karstique, les eaux souterraines des formations aquifères jurassiques à barrémiennes, sont fortement vulnérables aux éventuelles pollutions de surface.

Nous insistons sur la bonne karstification du massif qui la rend donc très vulnérable à toute pollution. En particulier, les très nombreuses formes de dissolution (dolines, ponors, avens...) qui recueillent les eaux de ruissellement sont directement connectés au réseau de drainage rapide du système karstique.

Tableau 35 : Signification des principaux axes factoriels du groupe2.

AF	Inertie	Signification	Résumé
F1	35	Minéralité : CE, HCO ₃ , Ca, Mg, k ...	<i>Minéralité des eaux</i>
F2	13	Cl +K + Na (contre Nitrate, Mg, Ca et HCO ₃)	<i>Processus Oxydoréductions</i>
F3	11	Entérocoques + Escherichia Coli	<i>Paramètre Bactériologique</i>
F4	7	Fer, Manganèse et Arsenic	<i>Transport des métaux lourds</i>

VI. 3. 2. Cartes des Axes factoriels

AF3/AF1 :

Les axes factoriels **AF3/AF1** permet de faire une typologie de ressources par rapport aux variations de qualité affectant les ressources en eau du ce groupe : les métaux et Bactériologie (Figure 62).

Les valeurs moyennes sur toutes les analyses de chacune des masses d'eau ainsi que les valeurs moyennes de chaque point de prélèvement pour ce groupe ont été reportées sur la figure 62.

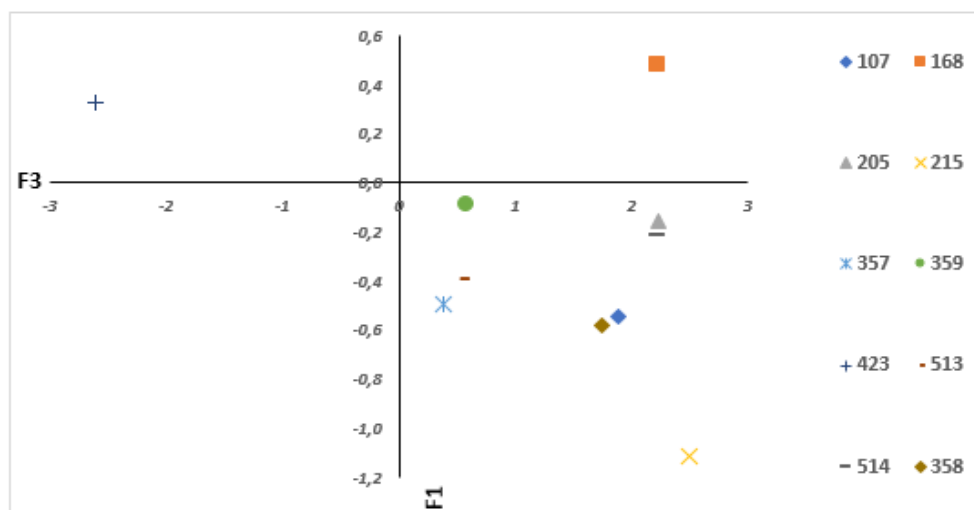


Figure 62 : Cartes des Axes factoriels F1/F3 du groupe 2.

Les masses d’eaux qui constituent ce groupe sont essentiellement des nappes de vallées, elles se situent dans le département du Var et au Sud du départements Bouche de Rhône.

Les fortes valeurs marquées sur *l’Axe Factoriel 2*, sont les mauvaises caractéristiques bactériologiques apparues dans la commune Cuges-Les-Pins (Source : jardin de la ville), la commune de La Crau (Source Puits Des Arquets), Montauroux (Source Prise E2S St Cassien-Montauroux),...

La minéralité importante exposée sur *l’Axe Factoriel 3* est remarqué essentiellement sur la commune Cuges-Les-Pins à la source jardin de la ville, commune Callas (Forage Les Costes), commune Hyères et la commune Montauroux, ...

Les masses d'eau de ce groupe se localise au département des Bouches-du-Rhône et du Var, les formations aquifères (notamment jurassiques à barrémiennes) ont une morphologie karstique très développée. Elles possèdent donc une perméabilité élevée ; les aquifères sont principalement alimentés par l'infiltration des eaux de pluie.

Les écoulements sont drainés vers la mer, et sont donc globalement orientés Nord-Sud. Ils alimentent de nombreux exutoires drainant les aquifères (infoterre, 2020).

Suivant les plans factoriels, on note une contamination fécale importante avec une faible minéralité sur la masse d’eau 215, qui présente les formations oligocènes de la région de Marseille. Elle s’oppose à la masse d’eau 168 (Calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques) plus minéralisée.

On note aussi que la masse d’eau 423 est une exception qui empreinte une très faible contamination fécale, elle définit les formations variées du Haut Verdon et Haut Var.

Au Quaternaire, la Durance emprunte le seuil de Lamanon et coule vers le sillon de Salon-Miramas, formant la Crau quaternaire ou Crau de Miramas (Figure 63). Au début de la régression pré-flandrienne, la Durance abandonne le couloir de Lamanon pour rejoindre le Rhône. Lors de la transgression flandrienne, la mer remonte et envahit la dépression de Berre mais ne pénètre pas dans la vallée du Rhône au-delà du delta d'Arles. Les matériaux fins entraînés par le fleuve édifient progressivement la Camargue (Moulin, 2012).

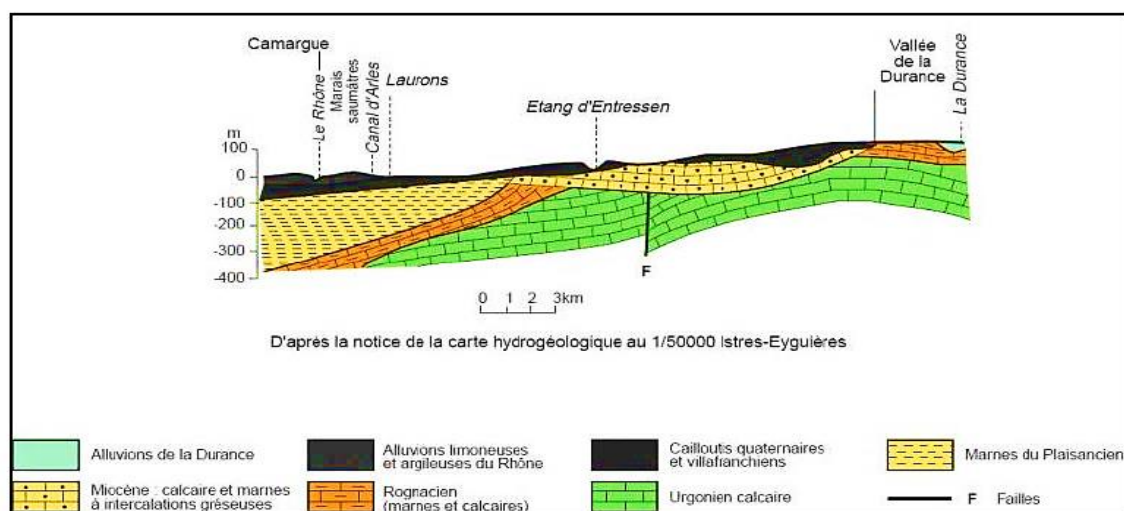


Figure 63 : Coupe NE - SO à travers la plaine de la Crau (MOULIN, 2012).

Les cailloutis de Crau affleurent sur l'ensemble de l'entité. Ils sont parfois cimentés en poudingues compacts, localement discontinus et fissurés. L'épaisseur des formations de Crau est en moyenne de 15 à 20 m mais peut atteindre plus de 50 m localement, en fonction de la topographie du substratum. Les épaisseurs les plus importantes se trouvent dans les couloirs de Miramas à Fos et d'Arles.

La coupe à travers la nappe de la Crau de figure 63, permet d'en visualiser la structure. Les cailloutis de la plaine de Crau sont des formations perméables contenant une nappe importante, notamment dans les couloirs constitués par les paléo-vallées de la Durance, où la perméabilité peut atteindre 10^{-2} m/s (Moulin, 2012).

VI. 3. 3. Plans factoriels

Parmi les avantages de l'ACP on notera la visualisation optimale des variables et de données. Les premiers plans factoriel F2/F1 montre qu'il y a une superposition entre deux types de faciès chimique : Une opposition entre les faciès chloruré-sodique et Carbonaté Calci-Magnésien (Figure 64).

La minéralité exposée en axe factoriel 1 est généralement liée à la nature de la lithologie et à la recharge prépondérante par les eaux d'irrigations, les précipitations et l'alimentation latérale.

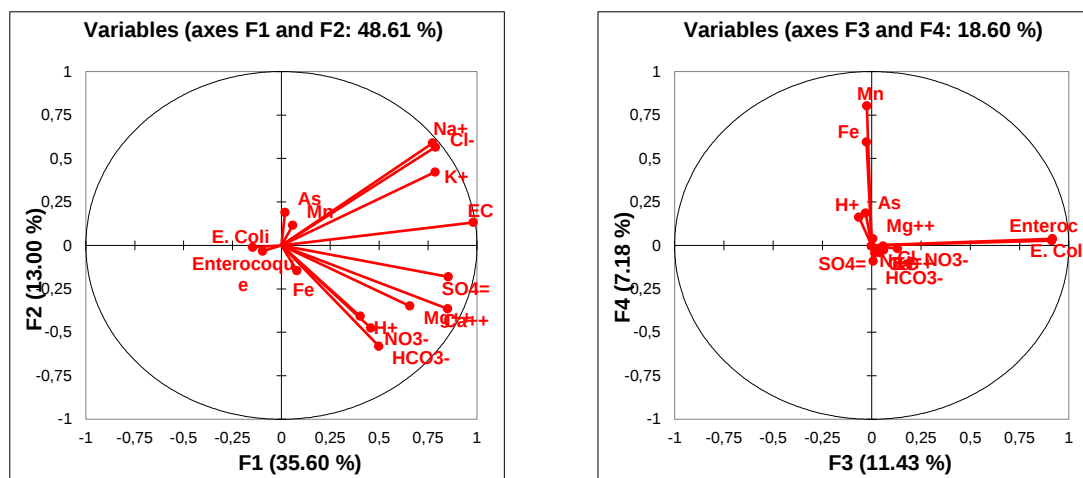


Figure 64 : Premiers plans factoriels de l'ACP pour l'ensemble du groupe 2.

Le diagramme de contribution des plans factoriels **F3 / F4**, illustre la corrélation et les variations des métaux lourds (La solubilisation des métaux : Fer, Manganèse et Arsenic) et la contamination fécale des Entérocoques et l'Escherichia Coli (Figure 64).

La superposition de ces plans factoriels expose une forte variabilité des paramètres bactériologiques des eaux moins profondes et aéré. Ainsi, une forte variabilité des métaux lourds, quasiment le Magnésium, le Fer et l'Arsenic est noté. Ces quatre axes factoriels totalisent **67.2%** de la variance totale.

VII. Distribution spatiale des sous-groupes

La classification hiérarchique ascendante (CHA) non supervisée a conduit à la définition de **3 sous-groupes nommés 2A, 2B et 2C**, plus deux sous-groupes 2C et 2D isolés des trois premiers, plus particulièrement le 2D (Tableau 6).

Sur la figure 65, le sous-groupe 2A est de couleur vert foncée, le sous-groupe 2B et de couleur vert clair, le sous-groupe 2C de couleur jaune-marron, 2D en bleu et 2E en violet.

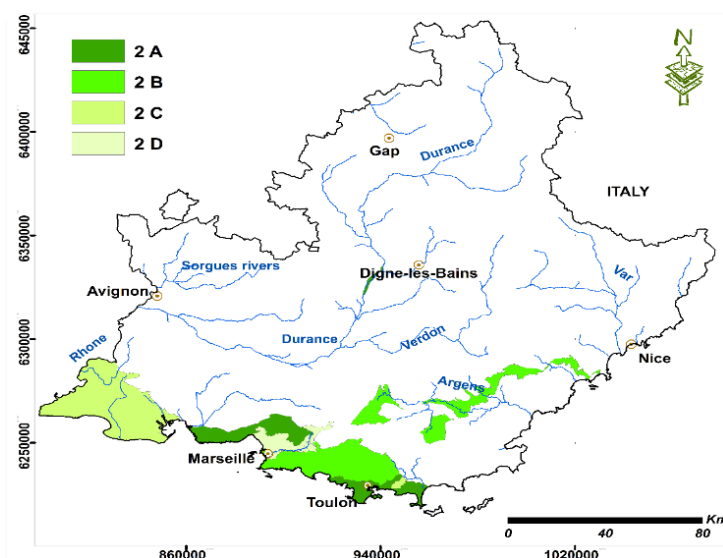


Figure 65 : Distribution spatiale de sous-groupes de MESO dans le groupe 2.

A. Les sous-groupes du groupe 2

Le groupe 2E est caractérisé par une forte minéralité essentiellement due au Sulfate, au Chlorure et au Sodium. Concernant les sous-groupes les teneurs en nitrates sont légèrement supérieures à la moyenne régionale.

Le groupe 2 présente une contamination bactérienne plutôt importante. Au sein de ce groupe, le sous-groupe 2B semble être, le plus affecté (Tableau 36). Une attention particulière sera accordée à ce sous-groupe.

Tableau 36 : Comparaison entre sous-groupe pour les différents paramètres.

Variable	Bloc2	Gr2	Gr2A	Gr2B	Gr2C	Gr2D
Entéroco	2.61	3.7	2.3	5.1	0.7	0.3
E. Coli	3.55	5.9	6.0	6.7	2.6	0.3
CE	548.34	807.7	779.8	845.7	647.4	763.9
HCO ₃ ⁻	252.28	311.0	305.3	318.1	284.4	300.0
H ⁺	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca ⁺⁺	86.78	117.8	122.5	117.1	99.5	126.8
Cl ⁻	17.48	47.7	36.6	57.9	28.5	18.9
Mg ⁺⁺	13	19.0	16.7	20.4	15.5	21.5
K ⁺	1.05	1.8	1.6	2.0	1.1	1.5
Na ⁺	11.02	27.1	19.9	33.2	16.6	10.9
SO ₄ ⁼	59.96	102.6	107.9	100.8	70.2	148.7
Fe	8.28	7.6	16.2	1.5	1.2	43.1
Mn	2.66	3.6	1.9	1.5	28.0	0.0
NO ₃ ⁻	4.67	10.2	13.7	8.8	8.5	8.2
As	0.24	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
Nombre Ech.	5294	562	165	330	43	24

-Le groupe 2A :

Ce sous-groupe est constitué des suivantes Masses d'eaux souterraines : La **FRDG 107** appartenant au Calcaires crétacés des chaînes de l'Estaque, Nerthe et Etoile, la **FRDG 358** puisée dans les Alluvions de la Durance moyenne en aval de St Auban (emprise du panache de pollution historique) et la **FRDG 514** pompée dans les formations variées de la région de Toulon. Ce dernier sous-groupe présente des eaux plutôt minéralisées. En effet, la conductivité électrique est nettement supérieure à la moyenne régionale, mais inférieure à la moyenne du groupe 2. La charge bactérienne est moyenne à forte, comme dans l'ensemble de ce groupe (Tableau 36 et 37).

Tableau 37 : statistiques univariées pour le sous-groupe Gr2A.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-Type	CV (%)
Entérocoque	0.0	72.0	2.3	8.0	346
E. Coli	0.0	249.0	6.0	25.7	429
CE	301	2014	779.8	360.8	46
HCO₃⁻	156	425	305.3	73.1	24
H⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	75
Ca⁺⁺	43.5	246.0	122.5	48.6	40
Cl⁻	0.0	313.0	36.6	45.3	124
Mg⁺⁺	0.0	44.6	16.7	10.1	61
K⁺	0.0	6.3	1.6	1.6	98
Na⁺	0.0	147.0	19.9	23.7	119
SO₄⁼	5.2	412.0	107.9	94.7	88
Fe	0.0	1800	16.2	144.3	889
Mn	0.0	267.0	1.9	21.0	1104
NO₃⁻	0.0	74.2	13.7	17.8	130
As	0.0	10.0	0.1	0.8	1285

Avec respectivement 45%, 9%, 9% et 9% de variance expliquée (Figure 66), les 4 premiers axes factoriels traduisent :

AF1 : La minéralité des eaux avec une opposition entre les eaux peu minéralisées et les eaux minéralisées.

AF 2 : La contamination des Entérocoques et l'Escherichia Coli.

AF3 : La solubilisation des métaux dans les eaux non contaminées par les bactéries fécales.

AF4 : L'opposition entre les eaux carbonatées qui contiennent des nitrates et les eaux chlorurées sodiques, réductrices dans lesquelles le fer et le manganèse sont solubilisés.

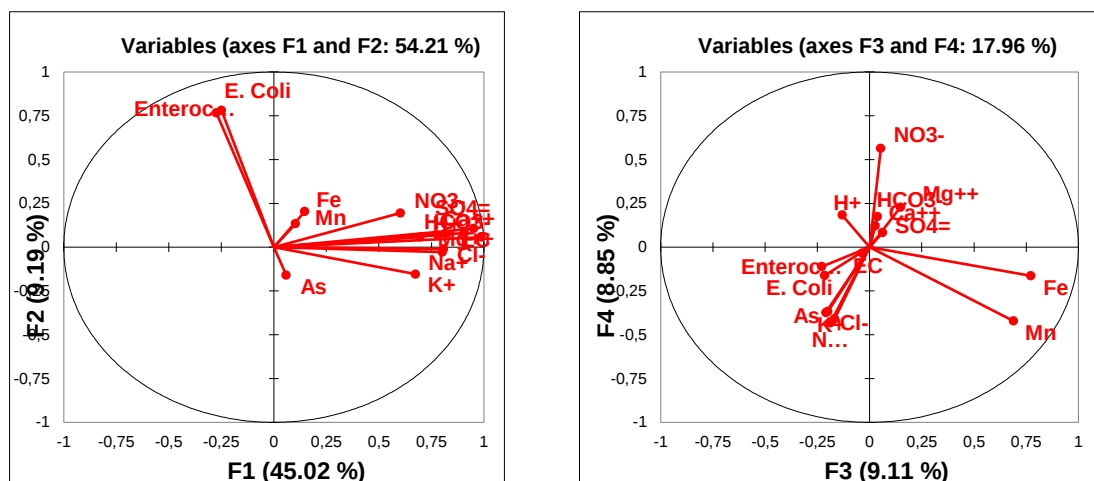


Figure 66 : Principaux plans factoriels de l'ACP sur le sous-groupe Gr2A.

La relation entre l'axe factoriel 2 qui représente la charge bactérienne et l'axe factoriel F1 qui représente la minéralité montre une opposition de comportement entre la source du Rosaire et le forage Verino et les autres ouvrages qui ont tous des puits ou des forages. Cette différence de comportement sera discutée dans le groupe Grp2B.

Le diagramme 68 illustre la relation entre l'axe factoriel AF2 représentant la charge bactérienne et la minéralité des eaux sur l'AF1, pour différents ouvrages (source forages et puits) du sous-groupe **Gr2A**. le premier plan factoriel permet de visualiser 45 % de l'information comprise dans les 165 données traitées dans ce sous-groupe.

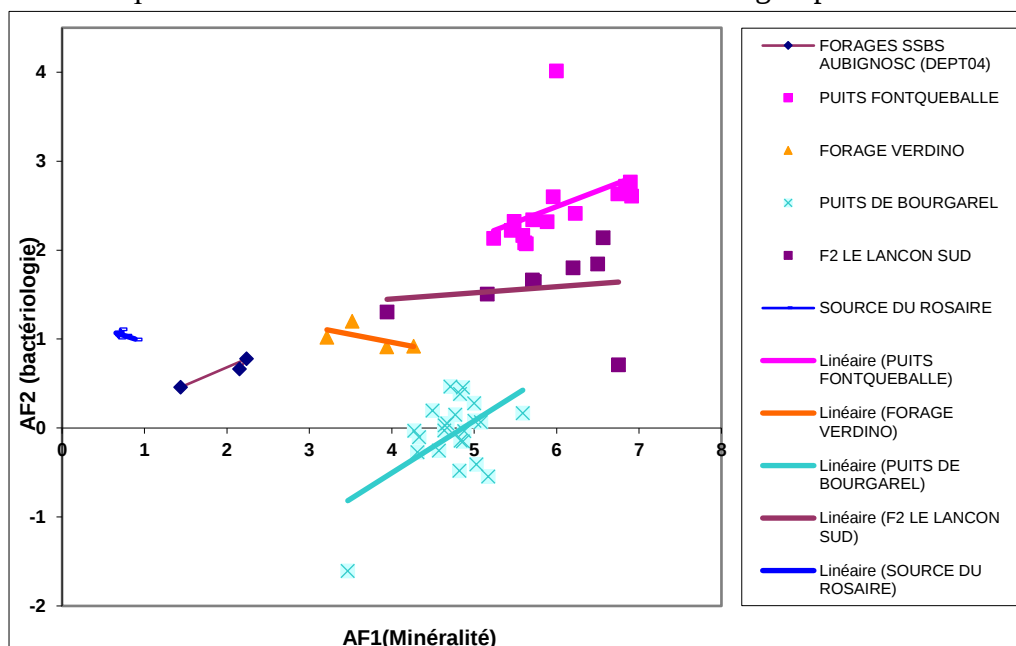


Figure 67 : Relation entre AF2 représentant la charge bactérienne et la minéralité des eaux (AF1) pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2A.

Les plans factoriels AF1/AF3 accomplit une typologie de ressources par rapport aux problèmes de qualité affectant les ressources en eau du ce groupe, essentiellement par la minéralité et les Bactério (Entérocoque et Escherichia Coli).

La plupart des pentes sont positives, les points représentatifs des échantillons d'eau ne sont pas cohérents dans ces plans factoriels. D'après les plans factoriels F3/F1, la plupart des masses d'eau de ce groupe marque une forte contamination fécale et une minéralité importante, surtout le Puits Fontqueballe (commune La Garde), ensuite le forage F2 Le Lancon Sud (commune Sanary-Sur-Mer) et le Forage Verdino (commune Carqueiranne). Ces puits sont implantés dans les formations variées de la région de Toulon. Les principaux aquifères de la région sont représentés par les calcaires du Crétacé et du Jurassique supérieur du bassin du Beausset et des massifs qui dominant Toulon. De multiples sources karstiques drainant ces grands ensembles aquifères émergent au contact des formations imperméables, notamment des argiles et marnes du Trias (Infoterre, 2020). La vulnérabilité est forte pour les calcaires liasiques et triasiques lorsqu'ils affleurent. Cette vulnérabilité est plus faible sous couverture.

Par contre le Puits De Bourgarel (commune Bandol) Source du Aubes (commun Salon-De-Provence) marquent une faible minéralité et une contamination fécale significative, liées essentiellement à la forme de recharge de la nappe. La majeure partie des formations formant cette masse d'eau sont peu perméables et présentent donc des capacités aquifères médiocres, en particulier les terrains métamorphiques, les pélites permienues, et les argiles et marnes du Trias supérieur.

-Le sous-groupe 2B

Le **sous-groupe 2B** présente un niveau de contamination fécale importante, y compris au sein du groupe 2 qui lui-même se caractérise par cette fragilité aux contaminations fécales (Tableau 38).

Avec respectivement **33%, 13%, 12% et 9%** de variance expliquée, les 4 premiers axes factoriels traduisent :

AF1 : La minéralité des eaux avec une opposition entre les eaux peu minéralisées et les eaux minéralisées.

AF2 : La contamination fécale liée au faciès carbonaté calcique.

AF3 : La contamination fécale plutôt liée au faciès NaCl et opposée au faciès carbonaté calcique.

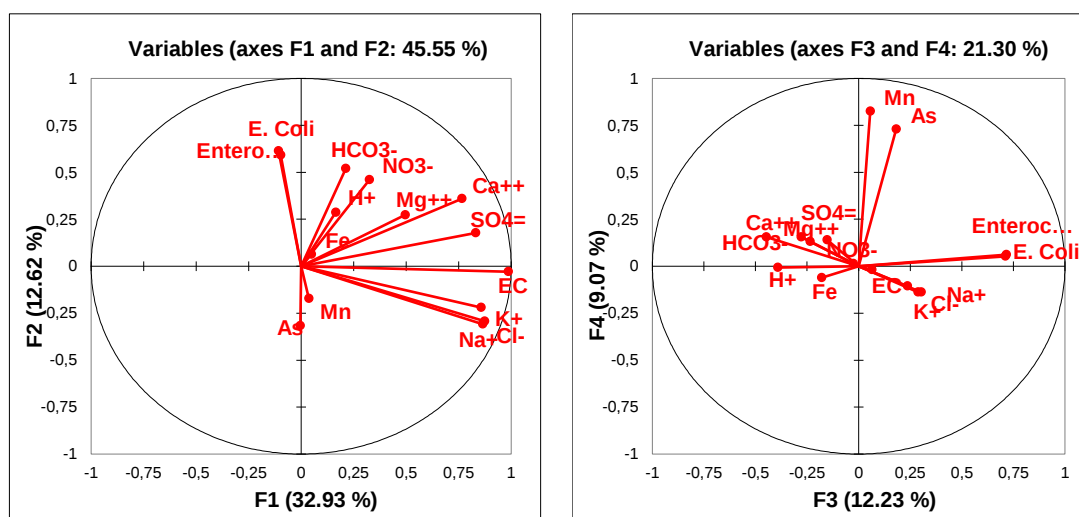
AF4 : Métaux (Manganèse) et métalloïdes (Arsenic).

Tableau 38 : statistiques univariées pour le sous-groupe Gr2B

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecarte-Type	CV (%)
Entéro.	0.0	560	5.1	34.3	679
E. Coli	0.0	400	6.7	28.7	429
CE	116	4980	845.7	438.3	52
HCO₃⁻	42.0	500	318.1	69.1	22
H⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	74
Ca⁺⁺	9.8	286	117.1	42.7	36
Cl⁻	0.0	1087	57.9	102.1	176
Mg⁺⁺	2.1	54.9	20.4	9.5	47
K⁺	0.0	16.5	2.0	1.8	93
Na⁺	0.0	705	33.2	60.3	181
SO₄⁼	0.0	572	100.8	92.8	92
Fe	0.0	107	1.5	9.3	603
Mn	0.0	159	1.5	10.6	730
NO₃⁻	0.0	94.4	8.8	10.6	121
As	0.0	8.0	0.1	0.5	787

Ainsi, dans ce contexte marqué par des problèmes de contamination fécale, l'ACP spécifique au sous-groupe permet de distinguer au minimum 2 mécanismes ou origine des transports de bactéries :

- Une origine liée aux eaux plutôt diluées de type carbonaté calcique
- Une origine plus liée au faciès chloruré sodique.

**Figure 68 : Principaux plans factoriels de l'ACP sur le sous-groupe Gr2B.**

Si l'on étudie les variations de la charge bactérienne en fonction de la minéralité (Figure 68), des informations intéressantes apparaissent.

La plupart des ouvrages sont des puits et des forages. La composante AF2 de la charge bactérienne augmente lorsque la minéralité augmente, elle diminue lorsque les eaux sont diluées par de la recharge de nappe.

En revanche, pour la source Fontaine des Laines, le comportement est opposé. La composante AF2 de la charge bactérienne augmente lors des événements pluvieux, ce qui peut s'expliquer par une contamination par des eaux de ruissèlement.

Ce type d'information accessible par le croisement des axes factoriels et l'étude des régressions spécifiques à chaque ouvrage pour les groupes Gr2A et Gr2B illustre l'intérêt de cette approche. Dans le cadre de ce travail, il a été constaté de manière assez systématique, ce qui ouvre la possibilité d'une typologie des ouvrages, mais ceci dépasse largement le cadre de ce travail. Une étude plus spécifique à cet aspect pourrait être utile.

Selon les axes factoriels AF1 et AF3 (Figure 69) on peut accomplir une typologie de ressources par rapport aux problèmes de qualité affectant les ressources en eau du cette groupe, essentiellement par la minéralité et les Bactéries (Entérocoque et Escherichia Coli).

La distribution des pentes et les points représentatifs des échantillons d'eau n'est pas cohérente dans ces plans factoriels, comme l'illustre la Figure 68, Comme déjà signalé le premier plan factoriel permet de visualiser 33 % de l'information comprise dans les 330 données traitées dans ce sous-groupe.

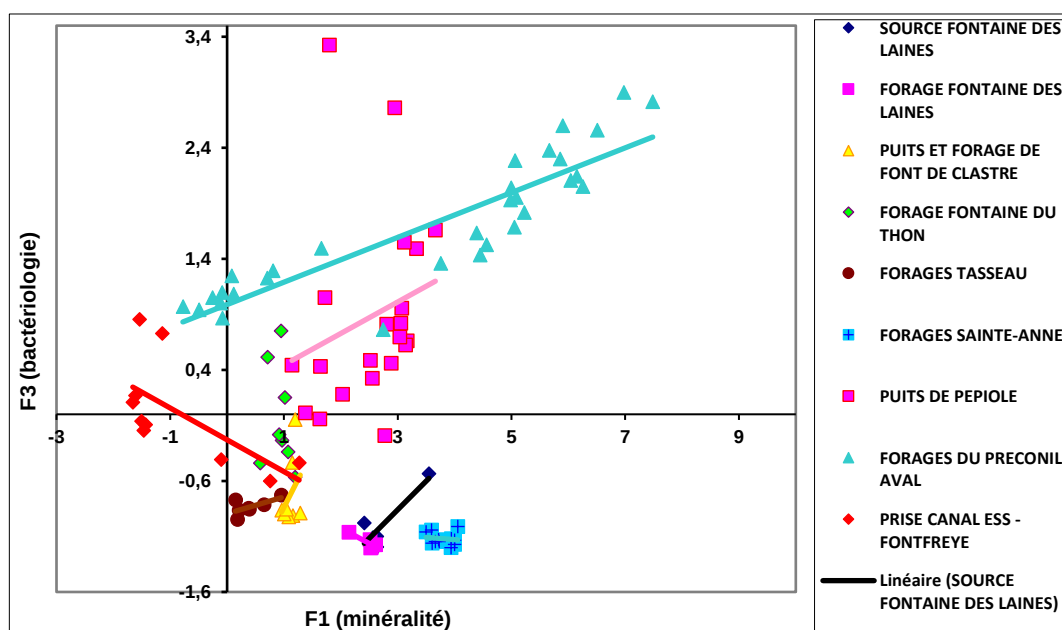


Figure 69 : relation entre la composante AF3 de la charge bactérienne et la minéralité des eaux (AF1) pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B.

Suivant les plans factoriels F3/F1, la plupart des masses d'eaux de ce groupe marque une faible contamination fécale (des faibles valeurs de Bactério), mais un peu minéralisée, à l'exception de forage de Sainte Anne (commune Draguignan) et le puits de Pepiole, marquent une minéralité et contamination fécale posée, avec une pente positive signifie l'importance de

contamination (Figure 69). Ces prélèvements font partie de la masse d'eau 169, présente une perméabilité importante, liée au développement de la fissuration et de chenaux de karstification. La perméabilité est augmentée par le phénomène de Cargneulisation, c'est-à-dire la dissolution préférentielle de la dolomite par des eaux chargées en sulfates (eaux ayant dissous des niveaux de gypses).

Par contre, la Prise Canal Ess – Fontfreyre (commune Les Adrets-De-L Esterel) expose une pente négative, marque une diminution de minéralité et une contamination fécale qu’évolue. Cette prise fait partie de masses d’eau 169, sont rechargées principalement par l’infiltration des eaux de pluie, secondairement par des pertes de rivières en provenance des contreforts hauts formés par le Keuper et les aquifères jurassiques qui dominent l’avant pays provençal (Infoterre, 2020).

Figure 70 : relation entre la composante AF2 de la charge bactérienne et la minéralité des eaux (AF1) pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B.

par les Bactério (Entérocoque et Escherichia Coli). La figure 70 illustre la relation entre les deux composantes microbiologie AF2 et AF3 pour différents ouvrages (source forages et puits) du sous-groupe Gr2B. La distribution des pentes et les points représentatifs des échantillons d'eau n'est pas cohérente dans ces plans factoriels, Comme déjà signalé les deux plans factoriels permet de visualiser 26% de l'information comprise dans les 330 données traitées dans ce sous-groupe.

Les plans factoriels F2/F3, la plupart des masses d'eaux de ce groupe marque une variabilité de la contamination importante. La bactériologie apparaît associée à deux axes factoriels désignant qu'il existe plusieurs sources indépendantes de variation de la contamination fécale des eaux souterraines de PACA, y compris à l'échelle des sous-groupes de MESO.

Le diagramme illustré en Figure 71 montre la relation entre les deux composantes microbiologie AF2 et AF3 pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B. La distribution des pentes et les points représentatifs des échantillons d'eau s'organisent en deux nuages de directions orthogonales. Ceci montre que la charge bactérienne des eaux ne se résume pas à une seule source de variation, mais à deux au minimum. Les variations de charge bactérienne sont donc complexes. Et elles ne peuvent se résumer à un processus dépendant du ruissellement.

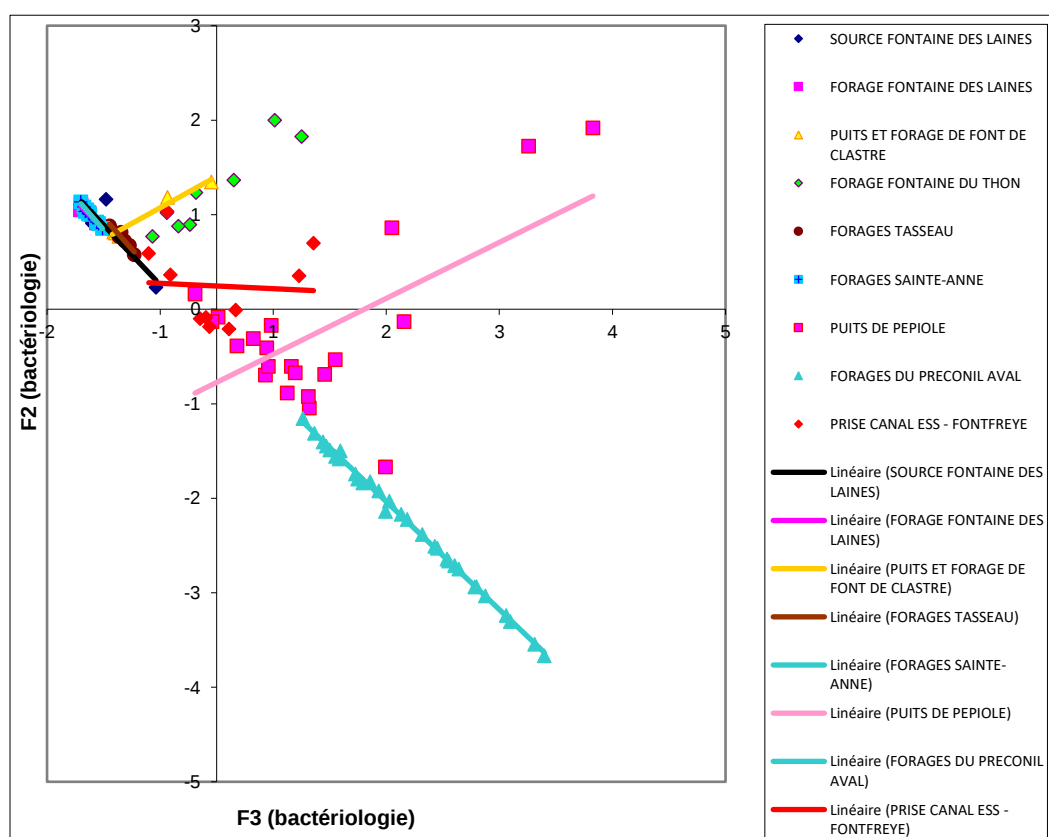


Figure 71 : Relation entre les deux composantes microbiologie AF2 et AF3 pour différents ouvrages du sous-groupe Gr2B.

CONCLUSION

L'efficacité de la méthode ayant été démontrée sur le groupe 1, le plus abondant des groupes, le groupe 2 a été étudié juste sur certains de ses sous-groupes à titre de vérification d'acquis du chapitre précédent. Aussi, pour alléger le manuscrit tous les sous-groupes n'ont pas été détaillés. Dans ce groupe 2 marqué par une contamination fécale plus forte que sur le reste de la région PACA, les mécanismes en jeu dans les variations de qualité de l'eau sont sensiblement les mêmes que pour le groupe 1 mais dans une hiérarchie parfois différente.

Un des points essentiels concerne, la complexité des mécanismes impliqués dans l'évolution spatio-temporelle de la charge bactérienne. Ainsi, comme pour le groupe 1, la bactériologie apparaît associée à deux voir plus d'axes factoriels indiquant qu'il existe plusieurs sources indépendantes de la variation de la contamination fécale, y compris à l'échelle des sous-groupes de MESO.

Par ailleurs, la relation entre ces différentes composantes de la variabilité de la charge bactérienne et la minéralité de l'eau permet de distinguer une typologie des captages et des forages ou puits, avec des comportements bien différents.

Ceci ouvre la voie vers un autre aspect de la typologie des captages et forages, directement à l'échelle des ouvrages. En effet, ce critère pourrait constituer une caractéristique des ouvrages et mesurer sa vulnérabilité aux événements météorologiques (précipitations abondantes).

CHAPITRE 3

DIFFERENCIATION DES CARACTERISTIQUES DES GROUPE DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE DE LA REGION PACA

Introduction :

La qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine sur la région PACA présentent une forte variabilité :

- Spatiale, selon les environnements géologiques, mais aussi selon les différentes occupations humaines,
- Temporelle, car lors des périodes pluvieuses l'arrivée des eaux météoriques dilue. Et éventuellement elle apporte des matières en suspension avec leur lot de bactéries, plus particulièrement pour les ressources superficielles et celles qui sont peu protégées par des sols épais et filtrants.

De ce fait, les caractéristiques de ces eaux sont extrêmement variables sur la région PACA et sur une durée de plus de 10 ans. Pour cette raison, la protection et la surveillance de la qualité de ces eaux est donc difficile.

Compte tenu de cette forte variabilité, ce travail a proposé de regrouper les analyses selon leur localisation par unités hydrogéologiques définies par le BRGM : les Masses d'Eaux Souterraines (MESO). Le travail conduit a montré que l'information essentielle condensée en 11 axes factoriels d'ACP permet de classer les MESO par degré de ressemblance à partir de valeurs moyennes sur chaque MESO pour chacun des 11 axes factoriels. Des groupes de MESO et des sous-groupes ont ainsi été définis à partir des caractéristiques moyennes.

Une étude partielle de certains de ces groupes et de certain des sous-groupes qui les constituent ont montré effectivement des comportements et de caractéristiques spécifiques à chacun de ces groupes et de ses sous-groupes, mais aussi une forte variabilité interne, malgré cette classification basée sur une information hydrogéologique solide que constitue le découpage des ressources hydrogéologiques régionales en masses d'eau, c'est-à-dire en unités hydrogéologiques.

Le but de ce chapitre est de mesurer à quel niveau la variabilité de la qualité des eaux interne à chaque MESO ou à chaque groupe de MESO est ou n'est pas un obstacle à son affectation à la MESO correspondante. En d'autres termes, la qualité d'un échantillon d'eau permet-elle de savoir à quelle MESO ou groupe de MESO elle appartient.

Dans l'affirmative, la variabilité interne aux MESO, bien qu'importante, pourra être considérée comme faible au regard de la variabilité entre les différentes unités hydrogéologiques.

Dans le cas contraire, la différenciation entre MESO à partir de la qualité des eaux ne concernera que des tendances.

Pour conduire cette analyse de manière plus concrète, l'outil principal retenu est l'analyse discriminante qui recherche les fonctions qui permettent de discriminer les échantillons d'eau de différentes MESO ou groupe de MESO à partir de leur résultat d'analyse.

Elle comportera deux parties, tout d'abord une **Analyse Discriminante (AD)** sur le MESO, puis une autre sur les groupes de MESO.

De manière secondaire, une autre technique sera utilisée, ou plus précisément un ensemble de techniques communément appelé « **Machine Learning** ». Cet ensemble de techniques, au développement important ces dernières années avec le développement du traitement de l'image et du son (reconnaissance vocale et reconnaissance faciale), requièrent de grandes bases de données. Le nombre de données étant relativement important pour le domaine de l'hydrochimie. Deux techniques de Machine Learning seront appliquées : *la technique de k plus proches voisins et la classification Naïve Bayésienne*.

I. Analyse discriminante appliquée sur les MESO régionales et les groupes des MESO

I. 1. MESO régionales

Une analyse discriminante a été effectuée sur les différentes masses d'eaux souterraines. Cependant, pour certaines MESO, il a fallu éliminer les informations car l'analyse discriminante impose certaines contraintes, par exemple un minimum de 2 échantillons d'eau dans chaque MESO afin de quantifier une variance interne à la MESO. Pour cette raison la totalité du bloc 2 ne figure pas dans cette analyse. Le résultat global, synthétisé par la matrice de confusions est sans appel (Annexe 1). A partir de la composition chimique et bactériologique des eaux, en général il n'est pas possible de différencier les différentes MESO.

La matrice de confusion établie, à partir de l'analyse discriminante et sur l'ensemble des analyses utilisées, indique un taux de classement des eaux de l'ordre **1.2 %**, ce qui est très faible, quasiment nul. Quelques MESO se différencient toutefois. Ainsi, la **FRDG 175** se discrimine de toutes les autres MESO avec un taux de réussite de **67 %**, mais elle ne concerne que 3 échantillons d'eau de la base de données. La **FRDG382** se discrimine avec un taux de réussite de **41 %** et elle comporte 17 échantillons d'eau.

En résumé, La variabilité interne à chaque masse d'eau souterraine est très forte par rapport à la différence de composition entre les différentes masses d'eau prises individuellement. Ceci explique la grande difficulté de traitement des données de la qualité de l'eau par les outils statistiques classiques, en étudiant les MESO individuelles. Compte tenu de ce résultat, il n'est pas paru utile de donner plus de détails sur les fonctions discriminantes, ni la position des centroïdes dans les différents plans factoriels, ...

Tableau 39 : Matrice de confusion de simple estimation des masses d'eaux souterraine de la région PACA.

FRDG	Total	% correct	FRDG	Total	% correct
104	141	0 %	353	31	0 %
107	6	0 %	354	7	0 %
108	24	0%	355	17	11.76%
130	64	1.56%	356	19	0 %
139	144	0 %	357	89	1.12%
166	20	0 %	393	14	0 %
167	62	1.61%	394	44	0 %
168	150	2.67%	396	110	10.00%
169	180	0 %	407	189	3.17%
170	95	0 %	413	14	7.14%
174	108	0 %	417	1141	0 %
175	3	66.67%	418	196	0 %
179	12	8.33%	419	112	0.89%
196	10	0 %	420	44	0 %
205	31	0 %	421	172	0.58%
209	106	0 %	422	131	0 %
210	6	0 %	423	78	1.28%
213	76	5.26%	504	12	0 %
215	15	0 %	513	45	0 %
218	32	3.13%	514	141	0 %
226	60	0 %	520	232	0.86%
234	6	0 %	521	26	0 %
243	7	0 %	528	20	0 %
247	43	0 %	531	126	0.79%
249	12	0 %	534	73	0 %
321	13	0 %	536	149	0 %
323	2	0 %	609	114	1.75%
343	8	0 %	610	91	5.49%
352	23	0 %	Total	5100	1.20%

I. 2. Groupe des MESO

Une approche un peu plus globale a été tentée en matière d'analyse discriminante. Au lieu de chercher à discriminer les MESO entre elles, ce paragraphe est consacré à la discrimination des 8 groupes de MESO.

Ces groupes de MESO ont été établis à partir des *caractéristiques moyennes* de chaque MESO. Ces groupes sont sensés rassembler des MESO aux caractéristiques proches entre elles, mais aux caractéristiques différentes par rapport aux autres MESO. La comparaison de résultats de ce calcul avec les résultats précédents permettra d'apprécier la pertinence du regroupement de MESO en ces 8 groupes. Les groupes sont identifiés par leur numéro tel que défini dans les chapitres précédents.

I.3. Matrice des confusions pour les groupes de MESO

Le résultat de la matrice de confusion (Tableau 40) indique un résultat très différent du précédent calcul discriminant. Le taux de bien classé est de 28.07%, ce qui est faible mais déjà significatif. Le groupe 3 se distingue bien des autres groupes avec un taux de bien classé de 84%. Il se confond principalement avec le groupe 4. Le groupe 4 se distingue également assez bien des autres groupes avec un taux de bien classé de **77%**. Il se confond principalement avec le groupe 3. Ainsi, les groupes 3 et 4 se ressemblent un peu, et ils se distinguent des autres groupes, et plus difficilement entre eux. Le groupe 1, le plus abondant en nombre d'échantillons d'eau, se discrimine le moins bien, probablement car il est trop important, contient trop de MESO différentes entre elle et la variabilité de la composition de ce MESO qui le constitue est trop importante.

Tableau 400 : Matrice des confusions pour les groupes de MESO.

Les Groupes	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	% correct
1	66	63	454	123	69	220	314	5	1314	5.02%
2	41	131	138	87	39	24	98	4	562	23.31%
3	5	4	203	15	3	6	7	0	243	83.54%
4	2	1	30	406	4	9	70	2	524	77.48%
5	2	7	29	34	61	19	100	6	258	23.64%
6	8	4	75	56	7	103	59	1	313	32.91%
7	15	11	290	977	28	64	446	5	1836	24.29%
8	1	4	8	0	0	2	20	16	51	31.37%
Total	140	225	1227	1698	211	447	1114	39	5101	28.07%

De ce fait, le regroupement des masses d'eaux souterraines semble plus pertinent en termes de définition d'unités de gestion et de protection de la qualité des eaux que ne le sont les MESO prises individuellement. Ceci justifie à posteriori, le choix de procéder à la création de ce groupe.

I.4. Distribution de la variance selon les différentes fonctions discriminantes

Concernant les fonctions discriminantes, Les trois premières fonctions discriminantes totalisent plus des 2 tiers de l'information discriminante (Figure 72 et Tableau 41).

Tableau 41 : Distribution de la variance selon les différentes fonctions discriminantes.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
Valeur propre	0.93	0.45	0.39	0.20	0.14	0.11	0.09	0.08	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	0.009
Variabilité (%)	35.33	17.01	14.72	7.56	5.58	4.49	3.37	3.00	2.73	2.09	1.70	1.07	0.58	0.38	0.33
% Cumulé	35.33	52.35	67.07	74.64	80.22	84.71	88.09	91.09	93.82	95.92	97.62	98.69	99.28	99.66	100

La contribution des différents paramètres aux cinq premières fonctions discriminantes montre que la bactériologie n'intervient jamais de manière significative en termes de discrimination (Figure 71). Ceci peut s'expliquer par le fait que la variabilité spatiale de la contamination fécale est très locale comme l'a montré la cartographie de paramètres et de l'axe factoriel régional de l'ACP régionale. Toutes les unités du paysage sont affectées à des degrés divers par la charge bactérienne et celle-ci varie fortement sur une faible distance. Son pouvoir discriminant à l'échelle des masses d'eau est donc nul.

Pour le groupe de masse d'eau les paramètres bactériologiques ont encore moins de pouvoir discriminant, même si au niveau des moyennes des différences notables existent pour la microbiologie.

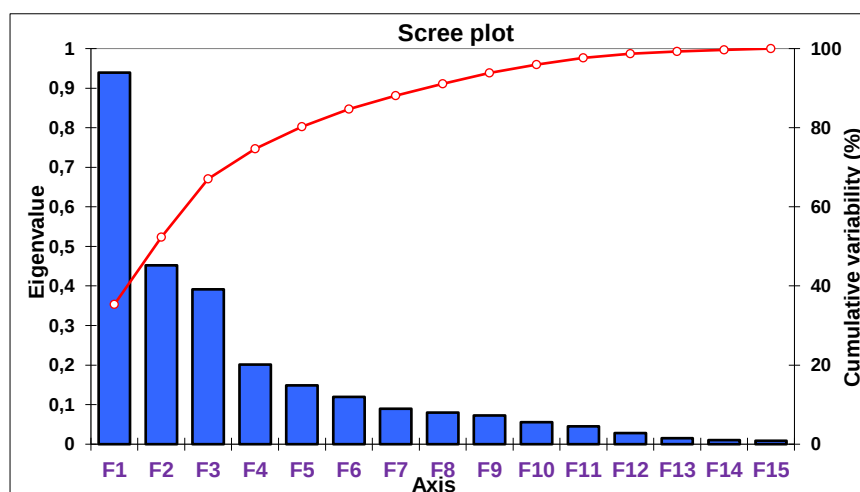


Figure 72 : Distribution de la variance selon les différentes fonctions discriminantes

La première fonction discriminante effectuée par l'analyse discriminante concerne la minéralité, la seconde l'opposition entre le faciès carbonaté calcique et le magnésium, la troisième concerne également les faciès chimiques des eaux souterraines de PACA (Figure 72).

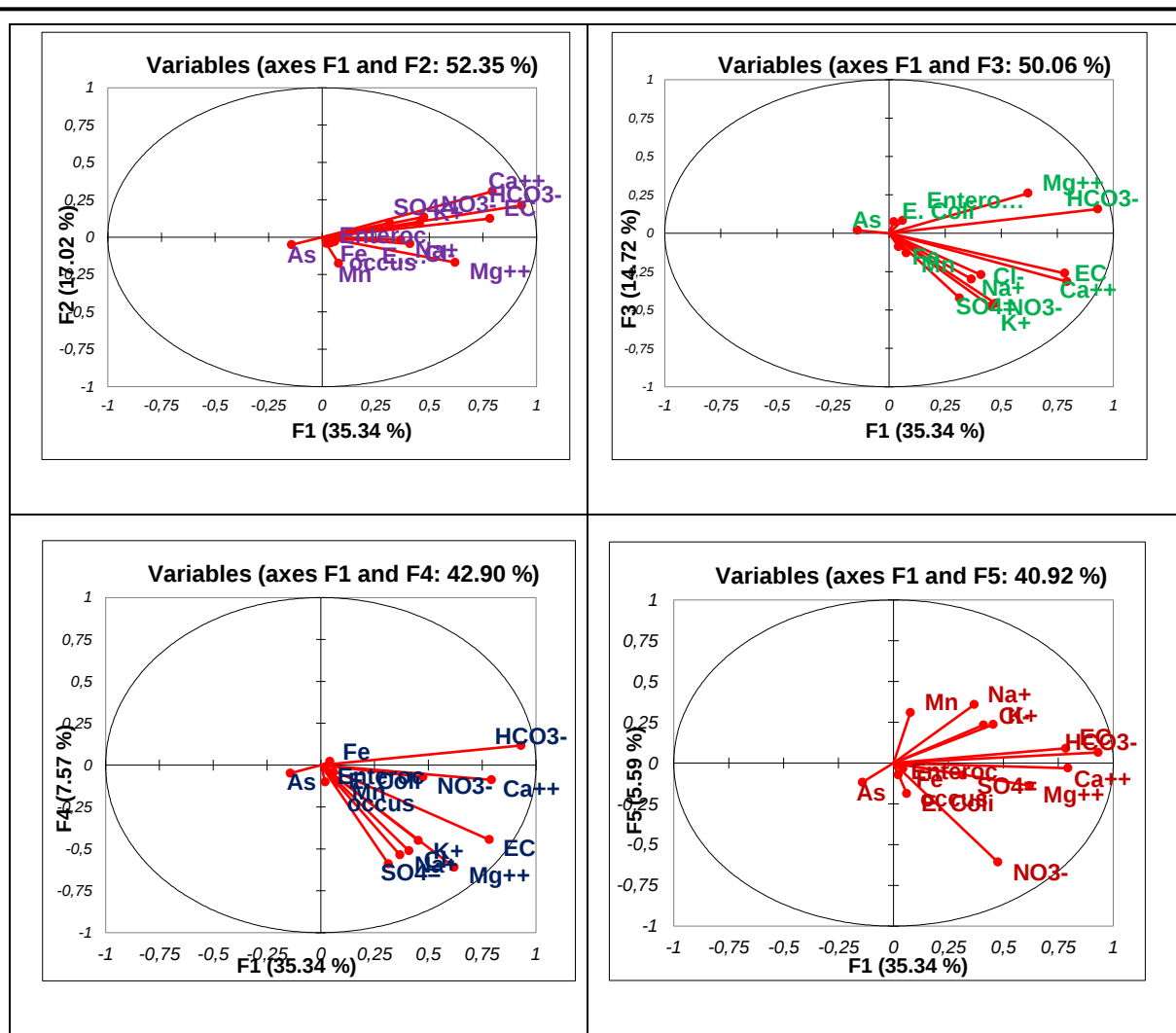


Figure 73 : Contribution des différents paramètres aux 5 premières fonctions discriminantes.

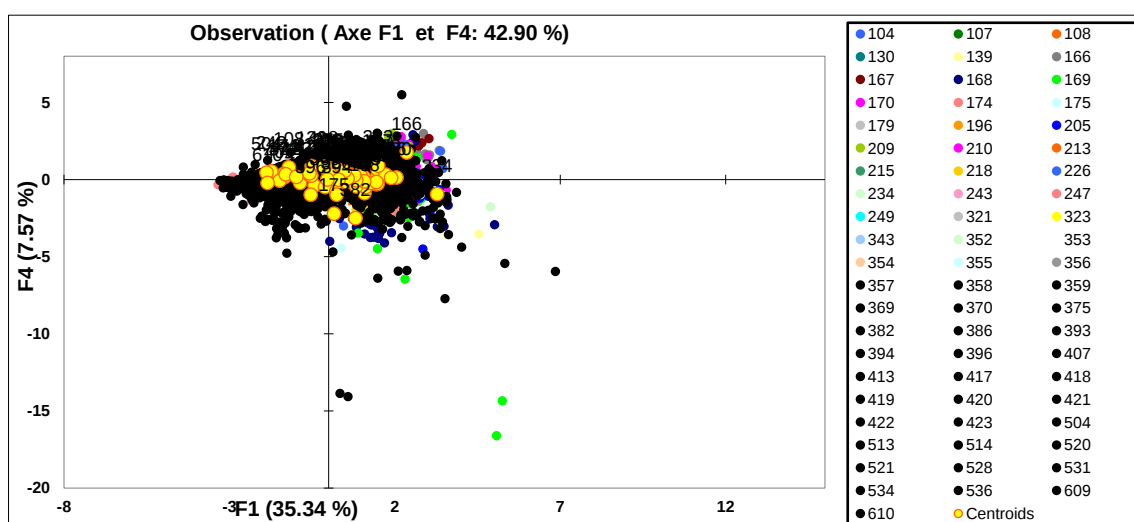


Figure 74 : Premier plan factoriel de l'AD effectuée sur les 8 groupes de MESO.

Ainsi, ce sont bien des critères de salinité (minéralité) des eaux et de faciès chimiques qui permettent le mieux (ou le moins mal) de différencier les groupes de MESO. Il convient de noter que la charge bactérienne n'intervient que très peu dans les principales fonctions discriminantes. Ceci est vrai aussi bien sur l'analyse discriminante effectuée sur les MESO que sur les groupes de MESO (Figure 73, 74 et 75).

Sur PACA, une méthodologie a été mise au point les quatre dernières années, elle consiste en un travail progressif depuis l'échelle départementale jusqu'à l'échelle régionale.

La question de la dimensionalité a été traitée par l'approche multivariée robuste : l'Analyse en Composante Principale (ACP). D'après les résultats, il apparaît alors clairement la possibilité d'établir une typologie des ressources en eau souterraine, comme le montrent les figures 76 et 78.

Les fonctions discriminantes sont très voisines lorsque l'on discrimine les MESO ou bien les groupes de MESO (Figure 73 et 75) des premiers plans factoriels de l'analyse discriminante effectuée sur les 8 groupes des masses d'eau souterraine sur l'ensemble de PACA.

Ainsi, il semble bien que ce ne sont pas les critères de discrimination qui différencient les deux calculs, mais le niveau de différenciation. Les caractéristiques de MESO sont peu différentes alors que les groupes de MESO sont nettement plus différentes entre eux (Figure 76 et 78).

Ceci confirme la méthode de regroupement des MESO aux caractéristiques proches par la méthode de réduction dimensionnelle, puis calculé des caractéristiques moyennes des MESO, finalement on passe au regroupement par classification hiérarchique non supervisée.

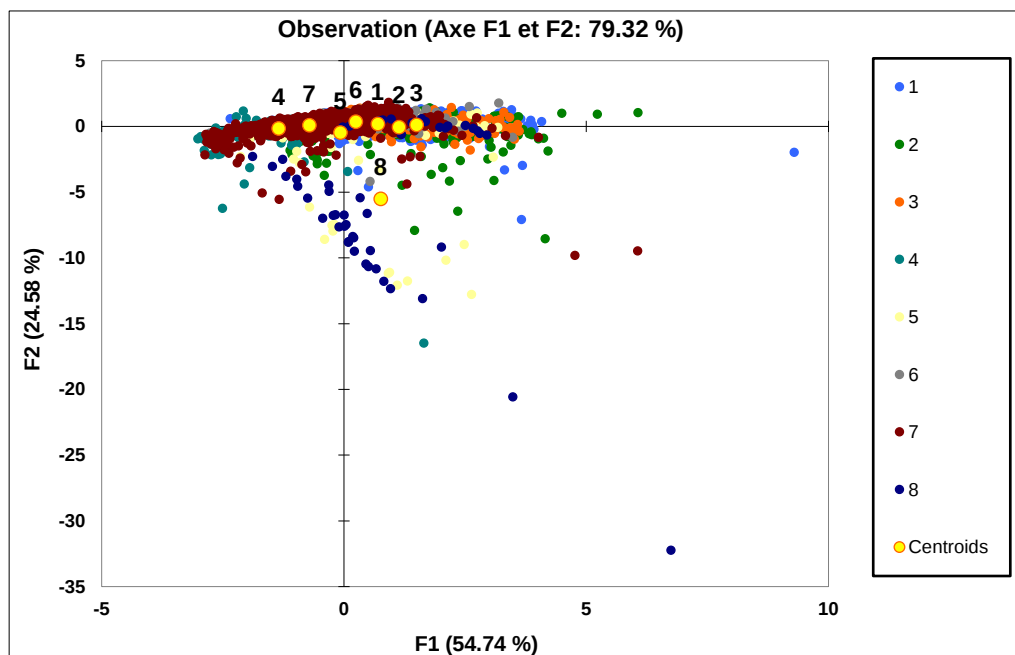


Figure 75 : Premier plan factoriel de l'AD effectuée sur les 8 groupes de MESO.

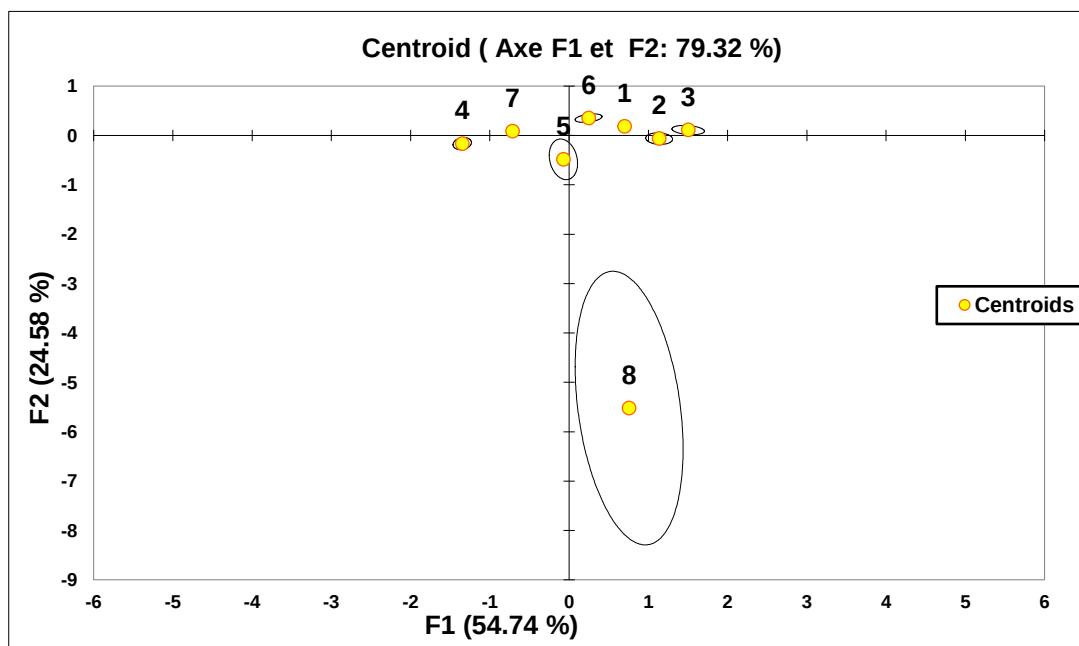


Figure 76 : Centroïdes des premiers plans factoriels de l'AD effectuée sur les 8 groupes des MESO.

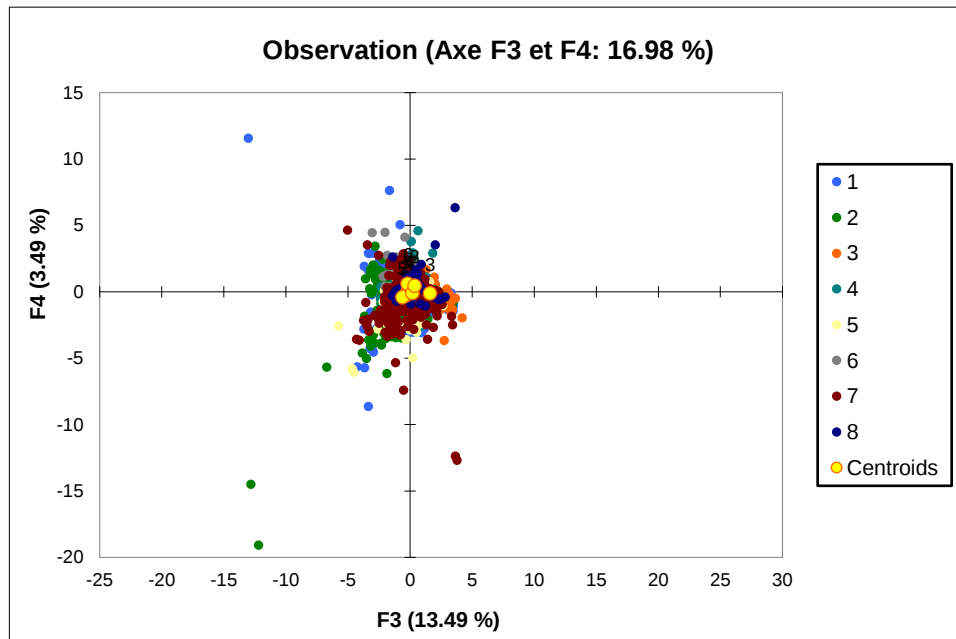


Figure 78 : Troisième et quatrième plan factoriel de l'AD effectuée sur les 8 groupes de MESO.

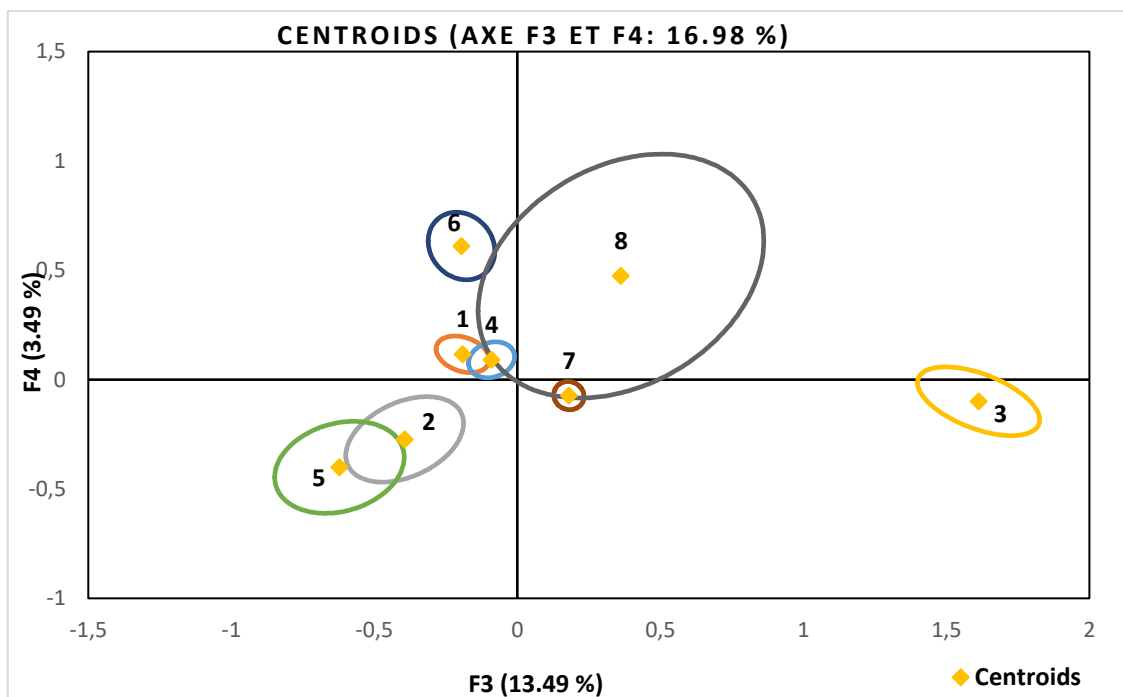


Figure 77 : Centroides de F3 et F4 de l'AD effectuée sur les 8 groupes des MESO.

Conclusion

Cette partie du chapitre consacré à la discrimination des masses d'eau et des groupes de masses d'eau apporte un éclairage utile à la connaissance de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine en région PACA.

En effet, le principal résultat est que même si les masses d'eaux souterraines ont des unités hydrogéologiques pertinentes, identifiées, décrites et cartographiées avec soin par le BRGM, la variabilité spatiale et temporelle de la composition de ces eaux, au sein même de chaque MESO est tellement importante, au regard des différences de composition entre masses d'eau, qu'il est impossible, à partir de sa composition, d'attribuer un échantillon d'eau à la masse d'eau dans laquelle il a été prélevé.

Ceci illustre parfaitement le niveau de difficulté du traitement de la qualité de l'eau en termes de spatialisation et de caractérisation de grands ensembles homogènes pour la protection et la gestion, ...

Cependant, la méthode proposée dans le chapitre 3 donne de meilleurs résultats. En effet, le fait de regrouper des MESO aux caractéristiques voisines, sur la base des valeurs moyennes des différents paramètres, permet de définir des ensembles plus pertinents et plus efficaces. Ceci justifie à posteriori les choix retenus dans le chapitre 3.

Ce travail de discrimination permet de mieux cerner les principales sources de variabilité :

- ▲ La variabilité entre les grandes unités géologiques qui s'exprime notamment dans la comparaison entre groupes de MESO.
- ▲ La variabilité interne aux groupes de MESO et dans chacune de MESO ; elle est très importante au point de ne pas permettre d'attribuer une analyse d'eau à la MESO où elle a été prélevée. Cette variabilité a plusieurs composantes :
 - Une composante temporelle liée aux fluctuations du climat, avec des phénomènes de dilution et d'oxygénation en période de pluie et de concentration en période sèche.
 - Une variabilité spatiale au sein des MESO, entre l'amont et l'aval qui se traduit en termes de minéralité croissante selon ce gradient, variabilité des usages, variabilité spatiale lithologiques au sein des MESO.

Les paramètres ayant un certain pouvoir discriminant sont liés à la géologie et en premier lieu la minéralité, et dans une moindre mesure au faciès chimiques.

En revanche la contamination fécale présente une variabilité à échelle trop locale et n'est d'aucun secours pour distinguer les différentes masses d'eau souterraine.

II. Apprentissage automatique (Machine Learning)

Exactement comme pour l'analyse discriminante (AD), deux niveaux de travail ont été utilisés pour les méthodes de Machine Learning. Dans cette étude, on a utilisé la méthode : **Classification naïve bayésienne**.

Pour cela la base de données a été scindée en deux groupes identiques : *un groupe de donnée pour l'apprentissage et un groupe pour la validation*.

Pour ce faire, dans chaque MESO ou groupe de MESO, un échantillon d'eau sur deux a été sélectionné pour l'apprentissage, l'autre a été réservé pour la validation.

Ce sont ainsi **2 550 échantillons** d'eau utilisés pour *l'apprentissage*, pareil pour la *validation*.

II.1. Echelle des groupes de MESO

A l'échelle des groupes de MESO, après la phase d'apprentissage, la prédiction de l'appartenance au groupe de MESO a donné **766 échantillons** bien classés, soit un taux de **30% de réussite**, ce qui est très proche, légèrement supérieur à celui obtenu pour l'analyse discriminante sur les groupes des MESO.

Pour les **1 550 échantillons** d'eau du groupe d'apprentissage, un auto-contrôle de l'efficacité de l'apprentissage sur le même groupe d'apprentissage donne un nombre de bien classé de 782 (30.7%), c'est-à-dire sensiblement égal au taux obtenu sur les données de vérification.

II.2. Echelle des MESO

A l'échelle des MESO, suite à la phase d'apprentissage, la prédiction des MESO à partir de la composition chimique a donné un nombre de réussite de **1 analyse** d'eau bien classée sur les **2 500** proposés au programme, ce qui donne un taux de réussite de **0.04%**. Un tirage aléatoire donnerait probablement un meilleur résultat. L'auto-vérification sur le jeu de donnée d'apprentissage donne une réussite pour **28** sur **2 500** échantillons d'eau (1.1%).

Ainsi, il apparaît clairement que s'il est possible de reconnaître les groupes de masses d'eau à partir de la composition chimique et de la charge bactérienne, avec un taux moyen de réussite, en revanche ceci s'avère très difficile voire impossible pour les masses d'eau.

Deux causes à cette situation peuvent être avancées :

- ✓ La variabilité spatiotemporelle de la composition chimique interne à chaque masse d'eau est très importante. Il est difficile dans ces conditions de fixer une caractéristique unique et stable, faible à l'échelle de la masse d'eau. La variabilité autour de cette moyenne est trop importante.

-
- ✓ Certaines masses d'eaux ont des caractéristiques très voisines, ce sont celles qui sont regroupés au sein de groupes de masses d'eau.

Les résultats obtenus avec la classification naïve bayésienne sont tout à fait comparables à ceux obtenu par l'analyse discriminante, tant au niveau des MESO que des groupes des MESO.

Une autre méthode de Machine Learning a aussi été utilisée sur les MESO. Il s'agit de **k plus proche voisins**. Elle donne des résultats comparables à celle de la classification naïve bayésienne. Elle n'est pas présentée dans ce document.

II.3. Conclusion sur le Machine Learning

Deux conclusions importantes peuvent être tirées :

- ▲ Pour l'échelle pertinente de travail sur la surveillance, la protection des masses d'eau, il est préférable de travailler à l'échelle des groupes d'eau et non à celle de la masse d'eau.
- ▲ Au niveau hydrogéologique, la définition des masses d'eau est très fine. Des masses d'eau géographiquement et géologiquement voisines pourraient être fusionnées. En effet, parfois la nappe d'accompagnement d'un cours d'eau émerge à deux MESO, l'une dans un secteur, l'autre au contact de la première plus en aval. La variabilité interne de la qualité de l'eau au sein de chacune de ces deux unités est très forte alors qu'il n'y a pas ou peu de différence de qualité entre ces deux corps d'eaux souterraines.

Un point important au niveau méthodologique, réside dans la comparaison entre l'Analyse Discriminante et le Machine Learning montre que la contrainte sur la linéarité intrinsèque à l'analyse discriminante ne semble pas réellement constituer une limitation.

En effet, les deux méthodes donnent des résultats remarquablement comparables aussi bien pour la discrimination des masses d'eau souterraine que pour les groupes des masses d'eaux.

Probablement l'intérêt du Machine Learning apparaîtra avec une base de données plus importante que celle utilisée dans ce travail. En effet cet ensemble de méthodes dont une seule a été utilisée dans ce travail, est habituellement utilisée pour le traitement de données très abondantes en traitement du on ou de l'image. En comparaison avec ce champ habituel d'utilisation, la base de données sur la qualité des eaux est de faible volume.

Cependant la remarquable coïncidence des taux de classement avec l'analyse discriminante suggère que malgré le faible volume de la base de données, les performances de la méthode de la classification naïve bayésienne ont été atteintes.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre est consacré à la différenciation des différentes masses d'eaux souterraines à partir de leur composition physicochimique et bactériologique.

Deux méthodes très différentes dans leur fonctionnement ont été utilisées donnant toutes les deux des résultats tout à fait comparables. Elles se confirment mutuellement, l'une validant les résultats de l'autre.

L'hypothèse de la linéarité intrinsèque à la méthode de l'Analyse Discriminante ne semble pas constituer une contrainte limitante dans le cas étudié. Ainsi, il ressort que la variabilité de la composition de chaque masse d'eau varie fortement dans l'espace, c'est à dire sur la surface couverte par cette masse d'eau, et dans le temps.

Cette variabilité importante est tout à fait comparable à la différence de qualité entre deux masses d'eau géologiquement et/ou géographiquement voisines. En revanche le regroupement de masse d'eau en groupes ou en sous-groupes aboutit à des ensembles nettement plus faciles à différencier.

De ce fait, il ressort que l'échelle pertinente de la gestion de la qualité des eaux brutes destinées à la consommation humaine est celle des groupes de Masses d'Eau Souterraine et non le point de prélèvement ni la masse d'eau souterraine.

Le résultat obtenu est très net car la différence des taux de discrimination entre le MESO et le groupe de MESO est très important. Ceci valide la démarche retenue dans le troisième chapitre.

SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE

La gestion de la qualité des eaux souterraines est difficile dans la région PACA. Une partie importante du territoire est couverte de montagne et la dispersion de l'habitat en hameaux situés dans des vallées éloignées conduit à l'existence d'un grand nombre de points d'eau (captages ou forages), chacun alimentant parfois un tout petit hameau.

De ce fait le nombre de « CODE INSTALLATION » est très important, chacun faisant l'objet d'une surveillance adaptée, mais aussi de caractéristiques propres, tant du point de vue de l'ouvrage que de la géologie. De ce fait établir une politique de surveillance plus fine que celle imposée par la réglementation s'avère difficile.

L'expérience de l'Agence Régionale de Santé et surtout celle de ses délégations départementales chargées de cette surveillance, ont une connaissance de terrain accumulée depuis des dizaines d'années de contrôle et de visites sur le terrain.

Certains secteurs, certains ouvrages posent plus de problèmes que d'autres. De la même manière certaines ressources en eau sont plus souvent sujettes à des dépassements de norme, en particulier au niveau bactériologique.

Cependant, au-delà de ce constat général, il est difficile d'établir une stratégie de suivi adaptée à l'environnement géologique. Les délégations départementales de l'ARS PACA adaptent l'intensité du contrôle à leur connaissance empirique du milieu, sans descendre en dessous des obligations réglementaires.

Le but de ce travail a été de déterminer une méthode objective, généralisable, de classification de la qualité de l'eau souterraine destinée à la consommation humaine. La difficulté essentielle est la grande variabilité spatiale de la qualité de l'eau qui s'ajoute à l'inévitable variabilité temporelle liée aux aléas climatiques.

Cette variabilité spatiale à courte distance et la forte variabilité géologique à l'échelle régionale font qu'une approche globale, même spatialisée n'est pas opérationnelle, seules les grandes tendances régionales sont mises en évidence, ce qui est inopérant.

A la suite de ce constat, une méthode a été mise au point. Pour être utilisable dans d'autres régions, il a été choisi une méthode faisant appel au croisement de la base de données SISE-EAUX avec la cartographie des masses d'eaux souterraines (MESO) effectuée par le BRGM.

Cette base de données bâtie à partir de l'archivage de toutes les données du contrôle sanitaire constitue une source d'information très importante et probablement sous utilisée.

Actuellement, les analyses sont conduites pour surveiller la qualité des eaux, ce qui est son principal objectif au départ. Le traitement de données par l'ARS consiste le plus souvent à mesurer le taux de conformité de eaux distribuées avec les normes en vigueur sur des périodes généralement quinquennales. La comparaison entre la cartographie des taux de conformités sur plusieurs périodes successives permet de mesurer l'impact des efforts de protection des captages et des forages. Cependant, les informations contenues dans cette base sont considérables et ce travail à tenter de mieux les valoriser.

Le travail conduit à étudier des ensembles d'analyses diverses. Le nombre de paramètres varie selon le type d'analyses. Il en résulte des matrices creuses difficiles à étudier. Un long travail fastidieux a consisté à vérifier les données car des anomalies peuvent exister du fait de la procédure d'extraction. Des sous-matrices pleines ont été extraites. Les prélèvements étant en général géo-référencés, il a fallu compléter les informations manquantes sur les localisations inconnues.

Le travail a essentiellement consisté à étudier un bloc de paramètres physico-chimique et microbiologiques sur 5 294 échantillons d'eau souterraine de PACA. L'étude au niveau régional ne donne que des tendances et informations grossières car l'information concernant tous les processus locaux sont dilués dans la masse d'information générale.

Une méthodologie a été mise au point. Elle consiste à rattacher chaque prélèvement à la masse d'eau souterraine (MESO) de la base de données du BRGM.

Une analyse en composante principale (ACP) a été effectuée sur l'ensemble de données. Les 11 premiers axes factoriels ont été retenus car ils condensent **97% de l'information** de la base de données. Le reste étant considéré comme du bruit statistique. Ces axes factoriels sont des macro-paramètres qui synthétisent l'information et ils sont cartographiables au même titre qu'un paramètre quelconque. Ainsi, l'axe factoriel 1 qui représente en général la minéralité des eaux remplace avantageusement la conductivité électrique et la plupart des éléments majeurs. Les valeurs **moyennes de chacun de ces 11** axes factoriels ont été calculées pour chacune des MESO. Chacune des 70 MESO de PACA concernée par le contrôle sanitaire est alors caractérisée par un vecteur de dimension 11.

Une **Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)** non supervisée sur cet ensemble de 70 MESO caractérisées par leurs 11 coordonnées, conduit alors à l'identification de 8 groupes et des sous-groupes de MESO aux caractéristiques voisines.

La cartographie de ces groupes de MESO à partir de la base SIG du BRGM montre une forte cohérence entre ces groupes et la structure géologique régionale.

Une Analyse Discriminante et des méthodes de Machine Learning montrent en retour qu'il n'est pas possible de différencier les masses d'eau entre elles à partir de leur composition chimique et bactériologique du fait de leur grande variabilité interne, alors que la différenciation des groupes de MESO est nettement plus facile.

L'étude des groupes et de certains sous-groupes de MESO permet une étude de données cohérentes, liées à des unités naturelles et non à des structures administratives. Quelques exemples sommaires d'étude des groupes et de sous-groupes ont été présentés à titre d'illustration.

Les processus les plus souvent responsables des variations spatio-temporelles de la qualité de l'eau sont :

- ✓ L'évolution des teneurs en éléments majeurs avec l'augmentation de minéralité des eaux.
- ✓ L'importance de la qualité bactériologique des eaux. La charge bactérienne d'origine fécale n'est pas une donnée simple. Selon les milieux, elle est associée à différents paramètres, indiquant des mécanismes de transfert différent selon le milieu géologique. Le déterminisme des contaminations bactériennes fécales est complexe. Dans certains milieux, ces germes sont liés aux eaux Bicarbonatées Calciques et Nitratées, souvent associées au Fer. C'est le cas de la contamination de captages par des eaux de surface, des eaux de ruissellement en milieu karstique. Il s'agit alors, le plus souvent, d'eaux contaminées par de troupeaux. Dans d'autre cas, la bactériologie est associée au NaCl notamment lors de la contamination en zone très urbanisée, en milieu très vulnérable, souvent près de torrents littoraux du varois ou des Alpes Maritimes.
- ✓ L'importance de métaux, Fe et Mn. Comme pour la bactériologie, l'étude montre que selon le milieu ces métaux sont liés à du ruissellement comme évoquée précédemment, ou bien liés à des processus redox dans des nappes qui présentent des gradients faibles.
- ✓ L'importance des processus redox dans la dynamique de Nitrates, du Fer et du Manganèse.

Cependant, **l'information véhiculée par les métaux** est pauvre en comparaison à celle qu'elle pourrait être, si le mode de prélèvement et de conditionnement des échantillons était conforme aux pratiques scientifiques avec microfiltration et acidification sur place. Il est probable que les teneurs en manganèse et en fer sont largement sous-estimées dans le cas de solubilisation en

conditions réductrices et surestimées dans le cas de présence de colloïdes ferriques dans des eaux contaminées par du ruissellement.

Ce travail confirme **que le SIG des masses** d'eau souterraine du BRGM est un outil d'une grande utilité et d'une grande pertinence. Cependant certaines de ce MESO cartographient des ensembles étendus et hétérogènes, ce qui conduit à mélanger des informations différentes au sein d'une même unité. Il existe donc une possibilité d'amélioration du travail avec une redéfinition plus précise de rares MESO.

Les résultats obtenus valident la méthodologie mise au point dans ce travail. De petites améliorations sont cependant souhaitables. Ainsi, pour limiter l'impact de certaines valeurs extrêmes qui impactent trop fortement l'analyse de variance, il pourrait donc utiliser la moyenne arithmétique plutôt que la moyenne géométrique pour les caractéristiques moyennes des MESO.

Il apparaît ainsi, que l'échelle pertinente pour construire une politique de surveillance de la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine est celles des groupes ou des sous-groupes de MESO.

Les résultats montrent effectivement que grâce à cette méthode, les mécanismes responsables de variations de qualité des eaux spécifiques à chaque secteur sont facilement identifiables, de même que les caractéristiques spécifiques à chacun de ces ensembles hydrogéologiques.

Le niveau pertinent pour une approche de gestion et celle de sous-groupes de 3 ou 4 MESO, voire si possible celle de la MESO. Pour un nombre plus élevé de MESO, l'information sur les mécanismes responsables des variations spatio-temporelles de la qualité de l'eau sont diluées et difficilement identifiables.

Ce travail confirme à l'échelle globale ou à des échelles administratives comme celle du département ne sont pas pertinentes.

La méthodologie a été mise au point laborieusement mais elle est désormais opérationnelle et totalement objective car basée sur une réduction dimensionnelle, suivie d'un croisement avec le SIG des masses d'eaux souterraines et une classification hiérarchique non supervisée. Ce dernier point permet de l'appliquer sans aucune connaissance géologique préalable. La cartographie BRGM des MESO étant suffisante.

Ceci ne constitue que la mise au point d'une méthodologie croisant mathématique, SIG et géologie et qui permet de construire les outils de surveillance et de gestion de la qualité des eaux souterraines.

Il faudrait aussi l'appliquer pour construire une politique de gestion des eaux destinées à la consommation humaine. De ce fait, elle est exportable vers d'autres régions françaises et vers l'échelle des Agences de bassin. Des projets sont en cours d'élaboration en continuité de ce travail ainsi qu'une nouvelle thèse sur la région Occitanie beaucoup plus grande que PACA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGRESTE, 2016** : Bilan annuel de l'emploi agricole - Résultats 2016 et estimations 2017- Agreste Chiffres et Données Agriculture n° 253.
- ARS, 2014** : Bilan EDCH « La qualité des eaux distribuées en Provence-Alpes-Côte d'Azur ». Rapport de l'agence régional de santé.
- Backman B., Bodiš D., Lahermo P., Rapant S., Tarvainen T., 1998** : Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. Environ. Geol. 36, 55–64. <https://doi.org/10.1007/s002540050320>.
- Ballan E., et les ATELIERS AZIMUTS (FEVRIER 2003)** : Atlas des paysages des Alpes de Haute-Provence, Présentation du département : Du pays ... aux paysages. Rapport en référence au cadre posé par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.
- Barbel-Périneau A., Barbiero L., Danquigny C., Emblanch C., Mazzilli N., Babic M., Simler R., Valles V., 2019** : Karst flow processes explored through analysis of long-term unsaturated-zone discharge hydrochemistry: a 10-year study in Rustrel, France. Hydrogeol. J. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01965-6>.
- Belle E, 2008** : Évolution de l'impact environnemental de lixiviats d'ordures ménagères sur les eaux superficielles et souterraines, approche hydro-biologique et hydrogéologique. Site d'étude : décharge d'Étueffont (Territoire de Belfort – France), THÈSE Spécialité Sciences de la Terre et de l'Environnement. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00400680>.
- Bellman R., 2010** : Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA. ISBN:978-0-691-14668-3.
- Blavoux B., 2006** : Aquifères et eaux souterraines en France. Tome 2 : Aquifère karstique de Vaucluse - BRGM Editions, Ouvrage Collectif sous la Direction de J.C. Roux, p. 719-729.
- BRGM, 1989** : Notice de la carte géologique au 1/50 000 de Bourg-Saint-Andéol (N°889) – BRGM.
- Cadilhac L., 2003** : Le Système D'évaluation De La Qualité Des Eaux Souterraines "Seq - Eaux Souterraines". Article in La Houille Blanche. [DOI : 10.1051/lhb/2003040](https://doi.org/10.1051/lhb/2003040).
- CEREG Ingénierie, 2013** : Etude d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous Bassin versant du Calavon-Coulon. Phase 1 à 6.
- CEREG Ingénierie, 2014** : Etude d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous Bassin versant de l'Eygues. Phase 1 à 6.
- Chessel D., Thioulouse J. & Dufour A.B., 2004** : Classification ascendante hiérarchique (CAH), Biostatistique Fiche stage7.doc/Page1/07-09-04. <http://pbil.univ-lyon1.fr/R/stage/stage7.pdf>. <http://larmarange.github.io/analyse-R/classification-ascendante-hierarchique.html>. doi/34986666.

- Comte J.-P., David A., Landreau A., 1996** : Méthode de détermination par système aquifère des niveaux de surveillance de la piézométrie et de la qualité des eaux souterraines. Rapport BRGM RR-38856-FR. 21p.
- Comte JP., Dacid A., Durand F., 1997** : Méthodologie de gestion des données sur les eaux souterraines. Conceptions des systèmes d'Information pour la gestion des eaux souterraines (SIGES). Rapport BRGM R 38483
- Corroy G., 1957** : Notice géologique et hydrogéologique sur le département des Alpes-Maritimes - Bull. Inst. Nation. hyg. T.12, n° 4, p. 890-938.
- CRIGE, 2016** : rapport méthodologique de production : base de données régionale d'occupation du sol 2006 - 2014.
- CRPF, 2014** : L'autoprotection des constructions situées en zone forestière exposée au risque d'incendie de forêt en PACA. Observatoire de la Forêt Méditerranéenne- réalisation CRPF (Centre national de la propriété forestière).
- DDTM du Var 2014**, La Mission Bruit de la direction départementale des territoires et de la Mer (DDTM). Comité de suivi du Bruit. <http://www.var.gouv.fr/comite-de-suivi-du-bruit-a4199.html>.
- Denegre J. et Salge F., 1996** : Les systèmes d'information géographique. Paris, PUF (Coll. « Que sais-je ? no 3122), 128 p. (ISBN 2-13-047932-4)
- DIGITAL INSIDERS, 2020** : Le Machine Learning ou « apprentissage automatique » : <https://digitalinsiders.feelandclic.com/construire/definition-quest-machine-learning>.
- Dominici R., Paloc H., 1968** : Hydrogéologie du bassin du Coulon (Vaucluse-Basses-Alpes). Rapport BRGM/68-SGN-199-HYD. 79p.
- DREAL PACA, 2019** & Agence de l'eau Rhône Méditerranéen & Corse : Rapport Diagnostic de la gestion quantitative de la ressource en eau de la région PACA.
- Duchaine, D., 1998** : Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de l'eau, 95 p.
- Egal E., 2008** : Carte géologique harmonisée du département des Hautes-Alpes. BRGM/RP - 57328-FR, 469P. ,2tab., 3pl.
- Fitts, C.R., 2013** : Groundwater Contamination, in: Fitts, C.R. (Ed.), Groundwater Science (Second Edition). Academic Press, Boston, pp. 499–585. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384705-8.00011-X>.
- Gaffet S., 2010**: Transit Time Environmental Tracing from Dissolved Organic Matter Fluorescence Properties in Karstic Aquifers. Application to Different Flows of Fontaine de Vaucluse Experimental Basin (SE France) BT - Advances in Research in Karst Media, in: Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., LaMoreaux, J.W. (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 143–149. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12486-0_22.

- GEOFLA-IGN, BD ALTI, 2013** : Carte géologique de France à 1/1 000 000 BRGM 11_2013. 250m IGN.
- Gilli E., Mangan Ch., Michelot N., 2006** : Les traçages karstiques des Alpes-Maritimes. Université de Nice-Sophia-Antipolis, UMR Espace. 33 p., 1 carte.
- Gonzalez G., 1994** : Schéma départemental des carrières de Vaucluse (84). Etude réalisée dans le cadre des actions de service public du BRGM 94 G 027. Rapport R 38 018 du BRGM.
- Gorodov EY., Gubarev W. 2013** : examen analytique de la visualisation de données Méthodes dans l'application de Big Data, Journal de génie électrique et informatique, 013, Numéro d'article 969458, pp. 1-7. dx.doi.org/10.1155/2013/969458
- GREC-PACA, 2010** : Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cahier thématique du GREC PACA, 2010.
- GREC PACA 1, 2017** : Cahier thématique du groupe de travail « Ressources en eau ». 'Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur'. 52 pages. ISBN : 9782956006053
- GREC-PACA 2, 2017** : Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Cahiers du GREC-PACA-2017.
- GTSQES, 2017** : Guide technique de suivi de la qualité des eaux souterraines. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. ISBN 978-2-550-70869-8. © Gouvernement du Québec – 2017.
- Helena B., Pardo R., Vega M., Barrado E., Fernandez J.M., Fernandez L., 2000** : Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. Water Res. 34, 807–816. [doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00225-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00225-0).
- Helsel D.R. and Hirsch R.M., 2002** : Statistical Methods in Water Resources. published in 2002 by the U.S. Geological Survey following return of copyright from Elsevier Publishers. ISBN: 0-444-88528-5.
- HYDROFIS & BRL Ingénierie, 2014** : Etude exploratoire de la nappe de la Durance, Phase 1 : Etat des lieux du fonctionnement des nappes alluviales et des usages sur la base des connaissances existantes. 323 p.
- IGN, 2020** : plateforme nationale de diffusion des données couvertes par la directive INSPIRE, directive européenne visant à faciliter la diffusion de l'information géographique (des données géographiques ou géolocalisées). <https://www.geoportail.gouv.fr/>
- Infoterre, 2020** : le portail d'accès aux données Géoscientifiques du BRGM, <http://infoterre.brgm.fr/page/eaux-souterraines-bsseau>.
- INSEE, 2015** : Recensement de la population régions, départements, arrondissements, cantons et communes. Les données de population au 1^{er} janvier 2015. par le décret n° 2018-333 du 3 mai 2018. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3292701>.

- Jegou A., Chabrol A., Édouard B., 2013 :** « Rapports genrés au terrain en géographie physique », Géographie et cultures.18 avril 2013. Journals open edition; <https://DOI: 10.4000/gc.2027>.
- Jolliffe I, 2002 :** Principal Component Analysis, 2nd edition éd., Springer-Verlag, 2002.
- Lafolie F., Renault P., Dudal F., Debroux M., 2005 :** ‘Composition de l'eau et du sol : effet des activités microbiennes et des déplacements de micro-organismes’. Article in La Houille Blanche · May 2005. <https://DOI: 10.1051/lhb:200503003>.
- Laurini R., Thompson D., 1992 :** Fundamentals of spatial informations system. Available from the British library, ISBN : 0 12 438380 7.
- Lipnicka M. and Nowakowski A., 2019 :** On dual dynamic programming in shape optimization of coupled models. Struct Multidisc Optim 59, 153–164 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2057-5>.
- Liu C.W., Lin K.H., Kuo Y.M., 2003 :** Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. Sci. Total Environ. 313, 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6).
- Mallat S. 2017 :** L'apprentissage face à la malédiction de la grande dimension. Collège de France. <https://www.college-de-france.fr/site/stephane-mallat/course-2017-2018.htm>.
- Moulin M., 2012 :** Atlas des ressources géothermiques en région PACA - Notice explicative. Rapport BRGM/RP-61780-FR, 46 p., 23.
- Moulin M., 2013 :** (avec la collaboration de Salquèbre D. et de Sany F.) – Actualisation de la synthèse hydrogéologique dans la région Provence – Alpes – Côte d’Azur (bassin Rhône – Méditerranée). Rapport final. Rapport BRGM/RP-61846-FR, 129 p., 10 ill., 4 ann.
- NICOD J., 1980 :** Les ressources en eau de la région Provence - Alpes - Côte d’Azur. Importance et rôle des réserves souterraines, in : Méditerranée, Troisième Série, Tome 39. L’eau En Provence-Alpes-Côte d’Azur. Publications de l’Université de Provence. <https://doi.org/10.3406/medit.1980.1937>.
- OFEV (éd.), 2019 :** État et évolution des eaux souterraines en Suisse. Résultats de l’Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédéral de l’environnement, Berne. État de l’environnement no 1901 : 144 p.
- Rezende-Filho A.T., Valles V., Furian S., Oliveira C.M.S.C., Ouardi J., Barbiero L., 2015 :** Impacts of lithological and anthropogenic factors affecting water chemistry in the upper Paraguay River Basin. J. Environ. Qual. 44. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0019>.
- Rivet F., 2015 :** Mise en place d’un réseau de suivi des eaux souterraines sur le département du Vaucluse. Rapport final BRGM/RP-64442-FR. 114 p., 43 ill., 9 ann, 1 CD.
- RMAJ, 2014 :** Rapport final de l’agence de l’eau RMC, mars 2014 : Identification et réservation des ressources majeures pour l’alimentation en eau potable Alluvions de la moyenne Durance et de ses affluents (Asse, Bléone, Verdon). Note de synthèse.

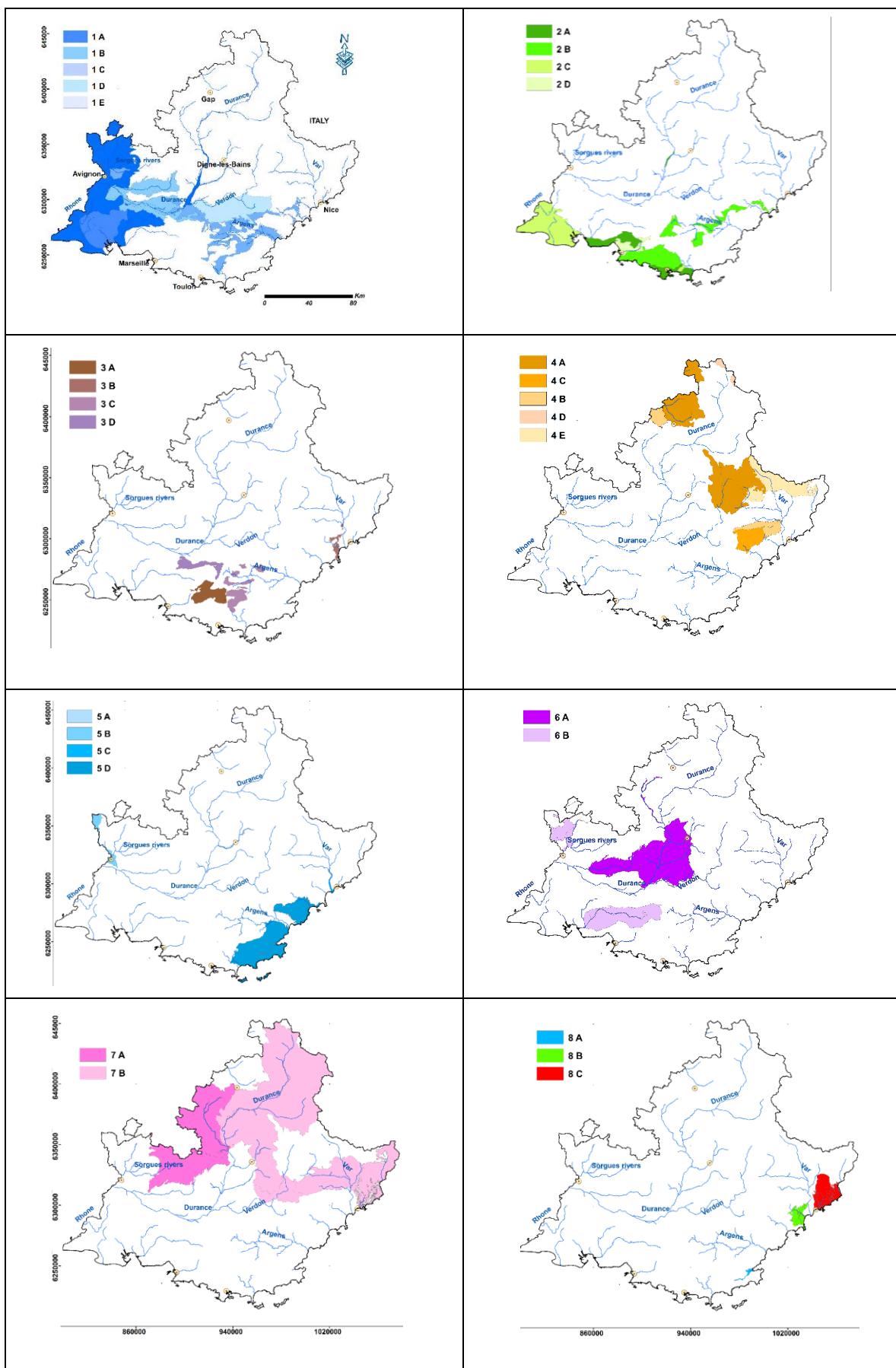
-
- Rougier L., 2020 :** Le Machine Learning et le *Big Data*, Développeur et Administrateur Coheris Liberty chez Domofrance – Mambajuce. <https://ia-data-analytics.fr/machine-learning/>
- Saeedi M., Abessi O., Sharifi F., Meraji H., 2010 :** Development of groundwater quality index. Environ. Monit. Assess. 163, 327–335. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0837-5>.
- SIE, 2020 :** système d'information sur l'eau. Il est inscrit dans le Schéma National des Données sur l'Eau (SNDE) : <http://www.data.eaufrance.fr/presentation>.
- Simler R., 2014 :** Hydrochemistry Multilanguage Software Free Distribution Laboratory of Hydrogeology. University of Avignon, France, Version 6.4.
- Tiouiouine A., Ouardi J., Valles V., Morarech M., Kacimi I., Bahaj T., Kassou N., 2018 :** Hydrogeological and hydro-geochemical study of the water wellfields of Loubet, Nice Region - France. J. Mater. Environ. Sci., 2018, Volume 9, Issue 2, Page 544-550. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.2.59>.
- Tiouiouine 1 A., Yameogo S., Valles V., Barbiero L., Dassonville F., Moulin M., Bouramtane T., Tarik Bahaj, Morarech M., Kacimi I., 2020 :** Dimension Reduction and Analysis of a 10-Year Physicochemical and Biological Water Database Applied to Water Resources Intended for Human Consumption in the Provence-Alpes-Côte d'Azur Region, France. Journal Water **2020**, 12, 525; [doi:10.3390/w12020525](https://doi.org/10.3390/w12020525).
- Tiouiouine A., Jabrane M., Kacimi I., Morarech M., Bouramtane T., Bahaj T., Yameogo S., Rezende-Filho A., Dassonville F., Moulin M., Valles V., Barbiero L., 2020 :** ‘Determining the Relevant Scale to Analyze the Quality of Regional Groundwater Resources While Combining Groundwater Bodies, Physicochemical and Biological Databases in Southeastern France’. Water **2020**, 12, 3476; [doi:10.3390/w12123476](https://doi.org/10.3390/w12123476).
- Wilson, S. R., Close, M. E., & Abraham, P., 2018 :** Applying linear discriminant analysis to predict groundwater redox conditions conducive to denitrification. Journal of hydrology, 556, 611-624.

ANNEXES

Annexe 1 : Description des masses d'eau souterraine de la région PACA.

FRDG	Description
FRDG104	Cailloutis de la Crau
FRDG107	Calcaires crétacés des chaînes de l'Estaque, Nerthe et Etoile
FRDG108	Massif calcaire crétacé du Dévoluy
FRDG130	Calcaires urgoniens du plateau de Vaucluse et de la Montagne de Lure
FRDG133	Calcaires crétacés de la montagne du Lubéron
FRDG139	Plateaux calcaires des Plans de Canjuers, de Tavernes-Vinon et Bois de Pelenq
FRDG163	Massif calcaire du Cheiron
FRDG164	Massif calcaire de Tourette-Chiers
FRDG165	Massif calcaire Mons-Audibergue
FRDG166	Massif calcaire de la Sainte-Victoire
FRDG167	Massifs calcaires de la Sainte-Baume, du Mont Aurélien et Agnis
FRDG168	Calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques
FRDG169	Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal
FRDG170	Massifs calcaires jurassiques du centre Var
FRDG174	Calcaires du Crétacé supérieur des hauts bassins du Verdon, Var et des affluents de la Durance
FRDG175	Massifs calcaires jurassiques des Préalpes niçoises
FRDG179	Unités calcaires Nord-Ouest varois (Mont Major, Cadarache, Vautubière)
FRDG205	Alluvions et substratum calcaire du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier
FRDG209	Conglomérats du plateau de Valensole
FRDG210	Formations variées et calcaires fuvéliens et jurassiques du bassin de l'Arc
FRDG213	Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires dans BV Basse Durance
FRDG215	Formations oligocènes de la région de Marseille
FRDG218	Molasses miocènes du Comtat
FRDG226	Calcaires urgoniens sous couverture du synclinal d'Apt
FRDG234	Calcaires jurassiques de la région de Villeneuve-Loubet
FRDG244	Poudingues pliocènes de la basse vallée du Var
FRDG247	Massifs calcaires du nord-ouest des Bouches du Rhône
FRDG249	Sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron
FRDG321	Alluvions du Drac amont et Séveraisse
FRDG323	Alluvions du Rhône du confluent de la Durance jusqu'à Arles et Beaucaire et alluvions du Bas Gardon
FRDG343	Alluvions du Gapeau
FRDG352	Alluvions des plaines du Comtat (Aigues Lez)
FRDG353	Alluvions des plaines du Comtat (Ouvèze)
FRDG354	Alluvions des plaines du Comtat (Sorgues)
FRDG355	Alluvions de la Bléone
FRDG356	Alluvions de l'Asse
FRDG357	Alluvions de la moyenne Durance
FRDG358	Alluvions de la Durance moyenne en aval de St Auban (emprise du panache de pollution historique)
FRDG359	Alluvions basse Durance
FRDG369	Alluvions de l'Huveaune
FRDG370	Alluvions de l'Arc de Berre

FRDG	Description
FRDG375	Alluvions de la Giscle et de la Môle
FRDG376	Alluvions de l'Argens
FRDG382	Alluvions du Rhône du défilé de Donzère au confluent de la Durance et alluvions de la basse vallée Ardèche
FRDG386	Alluvions des basses vallées littorales des Alpes-Maritimes (Siagne, Loup et Paillon)
FRDG393	Alluvions du Buëch
FRDG394	Alluvions Durance amont
FRDG396	Alluvions de la basse vallée du Var
FRDG406	Domaine plissé BV Isère et Arc
FRDG407	Domaine plissé BV Romanche et Drac
FRDG413	Formations variées des bassins versants Cenise et Pô
FRDG417	Formations variées du haut bassin de la Durance
FRDG418	Formations variées du bassin versant du Buëch
FRDG419	Formations variées du Crétacé au Tertiaire des bassins versants du Paillon et de la Roya
FRDG420	Formations diverses à dominante marneuse du Crétacé au Pliocène moyen du sw des Alpes-Maritimes
FRDG421	Formations variées du Secondaire au Tertiaire du bassin versant du Var
FRDG422	Formations variées du bassin versant du moyen Verdon
FRDG423	Formations variées du Haut Verdon et Haut Var
FRDG504	Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue
FRDG513	Formations variées du bassin versant de la Touloubre et de l'étang de Berre
FRDG514	Formations variées de la région de Toulon
FRDG518	Formations variées côtes du Rhône rive gardoise
FRDG520	Formations gréseuses et marno-calcaires de l'avant-Pays provençal
FRDG527	Calcaires et marnes crétacés du BV Drôme, Roubion, Jabron
FRDG528	Calcaires et marnes crétacés et jurassiques du BV Lez, Eygues/Aigue et Ouvèze
FRDG531	Argiles bleues du Pliocène inférieur de la vallée du Rhône
FRDG534	Formations gréseuses et marno-calcaires tertiaires en rive droite de la moyenne Durance
FRDG536	Marno-calcaires et grès Collines Côte du Rhône rive gauche et de la bordure du bassin du Comtat
FRDG609	Socle des massifs de l'Estérel, des Maures et Iles d'Hyères
FRDG610	Socle des massifs Mercantour, Argentera, dôme de Barrot



Annexe 2 : Répartition des 8 groupes de MESO dans la région PACA.