

Comparative study of the physicochemical composition of twenty packaged water brands marketed in Tunisia

Etude comparative de la composition physico-chimique de vingt marques d'eaux conditionnées et commercialisées en Tunisie

T. SGHAIER¹, M.A. BEN ABDALLAH¹

¹Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF). Université de Carthage. BP 10, Avenue Hédi Karray 2080, Ariana (Tunisie)

*Corresponding author: sgahier.tahar@iresa.agrinet.tn

Abstract – The classification of the most used twenty marks of conditioned water in Tunisia according to their content of chemical elements constitutes the main objective of this work. Cluster analysis and principal component analysis were used to analyze the data collected from the labels of bottled water. The obtained results showed that the twenty marks of studied water can be grouped in 10 distinct classes with similar chemical characteristics. The waters 'Main', 'Palma', 'Royale' and 'Sabrine' form each one a separate class while being distinguished between them and compared to all the other waters. Four other classes are formed by waters ('Aqualine' and 'Cristaline'), ('Primaqua' and 'Jektiss'), ('Marwa' and 'Ovia') and ('Hayet' and 'Jannet') whereas the two last classes contain ('Fourat', 'Mélina', 'Bargou' and 'Rayan') and ('Safia1', 'Safia2', 'Dima' and 'Melliti').

Keywords: Mineral water, source water, chemical elements, classification.

Résumé - La classification d'une vingtaine de marques d'eaux conditionnées, les plus utilisées en Tunisie, en fonction de leur teneur en éléments chimiques constitue l'objectif principal de ce travail. La classification hiérarchique ascendante et l'analyse en composantes principales ont été utilisées pour analyser les données collectées à partir des étiquettes des eaux embouteillées. Les résultats obtenus ont permis de répartir les 20 marques d'eaux étudiées en 10 classes distinctes, ayant chacune des caractéristiques chimiques semblables. Les eaux 'Main', 'Palma', 'Royale' et 'Sabrine' forment chacune une classe en se distinguant entre elles et par rapport à toutes les autres marques. Quatre autres classes sont formées par les eaux ('Aqualine' et 'Cristaline'), ('Primaqua' et 'Jektiss'), ('Marwa' et 'Ovia'), ('Hayet' et 'Jannet') alors que les deux dernières classes comportent ('Fourat', 'Mélina', 'Bargou' et 'Rayan') et ('Safia1', 'Safia2', 'Dima' et 'Melliti').

Mots clés : eau minérale, eau de source, éléments chimiques, classification.

1. Introduction

L'eau est un nutriment essentiel pour la vie humaine, animale et végétale. Quelle que soit l'origine de l'eau, minérale, de source ou de robinet, celle-ci joue un rôle capital pour la santé de l'homme. Selon Dumoulin et Mantha (2009) et Tordjman (2010), l'organisme d'un adulte a besoin, dans les conditions normales, d'environ 2,5 litres d'eau (eau ingérée + eau absorbée) par jour pour bien fonctionner, soit l'équivalent de 1,5 litres en boisson et 1 litre contenu dans les aliments. Les eaux minérales naturelles présentent une large palette de compositions minérales, selon le terroir d'où elles sont issues (CSEM 2017). Plusieurs références (Maton 2016 ; CSEM 2017 ; Barataud et Velghe 2017 ; Anonyme 3, 2016) font le classement des eaux minérales en fonction de leurs richesses en éléments minéraux tels que le calcium (Ca), le fluor (F), le bicarbonate de sodium (NaHCO₃), le magnésium (Mg) ou autres. Les spécialistes de la santé précisent que chaque eau a des indications préférentielles selon sa composition et sa teneur des minéraux (Mice 2008). Ces spécialistes rappellent que les besoins des personnes en éléments minéraux varient selon l'âge, l'activité physiques, l'état de santé et les spécificités de certaines périodes de la vie chez les enfants, les adolescents, les femmes enceintes ou allaitantes et les personnes

âgées (Mice 2008 ; Dumoulin et Mantha 2009 ; Barataud et Velghe 2017). Selon les cas et les besoins spécifiques de certaines personnes, les spécialistes peuvent recommander des eaux minérales riches en tels ou tels éléments minéraux, tout en respectant des teneurs limites.

Le secteur des eaux embouteillées ou conditionnées (eau minérale et de source) en Tunisie a connu ces dernières années une évolution très rapide. En effet, selon l'Office National du Thermalisme et de l'Hydrothérapie (ONTH 2016), la capacité de production de ce secteur est d'environ 350.000 bouteilles à l'heure et procure 2.500 postes d'emplois directs en plus des emplois indirects. Avec une augmentation annuelle de 7% de la consommation d'eau en bouteille (Kapitalis X) et plus d'une vingtaine d'unités de production d'eaux embouteillée sur le territoire national, une étude comparative, basée sur la composition chimique et minérale des différentes marques d'eaux, semble nécessaire.

L'objectif de cette étude est de rassembler les eaux les plus commercialisées sur le marché tunisien en groupes d'eaux ayant des similitudes de point de vue caractéristiques chimiques et teneurs en minéraux en utilisant un outil statistique basé sur la classification numérique et l'analyse en composantes principales. Les résultats obtenus peuvent constituer un outil d'aide à la décision quant au choix de l'eau à acquérir, et ceci pour un consommateur averti comme pour un spécialiste en nutrition.

2. Matériel et méthodes

2.1. Consommation de l'eau embouteillée en Tunisie

Grâce à ses qualités, l'eau minérale et/ou de source était considérée en Tunisie et en occident avant les années 80 comme un produit d'appoint d'hygiène et de santé et souvent réservé aux nourrissons et aux personnes malades ou fragiles (Velleminfroy 2014 ; Frédéric Maton 2016). Aussi, l'eau minérale embouteillée était considérée, durant cette période, comme produit réservée à une catégorie de clientèle déterminée du secteur de l'hôtellerie et de la restauration de luxe (ONTH 2016).

Pour le cas spécifique de la Tunisie et selon l'Office National du Thermalisme et de l'Hydrothérapie (ONTH, 2016), il est important à signaler que les premières eaux minérales mises en bouteilles datent depuis 1904; c'est le cas des eaux minérales de Ain Otkar à Korbous, suivies de celles d'Ain Melliti à Teboursouk puis de Ain Garci à Enfidha. Juste après l'indépendance, l'Etat tunisien a repris toutes les sources thermo-minérales du pays, ce qui a permis aux sociétés publiques de gérer exclusivement, durant la période allant de 1959 à 1988, toutes les unités industrielles de mise en bouteille des eaux minérales (ONTH 2016). A partir de 1988, le secteur composé de 7 unités fonctionnelles de conditionnement a connu des transformations significatives suite à son ouverture aux investisseurs privés, pour atteindre une capacité de production annuelle de l'ordre de 80 millions de litres en 1990, soit près de 9 fois la capacité de production annuelle de 1970 et 3 fois celle de 1980 (ONTH 2016).

La période des années 90 marque aussi le début d'un changement significatif des habitudes alimentaires, d'une classe donnée de tunisiens, en relation avec l'augmentation de la consommation des eaux minérales. En effet, certains intervenants dans le secteur des eaux minérales embouteillées en Tunisie (ONTH 2016 ; Thebti 2016) expliquent l'augmentation importante de la demande en eaux minérales en bouteilles, principalement par :

- L'amélioration du niveau de conscience, d'une catégorie donnée de consommateurs, quant aux effets bénéfiques des eaux minérales. Ainsi, cette catégorie a tendance à adopter de plus en plus le mode de la diététique et du culte du corps.
- L'amélioration relative du niveau de vie d'une catégorie donnée de consommateurs tunisiens.
- La non-satisfaction, relative, d'une classe donnée de consommateurs par la qualité de l'eau de robinet.
- La stratégie commerciale/marketing/distribution adoptée par les spécialistes du secteur des eaux embouteillées.

Pour satisfaire cette augmentation de la demande et répondre à une augmentation de la consommation moyenne de 7 litres/personne/an en 1990 à 127 litres/habitant/an en 2015, le nombre des unités fonctionnelles de conditionnement a passé durant cette période de 7 à plus de 21 unités de conditionnement, tout en intensifiant aussi la capacité de production individuelle de chacune de ces unités (ONTH 2016 ; Thebti 2016). Ainsi, les ventes d'eau minérales entre 1995 et 2015 ont passé de 110 millions à près de 1 milliard et demi de litres d'eaux (ONTH 2016 ; Thebti 2016 ; Anonyme 1, 2017). La consommation moyenne annuelle par habitant (Figure 1) a passé de 12 litres en 1995, à 71 litres en 2009, à 107 litres en 2012 et à environ 127 litres en 2015.

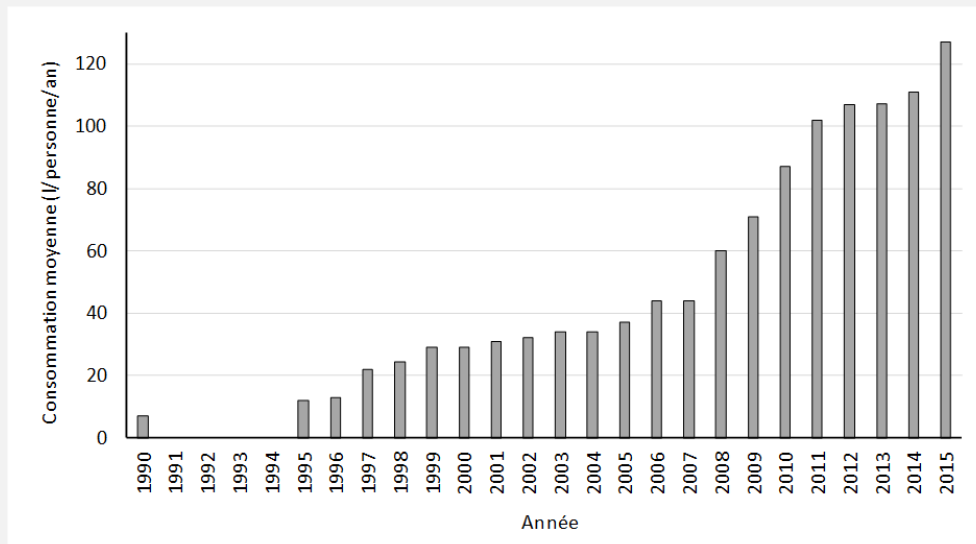


Figure 1. Evolution de la consommation moyenne annuelle (litres/personne/an) de l'eau embouteillée en Tunisie de 1990 à 2015 (ONTH 2016 ; Thebti 2016).

2.2. Consommation de l'eau embouteillée en Europe et dans le monde

Les moyennes de consommation de l'eau embouteillée en Tunisie en litres/habitant/an restent supérieures à celles des pays européens. En effet, les pays européens consomment chaque année près de 52 milliards de litres d'eau en bouteille, dont 87% sont des eaux minérales naturelles, ce qui correspond à une moyenne de consommation par personne et par an de l'ordre de 103 litres (CSEM 2015), soit 24 litres de moins par rapport à la moyenne nationale en Tunisie estimée à 127 litres/personne/an en 2015 (Thebti 2016).

Il est à signaler que la moyenne générale de consommation d'eau embouteillée en Europe cache une variabilité importante entre les valeurs moyennes par pays (Figure 2). En effet, les consommateurs italiens sont classés les premiers d'Europe avec 176 litres/personne/an suivi des allemands avec 171 litres/personne/an et en troisième rang les portugais avec 128 litres/personne/an (CSEM 2015). Les consommateurs français se placent en sixième rang avec une consommation moyenne annuelle de l'ordre de 118 litres/personne/an. D'autres pays européens ont des consommations moyennes annuelles de l'ordre de 20 à 25 litres/personne/an, c'est le cas de la Grande Bretagne, la Finlande, la Hollande et la Suède.

Toutefois et par comparaison aux pays du continent américain, les chiffres de consommation moyenne annuelle d'eau embouteillée en Europe sont nettement supérieurs à ceux d'Amérique du Nord qui se caractérisent par une consommation moyenne annuelle d'eau en bouteilles de près de 95 litres/personne/an, contre une consommation de l'ordre de 32,5 litres pour les sud-américains (CSEM 2015).

Quand à la moyenne de consommation en Afrique et en Moyen-Orient, elle est de l'ordre de 12 litres/personne/an, un chiffre qui reste inférieur à la consommation moyenne mondiale située à près de 25 litres/personne/an d'eau embouteillée (Anonyme 2, 2015).

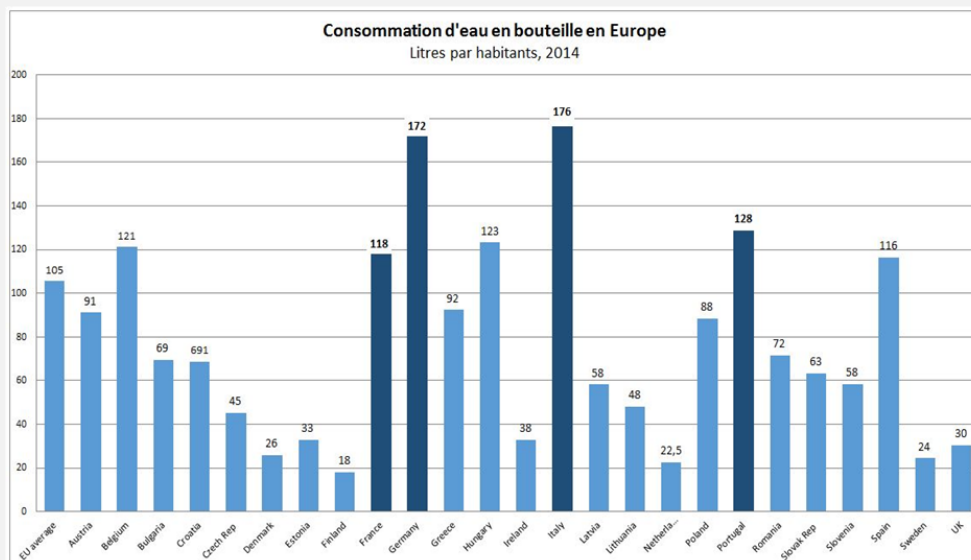


Figure 2. Consommation moyenne de l'eau embouteillée (litres/personne) en Europe en 2014. (Source : <http://eaumineralnaturelle.fr/wp-content/uploads/2014/09/Consommation-eau-en-bouteille-csem.jpg>)

2.3. Types d'eaux conditionnées commercialisées en Tunisie

D'après l'Office National du Thermalisme et de l'Hydrothérapie (ONTH X), il existe trois catégories d'eaux conditionnées commercialisées en Tunisie, à savoir : l'eau minérale naturelle, l'eau de source naturelle et l'eau de table. Les deux premières catégories d'eaux dites « naturelles » passent directement du sous-sol à la bouteille et sont pures ou potables dans leur état naturel, tandis que l'eau de table doit d'abord être traitée avant de devenir potable.

L'eau minérale naturelle, de composition stable dans le temps, possède des sels minéraux (calcium, magnésium, sodium, potassium) et oligo-éléments (fluor, silicium, vanadium) aux propriétés spécifiques. La concentration en éléments chimiques peut varier d'une eau à une autre. L'eau de source naturelle est naturellement propre à la consommation humaine sans aucun traitement chimique et elle est embouteillée à la source même. Elle est moins minéralisée et sa composition ne présente pas le même degré de stabilité et peut varier tout en restant dans les limites respectant les normes de potabilité pour les eaux « destinées à la consommation humaine ». L'eau de table, provenant d'un gisement souterrain, doit être biologiquement pure et doit subir des traitements réglementés par la législation en vigueur pour devenir apte à la consommation humaine.

2.4. Caractéristiques chimiques des eaux destinées à la consommation humaine

L'eau contient beaucoup d'ions dissous dont les principaux sont le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les carbonates (CO_3^{--}), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^{--}), les chlorures (Cl^-) et les nitrates (NO_3^-). Ces éléments proviennent pour l'essentiel du lessivage des sols par les eaux de pluie (Membratec 2008). Aussi, leur teneur dépend-elle directement de la nature des roches du bassin versant. Elle peut varier du milligramme par litre au gramme par litre pour les eaux les plus salées. L'eau contient également, mais en moins grande concentration variant du microgramme au milligramme par litre, des éléments nutritifs ou nutriments tels que l'azote (contenu dans l'ammoniac, les nitrites et les nitrates), le phosphore (contenu dans les phosphates) et la silice, mais aussi le fer et le manganèse. D'autres éléments en état de trace variant de 0,1 à 100 microgrammes par litre sont également présents dans l'eau ; comme c'est le cas de l'arsenic, le cuivre, le cadmium, le manganèse, le fer, le zinc, le cobalt et le plomb. Ces éléments proviennent de l'altération chimique et mécanique des roches, mais parfois aussi des activités industrielles et domestiques (Membratec 2008). Le tableau 1 présente les limites de concentration tolérées en éléments chimiques des eaux destinées à la consommation humaine (Ineris 2014), celles d'une eau idéale (Membratec 2008) et d'une eau riche en un élément donné (Velghe 2016).

Tableau 1. Valeurs limites tolérées des principaux éléments chimiques des eaux destinées à la consommation humaine, d'une eau idéale et d'une eau riche en un élément donné (Membratec 2008 ; Ineris 2014 ; Velghe 2016).

Eléments chimiques	Symboles	Limites de concentration (mg/l)	Eau idéale (mg/l)	Eau riche en un élément chimique donné (mg/l)
Calcium	Ca⁺⁺	-	40 à 125	> 120
Magnésium	Mg⁺⁺	50	5 à 30	> 56
Sodium	Na⁺	150	<20	> 360
Potassium	K⁺	12	-	-
Bicarbonates	HCO₃⁻	610	-	-
Sulfates	SO₄⁻	250	<50	-
Chlorures	Cl⁻	250	<20	-
Nitrates	NO₃⁻	50	<25	-
Fluorures	F⁻	1,5	-	1,5
pH	pH	6,5 à 9	6,8 - 8,2	-

2.5. Données collectées

Les données collectées, relatives aux caractéristiques chimiques des principales marques d'eaux conditionnées et commercialisées en Tunisie, proviennent directement des étiquettes collées sur les bouteilles disponibles sur le marché en Septembre-Octobre 2016 (Tableau 2), de l'Office National du Thermalisme et de l'Hydrothérapie (www.thermalisme.nat.tn) ou encore du tableau comparatif des caractéristiques chimiques des eaux publié sur internet par Sami Ben Yahya (Dromabuzz 2015). La valeur des sels totaux de la marque 'Marwa' qui n'est plus inscrite sur l'étiquette d'affichage a été empruntée du tableau comparatif de Sami Ben Yahya. Le tableau 2 présente pour chaque marque d'eau, le code utilisé, la date de mise en bouteille (DMB), la société qui exploite la source, le lieu où se trouve la source, l'origine (source ou forage), la région, la température de l'eau à la sortie et le débit.

Tableau 2. Marques d'eaux embouteillées et commercialisées en Tunisie.

Marque	Code	DMB	Société	Lieu	Origine	Région	T°	Débit l/s
'Safial'	Sf1	01/09/2016	SOSTEM	Ain Mizeb	Source	Ksour	17	1
'Safia2'	Sf2	28/08/2016	SOSTEM	Ain Ksiba	Source	Ksour	21	5
'Sabrine'	Sab	07/09/2016	SEEM	Chbika	Forage	Chbika	23	10
'Marwa'	Mrw	16/08/2016	SOSTEM	AinEl Hammam	Source	Joumine	23	2,5
'Hayet'	Hyt	*	S. Libre	Baten El-Ghazel	Forage	Jelma	21	10
'Jannet'	Jan	27/08/2016	SEEM	Haffouz	Forage	Haffouz	-	6
'Fourat'	Frt	03/09/2016	SONEM	Ksar Lamsa	Forage	El Oueslatia	-	10
'Cristaline'	Crs	09/09/2016	SOSTEM	Oued El Gueleb	Forage	Zagouan	-	10
'Jektiss'	Jkt	*	SBT	Koutine	Forage	Koutine	-	-
'Main'	Man	04/09/2016	SICEM	Tataouine	Forage	Tataouine	-	7
'Aqualine'	Aqa	21/09/2016	SMZ	Ouled Néji	Forage	Zagouan	-	5
'Melina'	Mln	**	SIEM	Jbel Guitoune	Forage	Bargou	23	5
'Primaqua'	Prm	*	SBT	Koutine	Forage	Koutine	21	5
'Dima'	Dma	19/09/2016	SOURCE	Ain M'rada	Forage	Tajrouine	21	5
'Palma'	Plm	16/09/2016	SOCEM	Sidi lich	Forage	Sidi lich	-	10
'Melliti'	Mlt	19/09/2016	SOSTEM	Téboursouk	Forage	Téboursouk	18	5
'Ovia'	Ova	*	SOZEC	El Hmira	-	Saouef	-	-
'Rayan'	Ray	*	RAYAN	Sid Ismail	-	Béja	-	-
'Royale'	Ryl	07/10/2016	ROYAL	Ain Soukra	Forage	Siliana	-	-
'Bargou'	Bar	25/08/2016	SEB.BA	Dahman El Kharroub	Source	Bargou	-	-

* Source : <http://www.huffpost.com/gen/3437346/original.jpg>

** Sources : <http://www.thermalisme.nat.tn/site/publish/content/article.asp?ID=138&>

Le tableau 3 présente les statistiques descriptives simples calculées sur les différentes variables (éléments chimiques) de 20 eaux conditionnées en Tunisie et considérées dans cette étude.

Tableau 3. Statistiques descriptives des caractéristiques chimiques des principales marques d'eau conditionnées et commercialisées en Tunisie.

Eléments chimiques	Symb.	Moy.	Min.	Max.	CV%	Limites de confiance ($\alpha = 5\%$)	
						Linf	Lsup
Sels totaux	ST	396,04	237,3	654	28,79	342,68	449,4
Calcium	Ca ⁺⁺	79,67	29,89	144,38	39,74	64,85	94,49
Magnésium	Mg ⁺⁺	17,41	7	37,45	45,78	13,68	21,14
Sodium	Na ⁺	31,78	12	51,73	40,2	25,81	37,76
Potassium	K ⁺	1,98	0,62	5,15	60,1	1,43	2,54
Bicarbonates	HCO ₃ ⁻	248,24	70,45	345,28	28,97	214,58	281,89
Sulfates	SO ₄ ⁻	48,21	7,8	167,88	99,92	25,67	70,76
Chlorures	Cl ⁻	49,45	14	110	55,47	36,61	62,28
Nitrates	NO ₃ ⁻	10,88	0,4	34,3	84,39	6,58	15,18
Fluorures	F ⁻	0,64	0,19	1,77	59,56	0,46	0,82
pH	pH	7,39	7	7,8	3,24	7,28	7,5

Linf : limite inférieure, Lsup : limite supérieure.

On remarque d'après ce tableau qu'il existe une grande variabilité entre les eaux de point de vue richesse en éléments chimiques (CV% entre 29 et 100%) à l'exception du pH qui présente un coefficient de variation faible (3,24%). En plus du pouvoir non discriminatif du pH, toutes les eaux possèdent un pH qui se trouve dans l'intervalle 6,8-8,2 considéré selon les données du tableau 1 comme celui d'une eau idéale. De ce fait, le pH (7 à 7,8) n'a pas été considéré dans l'analyse statistique des données.

Afin d'apprécier graphiquement les écarts enregistrés entre les différentes eaux étudiées de point de vue richesse en élément chimiques et localiser les valeurs observées par rapport aux limites de confiance déterminées pour chaque élément, la figure 3 présente les valeurs des cations et la figure 4 celles des sels totaux et des anions. Les deux lignes horizontales correspondent aux deux limites calculées au niveau de probabilité de 5% (LI : limite inférieure, LS : limite supérieure).

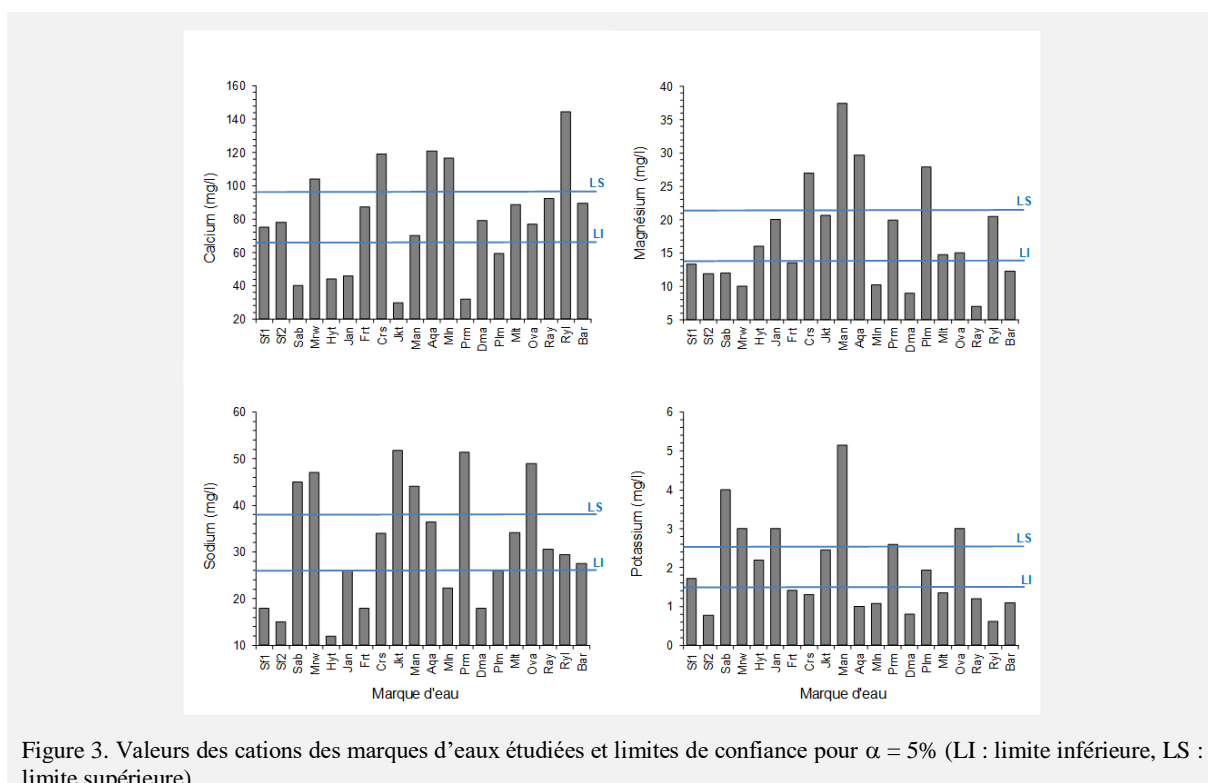


Figure 3. Valeurs des cations des marques d'eaux étudiées et limites de confiance pour $\alpha = 5\%$ (LI : limite inférieure, LS : limite supérieure).

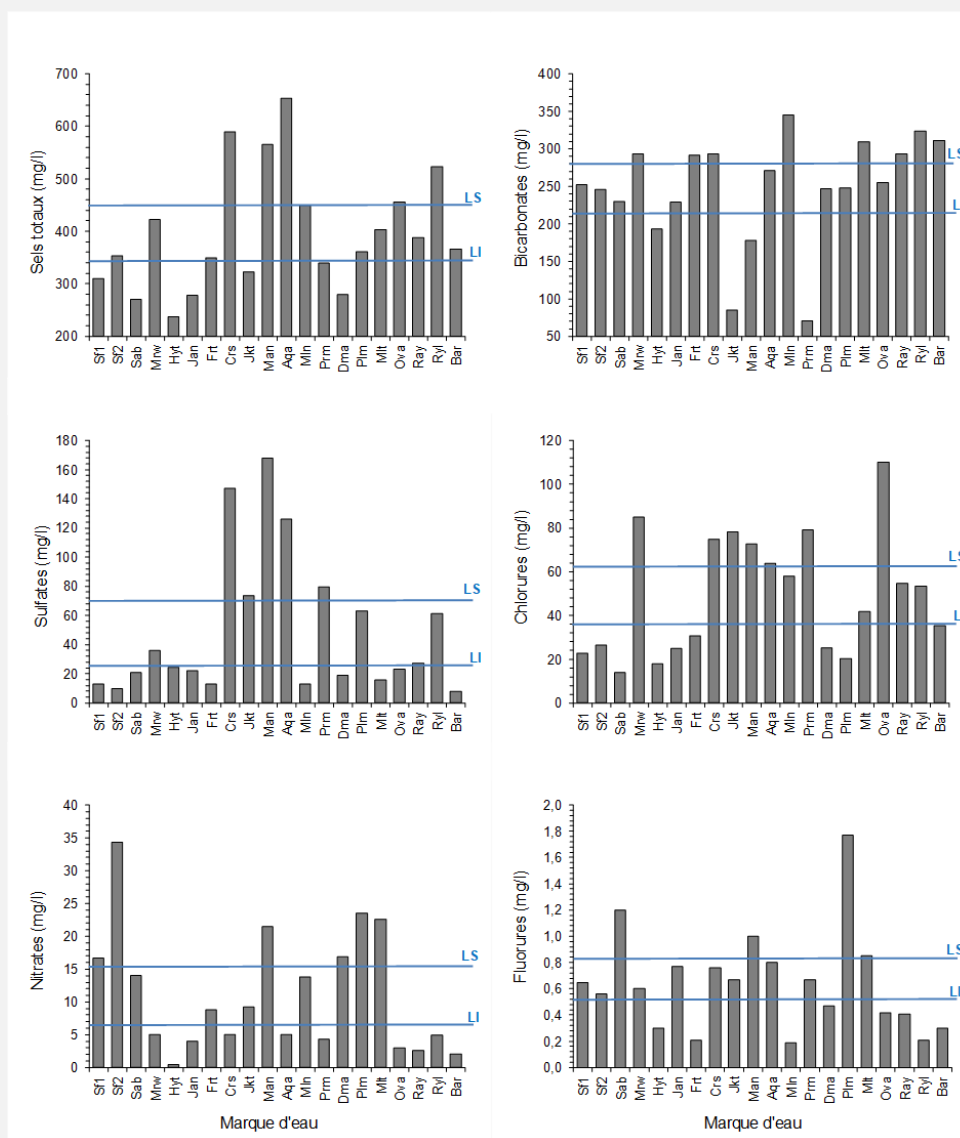


Figure 4. Valeurs des sels totaux et des anions des marques d’eaux étudiées et limites de confiance pour $\alpha = 5\%$ (LI : limite inférieure, LS : limite supérieure)

2.6. Analyses statistiques des données

Pour répartir les 20 marques d’eaux étudiées en classes ou groupes plus ou moins homogènes de point de vue richesse en éléments chimiques, nous avons eu recours à la classification numérique. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) utilisant l’algorithme de WARD comme méthode de partition (Palm 1996) a été appliquée sur la matrice des données relative aux caractéristiques chimiques des différentes marques d’eaux étudiées. Afin de caractériser les groupes d’eaux ainsi identifiées, une Analyse en Composantes Principales (ACP) suivie d’une représentation graphique des individus dans les premiers plans factoriels a été également effectuée sur les mêmes données. Cette technique est particulièrement avantageuse lorsque les axes principaux sont facilement interprétables et lorsqu’un nombre réduit d’axes prend en considération une part importante de la variabilité des données (Palm 2000 ; Sghaier 2009). Les analyses statistiques ont été réalisées à l’aide du logiciel SAS/STAT® en utilisant les procédures CLUSTER et PRINCOMP (SAS Institute Inc. 2004).

3. Résultats et Discussion

La figure 5 présente le dendrogramme issu de la classification numérique. Les résultats obtenus (niveau de coupe correspondant à la première réduction importante de R^2 d'une hiérarchie à une autre) ont montré que les 20 marques d'eaux étudiées peuvent être réparties en 10 classes ou catégories d'eaux plus ou moins homogènes de point de vue teneur en éléments chimiques. Ce dendrogramme montre également que 4 marques d'eaux se séparent des autres et chacune forme un groupe à part ayant des caractéristiques chimiques spécifiques. Il s'agit des marques 'Main' (G1), 'Palma' (G6), 'Sabrine' (G7) et 'Royale' (G8).

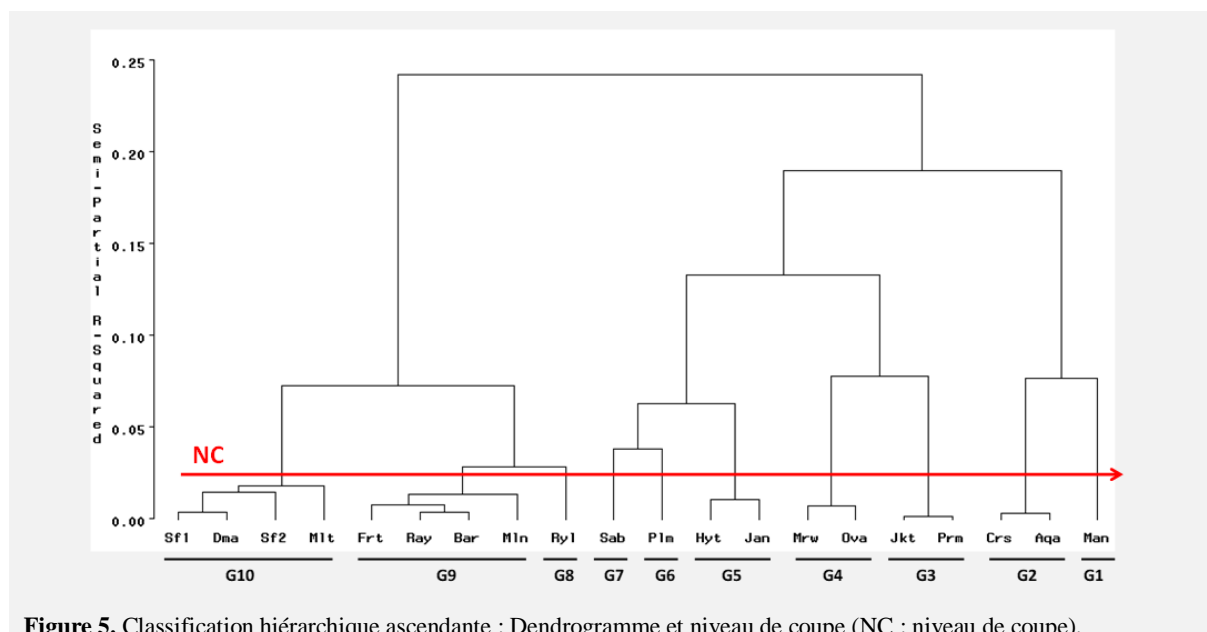


Figure 5. Classification hiérarchique ascendante : Dendrogramme et niveau de coupe (NC : niveau de coupe).

Aussi, ce dendrogramme montre la présence de quatre groupes de deux marques (G2 : 'Aqualine' et 'Cristaline' ; G3 : 'Primaqua' et 'Jektis' ; G4 : 'Marwa et Ovia' ; G5 : 'Hayet' et 'Jannet') et deux groupes de quatre marques (G9 : 'Fourat', 'Mélina', 'Bargou' et 'Rayan' ; G10 : 'Safia1', 'Safia2', 'Dima' et 'Melliti').

Pour caractériser les 10 groupes d'eaux ainsi identifiés, une analyse en composantes principales a été effectuée sur les mêmes données. Le tableau 4 qui présente les valeurs propres issues de l'ACP montre que les trois premiers axes principaux dont les valeurs sont toutes supérieures à l'unité expliquent ensemble 81% de la variabilité totale et que les deux premiers axes en expliquent 64%. Les 3 premiers axes principaux ont donc été retenus pour caractériser les 10 groupes d'eaux identifiés de point de vue teneur en éléments chimiques.

Tableau 4. Valeurs propres

Axe	Valeur propre	Différence	Proportion	Cumulée
1	3,6105	0,8145	0,3611	0,3611
2	2,7960	1,0693	0,2796	0,6407
3	1,7267	0,9744	0,1727	0,8133
4	0,7523	0,2113	0,0752	0,8886
5	0,5410	0,1811	0,0541	0,9427
6	0,3599	0,2568	0,0360	0,9786
7	0,1031	0,0353	0,0103	0,9890
8	0,0678	0,0415	0,0068	0,9957
9	0,0263	0,0099	0,0026	0,9984
10	0,0164		0,0016	1,0000

Le tableau 5 présente les corrélations des variables initiales avec les trois premiers axes principaux.

Tableau 5. Corrélation des variables initiales avec les trois premiers axes principaux.

Variable	Axe1	Axe2	Axe3
ST	0,5032	0,8283	0,1992
Ca ⁺⁺	-0,2021	0,9474	0,1617
Mg ⁺⁺	0,7994	0,1231	0,4339
Na ⁺	0,7783	-0,0179	-0,4216
K ⁺	0,6529	-0,4741	-0,1433
HCO ₃ ⁻	-0,5404	0,6563	0,2312
SO ₄ ⁻	0,8491	0,3084	0,2483
Cl ⁻	0,6132	0,4500	-0,5118
NO ₃ ⁻	-0,0819	-0,2722	0,7396
F ⁻	0,4998	-0,4118	0,5919

Pour donner un sens aux axes principaux retenus, chaque variable sera affectée à l'axe avec qui elle possède la corrélation la plus élevée en valeur absolue (Tableau 4). En procédant ainsi, les variables associées à chaque axe sont comme suit :

- Axe 1: Mg, Na, K, SO₄ et Cl.
- Axe 2: ST, Ca et HCO₃.
- Axe 3: NO₃ et F.

Le premier axe est un axe qui permet de classer les différentes marques d'eaux selon leur teneur en éléments Mg, Na, K, SO₄ et Cl. Cet axe présente également des corrélations positives non négligeables ($\geq 0,5$) avec ST (0,5032) et F (0,4998) et une corrélation négative avec HCO₃ (-0,5404). Ainsi, les marques d'eau qui se trouvent à l'extrême droite de cet axe (figures 6 et 7) sont riches en Mg, Na, K, SO₄ et d'un degré moindre en ST, Cl et F mais sont moins riches en HCO₃ et vis-versa.

Le deuxième axe permet de classer les marques d'eaux selon leur richesse en éléments ST, Ca et HCO₃ (eaux calciques bicarbonatées). Ce même axe présente également des corrélations négatives mais moins importantes avec K (-0,4741) et F (-0,4118). Comme pour le premier axe, ce deuxième axe permet de discriminer les marques d'eau selon leur richesse en ST, Ca et HCO₃ et leur faible teneur en éléments K et F et vis-versa (Figures 6 et 7).

Finalement le troisième axe qui est corrélé positivement avec les éléments NO₃ et F (eaux nitratées) et négativement avec l'élément Cl (-0,5118). Cet axe discrimine donc les marques d'eaux en fonction de leur richesse en NO₃ et F et leur pauvreté en élément Cl et vis-versa (Figures 7 et 8).

Les figures 6, 7 et 8 donnent la projection des variables (cercles des corrélations) et des marques d'eau (plans factoriels) formées par les différentes combinaisons des trois axes principaux retenus pour cette étude. Les 10 groupes d'eaux identifiés sont mentionnées sur chacun de ces trois graphiques.

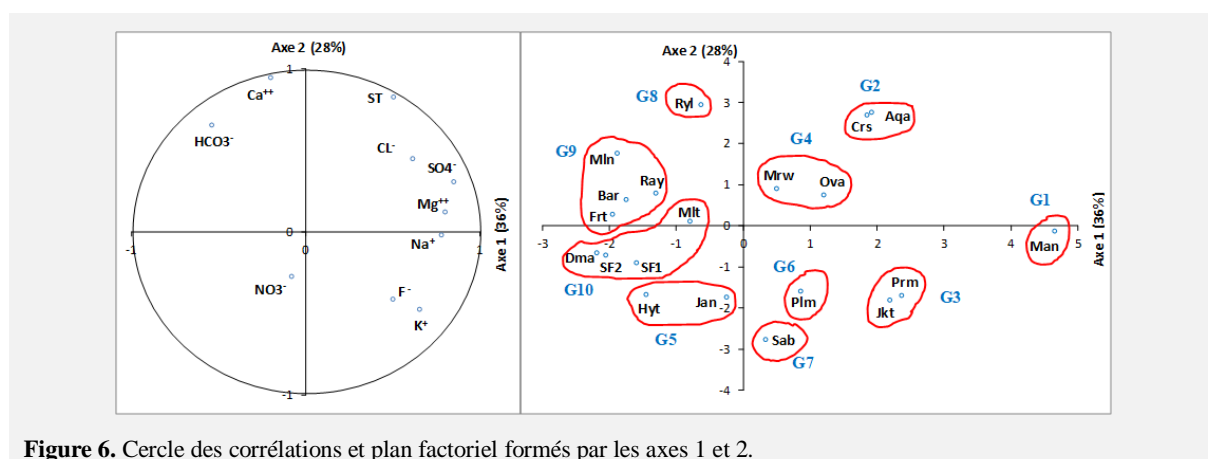


Figure 6. Cercle des corrélations et plan factoriel formés par les axes 1 et 2.

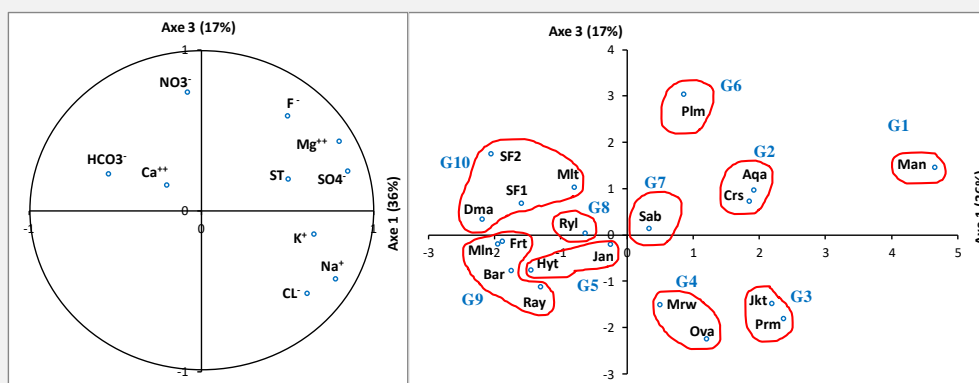


Figure 7. Cercle des corrélations et plan factoriel formés par les axes 1 et 3.

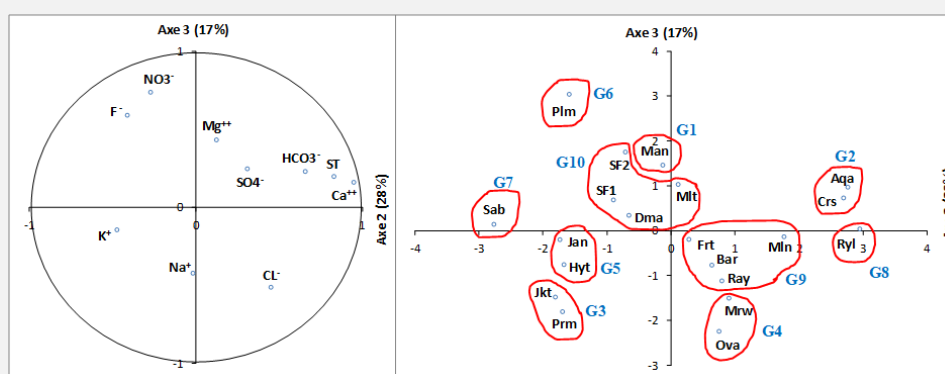


Figure 8. Cercle des corrélations et plan factoriel formés par les axes 2 et 3.

Pour apprécier la qualité de représentation (cosinus carrés) des variables (éléments chimiques) et des marques d'eaux sur les différents plans factoriels dressés, les tableaux 6 et 7 en présentent les principaux résultats. Ainsi, le tableau 6 montre que l'ensemble des variables étudiées sont très bien représentées sur l'un ou l'autre des trois plans factoriels élaborés (> 60%). Comme pour les variables, le tableau 7 donne les cosinus carrés de la projection des marques d'eaux sur les trois premiers axes principaux et leurs sommes sur les trois plans factoriels formés par ces axes. Ce dernier tableau qui présente les marques d'eaux par groupe indique également sur quel plan factoriel chaque groupe est mieux représenté (en gras).

Tableau 6. Qualité de représentation des variables sur les trois premiers axes principaux et sur les trois plans factoriels formés par les axes 1-2, 1-3 et 2-3 : Cosinus carrés des variables en %.

Variable	Axe1	Axe2	Axe3	Plan12	Plan13	Plan23
ST	25,32	68,61	3,97	93,93	29,29	72,58
Ca ⁺⁺	4,08	89,76	2,61	93,84	6,7	92,37
Mg ⁺⁺	63,91	1,52	18,83	65,42	82,73	20,34
Na ⁺	60,57	0,03	17,78	60,6	78,35	17,81
K ⁺	42,62	22,48	2,05	65,1	44,67	24,53
HCO ₃ ⁻	29,2	43,08	5,34	72,28	34,55	48,42
SO ₄ ⁻	72,09	9,51	6,17	81,6	78,26	15,68
Cl ⁻	37,6	20,25	26,2	57,86	63,8	46,45
NO ₃ ⁻	0,67	7,41	54,7	8,08	55,37	62,1
F ⁻	24,98	16,96	35,03	41,93	60,01	51,99

Pour la caractérisation des différents groupes d'eaux identifiés, nous nous sommes basés d'une part sur les graphiques des figures 6, 7 et 8 représentant la projection des variables (éléments chimiques) et des individus (marques d'eaux) sur les différents plans factoriels et, d'autre part sur les limites de confiance de chaque élément chimique calculés pour l'ensemble des eaux étudiées (Tableau 3 et Figures 3 et 4) ainsi que sur les statistiques descriptives des différents éléments chimiques de chaque groupe d'eaux (Tableau 8). L'appellation « valeurs faibles », « valeurs moyennes » ou « valeurs élevées » correspond à la position des valeurs de chaque élément chimique du groupe d'eaux par rapport aux limites de confiance de l'élément chimique en question (Tableau 3). Une valeur en dessous de la limite inférieure (Linf) est considérée comme « valeur faible », une valeur dépassant la limite supérieure (Lsup) est considérée comme « valeur élevée », tandis qu'une valeur qui se trouve entre les deux limites est considérée comme « valeur moyenne ». Le tableau 9 présente les eaux appartenant à chaque groupe et leur caractérisation du point de vue richesse en éléments chimiques.

Tableau 7. Qualité de représentation des marques d'eaux sur les trois premiers axes principaux et sur les trois plans factoriels formés par les axes 1-2, 1-3 et 2-3 : Cosinus carrés des individus en %.

Individus	Axe1	Axe2	Axe3	Plan12	Plan13	Plan23
Man	81,11	0,06	7,99	81,17	89,1	8,05
Crs	27,98	59,52	4,36	87,51	32,35	63,88
Aqa	27,08	56,22	6,93	83,29	34,01	63,15
Jkt	39,28	26,73	17,89	66,01	57,17	44,62
Prm	41,58	21,32	24,15	62,9	65,73	45,47
Mrw	3,99	13,23	36,4	17,22	40,4	49,63
Ova	15,82	6,17	54,94	21,99	70,76	61,11
Hyt	21,26	28,16	5,74	49,43	27,01	33,91
Jan	1,23	59,28	0,78	60,51	2,01	60,06
Plm	5,13	17,64	64,42	22,77	69,55	82,06
Sab	0,97	66,52	0,17	67,49	1,14	66,69
Ryl	4,08	88,71	0,02	92,79	4,09	88,72
Frt	83,66	1,72	0,82	85,38	84,48	2,54
Mln	47,43	41,68	0,24	89,11	47,68	41,92
Ray	41,52	15,39	30,35	56,91	71,86	45,74
Bar	65,26	8,7	12,52	73,95	77,78	21,22
Sf1	64,59	20,48	11,91	85,07	76,5	32,39
Sf2	37,5	4,5	27,27	42	64,77	31,77
Dma	78,86	7,09	1,93	85,96	80,79	9,02
Mlt	17,21	0,34	28,82	17,55	46,03	29,16

Tableau 8. Statistiques descriptives des éléments chimiques des différents groupes d'eaux embouteillées et commercialisées en Tunisie.

Groupe	Code	Valeur	Sels totaux	Eléments chimiques								
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻
1	Man	-	566	70,00	37,45	44,1	5,15	178,12	167,88	72,85	21,50	1,00
		Moy.	622,00	119,94	28,36	35,25	1,15	281,79	136,53	69,35	5,00	0,78
2	Aqa Crs	Min	590,00	119,00	27,00	34,0	1,00	270,57	126,07	63,70	5,00	0,76
		Max	654,00	120,88	29,72	36,5	1,30	293,0	147,00	75,00	5,00	0,80
		CV%	7,28	1,11	6,78	5,01	18,45	5,63	10,84	11,52	0	3,63
		Moy.	331,33	30,95	20,31	51,60	51,59	77,79	76,76	78,62	6,73	0,67
3	Prm Jkt	Min	322,66	29,89	19,99	51,46	2,45	70,45	73,77	78,22	4,27	0,67
		Max	340,00	32,00	20,63	51,73	2,59	85,12	79,75	79,01	9,18	0,67
		CV%	3,70	4,82	2,23	0,37	3,93	13,34	5,51	0,71	51,63	0
		Moy.	439,45	90,50	12,50	48,00	3,00	274,00	29,50	97,50	4,00	0,51
4	Mrw Ova	Min	422,90	77,00	10,00	47,0	3,00	255,00	23,00	85,00	3,00	0,42
		Max	456,00	104,00	15,00	49,0	3,00	293,00	36,00	110,00	5,00	0,60
		CV%	5,33	21,10	28,28	2,95	0	9,81	31,16	18,13	35,36	24,96
		Moy.	257,65	45,00	18,00	19,00	2,60	211,0	23,30	21,45	2,20	0,54
5	Hyt Jan	Min	237,00	44,00	16,00	12,00	2,20	193,00	22,00	17,90	0,40	0,30
		Max	278,00	46,00	20,00	26,00	3,00	229,00	24,60	25,00	4,00	0,77
		CV%	11,17	3,14	15,71	52,10	21,76	12,06	7,89	23,41	115,71	62,12
6	Plm	-	361,00	59,50	27,89	26,01	1,94	247,33	62,97	20,20	23,54	1,77
7	Sab	-	270,00	40,00	12,00	45,00	4,00	230,00	21,00	14,00	14,00	1,20
8	Ryl Frt Mln	-	523,21	144,38	20,45	29,4	0,62	323,9	61,3	53,29	4,92	0,21
		Moy.	388,19	96,45	10,75	24,57	1,20	310,55	15,29	44,62	6,84	0,28
		Min	350,00	87,30	7,00	17,90	1,07	292,00	7,80	30,64	2,10	0,19
		Max	448,75	116,59	13,50	30,65	1,42	345,28	27,20	58,04	13,84	0,41
9	Ray	CV%	11,15	14,08	26,50	22,96	13,23	7,97	54,45	30,73	81,58	36,20
		Moy.	336,75	80,25	12,25	21,30	1,16	263,53	14,45	29,08	22,63	0,63
10	Sf1 Sf2 Dma Mlt	Min	280,00	75,20	9,00	15,00	0,77	246,1	10,00	22,90	16,70	0,47
		Max	404,00	88,80	14,80	34,20	1,72	309,00	19,00	41,80	34,30	0,85
		CV%	16,01	7,38	20,16	40,92	39,55	11,56	26,63	29,60	36,46	25,70
		Moy.	336,75	80,25	12,25	21,30	1,16	263,53	14,45	29,08	22,63	0,63

Tableau 9. Caractéristiques chimiques des différents groupes d'eaux embouteillées et commercialisées en Tunisie

Gr.	Marque	Code	Caractéristiques
1	'Main'	Man	- Valeurs élevées en : ST, Mg, Na, K, SO ₄ , Cl, NO ₃ et F. - Valeur moyenne en : Ca. - Valeur faible en : HCO ₃ .
2	'Aqualine' 'Cristaline'	Aqa Crs	- Valeurs élevées en : ST, Ca, Mg, SO ₄ et Cl. - Valeurs moyennes à élevées : HCO ₃ . - Valeurs moyennes en : Na et F. - Valeurs faibles en : K et NO ₃ . - Valeurs élevées en : Na, SO ₄ et Cl.
3	'Primaqua' 'Jektiss'	Prm Jkt	- Valeurs moyennes à élevées : K - Valeurs moyennes en : Mg et F. - Valeurs faibles à moyennes : NO ₃ . - Valeurs faibles en : ST, Ca et HCO ₃ . - Valeurs élevées en : Na, K et Cl.
4	'Marwa' 'Ovia'	Mrw Ova	- Valeurs moyennes à élevées : ST, Ca, HCO ₃ - Valeurs faibles à moyennes : Mg, SO ₄ et F. - Valeurs faibles en : NO ₃ . - Valeurs moyennes à élevées : K.
5	'Hayet' 'Jannet'	Hyt Jan	- Valeurs moyennes en : Mg. - Valeurs faibles à moyennes : Na, HCO ₃ et F. - Valeurs faibles en : ST, Ca, SO ₄ , Cl et NO ₃ . - Valeurs élevées en : Mg, NO ₃ et F.
6	'Palma'	Plm	- Valeurs moyennes en : ST, Na, K, HCO ₃ et SO ₄ . - Valeurs faibles en : Ca et Cl. - Valeurs élevées en : Na, K et F.
7	'Sabrine'	Sab	- Valeurs moyennes en : HCO ₃ et NO ₃ . - Valeurs faibles en : ST, Ca, Mg, SO ₄ et Cl. - Valeurs élevées en : ST, Ca et HCO ₃ .
8	'Royale'	Ryl	- Valeurs moyennes en : Mg, Na, SO ₄ et Cl. - Valeurs faibles en : K, NO ₃ et F.
9	'Fourat' 'Melina' 'Bargou' 'Rayan'	Frt Mln Bar Ray	- Valeurs élevées en : HCO ₃ . - Valeurs moyennes à élevées : Ca et Na. - Valeurs moyennes en : ST. - Valeurs faibles à moyennes : SO ₄ , Cl et NO ₃ . - Valeurs faibles en : Mg, K et F.
10	'Safia1' 'Safia2' 'Dima' 'Melliti'	Sf1 Sf2 Dma Mlt	- Valeurs élevées en : NO ₃ . - Valeurs moyennes à élevées : HCO ₃ et F. - Valeurs moyennes en : Ca. - Valeurs faibles à moyennes : ST, Mg, Na, K et Cl. - Valeurs faibles en : SO ₄ .

En se basant sur les données du Tableau 1 qui indique les seuils de concentration d'une eau en certains éléments chimiques pour être considérée comme une eau chargée ou non en ces éléments, on peut constater que trois marques d'eau peuvent être considérées comme riches en Calcium dont la teneur en Ca⁺⁺ atteint ou dépasse le seuil limite de 120 mg/l, à savoir les deux marques 'Aqualine' (120,88 mg/l) et 'Cristaline' (119 mg/l) formant le groupe 2 ainsi que la marque 'Royale' (144,38 mg/l) qui se distingue des autres marques d'eaux et forme le groupe 8. La marque 'Palma' qui possède la teneur la plus élevée en fluorures (1,77 mg/l) peut être considérée comme la seule eau riche en cet élément dont la limite tolérée est fixée à 1,5 mg/l (Velghe 2016 ; Ineris 2014).

D'un autre côté, en se référant aux limites de concentration en certains éléments chimiques pour qu'une eau puisse être considérée comme une « eau idéale » (Tableau 1), seule la marque d'eau 'Hayet' peut avoir cette appellation.

Parmi les 10 groupes d'eaux formés, les groupes 5 ('Hayet' et 'Jannet') et 7 ('Sabrine') sont ceux qui contiennent le plus d'éléments chimiques à faibles teneurs, à savoir ST, Ca⁺⁺, SO₄⁻, Cl⁻ et NO₃⁻ pour le premier et ST, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁻ et Cl⁻ pour le deuxième. De même, les deux groupes 1 (Main) et 2 (Aqualine et Cristaline) sont ceux qui contiennent le plus d'éléments chimiques à fortes teneurs, à savoir ST, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, SO₄⁻, Cl⁻, NO₃⁻ et F⁻ pour le premier et ST, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁻, et Cl⁻ pour le deuxième. De point de vue richesse en nitrates, les groupes d'eaux les plus riches en NO₃⁻ sont 1 ('Main'), 6

(‘Palma’) et 10 (‘Safia1’ ‘Safia2’, ‘Dima’ et ‘Melliti’), tandis que les groupes les moins riches en cet élément chimique sont les groupes 2 (‘Aqualine’ et ‘Cristaline’), 4 (‘Marwa’ et ‘Ovia’), 5 (‘Hayet’ et ‘Jannet’) et 8 (‘Royale’). Les marques ‘Primaqua’, ‘Rayan’ et ‘Bargou’ qui appartiennent aux classes 3 pour la première et 9 pour les deux dernières présentent également des teneurs en nitrates qui ne dépassent pas la limite inférieure correspondant à 6,58 mg/l. Il est à signaler que la marque d’eau ‘Hayet’ est la seule eau dont la teneur en nitrates est inférieure à l’unité (0,4 mg/l).

De point de vue homogénéité des valeurs des différents éléments chimiques des eaux d’un même groupe, le tableau 8 montre que les eaux des groupes 3, 5 et 9 présentent des coefficients de variation un peu élevés (> 50%) pour un ou plusieurs éléments chimiques. En effet, le groupe 3 (‘Primaqua’ et ‘Jektiss’) présente un écart d’environ 5 mg/l de NO_3^- en faveur de la marque ‘Primaqua’ (teneur plus faible). Pour le groupe 5, la marque ‘Jannet’ enregistre les valeurs les plus élevées pour Na^+ , NO_3^- et F^- . Finalement, les marques d’eaux du groupe 9 présentent une hétérogénéité pour les éléments SO_4^{2-} (valeur max pour ‘Rayan’) et NO_3^- (valeur max pour ‘Melina’).

4. Conclusion

La demande croissante en eau embouteillée minérale et de source durant les deux dernières décennies s’est accompagnée par une entrée en production de plusieurs nouvelles marques d’eaux réparties sur tout le territoire de la Tunisie. Ainsi et devant la grande diversité des marques d’eaux commercialisées (origine, composition chimique, prix, etc.), le consommateur tunisien se trouve, parfois, désorienté quant au choix de celle qui lui convienne. Le présent travail s’est fixé comme objectif la répartition à l’aide d’un outil statistique des 20 eaux, les plus utilisées par les consommateurs tunisiens, en groupes ou catégories d’eaux plus ou moins homogènes de point de vue teneurs en éléments chimiques. Les résultats obtenus ont montré que les 20 eaux étudiées peuvent être groupées en 10 groupes ou classes distinctes d’eaux. Il s’agit de quatre groupes d’une seule marque chacun (‘Main’); (‘Palma’); (‘Royale’) et (‘Sabrine’), quatre groupes de deux marques chacun (‘Aqualine’ et ‘Cristaline’); (‘Primaqua’ et ‘Jektiss’); (Marwa’ et ‘Ovia’) et (Hayet’ et ‘Jannet’) et deux groupes de quatre marques chacun (‘Fourat’, ‘Mélina’, ‘Bargou’ et ‘Rayan’) et (‘Safia1’, ‘Safia2’, ‘Dima’ et ‘Melliti’).

La classification issue de cette étude qui est purement statistique, basée sur la composition quantitative et non qualitative des éléments chimiques des 20 eaux étudiées, ne donne le privilège à aucune marque d’eau. Le principal résultat exploitable à ce niveau c’est de permettre aux consommateurs avertis et aux spécialistes de la santé d’élargir la gamme de choix des marques d’eaux ayant des similitudes en termes de composition chimique. Les aspects sanitaires et nutritionnels des eaux minérales et de sources commercialisées en Tunisie restent l’affaire des spécialistes.

5. Références

- Anonyme 1 (2017).** Revue avant première N° 5 (2017 فبراير 03: إقتصادية, أخبار وطنية, أخبار إقتصادية) <http://www.avant-premiere.com.tn/%D9%85%D8%B9%D8%AF%D9%84-%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D9%87%D9%84%D8%A7%D9%83-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%88%D9%86%D8%B3%D9%8A-%D9%84%D9%84%D9%85%D9%8A%D8%A7%D9%87-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B9%D8%AF%D9%86%D9%8A%D8%A9/>
- Anonyme 2 (2015).** Consommation d’eau en bouteille dans le monde. Eds L’économiste. <http://www.leconomiste.eu/images/PicsHOMEMADE/EAU%20-%20Consommation%20bouteille.png>
- Anonyme 3 (2016).** Les types d’eaux: Les eaux minérales. Eds EauNaturelle.ch. http://www.lemieuxetre.ch/eau/frame_eau_types_minerale.htm
- Barataud B. et Velghe C. (2017). Mieux choisir ses eaux minérales. Eds MGC Prevention. <http://www.mgc-prevention.fr/mieux-choisir-ses-eaux-minerales/>
- CSEM (2015).** L’eau en bouteille : un héritage culturel et économique en Europe. Chambre Syndicale des Eaux Minérales 2015. <http://eaumineralnaturelle.fr/consommation/09/17/leau-en-bouteille-un-heritage-culturel-et-economique-en-europe.htm>
- Dromabuzz (2015).** Quelle eau minérale choisir? Un internaute Tunisien a comparé pour nous. Publication internet : <http://dromabuzz.com/2015/06/quelle-eau-minerale-choisir-un-internaute-tunisien-a-compare-pour-nous>

- Dumoulin L. et Mantha M.M. (2009).** Boire de l'eau : pourquoi et combien ? Dossier Nutrition. Eds Santé.net. https://www.passeportsante.net/fr/Actualites/Dossiers/ArticleComplementaire.aspx?doc=eau_questions_sante_do
- Ineris (2014).** Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 1^{er} décembre 2013. Rapport d'étude n° INERIS-DRC-14-142522-01489A. 129 p.
- Kapitalis (X).** Tunisie : La consommation d'eau minérale augmente de 7% par an. <http://www.kapitalis.com/conso/21965-tunisie-la-consommation-d-eau-minerale-augmente-de-7-par-an.html>
- Maton M. (2016).** Les Eaux et leurs Teneurs., Eds Institut de Recherche du Bien-être, de la Médecine et du Sport Santé. <https://www.irbms.com/eaux-teneurs/>
- Membratec (2008).** L'eau potable idéale. Publication internet: <http://www.membratec.ch/template/fs/documents/EauPotable/QualiteEau.pdf>
- Mice S. (2008).** L'eau potable, Ed Médecine et santé. <http://www.medecine-et-sante.com/nutrition/eaupotable.html>
- ONTH (X).** Office National du Thermalisme et de l'Hydrothérapie : www.thermalisme.nat.tn
- ONTH (2016).** Différentes unités de mise en bouteille. Office National du Thermalisme et de l'Hydrothérapie, Tunisie. <http://www.thermalisme.nat.tn/site/publish/content/article.asp?ID=138&>
- Palm R. (1998).** L'analyse en composantes principales : *principes et applications*. Gembloux (Belgique), Faculté des Sciences agronomiques, 31 p.
- SAS Institute Inc (2004).** SAS/STAT 9.1 Users's Guide. SAS Institute Inc, Cary, NC.
- Sghaier T. et Khouja M.L. (2009).** Comportement des provenances de pin d'Alep (*Pinushalepensis* Mill.) dans le semi aride tunisien. Annales de l'INRGREF, 13, 89-106.
- Thebti W. (2016).** Eaux minérales : Une réelle industrie pour l'investissement. Eds African Manager. http://africanmanager.com/11_eaux-minerales-une-reelle-industrie-pour-linvestissement-mais-a-condition/
- Tordjman D. (2010).** Les besoins du corps en eau. Eds Doctissimo nutrition, dossier eau. <http://www.doctissimo.fr/html/nutrition/dossiers/eau/articles/13184-besoins-corps-eau.htm>
- Velghe C. (2016).** Mieux choisir ses eaux minérales. Publication internet : <http://www.mgc-prevention.fr/mieux-choisir-ses-eaux-minerales/>.
- Velleminfroy (2014).** Eau minérale, eau de source, eau du robinet : quelle différence ?. <http://blog.eaumineralevelleminfroy.fr/eau-minerale-eau-de-source-eau-du-robinet-quelle-difference/>