

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques
Eau & Environnement

Mémoire de projet fin d'études

**EAUX EMBOUTEILLÉES,
CHIMIE, QUALITÉ DES
ANALYSES ET QUALITÉ
CHIMIQUE**

Réalisé par :

**EL HARRAM Amina
ELAAMMARI Oumaima
LAGAAIRI Rida**

Soutenu le 20 juin 2023 devant :

**EL AMARI Khalid
BENKADDOUR Abdelfattah**

**Examineur
Encadrant**

Remerciement :

Par le biais de ce rapport, nous exprimons notre sincère gratitude envers notre estimé professeure et encadrant, Pr. Abdelfattah Benkaddour. Nous lui sommes reconnaissants pour son engagement indéfectible et ses compétences pédagogiques exceptionnelles qui ont grandement enrichi notre expérience académique et contribué à notre développement personnel.

Nous lui exprimons aussi notre gratitude pour le temps précieux qu'il a consacré à évaluer attentivement nos travaux et à nous fournir des commentaires constructifs d'une grande patience.

Nous tenons à présenter notre profonde gratitude envers tous nos professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont prodigués, qui a joué un rôle inestimable dans notre processus d'apprentissages et dans notre quête constante d'amélioration pendant toute ces années passées à la faculté des science et technique, cette dernière que nous souhaitons aussi exprimer notre gratitude pour avoir dispensé une éducation de qualité.

Tout notre respect envers l'examineur, monsieur EL AMARI Khalid, qui va consacrer le temps et l'attention pour évaluer notre travail.

Nous tenons à présenter nos remerciements envers monsieur EL ALAOUI Abdelhafid pour l'aide précieuse, lors du déroulement de ce mémoire.

Nous adressons nos gratitudes également à nos parents pour leurs soutiens, leurs incommensurables sacrifices et leurs assistances qui sans laquelle nous ne pourrions pas arriver au bout de ce travail scientifique.

Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui ont soutenu notre projet d'impact social par leurs encouragements et leurs croyances en notre vision qu'ils ont été des moteurs essentiels de notre détermination et notre persévérance.

LISTES DES FIGURES :

Figure 1: Exemple d'emballage de deux marques d'eau embouteillée.....	6
Figure 2 : Structure du marché mondial de l'eau en bouteille par grande région géographique en 2021	7
Figure 3 : Pourcentage des revenus mondiaux en dollars américains et volume de consommation en litres durant l'année 2021.....	9
Figure 4 : Cycle de l'eau	10
Figure 5 : Schéma montrant les différentes composantes d'une nappe libre	10
Figure 6 : Situations géographiques des sources des eaux étudiées.....	14
Figure 7 : Géomorphologie montrant les deux unités caractérisant la nature de la zone cartographiée	15
Figure 8 : Coupe géologique interprétative au niveau des sources de Sidi Harazem	16
Figure 9 : Formations quaternaire de la région d'Evian.....	17
Figure 10 : Stratigraphie des terrains de Contrex et Vittel	18
Figure 11 : Coupe schématique et série stratigraphique descriptive de la source Perrier.....	19
Figure 12 : Variation de la conductivité en fonction de TDI des différentes eaux étudiées. ...	22
Figure 13 : Projection des analyses chimiques des dix échantillons d'eau embouteillée sur le diagramme de Schoeler.	23
Figure 14 : Projection des analyses chimiques des eaux embouteillées d'origine marocaine sur le diagramme de Schoeller.	24
Figure 15 : Projection des analyses chimiques des échantillons d'eaux embouteillées d'origine étrangères.....	25
Figure 16 : Projection des analyses chimique des échantillons d'eau embouteillée d'origine marocaine.	26
Figure 17 : Projection des analyses chimiques des échantillons d'eau embouteillée étrangères.	27
Figure 18 : Saturation des eaux étudiées <i>vis à vis</i> du gypse.....	30
Figure 19 : Saturation des eaux étudiées <i>vis à vis</i> du calcite.....	30
Figure 20 : Saturation des eaux étudiées <i>vis à vis</i> de la dolomite.....	31
Figure 21 : Saturation des eaux étudiées <i>vis à vis</i> de l'aragonite.....	31
Figure 22 : Analyse en composantes principales de composition chimique sous R.....	34
Figure 23 : Analyse factorielles des dix marques (individus) d'eau avec R.....	35
Figure 24 : Normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine.	36
Figure 25 : Série chronologique mondiale des déchets d'eau embouteillée en PET de l'année 2000 à 2021	38

LISTES DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Compositions chimiques des eaux embouteillées d'origine marocaine.....	13
Tableau 2 : Compositions chimiques des eaux embouteillées étrangères commercialisées au Maroc.	14
Tableau 3 : Caractéristiques géologiques des dix échantillons d'eau embouteillées étudiées.	19
Tableau 4 : Balances ioniques des différents eaux embouteillées d'origine marocaine et étrangères.	20
Tableau 5 : Mesures du conductivités des échantillons d'eau étudiées.	22
Tableau 6 : Matrices de corrélation des paramètres chimiques analysés des eaux embouteillées.	33

SOMMAIRE :

I-Introduction générale :	5
II- Généralités sur les eaux embouteillées :	6
II-1 : Informations consignées sur les étiquettes des eaux embouteillées :	6
II-2 : Consommation des eaux embouteillées dans le monde :	7
II-3-Types d'eau embouteillée :	7
II-3-1 : Eaux minérales naturelles :	7
II-3-2 : Eau de source naturelle :.....	8
II-3-3 : Eau de table traité :	8
II-3-4 : Eaux souterraines :.....	9
III- Principales eaux embouteillées commercialisées au Maroc :	12
III-1- Principales eaux embouteillées d'origine marocaine et leurs compositions chimiques :	12
III-2 : Principales eaux embouteillées étrangères commercialisées au Maroc et leurs compositions chimiques :	13
III-3 : Contextes géologiques des origines des eaux embouteillées étudiées d'origine marocaine et Française :	14
III-3-1 : Eaux de Oulmès (Oulmès, Sidi Ali, Ain Atlas et Bahia) :	15
III-3-2 : Source Ain Soltane :	15
III-3-3 : Source de Sidi Harazem :	16
III-3-4 : Source d'Evian :	17
III-3-5 : Source des eaux Contrex et Vittel :	17
III-3-6 : Source de l'eau gazeuse Perrier :.....	18
IV- Chimie des eaux embouteillées :	20
IV-1 : Qualité des analyses chimique des eaux en bouteille :	20
IV-1-1 : Technique de l'électroneutralité :.....	20
IV-1-2 : Technique de corrélation entre le Total des Ions Dissous (TDI) et les mesures de conductivité :.....	21
IV-2 : Chimie des éléments majeurs et faciès des eaux étudiées :	23
IV-2-1 : Projection des données sur le diagramme de Schoeller :	23
IV-2-2 : Projection des données sur le diagramme de Piper :	26
IV-2-3 : État de saturation des eaux étudiées vis-à-vis de quelques minéraux :	29
Matrice de corrélation :	32
V- Qualité chimique des eaux embouteillées étudiées :	35
VI- Impact de la consommation des eaux embouteillées sur l'environnement :	38
Conclusion générale :	40
Références bibliographiques :	41
Webographie :	42

I-Introduction générale :

L'eau est une ressource essentielle à la vie sur terre et joue un rôle important dans notre santé et bien-être, elle est porteuse de multiples valeurs et avantages. Cette ressource répond aux besoins fondamentaux de l'homme et indispensable au bon fonctionnement de l'organisme. Un adulte en bonne santé devrait boire un litre à un litre et demi d'eau par jour selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Le corps humain est composé de 70% d'eau. Près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau essentiellement sous forme d'océans. C'est l'une des composantes de base de l'écosystème.

Le besoin en eau potable ne cesse d'augmenter à cause de l'évolution démographique et du changement du mode de vie de l'être humain qui est plus attentif à la qualité de l'eau potable et à son impact sur la santé.

Les eaux embouteillées sont devenues une alternative populaire à l'eau de robinet. Cette dernière qui peut contenir des contaminants, peut conduire l'homme à se tourner vers l'eau en bouteille. Cette eau offre aux consommateurs une commodité et une variété de choix malgré son prix très élevé quand on le compare à celui de l'eau de robinet.

L'objectif de ce rapport est d'explorer la chimie de l'eau embouteillée de quelques marques marocaine et étrangères et de mettre en évidence la qualité des analyses chimiques mentionnées sur l'emballage ainsi que la qualité chimique de l'eau, et comparer les échantillons d'étude aux normes relatives à la qualité des eaux. Ce travail, porte, également sur l'impact environnemental de la consommation de ces eaux. Cette analyse nous permettra de prendre des décisions éclairées concernant notre consommation d'eau embouteillée.

Ce rapport fournira également une analyse détaillée des principaux facteurs influençant la minéralisation de l'eau. On utilisera les différents outils hydrogéochimiques qui nous permettront de définir les faciès chimiques. Cette étape permet d'explorer les relations liant les compositions chimiques et leurs contextes géologiques correspondants.

II- Généralités sur les eaux embouteillées :

Les eaux embouteillées, également appelées eaux en bouteille ou eaux de source, sont des eaux minérales ou des eaux de source qui sont conditionnées dans des bouteilles en plastique ou en verre pour la consommation individuelle. Les eaux embouteillées peuvent avoir différentes sources et se présentent sous différentes nomenclatures.

II-1 : Informations consignées sur les étiquettes des eaux embouteillées :

Les emballages des bouteilles d'eau comportent plusieurs éléments, il s'agit le plus souvent du nom commercial affiché en plus gros caractères, du logo, d'un code barre, de références sur la détention d'agrément ou d'autorisation de production et/ou de commercialisation du produit, d'une ou deux phrases pour présenter les caractéristiques de l'eau. Sont, parfois, mentionnés le lieu où est exploité et le nom de la source de provenance de l'eau mise en bouteille, du laboratoire de contrôle de la qualité de l'eau en bouteille, la date de péremption (il est recommandé de conserver l'eau embouteillée à l'abri de la lumière dans un endroit propre, sec, tempéré et sans odeur), ainsi des indications sur la matière de l'emballage. Une indication sur l'emballage après usage en vue de protéger l'environnement, de la quantité du contenu dans les bouteilles, les paramètres physico-chimiques, et la composition analytique exprimée en mg/l avec le pH et les résidus sec de minéraux obtenus à 180°C. Ainsi que et des informations sur la minéralisation.

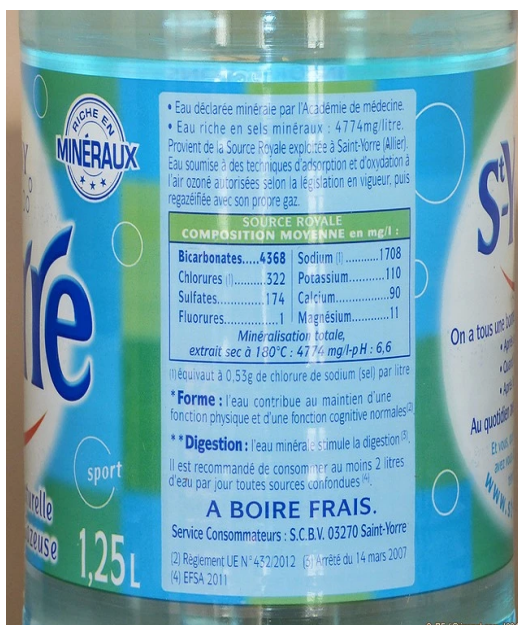


Figure 1: Exemple d'emballage de deux marques d'eau embouteillée (Site web 1 et 2).

II-2 : Consommation des eaux embouteillées dans le monde :

Le marché des eaux embouteillées est un marché en pleine expansion. Les eaux en bouteille sont largement consommées. Chaque année la population mondiale consomme plus de 300 milliards de litres d'eau minérale en bouteille.

Les ventes totales actuelle d'eau embouteillée varient considérablement entre les principales régions géographiques. La région Asie-Pacifique représente le plus grand marché régional tant en dollars qu'en litres (consommation), suivie par l'Amérique du Nord et l'Europe.

L'ensemble des pays du Sud (Asie, Amérique latine et Caraïbes) représente environ 60% des Ventes mondiales en dollars et en litres.

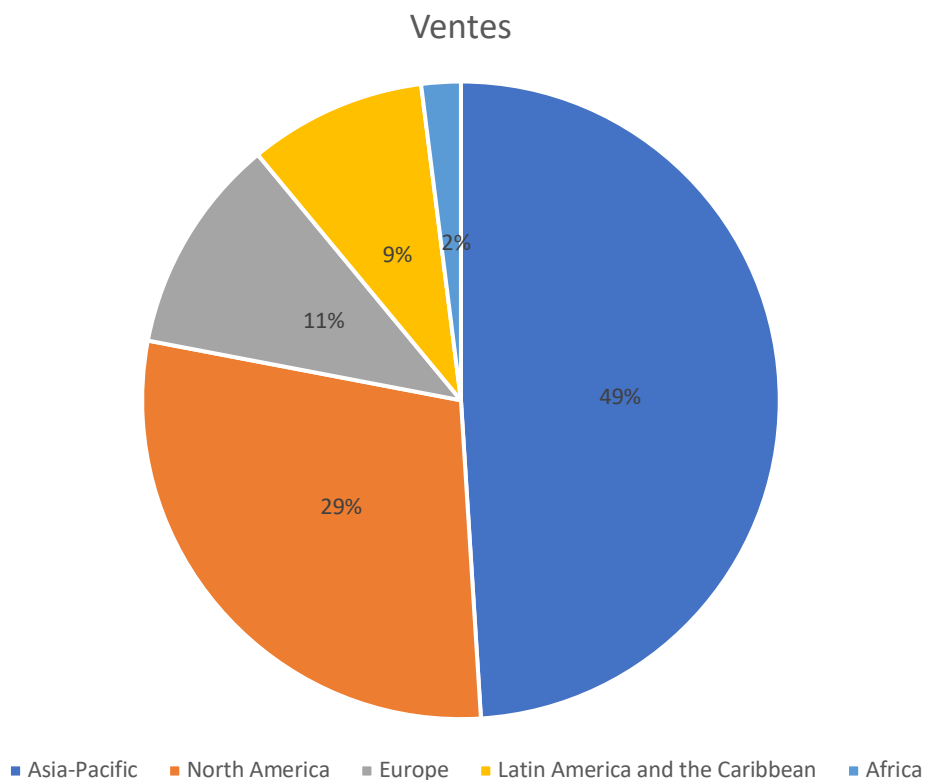


Figure 2 : Structure du marché mondial de l'eau en bouteille par grande région géographique en 2021(Bouhleb et al., 2023).

II-3-Types d'eau embouteillée :

Il existe trois types d'eau embouteillée les plus vendus dans le marché marocains, ces eaux sont classées selon leur source et les traitements subis.

II-3-1 : Eaux minérales naturelles :

Ce sont des eaux plates ou gazeuses qui ont des propriétés thérapeutiques reconnues par l'académie de médecine, elle provient de sources souterraines protégées de pollution. Leur appellation « eau minérale naturelle » est soigneusement encadrée par le code de la santé publique, une eau minérale naturelle ne peut qu'être d'origine naturelle et elle ne subit pas de traitement chimique depuis la phase de captage jusqu'à la phase de l'embouteillage, de plus ce type d'eau doit avoir une composition chimique stable dans le temps. Leur exploitation doit être autorisée par le ministère de la santé.

II-3-2 : Eau de source naturelle :

C'est une eau qui ne possède pas de vertus médicinales particulières. Elle est définie par une émergence naturelle ou forée, sa composition physico-chimique constante n'est pas nécessairement et elle ne subit pas de traitement chimique sauf ce qui est autorisé par la législation en vigueur. Contrairement à l'eau minérale, tenue à une stabilité en sels minéraux et oligo-éléments.

II-3-3 : Eau de table traité :

C'est une eau qui doit être microbiologiquement traitée (à l'aide de technique de microfiltration de pointe, sans germes et sans résidus et ne doit pas contenir des substances organiques et des impuretés. Elle a une minéralisation constante, conservant les nutriments naturellement présents dans l'eau. Elle peut provenir d'une source d'eau de surface ou d'un aquifère libre.

Toutes ces catégories d'eaux peuvent être vendues éventuellement sous la forme « gazeuse » naturelle ou pas. Quand elle est naturellement gazeuse, l'eau a la même teneur en gaz en bouteille qu'à la source. Elle peut bénéficier d'un rajout de gaz provenant de la source et être toujours naturellement gazeuse. Enfin, l'eau peut être renforcée avec du gaz autre que celui de la source, c'est-à-dire par adjonction de gaz carbonique.

La figure 3 montre les revenus mondiaux des trois types d'eau les plus commercialisées ainsi que les volumes en litres.

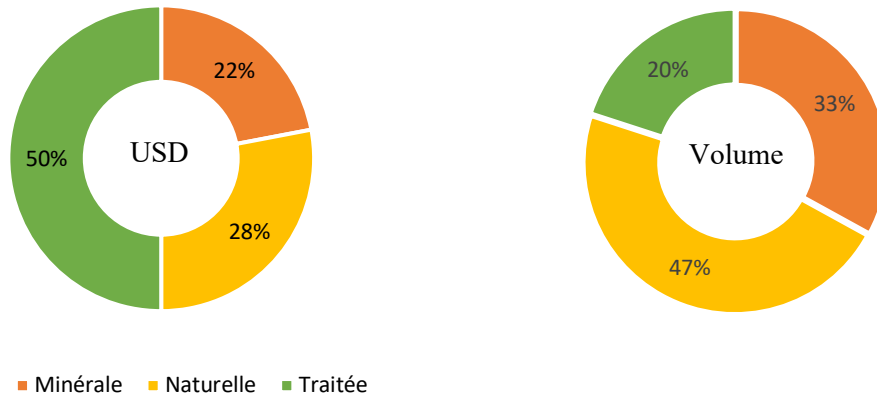


Figure 3 : Pourcentage des revenus mondiaux en dollars américains et volume de consommation en litres durant l'année 2021 (Bouhleb et *al.*, 2023).

II-3-4 : Eaux souterraines :

Le cycle de l'eau est l'échange permanent de l'eau entre les mers et les océans, les eaux continentales (superficielles et souterraines), l'atmosphère et la biosphère.

Cet échange se réalise :

- Dans l'atmosphère où l'eau circule sous forme de vapeur d'eau.
- Sur terre où l'eau s'écoule en surface ou sous terre.

Ce sont les précipitations qui alimentent les eaux souterraines.

En moyenne, 65 % des précipitations

qui arrivent à la Terre s'évaporent, 24 % ruissellent et 11 % s'infiltrent.

Mais une partie seulement d'entre elles est disponible pour la recharge des nappes, car une partie est utilisée par le sol et les plantes et une autre partie alimente par ruissellement les eaux de surface (lacs et rivières) ; seul le solde s'infiltré lentement dans le sol et le sous-sol.

L'eau de pluie circule dans les pores et les fissures des roches ; on parle alors de roches réservoirs ou d'aquifères.

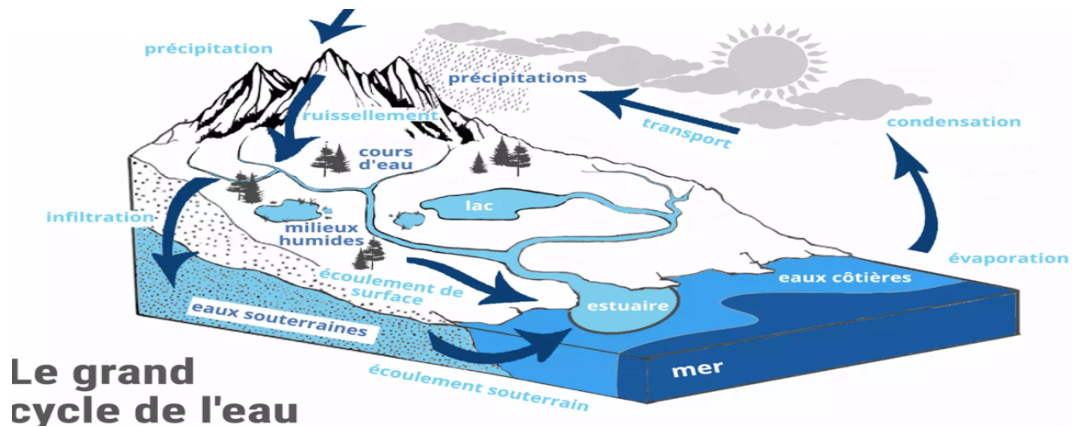


Figure 4 : Cycle de l'eau (Site web 3).

Les aquifères sont composés de deux parties (Fig. 5) :

- Une zone non saturée : l'eau ne remplit pas la totalité des pores et se trouve en mouvement permanent, vers la surface (la capillarité fait remonter l'eau vers la terre végétale comme un buvard), et vers les profondeurs par l'effet de pesanteur.
- Une zone saturée qui renferme la nappe. L'eau remplit tous les pores et s'écoule dans le sous-sol sur la couche imperméable, en suivant la topographie sur plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres. L'eau souterraine peut réapparaître à la surface du sol en formant une source à l'origine d'un cours d'eau.

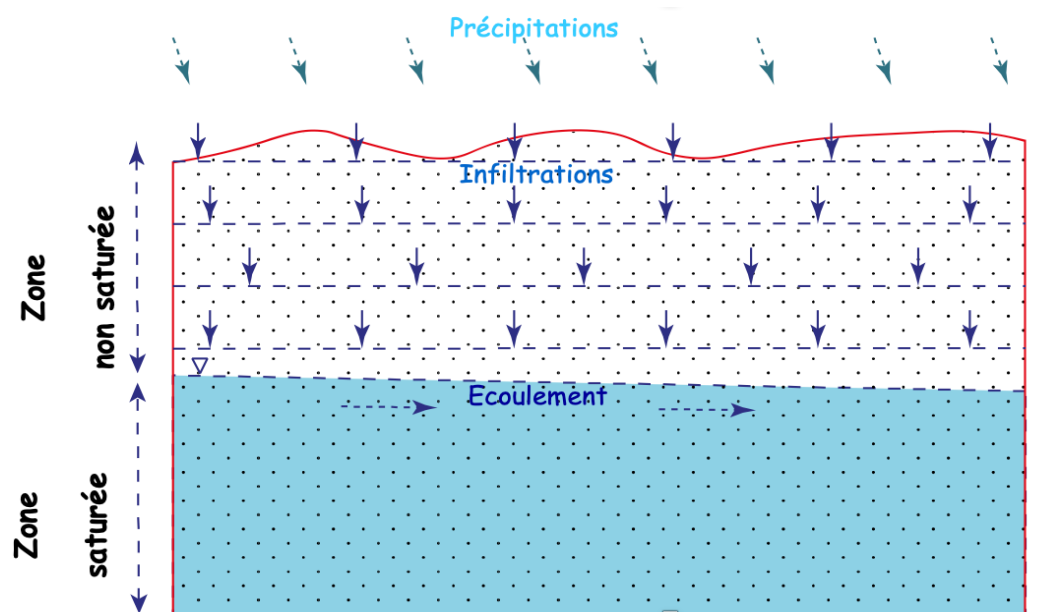


Figure 5 : Schéma montrant les différentes composantes d'une nappe libre (Cours LST EE, 2023).

- **L'eau souterraine** : La diversité des roches réservoirs, ou aquifères, combinée à celle des climats et des paysages, entraîne une grande variété de nappes d'eau souterraine, à la fois en taille, en profondeur et en comportement.

Les nappes d'eau souterraine ne sont ni des lacs ni des cours d'eau souterrains : c'est de l'eau contenue dans les roches poreuses saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées (BRGM, 2012).

- Nappes libres : une nappe libre est une nappe contenue dans une couche perméable partiellement saturée reposant sur une couche imperméable ou semi perméable. La surface libre est toujours à la pression atmosphérique (communication directe avec l'air libre à travers les interstices).
- Nappe captive : on appelle nappe captive ou en charge ou sous pression, une nappe comprise entre deux formations géologiques imperméables. Le toit de la nappe est ainsi maintenu au-dessous de la surface piézométrique. Si on perce le toit de la nappe, l'eau monte et s'établit à un niveau en fonction de la charge à laquelle il est soumis. À la limite on a des forages artésiens cette artésianisme peut cependant disparaître avec le temps si on exploite la nappe, par réduction de la charge dans l'aquifère.

III- Principales eaux embouteillées commercialisées au Maroc :

Le présent travail traite à la fois des eaux provenant du Maroc et de la France.

Au Maroc le marché est dominé par les eaux minérales dont le pourcentage est de 70% de consommation. Par contre les eaux gazeuses sont faiblement consommées car elles ne présentent que 9% (Site web 4).

En France la consommation moyenne est de 135 litres/habitant soit une consommation de 9 milliards de litres pour l'ensemble de la population. Environ, 4,6 milliards de litres d'eau l'minérale naturelle, et 4,4 milliards d'eau de source (Site web 5).

III-1- Principales eaux embouteillées d'origine marocaine et leurs compositions chimiques :

Le présent travail concerne les six (6) différentes marques d'eau embouteillée suivantes : Sidi Harazem, Ain Atlas, Ain Soltane, Sidi Ali, Bahia et Oulmès.

- **Ain Atlas** : Prélevé de Hammou Aguemguem dans la région Moyen Atlas non loin de Oulmès, c'est le dernier née dans le paysage des eaux Oulmès.
- **Ain Soltane** : C'est une source qui a une altitude de 1000m à environ 30km de Fès. Cette eau est produite par la société des eaux AL Karama.
- **Bahia** : C'est une eau de table traitée produite par les eaux minérales de Oulmès, Bahia occupe le premier rang sur le segment des eaux de table, elle est purifiée par un système d'ultrafiltration d'osmose inverse, qui permet d'éliminer tous les résidus indésirables pour ne garder que l'essentiel de l'eau.
- **Oulmès** : Eau issue de la seule source des eaux minérales gazeuse au Maroc qui se trouve au pied des montagnes du Moyen Atlas.
- **Sidi Ali** : Provenant de la source Sidi Ali Cherif qui est née dans les profondeurs des montagnes du Moyen Atlas.
- **Sidi Harazem** : C'est une eau minérale de la source « Sidi Harazem » située dans la région de Fès, au cœur du Moyen Atlas.

Les compositions chimiques des différentes eaux embouteillées étudiées sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Compositions chimiques des eaux embouteillées d'origine marocaine.

Eau Embouteillée	Composition chimique en mg/l										TDI	Nature
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	F ⁻	SiO ₂		
1- Oulmès	108	57	22	11	5	284	314	854	-	-	1655	Eau minérale gazeuse
2- Sidi Harazam	70	40	8	20	4	220	120	335	-	-	817	Eau minérale naturelle
3- Ain Soltane	70	44	1	3,7	16	7,1	4	402	-	-	547	Eau minérale naturelle
4- Ain Atlas	18	13	8	8	4	12	48	217	-	-	328	Eau minérale naturelle
5- Sidi Ali	12	9	3	42	-	14	26	104	-	-	210	Eau de source
6-Bahia	16	6	1	15	1	64	25	49	-	-	177	Eau de table traitée

III-2 : Principales eaux embouteillées étrangères commercialisées au Maroc et leurs compositions chimiques :

Les eaux étrangères étudiées dans le présent travail sont : Évian, Contrex, Vittel et Perrier.

- **Contrex** : c'est une eau minérale faisant partie des eaux minérales de Vittel prélevé à Contrexéville appartenant à la société Nestlé water (Site web 6).
- **Évian** : c'est une eau minérale naturelle prélevée à Évian-les bains dans les Alpes françaises du département de la Haute-Savoie (Site web 7).
- **Perrier** : c'est une eau minérale naturelle gazeux française issue de la source des Bouillens, sa source se situe à Vergèze, dans le Gard à 15km de Nîmes, cette marque est créée en 1903 (Site web 8).
- **Vittel** : c'est une marque d'eau minérale moyennement minéralisée appartenant à la société Nestlé Water, prélevé à Vittel créé en 1855 (Site web 9).

Ci-dessous, sont présentées les compositions minérales en mg/l des eaux étrangères de notre étude :

Tableau 2 : Compositions chimiques des eaux embouteillées étrangères commercialisées au Maroc.

Eaux embouteillées	Composition chimique en mg/l										TDI	Nature
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	F ⁻	SiO ₂		
1- Contrex	468	74.5	-	112 1	2,9	-	9,4	372	-	-	2047,8	Eau minérale naturelle
2- Vittel	240	42	2, 2	400	4,4	7,3	5,2	384	-	-	1085,1	Eau minérale naturelle
3- Perrier	150	3.9	1	25,3	7.3	19. 5	9,6	420	0,2	-	635,6	Eau minérale gazeuse
4- Evian	80	26	1	14	3,8	-	6.5	360	0,0 6	15	506,36	Eau minérale naturelle

III-3 : Contextes géologiques des origines des eaux embouteillées étudiées d'origine marocaine et Française :

Le but de cette partie est d'identifier les différents contextes géologiques des échantillons d'eau étudiées, pour pouvoir déterminer par la suite la relation du chimisme d'eau avec la géologie.

Les deux figures ci-dessous montre les situations géographiques des eaux embouteillées marocaine et française.

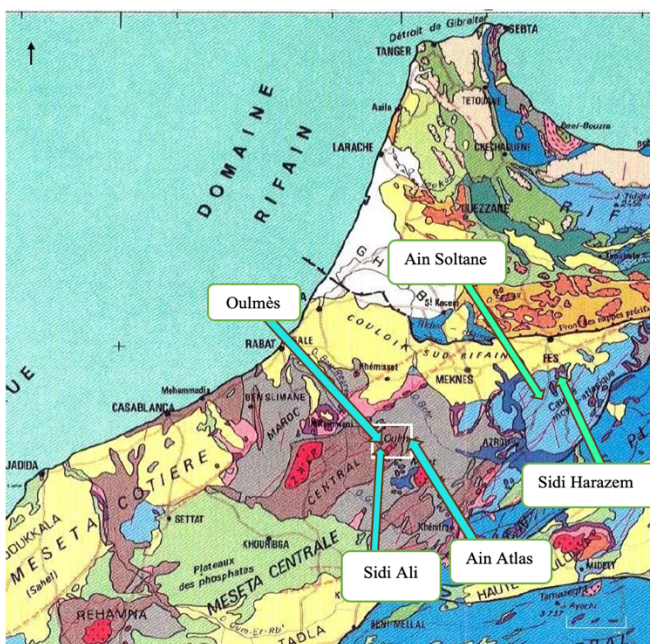


Figure 6 : Situations géographiques des sources des eaux étudiées (Site web 10 et 11).

III-3-1 : Eaux de Oulmès (Oulmès, Sidi Ali, Ain Atlas et Bahia) :

Le plateau d'Oulmès est situé dans sa totalité, dans la Méséta centrale, encore appelé plateau Central Marocain. Celui-ci se présente comme un vaste quadrilatère dont Rabat, Azrou, Kasba Tadla et Casablanca marquant les sommets. Il est limité au nord par le couloir Sud-Rifain, au sud par le plateau des phosphates, à l'est par le Moyen Atlas et à l'ouest par la Méséta côtière (Elbatloussi et *al.*, 2005).

D'un point de vue géologique, le plateau d'Oulmes comprend deux grands types de formations géologiques, une formation granitique entourée d'une zone d'andalousite et de schiste à biotite. A l'est de ces formations schisteuses, on trouve un affleurement de formation de quartzite avec des schistes argileux contenant des nodules calcaires, des grès et du calcaire. Les faciès granitiques du Massif d'Oulmes, peuvent être classés en deux grands groupes les granites à grains moyens à deux types de mica, et les granites fins.

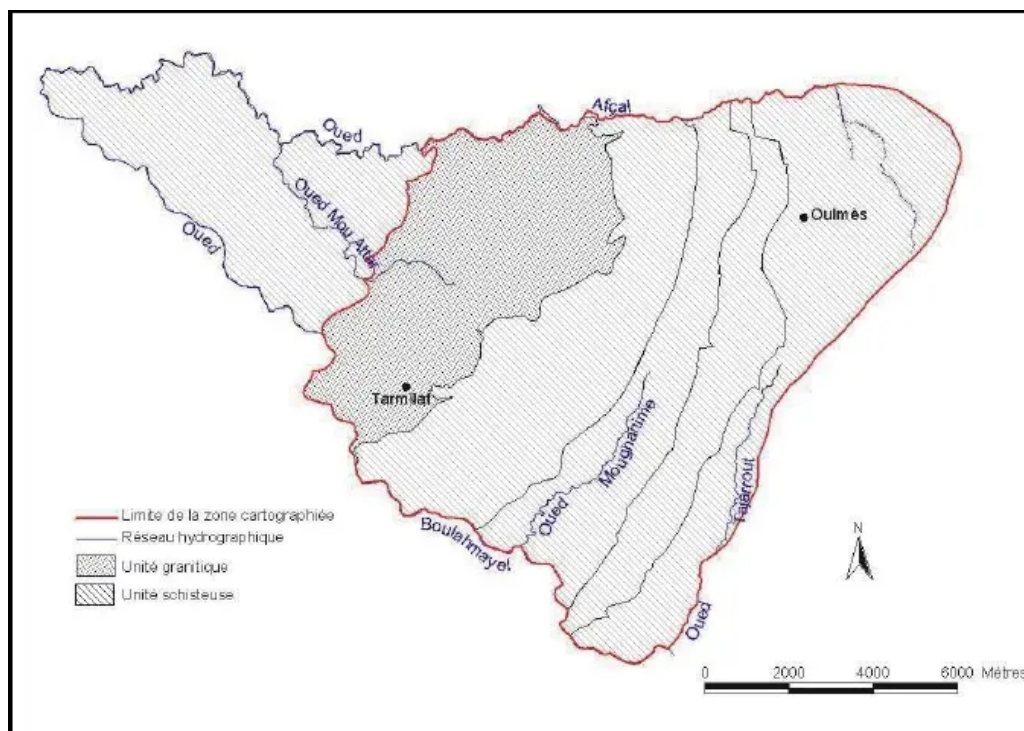


Figure 7 : Géomorphologie montrant les deux unités caractérisant la nature de la zone cartographiée (Elbatloussi et *al.*, 2005).

III-3-2 : Source Ain Soltane :

La source d'eau minérale, Ain Soltane, jaillit dans la chaîne du Moyen Atlas, qui présente une formation carbonatée jurassique résistante (calcaire et dolomie) dans laquelle des niveaux de marnes, d'argiles et de grès sont ajoutés. Ces terres sont déposées sur une série

volcano-détritique triasique formée principalement d'argiles, de grès et de basaltes alcalins. Les eaux du Moyen Atlas présentent généralement un chimisme bicarbonate fortement calcoc-magnésien en relation avec les formations géologiques en place. Les dômes de sel du Trias, largement répandus, affleurent localement (par exemple à Tissa, à 47 km au nord de Fès), et sont également présents à différentes profondeurs dans le Corridor Pré-Rif (Ghalit et *al.*, 2023).

III-3-3 : Source de Sidi Harazem :

La plaine de Sidi Harazem, qui contient l'aquifère de l'échantillon Sidi Harazem, est formée par des dépôts terrigènes de type fluvial d'âge plio-quadernaire, présents principalement dans la partie nord de la plaine ; cette formation est signalée sous le nom de « Conglomérats de Tamatia ». Ces conglomérats sont des dépôts en discordance sur les marnes sableuses du Pliocène inférieur et moyen. La formation est constituée d'une succession de lits de conglomérats métriques entrecoupés de petites passes de grès grossier marquant un ensemble de séquences séparées par des surfaces ravinées. Les éléments constitutifs des conglomérats sont hétérogènes et polymériques d'origine liasique ou miocène et se fixent dans une matrice gréseuse et grésio-argileuse (Ghalit et *al.*, 2023).

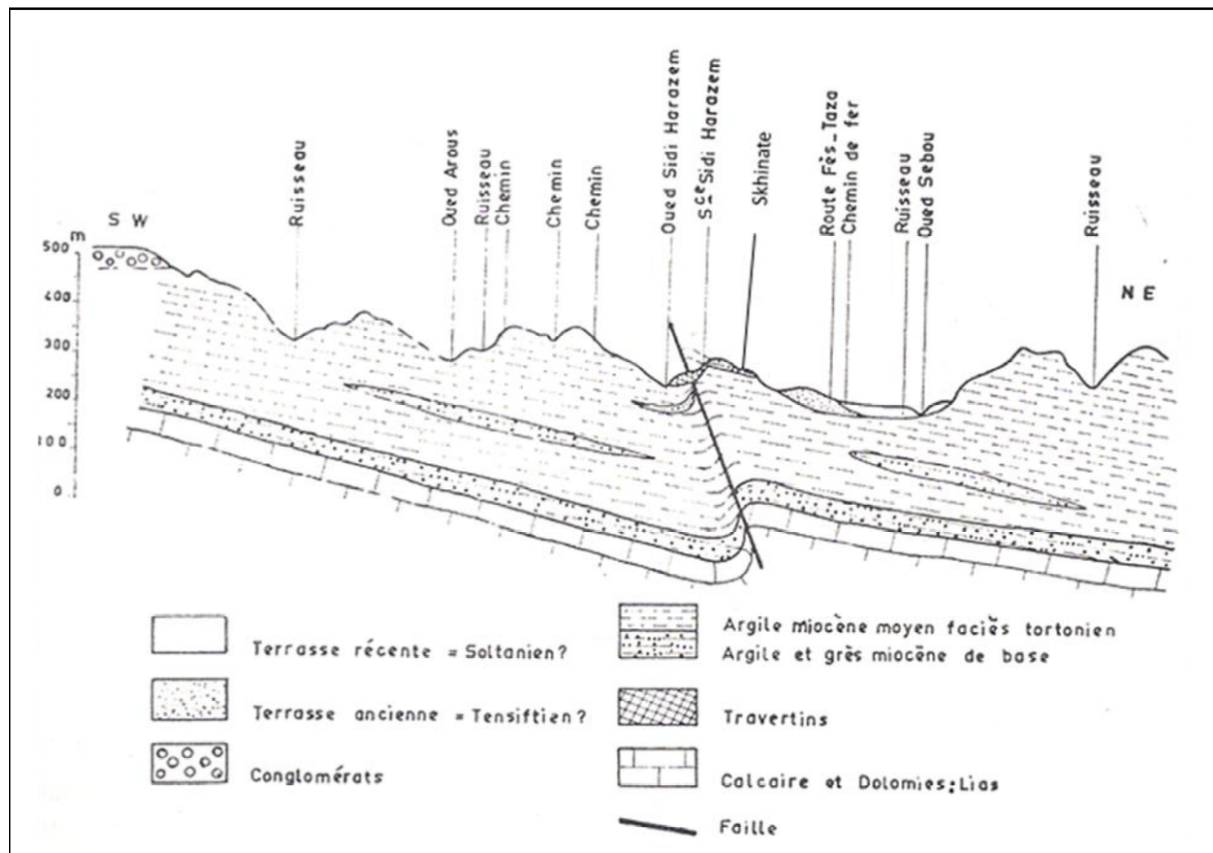


Figure 8 : Coupe géologique interprétative au niveau des sources de Sidi Harazem (Agence Urbaine et de Sauvergarde de Fès).

III-3-4 : Source d'Evian :

Les formations du substratum rocheux avec les nappes préalpines affleurantes à l'Est jusqu'au bord du Léman (Meillerie, Saint Gingolph), au Sud avec les Monts d'Hermones et également dans la profonde entaille de la Dranse.

On y rencontre, dans ce secteur, la nappe des Préalpes Médiannes Plastiques (épaisse série calcaréo-marneuse à dolomies) chevauchant, en position frontale, la Nappe du Gürnigel (flysch à conglomérats) et des écailles de flysch ultra-helvétiques. Cet ensemble de nappes chevauche la molasse subalpine parautochtone, à facies de marnes bariolées à anhydrite et de marnes gréseuses. Les gypses, cargneules et dolomies triasiques, situés à la base de la Nappe des Préalpes Médiannes Plastiques affleurent sporadiquement le long de la Dranse et sur le plateau de Gavot (Blavoux et Nicoud, 2009).

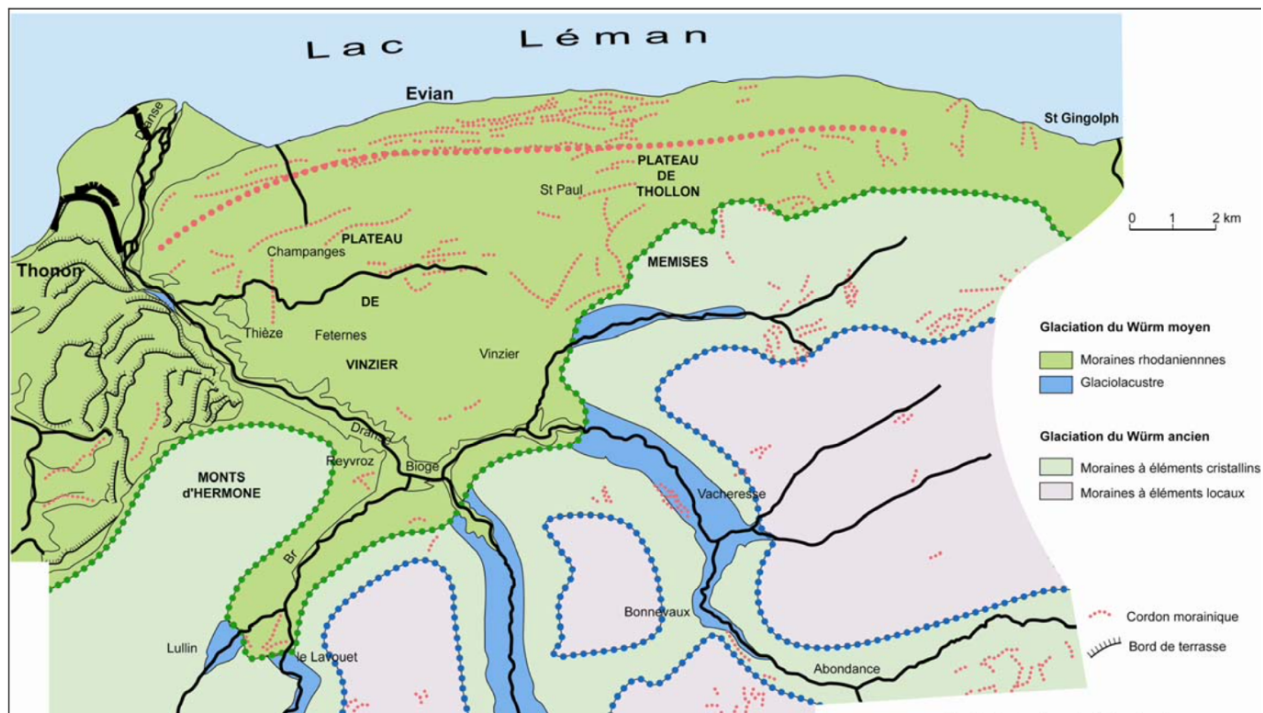


Figure 9 : Formations quaternaire de la région d'Evian. (Blavoux et Nicoud, 2009).

III-3-5 : Source des eaux Contrex et Vittel :

Ce sont les terrains du Keuper, de la Lettenkohle et du Muschelkalk supérieur et moyen qui constituent les gîtes hydrominéraux de Contrexéville (source Contrex) et Vittel, avec, de haut en bas (Comité français de l'AIH-Evian, 2009) :

Stratigraphie

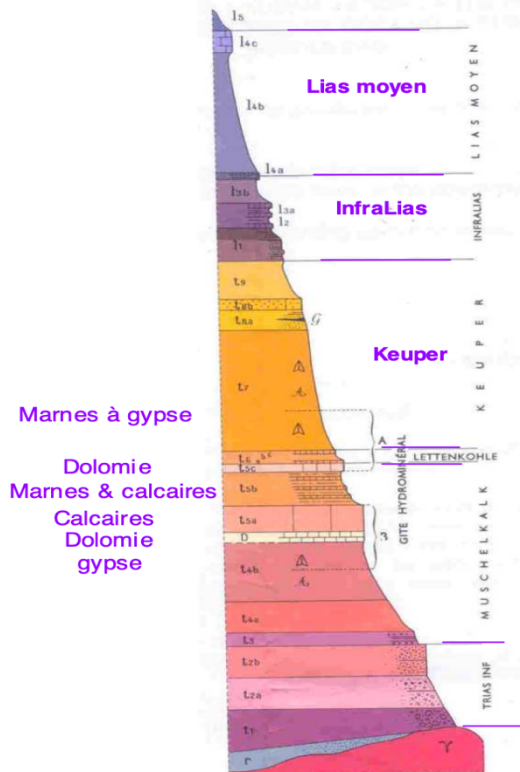


Figure 10 : Stratigraphie des terrains de Contrex et Vittel (Debeglia et Greber, 2009).

III-3-6 : Source de l'eau gazeuse Perrier :

Vergèze est une commune française située dans le sud du département du Gard, en Région Occitanie. C'est sur le territoire de la commune que se trouve la source Perrier (Site web 12).

Les contextes géologiques et structuraux du site des Bouillens sur le plan hydrogéologique ont identifiées trois composantes distinguées qui sont (Berard P. et *al*, 1991) :

- Composante 1 : qui correspond à l'aquifère alluvial contenu dans les dépôts fluviaux du villafranchien : Sables, graviers et galets situés sous couverture limono-argileuse.
- Composante 2 : composante majeure provenant des massifs calcaires des Garrigues, formant une nappe karstique drainée par la faille de Nîmes.
- Composante 3 : eau minéralisé chaude d'origine volcanique profonde qui véhicule le CO₂ au travers des fissures en distension d'un réseau de failles burdigaliennes (calcaire récifaux à bryozoaires) piégée sous les marnes Plaisancien.

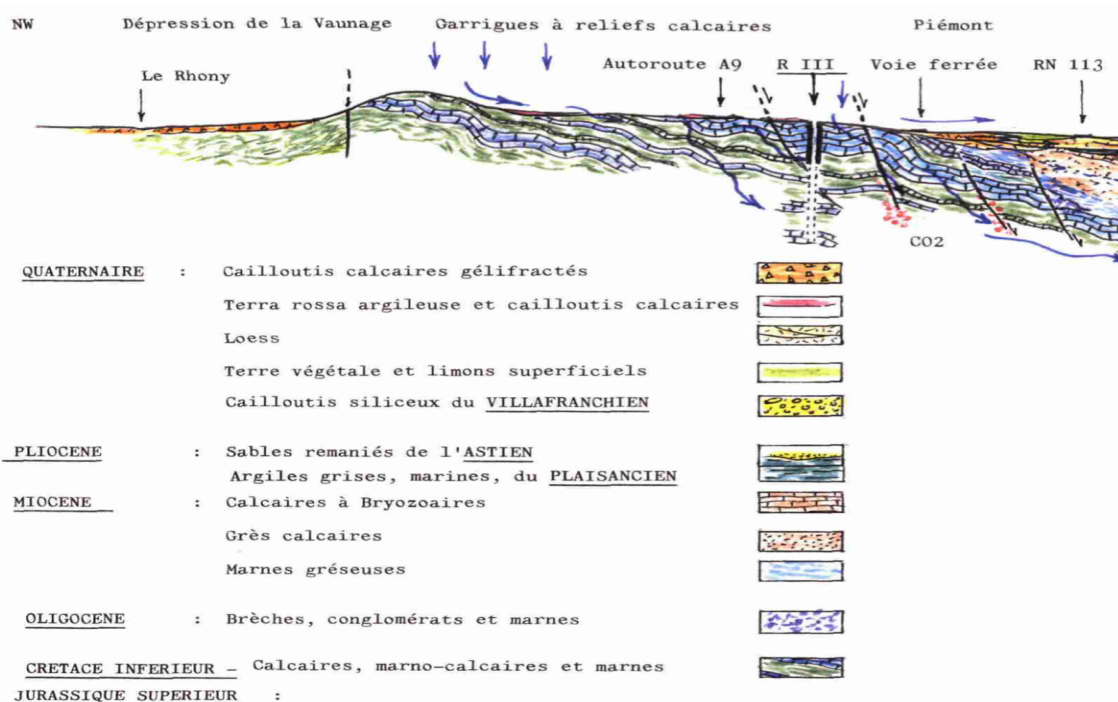


Figure 11 : Coupe schématique et série stratigraphique descriptive de la source Perrier (Berard et al, 1991).

Le tableau ci-dessous résume la géologie des différents échantillons des eaux embouteillées leurs villes et leurs origines de provenance :

Tableau 3 : Caractéristiques géologiques des dix échantillons d'eau embouteillées étudiées.

Marque de l'eau	Ville	Origine	Géologie
Sidi Harazam	Fès	Moyen Atlas	Dolomies(jurassique)
Ain Soltane	Imouzzar-Kandar	Moyen Atlas	Formation carbonaté (Jurassique)
Ain Atlas	Oulmès	Moyen Atlas	Granites
Sidi Ali	Oulmès	Plateau Oulmès	Terrain schisteux situé en bordure du massif granitique
Oulmès	Oulmès	Pied des montagnes du Moyen Atlas	Formation volcanique
Evian	Evian les Bains	Alpes Françaises	Géologie complexes constitué de formation détritique tel qu'Argile et le sable avec des formations calcaires.
Contrexe	Contrexéville	Vosges de la région Grand Est	Gisements souterrains naturellement protégé par roche imperméable constitué d'argile, marne (mésozoïque au cenozoïque)
Vittel	Vittel	Vosges (France)	Formation dolomitique du Trias
Perrier	Vergèze	Gard (France)	Formation Sédimentaire et Volcanique

IV- Chimie des eaux embouteillées :

Dans cette partie on s'intéresse aux échantillons d'origines marocaine et étrangère. On se concentra sur des différents aspects tel que la qualité d'analyse des eaux en bouteille en se basant sur le calcul de des balance ioniques ainsi que les mesures de conductivité. Une partie sera consacrée aux détermination des faciès chimiques à l'aide des représentations graphique Shoeller et Piper, ainsi que les indices de saturation *vis-à-vis* aux quelques minéraux. La dernière étape portera sur l'ACP.

IV-1 : Qualité des analyses chimique des eaux en bouteille :

La vérification de la qualité des analyses chimiques des eaux étudiées est basée sur les deux techniques suivantes :

- L'électroneutralité de l'eau.
- La corrélation entre le totale des ions dissous (TDI) et les mesures de conductivité effectuée au laboratoire.

IV-1-1 : Technique de l'électroneutralité :

La balance ionique (BI) est par définition la différence entre les anions et les cations autrement dit, l'équilibre anions-cations. BI est de l'ordre de zéro (0) lorsque la qualité des analyses est parfaite. BI est défini par la relation suivante :

$$BI = \left(\frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \right) * 100$$

- $0 \leq BI < 5$: analyses de bonne qualité.
- $5 \leq BI < 10$: analyses acceptables.
- $BI \geq 10$: analyse douteuse à réétudier.

Les calculs de la BI sont consignés dans le tableau 4

Tableau 4 : Balances ioniques des différents eaux embouteillées d'origine marocaine et étrangères.

Les eaux	Oulmès	Sidi Harazem	Ain Soltane	Ain Atlas	Sidi Ali	Bahia	Contrex	Vittel	Perrier	Évian
BI(%)	4,29	0,16	1,17	1,67	7,61	8,22	0,74	2,78	1,10	1,41

D'après ces résultats on peut classer la qualité des analyses chimiques en deux catégories :

- Eaux d'analyses chimiques de bonne qualité ($0 < BI < 5$). C'est le cas des eaux : Sidi Harazem, Ain Soltane, Ain Atlas, Oulmès, Contrex, Perrier, Évian et Vittel.
- Eaux d'analyses chimiques acceptable ($5 < BI < 10$). C'est le cas des deux eaux Bahia et Sidi Ali.

IV-1-2 : Technique de corrélation entre le Total des Ions Dissous (TDI) et les mesures de conductivité :

Cette technique est basée sur la relation qui lie la conductivité et la somme des ions dissous. La conductivité permet d'avoir une idée sur la minéralisation totale de l'eau car elle varie proportionnellement avec la conductivité, *via* la relation suivante :

$$\text{TDI (mg/l)} = A * K (\mu\text{S/cm})$$

- TDI : Minéralisation totale de l'eau en mg/L
- K : Conductivité électrique en $\mu\text{S/cm}$
- A : Coefficient de proportionnalité sans dimension compris entre 0,55 et 0,9, en moyenne $A=0,7$.

Mode opératoire de la mesure de la conductivité par le conductimètre :

- Étalonnage de l'appareil.
- Rinçage de la cellule par l'eau distillée.
- Mettre la cellule dans un bécher qui contient de l'échantillon à analyser.
- L'appareil donne directement la valeur de la conductivité en μS .

Le tableau 5 présente les mesures de conductivité des échantillons d'eau obtenues à la température ambiante 26°C (température de laboratoire) à l'aide du conductimètre. Les données sont classées dans l'ordre des eaux les plus minéralisées vers les moins minéralisées.

Tableau 5 : Mesures du conductivités des échantillons d'eau étudiées (mesures effectuées le 6 juin 2023).

Marque	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	TDI (mg/l)
Contrex	2329	2048
Oulmès	2286	1655
Vittel	1564	1085
Sidi Harazem	1417	817
Perrier	947	636
Ain Soltane	790	547
Evian	734	506
Ain Atlas	471	328
Sidi Ali	361	210
Bahia	343	177

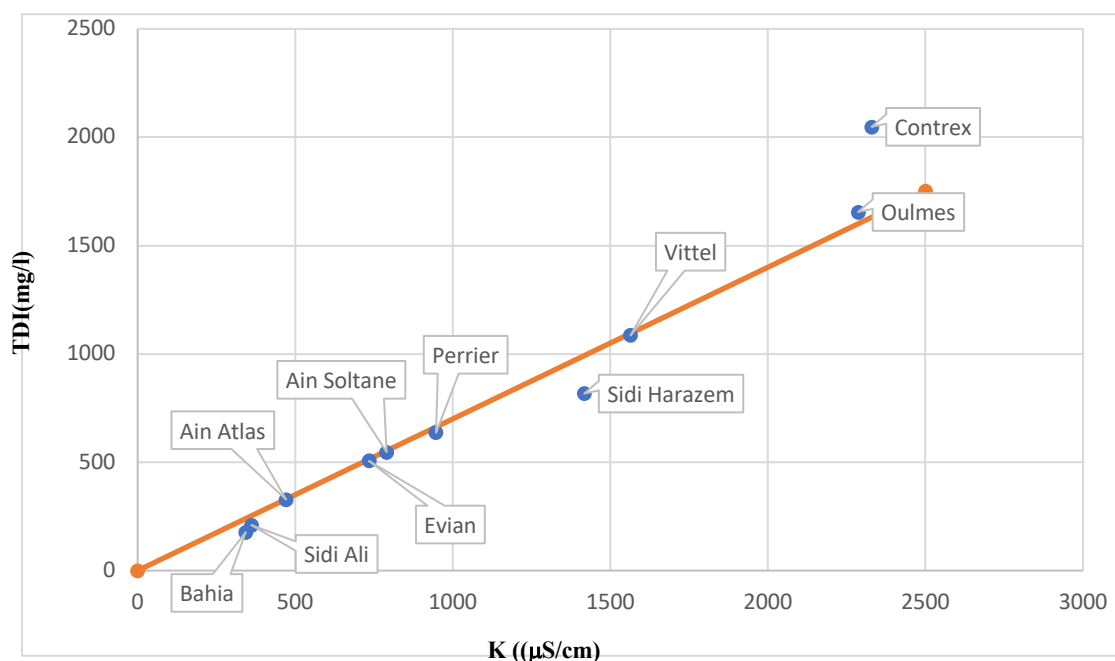


Figure 12 : Variation de la conductivité en fonction de TDI des différentes eaux étudiées.

La figure 11 montre, clairement, qu'à l'exception de l'eau Contrex, toutes les eaux sont conformes à la proportionnalité entre la conductivité et le TDI mentionnée ci-dessus. La constante reliant la minéralisation à la conductivité est de l'ordre de 0,9 dans le cas de l'eau Contrex. Cette valeur reste, tout de même, comprise entre 0.55 et 0.9. Sachant que la BI relative à cette eau est de l'ordre de 0.7, on peut considérer que les analyse dans ce cas sont de bonne

qualité. La différence entre les constantes de proportionnalité A est, probablement liée à la nature des ions dominants.

IV-2 : Chimie des éléments majeurs et faciès des eaux étudiées :

Afin de comprendre les processus de minéralisation contrôlant la chimie des eaux étudiées, les données sont projetées sur différentes représentations graphiques. Pour définir les faciès chimiques des échantillons d'eau on aura besoin d'utiliser des diagrammes hydrogéochimiques spécifiques pour ces fonctions, qui sont le diagramme de Schoeller et de Piper.

IV-2-1 : Projection des données sur le diagramme de Schoeller :

C'est un diagramme qui permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est présentée par une ligne verticale en échelle logarithmique ; la ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. Ce diagramme est exécuté par le logiciel Diagrammes (Site web 11), ce dernier est créé par Ronald Smiller. C'est un logiciel hydro-chimique en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau, ses fonctions sont variées et complètes.

La figure 13 présente les projections des analyses chimiques des échantillons (d'origines marocaine et étrangères).

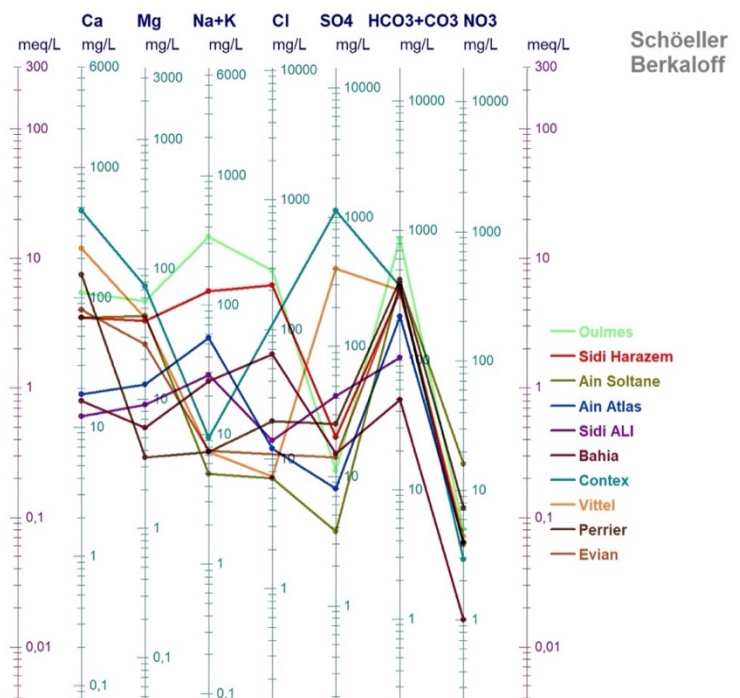


Figure 13 : Projection des analyses chimiques des dix échantillons d'eau embouteillée sur le diagramme de Schoeler.

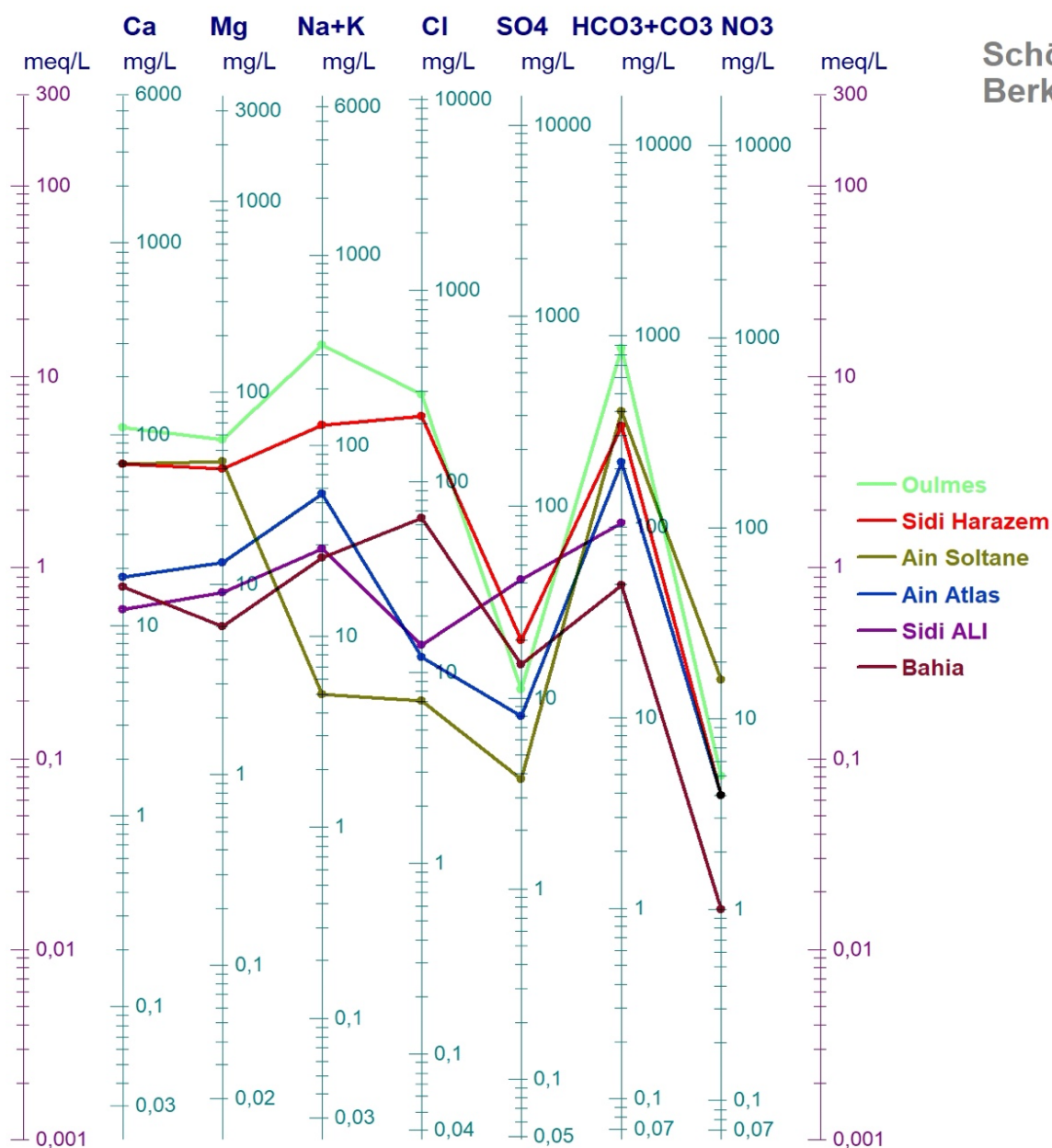


Figure 14 : Projection des analyses chimiques des eaux embouteillées d'origine marocaine sur le diagramme de Schoeller.

La projection sur Piper montre clairement un parallélisme graduel entre deux groupes qui sont Ain Atlas et Sidi Ali, Oulmès et Sidi Harazem. En effet elles proviennent de la région de Fès et Oulmès. On constate, tout de même que l'eau Bahia présente un parfait parallélisme avec les eaux Oulmes et Sid Harazem mais avec de faibles concentrations. Cette différence serait liée au fait que cette eau est traitée. Ce traitement serait la cause de la baisse des concentrations.

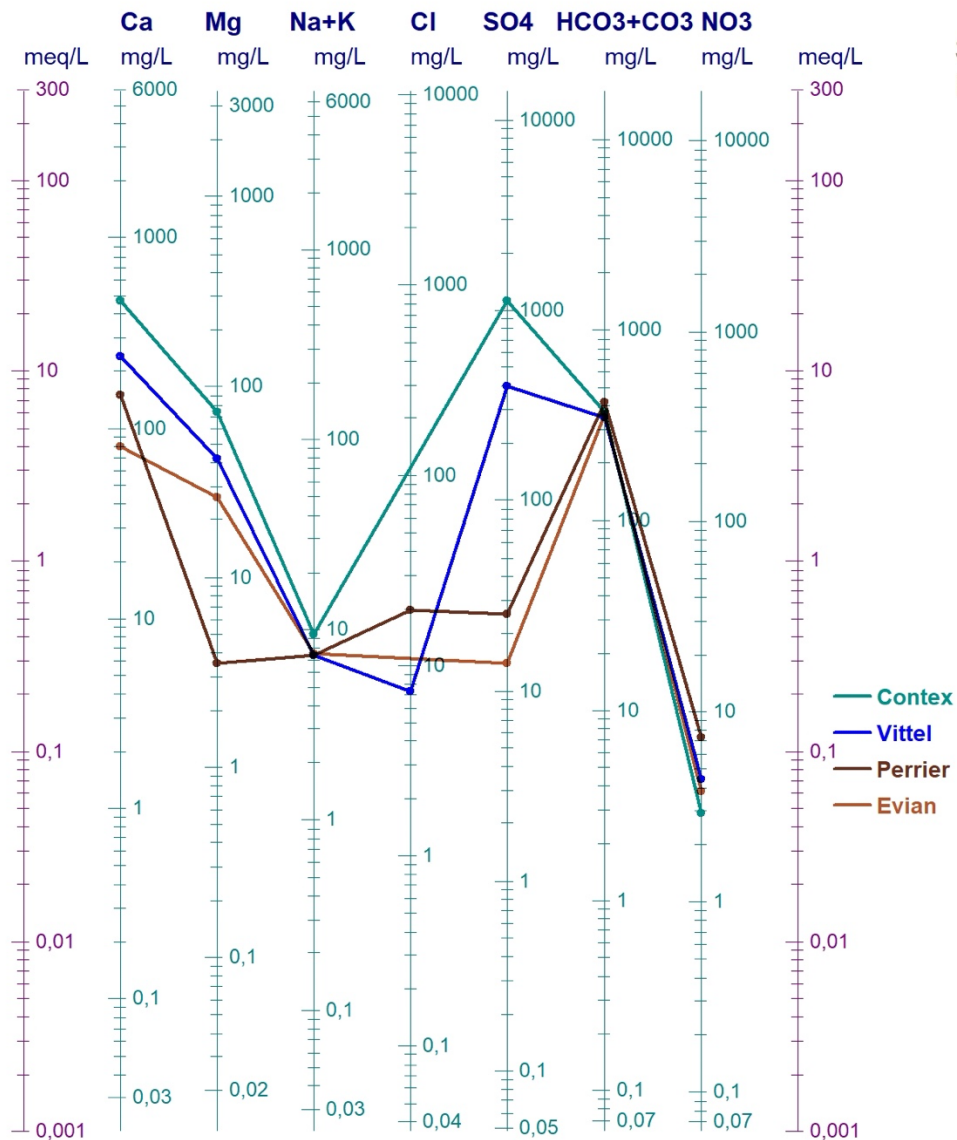


Figure 15 : Projection des analyses chimiques des échantillons d'eaux embouteillées d'origine étrangères.

Concernant les eaux étrangères, la présentation graphique de Schoeler (Fig.15) montre une ressemblance entre les eaux Contrex et Vittel. En effet, ces eaux proviennent de la même région.

IV-2-2 : Projection des données sur le diagramme de Piper :

Cette présentation permet de dilucider les faciès chimiques d'un ensemble d'échantillons d'eau. Ce diagramme est composé de deux triangles qui permettent de projeter les faciès cationiques et les faciès anioniques et d'un losange synthétisant le faciès global.

Ci-dessous, sont présentées les projections des analyses chimiques des échantillons d'eau embouteillée (d'origines marocaine et étrangère) sur le diagramme de Piper.

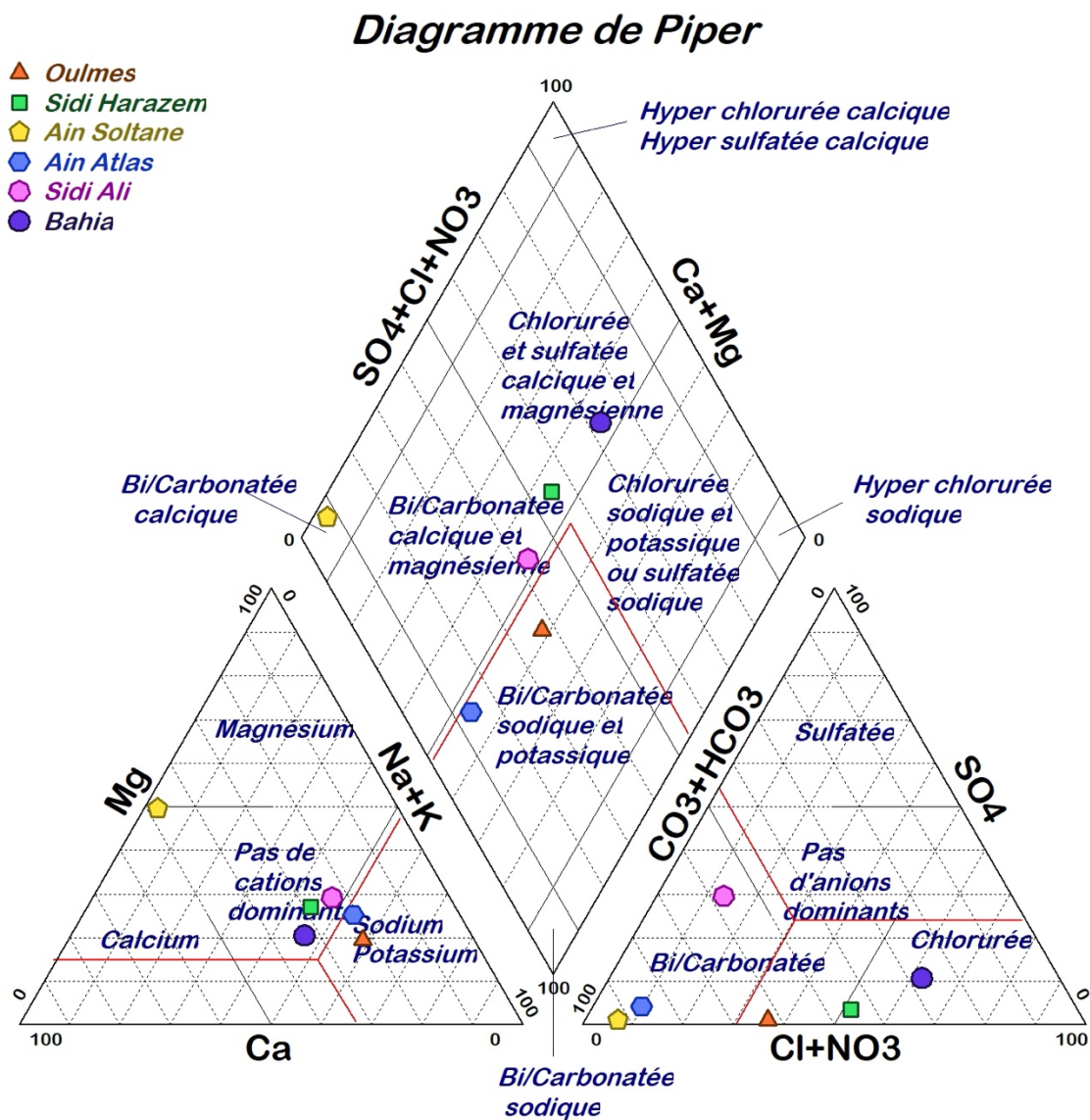


Figure 16 : Projection des analyses chimique des échantillons d'eau embouteillée d'origine marocaine.

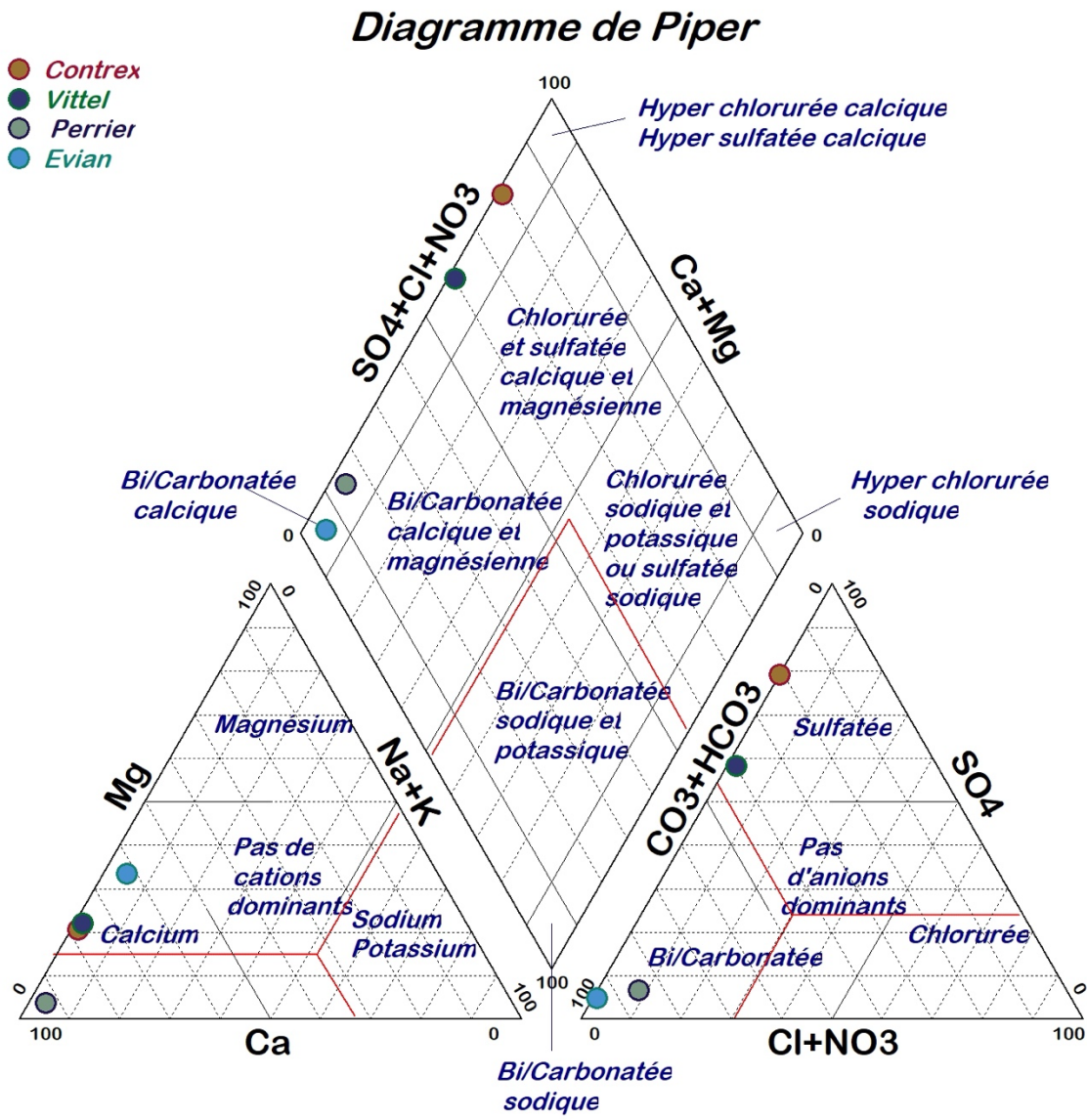


Figure 17 : Projection des analyses chimiques des échantillons d'eau embouteillée étrangères.

Interprétation : La projection sur le diagramme de Piper (Fig. 16 et 17) a permis de classer les dix échantillons d'eaux en trois principaux faciès chimiques :

- Les eaux Sidi Ali, Ain Soltane, Évian et Perrier appartiennent au faciès **bicarbonaté calcique et magnésienne**.
- Les eaux Sidi Harazem, Bahia, Vittel et Contrex appartiennent au **faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésienne**.
- Les deux eaux Oulmès et Ain Atlas appartiennent au faciès **bicarbonaté sodique et potassique**.

Relation des faciès avec la nature géologiques de leurs origines :

Faciès bicarbonaté calcique et magnésienne :

- Pour l'eau Sidi Ali le calcium et les bicarbonates sont respectivement le cation et l'anion le plus dominant cette eau présente un appauvrissement relatif en sodium. Cette eau provenant de la source Sidi Ali Sherif qui se trouve au sein des schistes métamorphique première auréole qui ceinture le granite.
- Pour l'eau Ain Soltane sa minéralisation est liée à l'émergence de sources dans le Jurassique carbonaté dominé par des calcaires et des dolomies.
- Quant à l'eau Evian, sa minéralisation est due à l'interaction avec des séries calcero-marneuse à dolomie et des faciès de marne et de marne gréseuse et de gypse.
- Pour l'eau Perrier sa minéralisation est liée à l'interaction avec des séries de calcaire, marno-calcaire et marne, cette eau minérale chaude est d'origine volcanique profonde.

Faciès chloruré et sulfaté calcique :

- Pour l'eau Sidi Harazem sa minéralisation est lié au contact des marnes détritiques miocènes du pré-rif disposé sur les carbonates jurassiques de l'Atlas. Les couches d'évaporites qui se trouve dans les marnes miocènes fournit des ions Na^+ et Cl^- .
- Pour l'eau Bahia qui est une eau de table à forte concentration de sels dissous il est riche en Na^+ et Cl^- la teneur en carbonates est normale avec absence de carbonates alcalin.
- Pour les eaux Vittel et Contrex, les zones de dissolution de gypse ont entraînés une augmentation en ions dissouts SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

Bicarbonaté sodique et potassique :

Pour les eaux Oulmès et Ain Atlas leurs minéralisations est liés aux interactions des eaux avec l'encaissant formé essentiellement des schistes à calcaire gréseux et des roches volcanique de l'ordovicien.

- L'eau Oulmès puise sa minéralisation dans les profondeurs des roches volcaniques et remonte vers la surface, poussé par les bulles de gaz carbonique entre les schistes et les granites.
- Pour l'eau Ain Atlas il est caractérisée par une minéralisation diverse lui donnant un faciès bicarbonaté sodique dominant.

IV-2-3 : État de saturation des eaux étudiées *vis-à-vis* de quelques minéraux :

Pour confirmer le processus de dissolution ou précipitation *vis-à-vis* des principaux minéraux comme le gypse, la calcite, la dolomite et l'aragonite, il faut tout d'abord calculer leurs Indices de Saturation (IS), ce dernier est définie par la relation suivante :

$$\mathbf{IS = \underline{\underline{Log(PAI)/K}}}$$

PAI : Produit d'Activité Ionique

K : Constante de solubilité minérale à l'équilibre.

- **IS = 0** désigne un état d'équilibre du minérale dans l'eau.
- **IS < 0** : eau est sous-saturée *vis-à-vis* du minéral elle est donc agressive.
- **IS > 0** : eau saturée *vis-à-vis* du minéral, l'eau est donc incrustante ou entartrant.

Dans le présent travail, les valeurs IS comprises entre -0,5 et 0,5 désignent un état d'équilibre.

Les résultats des calculs des IS sont présentés sur les figures 18,19,20 et 21. Les calculs portent sur dix (10) échantillons d'eau. Ces indices sont relatifs aux minéraux suivant : le gypse (CaSO₄·2H₂O), la calcite (CaCO₃), la dolomite (CaMg(CO₃)₂) et l'aragonite(CaCO₃), (On suppose que les valeurs d'IS comprises entre 0,5 et -0,5 désigne une état d'équilibre).

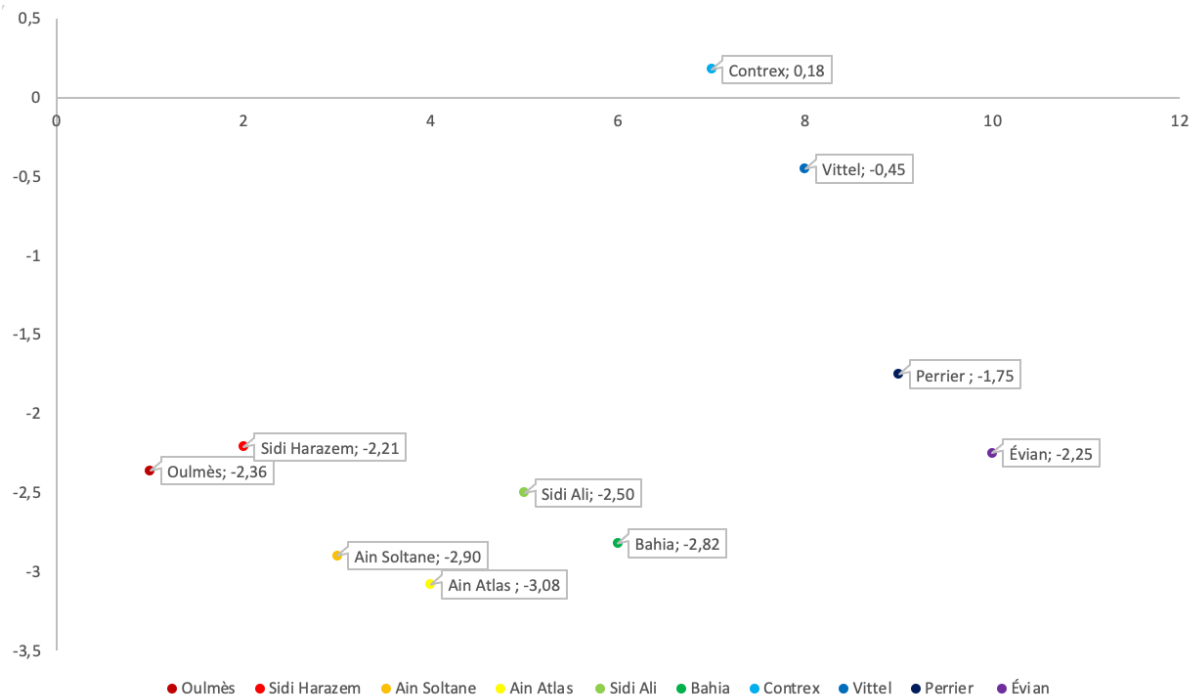


Figure 18 : Saturation des eaux étudiées vis à vis du gypse.

D'après la fig.18 les eaux : Contrex et Vittel sont à l'équilibre, alors que les eaux Oulmès, Sidi Harazem, Ain Soltane, Ain Atlas, Sidi Ali, Bahia, Perrier et Evian sont sous saturées ça veut dire des eaux agressives.

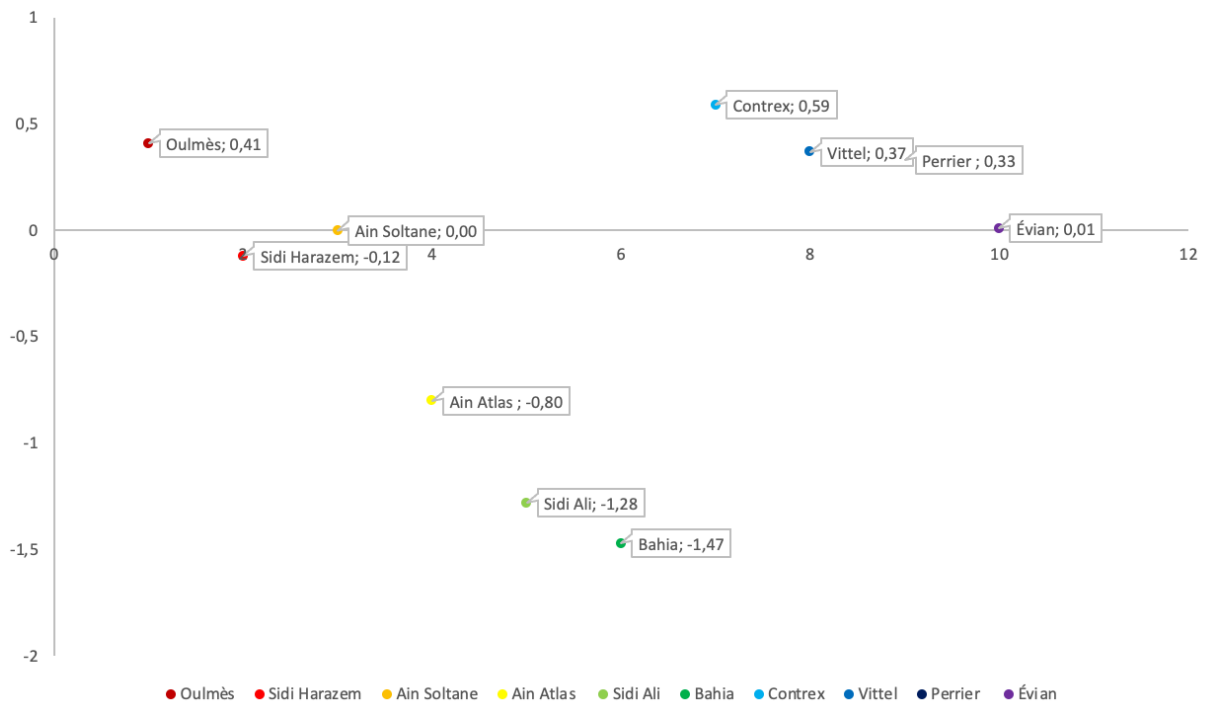


Figure 19 : Saturation des eaux étudiées vis à vis du calcite.

D'après la fig. 19 les eaux Oulmès, Sidi Harazem, Ain Soltane, Vittel, Perrier et Evian sont à l'équilibre, alors que l'eau Contrex est sursaturée doc c'est une eau en tartrate.

Les eaux Ain Atlas, Sidi Ali et Bahia sont sous-saturées donc ils sont des eaux agressive.

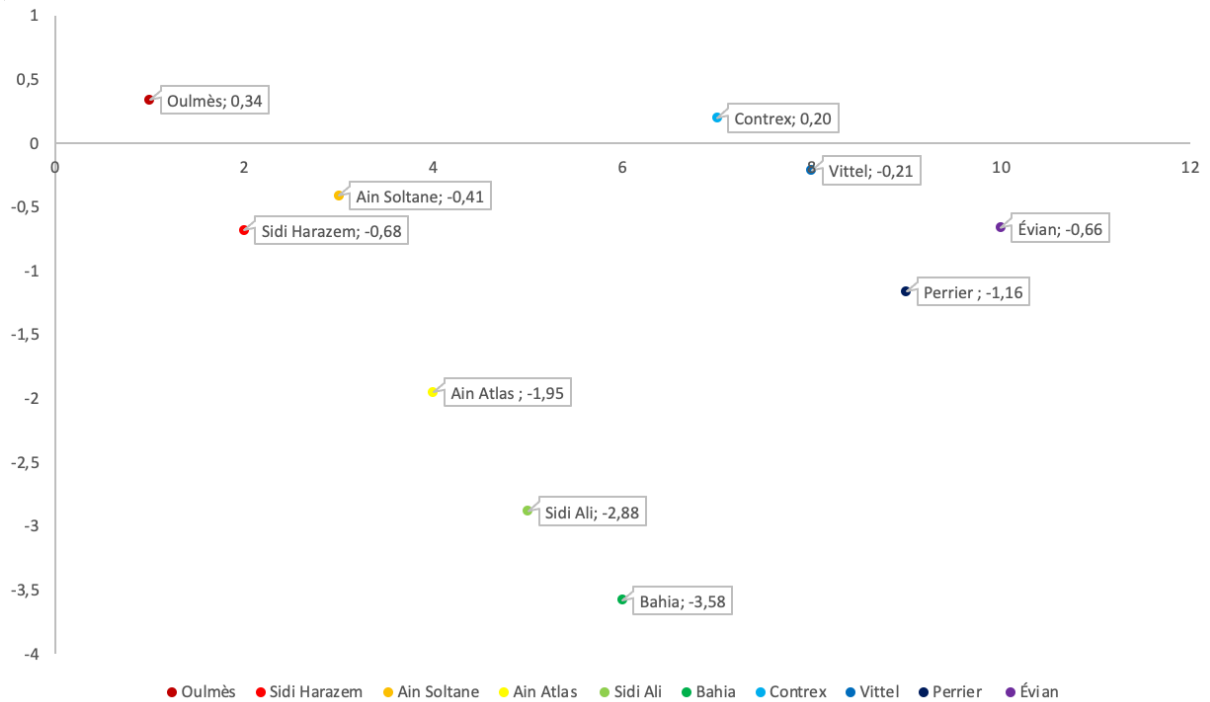


Figure 20 : Saturation des eaux étudiées vis à vis de la dolomite.

D'après la fig. 20 les eaux Oulmès, Ain Soltane, Contrex, et Vittel sont à l'équilibre mais les eaux Sidi Harazem, Ain Atlas, Sidi Ali, Bahia, Perrier et Evian sont sous-saturées donc des eaux agressives.

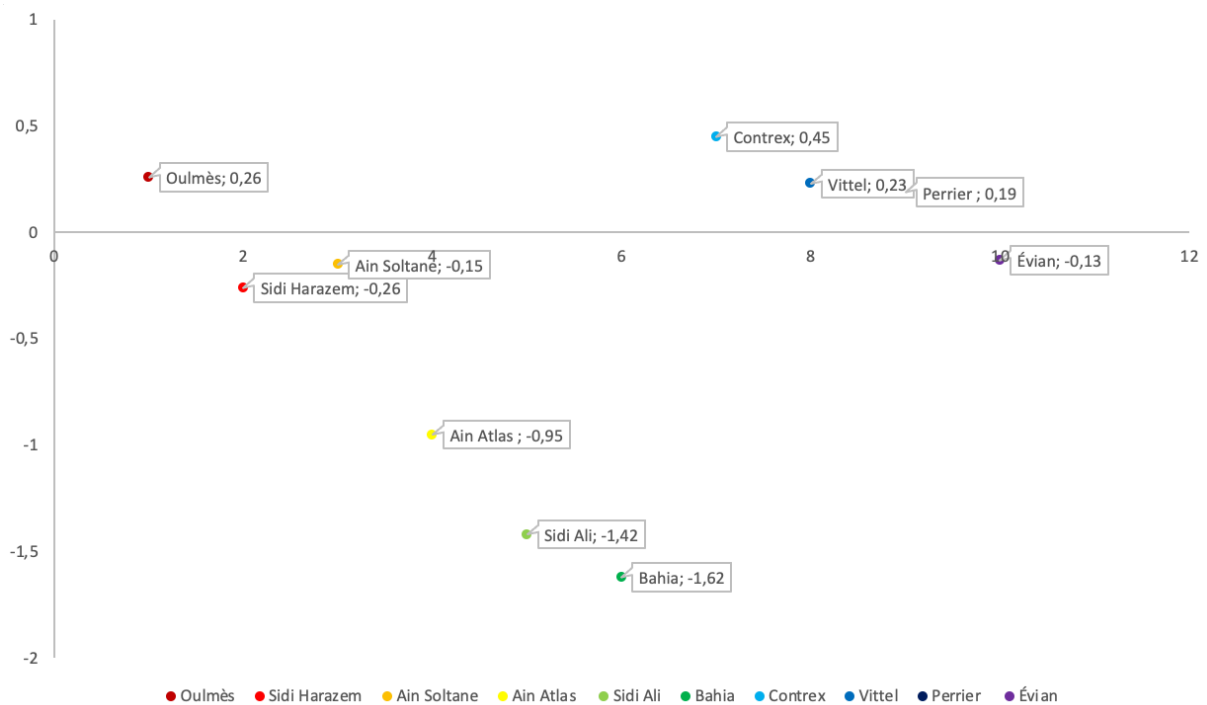


Figure 21 : Saturation des eaux étudiées vis à vis de l'aragonite.

D'après la figure 21 les eaux Oulmès, Sidi Harazem, Ain Soltane, Contrex, Vittel, Perrier et Evian sont des eaux à l'équilibre, par contre les eaux Ain Atlas, Sidi Ali et Bahia sont sous-saturées donc des eaux agressives.

Conclusion :

L'eau Contrex présente un état d'équilibre à un état sur-saturé vis à vis des quatre minéraux car cette eau est fortement minéralisée. Alors que l'eau Bahia présente un état de sous-saturation vis-à-vis des quatre minéraux car c'est une eau de table traité qui a subis des traitements chimiques qui ont la rendue faiblement minéralisée.

IV-3 : Interprétation des données à l'aide de l'Analyse en Composantes Principale (ACP) :

L'analyse en composantes principales est un grand classique de l'analyse des données qu'on note par la suite ACP ou Principal Component Analysis (PCA) en anglais. C'est une méthode statistique multivariée proposée sous forme d'un tableau rectangulaire des données comportant les valeurs des variables quantitatives pour un ensemble d'individus qui sont utilisés pour résumer et visualiser l'information contenue dans ces données procurant ainsi des représentations géométriques de ces individus et de ces variables.

L'objectif de l'ACP est de réduire la dimension d'un espace en essayant de déformer le moins possible des critères à la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales.

Le but de ce travail est de présenter et de faire une description, tout expliquant comment résoudre le problème de la représentation des données et étudier les relations existantes entre les individus par l'évaluation de leurs ressemblances, ainsi que les relations entre les variables par l'évaluation de leur liaison.

L'analyse des données (aussi appelé analyse exploratoire des données ou AED) est une famille de méthodes statistiques dont les principales caractéristiques sont d'être multidimensionnelles et descriptives permettant un nombre très important de données et de dégager les aspects les plus intéressants de la structure de celle-ci (Mansouri, 2019).

Matrice de corrélation :

La matrice de corrélation est un tableau qui permet d'avoir la corrélation entre les différentes variables, elle est utilisée pour évaluer la dépendance entre plusieurs variables en

même temps. L'exécution de cette méthode sur Excel nous donne un tableau contenant les coefficients entre chaque variable et les autres (Site web 13).

Le tableau 6 montre cette méthode :

Tableau 6 : Matrices de corrélation des paramètres chimiques analysés des eaux embouteillées.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	F ⁻	SiO ₂
Ca ²⁺	1									
Mg ²⁺	0,71	1								
K ⁺	-0,22	0,27	1							
SO ₄ ⁻	0,95	0,66	-0,29	1						
NO ₃ ⁻	-0,02	0,22	-0,06	-0,18	1					
Cl ⁻	-0,19	0,30	0,85	-0,28	-0,08	1				
Na ⁺	-0,15	0,34	0,97	-0,24	-0,07	0,92	1			
HCO ₃ ⁻	0,28	0,60	0,68	0,04	0,37	0,58	0,72	1		
F ⁻	0,03	-0,43	-0,25	-0,18	0,17	-0,21	-0,22	0,12	1	
SiO ₂	-0,11	-0,08	-0,19	-0,15	-0,08	-0,22	-0,18	0,02	0,19	1

L'analyse de la matrice de corrélation montre une bonne corrélation supérieure à 0,6 entre les éléments suivants :

- Une très forte corrélation entre :
 - ❖ Le potassium et le sodium (0,97) leur présence est liée aux minéraux évaporitiques.
 - ❖ Le calcium et les sulfates (0,95) due aux présences des gypses (CaSO₄).
 - ❖ Le chlorure et le Sodium (0,92) due à la présence de NaCl provenant de l'halite.
- Une forte corrélation : entre le potassium et le chlorure (0,85), due aussi aux minéraux évaporitiques.
- Une moyenne corrélation entre :
 - ❖ Le sodium et les bicarbonates (0,72).
 - ❖ Le calcium et le magnésium (0,71).
 - ❖ Le potassium et le bicarbonates (0,68).

Ces corrélations sont dues aussi aux formations évaporitiques.

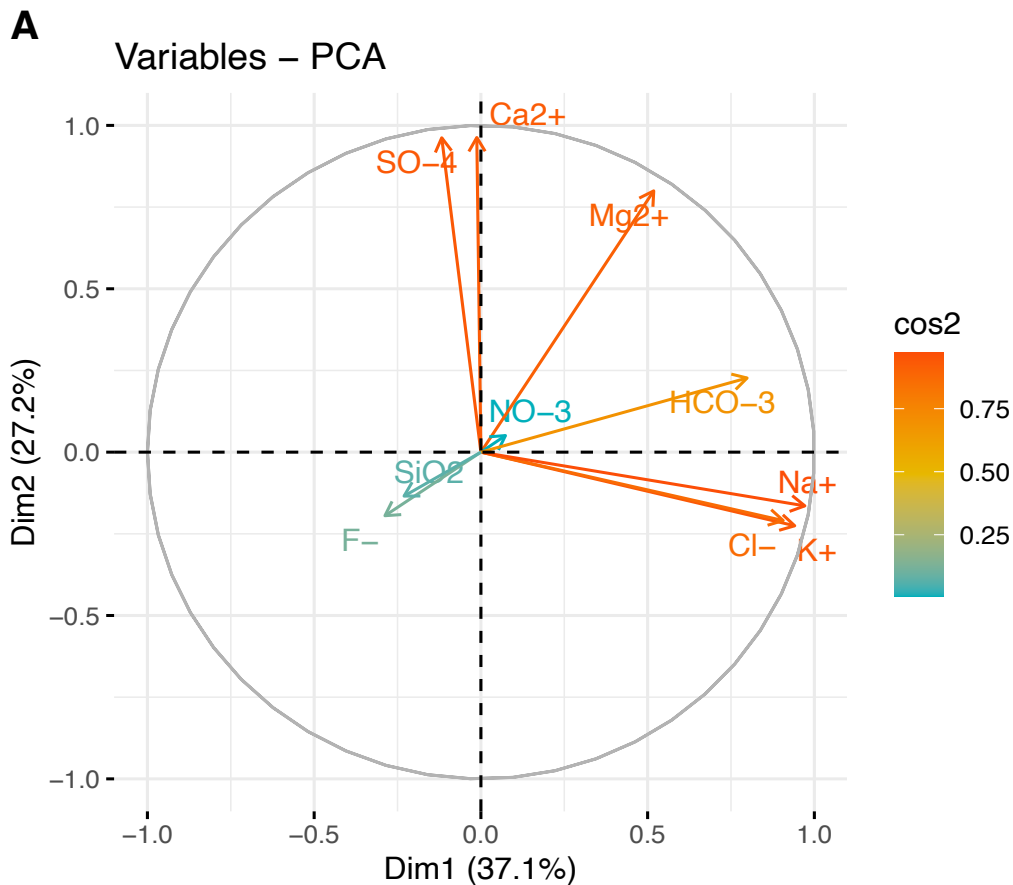


Figure 22 : Analyse en composantes principales de composition chimique sous R.

Analyse au Composante Principale des variables en deux dimensions :

Avec une variance totale de 64%, les variables sont classées selon deux dimension s

- Dimension 1 (37% de variance) : Les variables HCO₃⁻, Na⁺ et Cl⁻ sont fortement et positivement corrélés. En effet cette corrélation est due à la présence d'évaporite et notamment NaCl qui se trouve dans les formations triasiques du Moyen Atlas et les Alpes française.
- Dimension 2 (27% de variance) : Les variables SO₄²⁻, Ca²⁺ sont fortement et positivement corrélés, Mg²⁺ est moyennement est positivement corrélé avec la Dim1. Ces corrélations sont liées à la dissolution de gypse (CaSO₄, 2H₂O). Dans les formations de Vosges (Le grand Est).

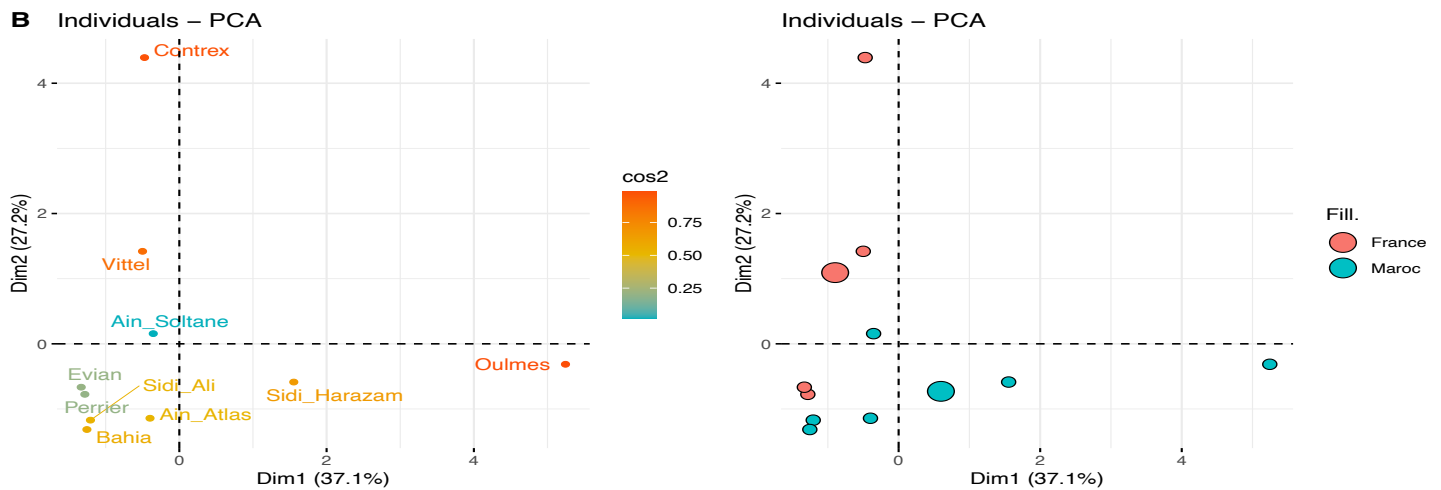


Figure 23 : Analyse factorielles des dix marques (individus) d'eau avec R.

80% des échantillons d'eau sont corrélés selon la dimension 1, ce qui permet de dire que le groupe évaporitique lié à la dissolution d'halite est le plus dominant. Alors que les eaux corrélées selon la dimension 2ne présentent que 20% (Contrex et Vittel). Ces eaux sont en liaison avec la dissolution de gypse.

V- Qualité chimique des eaux embouteillées étudiées :

Les eaux embouteillées doivent respecter les normes imposées par la législation marocaine relatives à la qualité des eaux alimentaire avant d'être mise en disponibilité pour la consommation humaine, pour présenter au consommateur une eau qui n'a pas de risque sur la santé. Selon la définition de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'eau destinée à la consommation humaine, ne doit contenir en quantités dangereuses ni micro- organismes, ni substances chimiques nocifs pour la santé ; en outre elle doit être aussi agréable à boire que les circonstances le permettent. Les eaux d'alimentation humaine doivent satisfaire aux exigences de qualité spécifiées mentionnées sur la figure 23. Ces normes comprennent cinq groupes de critères : des paramètres physico-chimiques, des paramètres organoleptiques, des facteurs indésirables ou toxiques, des facteurs d'intérêt biologiques ainsi que de facteurs bactériologiques.

Concernant la qualité chimique des eaux embouteillées étudiées, les concentrations ne devraient pas être supérieures aux valeurs figurant dans la colonne Valeur Maximale Admissible (VMA).

Paramètres	Unité	VMR	VMA	VmR
Facteurs organoleptiques				
Odeur	Seuil de perception à 25°C	0	3	
Saveur	Seuil de perception à 25°C	0	3	
Couleur réelle	Unité Pt mg/l	5	20	
Turbidité	Uni. de turbidité Néphélo. : NTU	1	5	
Facteurs physico-chimiques				
Potentiel Hydrogène	Unité pH	6,5<pH<8,5	9,2	6
Conductivité	µS/cm à 20°C	1300	2700	110
Minéralisation totale	Résidu sec à 105°C Mg/l	1000	2000	100
Dureté totale	még/l	6		2
Magnésium	Mg : mg/l	100		
Aluminium	Al : mg/l	0,05		
Ammonium	NH ₄ : mg/l	0,05	0,5	
Nitrites	NO ₂ : mg/l		0,1	
Nitrates	NO ₃ : mg/l		50	
Chlorures	Cl : mg/l	300	750	

VMA : Valeur maximale admissible
 VMR : Valeur maximale recommandée
 VmR : Valeur minimale requise

Paramètres	Unité	VMR	VMA	VmR
Sulfates	SO ₄ mg/l	200		
Oxygène	O ₂ mg/l	5<O ₂ <8		
Facteurs indésirables ou Toxiques				
Arsenic	As : mg/l		0,05	
Baryum	Ba : mg/l		1	
Cadmium	Cd : mg/l		0,005	
Cyanures	CN : mg/l		0,1	
Chrome total	Cr : mg/l		0,05	
Cuivre	Cu : mg/l		1	
Fer	Fe : mg/l		0,3	
Fluorures	F : mg/l	0,7	1,5	
Manganèse	Mn : mg/l		0,1	
Mercuré	Hg : mg/l		0,001	
Plomb	Pb : mg/l		0,05	
Hydrogène sulfuré	Non détectables organoléptiquement			
Sélénium	Se : mg/l		0,01	
Zinc	Zn : mg/l		5	
Facteurs d'intérêts biologiques				
Oxydabilité au KMnO ₄	O ₂ : mg/l	2	1	

Facteurs bactériologiques		
Valeurs maximales admissibles (Nb. de germes/100ml)		
Paramètres	VMA	Commentaires
Coliformes totaux		
A - Eau transportée sous canalisation.		
a.1 -Eau désinfectée à l'entrée du système de distribution (0.1<Cl _{2 <td>0</td> <td>Désinfection efficace : turbidité<1NTU pH<8 durée de contact > 30mn 0.2<Cl₂</td>}	0	Désinfection efficace : turbidité<1NTU pH<8 durée de contact > 30mn 0.2<Cl ₂
a.2- Eau non désinfectée à l'entrée du système de distribution.	0 : 98% échantillons/an	3 occasionnellement (pas ds 2 échant. consécutifs)
a.3- Eau dans le réseau de distribution : eau nécessairement désinfectée (0.1<Cl _{2 <td>0 : 95% échantillons/an</td> <td>3 occasionnellement (pas ds 2 échant. consécutifs)</td>}	0 : 95% échantillons/an	3 occasionnellement (pas ds 2 échant. consécutifs)
B - Eau non transportée sous canalisation	10	
C - Eau embouteillée	0	Protection des captages. Faire bouillir l'eau avant de la consommer.
D- Eau approvisionnée en ca de catastrophes	0	
Coliformes fécaux		
A - Eau transportée sous canalisation.		
a.1 -Eau désinfectée à l'entrée du système de distribution (0.1<Cl _{2 <td>0</td> <td>Dans une eau traitée, le dénombrement des germes totaux effectué à l'extrémité du réseau de distribution ne doit pas excéder 20 fois le taux obtenu en début de réseau avant le ou les réservoirs de mise en charge dans 90% des échantillons analysés au cours de l'année.</td>}	0	Dans une eau traitée, le dénombrement des germes totaux effectué à l'extrémité du réseau de distribution ne doit pas excéder 20 fois le taux obtenu en début de réseau avant le ou les réservoirs de mise en charge dans 90% des échantillons analysés au cours de l'année.
a.2- Eau non désinfectée à l'entrée du système de distribution.	0	
a.3- Eau dans le réseau de distribution : eau nécessairement désinfectée (0.1<Cl _{2 <td>0</td> <td></td>}	0	
B - Eau non transportée sous canalisation	0	
C - Eau embouteillée	0	
D- Eau approvisionnée en ca de catastrophes	0	
Germes totaux à 37 et à 22 °C		

Figure 24 : Normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine.

Comparaison entre les échantillons des eaux et les normes marocaines :

En termes de facteurs physico-chimiques :

Composition chimique :

On observe que toutes les eaux embouteillées qui font objet de cette étude respectent les normes marocaines relative à la qualité des eaux car :

- Les concentrations en magnésium ne dépassent pas 100 mg/L comme valeur recommandée.
- Les concentrations en nitrates ne dépassent pas 0,1mg/l comme valeur maximale admissible, les concentrations en chlorures ne dépassent pas 750mg/l comme valeur maximale admissible.

- Les concentrations en sulfates ne dépassent pas 200mg/l comme valeur maximale recommandée, sauf l'eau Contrex qui présente une concentration de sulfates très élevée, la valeur recommandée est de 200 mg/l alors que la concentration en sulfate dans l'eau Contrex est de 1121 mg/l.

Conductivité :

Tous les échantillons des eaux respectent les normes marocaines relatives à la qualité des eaux en ce qui concerne la conductivité. En effet la mesure de conductivité la plus élevée (Contrex 2329 $\mu\text{S/cm}$) ne dépassent pas la valeur maximale admissible qui est de 2700 $\mu\text{S/cm}$.

VI- Impact de la consommation des eaux embouteillées sur l'environnement :

Les plastiques, polymères de composition très variable, sont devenus des objets d'usage courant. Mais ils sont maintenant reconnus comme une source de pollution pour l'environnement. Ils affectent l'ensemble de la planète jusqu'aux régions les plus reculées, telles les calottes glaciaires des zones polaires ou les plus profondes fosses océaniques.

Bien que l'eau puisse être conditionnée dans des bouteilles en verre, des canettes en aluminium et des boîtes en carton, les contenants en plastique représentent de loin les emballages les plus couramment utilisés dans l'industrie. Chaque minute, plus d'un million de bouteilles sont vendues dans le monde et avec l'élimination des bouteilles à usage unique pose la question de la pollution plastique. Cela pose un problème majeur, car les matières plastiques peuvent mettre jusqu'à 1 000 ans à se dégrader.

Il apparaît que la quantité moyenne annuelle de déchets de bouteilles d'eau en PET sur cette période était d'environ 18 millions de tonnes et la quantité de 2021 dépasse déjà 25 millions de tonnes. La figure 25 montre également certaines estimations disponibles du nombre total de bouteilles en PET éliminées. La majeure partie de ces déchets de PET est produite en Amérique du Nord, en Chine et en Europe (Bouhleb et *al.*, 2023).

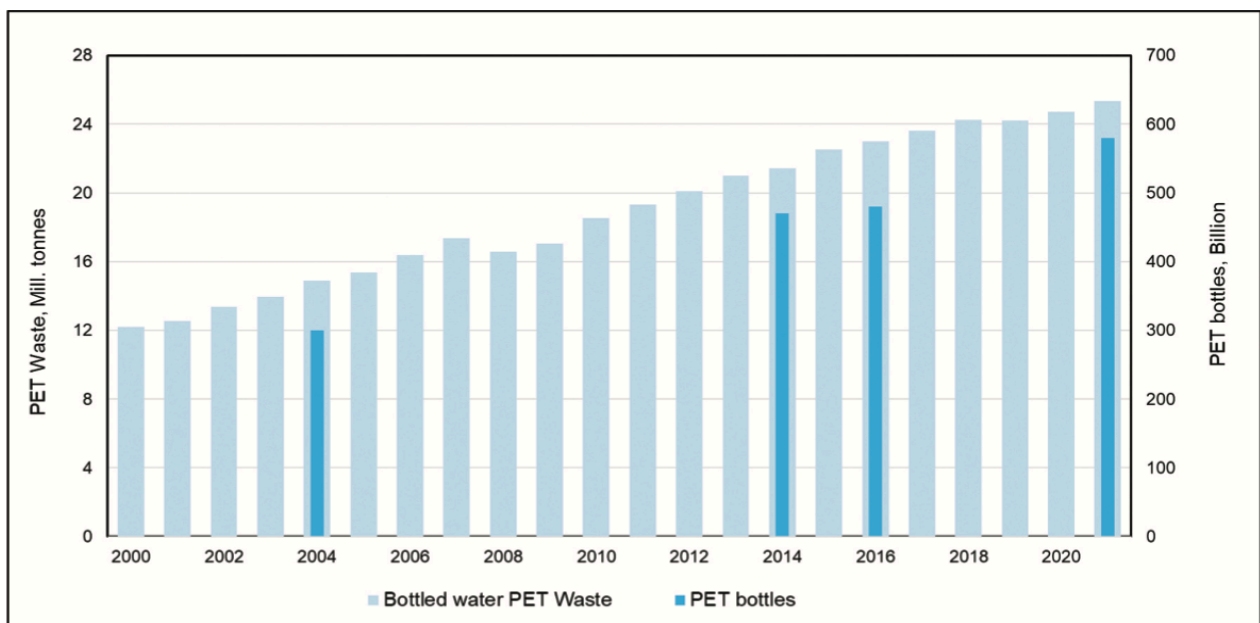


Figure 25 : Série chronologique mondiale des déchets d'eau embouteillée en PET de l'année 2000 à 2021 (Bouhleb et *al.*, 2023)

Solutions :

Il y a un certain nombre de choses que les individus peuvent faire pour réduire l'impact environnemental de la consommation d'eau en bouteille :

- Réduire la consommation d'eau en bouteille.
- Procurez-vous une ou plusieurs bouteilles durables et réutilisables et prenez l'habitude de les remplir en eau de robinet.
- Utiliser les eaux locales à la place des eaux embouteillées.
- Dans les lieux de réunion ou les réunions de bureau, fournissez de l'eau du robinet dans des distributeurs.
- Soutenir l'installation d'un plus grand nombre de fontaines à eau potable dans les lieux publics.
- Soutenir les lois sur la consigne des bouteilles.
- Si vous achetez de l'eau en bouteille :
 - Choisir les marques embouteillées les plus proches de chez vous.
 - Évitez l'eau en bouteille à des milliers de kilomètres de distance.
 - Évitez les petites bouteilles.
 - Remplissez les bouteilles avec de l'eau du robinet pour les réutiliser.
 - Placez les bouteilles dans les bacs de recyclage une fois que vous en avez fini avec elles.

Conclusion générale :

Cette étude des eaux embouteillées a permis de révéler plusieurs points importants tel que la relation du chimisme des eaux avec le contexte géologique. En effet, c'est un facteurs important contrôlant l'évolution hydrochimique des eaux souterraines. Ceci est prouvé en premier lieu par l'analyse des représentations graphiques Shoeller et Piper. Les dix échantillons étudiés ont révélé trois faciès chimiques principaux :

- Faciès bicarbonaté calcique et magnésienne,
- Faciès chloruré sulfaté calcique et magnésienne,
- Faciès bicarbonaté sodique et potassique.

Ces faciès confirment la prédominance des formations carbonatés (Calcaire et dolomie) au niveau des sites de prélèvement de ces eaux. Ceci est confirmé par les données géologiques collectées.

L'analyse en composantes principales (ACP) a, en outre, révéler l'effet de la présence de minéraux évaporitiques (halite et gypse) sur la chimie des eaux marocaine. Elle a, également, permis de classer les eaux étudiées en trois groupes selon l'ordre de minéralisation.

Une commercialisée sous la nomenclature "Eau Minérale Naturelle" n'est pas censée être conforme aux normes de potabilité. En dépit de la forte minéralisation de quelques eaux minérales naturelles (Contrex et Oulmes), toutes les eaux respectent les normes de potabilité chimiques marocaines en vigueur.

En fin on a abordé l'impact des bouteilles en plastique sur l'environnement. A cet égard, pour diminuer cet impact, mieux vaut privilégier les eaux locales, et acheter son eau embouteillée consignée. De nombreuses marques vendent encore des eaux en verre consignées, ces bouteilles peuvent être lavées et réutilisées.

Références bibliographiques :

AHOVEY A. É. Ch., AMADOU SANNI M. et AZONHE H. S. (2022) - Eau en bouteille à la portée de main au Bénin, International Journal of Research in Environmental Science, Vol.8, Issue 4, pp. 10-20.

Benkaddour A. (2023) – Cours LST EE, Faculté des sciences et techniques, Université Cadi Ayad.

Berard P., Baudon-Juvet A. et Liautard P. (1991) - Étude Hydrogéologique et d'Environnement En Amont Hydraulique de la Source Perrier (Zone de Guarrigues et de piémont), Société générale des grandes sources d'eaux minérales Françaises, 124p.

Blavoux B., Nicoud G., Barbet C., Beley J-J., Bligny J-C., Lachassagne P., Le Hec C., Paillet A et Peton D. (2009) - Livret-Guide, Excursion Géologique et Hydrogéologique, Le Gisement des Eaux Minérale d'Evian -Contexte Hydrogéologique- Protection et gestion de l'impluvium, 30p.

Bouhleh Z., kopke J., Mina M. et Smakhtine V. (2023)-Global Bottled Water Industry: A Review of Impacts and Trends, United Nations University, 44p.

Debeglia N. et Greber C. (2009) - Géologie-Hydrogéologique du bassin hydrominéral de Vittel-Contrexéville (Vosges), Nestlé Waters, 10p.

Développement durable, Environnement, Faune et Parc, Québec (2012) - Fiche technique N°4, Réduction de la Consommation d'Eau Embouteillée au Bureau, 4p.

Dominique V. (2009) - Étude de Données Physico-chimique des eaux du Secteur Nord du Piton des Neiges Ile de la Réunion, Géosciences Réunion, 33p.

Elbatloussi D., Cheddadi M., Dadi S., Ruthy I., Orban Ph. Et Dassargues A. (2005) - Carte Hydrogéologique du Plateau d'Oulmès (Maroc), Département de Géologie, École Nationale de l'Industrie Minérale, Service d'Hydrogéologie, Université de Liège, 49p.

Ghalit M., Bouaissa M., Gharibi E., Taupin J-D. et Patris N. (2023) - Hydrogeochemical Characteristics and Isotopic Tools Used to Identify the Mineralization Processes of Bottled Mineral Water in Morocco, Geosciences, Vol.4, n°38, 21p.

Les Eaux Souterraines (2012) - Bureau de Recherche Géologique et Minière, Agence de l'Eau Adour-Garonne, 10p.

Mansouri H. (2019) - Analyse en Composantes Principal (ACP), Département de Mathématiques, Université Mohamed Khider, Biskra, 50p.

Préfecture de Fès, Commune Rurale de Sidi Harazem, Plan d'aménagement du centre Sidi Harazem-Skhinate (2015) - Agence Urbaine et de la sauvegarde de Fès, 69p.

Webographie :

- Site 1 : <https://www.alamyimages.fr/>
- Site 2 : <https://www.grincant.com/>
- Site 3 : <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/cours-ps-1/5eme-ps-1/processus-sauvegarde-ressources.html>
- Site 4 : https://www.boisson-sans-alcool.com/marques_boissons-sans-alcool/
- Site 5 : <https://eaumineralnaturelle.fr>
- Site 7 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Contrex>
- Site 6 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Évian_\(eau_minérale\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Évian_(eau_minérale))
- Site 8 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Vittel_\(eau_minérale\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vittel_(eau_minérale))
- Site 9 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Perrier_\(eau_minérale\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Perrier_(eau_minérale))
- Site 10 : <https://docplayer.fr/45058753-Carte-hydrogeologique-du-plateau-d-oulmes-maroc-notice-explicative.html>
- Site 11 : <http://auiourdhui.com>
- Site 12 : <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>
- Site 13 : <http://www.sthda.com/french/wiki/matrice-de-correlation-guide-simple-pour-analyser-formater-et-visualiser>