

الجمهورية
الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
البي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Hydraulique**

Spécialité : **Hydraulique Urbaine**

Par :

DIB ILYÈS ZINE EDDINE

YADI SALIH

Sujet

**Application de l'analyse multicritères pour la classification chimique
de quelques eaux minérales algériennes commercialisées**

Soutenu publiquement, le **19 Septembre 2020**, devant le jury composé de :

Mme ADJIM Hayet	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Présidente
Mr BENTALHA Chakib	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme LALLAM Faiza	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr BOUMEDIENE Maamar	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Co-encadreur

Promotion : 2019 – 2020

REMERCIEMENTS

Remercions en premier lieu Dieu qui nous a dotés de courage, de volonté et de persévérance pour mener à terme ce travail dans ces circonstances difficiles dues à la pandémie. Nous Le remercions pour la santé et l'inspiration qu'Il nous a accordées. Gloire et louange à Dieu le Miséricordieux.

Nous tenons sincèrement à adresser nos vifs remerciements, avec nos plus profonds respects, à nos encadrants, Monsieur Maâmar BOUMEDIENE et Madame Faïza DEBBAL, Professeurs à l'université de Tlemcen. Ils n'ont pas ménagé leurs efforts et ont fait preuve de professionnalisme dans la direction de notre travail. Leurs conseils instructifs et leurs judicieuses remarques nous ont aidés à mieux finaliser notre mémoire. Nous leur sommes très reconnaissants.

Nous exprimons toute notre gratitude à l'ensemble des dirigeants de l'ADE production Tlemcen, plus précisément au niveau du laboratoire d'analyse, pour leur accueil et leur approbation à concrétiser notre projet de fin d'études. Nous les remercions aussi pour leur bienveillance et leur disponibilité, car, malgré leurs occupations, ils ont pu trouver le temps et l'énergie pour suivre de près le déroulement de notre travail. Nous n'oublions pas de remercier M. DIDI M.A., directeur du Laboratoire de Technologie de Séparation et de Purification de la Faculté des Sciences de Tlemcen qui a accepté de mettre à notre disposition ses appareils de mesure.

Nous remercions l'ensemble des employés de l'ADE production Tlemcen pour toutes les idées et les informations qu'ils nous ont délivrées et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Nous invitons respectueusement les honorables membres du jury à bien vouloir juger notre modeste travail, en espérant que nos résultats répondent à leurs attentes. Nous les remercions avec sincérité. Il s'agit de Madame Hayat DJEDID en sa qualité de présidente et de Monsieur Chakib BENTALHA en sa qualité d'examineur.

Nous exprimons toute notre gratitude aux enseignants du département d'Hydraulique de Tlemcen pour le savoir et la qualité de la formation qu'ils nous ont prodigués, comme nous remercions tout le personnel du département pour leur professionnalisme.

Enfin nous remercions aussi chaleureusement nos parents, nos frères, nos amis et nos camarades pour leurs aides durant tout notre parcours, pour les moments agréables qu'on a passés ensemble, pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes chers frères et sœur pour leur appui et leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

À toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible. Merci d'être toujours présents pour moi.

Je dédie ce travail à tous mes professeurs de la filière hydraulique

À tous mes amis (e).

À tous les étudiants de la filière hydraulique promotion 2015.

DIB IlyesZine Eddine

Dédicaces

Ce modeste travail, je le dédie naturellement à mes parents que j'imagine heureux de me voir motivé à aller jusqu'au bout de mes études et à mes deux admirables frères.

Avec eux tous, j'ai une relation particulière où les discussions scientifiques tiennent une place prépondérante.

Je dédie aussi ce mémoire à mes grands-parents, paternels et maternels qui sont ma véritable école de la vie.

YADISalîh

Résumé

Les eaux minérales sont des eaux souterraines microbiologiquement saines, naturellement pures et qui ont la particularité d'avoir une teneur en minéraux et oligoéléments fixe et constante dans le temps. Bien qu'elles soient soumises à des normes et réglementations strictes que ce soit dans le domaine de l'exploitation, l'embouteillage, l'étiquetage et surtout la composition, chaque eau minérale reste unique du point de vue de sa composition en minéraux et de leurs concentrations.

L'objectif de ce travail est de comparer et de classer plusieurs eaux minérales selon différents critères. On a donc choisi de travailler sur cinq (05) eaux minérales commercialisées en Algérie en l'occurrence: Les eaux minérales de Guedila, Saïda, Mansourah, Nestlé Pure Life (que nous appellerons simplement Nestlé) et Lalla Khedidja.

Après plusieurs analyses faites sur ces eaux, nous avons en premier lieu essayé de les comparer et de les classer selon leur composition chimique et leur degré de potabilité en se servant du diagramme de Schoeller.

En second lieu, nous avons développé une classification chimique complète et plus détaillée de ces eaux, moyennant différentes méthodes d'analyse multicritère. Ces méthodes prennent en considération le poids et l'importance de chaque critère retenu dans le classement de ces eaux.

L'application de l'analyse multicritère a donné de bons résultats quant à la classification de ces eaux.

Mots clés : Eau minérale, analyse physico-chimique, diagramme de Schoeller, Normes de potabilité, Analyse multicritère, ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS ;

Abstract

Mineral waters are microbiologically healthy, naturally pure groundwater which has the particularity of having a fixed and constant mineral and trace element content over time. Although they are subject to strict standards and regulations in terms of operation, bottling, labeling and above all composition, each mineral water remains unique from the point of view of its mineral composition and of their concentrations.

The objective of this work is to compare and classify several mineral waters according to different criteria. We therefore chose to work on five (05) mineral waters marketed in Algeria in this case: Mineral waters from Guedila, Saïda, Mansourah, Nestlé Pure Life and Lalla Khedidja.

After several analyzes made on these waters, we first tried to compare them and classify them according to their chemical composition and their degree of drinkability using the Schoeller diagram. Secondly, we have developed a complete and more substantiated chemical classification of these waters, using different multi-criteria analysis methods. These methods take into consideration the weight and importance of each criterion used in the classification of these waters.

The application of multicriteria analysis has given good results in the classification of these waters.

Keywords: Mineral water, physic-chemical analysis, Schoeller diagram, Potability standards, Multicriteria analysis, ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS;

ملخص

المياه المعدنية هي مياه جوفية صحية من الناحية الميكروبيولوجية، نقية بشكل طبيعي ولها خصوصية وجود محتوى ثابت من المعادن وأثار العناصر بمرور الوقت. على الرغم من أنها تخضع لمعايير وأنظمة صارمة في مجال التشغيل والتعبئة ووضع العلامات، تظل كل المياه المعدنية فريدة من نوعها من وجهة نظر تركيبها المعدنية و من تركيزاتها. الهدف من هذا العمل هو مقارنة وتصنيف العديد من المياه المعدنية وفقاً لمعايير مختلفة. لذلك اخترنا العمل على خمسة (05) مياه معدنية و التي يتم تسويقها في الجزائر و هي :غديلة،سعيدة،منصورة،نستله و لالة خديجة. بعد إجراء العديد من التحليلات على هذه المياه ، حاولنا أولاً مقارنتها وتصنيفها وفقاً لتركيبها الكيميائي ودرجة قابليتها للشرب باستخدام مخطط Schoeller.

ثانياً ، قمنا بتطوير تصنيف كيميائي كامل وموثوق لهذه المياه ، باستخدام طرق تحليل مختلفة متعددة المعايير .تأخذ هذه الطرق في الاعتبار وزن وأهمية كل معيار من هذه المياه.

أعطى تطبيق التحليل متعدد المعايير نتائج جيدة في تصنيف هذه المياه.

الكلمات الرئيسية: المياه المعدنية، التحليل الفيزيائي والكيميائي، مخطط Schoeller ، معايير القابلية للشرب؛
تحليل متعدد المعايير؛ ELECTRE ،PROMETHEE ،TOPSIS

Liste des abréviations

Abréviations	Signification
OMS	l'Organisation Mondiale de la Santé
ONU	l'Organisation des Nations Unies
EMM	L'Entreprise des eaux Minérales de Mansourah
S.P.A	Société Par Action
PET	Poly Ethylène
CO ₂	Dioxyde de carbone
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
O ₂	Oxygène
pH	Potentiel d'Hydrogène
Na	Sodium
K	Potassium
meq	Milliéquivalent
EDTA	Éthylène Diamine Tétra Acétique
Ca	Calcium
Mg	Magnésium
NaOH	Hydroxyde de sodium
T.A	Titre Alcalimétrique
P.P	Phénol Phtaléine
HCl	Acide chlorhydrique
T.A.C	Titre Alcalimétrique Complète
[x]	Elément chimique
r ⁺	Somme concentration des cation s
r ⁻	Somme concentration des anions
r%[X]	Ration chimique d'un élément chimique
Cl	chlorures
N	Normalité de la solution
SO ₄	Sulfates
HCO ₃ ⁻	Bicarbonates
NO ₂ ⁻	Nitrites
TH	La dureté totale
ADE	Algérienne des Eaux
NO ₃ ⁻	Nitrates
AMC	Analyse Multi-Critère
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation METHods for Enrichement Evaluation
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<i>CCi</i>	Coefficient de proximité
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
AHP	Analytic Hierarchy Process

Liste des tableaux

Tableau I : Critères de qualité des eaux minérales [6].....	6
Tableau I.1 : Critères de qualité des eaux minérales (Normes algériennes) [7].....	7
Tableau II.1 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Mansourah.....	10
Tableau II.2 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Guedila.....	12
Tableau II.3 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Lalla Khedidja.....	13
Tableau II.4 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Nestlé.....	14
Tableau II.5 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Saïda.....	15
Tableau IV.1 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Mansourah.....	26
Tableau IV.2 : Résultats des analyses chimiques obtenus au laboratoire pour l'eau minérale de Mansourah.....	26
Tableau IV.3 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Guedila.....	27
Tableau IV.4 : Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Guedila.....	27
Tableau IV.5 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Lalla Khedidja.....	28
Tableau IV.6 : Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Lalla Khedidja.....	28
Tableau IV.7 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Nestlé.....	29
Tableau IV.8 : Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Nestlé.....	29
Tableau IV.9 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Saïda.....	30
Tableau V.1 : Exemples d'application de l'analyse multicritère.....	45
Tableau V.2 : Tableau de performance.....	47
Tableau V.3 : Intensité de préférence.....	49
Tableau V.4 : Echelle de comparaison binaire de Saaty. [27].....	53
Tableau V.5 : Matrice des comparaisons binaires.....	54
Tableau VI.1 : les eaux minérales étudiées.....	56
Tableau VI.2 : Poids des critères.....	57
Tableau VI.3 : Le score de la dureté des eaux.....	58
Tableau VI.4 : Le score de la minéralisation des eaux.....	58
Tableau VI.5 : Les scores de la nature hydrochimique des eaux.....	59
Tableau VI.6 : Les scores de la teneur en nitrate.....	59
Tableau VI.7 : tableau des performances.....	60
Tableau VI.8 : les indices de concordance.....	60
Tableau VI.9 : Les indices de non discordance.....	61
Tableau VI.10 : Surclassement et non surclassement des actions.....	61
Tableau VI.11 : Les intensités de préférence multicritères.....	63
Tableau VI.12 : Les flux sortants et entrants.....	63
Tableau VI.13 : Les flux nets.....	64

Tableau VI.14 : Les performances normalisées.....	65
Tableau VI.15 : Calcul de $\{ e'' \}_{ij}$	65
Tableau VI.16 : Les profils idéal et anti-idéal.....	65
Tableau VI.17: La distance euclidienne de chaque action.....	66
Tableau VI.18 : Les coefficients de proximité ($\{ CC \}_{_i}$).....	66

Liste des figures

Figure IV.1 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Mansourah.....	32
Figure IV.2 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Guedila.....	33
Figure IV.3 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Lalla Khedidja.....	33
Figure IV.4 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Nestlé.....	34
Figure IV.5 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Saïda.....	34
Figure IV.6 : Représentation graphique sur diagramme de Schoeller de la composition chimique des eaux minérale.....	35
Figure IV.7 : Représentation graphique de la dureté totale pour les différentes eaux minérales étudiées.	37
Figure IV.8 : Evolution de la conductivité pour les différentes eaux minérales étudiées.....	37
Figure IV.9 : Variation de la turbidité des Différentes eaux minérales étudiées.....	38
Figure IV.10 : Evolution de la concentration du calcium pour les différentes eaux minérales étudiées.	39
Figure IV.11 : Représentation graphique de la concentration du magnésium pour les différentes eaux minérales étudiées.....	39
Figure V.1: Problématique de choix (Mousseau V. 1993). [23].....	44
Figure V.2 : Problématique de Tri (Mousseau V. 1993). [23].....	44
Figure V.3 : Problématique de Rangement (Mousseau V. 1993). [23].....	45
Figure V.4: La structure hiérarchique.....	53
Figure VI.1 : Surclassement des eaux minérales par la méthode ELECTRE I.....	62
Figure VI.2 : classification des eaux minérales par la méthode PROMETHEE II.....	64
Figure VI.3 : Classification des eaux minérales par la méthode TOPSIS.....	67

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les Eaux Minérales.....	3
I.1. Définition.....	3
I.2. Caractéristiques et composants d'une eau minérale.....	3
I.3. Pourquoi l'eau minérale est-elle si bonne pour la santé ?.....	3
I.4. Les classes d'eaux minérales.....	5
I.5. Normes de qualité d'une eau minérale.....	6
I.6. L'étiquetage des eaux minérales.....	7
I.7. Le système politique des eaux minérales en Algérie.....	8
Chapitre II : Description de quelques eaux minérales algériennes commercialisées.....	9
II.1. Introduction.....	9
II.2. Marques des eaux minérales en Algérie.....	9
II.2.1. L'eau minérale de Mansourah.....	10
II.2.2. L'eau minérale de Guedila.....	11
II.2.3. L'eau minérale de Lalla Khedidja.....	12
II.2.4. L'eau minérale de Nestlé.....	13
II.2.5. L'eau minérale de Saïda.....	14
Chapitre III: Matériel et Méthodes.....	16
III.1. L'échantillonnage.....	16
III.2. Matériels et méthodes.....	16
III.2.1. Mesure de la température.....	16
III.2.2. Mesure du potentiel d'hydrogène (pH).....	17
III.2.3. Mesure de la conductivité.....	17
III.2.4. Mesure de la turbidité.....	18
III.2.5. Mesure du sodium (Na ⁺) et du potassium (K ⁺).....	18
III.2.6. Dosage de la dureté totale par complexométrie (EDTA, Éthylènediaminetétraacétique) :19	
III.2.7. Dosage de calcium.....	20
III.2.8. Dosage de l'alcalinité.....	21
III.2.9. Dosage des chlorures (méthode de MOHR).....	22
III.3. Analyse spectrophotométrique.....	22
III.3.1. Détermination de la salinité :.....	23
III.3.2. Dosage des Sulfates.....	23

III.3.3. Dosage des nitrites.....	24
III.3.4. Calcul des bicarbonates (HCO_3^-).....	24
III.3.5. Calcul du magnésium (Mg^{+2}).....	24
Chapitre IV : Résultats et interprétations.....	25
IV.1. Introduction.....	25
IV.2. Résultats et discussion :.....	26
IV.2.1. L'Eau Minérale de Mansourah.....	26
IV.2.2. L'eau minérale de Guedila.....	27
IV.2.3. L'eau minérale de Lalla Khedidja.....	28
IV.2.4. L'eau minérale de Nestlé.....	29
IV.2.5. L'eau minérale de Saïda.....	30
IV.3 Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et ceux du laboratoire :.....	31
IV.4. Diagramme de Schoeller.....	34
IV.5. Comparaison de quelques résultats de la qualité chimique des eaux minérales:.....	36
IV.6. Interprétation des résultats.....	40
Chapitre V : Méthodes d'analyses multicritères.....	42
V.1. Introduction:.....	42
V.2. Concepts et terminologie :.....	42
V.3. La problématique de décision :.....	43
V.3.1. Problématique de choix P_α :.....	43
V.3.2. Problématique de tri P_β :.....	44
V.3.3. Problématique de rangement P_γ :.....	44
V.3.4. Problématique de description P_δ :.....	45
V.4. Les Méthodes d'analyse multicritère :.....	45
V.4.1 Les méthodes de surclassement :.....	46
V.4.1.1. La méthode ELECTRE I (Roy B. 1968).....	47
V.4.1.2. La Méthode PROMETHEE.....	48
V.4.1.3. La méthode TOPSIS.....	51
V.4.2. Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse.....	51
V.4.2.1. La méthode SMART.....	52
V.4.2.2. La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) :.....	52
V.5. Conclusion :.....	55
Chapitre VI : Application de l'analyse multicritère.....	56
VI.1. Introduction :.....	56

VI.2. Tableau de performance :	56
VI.2.1. Les critères inclus dans la classification :	56
VI.2.2. Les actions :	56
VI.2.3. Le poids des critères :	57
VI.3. Les scores des actions :	57
VI.3.1. La dureté (TH) :	58
VI.3.2. Minéralisation (mg/l) :	58
VI.3.3. Nature hydrochimique :	59
VI.3.4. Teneur en nitrate :	59
VI.4. Tableau des performances :	59
VI.5. Application de l'AMC et classification des eaux minérales étudiées :	60
VI.5.1. La méthode ELECTRE I :	60
VI.5.2. Méthode PROMETHEE II.....	63
VI.5.3. La méthode TOPSIS :	64
VI.6. Conclusion.....	67
Conclusion Générale.....	68

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau est sans aucun doute la ressource la plus importante et la plus indispensable sur cette terre. Elle est utilisée dans tous les domaines d'activités de l'homme : domestiques, industrielles ou agricoles. Nos corps étant composés essentiellement d'eau, il est indispensable d'en consommer régulièrement pour nous hydrater et préserver notre santé.

Cependant, l'eau que nous buvons doit être propre et saine pour notre organisme. Les eaux minérales sont les eaux les plus saines pour la consommation. Elles sont naturellement pures et sont prélevées directement des sources sans subir des opérations de traitement. A cet effet, leur exploitation est très réglementée.

Sur le marché algérien, en plus des eaux de source, il existe plusieurs types et catégories d'eaux minérales qui sont commercialisées. Mais y'a-t-il une eau qui est meilleure à boire que les autres ?

Il est difficile de répondre à cette question puisque tout dépend du besoin de la personne qui la consomme. Pour un sportif, par exemple, des eaux riches en bicarbonates et en magnésium sont recommandées tandis que pour les personnes âgées se sont des eaux riches en calcium qui le sont, etc.

Dans ce travail, nous avons essayé de faire une classification chimique de cinq eaux minérales vendus en Algérie (eaux minérales de Mansourah, de Guedila, de Lalla Khedidja, de Nestlé et de Saïda) selon leurs capacités à pouvoir être bues régulièrement et quotidiennement par la population, sans spécifier un type de personne précis.

Pour effectuer cette classification, nous avons utilisé des méthodes dites d'analyse multicritère, qui sont généralement appliquées dans les problèmes de prise de décision et nous avons illustré leurs efficacité dans notre domaine.

Pour faire ce travail, on a structuré notre mémoire en cinq chapitres comme suit :

- Le premier chapitre donne des généralités sur les eaux minérales principalement en termes de définitions, de caractéristiques, de classification, de composantes et de normes.

Introduction générale

- Le second chapitre est une brève description de quelques eaux minérales algériennes.
- Le troisième chapitre présente le matériel et les méthodes analytiques utilisées lors du travail expérimental.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats expérimentaux auxquels on a abouti.
- Dans le cinquième chapitre, nous soulignons certaines méthodes d'analyse multicritère, en particulier nous faisons une présentation des méthodes ELECTRE I, PROMETHEE II et TOPSIS.
- Le sixième chapitre expose l'application de ces trois méthodes d'analyse multicritère pour déterminer la classification des cinq eaux minérales considérées.

Le document s'achève enfin par une conclusion générale.

Chapitre I: Généralités sur les Eaux Minérales

Chapitre I: Généralités sur les Eaux Minérales

I.1. Définition

L'eau minérale est une eau souterraine microbiologiquement saine, naturellement pure et qui a la particularité d'avoir une teneur en minéraux et oligoéléments fixe et constante dans le temps, contrairement aux eaux de sources qui elles ont une teneur variable. Elle est mise en bouteille directement de la source sans contact avec l'extérieur et sans risque de pollution. Elle ne subit donc aucun traitement chimique de désinfection.

Les eaux minérales sont soumises à des normes et réglementations strictes et font l'objet de plusieurs contrôles quotidiens qui garantissent leurs qualités.

I.2. Caractéristiques et composants d'une eau minérale

Chaque eau est composée d'un bon nombre de minéraux. Les eaux ont toutes des propriétés différentes, compte tenu de leurs compositions et de leurs concentrations en minéraux. Cela est dû aux types de roches que les eaux traversent et au temps qu'elles y passent. C'est ce qui induit la différence de goût et de saveurs de chaque eau. Néanmoins, les eaux minérales ont la particularité d'avoir une composition en minéraux qui reste stable et donc deux bouteilles ou deux lots différents d'une même eau minérale auront les mêmes propriétés.

Même si les concentrations changent, les eaux minérales restent globalement composées des mêmes minéraux. On y trouve majoritairement : du calcium, du magnésium, du sodium, du potassium, des chlorures, des bicarbonates, des sulfates, des nitrates.

On peut aussi retrouver plus rarement et en moins grandes quantités : du fluorure, de la silice ou encore des métaux lourds tels que le plomb ou le chrome.

I.3. Pourquoi l'eau minérale est-elle si bonne pour la santé ?

En vertu de sa composition stable en minéraux et en oligo-éléments, l'eau minérale naturelle peut se voir reconnaître des propriétés favorables à la santé par des organismes habilités. Cette caractéristique n'est cependant plus exigée dans certains pays et l'OMS indique que les "effets bénéfiques n'ont jamais été sérieusement prouvés". L'eau minérale ne serait de ce fait pas meilleure pour la santé qu'une eau de source ou de robinet par exemple, mais le débat reste encore ouvert dans la communauté scientifique.

Dans le même registre le professeur Marc Henry, chercheur en chimie et spécialiste de l'eau, explique dans l'une de ses conférences [1] que l'eau qu'on boit n'est pas faite pour nous apporter les apports en minéraux dont a besoin notre corps mais pour le nettoyer et l'hydrater.

En effet si on prend à titre d'exemple les besoins quotidiens moyens en calcium pour un adulte, qui sont de 900 mg/j, et la concentration en calcium de la plupart des eaux minérales on comprend vite que l'apport que nous fournissent ces eaux est dérisoire. L'eau minérale SAÏDA par exemple contient 68mg de calcium par litre. Il nous faudra donc boire plus de 13 litres par jour si on veut compléter notre apport quotidien en calcium.

Il y a cependant des eaux minérales très chargées en tels ou tels minéraux qui sont conseillées dans certains cas ou certaines maladies. On peut citer les eaux riches en :

- Bicarbonates : ces derniers interviennent de façon indirecte sur la santé, notamment quand ils sont associés au sodium. Les eaux fortement bicarbonatées (>1000 mg/L) peuvent alors être indiquées en cas de digestion difficile ;
- Calcium : il favorise la minéralisation des os. Les eaux riches en calcium (>150 mg/L) sont donc indiquées à tous et plus particulièrement aux personnes souhaitant compléter des apports médicamenteux ou alimentaires ;
- Fluor : il prévient les caries et participe à la minéralisation des dents. Les besoins en fluor sont variables en fonction de l'âge, mais un apport de 0,5 mg/jour est suffisant ;
- Magnésium : il est essentiel au fonctionnement des cellules. Des eaux à fortes teneurs en magnésium (> 50 mg/L) sont également indiquées en cas de stress et de fatigue ;
- Sodium : agissant sur le rythme cardiaque et sur les muscles, les eaux riches en sodium (>150 mg/L) peuvent être recommandées aux sportifs exerçant des activités d'endurance ;
- Sulfates : les eaux riches en sulfates (>300 mg/L) ont des effets diurétiques et laxatifs. Elles seront donc préconisées lors de certains dysfonctionnements rénaux ou bien lors d'épisodes de constipation [2], [3].

Une eau très chargée en minéraux n'est cependant pas forcément adaptée à une consommation quotidienne. Les spécialistes recommandent de diversifier les eaux qu'on boit plutôt que de rester sur la même.

On peut néanmoins considérer que l'eau minérale est bonne pour la santé du fait qu'elle ne subit aucun traitement ni aucune manipulation chimique et donc qu'elle est la plus saine possible.

I.4. Les classes d'eaux minérales

Il existe autant d'eaux minérales qu'il existe de sources, chacune ayant sa propre composition en minéraux ; on les classe toutefois selon les critères suivants :

- La teneur en gaz carbonique,
- Le degré de minéralisation,
- La composition physicochimique.

a) Selon la teneur en gaz carbonique :

On distingue :

- L'eau minérale naturelle non gazeuse.
- L'eau minérale naturelle naturellement gazeuse.
- L'eau minérale naturelle dégazéifiée.
- L'eau minérale naturelle renforcée au gaz carbonique de la source.
- L'eau minérale naturelle gazéifiée.

b) Selon le degré de minéralisation :

La composition minérale des eaux en question dépend de la nature des roches qu'elles traversent et du temps qu'elles mettent à les traverser.

On retrouve dans ce cas trois catégories :

- **Une eau très faiblement minéralisée**: la teneur en sels minéraux est inférieure à 50 mg/L.
- **Une eau faiblement minéralisée ou oligo-minérale**: la teneur en sels minéraux est inférieure à 500 mg/L
- **Une eau riche en sels minéraux** : la teneur en sels minéraux est supérieure à 1500 mg/L

Ces teneurs en sels minéraux sont calculées comme résidus après évaporation de l'eau à 180°C. (Résidus à sec) [4].

c) Selon la composition physicochimique :

Il existe principalement cinq catégories d'eaux minérales:

- Les eaux bicarbonatées : bonnes pour traiter les affections du foie et des intestins ;

- Les eaux sulfatées : bonnes pour traiter les affections des reins, de la peau (brûlures, eczémas, cicatrices) ;
- Les eaux sulfurées : bonnes pour les muqueuses et pour les affections respiratoires ;
- Les eaux chlorurées : bonnes pour les processus de croissance ;
- Les eaux oligométalliques : bonnes pour les rhumatismes et les affections neurologiques [5].

I.5. Normes de qualité d'une eau minérale

On entend par normes de qualité des eaux minérales le seuil maximal à ne pas dépasser de certains éléments contenus dans l'eau. La plupart des pays ayant leurs propres normes, il en existe plusieurs. Cependant, celles qui sont souvent prises en référence sont les normes du CODEX ALIMENTAIRE, normes décidées en commun par l'Organisation des Nations Unies (ONU) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Tableau 01 : Critères de qualité des eaux minérales [6].

Élément chimique	Concentration maximale admissible (mg/l)
Antimoine	0.005
Arsenic	0.01
Baryum	0.7
Borate	5
Cadmium	0.003
Chrome	0.05
Cuivre	1
Cyanure	0.07
Fluorure	-
Plomb	0.01
Manganèse	0.4
Mercure	0.001
Nickel	0.02
Nitrate	50
Nitrite	0.02
Sélénium	0.01

Pour le Fluorure, si l'eau contient plus de 1 mg/l, l'expression « contient du fluorure » doit figurer sur l'étiquette. Si elle contient plus de 1.5 mg/l, l'expression qui doit figurer devient: Ce produit ne convient pas aux nourrissons, ni aux enfants de moins de sept ans.

Tableau II.1 : Critères de qualité des eaux minérales (Normes algériennes) [7].

Élément chimique	Concentration maximale admissible (mg/l)
Antimoine	0.005
Arsenic	0.05
Baryum	1
Borate	5
Cadmium	0.003
Chrome	0.05
Cuivre	1
Cyanure	0.07
Fluorure	5
Plomb	0.01
Manganèse	0.1
Mercure	0.001
Nickel	0.02
Nitrates	50
Nitrites	0.02
Sélénium	0.05

I.6. L'étiquetage des eaux minérales

On trouve sur les étiquettes des eaux minérales plusieurs informations. Certaines sont obligatoires :

- Le nom de la source d'où est exploitée l'eau.
- Le lieu de la source (ville, pays).
- La composition de l'eau en minéraux, leurs concentrations et le PH.
- La nature de l'eau (non gazeuse, naturellement gazeuse, gazéifiée,...).
- La quantité d'eau contenue dans la bouteille.
- La date limite de consommation, précédée par l'expression « A consommer de préférence avant fin ».

- Le numéro du lot.
- La mention « Ce produit ne convient pas aux nourrissons, ni aux enfants de moins de sept ans » si le taux de fluorure dépasse les 1.5 mg/l [8].

D'autres informations peuvent être rajoutées par les marques pour mieux informer les consommateurs sur leurs choix, telles que les conditions de conservation de la bouteille ou encore le dessin indiquant si la bouteille est recyclable. Mais ces informations ne doivent pas être de nature à induire l'acheteur en erreur, notamment sur les caractéristiques de l'eau ou en attribuant à cette dernière des effets ou propriétés qu'elle ne posséderait pas [9].

Enfin l'espace restant est utilisé à des fins de marketing visant à attirer le consommateur. On y trouve souvent des slogans, des dessins ou images de nature, montagnes, volcans et autres, et aussi parfois l'histoire de la marque et de la source [10].

I.7. Le système politique des eaux minérales en Algérie

Depuis l'arrêté interministériel du 22 janvier 2006, le système politique des eaux minérales en Algérie s'est grandement renforcé. En effet ces nouveaux textes essayent de répondre au mieux aux normes internationales et visent deux objectifs fondamentaux qui sont : le respect des qualifications requises pour la sélection, la dénomination des types d'eaux (eaux de sources et eaux minérales) et le respect de l'environnement.

Aussi pour l'exploitation et la production de ces eaux, il est aujourd'hui obligatoire d'obtenir l'autorisation des pouvoirs publics centraux. Celle-ci n'est délivrée qu'après l'étude et l'analyse de l'eau à exploiter, et l'étude environnementale. Si ces dernières sont concluantes, l'appellation 'eau de source' peut être donnée. La dénomination 'eau minérale' quant à elle n'est attribuée qu'après un suivi de l'eau en question pendant une année au bout de laquelle on doit en prouver la stabilité des teneurs en minéraux. Quant au volet commercialisation, a été rajoutée l'obligation de mentionner sur les étiquettes des bouteilles les éléments contenus dans l'eau et leurs concentrations [7].

Chapitre II : Description de quelques eaux minérales algériennes commercialisées

Chapitre II : Description de quelques eaux minérales algériennes commercialisées

II.1. Introduction

Le secteur de l'eau conditionnée en Algérie a vécu ces dernières années un développement exceptionnel. Ce développement s'est concrétisé par l'implantation de dizaines d'unités d'exploitation et de production des eaux conditionnées à travers l'ensemble du territoire national. Il a été aussi accompagné par une augmentation exceptionnelle de la consommation dont la part par habitant a remarquablement évolué en vingt ans (4 L/habitant/an en 1989 à 22 L/habitant/an en 2007). [7]

L'Algérie couvre 98% de ses besoins dans les boissons gazeuses, les jus et l'eau. Les marques produites et distribuées sont composées de 17 eaux de source dont une est gazéifiée, 'Cordial' et 23 marques d'eau minérale naturelle dont deux sont gazeuses 'Mouzaïa' et 'Ben Haroun'

II.2. Marques des eaux minérales en Algérie

Plus de 40 marques d'eaux minérales (et eaux de source) sont commercialisées sur le marché Algérien :

- Les Eaux minérales ; on y trouve : Ifri, Mansourah, Toudja, Golea, Aghbalou (w Bejaia), Efren (w Béjaia), Saïda, Guedila, Chifaa, Lalla Khedidja, Mouzaïa, Sidi El Kébir, Messerghin, Blida, Ben Haroun, Hayat Youkous, Tessala, Hammamat, Eau minérale Batna, Togi, Alam (w Bejaia), Mansourah (Tlemcen), etc...

Les eaux de sources ; telles que : Ayris, Righia, Sidi Rached,

Notre travail a été consacré essentiellement aux 5 marques d'eaux minérales suivantes:

- Les eaux minérales de Mansourah,
- Les eaux minérales de Guedila ,
- Les eaux minérales de Lalla Khadidja,
- Les eaux minérales de Nestlé ,
- Les eaux minérales de Saïda.

II.2.1. L'eau minérale de Mansourah

A/ Présentation de l'entreprise

L'entreprise des eaux minérales de Mansourah par abréviation EMM, étant une Société par action S.P.A dont le siège et l'unité sont situés à Mansourah route de Béni mester à 5 Km du centre de la ville de Tlemcen et à moins de 20 Km de l'aéroport internationale Zenâta et de 60 Km du port de Ghazaouet

B/ Le site d'exploitation et son environnement

Les structures de conditionnement de l'eau de Mansourah sont implantées à côté de la zone de captage dans un site isolé en pleine campagne. Cette eau est classée eau minérale naturelle suite à son captage dans les profondeurs de la nappe aquifère. L'eau de Mansourah est soumise à des contrôles stricts de qualité avant, pendant et après avoir été embouteillée.
[11]

C/ La géologie

Le site de captage est constitué d'une couche d'argile superficielle protège la source, et plus profondément il y a majoritairement des formations calcaro-dolomitiques (calcaire et dolomie). Les montagnes de Tlemcen ou le captage est implanté constituent un important réservoir d'eau naturelle.

D/ La minéralogie

. La minéralisation de l'eau minérale Mansourah est consignée dans le tableau II.1 ci-après :

Tableau II.1 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Mansourah (selon l'étiquette).

Composition	mg/l
Calcium	85
Magnésium	37
Sodium	30
Potassium	2
Sulfates	53
Bicarbonates	362
Chlorures	48
Silice	12.1
Nitrates	12
Nitrites	0.00
pH	7
Résidus à sec (180)	660

E/ Marketing et distribution

L'entreprise Mansourah a tenu à se développer et à étendre son réseau de livraison à domicile, et plusieurs collaborations avec différentes institutions ont été faites comme :

- Les hôtels
- Les hôpitaux
- Les dépositaires grossistes d'eau minérale

L'entreprise vise à atteindre des objectifs bien ciblés dont :

- L'accroissement des flottes de distribution : Véhicules lourds au tonnage dépassant les 70 tonnes afin d'augmenter au maximum ses capacités de distribution,
- La multiplication des points de vente à travers tout le territoire national,
- Le développement accru des offres promotionnelles.

II.2.2. L'eau minérale de Guedila

A/ Présentation de l'entreprise

Guedila est une marque algérienne d'eau minérale créée en 2004 prélevée de la source Guedila et exploitée par la société Guedila sur la commune de Djemorah dans la wilaya de Biskra dans le sud-est algérien.

B/ Localisation

La marque prélève son eau de la source Guedila qui jaillit au pied du mont du même nom du côté sud de la chaîne montagneuse de l'Aurès sur la commune de Djemorah. [12]

C/ Minéralogie

Notons d'abord que la géologie de la région aux alentours de la source est principalement constituée de calcaire. La minéralisation de l'eau minérale Guedila est consignée dans le tableau II.2 ci-après :

Tableau II.2 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Guedila (selon l'étiquette)

Composition	mg/l
Calcium	78
Magnésium	37
Sodium	29
Potassium	2
Sulfates	95
Chlorures	40
Nitrates	4.5
Nitrites	< 0.01
pH	7.35
Résidus à sec (180)	564

II.2.3. L'eau minérale de Lalla Khedidja

A/ Présentation de l'entreprise

Lalla Khedidja est une marque d'eau minérale appartenant à Cevital Agro-industrie, filiale du Groupe Cevital créé en 1998.

B/ Localisation et géologie

L'eau minérale Lalla Khedidja prend son origine dans les monts enneigés du Djurdjura dans le nord algérien. En s'infiltrant lentement au travers des roches, elle se charge naturellement en minéraux. C'est une eau de montagne, oligo-minérale non gazeuse. [13]

La nature dominante des roches de cette région est principalement de type calcaire.

C/ Minéralisation

La minéralisation de l'eau minérale Lalla Khedidja est consignée dans le tableau II.3 suivant :

Tableau II.3 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Lalla Khedidja (selon l'étiquette)

Composition	mg/l
Calcium	53
Magnésium	7
Sodium	5.5
Potassium	0.54
Sulfates	7
Fluor	0.26
Bicarbonates	160
Chlorures	11
Nitrates	0.42
Nitrites	< 0.01
pH	7.22
Résidus à sec (180)	187

D/ Marketing

Pour préserver la pureté et les qualités originelles de l'eau minérale Lalla Khedidja. La société puise l'eau directement à la source. Elle la transporte ensuite par des conduites spéciales en inox et embouteillée directement à l'unité de production d'AGOUNI GHEGHRANE (TiziOuzou).

Lalla Khedidja est disponible sous emballage PET en deux formats ; familial 1.5 L et individuel 0,5 L [13]

II.2.4. L'eau minérale de Nestlé

A/ Présentation de l'entreprise

Nestlé Waters est une filiale du groupe suisse Nestlé (division eau), qui regroupe ses activités dans les eaux en bouteille. Elle est no 1 mondial du secteur

B/ Localisation

La source Taberkachent exploitée par la firme Nestlé Waters Algérie est située dans la wilaya de Blida. Elle est exploitée sous le nom de Pure Life comme toutes les sources auxquelles a eu accès la firme de part le monde.

C/ Minéralisation

La minéralisation de l'eau minérale Nestlé est consignée dans le tableau II.4 suivant :

Tableau0II.4 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Nestlé (selon l'étiquette)

Composition	mg/l
Calcium	55
Magnésium	17
Sodium	> 12
Potassium	0.5
Sulfates	33
Silice	12
Bicarbonates	210
Chlorures	> 15
Nitrates	4.6
Nitrites	< 0.01
pH	7.8
Résidus à sec (180)	372

II.2.5. L'eau minérale de Saïda

A/ Présentation

Saïda est une marque algérienne des eaux minérales embouteillées portant le même nom de la ville dont provient la source. L'entreprise propose aussi des boissons non avec son partenaire japonais Suntory. [1][4]

B/ Minéralisation

La minéralisation de l'eau minérale Saïda est consignée dans le tableau II.5 suivant :

Tableau II.5 : Données sur la minéralisation de l'eau minérale de Saïda (selon l'étiquette)

Composition	mg/l
Calcium	68
Magnésium	50
Sodium	58
Potassium	2
Sulfates	65
Bicarbonates	376
Chlorures	81
Nitrates	15
Nitrites	Absence
PH	7.5
Résidus à sec (180)	478

C/ Développement et marketing

Inaugurées depuis 1967, la marque tient toujours sa place parmi les leaders malgré la concurrence accrue au niveau local. Grace notamment aux stratégies de ventes et de distributions adoptées, en collaborant avec des personnels qualifiés (quasiment 700 employés).

La compagnie prépare le lancement d'autres produits de la même catégorie (jus, boissons énergisantes, ...) en visant le marché international.

Chapitre III : Matériel et Méthodes

Chapitre III: Matériel et Méthodes

III.1. L'échantillonnage

L'échantillonnage est le prélèvement d'échantillons selon une procédure spécifiée. Il est utilisé pour faire des déclarations fiables sur la qualité, l'état ou la composition d'une matière particulière.

L'échantillon prélevé doit être assez petit pour être facilement transportable et manipulable tout en comportant une quantité suffisante pour être représentatif de l'ensemble duquel il est prélevé. Il doit être manipulé de manière à ce que sa composition ne soit modifiée au cours d'aucune étape (transport, stockage, manipulation,..) et toutes les précautions possibles doivent être prises afin d'éviter sa contamination ou un changement de composition [15].

Les bouteilles d'échantillonnage doivent être fermées et conservées dans un endroit propre. L'équipement utilisé pendant les prélèvements doit aussi rester propre. L'opérateur doit s'assurer que ses mains ne sont pas souillées et porter des gants jetables, neufs et propres [16].

L'échantillon doit toujours être parfaitement identifié et porter le lieu et la date. Il est bon de noter toutes les circonstances plus ou moins anormales pouvant survenir et qui peuvent fausser le résultat tels que :

- L'échappement de gaz dissous: CO₂, H₂S ou inversement dissolution des gaz atmosphériques (O₂, CO₂).
- La précipitation de la substance peu soluble.
- L'adsorption sur les parois du contenant ou inversement dissolution du verre.
- Une photosynthèse par les algues microscopiques, sous l'action de la lumière.
- Une oxydation (ou réduction) chimiques [17].

III.2. Matériels et méthodes

III.2.1. Mesure de la température

La température d'une eau minérale ou, plus généralement, d'une eau potable est un facteur assez important ; en effet de façon générale plus la température d'une eau est élevée plus il y a risque de réactions chimiques susceptibles de détériorer la qualité de l'eau. Une eau de boisson est idéalement consommable lorsque sa température varie entre 9 et 12°C [17].

Dans notre cas, la mesure de la température a été effectuée grâce au thermomètre intégré de l'appareil de mesure de la conductivité.

III.2.2. Mesure du potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est l'une des mesures que l'on doit effectuer le plus fréquemment ; il est relié à la teneur en ions H^+ et aussi à l'acidité et l'alcalinité de l'échantillon. Le pH-mètre est l'appareil le plus utilisé pour la mesure du pH.

Mode opératoire

Brancher le pH-mètre, le laisser se stabiliser pendant quelques minutes, installer les électrodes aux entrées correspondantes sur l'appareil, et :

- Etalonner l'appareil à l'aide d'une solution tampon, ensuite rincer l'électrode avec de l'eau distillée et avec l'échantillon à analyser,
- Amener l'échantillon d'eau à analyser à la température désirée,
- Plonger l'électrode dans l'échantillon à analyser et lire la valeur de pH directement,
- Après chaque détermination du pH, on retire l'électrode, on la rince et à la fin de l'expérience, on la laisse tremper dans de l'eau distillée.

III.2.3. Mesure de la conductivité

La conductivité traduit la concentration en minéraux dissous dans l'eau; elle est proportionnelle au degré de minéralisation et varie en fonction de la température. La détermination de la conductivité de l'eau minérale a été faite en utilisant un conductimètre .

1. Principe :

Le conductimètre possède une cellule conçu pour donner une lecture précise de la conductivité en $\mu S/cm$ directement sur le cadran digital.

2. Mode opératoire :

- Régler l'appareil,
- Rincer la cellule du conductimètre avec de l'eau distillée, puis avec l'échantillon,
- Mettre l'échantillon à analyser dans l'appareil,
- Lire les valeurs de la conductivité et la température de l'échantillon affichées sur l'écran de l'appareil.

III.2.4. Mesure de la turbidité

La turbidité d'une eau est déterminée par sa teneur en matières en suspension (grains de silice, matière organique, limons,...). Lorsque cette teneur est élevée, l'eau se trouble et forme d'importants dépôts dans la bouteille.

La turbidité d'une eau minérale doit être maintenue inférieure à 1 NTU. Elle se mesure à l'aide du turbidimètre [17].

Mode opératoire

Une cuvette propre de mesure est remplie avec l'échantillon à analyser, bien homogénéisée et la mesure est effectuée rapidement. Il est nécessaire de vérifier l'absence de bulles d'air avant la mesure. La valeur est obtenue directement sur le cadran du turbidimètre en NTU.

III.2.5. Mesure du sodium (Na⁺) et du potassium (K⁺)

L'analyse du sodium (Na⁺) et potassium (K⁺) a été effectuée, au niveau du laboratoire de Technologie de Séparation et de Purification de la Faculté des Sciences de Tlemcen, à l'aide d'un photomètre à flamme qui permet le dosage simultané du sodium et potassium, ainsi que, suivant l'option choisie, le dosage du lithium ou du calcium.

1. Principe

La méthode consiste à chauffer les ions métalliques d'un échantillon dans le but de capturer les émissions lumineuses provenant de leur excitation à l'aide d'un détecteur. Ainsi, un système avec un gaz vecteur emporte l'échantillon nébulisé dans une flamme, où le processus d'excitation a lieu. Comme dans plusieurs méthodes analytiques, il doit y avoir un système d'étalonnage pour quantifier la présence d'un métal dans un échantillon.

Les échantillons et les solutions étalonnés doivent être dilués à 1/100 ml dans l'eau distillée.

Avant chaque mesure on a effectué l'étalonnage de l'appareil par de l'eau distillée (lorsque la mesure de zéro est stable : Na = 001, K = 003) et le calibrage par la solution étalonnant Na = 140 meq/l, K = 4,0 meq/l (lorsque la mesure est stable: Na = 100, K = 088), les mesures sont effectuées dans la plage du sodium (Na⁺) variant de 120 à 160 meq/l .

2. L'utilisation:

1/ Mise sous tension:

- Mettre l'interrupteur secteur situé sur la face arrière.
- Ouvrir l'arrivée de gaz.
- Vérification du siphon pour remplir à l'eau distillée.
- Laisser l'appareil en préchauffage (15 min).

2/ Mode initial :

La gamme de dosage sélectionnée est le mode (1h) avec mesure en haute sensibilité sur le potassium.

La plage :

Na ⁺	→	120 à 160 meq/l.
K ⁺	→	0 à 25,5 meq/l.

3. Mode opératoire:

- Les échantillons à doser ainsi que la solution étalonnée doivent être préalablement dilués au 1/100 en eau distillée.
- Placer l'aiguille dans un récipient contenant de l'eau distillée.
- Essuyer l'aiguille de prélèvement avant de la plonger dans la solution étalonnée préalablement diluée.
- Utiliser la touche [CAL] pour valider le réétalonnage.
- Essuyer l'aiguille avant de la plonger dans le 1^{er} échantillon.

Les échantillons analysés et leurs résultats sont donnés directement par l'afficheur de l'appareil en meq/l.

III.2.6. Dosage de la dureté totale par complexométrie (EDTA, Éthylènediaminetétraacétique) :**Principe :**

La mesure est un dosage volumétrique par un réactif titrant complexant, l'EDTA (sel tétrasodique de l'acide éthylène diamine tétra-acétique).

L'EDTA a la propriété de se combiner avec les ions calcium puis magnésium pour former des composés solubles, les chélates.

La fin du dosage est décelée par la couleur bleue de l'indicateur coloré (Indicateur Net), étant violet tant que les ions magnésium restent à l'état libre en solution.

Réactifs utilisés :

- Solution de EDTA 0,02 N.
- Solution étalon de calcium à 0,4 g/l.
- Solution tampon.

Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer de 250 ml, on verse 10 ml d'eau. On chauffe avec un bain marie à une température d'environ 60°C puis on ajoute 0,5 ml de la solution tampon (pH = 9,5 – 10) et (2) gouttes d'indicateur coloré NET. On verse la solution d'EDTA jusqu'à virage du rouge en bleu vert. La valeur de la dureté totale est donnée par l'expression suivante :

$$TH = (N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times 1000 / V_0$$

où :

TH signifie titre hydrotimétrique (dureté totale) en meq g, 1 meq g = 5°f.

$$TH = (N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times 1000 / V_0 \times 5.$$

N_{EDTA} : normalité de l'EDTA.

V_{EDTA} : volume de l'EDTA.

V_0 : volume de l'échantillon..

III.2.7. Dosage de calcium

Principe :

Pour déterminer la concentration en calcium, on utilise l'EDTA comme complexant. Au paravent on précipite le magnésium sous forme de $Mg(OH)_2$ vers $pH = 12$ par addition de la soude, l'indicateur utilisé est sensible aux sels ions Ca^{+2} [3].

C'est la Murexide qui répond à cette condition, connaissant la dureté totale d'une part et la dureté calcique d'autre part, il est facile par différence de calculer la dureté magnésienne qui est, pour la plupart des eaux minérales, inférieure à la dureté calcique.

Réactifs utilisés :

- Solution d'EDTA (0,02 N).
- Solution de NaOH.
- Murexide.

Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer de 250ml, on prélève 10ml d'eau à analyser. On ajoute 0,4ml de solution NaOH, une pincée de Murexide puis la solution jusqu'à obtenir du rose pourpre.

Expression des résultats :

$$T_{enCa^{+2}} = (N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times V_0 \times 20 \text{ (mg/l)}$$

Les calculs : la dureté totale est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$T_{Ca^{+2}} = (N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times 1000 / V_0.$$

avec :

$T_{Ca^{+2}}$: concentration de calcium.

N_{EDTA} : normalité de l'EDTA.

V_{EDTA} : volume de l'EDTA.

V_0 : volume de l'échantillon.

III.2.8. Dosage de l'alcalinité

A/ Détermination du Titre Alcalimétrique (T.A)

1. Principe :

Cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence de la phénolphtaléine (P.P).

Réactifs utilisés :

- Acide chlorhydrique HCl 0,1 N ou H₂SO₄.
- Solution phénolphtaléine.

2. Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer de 250 ml, on verse 10 ml d'eau à analyser, on ajoute 3 gouttes de solution P.P. Une couleur rose doit se développer dans le cas contraire le TA est nul.

B/ Détermination du Titre Alcalimétrique Complète (T.A.C)

1. Principe

Cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence de méthyle orange.

Réactifs utilisés :

- Acide chlorhydrique HCl 0,1N.
- Solution de méthyle orange

2. Mode opératoire

Dans un erlenmeyer de 250 ml, on verse 10ml d'eau à analyser. On ajoute 3 gouttes de solution vert de bromocrésol bleu. On titre ensuite avec l'acide HCl 0,1N jusqu'à la disparition de la couleur bleue .

3. Expression des résultats

La valeur du Titre Alcalimétrique complète est donnée par l'expression suivante :

$$TAC = ((N_{HCl} \times V_{HCl}) \times 1000 / V_0) \times 5$$

où :

V₀ : prise d'essai

TAC : titre alcalimétrique complet en (°F)

III.2.9. Dosage des chlorures (méthode de MOHR)

1. Principe :

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titre de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent [18].

Réactifs utilisés :

- Solution de chromate de potassium à 10%.
- Solution de nitrate d'argent à 0,01 N. (N : normalité de la solution)

2. Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer de 250 ml, on verse 10ml d'eau à analyser. On ajoute 3 gouttes de chromate de potassium à 10 % puis on titre avec le nitrate d'argent (AgNO_3 , 0,1N) jusqu'à virage au rouge brique.

4. Expression des résultats

Pour une prise d'essai de 10 ml.

$$T_{\text{enCl}^-} = (N_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3}) \times 1000 / V_0 \times M_{\text{Cl}}.$$

où :

N_{AgNO_3} : normalité du nitrate d'argent.

V_{AgNO_3} : volume du nitrate d'argent.

V_0 : volume de l'échantillon.

M_{Cl} : masse molaire de Cl.

III.3. Analyse spectrophotométrique

L'analyse spectrophotométrique a été réalisée en utilisant un spectrophotomètre. C'est un appareil simple faisceau, commandé par microprocesseur pour utilisation au laboratoire ou sur terrain. Il nous permet l'identification de plusieurs corps minéraux d'échantillon [4].

Mode opératoire :

- Allumer l'appareil.
- Sélectionner le programme mémorisé (le code de chaque élément).
- Régler la longueur d'onde.
- Introduire le blanc (eau distillée) et régler le zéro.
- Placer l'échantillon préparé dans la cuve de mesure (on a déjà ajouté le réactif spécifique pour chaque élément et on mélange).
- Attendre le temps de développement de la réaction.
- Presser la touche READ / ENTRE ;

III.3.1. Détermination de la salinité :

Le sel dissous modifie les propriétés de l'eau, en premier lieu sa capacité de dissolution, sa densité, mais aussi sa compressibilité, son point de congélation et d'ébullition, sa conductivité électrique, sa dureté ainsi que sa viscosité ou sa corrosivité, et très légèrement sa capacité à transporter les sons et la lumière. La quantité de sels dissous dans un liquide modifie la pression osmotique de celui-ci.

La salinité est limitée à une température donnée dit seuil de saturation, au delà duquel le liquide ne pouvant dissoudre plus de sel, des cristaux se forment au fond du récipient ou en périphérie de la surface. L'eau chaude peut contenir plus de sel dissous que l'eau froide. On dit qu'une eau qui contient beaucoup de sels dissous est "dure".

Mode opératoire :

- Régler le conductimètre
- Rincer la cellule avec de l'eau distillée, puis avec l'échantillon.
- Immerger dans l'eau à analyser.
- Lire l'affichage de l'appareil P4 et la température de l'échantillon.

III.3.2. Dosage des Sulfates

La concentration en ions sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante des sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l ; ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/l) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec est élevé [18].

Mode opératoire :

- Allumer l'appareil.
- Sélectionner le programme mémorisé (680).
- Régler la longueur d'onde.
- Introduire le blanc (eau distillée) et régler le zéro.
- Placer l'échantillon préparé dans la cuve de mesure (on a déjà ajouté le réactif spécifique pour chaque élément et on mélange).
- Attendre le temps de développement de la réaction.
- Presser la touche READ / ENTRE ; l'affichage indique le résultat de mesure.

III.3.3. Dosage des nitrites

Suivant l'origine des eaux, la teneur en nitrites est assez variable. La méthode d'analyse de la sulfanilamide a une sensibilité de l'ordre de quelques microgrammes par litre. Il sera

nécessaire d'en tenir compte pour l'interprétation des résultats et de prendre toutes précautions utiles pour la pureté des réactifs et la propreté de la verrerie.

1. Principe

Les nitrites réagissent avec la sulfanilamide pour former un composé diazoïque qui, après copulation avec le N-1-Naphtyl éthylène diamine dichloride, donne naissance à une coloration rose mesurée à 543 nm.

2. Mode opératoire

On introduit 50 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée puis on ajoute 1ml du réactif mixte. On attend ensuite 10 minutes. Après l'apparition de la coloration rose qui montre la présence du NO₂⁻, on effectue la lecture à l'aide d'un spectrophotomètre à 543 nm. Le résultat est donné directement en milligrammes par litre d'eau (mg/l)

III.3.4. Calcul des bicarbonates (HCO₃⁻)

Pour calculer la concentration des bicarbonates, nous avons utilisé la loi suivante :

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{\text{TAC}}{5} \cdot \text{M} \dots\dots\dots (\text{mg/l})$$

où :

TAC : titre alcalimétrique complet.

M. masse molaire de HCO₃⁻.

III.3.5. Calcul du magnésium (Mg⁺²)

Pour calculer la concentration du magnésium, nous avons utilisé la loi suivante :

$$[\text{Mg}^{2+}] = \text{TH} - [\text{Ca}^{+2}] / 20 \dots\dots\dots (\text{mg/l})$$

où :

TH: la dureté totale..... (°F)

[Ca⁺²]: concentration du calcium (mg/l).

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction

Afin d'évaluer la qualité chimique et d'apprécier le degré de potabilité de cinq marques d'eaux minérales commercialisées sur le marché algérien, nous avons réalisé pendant un stage de quelques jours, effectué au niveau de l'Algérienne des Eaux (ADE) de Tlemcen, l'analyse des principaux paramètres physico-chimiques de ces eaux en l'occurrence: les eaux minérales de Mansourah, Guedila, Lalla Khedidja, Nestlé et Saïda. Ces eaux ont été choisies de façon à ce que les sources dont elles proviennent soit réparties un peu partout sur le territoire algérien pour avoir le plus de diversité possible.

A noter que pour le sodium et le potassium l'analyse a été faite au niveau du Laboratoire de Technologie de Séparation et de Purification de la Faculté des Sciences de Tlemcen et que, faute de moyens et de matériels analytiques, les nitrates n'ont pas été analysés dans le présent travail.

Dureté de l'eau:

Pour l'ensemble des échantillons étudiés, la dureté totale de l'eau a été calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$TH = \frac{[Ca]}{4} + \frac{[Mg]}{2,4} \quad (^\circ F) \quad (IV.1)$$

Formule ionique de l'eau :

La formule ionique de l'eau a été établie de la façon suivante :

$$[X] \text{ meq/l} = \frac{[X] \text{ mg/l}}{\text{massemolaire}} \times \text{valence} \quad (IV.2)$$

$$r\%(x) = \frac{[X] \text{ meq/l}}{\sum r^+} \cdot 100, \quad (IV.3)$$

IV.2. Résultats et discussion :

IV.2.1. L'Eau Minérale de Mansourah

Les résultats trouvés, pour l'eau minérale de Mansourah, sont présentés dans les tableaux (IV.1), (IV.2) ci-dessous:

Tableau IV.1 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Mansourah.

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Conc.(mg/l)	85	37	30	01	48	53	362	12
Conc (meq/l)	4,25	3,03	1,30	0,025	1,35	1,10	5,93	0.19
∑ r	∑r ⁺ = 8,60				∑r ⁻ = 8.57			
r %	49,41	35,23	15,11	0,29	15.70	12.79	68.95	2.20
Dureté (TH) : 36.66 °F Minéralisation : 628 mg/l								

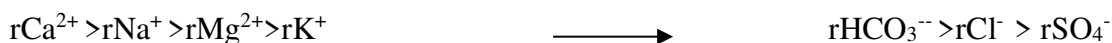
Tableau IV.2 : Résultats des analyses chimiques obtenus au laboratoire pour l'eau minérale de Mansourah.

Concentrations					
<u>Cations :</u>	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l	<u>Anions :</u>	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l
Calcium	76	3.8	Bicarbonates	384.3	6.3
Magnésium	19.2	1.58	Sulfates	65	1.35
Sodium	60	2.60	Chlorures	63.81	1.8
Potassium	1.9	0.048	Nitrites	0.006	//
pH : 7.85, TA : 0.0 °F, TAC : 315 mg/l, TH: 39 °F					
Conductivité (µs/cm) : 821, Minéralisation: 670.21 mg/l					

Formule ionique de l'eau:

Pour l'établir, on classe de gauche à droite par ordre croissant les quantités des cations puis des anions (résultats en meq/l).

Pour cette eau, nous avons constaté la séquence suivante :



Type hydrochimique de l'eau :

D'après la formule ionique de l'eau on remarque que l'eau minérale de Mansourah est de nature bicarbonatée calcique.

IV.2.2. L'eau minérale de Guedila

Les résultats trouvés, pour l'eau minérale de Guedila, sont présentés dans les tableaux (IV.3), (IV.4) ci-dessous:

Tableau IV.3 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Guedila.

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Conc (mg/l)	78	37	29	2	40	95	317	4.5
Conc (meq/l)	3.9	3.04	1.26	0.051	1.12	1.98	5.19	0.072
∑ r (meq/l)	∑r ⁺ = 8.25				∑r ⁻ = 8.36			
r %	47.27	36.85	15.27	0.61	13.57	24	62.91	0.87
Dureté (TH) : 34.91 °F Minéralisation : 602.5 mg/l								

Tableau IV.4 : Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Guedila.

Concentrations					
Cations :	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l	Anions :	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l
Calcium	72	3.6	Bicarbonates	335.5	5.5
Magnésium	15.36	1.26	Sulfates	48	1
Sodium	59	2.56	Chlorures	49.63	1.4
Potassium	1.9	0.048	Nitrites	< 0.001	
pH : 7.85, TA : 0.0 °f, TAC : 275 mg/l TH: 34 °F					
Conductivité (µs/cm) : 744, Minéralisation: 581.39 mg/l					

Formule ionique de l'eau :

Pour cette eau, nous avons constaté la séquence suivante :



Type hydrochimique de l'eau :

D'après la formule ionique on remarque que cette eau est de nature bicarbonatée calcique.

IV.2.3.L'eau minérale de Lalla Khedidja

Les résultats trouvés, pour l'eau minérale de Lalla Khedija, sont présentés dans les tableaux (IV.5), (IV.6) ci-dessous:

Tableau IV.5: Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Lalla Khedidja.

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Conc (mg/l)	53	7	5.5	0.54	11	7	160	0.42
Conc (meq/l)	2.58	0.57	0.24	0.013	0.31	0.14	2.62	0.0067
∑ r (meq/l)	∑ r ⁺ = 3.40				∑ r ⁻ = 3.0767			
r %	75.88	16.76	7.05	0.38	9.11	4.11	77.05	0.19
Dureté (TH) : 16.16 °F Minéralisation : 244.46 mg/l								

Tableau IV.6: Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Lalla Khedidja.

Concentrations					
Cations :	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l	Anions :	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l
Calcium	48	2.4	Bicarbonates	176.9	2.9
Magnésium	5.76	0.47	Sulfates	5	0.10
Sodium	54	2.34	Chlorures	17.72	0.49
Potassium	2.1	0.053	Nitrites	< 0.001	
pH : 7.85, TA : 0.0 °f, TAC : 1.45 mg/l, TH: 24 °F					
Conductivité (µs/cm) : 283, Minéralisation: 309.48 mg/l					

Formule ionique de l'eau :

Pour cette eau, nous avons constaté la séquence suivante :



Type hydrochimique de l'eau :

D'après la formule ionique de l'eau on remarque que cette eau est aussi de nature bicarbonatée calcique.

IV.2.4. L'eau minérale de Nestlé

Les résultats trouvés, pour l'eau minérale de Nestlé, sont présentés dans les tableaux (IV.7), (IV.8) ci-dessous:

Tableau IV.7: Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Nestlé.

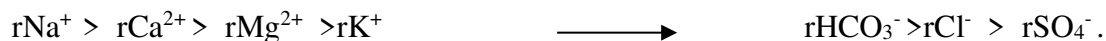
Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Conc (mg/l)	55	17	>12	0.5	>15	33	210	4.6
Conc (meq/l)	2.75	1.4	0.52	0.012	0.42	0.68	3.44	0.074
Σ r	Σr ⁺ =4.68				Σr ⁻ = 4.624			
r %	58.76	29.91	11.11	0.25	8.97	14.53	73.50	1.58
Dureté (TH) : 20.83 °F Minéralisation : 347.1 mg/l								

Tableau IV.8: Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Nestlé.

Concentrations					
Cations :	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l	Anions :	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l
Calcium	48	2.4	Bicarbonates	231.8	3.8
Magnésium	9.6	0.79	Sulfates	20	0.41
Sodium	59	2.56	Chlorures	35.45	1
Potassium	2.3	0.058	Nitrites	<0.001	//
pH : 7.99, TA : 0.0 °f, TAC : 190 mg/l, TH: 22 °F					
Conductivité (µs/cm) : 531, Minéralisation: 405.85 mg/l					

Formule ionique de l'eau :

Pour cette eau, nous avons constaté la séquence suivante :



Type hydrochimique de l'eau :

D'après la formule ionique de l'eau on remarque que cette eau est cette fois de nature bicarbonatée sodique.

IV.2.5. L'eau minérale de Saïda

Les résultats trouvés, pour l'eau minérale de Saïda, sont présentés dans les tableaux (IV.9), (IV.10) et sur la figure (V.2) ci-dessous:

Tableau IV.9 : Résultats des analyses chimiques (selon l'étiquette) et autres calculs faits pour l'eau minérale de Saïda.

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Conc (mg/l)	68	50	58	2	81	65	376	15
Conc (meq/l)	3.4	4.11	2.52	0.05	2.28	1.35	6.16	0.24
∑ r (meq/l)	∑r ⁺ = 10.08				∑r ⁻ = 10.03			
r %	33.73	40.77	25	0.49	22.61	13.39	61.11	2.38
Dureté (TH) : 37.83 °F Minéralisation : 715 mg/l								

Tableau IV.10: Résultats des analyses chimiques obtenus au Laboratoire pour l'eau minérale de Saïda.

Concentrations					
<u>Cations :</u>	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l	<u>Anions :</u>	Concentration en mg/l	Concentration en meq/l
Calcium	64	3.2	Bicarbonates	390.4	6.4
Magnésium	24	1.97	Sulfates	73	1.52
Sodium	62	2.69	Chlorures	102.8	2.89
Potassium	2.1	0.053	Nitrites	0.005	
pH : 7.44, TA : 0.0 °f, TAC : 320 mg/l, TH: 41 °F					
Conductivité (µs/cm) : 531, Minéralisation: 718.3 mg/l					

Formule ionique de l'eau :

Pour l'établir, on classe de gauche à droite par ordre croissant les quantités des anions puis des cations (en meq/l).

Pour cette eau, nous avons constaté la séquence suivante :

**Type hydrochimique de l'eau :**

D'après la formule ionique de l'eau on remarque que cette eau est de nature bicarbonatée calcique.

IV.3 Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et ceux du laboratoire :

D'après les figures IV.1,..., IV.5 ci-dessous, on remarque que les données inscrites sur les étiquettes et celles obtenues lors des analyses au laboratoire sont différentes, mais l'écart reste dans la plupart des cas très faible et quasiment négligeable. Dans quelques cas néanmoins la différence est assez importante, comme pour le cas du sodium (figure IV.2 et IV.3) ou encore du sulfate (figure IV.2). Ces écarts peuvent être dus soit à des erreurs sur les données de l'étiquette soit à des erreurs de manipulation au laboratoire, mais il est toutefois bien plus probable que la cause vienne de la manipulation. En effet faute de temps et de moyens nous n'avons pas pu répéter les analyses plusieurs fois afin de faire une moyenne des résultats et ainsi diminuer l'écart d'incertitude. Mais, comme dit précédemment, dans la majorité des cas les résultats obtenus au laboratoire se rapprochent de ceux mentionnés sur les étiquettes et donc l'incidence de ces erreurs sur la suite du travail sera minime.

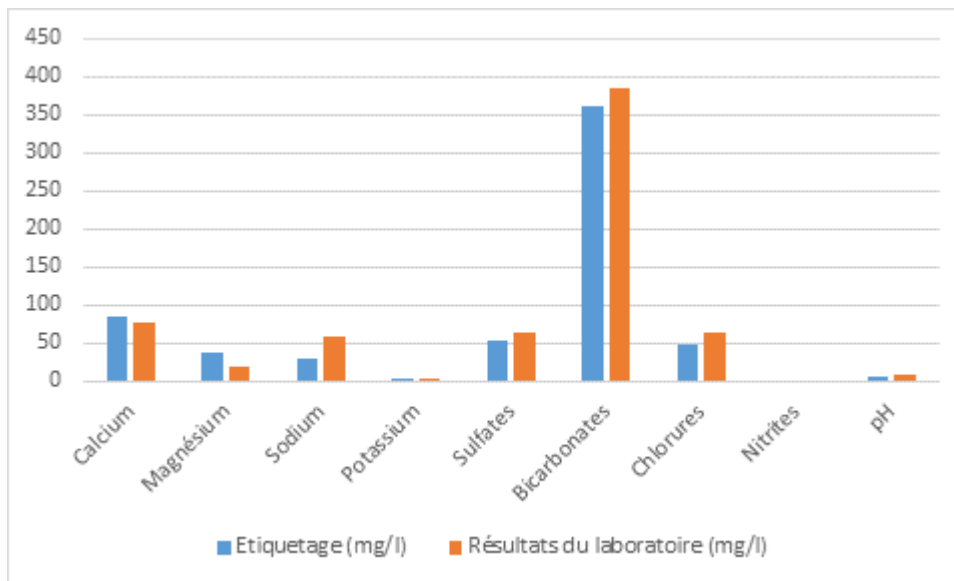


Figure IV.1: Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Mansourah.

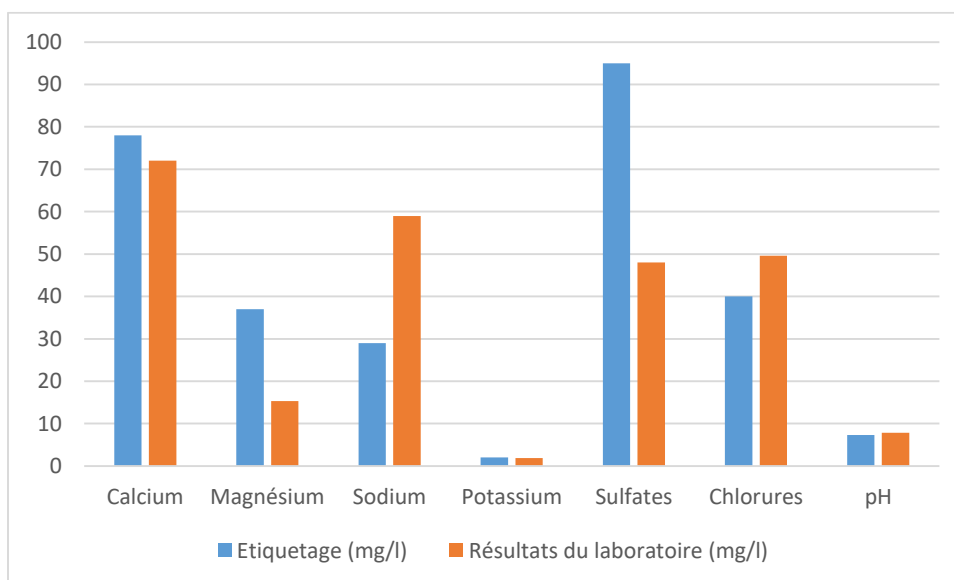


Figure IV.1 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Guedila.

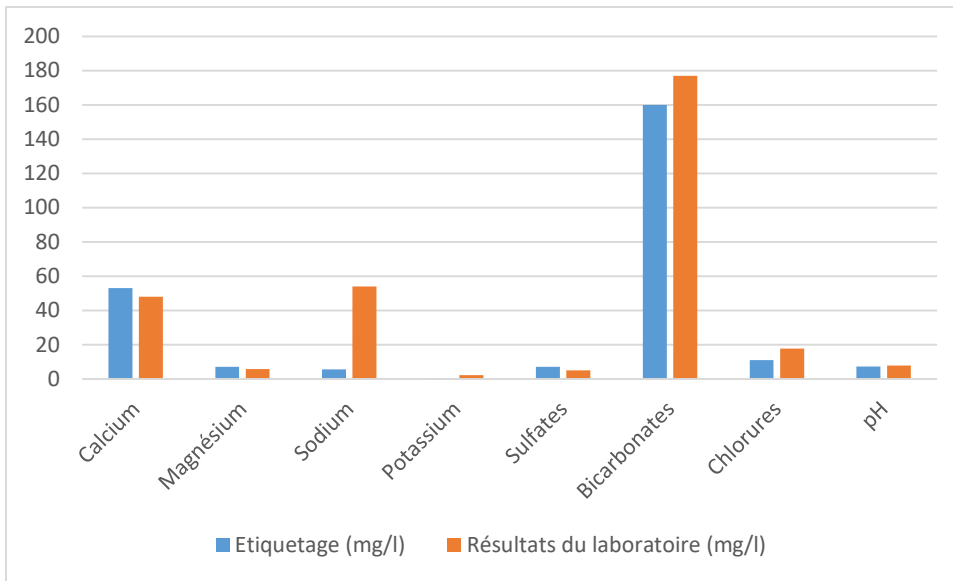


Figure IV.2 : Comparaison entre les résultats de l’étiquetage et du laboratoire de l’eau minérale de Lalla Khedidja.

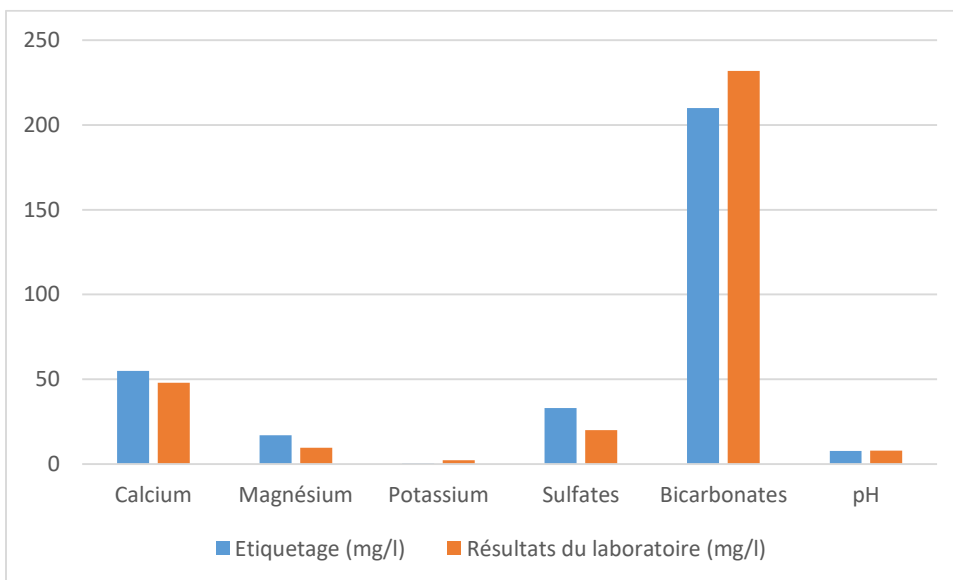


Figure IV.3 : Comparaison entre les résultats de l’étiquetage et du laboratoire de l’eau minérale de Nestlé.

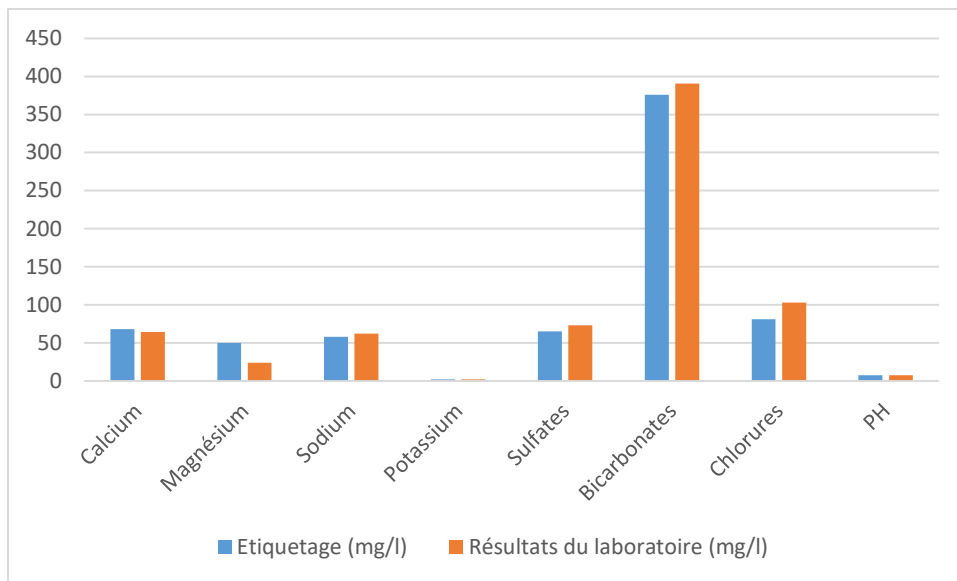


Figure IV.4 : Comparaison entre les résultats de l'étiquetage et du laboratoire de l'eau minérale de Saïda.

IV.4. Diagramme de Schoeller

Le diagramme de Schoeller permet entre autres de reconnaître le faciès chimique d'une eau souterraine en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques. Il permet aussi d'estimer d'une façon plus ou moins précise la potabilité de cette eau en fonction de ces concentrations.

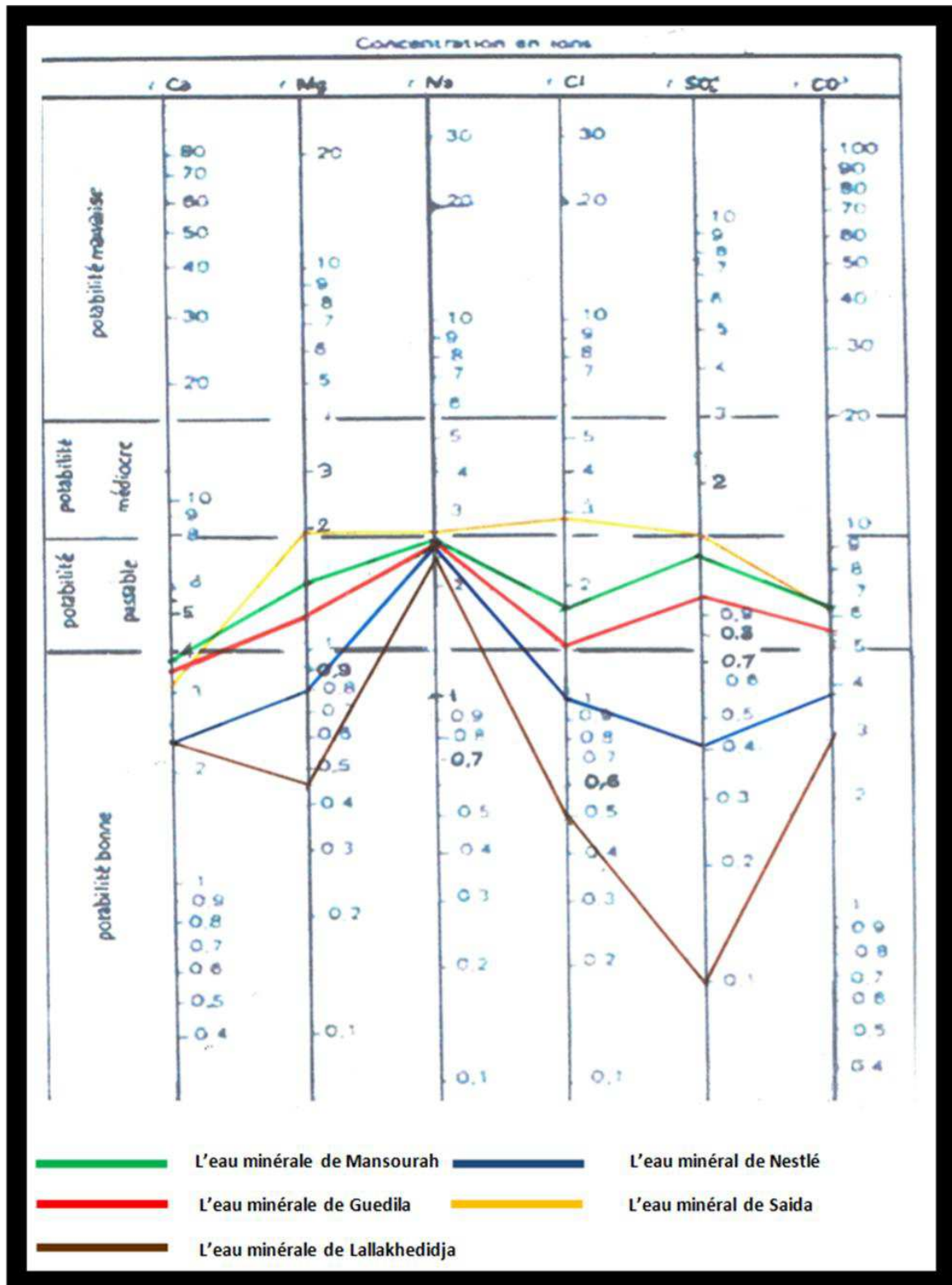


Figure IV.5 : Représentation graphique sur diagramme de Schoeller de la composition chimique des eaux minérale.

D'après le diagramme on constate que pour les trois eaux minérales de Saïda, Guedila et Mansourah, les courbes se situent dans la zone de potabilité passable, l'eau de Saïda étant celle qui s'approche le plus de la zone de potabilité médiocre. Quant aux eaux de Nestlé et Lalla Khedidja leurs courbes se situent principalement dans la zone de la bonne potabilité.

A noter que cette potabilité n'est estimée qu'en fonction des principaux éléments contenus dans l'eau et que plusieurs paramètres ne sont pas considérés.

IV.5. Comparaison de quelques résultats de la qualité chimique des eaux minérales:

Comme dit précédemment, le diagramme de Schoeller, bien qu'il puisse donner une vision globale sur la qualité d'une eau, néglige plusieurs paramètres. Nous avons donc jugé nécessaire de faire une petite comparaison de la qualité chimique des eaux minérales en considérant d'autres paramètres qui sont :

- La dureté totale,
- La conductivité ;
- La minéralisation ;
- La concentration en calcium (Ca^{2+})
- La concentration en magnésium (Mg^{2+})

A/La dureté totale (T.H)

Les résultats de la dureté obtenus pour les différentes eaux minérales étudiées sont représentés graphiquement sur la figure (IV.7) suivante :

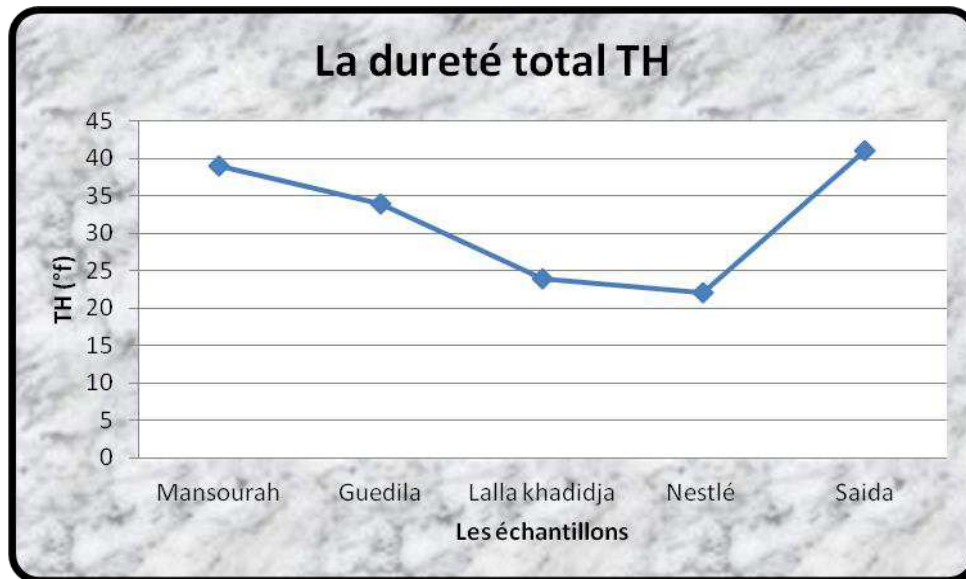


Figure IV.6 : Représentation graphique de la dureté totale pour les différentes eaux minérales étudiées.

B/ La conductivité

Les résultats pour la conductivité obtenus pour les différentes eaux minérales étudiées sont représentés graphiquement sur la figure (IV.8) suivante :

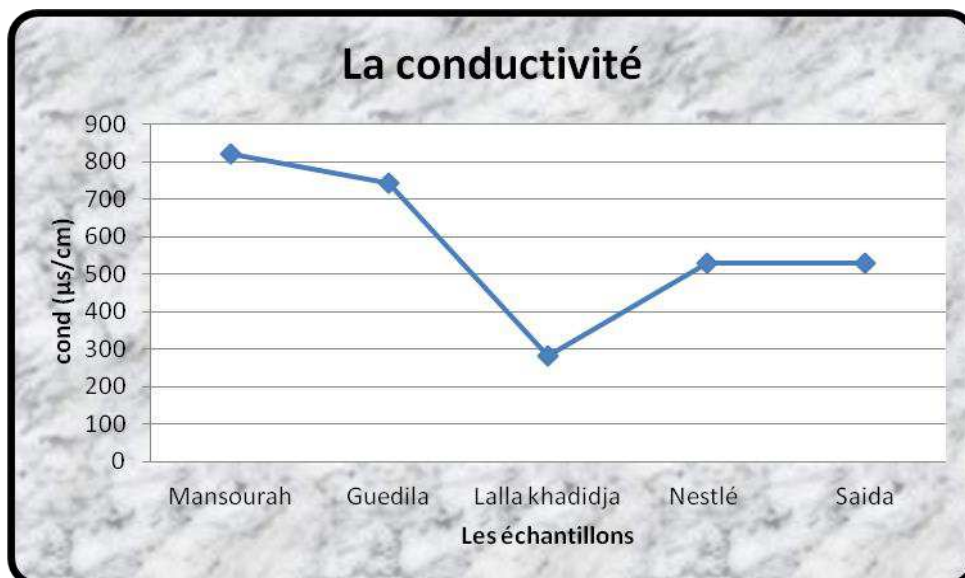


Figure IV.7 : Evolution de la conductivité pour les différentes eaux minérales étudiées.

C/ La minéralisation

Les résultats de la minéralisation obtenus pour les différentes eaux minérales étudiées sont représentés graphiquement sur la figure (IV.9) suivante :

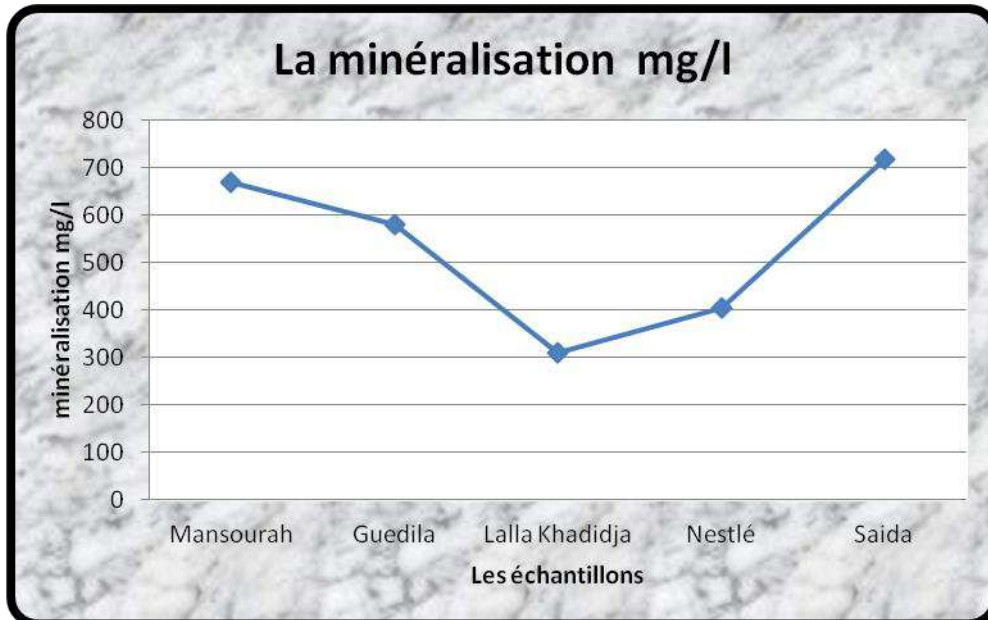


Figure IV.8 : Variation de la turbidité des Différentes eaux minérales étudiées.

D) Concentration en Calcium [Ca²⁺]

Les résultats du calcium obtenus pour les différentes eaux minérales étudiées sont représentés graphiquement sur la figure (IV.10) suivante :

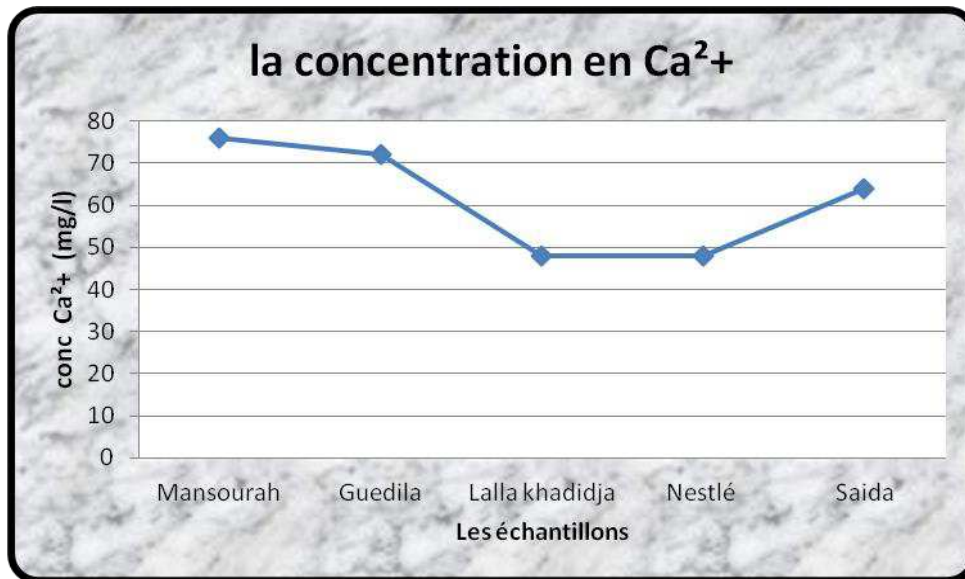


Figure IV.9 : Evolution de la concentration du calcium pour les différentes eaux minérales étudiées.

E) Concentration en magnésium [Mg^{2+}]

Les résultats pour le magnésium obtenus pour les différentes eaux minérales étudiées sont représentés graphiquement sur la figure (IV.11) ci-après:

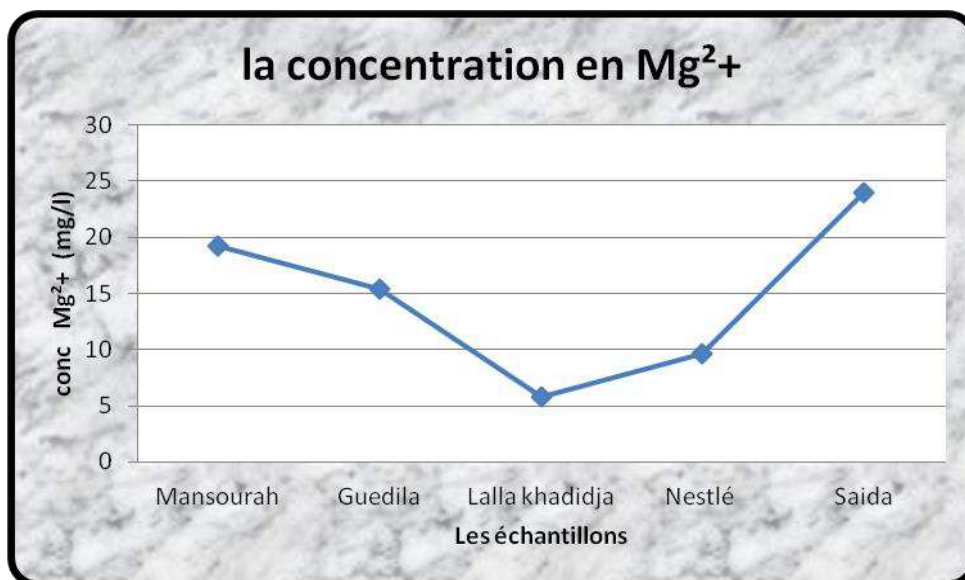


Figure IV.10 : Représentation graphique de la concentration du magnésium pour les différentes eaux minérales étudiées.

IV.6. Interprétation des résultats

Elle est faite sur la base des résultats obtenus à partir de nos analyses effectuées au laboratoire.

Le calcium et le magnésium sont des éléments très répandus dans les eaux minérales et ne représentent aucun risque pour la santé, il existe néanmoins dans les normes des eaux potables des limites de concentrations maximales admissibles pour la consommation qui sont de 80 mg/L pour le calcium et de 50 mg/L pour le magnésium. La concentration de ces derniers dans les cinq eaux étudiées ne dépasse pas ces seuils. On notera que l'eau la plus chargée en calcium est celle de Mansourah et la plus chargée en magnésium est l'eau de Saïda

Concernant la dureté, les résultats obtenus montrent que la dureté totale est relativement acceptable pour l'ensemble des eaux minérales étudiées. Ce paramètre n'a pas une grande incidence sur la santé puisque la dureté dépend de la concentration du calcium et du magnésium dans l'eau. Ces concentrations sont bien au-dessous des limites maximales fixées par les normes de potabilité. Cependant, plus une eau est dure moins elle est agréable à consommer. Dans ce cas-là, l'eau de Nestlé et de Lalla Khedidja sont les plus agréables à boire comparativement aux autres eaux étudiées.

Pour la minéralisation de l'eau, une consommation régulière d'une eau très minéralisée peut entraîner des surdoses de certains minéraux et au contraire la consommation régulière d'une eau très peu minéralisée peut entraîner des carences. De plus la minéralisation a aussi un lien avec la dureté : une eau trop ou très peu minéralisée peut être désagréable à la consommation. Pour une consommation régulière, une minéralisation de 500 mg/l environs est recommandée. De ce fait, les deux eaux minérales s'approchant le plus de cette valeur sont celles de Lalla Khedidja et de Nestlé. Quand à celle de Saïda, c'est l'eau la plus minéralisée. Enfin pour la conductivité, la valeur maximale admissible selon le Décret exécutif n°11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine est de 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans notre cas, toutes les eaux minérales étudiées dans le présent travail ont une valeur bien en dessous de 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Enfin, on peut conclure que pour l'ensemble des eaux minérales étudiées, il n'y a pas de problème majeur quant à leur consommation. Les normes de potabilité sont respectées. Néanmoins, on remarque que les deux eaux minérales qui se démarquent le plus par leur qualité chimique sont celles de Lalla Khedidja et Nestlé. Elles sont douces, très bien minéralisées avec une potabilité assez bonne.

A la suite de ce travail, on étudiera l'application des méthodes d'analyse multicritère pour la classification chimique de ces eaux qui vont confirmer (ou non) nos résultats obtenus.

Chapitre V : Méthodes d'analyse multicritère

Chapitre V : Méthodes d'analyses multicritères

V.1. Introduction:

Les méthodes d'analyse multicritère (AMC), sont un ensemble de méthodes qui font intervenir et regrouper plusieurs critères pour permettre la résolution de problèmes d'aide à la décision. Elles sont élaborées par un groupe de personnes ayant des perspectives différentes pour prendre les décisions complexes. Ces méthodes fournissent un cadre structuré de discussion et de débat et permettent la mise en œuvre de la décision finale.

V.2. Concepts et terminologie :

Dans un problème de prise de décision on doit utiliser plusieurs paramètres qui sont :

a) Les acteurs :

Un individu ou un groupe d'individus est acteur d'un processus de décision s'il influence directement ou indirectement sur la décision.

On trouve dans les acteurs, les **intervenants**, qui interviennent directement dans la prise de décision et le choix des solutions après utilisation des méthodes AMC. Aussi les **agis** qui quant à eux sont ceux qui subissent les conséquences de la décision, qui est censée être prise en prenant en compte leurs préférences [19].

b) Les actions ou alternatives :

Une action est une représentation d'un cas des solutions qui contribue à la décision. Cette action peut prendre plusieurs formes : une région, un site, un investissement, une offre, plans d'aménagement, etc. [20]

c) Les objectifs :

L'objectif indique le sens de l'amélioration dans lequel le décideur veut apporter à son problème et trouver une solution. Les trois façons de poursuivre un objectif sont de l'optimiser, de le minimiser ou de la maintenir dans une situation donnée. Comme exemple on peut citer ces trois cas : maximiser le profit, réduire les coûts ou maintenir l'équilibre économique.

d) Les agrégations :

Ce sont les paramètres qui contribuent à évaluer et juger une action. Ces dernières se présentent en deux types : critères et contraintes.

Les critères : Ce sont des facteurs avec lesquels on mesure et évalue une action ; ils dépendent des préférences du décideur (coûts, ressources humaines, sécurité, environnement, etc.)

Les contraintes : Ce sont des paramètres qui permettent de limiter et dessiner les frontières dans lesquels les actions considérées sont réalisables, ils peuvent aussi être appelés 'critères d'admissibilité' (par exemple, le site d'implantation d'une usine doit se situer au maximum à 600 mètres d'une auto route).

V.3. La problématique de décision :

D'après Simon H.A (1960) [21], le processus de décision passe globalement par trois phases :

–*Phase de compréhension* : analyse de la situation et du problème.

–*Phase de modélisation* : formulation du problème (mise en évidence des écarts entre la situation actuelle et la situation objectée) et description des solutions potentielles.

–*Phase de sélection* : consiste dans le choix de la solution en fonction de plusieurs critères spécifiques (objectifs, normes,...) ou abstraits (intuition, motivation, ...).

La problématique de la prise de décision en AMC est la façon dont l'aide à la décision doit être considérée. De ce fait il existe quatre problématiques décisionnelles de références identifiées: les problématiques de choix, les problématiques de tri, les problématiques de rangement et les problématiques de description [20].

V.3.1.Problématique de choix P_α :

Elle consiste à diviser l'ensemble de toutes les alternatives en deux sous-ensembles : Le sous ensemble des bonnes alternatives et le sous ensemble des mauvaises alternatives, ce dernier ne sera plus considéré dans le problème de décision et le nombre d'actions à traiter sera donc réduit.

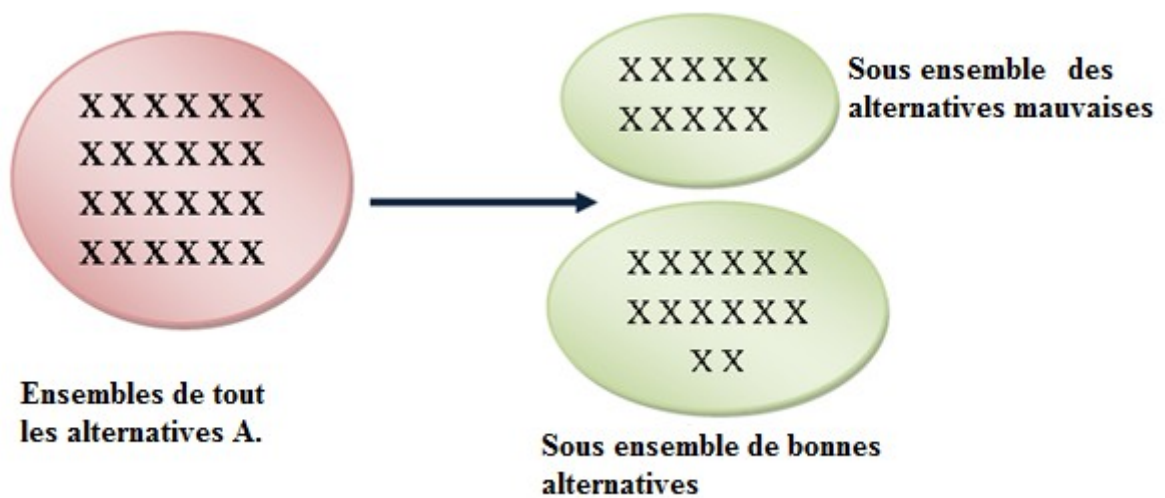


Figure V.1: Problématique de choix (Mousseau V. 1993). [22]

V.3.2.Problématique de tri P_β :

Cette problématique consiste à affecter chaque action à un ensemble de catégories prédéfinies. Le choix de ces catégories est défini par le type du problème abordé et la façon dont on veut le résoudre. Par exemple, déterminer des catégories de confort pour les offres (inconfortable, confortable, très confortable).

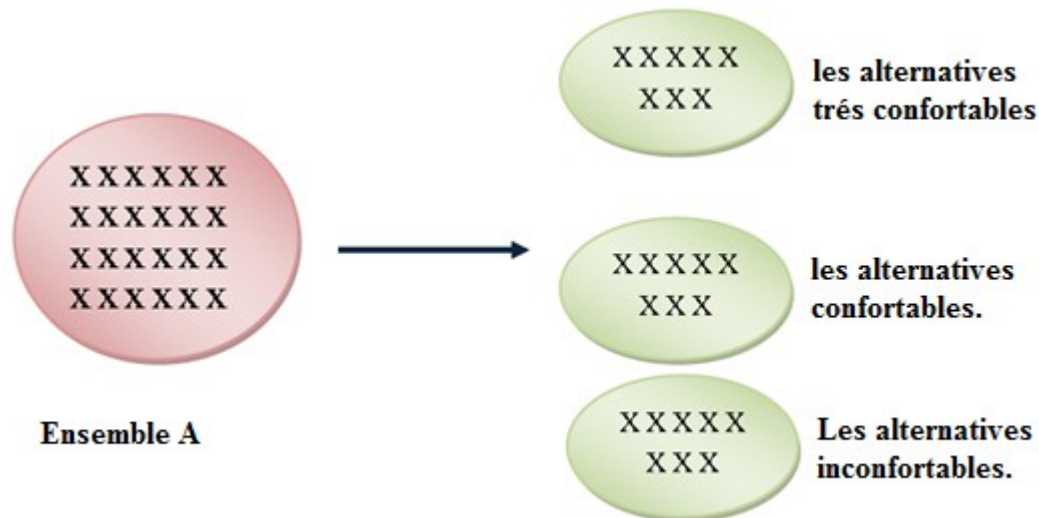


Figure V.2 : Problématique de Tri (Mousseau V. 1993). [22]

V.3.3. Problématique de rangement P_γ :

Consiste à ranger différentes actions selon un ordre de rangement partiel ou total sur l'ensemble des actions.

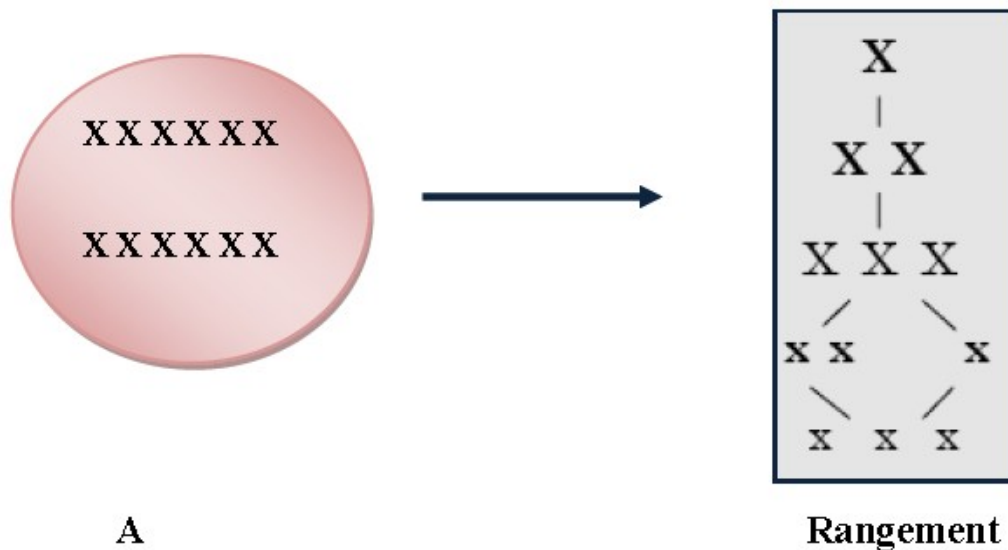


Figure V.3 : Problématique de Rangement (Mousseau V. 1993). [22]

V.3.4. Problématique de description P_δ :

L'objectif de cette dernière n'est pas de comparer et trier les actions comme le font les trois problématiques précédentes, mais plutôt d'éclairer dans le choix de la décision en essayant de décrire les actions et leurs conséquences. Cette problématique de description est

souvent utilisée quand le décideur a du mal à identifier le problème, à exprimer son point de vue ou le type de résultat qu'il souhaite obtenir.

V.4. Les Méthodes d'analyse multicritère :

Les premières applications des méthodes AMC ont été implémentées dans la prise de décision environnementale, gestion des ressources en eau (Anandalingam, G., et Olsson., 1989) [23], gestion des déchets nucléaires, implantation d'une centrale nucléaire...(Barda O.H., Dupuis J., Lencioni, P., 1990) [24]

Depuis différentes méthodes ont été développées et généralisées à de nouvelles applications (voir tableau (V.1)).

Tableau V.1 : Exemples d'application de l'analyse multicritère.

Problématique	Références
Modélisation de la dégradation hydraulique et structurelle des réseaux sanitaires et pluviaux.	Ennaouri I., Fuamba M. (2010)
Un indice local de résilience aux catastrophes permettant d'évaluer les communautés côtières sur la base d'un processus d'analyse hiérarchique (AHP)	Orencio P.M., Fujii M. (2013).
Évaluation des facteurs affectant les risques pour la santé publique dus aux inondations dans l'état de Kassala, au Soudan	Abbas H.B., Routray J.K. (2014).
Application du processus d'analyse hiérarchique (AHP) dans l'évaluation des effets du transport solide en rivière	Hachoł J., Hämmerling M., Bondar-Nowakowska E. (2017).
Estimation du coefficient de ruissellement par le processus d'analyse hiérarchique.	Lallam F., et all (2018)

Les méthodes d'analyse multicritère suivent en général une même démarche :

- L'identification de l'objectif général de la démarche et le type de décision.
- Le dressage de la liste des actions et solutions potentielles.
- L'identification des critères qui orienteront les décideurs.
- Le jugement des solutions par rapport aux critères.

Il existe deux principales familles de méthodes d'AMC.

Les méthodes de surclassement, qui ont pour principe de comparer les différentes alternatives par paires.

La deuxième famille comprend les méthodes qui utilisent un critère de synthèse unique, ce qui consiste à réunir les performances d'une alternative en un unique critère.

V.4.1 Les méthodes de surclassement :

Le principe de ces méthodes est de comparer les actions deux à deux on utilisant une relation de surclassement S , puis exploiter cette dernière afin de déterminer un résultat permettant de répondre à l'un des problèmes suivant : choix, tri ou rangement.

Les différentes manières d'aborder ces deux étapes ont conduit à l'apparition de plusieurs méthodes de surclassement. On peut nommer quelques unes.

V.4.1.1. La méthode ELECTRE I (Roy B. 1968)

La méthode ELECTRE I (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) a été développée par Roy B (Roy B. 1968). Dans cette dernière le surclassement d'une action (a) sur une action (b) (aSb) dépend de deux principes :

La concordance : Il faut qu'une majorité des critères soient en faveur de a,

La non discordance : Il ne faut pas qu'il y ait un critère qui s'oppose fortement au surclassement de (a) sur (b).

Les principes de concordance et de non discordance sont formalisés par la construction des indices de concordance et de discordance comme suit :

On considère un ensemble A de m actions, qui représentent l'objet de la décision. Le décideur doit définir un ensemble de critères $f = \{1, 2, \dots, n\}$ destinés à modéliser ses préférences. Chaque action est évaluée selon les critères définis à l'aide d'une échelle qualitative et des scores. L'évaluation de l'action a_i sur le critère j est notée e_{ij} .

L'importance de chaque critère dans la prise de décision est traduite par un poids π_j avec $\sum \pi_j = 1$.

Ces paramètres sont regroupés dans un tableau appelé le tableau de performance (Tableau V.2).

Tableau V.2 : Tableau de performance.

		Les critères			
		C ₁	C ₂	...	C _n
Poids des critères		π ₁	π ₂	...	π _n
	a ₁	e ₁₁	e ₁₂	...	e _{1n}
	a ₂	e ₂₁	e ₂₂	...	e _{2n}

	a _m	e _{m1}	e _{m2}	...	e _{mn}

L'indice de concordance :

L'indice de concordance $c(a_i, a_k)$, attribué au couple d'actions (a_i, a_k) est définie par :

$$c(a_i, a_k) = \sum_{j \in C} \pi_j \tag{V.1}$$

avec $C = \{j \text{ tel que } e_{ij} \geq e_{kj}\}$

C ; est appelée coalition concordante.

Le non discordance :

La non discordance représente le fait qu'il ne devrait pas y avoir de critère dans lequel l'avantage de a_k sur a_i contredit l'affirmation a_i surclasse a_k .

Cet indice est déterminé par la formule suivante :

$$d(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \forall j, e_{ij} \geq e_{kj} \\ \frac{1}{E} * \max_{\{j \text{ tel que } e_{ij} < e_{kj}\}} |e_{kj} - e_{ij}| & \text{si non} \end{cases} \tag{V.2}$$

E est l'étendue de la plus grande échelle associée à l'un des critères ;

$$E = \max_{i,k,j} |e_{kj} - e_{ij}| \tag{V.3}$$

La relation de surclassement :

La relation de surclassement S est définie comme suit :

$$a_i S a_k \iff c(a_i, a_k) \geq s \text{ et } d(a_i, a_k) \leq t \tag{V.4}$$

où s et t sont respectivement les seuils exigés de concordance et de discordance.

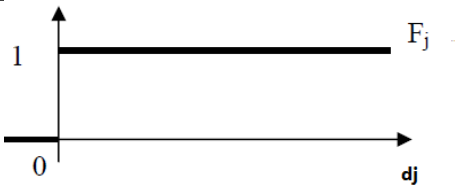
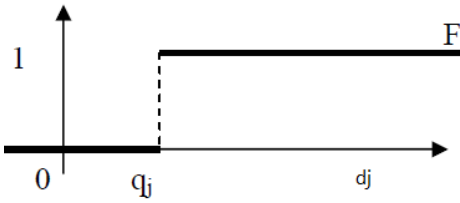
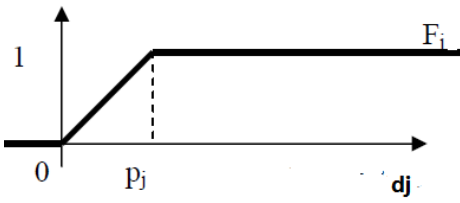
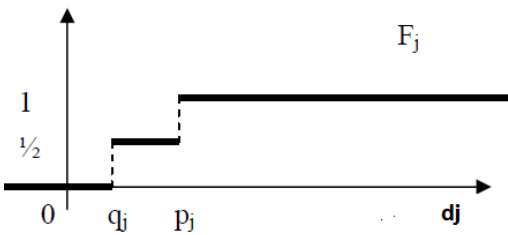
V.4.1.2. La Méthode PROMETHEE

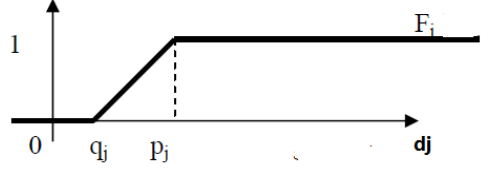

La méthode **PROMETHEE** (Preference Ranking Organisation **METH**ods for Enrichement **E**valuation) a été mise au point en 1985 par Jean Pierre Brans et Vincke. Elle permet de classer les alternatives (actions) des meilleures aux moins bonnes.

Cette méthode est basée sur l'élaboration d'une relation de surclassement reflétant une intensité de préférence. Comme pour la méthode ELECTRE, pour chaque action, une note et un poids sont attribués à chaque critère.

On commence par calculer des indices $F_j(e_j(a_i) - e_j(a_k))$ pour mesurer les intensités de préférence sur les critères j entre tout couple d'alternatives et pouvant prendre différentes formes. Si on note $d_j = e_j(a_i) - e_j(a_k)$, le tableau V.3 mentionne certaines d'entre elles :

Tableau V.3 : Intensité de préférence.

$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } d_j \leq 0 \\ 1 & \text{si non} \end{cases}$	
$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } d_j \leq q_j \\ 1 & \text{si non} \end{cases}$	
$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \geq d_j \\ \frac{d_j}{p_j} & \text{si } 0 \leq d_j \leq p_j \\ 1 & \text{si } d_j \geq p_j \end{cases}$	
$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } q_j \geq d_j \\ \frac{1}{2} & \text{si } q_j \leq d_j \leq p_j \\ 1 & \text{si } d_j \geq p_j \end{cases}$	

$F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } q_j \geq d_j \\ \frac{d_j - q_j}{p_j - q_j} & \text{si } q_j \leq d_j \leq p_j \\ 1 & \text{si } d_j \geq p_j \end{cases}$	
$F_j(d_j) = 1 - e^{-\frac{d_j^2}{2s_i^2}}$	

où q_j et p_j sont les seuils de préférence et d'indifférence et s_i est l'écart-type.

Les méthodes **PROMETHEE** passent par les étapes suivantes

Étape 1 :

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) on calcule les intensités de préférence multicritère :

$$P(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot F_j(d_j) \tag{V.5}$$

Étape 2 :

Pour chaque alternative a_i , il existe deux types de flux de surclassement, sortants et entrants :

Flux sortant : il reflète le caractère de surclassement de a_i , par rapport aux autres alternatives, ou sa force. Il est d'autant plus grand que a_i surclasse fortement les autres alternatives.

$$\phi^+(a_i) = \sum_{a_k \neq a_i} P(a_i, a_k) \tag{V.6}$$

Flux entrant : il exprime la faiblesse de a_i , par rapport aux autres alternatives. Il est d'autant plus petit que a_i est peu surclassée.

$$\phi^-(a_i) = \sum_{a_k \neq a_i} P(a_k, a_i) \tag{V.7}$$

Étape 3 : Phases d'exploitation qui se basent sur les valeurs $\phi^+(a_i)$ et $\phi^-(a_i)$.

PROMETHEE I,

Le surclassement d'une action a_i sur une action a_k est déterminé par la relation suivante :

$$a_i S a_k \overset{\circ}{\square} \tag{V.8}$$

PROMETHEEII,

Le rangement des actions est obtenu selon l'ordre décroissant des flux nets $\phi(a_i)$ définis comme suit :

$$\phi(a_i) = \phi^{+\tilde{c}(a_i) - \phi^{-\tilde{c}(a_i)} \tilde{c}} \quad (V.9)$$

V.4.1.3. La méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) a été développée par les scientifiques Hwang et Yoon en 1981. Elle a pour principe de trouver l'alternative qui soit en même temps la plus proche de l'alternative idéale et la plus éloignée de l'alternative anti-idéale par rapports aux autres alternatives.

Les différentes étapes de cette méthode peuvent être résumées comme suit :

-Etape 1 : Définir le tableau des performances (tableau V.2).

-Etape 2 : Normaliser les performances des critères :

$$e'_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [e_{ij}]^2}}, i=1, \dots, m \text{ et } j=1, \dots, n \quad (V.10)$$

-Etape 3 : calculer ; $e''_{ij} = \pi_j * e'_{ij}$ (V.11)

-Etape 4 : Déterminer les profils idéal ($a^{+\tilde{c}}$) et anti-idéal ($a^{-\tilde{c}}$).

$$a^{+\tilde{c}} \text{ avec } e_j^{+\tilde{c} = \max_i [e''_{ij}] \tilde{c}}$$

$$\text{Et } a^{-\tilde{c}} \text{ avec } e_j^{-\tilde{c} = \min_i [e''_{ij}] \tilde{c}}$$

-Etape 5 : Calculer la distance euclidienne de chaque action par rapport aux profils ($a^{+\tilde{c}}$ et ($a^{-\tilde{c}}$).

$$d_i^{+\tilde{c}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \tilde{c} \tilde{c} \tilde{c} \tilde{c}} \quad (V.12)$$

$$d_i^{-\tilde{c}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \tilde{c} \tilde{c} \tilde{c} \tilde{c}} \quad (V.13)$$

-Etape 6 : Calculer le coefficient de proximité (CC_i) et classer des alternatives.

$$CC_i = \frac{d_i^{-\tilde{c}}}{d_i^{+\tilde{c}} + d_i^{-\tilde{c}} \tilde{c}} \quad (V.14)$$

Une alternative a_i avec un coefficient de proximité (CCi) proche de 1 indique que cette dernière est proche de a^{+i} et loin de a^{-i} . De ce fait, le classement des alternatives se fait dans l'ordre décroissant des CCi . L'alternative a_i avec le plus grand CCi sera le choix le plus satisfaisant.

V.4.2. Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse

Le principe de ces méthodes est de chercher une fonction qui est le résultat de l'agrégation des performances d'une action par rapport aux autres actions [25].

Il existe une panoplie de méthode dont nous mentionnons quelques-unes.

V.4.2.1. La méthode SMART

La méthode SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) a été développée par W. Edwards en 1971 et se décompose en 3 grandes étapes :

-Étape 1 : Définir le tableau des performances (tableau V.2).

-Étape 2 : Déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j e_{ij}, i=1, \dots, m \quad (V.15)$$

-Étape 3 : Classer les actions selon l'ordre décroissant de $U(a_i)$.

V.4.2.2. La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) :

Cette méthode a été développée en 1980 par Thomas L. Saaty. Elle utilise le processus d'analyse hiérarchique qui est une technique structurée pour organiser et analyser des décisions complexes, basée sur les mathématiques et l'expérience.

Cette méthode est capable de résoudre un grand nombre de problèmes décisionnels de façon quantitative en élaborant un modèle d'aide à la décision et elle permet de convertir des comparaisons par paire établies sur une échelle sémantique (à 9 niveaux) en un vecteur de priorité.

Comme les méthodes précédentes, cette méthode est réalisée en plusieurs étapes :

Étape 1 : on décompose le problème complexe en une structure hiérarchique. Cette structure pyramidale se compose toujours au sommet (niveau 0) du sujet de décision, puis d'un niveau de critère de décision (niveau 1), puis d'un niveau des caractéristiques de ces critères (niveau 2) ...Le dernier niveau est celui des actions.

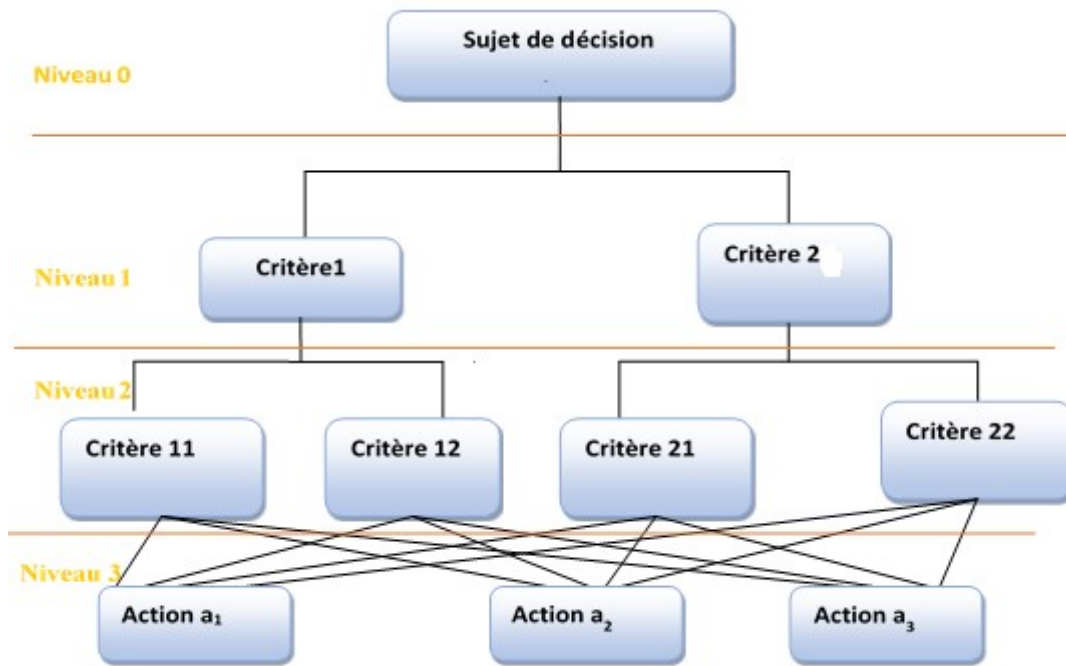


Figure V.4: La structure hiérarchique

Il n'y a pas de règle fermement établie pour construire une hiérarchie, cette construction dépend du type de décision qu'un individu ou qu'un groupe d'individu doit prendre.

-Étape2 : Pour chaque niveau du sommet à la base hiérarchique, on doit comparer de manière binaire les critères deux à deux par rapport au critère supérieur en attribuant une note chiffrée sur une échelle prédéfinie. [26]

Tableau V.4: Echelle de comparaison binaire de Saaty. [26]

Appréciation	Degré d'importance
Importance égale de deux critères	1
Faible importance d'un critère par rapport à un autre	3
Importance moyenne d'un critère par rapport à un autre	4
Importance forte d'un critère par rapport à un autre	5
Importance attestée d'un critère par rapport à un autre	7
Importance absolue d'un critère par rapport à un autre	9

2, 4, 6, 8 : valeurs intermédiaires entre deux jugements utilisé pour affiner le jugement.

Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons (tableau.V.5).

Tableau V.5 : Matrice des comparaisons binaires.

	Critère 1.1	Critère 1.2	...	Critère 1.n
Critère 1.1	<i>I</i>	a_{21}	...	a_{n1}
Critère 1.2	a_{12}	<i>I</i>	...	a_{n2}
...
Critère 1.n	a_{1n}	a_{2n}	...	<i>I</i>

$$\text{où } a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \tag{V.16}$$

Par convention, la comparaison se fait toujours des éléments de gauche (lignes) aux éléments supérieurs (colonnes).

-Étape 3 : On établit le poids de chaque critère en procédant de la manière suivante :

- ✓ Dans la matrice on divise chaque élément par la somme de sa colonne :

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} \tag{V.17}$$

- ✓ On calcule ensuite la moyenne arithmétique des nombres sur chaque ligne. Chaque ligne correspond à un critère, la moyenne associée au critère définit son poids (p_i) par rapport au critère père (supérieur).

$$p_i = \frac{1}{n} \sum_j b_{ij} \tag{V.18}$$

où n est le nombre des critères à comparer.

De cette manière on définit le poids de chaque critère dans la structure hiérarchique.

Remarque : La somme des poids des critères appartenant au même nœud d'arborescence est égale à « 1 ».

-Étape 4 : Cohérence des jugements.

Dans un problème de décision, nos jugements seraient fondés sur des appréciations qui pourraient sembler aléatoires. Cependant, il est difficile de se tenir toujours à une cohérence

parfaite; un des avantages majeurs de l'AHP est de pouvoir calculer le *ratio de cohérence* RC dont la valeur doit être inférieure ou égale à 10% pour déduire que les jugements sont cohérents.

Pour calculer cet indice, Saaty propose de calculer l'indice de cohérence (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (V.19)$$

V.5. Conclusion :

Choisir une méthode multicritère n'est pas une tâche facile. Il n'y a pas de méthodologie bien précise pour faire cette sélection. Certains pensent même qu'il est nécessaire de se soumettre aux processus multicritère pour déterminer le choix.

Guitouni et Martel remarquent que la plupart des analystes et chercheurs sont incapables de justifier le choix d'une méthode multicritère, c'est pourquoi, par familiarité ou affinité avec une méthode donnée, on justifie son choix [27].

Pour notre cas, nous avons utilisé trois méthodes issues des méthodes de surclassement : ELECTRE I, PROMETHEE II et TOPSIS.

Chapitre VI : Application de l'analyse multicritère

Chapitre VI : Application de l'analyse multicritère

VI.1. Introduction :

Les eaux minérales étudiées précédemment ne sont pas de mauvaise potabilité et toutes répondent aux normes. A travers ce chapitre, nous allons appliquer l'analyse multicritère pour une classification des eaux minérales de Mansourah, Guedila, Lalla Khedidja, Nestlé et de Saïda. Cette classification est basée sur les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux.

Les méthodes que nous utiliserons seront la méthode ELECTRE I, PROMETHE II et TOPSIS. Ces trois dernières nécessitent de tracer au préalable un tableau de performance.

VI.2. Tableau de performance :

Le tableau de performance est un tableau qui réunit les actions (eaux minérales), et les critères sur lesquels va être établi le classement.

VI.2.1. Les critères inclus dans la classification :

On a choisi les critères les plus représentatifs d'une bonne ou mauvaise qualité d'eau qui sont définis comme suit:

Cr_d : la dureté (TH).

Cr_m : la minéralisation (mg/l).

Cr_h : la nature hydrochimique.

Cr_n : la teneur en nitrate.

VI.2.2. Les actions :

Le tableau VI.1 illustre les eaux minérales considérées dans cette étude.

Tableau 0.1 : les eaux minérales étudiées.

Eau minérale	Notation
Eau de Mansourah	Am
Eau de Guedila	Ag
Eau de Lalla Khedidja	Al
Eau de Nestlé	An
Eau de Saïda	As

VI.2.3. Le poids des critères :

On sait que toutes les eaux étudiées sont dans les normes et elles sont bonnes pour la santé, et c'est pour cela que l'importance et donc le poids donnés à ces critères est fonction de l'agréabilité à boire et de ces eaux et leur capacité à pouvoir être bu régulièrement plutôt qu'en fonction de leurs potabilités.

De ce fait le plus grand poids est donné à la dureté puisque c'est le paramètre le plus facilement perceptible une fois l'eau en bouche, en plus une eau est très dure ou très douce est désagréable à la consommation.

Arrive ensuite la teneur en nitrates ; le corps humain n'ayant besoin que d'une faible teneur en nitrates mieux vaut qu'ils soient présents dans l'eau avec une faible quantité.

Le troisième critère est la minéralisation de l'eau. Rappelons qu'une consommation régulière d'une eau très minéralisée peut entraîner des surdoses de certains minéraux ainsi et au contraire la consommation régulière d'une eau très peu minéralisée peut entraîner des carences. De plus la minéralisation a aussi un lien avec la dureté et une eau trop ou très peu minéralisée peut être désagréable à la consommation. Ce paramètre a donc bien son importance dans ce classement.

Le dernier paramètre est celui de la nature hydro-chimique. La nature hydro-chimique de l'eau est déterminée à partir des anions et cations les plus présents dans une eau, par exemple une eau qui contient majoritairement du bicarbonate (HCO_3^-) et de calcium (Ca^{2+}) est une eau dite *bicarbonatée calcique*.

Les poids adaptés à ces critères sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 0.2 : Poids des critères.

Les critères	Cr_d	Cr_m	Cr_h	Cr_n
Les poids	0,4	0,2	0,1	0,3

VI.3. Les scores des actions :

Pour chaque critère, on attribue des notes aux actions. Cette valeur est en fonction des caractéristiques des eaux.

VI.3.1. La dureté (TH) :

Une eau est la plus agréable à boire lorsque sa dureté varie entre 7°f et 22°f, et donc plus la dureté d'une eau se rapproche de cette marge plus le score donné est élevé (tableau.VI.3).

Tableau 0.3 : Le score de la dureté des eaux.

Les actions	La dureté	Les scores
A_m	36,66	4
A_g	34.91	5
A_l	16.16	9
A_n	20.83	8
A_s	37.83	3,5

VI.3.2. Minéralisation (mg/l) :

Une minéralisation en dessous de 500 mg/l est la plus appropriée pour une consommation régulière, les scores les plus élevés sont donc attribués aux eaux ayant la minéralisation la plus proche de cette norme (tableau.VI.4).

Tableau 0.4 : Le score de la minéralisation des eaux.

Les actions	Minéralisation (mg/l)	Les scores
A _m	670,21	5,5
A _g	581,39	6,25
A _l	309,48	8
A _n	406,15	7
A _s	718,3	5

VI.3.3. Nature hydrochimique :

Les eaux bicarbonatées sodiques ne sont pas moins bonnes que les bicarbonatées calciques. Néanmoins les effets bénéfiques du calcium sur le corps sont plus nombreux, on donne donc aux eaux ayant cette nature un score plus élevé.

Tableau 0.5 : Les scores de la nature hydrochimique des eaux.

Les actions	Nature hydrochimique	Les scores
A _m	Bicarbonaté calcique	6
A _g	Bicarbonaté calcique	6
A _l	Bicarbonaté calcique	6
A _n	Bicarbonaté sodique	4
A _s	Bicarbonaté calcique	6

VI.3.4. Teneur en nitrate :

On sait que plus la teneur de nitrates d'une eau est faible et plus cette eau est bonne, d'où résulte le tableau suivant :

Tableau 0.6 : Les scores de la teneur en nitrate.

Les actions	Teneur en nitrate	Les scores
A _m	12	3
A _g	4,5	7
A _l	0 ,42	9
A _n	4,6	7
A _s	15	1,5

VI.4. Tableau des performances :

Les résultats précédents sont résumés dans un seul tableau (tableau.VI.7) appelé le tableau des performances.

Tableau 0.7 : tableau des performances.

		Les critères			
		Cr _d	Cr _m	Cr _h	Cr _n
Poids des critères		0,4	0,2	0,1	0,3
		Score des actions			
Les actions	A _m	4	5,5	6	3
	A _g	5	6,25	6	7
	A _l	9	8	6	9
	A _n	8	7	4	7
	A _s	3,5	5	6	1,5

VI.5. Application de l'AMC et classification des eaux minérales étudiées :

Dans la suite, tous les calculs sont effectués par le logiciel Excel. On a utilisé comme base de données le tableau de performance VI.7

VI.5.1. La méthode ELECTRE I :

Etape 1 : calcul de l'indice de concordance.

A partir de l'équation (V.1), l'indice est calculé pour chaque couple d'action (tableau VI.8) .

Tableau 0.8 : les indices de concordance.

	A _m	A _g	A _l	A _n	A _s
A _m		0,1	0,1	0,1	1
A _g	1		0,1	0,4	1
A _l	1	1		1	1
A _n	0,9	0,9	0		0,9
A _s	0,1	0,1	0,1	0,1	

Etape 2 : calcul de l'indice de non discordance.

Les résultats du tableau.VI.9 sont obtenus de l'équation (V.3).

Tableau 0.9 : Les indices de non discordance.

	A _m	A _g	A _l	A _n	A _s
A _m		0,533	0,8	0,533	0
A _g	0		0,533	0,4	0
A _l	0	0		0	0
A _n	0,267	0,267	0,267		0,267
A _s	0,2	0,733	1	0,733	


avec une étendu $E = 7.5$.

Etape 3 :

Pour un seuil de concordance $s = 0.9$ et de discordance $t = 0.15$, et en appliquant la relation de surclassement S définie par la relation (V.4) on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 0.10 : Surclassement et non surclassement des actions.

	Am		Ag		Al		An		As	
	c	d	c	d	c	d	c	d	c	d
Am			0,1<s	0,53>t	0,1<s	0,8>t	0,1<s	0,53>t	1>s	0<t
Ag	1>s	0<t			0,1<s	0,53>t	0,4<s	0,4>t	1>s	0<t
Al	1>s	0<t	1>s	0<t			1>s	0<t	1>s	0<t
An	0,9=s	0,27>t	0,9=s	0,27>t	0<s	0,27>t			0,9=s	0,27>t
As	0,1<s	0,2>t	0,1<s	0,73>t	0,1<s	1>t	0,1<s	0,73>t		
	Am		Ag		Al		An		As	
	c	d	c	d	c	d	c	D	c	d
Am			0,1<s	0,53>t	0,1<s	0,8>t	0,1<s	0,53>t	1>s	0<t
Ag	1>s	0<t			0,1<s	0,53>t	0,4<s	0,4>t	1>s	0<t
Al	1>s	0<t	1>s	0<t			1>s	0<t	1>s	0<t
An	0,9=s	0,27>t	0,9=s	0,27>t	0<s	0,27>t			0,9=s	0,27>t
As	0,1<s	0,2>t	0,1<s	0,73>t	0,1<s	1>t	0,1<s	0,73>t		

 Condition de surclassement vérifiée.

A partir du tableau VI.10, on a les surclassements suivants : Am S As ; Ag S As ; Ag S Am ; Al S Ag ; Al S Am ; Al S As et Al S An qui sont représentés par la figure VI.1.

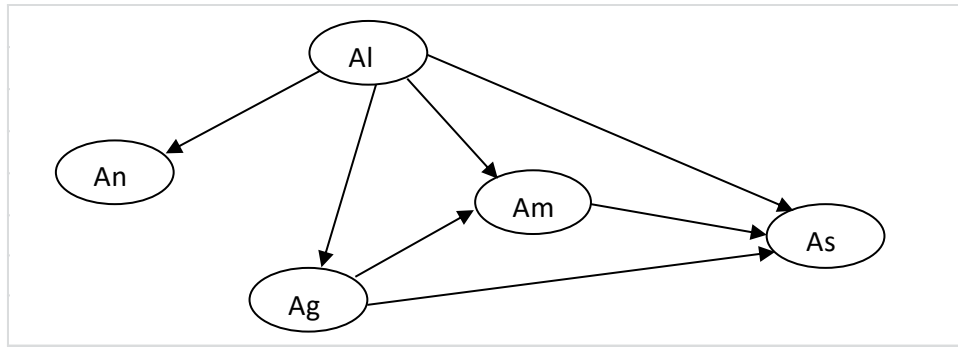


Figure 0.1 : Surclassement des eaux minérales par la méthode ELECTRE I

Interprétation :

Les résultats obtenus montrent que l'eau de LallaKhedidja surclasse toutes les autres eaux, ce qui en fait la meilleure eau parmi celles étudiées. Arrive ensuite l'eau de Guedila qui surclasse les eaux de Mansourah et de Saïda, puis enfin l'eau de Mansourah qui surclasse celle de Saïda.

Cependant, Les conditions de surclassement ne sont pas respectées entre l'eau de Nestlé et les autres (sauf pour LallaKhedidja qui l'a surclasse) on ne peut donc pas connaître son classement d'où l'inconvénient de la méthode ELECTRE I.

VI.5.2. Méthode PROMETHEE II

Dans la suite, on pose $d_j = e_j(a) - e_j(b)$ et on considère la fonction $F_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } d_j \leq 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$

Etape 1 : Calcul des intensités de préférence multicritère.

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) et à partir de l'équation (V.5), on calcule les intensités de préférence multicritère (tableau VI.11).

Tableau 0.11 : Les intensités de préférence multicritères.

	A _m	A _g	A _l	A _n	A _s
A _m	0	0	0	0,1	0,9
A _g	0,9	0	0	0,1	0,9
A _l	0,9	0,9	0	0,9	0,9
A _n	0,9	0,6	0	0	0,9
A _s	0	0	0	0	0

Etape 2 : Calcul du flux sortant et entrant.

Tableau 0.12 : Les flux sortants et entrants.

Les actions	ϕ^+	ϕ^-
A _m	1	2,7
A _g	1,9	1,5
A _l	3,6	0
A _n	2,4	1,1
A _s	0	3,6

Etape 3 : Phases d'exploitation

Le rangement des actions est obtenu selon l'ordre décroissant des flux nets $\phi(a_i)$ définis par l'équation (V.9)

Tableau 0.13 : Les flux nets.

Les actions	Le flux nets
A _m	-1,7
A _g	0,4
A _l	3,6
A _n	1,3
A _s	-3,6

D'où le rangement suivant :

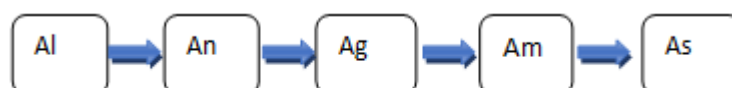


Figure 0.2 : classification des eaux minérales par la méthode PROMETHEE II.

Interprétation:

Comme pour la méthode ELECTRE I c'est l'eau de Lalla Khedidja qui surclasse toute les autres eaux. On trouve aussi le même classement concernant les eaux de Guedila, Mansourah et Saïda.

On a cependant ici un rangement total, on connaît donc l'emplacement de l'eau de Nestlé qui vient juste après Lalla Khedidja et qui donc surclasse toute les autres sauf cette dernière.

A noter qu'avec la méthode PROMETHEE II le rangement obtenu est total et non partiel contrairement à la méthode ELECTRE I.

VI.5.3. La méthode TOPSIS :

Etape 1 : Normalisation des performances des critères :

Les résultats du tableau VI.14 sont obtenus à partir de l'équation (V.10)

Tableau 0.14 : Les performances normalisées.

	Cr_d	Cr_m	Cr_h	Cr_n
A_m	0,284	0,382	0,474	0,217
A_g	0,355	0,434	0,474	0,507
A_l	0,639	0,556	0,474	0,652
A_n	0,568	0,486	0,316	0,507
A_s	0,249	0,347	0,474	0,109

Etape 2 : Calcul de e''_{ij}

De l'équation (V.11) on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 0.15 : Calcul de (e''_{ij})

	Cr_d	Cr_m	Cr_h	Cr_n
Am	0,114	0,076	0,047	0,065
Ag	0,142	0,087	0,047	0,152
Al	0,256	0,111	0,047	0,196
An	0,227	0,097	0,032	0,152
As	0,099	0,069	0,047	0,033

Etape 3 : Détermination des profils idéal (a^+) et anti-idéal (a^-)

En utilisant les formules (V.12) et (V.13) on définit le profil idéal $a^+ = \{e_1^+, e_2^+, e_3^+, e_4^+\}$ et le profil anti-idéal $a^- = \{e_1^-, e_2^-, e_3^-, e_4^-\}$

Les e_j^+ et les e_j^- sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 0.16 : Les profils idéal et anti-idéal.

e_j^+	0,256	0,111	0,047	0,196
e_j^-	0,099	0,069	0,032	0,033

Etape 4 : Calcul de la distance euclidienne de chaque action par rapport aux profils (a^+) et (a^-) :

Les résultats du tableau (VI.17) sont obtenus par les équations (V.14) et (V.15).

Tableau 0.17: La distance euclidienne de chaque action par rapport aux profils (a^+) et (a^-)

Les actions	d_i^+	d_i^-
Am	0,196	0,040
Ag	0,124	0,129
Al	0,000	0,230
An	0,056	0,177
As	0,230	0,016

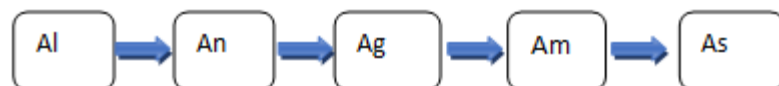
Etape 5 : Calcul des coefficients de proximité (CC_i).

Ces coefficients sont calculés à partir de la formule (V.16) (tableau VI.18)

Tableau 0.18 : Les coefficients de proximité (CC_i).

Les actions	CC_i
Am	0,17
Ag	0,51
Al	1,00
An	0,76
As	0,06

Le classement des alternatives se fait dans l'ordre décroissant des CC_i . (figure VI.3)

**Figure 0.3** : Classification des eaux minérales par la méthode TOPSIS.

Interprétation:

Le rangement obtenu est le même qu'avec la méthode PROMETHEE II, ce qui confirme la fiabilité des résultats

VI.6. Conclusion

Bien que la méthode ELECTRE I ne propose pas un rangement total et qu'on ne puisse pas connaître le placement de l'eau de Nestlé elle donne un rangement très proche de celui obtenu avec les deux autres méthodes PROMETHEE II et TOPSIS qui, elles, donnent un rangement similaire (identique) malgré leur approche différente du problème.

Aussi le rangement obtenu confirme ce qui a été dit dans les chapitres précédents ; en effet on avait déjà remarqué que les eaux de Lalla Khedidja et de Nestlé avaient les meilleures propriétés et que celles de Saïda ont les moins bonnes. Cela est bien montré à travers les méthodes appliquées.

L'application de l'analyse multicritère sur ces 5 eaux minérales, afin de les classer, a donc été concluante.

Conclusion Générale

Sur le marché algérien, il existe toute une panoplie d'eaux minérales soumises aux normes de potabilité internationales. Cependant, certaines de ces eaux minérales se démarquent plus ou moins par leur qualité chimique.

A travers ce travail, nous avons établi une classification de cinq eaux minérales en l'occurrence : Mansourah, Guedila, Lalla Khedidja, Nestlé et Saida. Ces eaux ne sont pas jugées sur la base de leur potabilité mais plutôt sur leur capacité à pouvoir être consommées régulièrement. A titre de rappel, les eaux fortement minéralisées, par exemple, bien qu'elles soient dans les normes ne sont pas destinées à une consommation régulière.

Afin de pouvoir établir ce classement notre travail a consisté en deux parties distinctes:

La première partie était surtout pratique dans laquelle nous avons procédé à des analyses physico-chimiques au niveau du laboratoire de l'ADE Tlemcen ainsi qu'au niveau du département de chimie de l'université de Tlemcen. Ces analyses nous ont permis d'éclaircir plusieurs aspects sur la qualité de ces eaux. En effet, nous avons pu constater que pour la totalité des cinq eaux étudiées les normes de potabilité sont toutes respectées. Bien que la dureté moyenne de ces eaux reste assez élevée mais toutefois elle est acceptable. Ainsi, le diagramme de Schoeler nous a permis de classer ces eaux selon leur degré de potabilité comme suit : Les trois eaux de Saida, Guedila et Mansourah se situent dans la zone de potabilité passable tandis que les eaux de Lalla Khedidja et Nestlé sont dans la zone de bonne potabilité.

La deuxième partie de notre travail était théorique dans laquelle, en utilisant quelques méthodes de l'analyse multicritère, nous avons pu établir une classification chimique de ces eaux minérales.

- La méthode **ELECTRE I** a donné le classement suivant :

On a l'eau de Lalla Khedidja qui surclasse toutes les eaux, ensuite l'eau de Guedila qui surclasse les eaux de Mansourah et Saida, et enfin l'eau de Mansourah qui surclasse l'eau de Saida.

Quant à l'eau de Nestlé, la condition de sur classement entre elle et les 3 eaux de Guedila, Mansourah et Saida n'a pas été vérifiée, on ne connaît donc pas son emplacement dans le classement. Toutefois on sait qu'elle est surclassée par l'eau de Lalla Khedidja.

Les deux autres méthodes utilisées c'est-à-dire la méthode « PROMETHEE II » et la méthode « TOPSIS » nous ont donné pratiquement des résultats similaires et ont illustré le classement suivant :

L'eau de Lalla Khedidja qui surclasse toutes les autres eaux, arrivent ensuite l'eau de Nestlé, Guedila, Mansourah et enfin l'eau de Saida

Nous constatons que les trois méthodes donnent le même classement et confirment les résultats obtenus par l'analyse physico-chimique tout en ajoutant plus de détails.

En effet, avec les deux méthodes PROMETHEE II et TOPSIS nous avons obtenu un rangement total ce qui nous a permis de connaître l'emplacement de chaque eau dans le classement général.

Cela nous permet d'en tirer les conclusions suivantes :

En premier lieu : L'eau de Lalla Khedidja a les meilleurs propriétés. Arrivent ensuite l'eau de Nestlé, Guedila et Mansourah et enfin l'eau de Saida. Ceci ne fait pas de cette dernière une eau mauvaise mais une eau moins adaptée à une consommation régulière que celle de Lalla Khedidja par exemple.

L'étude a montré que l'application de l'analyse multicritère a été concluante et a donné de bons résultats. Il serait intéressant de recourir à une utilisation plus poussée de cette méthode pour connaître son réel potentiel dans le domaine de l'hydraulique.

Aussi il est important de noter que nous avons rencontré quelques obstacles entravant le bon déroulement de notre projet de fin d'étude. Ces obstacles se résument comme suit :

- Faute de temps et de moyens nous n'avons pu considérer que quelques paramètres que nous avons jugés prépondérants pour établir ce classement. Une augmentation du nombre de paramètres aurait sans doute donné des résultats plus précis et peut-être légèrement différents.
- Rareté des documents spécialisés surtout avec la fermeture de la bibliothèque et de la majorité des organismes en raison de la pandémie du COVID19.
- Nous avons prévu une visite à l'usine Eau Minérale de Mansourah malheureusement, à cause du confinement, cette visite a été annulée.

Ce modeste travail a pour vocation d'aider les étudiants et les futurs chercheurs à mieux adapter les méthodes d'analyse multicritère dans d'autres problèmes hydrauliques, il constitue aussi une référence bibliographique de ces méthodes.

À la suite de ce travail, et avec le même procédé, nous proposons de faire une classification chimique de toutes les eaux minérales disponibles sur le marché algérien

Références

1. <https://www.josmose.fr/blog/107-savoir-lire-son-etiquette-deau-minerale>
2. Rapport de l'Académie nationale de médecine (France), Place des eaux minérales dans l'alimentation, Novembre 2006.
3. Rapport de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA), Lignes directrices pour l'évaluation des eaux minérales naturelles au regard de la sécurité sanitaire, Mai 2008. Page 55
4. European Federation of Bottled Water (EFBW, 2017), Directive 2009/54/EC du 18 Juin 2009.
5. https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_min%C3%A9rale_naturelle
6. NORME POUR LES EAUX MINÉRALES NATURELLES, Adoptée en 1981. Révisée en 1997, 2008. Amendée en 2001, 2011, 2019, in Codex Alimentarius (ONU, OMS)
7. Hazzab Abdelkrim. Eaux minérales naturelles et eaux de sources en Algérie, C. R. Geoscience 343 (2011), pp. 20–31.
8. <https://www.annuairevert.com/dossier/l-etiquetage-de-l-eau-en-bouteille-92.php>
9. DIRECTIVE 2000/13/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 20 mars 2000 relative au rapprochement des législations des États membres concernant l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires ainsi que la publicité faite à leur égard (JO L 109 du 6.5.2000, p. 29)
10. <https://www.purezza.fr/le-blog/etiquette-eau-minerale-qu-est-ce-qu-on-y-trouve/>
11. <http://www.eademansourah.com/presentation.html>
12. <https://www.guedila.com/#gallery-2>
13. <http://www.cevital-agro-industrie.com/fr/produit-grand-public/llk-p11>
14. <https://www.emploitic.com/eau-saida/presentation>
15. PROCÉDURES D'ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU POUR ANALYSE EN LABORATOIRE Par Isabelle Brais, dta, agr. Représentante-conseil chez Groupe Horticole Ledoux inc. Dernière mise-à-jour : 22 janvier 2009
16. https://www.oieau.fr/ReFEA/fiches/AnalyseEau/AnalyseEau_PresGen.htm
17. Méthode d'analyse 'Détermination de la conductivité : méthode électrométrique', Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.

18. Normes de qualité d'une eau de boisson (ADE); centre de formation aux métiers de l'eau de Tizi-Ouzou, le 14/09/2004.
19. Bernard ROY, Denis BOUYSSOU, Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas. Collection Gestion. Série : Production et techniques quantitative appliquées a ka gestion (1993).
20. Bernard ROY, Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Economica, Paris, France, 1985, 423 pages
21. Herbert Alexander Simon: The Ford distinguished lectures: Vol. 3. The new science of management decision. 1960
22. Vincent Mousseau, Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques (1993)
23. Ananda lingam, G. Olsson, C. E, 1989:"A multi-stage multi-attribute decision model for project selection," European Journal of Operational Research, Elsevier, vol. 43(3), pages 271-283, December.
24. O.Haluk Barda, Joseph Dupuis, Pierre Lencioni: Multicriteria location of thermal power plants 1990. European Journal of Operational Research Volume 45, Issues 2–3, 13 April 1990, Pages 332-346
25. Abdelkader Hammami : Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau. Thèse de doctorat, Universités Laval, Québec, Canada. 2003
26. Thomas L.Saaty: Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. European Journal of Operational Research. Volume 145, Issue 1, 16 February 2003, Pages 85-91
27. Adel Guitouni, Jean-MarcMartel: Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method 1998. European Journal of Operational Research. Volume 109, Issue 2, 1 September 1998, Pages 501-521