
Revue Nature et Technologie

Academic Journal with an International Dissemination



Volume 16

Issue 01 – January 2024





Presentation

"Nature and Technology Review" (NATEC) is a multidisciplinary scientific journal published by Hassiba Benbouali University of Chlef (Algeria) since June 2009. NATEC publishes, in English and French, original research articles and review articles, which cover a wide spectrum of theoretical and experimental work at universities and other national, regional and international research organizations.

The fields covered by NATEC are divided into 3 categories:

- Category A: Fundamental Sciences and Engineering
- Category B: Agronomic and Biological Sciences
- Category C: Environmental Sciences.

NATEC adheres to the ethical guidelines for research and publication of [COPE](#) as described in [Guidelines on Good Publication](#).

NATEC has an international reviewing committee and senior researchers with established competence in their fields.

The submission is exclusively via electronic way through the Algerian Scientific Journal Platform (ASJP): <https://www.asjp.cerist.dz/en/PresentationRevue/47>

All articles submitted to NATEC are subject to a rigorous double-blind peer-to-peer review by at least two referees in the field of the submitted work.

What is considered in the evaluation are originality; accuracy; reproducibility; validity and language.

Possible decisions reserved for an article include acceptance, revision or rejection. If an author is encouraged to revise his or her article, there is no guarantee that the revised version will be published. The decision to reject an article is final.

During the entire evaluation process, the Editorial Board guarantees the anonymity of the referees and authors. Articles are submitted to the experts anonymously. The evaluation sheets sent to the authors are also anonymous.

All members of the Reviewing Committee and Editorial Board are under the obligation of confidentiality of the articles. They are strictly forbidden to divulge the content, in whole or in part, even the abstract, of articles under review by the journal. This prohibition remains valid even for articles that have been definitively rejected.

The submission, evaluation and publication of accepted articles are totally free. The publication is in Open Access under the terms of the BY license of [Creative Commons Attributions 4.0 International](#) which allows to share, copy, reproduce, distribute, communicate, reuse or adapt the published work with the obligation to credit its author.

Acceptance of the manuscript is limited by the legal requirements that will be in effect at the time regarding law, copyright infringement and plagiarism.

"Nature and Technology Journal" is indexed in the following databases: [ASJP](#) ; [ProQuest](#) ; [EBSCO](#) ; [DOAJ](#) ; [Worlcat ResearchBib](#) ; [DRJI](#) ; [MIAR](#) ; [WebReview](#) ; [CiteFactor](#) ; [DFAJ](#) ; [ACNP](#) et [Mirabel](#).

Committees

Honorary Director:

Pr. ACHOUR Djillali

Publication Director:

Dr. HOCINE Ahmed

Editor-in-Chief:

Dr. HDR. ZIDANE Azdinia Laboratory of Natural Bio-Resources, Department of Biology, Faculty of Nature and Life Sciences, University Hassiba Benbouali of Chlef (Algeria)

Editorial Committee

Dr. SADOUD Meryem

Department of Biology, Faculty of Nature and Life Sciences, University Hassiba Benbouali of Chlef (Algeria)

Dr. TAHRAOUI Mohamed Amine

Department of Computer sciences, University Hassiba Benbouali of Chlef, Algeria

Dr. TAHRAOUI-DOUMA Naima

Process engineering sciences, University Hassiba Benbouali of Chlef, Algeria

Dr. GADOUCHE Leila

Dr. METLEF Sara

Laboratory of Local Natural Bioresources. Faculty of Agronomic and Biological Sciences, University Hassiba Benbouali of Chlef, Algeria

Dr. SADOUD Meryem

Laboratory of Beneficial Microorganisms, Functional Foods and Health, Department of biology, Faculty of natural and life sciences, University of Mostaganem, 27000, Algeria

Associated Editors:

Dr. ALLIOUCHE Faiza

Laboratory of Formulation and Manufacture of Artificial Foods for Farmed Fish, CNRDPA, Bou Ismail, Tipaza. Algeria

ARAB Karim

Department of Biology

Pr. BAKOUR Rabah

University of Science and Technology Houari Boumediene, Algeria

Pr. BEKRO Yves-Alain

University of Abobo-Adjamé, Abidjan, Ivory Coast

Pr. BELAKEHAL Azeddine

Mohamed Khider University of Biskra, Algeria

Pr. BEREZOWSKA-AZZAG Ewa

Polytechnic School of Architecture and Urbanism EPAU Algiers, Algeria

Pr. BOUKALA IOUALALEN Malika

University of Science and Technology Houari Boumediene, Algiers, Algeria

Pr. GHOUL Said

Philadelphia University, Aman, Jordan

Pr. HACENE Hocine

University of Science and Technology Houari Boumediene, Algiers, Algeria

Pr. HAMRAT Mostefa

Hassiba Benbouali University of Chlef, Algeria

Pr. HARTANI Tarik

Morsli Abdellah University Center of Tipaza, Algeria

Pr. KHELIDJ Abdelhafid

University of Nantes, Nantes, France

Pr. LACHI Mohammed

GRESPI, Reims, France

Pr. MERAGHNI Fodil

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France

Pr. M'SADAK Youcef

ISA, Chot Meriem, Sousse Tunisia

Pr. OUALIDA Rached

National School of Biotechnology, Constantine, Algeria

Pr. OULD CHIKH El bahri

Mustapha Stambouli University of Mascara, Algeria

Pr. Paola Ferrazzi

Department of Agricultural, Forestry and Food Sciences, University of Torino, Italy

Pr. RAHAL Farid

Department of Civil Engineering, Mohamed Boudiaf University of Oran, Algeria

Pr. SRAIRI Mohamed Taher

Hassan II Agronomic and Veterinary Institute, Morocco

Department of Chemistry, Faculty of Science, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco

Pr. YAHIAOUI Karima

Department of Nature and Life Sciences – Univ. M. Bouguerra of Boumerdes, Algeria

Pr. YAOVI Ameyapoh

Higher School of Biological and Food Techniques, University of Lomé, Togo

Pr. ZEMMOURI Noureddine

Mohamed Khider University of Biskra, Algeria

Secretary:

Mr. MAHMOUD Benaouda; b.mahmoud@univ-chlef.dz; Mobil: +(213) 671862766

Ms. RIATI Sabrina; s.riati@univ-chlef.dz

Address:

Revue Nature et Technologie, Direction des publications, Pôle universitaire Ouled-Fares, 4^e étage (Rectorat) 02180, Chlef – Algeria.

Summary

volume 16
Issue n°01 – January 2024



Revue Nature et Technologie

<https://www.univ-chlef.dz/>
ISSN: 1112-9778 – E-ISSN: 2437-0312

Class B: Agronomic & Biological Sciences

Eau minérale embouteillé en Algérie : Quelles perspectives ?01

Lakhdar ZELLA, Adel BAROUCHE et Mawhoub AMIROUCHE

Effet des conservateurs acides et hydro colloïdes alimentaire sur la durée de conservation du lait cru a la température ambiante11

Dominique AGANZE MULUME, Daniel BUCHAGUZI MUZUSANGABO, Janvier MUGISHO ZIRHUMANA, Thomas BRIGATTI, Sage WEREMUBI MWISHA, Orthence KANYERE KAZIGE, Jacques KALUMUNA BARHASHISHWA, Pascal NSAMBU MUKONDUASUMU

Class C: Environmental Sciences

Cyclostratigraphy of the formations of the Ivorian terminal continental: Case of the "RO" drilling of Aboisso, South-East of Côte d'Ivoire 28

Jean-Baptiste KASSI, Roger Fabus YAO

Détermination de la formule appropriée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans une région aride : Application à la station de Béchar (SO Algérien) 39

Lynda CHEBBAH et Abdesselem KABOUR

Empreinte anthropique sur la dynamique des écosystèmes de la forêt classée d'Amou-Mono au Togo52

Aoufoh KOFFI N'DERE, Kokouvi Bruno KOKOU, Wouyo ATAKPAMA, Bimare KOMBATE, Hodabalo EGBELOU, Madjouma KANDA et Komlan BATAWILA



L'eau minérale embouteillée en Algérie : quelles perspectives ?

Lakhdar ZELLA*, Adel BAROUCHE et Mawhoub AMIROUCHE

Faculté des sciences de la nature et de la vie, Université de Blida 1, Algérie

Résumé

La production des eaux minérales naturelles (EMN) embouteillées en Algérie connaît une importante croissance. Le nombre de marques ne cesse d'augmenter régulièrement, avoisinant la centaine actuellement. C'est cet essor invasif qui a attisé notre appétence à s'intéresser au phénomène et connaître de plus près les eaux minérales algériennes à travers les étiquettes collées aux bouteilles. Notre objectif est de recenser, de cartographier et de catégoriser ces eaux. D'après les résultats trouvés, il en ressort que la majorité des exploitations se trouvent dans la zone nord-est du pays avec une densité dans la région de Tizi Ouzou et Bejaia, appartenant aux bassins hydrographiques n° 3 et n° 4. A propos des aspects physico-chimiques, les eaux de Ben Haroun, Mouzaia et Sidi Okba sont des eaux bicarbonatées (teneur en $\text{HCO}_3^- > 600$ mg.) et magnésiennes (teneur en mg > 50 mg). L'eau Ben Haroun, est une eau calcique (teneur en calcium > 150 mg), sodique (> 200 mg) et sulfatée (> 200 mg). Sur la vingtaine de marques retenues, une quinzaine se caractérise par un résidu sec (RS) conforme à la norme (supérieur à 500 mg) Quatre autres marques ont un RS moyen et sont celles de Sidi Yakoub (152 mg), El Golea (180 mg), Lala Khedidja (187 mg) et El Meniaa (199 mg) Les eaux de Ben Haroun et Mouzaia se distinguent par un résidu sec élevé, de l'ordre de 2800 et 1280 mg respectivement.

Mots-clés : Eau minérale embouteillée ; Algérie ; Résidu sec (RS); Aspect physico-chimique

Bottled mineral water in Algeria: What prospects?

Abstract

The production of natural mineral waters bottled in Algeria recognized an exponential growth. The number of brands continues to increase regularly, currently reach one hundred. For this reason, that has fueled our appetite to take an interest in the phenomenon and to know Algerian mineral waters through the labels on the bottles. The objective of this study is to identify and categorize these waters. According to the results found, it appears that the most important of farms are located in the northeastern zone of the country with a density in the region of Tizi ousou and Bejaia, belonging to hydrographic basins n°. 3 and no. 4. According to the physicochemical aspects, the waters of Ben Haroun, Mouzaia and Sidi Okba are bicarbonate waters (HCO_3^- content > 600 mg) and magnesium (Mg content > 50 mg). Ben Haroun water is calcium (calcium content > 150 mg), sodium (> 200 mg.L-1 and sulfated water (> 200 mg) From the twenty brands selected waters, fifteen are characterized by a dry residue (DR) that complies with the standard (more than 500 mg) Four other have an average DR and are those of Sidi Yakoub (152 mg), El Golea (180 mg), Lala khedidja (187 mg) and El Meniaa (199 mg). The waters of Ben Haroun and Mouzaia are characterized by a high dry residue, which is in order of 2800 and 1280 mg, respectively.

Keywords: Mineral water; Algeria; Dry residue (DR); Physicochemical aspect.

1. Introduction

La bouteille d'eau minérale est partout, sur les tables, dans les voitures, dans les bureaux et dans les maisons...., elle est devenue manifestement un accessoire omniprésent dans les grands rendez-vous et rassemblements. Depuis que le verre a été substitué par le plastique, la bouteille d'eau est devenue très disponible, à portée de main des consommateurs. Plusieurs personnes ne consomment désormais que de l'eau embouteillée,

abandonnant totalement l'eau potable du robinet, et jetant l'anathème sur sa légendaire qualité.

L'assemblée Générale des Nations Unies dans sa résolution 64/292 [1] a souligné que disposer d'une certaine quantité suffisante d'eau et de bonne qualité est un droit élémentaire de la vie dans le sens: « qu'une eau de boisson sûre et saine et l'assainissement sont un droit de l'homme essentiel à la pleine jouissance de la vie et à l'exercice de tous les droits ».

L'attrance du consommateur à l'eau minérale



embouteillée est dictée par sa prétendue pureté et surtout par sa large disponibilité.

Chaque année, la population mondiale (8 milliards de personnes en 2022) boit plus de 203,4 milliards de litres d'eau minérale en bouteilles, soit un débit de 6500 L/s ou 557 millions L/j [2]. Sur la base d'une consommation journalière de 2 litres, on en déduit une population équivalente qui ne consomme régulièrement que de l'eau minérale de 278,5 millions, soit environ 3,7 % de la population mondiale. En France, pour une population de 67,5 millions, près de 9,3 milliards de litres d'eau en bouteille sont ingurgités annuellement, un équivalent de 12,7 millions personnes, ou 18,9 % de la population [3].

En Algérie, l'intérêt à l'eau minérale est attesté depuis l'époque romaine, évoqué par Hanriot M. [4] et Colliffe J. [5] ayant répertorié et caractérisé de nombreuses sources froides et chaudes concentrées dans les zones volcaniques du nord du pays.

A l'indépendance, l'Algérie a hérité du patrimoine des eaux minérales destinées à la boisson qu'elle a nationalisé en 1966 sous la bannière de la société nationale des eaux minérale (SNEM), commercialisant quelques marques comme Mouzaïa, Batna, Saida et Ben Haroun. Cette liste a été étendue par la suite à celle d'El Goléa, de Mostaganem, de Hammamet et de Djemorah. Dans les années 1990, la SNEM est dissoute, remplacée par une centaine d'entreprises privées spécialisées dans de production et la commercialisation d'eaux minérales.

Les eaux souterraines sont de droit public et leur exploitation est soumise à l'accord de l'autorité compétente de l'Etat. La concession d'exploitation est réglementée par le décret exécutif 04-196 du 15/07/2004 [6], modifié et complété par le décret 13-298.

Aujourd'hui, il existe plus d'une centaine d'exploitants mais seules cinq marques (Ifri, Saida, Lalla Khedidja, Guedilla, et Nestlé) se partagent largement (70 %) les parts du marché algérien [7].

En Algérie, la consommation annuelle des eaux minérales selon l'Association des Producteurs Algériens de Boissons (APAB) [8], est estimée à 2,7 milliards de litres, soit 63 L/hab. En France, elle frôle 145 L/hab. L'Italie et la Finlande occupent respectivement le haut et le bas du tableau avec 192,6 L/hab et 18 L/hab. Les mexicains sont les grands consommateurs de l'eau minérale avec un taux de 235 L/hab, très loin de la moyenne mondiale évaluée à 40 L/hab [2].

C'est à partir des gisements exclusivement souterrains, microbiologiquement sains et protégés contre les risques de pollution que les précieuses eaux minérales naturelles (EMN) sont exploitées. L'eau minérale naturelle est captée soit par une source, soit par un forage. Définie en tant que telle par la réglementation, elle est utilisée pour l'embouteillage (boisson) et ou le thermalisme. Elle doit être pure, protégée géologiquement et présentant une composition minérale parfaitement stable, sans faire l'objet d'aucun traitement chimique ni désinfection avant son embouteillage ou son utilisation thermique [9]. Elle est censée être à ce titre, microbiologiquement saine et exempte de micro-organismes pathogènes. En fonction de la composition minérale, il est accordé le label d'eau minérale si celle-ci est stable dans le temps, et le label d'eau de source si elle est variable.

Le débit global d'exploitation des gisements souterrains (eau minérale et eau de source) révélé par le ministère des ressources en eau [10] est de 699 L/s, soit 60394 m³/j. Ce débit englobe 71 concessions d'eau de source et 26 d'eau minérale et correspond à environ 40 millions de bouteilles.

Dans la nature, il est extrêmement rarissime de trouver une eau pure, elle est constamment associée aux minéraux et par essence elle est naturellement minérale. L'eau et les minéraux représentent le tandem vital pour notre organisme et dont les teneurs distinguent une large gamme de qualité et classes d'eau. Les sels minéraux sont indispensables et constituent environ 4 % de sa masse [11].

Certains minéraux dits majeurs comme le calcium, le magnésium, le potassium, le phosphore, le soufre, le sodium et le chlore sont indispensables à l'organisme en quantité relativement élevée, totalisant jusqu'à 10 g/j, alors qu'une douzaine d'autres d'éléments ne sont tolérés qu'en infimes quantités : les oligoéléments.

Le plus important des ions est le potassium, son rôle est crucial dans la vie cellulaire, le calcium assure la structure osseuse et catalyse les réactions enzymatiques.

Le magnésium et les chlorures de sodium gouvernent les entrées et sorties d'eau dans la cellule alors que les ions bicarbonates contrôlent l'acidité intracellulaire et sanguine [12].

La minéralisation de l'eau est évaluée par le résidu sec (RS) en mg/l ou grâce à la conductivité électrique (CE en $\mu\text{s}/\text{cm}$ à 25 °C). Ainsi, l'eau pure (H₂O) ne

contient à 25 °C, que 2.10-7 moles (2/10 millions) par litre d'ions H⁺ et OH⁻ et possède une CE de 0,055 µS/cm. Celle de l'eau déminéralisée est 1 µS/cm [13], de l'eau de pluie est 50 µS/cm et de l'eau potable (50-500 µS/cm). La dominance de chacun des éléments minéraux imprime la catégorie minérale d'eau (bicarbonatée, calcique...) mais la teneur limite tolérable dans l'eau pour chacun des minéraux est fixée dans les normes universelles de potabilité de l'eau (OMS, Codex alimentarius)¹.

Plusieurs auteurs se sont intéressés au sujet de la typologie des eaux minérales naturelles en Algérie à l'égard de Hazzab [14], de Labadi et Hammache [15], de Khelif et Rebboub [16], et Bektache et Ouhab [17]. Dans ce contexte s'inscrit notre étude qui vise d'une part à actualiser la classification et la typologie d'une centaine d'eaux de source commercialisées en Algérie et dans une deuxième part à soulever les inconvénients qui en découlent du développement des eaux minérales embouteillées.

2. Matériel et méthodes

2.1. Géolocalisation

L'étude est basée sur 25 marques d'eaux minérales commercialisées en Algérie durant la période 2020-2022 qui ont été localisées géographiquement avec précision en utilisant leurs coordonnées de position (Latitude, Longitude) sur une carte de l'Algérie ainsi que sur les bassins hydrographiques.

2.2. Collecte des données

Les données fournies par l'étiquette collée sur la bouteille représentées par la composition minérale (cations et anions), le résidu sec à 180 °C, le pH ainsi que le RS qui un paramètre essentiel de la potabilité de l'eau de boisson sont répertoriées et exploitées afin d'établir un inventaire exhaustif des eaux embouteillées (eaux minérales et eaux de sources) commercialisées. Pour des raisons de surcharge, seuls les résultats relatifs aux eaux minérales sont présentés ici.

Le tableau 1 représente les cinq classes d'eau minérale caractérisées par Rodier D. [18] selon la valeur de RS

Tableau 1.

Classes de potabilité de l'eau en fonction du RS

RS en mg	Classes	Potabilité
< 50	Très faiblement minéralisée	Très bonne
< 500	Faiblement minéralisée	Bonne
500 < RS < 1500	Moyennement riche en minéraux	Moyennement bonne
1500 < RS < 3000	Riche en minéraux	Passable
3000 < RS < 4000	Très riches en minéraux	Mauvaise

Les teneurs en minéraux relevées des étiquettes permettent d'établir la typologie et la classification des différentes eaux. Ces teneurs sont également confrontées aux besoins de l'organisme humain et aux normes de minéralité admise relative aux eaux de boissons.

2.3. Composition et caractérisation physico-chimique des eaux minérales

Afin de dévoiler la balance ionique de chaque eau, nous avons utilisé le diagramme de Stiff, composé d'une double ordonnée, l'une pour les cations et l'autre pour les anions alors que pour décrire les faciès chimiques, nous avons utilisé le diagramme de Piper qui est composé de deux triangles de part et d'autre, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange central sur lequel converge le faciès global. Ce diagramme permet une représentation des cations et anions sur les deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon qui précise le faciès de l'eau naturelle concernée.

2.4. Etude de l'aspect économique

L'aspect économique de l'utilisation de l'eau minérale en Algérie a été évalué en comparant les prix des différentes marques d'eau minérales avec celle de l'eau potable de robinet

3. Résultats et interprétation

¹ <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/fr/>

3.1. Géolocalisation

La localisation précise basée sur les coordonnées géographiques (latitude, longitude) de chaque source d'eau minérale est représenté par le tableau 2 qui montre que la quasi-totalité des captages est réalisée dans la partie nord-est du pays, avec une concentration dans la région montagneuse de Tizi-Ouzou et Bejaia, avec une dizaine à Bejaia. Cette région, bénéficie à l'instar de tout le nord-est du pays d'une pluviométrie relativement copieuse d'environ 1000 mm.

Ces sources d'eau sont dispersées sur cinq grands bassins hydrographiques (BH) comme l'indique la figure 1. Les unités d'exploitation des EMN sont concentrées au niveau des BH n° 3 et 4, situés au nord-est, les plus faibles en superficie mais les mieux arrosées. Tandis que

BH n° 1 est le moins doté en ressources hydriques et en potentialités d'eaux minérales, au moment que le BH n° 5 regorge en eaux souterraines fossiles.

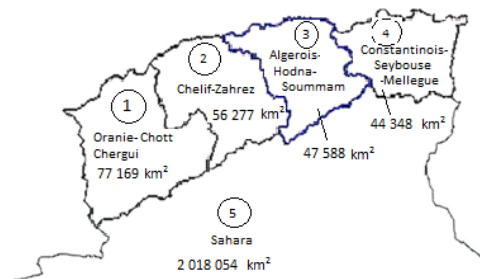


Figure 1. Position géographique des 5 bassins hydrographiques en Algérie.

Tableau 2
Positionnement géographique des marques d'eau minérale en Algérie.

N°	Nom	Latitude	Longitude	Wilaya	Bassin Hydrographique
1.	Ben Haroun	36.4554	3.7714	Bouira	Algérois-Hodna-Soummam
2.	Mouzaïa	36.4708	2.6855	Blida	Algérois-Hodna-Soummam
3.	Toudja	36.7525	4.8949	Bejaia	Algérois-Hodna-Soummam
4.	Ifri	36.5400	4.6118	Bejaia	Algérois-Hodna-Soummam
5.	Lalla Khedidja	36.4475	4.2283	Tizi Ouzou	Algérois-Hodna-Soummam
6.	Alma	36.5228	4.5195	Bejaia	Algérois-Hodna-Soummam
7.	Youkous	35.4178	7.9636	Tébessa	Constantinois-Seybouse-Mellegue
8.	Djemila	36.3432	5.7435	Sétif	Constantinois-Seybouse-Mellegue
9.	Batna	35.5634	6.1889	Batna	Constantinois-Seybouse-Mellegue
10.	Sidi Driss	36.5936	6.5706	Skikda	Constantinois-Seybouse-Mellegue
11.	Hammamet	35.4491	7.9502	Tébessa	Constantinois-Seybouse-Mellegue
12.	Fendjel	36.2709	7.5217	Guelma	Constantinois-Seybouse-Mellegue
13.	Texenna	36.6598	5.7887	Jijel	Constantinois-Seybouse-Mellegue
14.	Theveste	35.4007	8.1191	Tébessa	Constantinois-Seybouse-Mellegue
15.	Saïda	34.8595	0.1472	Saïda	Oranie-Chott Chergui
16.	Messerghine	35.6194	-0.7297	Oran	Oranie-Chott Chergui
17.	Mansorah	34.8614	-1.3385	Tlemcen	Oranie-Chott Chergui
18.	Sfid	34.4844	0.0226	Saïda	Oranie-Chott Chergui
19.	Guedila	35.0702	5.7876	Biskra	Sahara
20.	El Golea	30.5833	2.8836	Ghardaïa	Sahara
21.	Sidi Okba	34.7505	5.9084	Biskra	Sahara
22.	Milok	33.9280	2.8450	Laghouat	Sahara
23.	El Menia	30.5740	3.1864	Ghardaïa	Sahara
24.	El Ghozlan	35.1236	5.6176	Biskra	Sahara
25.	Baniane	35.0052	6.0453	Biskra	Sahara

3.2. Composition et caractérisation des eaux minérales

Les eaux minérales embouteillées, ont chacune leurs particularités, leur goût est leur empreinte qui témoignent du faciès de leur terroir et leur

environnement. Un comparatif des EMN permet de mettre en exergue les minéralités de chacune d'elles, ainsi que de leur catégorisation.

La composition ionique des eaux minérales objet de cette étude est récapitulée dans le tableau 3.

Tableau 3
Composition ionique des eaux minérales.

N°	Sources	Cations (mg.L ⁻¹)				Anions (mg.L ⁻¹)				RS (mg.L ⁻¹)	pH	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ²⁻	NO ⁻	NO ⁻			HCO ⁻
1.	Ben Haroun	413	63,2	680	9,6	399	514	20	0,1	1809	2800	6,7
2.	Mouzaïa	136	75	145	3	150	120	20	0,02	600	1280	6,5
3.	Sidi Okba	143	65,4	63,4	3,7	75	44,4	2,07	0	-	962	7,7
4.	M. Ghozlane	67,5	36,7	19,0	0,9	44	92	4,28	0	231	451	7,6
5.	Baniane	91	56	34	3	41	158	2,60	0	-	673	7,5
6.	Mansorah	85	37	30	1	48	53	12	0	632	660	7
7.	Batna	59	45	15	2	22	40	0	0	378	650	6,9
8.	Sfid	74	35	28	2	68	91	≤28	0	268	650	7,2
9.	Alma	91	37	31	2	55	87	15	< 0,01	350	628	7
10.	Theveste	89,9	34,	47,2	0,9	65	188	2,35	< 0,01	232	588	7,8
11.	Guedila	78	37	29	2	40	95	4,50	< 0,01	-	564	7,3
12.	Saida	68	50	58	2	81	65	15	0	376	478	7,5
13.	Djemila	112	24	20	11	28	45	-	-	354	468	7,5
14.	Ifri	99	24	15,8	2,1	72	68	15	< 0,02	265	380	7,2
15.	Milok	59	12	9	3	16	65	15,20	0	152	330	7,6
16.	Messerghine	52	42	45	3	78	50	5	0	260	320	7,2
17.	Youkous	77,4	14,5	13,4	4,6	25,7	35,8	2	0	219	285	7,4
18.	Toudja	56,6	15,2	29	0,7	48	19,6	4	< 0,01	-	250	7,2
19.	Hammamet	63	15	13	4,4	21	29	5	0,01	209	238	7,4
20.	Fendjel	78	16,5	18,6	3,2	23	26,4	0	0	224	233	7,8
21.	El Meniaa	25	5	27	4	10	21	11,4	< 0,01	125	199	7,9
22.	Lala Khadidja	53	7	5,5	0,5	11	7	0,42	0	160	187	7,2
23.	El Golea	24	7	28	4,6	20	36	2,40	trace	-	180	7,4
24.	Texenna	30	9,1	11	1	28,4	11	0	0	60	152	7
25.	Sidi Driss	38,8	3,16	7,1	0,72	16,9	10	< 0,15	< 0,02	127	202	7,7

NB : (-) valeur non indiquée

Les 25 marques d'eaux minérales étudiées contiennent des cations et des anions en quantité variables, elles sont dépourvues de l'ion nitrite (NO_2^-), et seulement un tiers de ces eau contient des teneurs faibles qui n'ont pas dépassée 10 mg.L^{-1} de l'ion nitrate (NO_3^-). Cette valeur reste loin de la valeur de toxicité de 50 mg.L^{-1} fixée par la norme de l'OMS².

Les eaux de Ben Haroun, Mouzaïa et Sidi Okba sont des eaux bicarbonatées (teneur en $\text{HCO}_3^- > 600 \text{ mg.L}^{-1}$) et magnésiennes (teneur $> 50 \text{ mg.L}^{-1}$), Ben Haroun est également une eau calcique (teneur en calcium $> 150 \text{ mg.L}^{-1}$), sodique ($> 200 \text{ mg.L}^{-1}$) et sulfatée ($> 200 \text{ mg.L}^{-1}$). La quasi-totalité des eaux est pauvre en sodium avec des teneurs inférieure à 20 mg.L^{-1} .

Concernant le RS des différentes eaux, il est inférieur à 500 mg.L^{-1} pour 15 marques d'eau tandis qu'il est très élevé avec des valeurs allant de 900 à 2800 mg.L^{-1} pour les eaux de Sidi Okba, Mouzaïa et Ben Haroun. Le pH des eaux varie légèrement entre 6,9 et 7,9.

D'après la figure 2, les eaux minérales collectées sont faiblement minéralisées, à l'exception des eux de Ben Haroun et Mouzaïa qui sont fortement minéralisée. L'eau qui possède la valeur la plus faible de RS (152 mg.L^{-1}) est celle de Sidi Yacoub/Taxana, située au nord-est de la wilaya de Jijel.

Les valeurs de RS les plus recherchés sont celles qui sont inférieure à 100 mg.L^{-1} , ce type d'eau est pour le moment inexistant en Algérie. Au contraire, quelques eaux minérales françaises ont des RS relativement bas comme par exemple l'eau Mont Roucous (29 mg.L^{-1}), Volvic (130 mg.L^{-1}) et Evian (345 mg.L^{-1}).

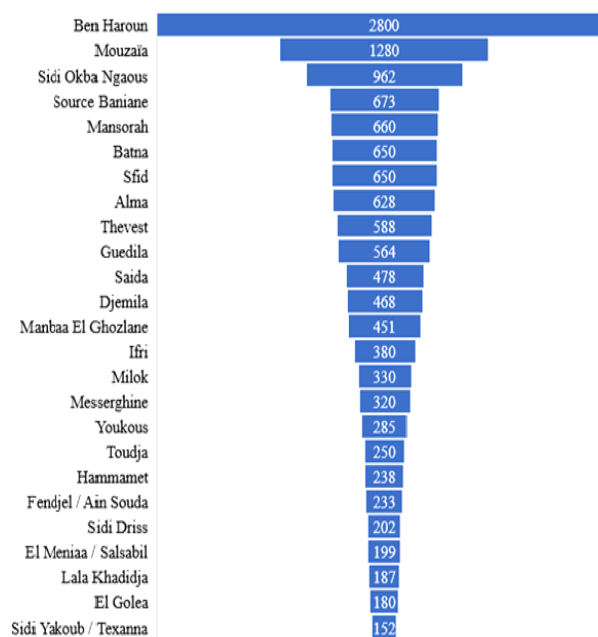


Figure 2. Classification des eaux minérales algériennes en fonction du RS.

² <https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm>

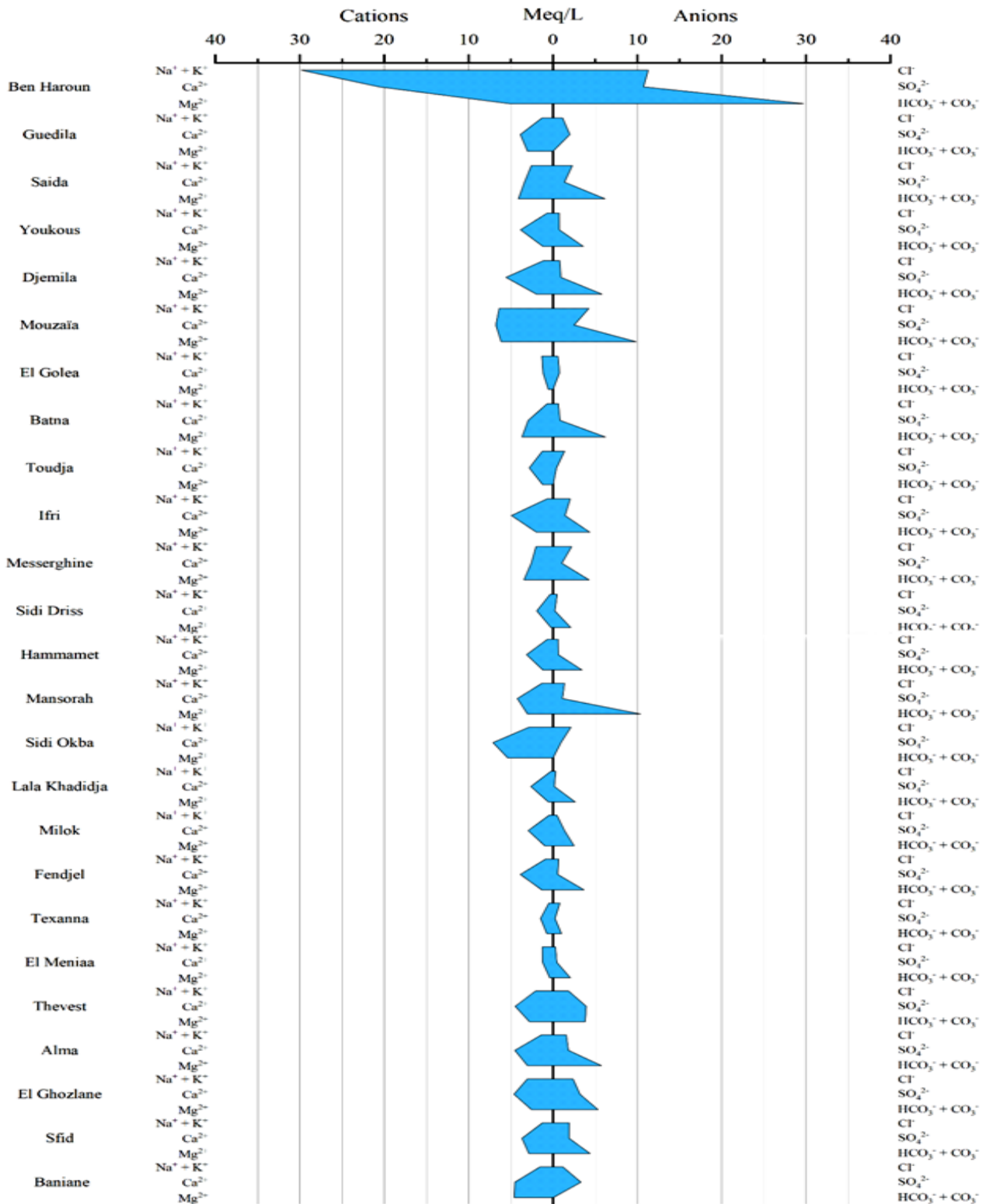


Figure 3. Diagramme de Stiff relatif aux eaux minérales naturelles

3.2.1. Caractérisation des eaux minérales selon le diagramme de Stiff :

Le diagramme de Stiff dévoile la balance ionique de l'eau minérale. Des figures géométriques impriment la tendance des cations vis-à-vis des anions ou vice versa. Ainsi, pour l'eau minérale Guedilla, on remarque sur la figure 3, la dominance des cations (146 mg.L^{-1}) par rapport aux anions (140 mg.L^{-1}). Leur somme est 286 mg.L^{-1} sur les 564 mg.L^{-1} du RS. De la même manière, pour l'eau Mansorah les anions (745 mg.L^{-1}) dominant largement les cations (153 mg.L^{-1}). Leur somme donne 898 mg.L^{-1} contre un RS = 660 mg.L^{-1} . L'eau de Mouzaia est très riche en bicarbonates.

Théoriquement, à l'égard de la balance ionique, la somme des cations est sensiblement égale à la somme des anions et leur somme équivaut au RS. Cependant, les différences constatées dans nos résultats sont due à la présence d'ions dans le résidu sec autres que ceux indiqués sur l'étiquette.

3.2.2. Caractérisation des eaux minérales selon le diagramme de Piper :

En se référant au diagramme de Piper mentionné dans la figure 4, la plupart des échantillons (marques d'eau minérale) examinée se caractérise par un faciès dominant bicarbonaté calcique et magnésien corroborant les résultats déjà obtenus par Khelif et Rebboub [16]. ; Bektache et Ouhab [17]. Cependant cette expansion cosmopolite de l'usage de l'eau minérale a des retombées tant sur plusieurs plans : ressources eau souterraines, sanitaire, économique et environnemental.

3.2.3. aspect économique

En se référant aux résultats de la société des eaux et de l'assainissement (SEEAL) d'Alger (tableau 5), l'eau en bouteille est chère, en Algérie, le prix de la bouteille d'eau minérale de 1,5 L est de 35 à 40 DA, alors que le mètre cube d'eau du robinet vaut 6 DA, soit 0,009 DA le 1,5 L, en comparant avec, le rapport est d'environ 4000 fois. La bouteille de 1 L de Perrier est vendue à Alger à 500 DA. A Paris, le prix d'un litre d'eau du robinet est de 0,0025 euro à comparer avec le prix moyen d'un litre d'eau en bouteille qui est d'environ 0,5 euro [19]. L'eau en bouteille est donc 200 fois plus chère.

L'eau du robinet amenée à domicile, outre son prix

relativement bas, présente une qualité équivalente, parfois supérieure à certaines eaux en bouteilles (Tableau 5).

Tableau 5
Composition minérale de l'eau du robinet

Composition Minérale (mg.L^{-1})	Teneur limite de référence	Eau du Robinet Paris	Eau du Robinet Alger*
Calcium	-	90	54
Magnésium	-	06	24
Sodium	200	10	50
Potassium	12	02	2,4
Bicarbonates	-	220	133
Sulfates	250-400*	30	79,2
Chlorures	250-500*	20	199
Nitrates	50	29	7,2
Nitrites	- 0,03	-	< 0,02
Fluor	1,5	0,17	-
RS	-	420	-
CE en $\mu\text{S/cm}$	< 2800	-	991

Nestlé Waters™ est parmi les géants ayant main basse sur l'eau minérale, bien qu'il ne représente que 15 % de ce marché, il est le numéro un sur le marché mondial de l'EMN. Il possède des marques de renommée dans 17 pays mais son eau est distribuée dans 120 pays [20]. Il s'octroie des marges bénéficiaires astronomiques et son chiffre d'affaire dépasse actuellement les 80 milliards de dollars US [20]. L'eau en bouteilles est "le marché des boissons le plus dynamique au monde, évalué à 147 milliards de dollars américains par an", selon [21].

4. Discussion

La norme OMS reconnaît en matière de minéralité totale, que le total des solides dissous (TDS), doit être en dessous de 1000 mg.L^{-1} . Rien n'apparaît par contre à ce sujet dans les directives européennes ou algériennes, comme s'il fallait taire cet aspect et ne pas remettre en cause l'excès de minéralité de la grande majorité des eaux minérales dont le RS dépasse les 500 mg.L^{-1} .

Si on considère les besoins en calcium (1200 mg/j), boire 2 l d'eau minérale Saïda apporte 136 mg de calcium, soit 11,3 % des besoins quotidiens, et combler ces derniers cela requière 18 l d'eau

. L'eau consommée se limite à un pouvoir de nettoyant et de détoxiquant, doit-on comprendre, un pouvoir d'autant plus efficace que l'eau est moins minéralisée. L'eau de boisson est surtout nécessaire pour ce qu'elle emporte que pour ce qu'elle apporte.

Cette tendance est clairement explicitée par l'OMS [9] qui indique qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune preuve scientifique valable des effets positifs de ces eaux minérales. Bien que certaines eaux minérales puissent être utiles pour fournir des micronutriments essentiels, tels que le calcium et le magnésium, les directives OMS ne font pas de recommandations concernant des concentrations minimales d'éléments essentiels en raison des incertitudes relatives à l'apport minéral de l'eau de boisson

Un énorme progrès a été effectué dans le domaine du contrôle de la qualité d'eau de boisson. De pas de contrôle du tout au Moyen Age et même à la Renaissance, à un contrôle sommaire basé sur à peine six paramètres à la fin du XIX^{ème} siècle. Aujourd'hui, c'est un faisceau de 63 paramètres (physico-chimiques, organoleptiques, microbiologiques, substances toxiques) qui évalue la qualité de l'eau potable [9].

Cependant, l'EMN est censée être potable naturellement, du fait de la protection de son périmètre de captage. Elle se distingue de sa composition minérale parfaitement stable, sans aucun traitement chimique ni désinfection avant son embouteillage. Des études basées sur des analyses au laboratoire telles Aguagnia et Ounaissia [23] mais aussi Labadi et Hammache [15] ont soulevé que les teneurs en éléments chimiques majeurs changent dans le temps alors qu'elles sont censées être constantes.

Sur le plan bactériologique, l'adjonction du chlore, au demeurant très fréquemment utilisée pour l'eau du robinet, est bannie pour les EMN, ce qui soulève le doute sur sa stérilité. C'est la raison pour laquelle des mesures très strictes sont imposées lors de la mise en bouteille. Par ailleurs, une eau qui reste longtemps stockée augmente sa vulnérabilité à l'infection surtout si elle est exposée à la chaleur et à la lumière. C'est ainsi que des imperfections qualitatives ont été signalées pour certaines marques.

Aussi, dans certaines eaux minérales vendues à l'étranger, un excès d'antimoine a été signalé [21]. Ce surdosage semble t-il dû à la fabrication du PET (polyéthylène téréphtalate) dans lequel le trioxyde d'antimoine, les phtalates, l'antimoine ou l'acétaldéhyde,

sont fréquemment utilisés comme catalyseurs de polymérisation du PET [22]. Ils peuvent se détacher et migrer dans l'eau où ils se concentrent. Des traces de trioxyde d'antimoine (jusqu'à 0,5 µg.L⁻¹), ont été décelées dans des EMN, cette concentration est dix fois plus faible que la norme européenne (5 µg.L⁻¹), en outre c'est l'effet cumulé qui est à craindre [21]. Ingérés, ces particules provoqueraient des troubles respiratoires, des troubles endocriniens ou même un cancer.

Un test réalisé sur une eau minérale allemande a présenté une augmentation de concentration allant de 3,8 ng.L⁻¹ d'antimoine au départ, à 626 ng.L⁻¹ après trois mois de contact [24]. Une autre étude menée sur 11 marques d'EMN, a révélé que 93 % contiennent de minuscules particules de plastiques dont les dangers sanitaires restent encore méconnus [21].

Bien qu'elle soit très pratique, l'eau en bouteille n'est pas écologique et la bouteille de PET est un vrai fléau de pollution. Celle-ci touche tout l'environnement et se concentre particulièrement au large des océans Les empreintes carbone et même hydrique sont élevées, alors que le PET met des siècles à se désintégrer. L'angélisme qui voile l'exploitation des eaux dites minérales cache merveilleusement bien l'assaut vers la privatisation des ressources naturelles d'eau, objectif de l'économie libérale mondiale.

5. Conclusion

La consommation des eaux minérales embouteillées en Algérie connaît une certaine croissance. Entre les eaux minérales et les eaux de sources, il existe une centaine de marques dont cinq (Ifri, Lalla Khedidja, Guedilla et Nestlé) se partagent 70 % des parts du marché algérien. La Géolocalisation de ces eaux a permis de mettre en exergue une nette concentration des exploitations des eaux minérales dans la région de Kabylie où il serait prévoyant de suivre les éventuels risques (hydrogéologiques et environnementaux) d'une telle surexploitation.

Il est constaté aussi que les eaux minérales vendues en Algérie, ont une minéralité moyenne à faible, à l'exception de deux marques (Ben Haroun et Mouzaia) dont elle est excessive, dépassant 1000 mg.L⁻¹. Cependant, aucune eau n'a un RS inférieur à 100 mg.L⁻¹.

A l'instar des autres pays, l'Algérie s'enlise dans le

modèle de consommation propre aux pays riches. La bouteille d'eau minérale est partout disponible et n'est guère affectée par les périodes de sécheresse touchant les robinets domestiques. Il est même permis de penser que cette disponibilité fait augmenter la consommation d'eau. De plus en plus de personnes abandonnent l'eau du robinet au profit de l'eau en bouteille qui s'est imposée comme une nouvelle manière de consommer l'eau.

Références

- [1] NU (2010). Déclaration des Nations Unies. Resolution 64/292. <http://ohchr.org/fr>
- [2] Globometer (2022). Consommation d'eau minérale dans le monde. <http://globometer.com>
- [3] WRI (2022). Demography. World resources institute. www.wri.org
- [4] Hanriot M. (1911). Les eaux minérales de l'Algérie. Ed. Dunod et Pinat, Paris, 412P. Disponible en ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5849085x/f10.item> (Consulté le 16/03/2023)
- [5] Colliffe J. (1856). Sur les eaux minérales naturelles en Algérie. *J. Pharm. Chim.*, 29 (3) 283 285.
- [6] <https://www.commerce.gov.dz/fr/reglementation/decret-executif-n-deg-04-196>
- [7] https://www.boisson-sans-alcool.com/marques_eau-algerie/
- [8] APAB (2022). Rapport annuel. Association des producteurs algériens de boisson. <http://apab.algerie.org>
- [9] OMS (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4^e Ed. OMS. 564p
- [11] Vidal (2008). Les sels minéraux et les oligoéléments. Guide de l'alimentation équilibrée. <https://www.vidal.fr/sante/nutrition/corps-aliments/sels-mineraux-oligoelements.html> (Consulté le 19/03/2023)
- [12] Queneau P., Hubert J. (2006). Place des eaux minérales dans l'alimentation. *Bull. Acad. Nle Med.*, 190 (8). [HTML] https://www.academie-medecine.fr/06_19_place_des_eaux_minerales_dans_l'alimentation/ ((Consulté le 13/05/2023)
- [13] Atteira O. (2015). Chimie et pollution des eaux. Ed. Lavoisier. Tec Doc, 429 p.
- [14] Hazzab A. (2011). Eaux minérales naturelles et eaux de sources en Algérie. *Geoscience*, 343 (1) : 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.11.007>
- [15] Labadi A.S., H. Hammache (2016). Etude comparative des eaux minérales et des eaux de sources produites en Algérie. *Larhyss Journal*. 13 (4) : 319-342. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/55396> (Consulté le 21/05/2023)
- [16] Khelif S. et Rebboud A. (2020). « *Etude physico chimique de quelques eaux minérale en Algérie* ». Master Génie Procédés, Univ.Blida1, Algérie, 51P. Disponible en ligne. <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/11067/1/m%C3%A9moire-master-2.pdf>. (Consulté le 19/04/2023)
- [17] Bektache S., OS. (2022). « *Etude des critères de choix des marques sur le marche de l'eau embouteillée dans la ville de Bejaia* ». Master Dept. Sc. Econ., Univ. Bejaia, Algérie, 78P. .
- [18] Rodier J., Legube B., Merlet N. (2005). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduelles, eaux de mer. Ed. Dunod, 1383P.
- [19] Rapport d'information. Les bioplastiques biodégradables et compostables : états des lieux. 44P. <https://sphere.eu/wp-content/uploads/2019/07/Rapport-SPHERE-FRAN-DEF.pdf> (consulté le 25/04/2023)
- [20] Wateau F. (2015). L'eau des riches : Perrier, le cosmopolitisme et les buveurs d'eau en bouteilles. *Revue Ateliers d'anthropologie* n°41. <https://doi.org/10.4000/ateliers.9802>
- [21] Gaubert C. (2018). L'eau en bouteille deux plus contaminée par des particules de plastique qu'au robinet. https://www.sciencesetavenir.fr/sante/1-eau-en-bouteille-deux-fois-plus-contaminee-par-des-particules-de-plastique-qu-au-robinet_122059. (Consulté le 30/10/2023)
- [22] MacArthur E. (2016). Pour une nouvelle économie des plastiques. Rapport présenté au Forum économique mondial en 2016. https://2014-2019.switchmed.eu/fr/documents/npec-hybrid_french_22-11-17_digital.pdf. (Consulté le 11/10/2023)
- [23] Aguagnia K. et Ounaissia W. (2013). « *Etude comparative de quelques sources minérales embouteillées en Algérie* ». Mémoire Master SNV Biol. Univ. Guelma, 54P. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/2545/1/M570.366%202013%20SNV.PDF> (Consulté le 15/06/2023)
- [24] Picot A. et Narbonne J. F. (2011). L'antimoine un toxique mythique toujours méconnu. *Revue l'Actualité Chimique*, avril (351) 53-58. <https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/2011-351-avril-p.53-Picot-HD.pdf> (Consulté le 06/06/2023)



Efficacité des conservateurs acides et hydrocolloïdes alimentaires sur la durée de conservation du lait cru à température ambiante

Dominique AGANZE MULUME^{a,c,*}, Daniel BUCHAGUZI MUZUSANGABO^a, Janvier MUGISHO ZIRHUMANA^a, Thomas BRIGATTI^e, Sage WEREMUBI MWISHA^a, Orthence KANYERE KAZIGE^a, Jacques KALUMUNA BARHASHISHWA^d, Pascal NSAMBU MUKONDUASUMU^{a,b,d}

^a Faculté des sciences Agronomiques et Environnement, Université Evangélique en Afrique, B.P: 3323/Bukavu, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo

^b Département de Production Végétale, Institut Supérieur d'Etudes Agronomiques et Vétérinaires de Mushweshwe (ISEAV-Mushweshwe), B.P :19/Bukavu, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo

^c Laboratoire de Microbiologie et Technologie des Aliments, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université Evangélique en Afrique, B.P : 3323/Bukavu, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo

^d Institut Supérieur des Techniques Médicales de Nyangezi (ISTM-Nyangezi), B.P :25/Bukavu, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo

Résumé

La présente étude a été initiée afin d'étudier les effets des conservateurs acides (CA) et hydrocolloïdes alimentaires (HC) sur la durée de conservation du lait cru à la température ambiante (entre 20 à 25 °C). Pour ce faire, les échantillons de lait cru ont reçu différentes doses des conservateurs acides (l'acide citrique : E330 et l'acide ascorbique : E300) et hydrocolloïdes alimentaires (l'Agar-agar alimentaire : E406 et Amidon : E1400). Les doses des conservateurs acides et des hydrocolloïdes alimentaires ont été variées dans l'optique de trouver la dose optimale pouvant prolonger la durée de conservation du lait cru tout en préservant la qualité physicochimique, microbiologiques et organoleptiques. Au terme des investigations faites, il a été observé que les conservateurs acides utilisés ont permis de préserver la qualité microbiologique des échantillons du lait et n'ont pas présenté des effets significatifs sur les valeurs finales de pH. Par contre, les hydrocolloïdes alimentaires utilisés ont eu l'effet escompté en empêchant la coagulation du lait en présence des acides mais uniquement lorsque la dose appliquée était $\leq 0,3$ g dans 100 mL de lait. L'acide citrique a été plus efficace que l'acide ascorbique, tandis que le meilleur hydrocolloïde alimentaire s'est avéré être l'Agar-agar alimentaire (E406). Les résultats de cette étude indiquent que les conservateurs acides et les hydrocolloïdes alimentaires peuvent donc prolonger la durée de conservation du lait cru à température ambiante et limiter la dégradation microbienne du lait cru. Ces substances peuvent aider à améliorer la sécurité alimentaire et la nutrition dans les régions où la conservation du lait cru pose des sérieux problèmes.

Mots clés : Lait cru ; Conservateurs acides ; Hydrocolloïdes alimentaires ; Qualité microbiologique ; Qualité organoleptique

Effectiveness of food acid and hydrocolloid additives on the shelf life of raw milk at room temperature

Abstract

The present study was conducted to investigate the effects of acid preservatives (AP) and food hydrocolloids (FH) on the shelf life of raw milk at room temperature (between 20 to 25°C). Raw milk samples were treated with different doses of acid preservatives (citric acid: E330 and ascorbic acid: E300) and food hydrocolloids (food agar-agar: E406 and starch: E1400) to determine the optimal dose that could prolong the shelf life of raw milk while maintaining its physicochemical, microbiological, and organoleptic quality. The results showed that the acid preservatives helped preserve the microbiological quality of the milk samples without significant effects on the final pH values. The food hydrocolloids prevented milk coagulation in the presence of acids only when applied at a dose ≤ 0.3 g in 100 mL of milk. Citric acid was more effective than ascorbic acid, while food agar-agar (E406) was the best food hydrocolloid. Acid preservatives and food hydrocolloids can be effective tools for prolonging the shelf life of raw milk at room temperature and improving food safety and nutrition in regions where raw milk preservation is a challenge.

Keywords: Raw milk; Acid preservatives; Food hydrocolloids; Microbiological quality; Organolepticity.



1. Introduction

Le lait est un aliment très important non seulement dans l'alimentation humaine [1] mais aussi dans la création d'emplois et de la richesse [2,3]. Le lait et ses dérivés sont une source importante de nutriments dont les protéines, les glucides, les acides gras utiles, les minéraux et les vitamines [4-6]. Le lait de vache est le plus consommé de tous les laits des mammifères [7]. Il est consommé aujourd'hui plus que jamais auparavant et sa demande augmente à un rythme rapide [8]. La FAO estime que la consommation de lait par habitant en Afrique est d'environ 25 litres par an, la moyenne mondiale étant de 100 litres par habitant par an [9,10].

Dans les pays africains, plusieurs exploitations investissent dans le commerce du lait car il donne naissance à une multitude de produits laitiers [11] qui sont au cœur de l'alimentation humaine [12]. A l'état cru, les propriétés physicochimiques et microbiologiques du lait sont très intéressantes et renseignent sur la richesse du lait lors de sa consommation ainsi que pour la fabrication d'autres produits laitiers [13,14]. La qualité du lait changeant en fonction de plusieurs facteurs dont la génétique de l'animal, les conditions d'élevage, le mode de traite (manuel ou mécanique), l'hygiène, le temps de conservation, etc. [2,15]. Un litre de lait a une valeur énergétique d'environ 750 Kcal facilement utilisables [16].

En République Démocratique du Congo (RDC), le lait est un produit de luxe [17,18]. Toutefois, sa conservation, son transport de la ferme jusqu'à domicile [2] et sa qualité sanitaire constituent une préoccupation importante, tant pour des raisons socio-économiques que sanitaires [19]. De surcroît, la production du lait, se heurte souvent au problème de gestion de la qualité du lait [20] qui ne cesse de s'altérer très rapidement dès sa sortie du pis une fois qu'il est entreposé à la température ambiante. De même, suite à une multitude de microorganismes pathogènes et non pathogènes dont le lait regorge, il ne tarde pas à s'aigrir puis à changer d'apparence [12,21,22]. Ces populations microbiennes sus-évoquées sont d'origines multiples comme les conditions de traite au niveau des fermes, les défauts d'hygiène à tous les stades

et l'absence d'une chaîne du froid continue dans le circuit de production [2-5].

Cependant, la préservation de la bonne qualité du lait durant une longue période semble être techniquement et économiquement très délicate à réaliser. Par ailleurs, deux directions ont été explorées simultanément pour prolonger la durée de conservation du lait. Il s'agit d'une part de la transformation radicale du lait via sa déshydratation partielle ou totale [23,24] et d'autre part de l'association du traitement thermique du lait ainsi que de sa réfrigération pour inhiber le développement microbien sans modifier son caractère liquide [21,23,24].

Paradoxalement, un débat permanent sur le traitement optimal du lait a toujours opposé les hygiénistes et les nutritionnistes. Les premiers étant soucieux d'éradiquer toutes les bactéries pathogènes, prônent un traitement thermique élevé du lait, au risque d'altérer son goût. Par contre, les seconds, qui veulent préserver les qualités gustatives et nutritionnelles du lait, préfèrent limiter son chauffage [2].

Le manque d'électricité en permanence et des équipements de conservation (congélateurs et réfrigérateurs) impactent négativement sur la conservation du lait cru pendant une longue durée dans la province du Sud-Kivu en RD Congo. Curieusement, force est de constater que jusqu'à l'heure actuelle, très peu d'études conduites dans la province du Sud-Kivu se sont orientées vers la recherche d'une méthode pouvant aider les éleveurs et les vendeurs à prolonger la durée de conservation du lait cru tout en préservant ses qualités physicochimiques, nutritionnelles, microbiologiques et organoleptiques. Ainsi, c'est dans l'optique de combler ces lacunes susdites que cette étude a été initiée. Elle vise généralement à contribuer à l'amélioration de la durée de conservation du lait cru produit et vendu dans la province du Sud-Kivu via les conservateurs acides (CA) et les hydrocolloïdes alimentaires (HC). Spécifiquement, elle poursuit les objectifs ci-dessous :

- Evaluer les effets des conservateurs acides et des hydrocolloïdes alimentaires sur la durée de conservation du lait cru à la température ambiante ;

• Comparer les qualités physicochimiques, microbiologiques et organoleptiques de différents laits crus conservés par les conservateurs acides et les hydrocolloïdes alimentaires à la température ambiante avec celles des laits crus conservés à froid via le réfrigérateur.

2. Matériels et méthodes

2.1. Milieu d'étude

Les échantillons du lait cru ont été collectés dans le territoire de Kabare (2° 30' Sud, 28° 48' Est), se trouvant dans la province du Sud-Kivu à l'Est de la République Démocratique du Congo. Le choix du territoire de Kabare pour cette étude a été motivé par la dépendance de ses habitants vis-à-vis du lait cru à la fois comme source de revenu et comme aliment. Les analyses physicochimiques, organoleptiques et microbiologiques ont été conduites dans le laboratoire de microbiologie et technologies alimentaires de l'Université Evangélique en Afrique (UEA) à Bukavu.

2.2. Matériel et réactifs utilisés

La présente étude a été menée en utilisant le lait cru issu de plusieurs femelles des vaches de race frisonne qui sont élevées dans les conditions agroécologiques de Kabare. Par ailleurs, les bocaux stériles et le bac isotherme muni des accumulateurs de froid ont été utilisés dans les processus de prélèvement et transport du lait cru de la ferme jusqu'au laboratoire.

Pour le test de conservation du lait, deux conservateurs acides ont été utilisés. Il s'agit de l'acide citrique (E330) et de l'acide ascorbique (E300). De même, deux hydrocolloïdes alimentaires dont l'Agar-agar alimentaire (E406) et l'Amidon (E1400) ont été utilisés pour prévenir la coagulation et empêcher la précipitation des protéines du lait en présence des conservateurs acides.

Plusieurs matériels du laboratoire ont été utilisés lors des analyses physicochimiques et microbiologiques des échantillons du lait conservé. Parmi ces équipements figurent l'autoclave de

marque Sturdy SA-252F ayant servi à la stérilisation, la balance analytique de précision (KERN AEJ 100-4CM), la Hotte à Flux laminaire à Rayon UV (Clean view), le bain-Marie (Pierron hydromaxi 1000), le pH-mètre (Mettler-toledo AG), la verrerie du laboratoire (béchers, erlenmeyer, tube à essai, éprouvette graduée, fiole graduée), le Vortex (CYAN CL001), le Bec bunsen et le réfrigérateur.

2.3. Méthodes

2.3.1. Echantillonnage

Les échantillons du lait cru étaient collectés dans dix (10) fermes paysannes sur des femelles multipares en lactation, de race frisonne, cliniquement saines d'après les vétérinaires des fermes. Un échantillon composite était obtenu en mélangeant les laits collectés dans les dix fermes. Les échantillons de lait cru ont été prélevés et conservés dans des bocaux en polyéthylène stériles à 4 °C au cours de leur acheminement au laboratoire. Les caractéristiques du lait cru utilisé (potentiel en hydrogène, acidité titrable, teneur en matières sèches, taux d'humidité (ou teneur en eau), teneur en lactose, densité, teneur en minéraux) ont été immédiatement mesurées juste après collecte.

2.3.2. Application des conservateurs acides et des hydrocolloïdes alimentaires

Deux conservateurs acides ont été utilisés dont l'acide citrique (E330) et de l'acide ascorbique (E300). De même, deux hydrocolloïdes alimentaires ont été utilisés dont l'Agar-agar alimentaire (E406) et l'Amidon (E1400). Les conservateurs acides ont été appliqués en variant les doses (0,1 ; 0,3 et 0,5 g/100 mL) afin de trouver la dose optimale pour une conservation effective. Les hydrocolloïdes ont également été ajoutés (0,2 ; 0,3 et 0,4 g/100 mL) car ils ont la capacité de maintenir les micelles de la caséine dans une suspension colloïdale en empêchant leur précipitation lorsqu'on ajoute des conservateurs acides dans le lait [24] ; et à condition de les appliquer avant les conservateurs acides dont le choix se justifie non seulement par leur capacité à baisser le pH à des valeurs inférieures à 4 en permettant d'assurer l'innocuité

microbienne du lait [25,26], mais aussi par leur effet sur la réaction de conversion du lactose en acide lactique [27].

Ainsi, les conservateurs acides étant de même nature que les produits de cette réaction enzymatique, ils se comportent comme des inhibiteurs de la réaction [28]. Cela est en effet expliqué par la cinétique des réactions enzymatiques qui présente une phase d'inhibition par les produits de la réaction, une phase pendant laquelle la concentration des produits de la réaction n'est plus négligeable et la réaction inverse tend à diminuer cette concentration [29]. A ce moment-là, la vitesse de formation des molécules du complexe enzyme-substrat (ES) diminue progressivement jusqu'à l'établissement de l'équilibre [28]. Lorsqu'il y a déjà dans le milieu réactionnel (le lait) des molécules de même nature que les produits de la réaction (les conservateurs acides), on atteint la phase d'équilibre pendant laquelle les quantités de substrat « S » et de produit « P » sont constantes ($K_1S = K_{-1}P$) [30]. Dans ces conditions, la réaction est très considérablement ralentie, ce qui empêcherait la dégradation du lactose et d'autres macromolécules du lait [28-30].

Les échantillons de lait ont été séparés en deux lots dont le premier a reçu l'acide citrique et le deuxième lot l'acide ascorbique. Pour le premier lot, neuf échantillons de lait (L1 à L9) ont reçu à la fois l'acide citrique (AC) et les hydrocolloïdes alimentaires (HC). Trois échantillons (L01 à L03) n'ont reçu que l'acide citrique et non les HC. Les échantillons T1 et T2 sont des témoins qui n'ont rien reçu comme traitement mais les T2 ont été conservés au réfrigérateur contrairement aux T1 qui ont été conservés à la température ambiante 20-25 °C. Pour le deuxième lot, la même chose a été faite à la seule différence que l'acide citrique a été remplacé par l'acide ascorbique. Après ajout de conservateurs, les laits ont été conservés à température ambiante, excepté les échantillons témoins (T2) qui ont été conservés à 4 °C dans le congélateur. Les analyses ont été réalisées le premier jour de la collecte des échantillons et après 2 semaines de conservation.

2.3.3. Détermination du pH, de l'acidité Dornic, de la teneur en lactose et phosphore

Les paramètres en étude étaient le pH, l'acidité titrable, la concentration en lactose, la concentration en phosphore et le résidu sec de différents échantillons de lait avant et après 2 semaines de conservation à température ambiante (variant entre 20 et 25 °C) et au réfrigérateur. Ces paramètres ont été évalués respectivement selon les méthodes ci-après : pH-métrie, titrimétrie suivant la norme NF V05-101 (1974) [44], méthode de Bertrand pour la teneur en glucides et méthode d'Olsen pour la teneur en phosphore [9,11]. La teneur en acidité titrable a été déterminée en titrant 10 mL de l'échantillon de lait par la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) de concentration 0,01N en présence d'une goutte de phénolphthaléine (1 %) comme indicateur coloré jusqu'au point d'équivalence détectable lors de l'apparition de la couleur rose persistante. A l'issue du dosage, l'acidité titrable a été d'abord exprimée en $g.L^{-1}$ et évaluée via l'expression ci-après :

$$C_0 = \frac{C_1 \times V_{\text{éq}} \times \text{Mac}}{V_0} \quad (1)$$

Où : C_1 est la concentration d'hydroxyde de sodium (NaOH) de l'ordre de 0,01 N ; $V_{\text{éq}}$ est le volume (en mL) de la solution de l'hydroxyde de sodium (0,01 N) consommé au point d'équivalence, en mL ; Mac est la masse molaire de la molécule d'acide lactique de l'ordre de 90 g.mol^{-1} ; V_0 est le volume de lait prélevé ($V_0 = 10 \text{ mL}$).

Enfin, l'acidité titrable du lait a été convertie en degré dornic (°D) à l'aide de l'expression ci-dessous :

$$^{\circ}D = \frac{C_0}{0,1 \text{ g/L}} \quad (2)$$

Le lactose a été dosé dans le lait conformément au mode opératoire relatif à la méthode de Bertrand alors que le phosphore a été dosé par la méthode d'Olsen. Le principe de la méthode d'Olsen est tel que l'ion orthophosphate du produit laitier réagit avec l'ion molybdate pour former un complexe phosphomolybdate. Ce dernier est réduit avec l'acide ascorbique en milieu acide pour former un

complexe phosphomolybdique de couleur bleue, dont l'absorbance déterminée à la longueur d'onde de l'ordre de 665 nm est proportionnelle à la concentration de l'ion orthophosphate présent dans l'échantillon de lait.

2.3.4. Détermination de la teneur en eau

La teneur en eau (%H) a été déterminée selon le standard NF V04-401 proposé par l'association Française de Normalisation (AFNOR en 1968). La méthode consiste à étuver l'échantillon à 105 °C jusqu'à obtenir un poids constant. Ainsi, la teneur en eau découle de la différence entre la matière fraîche et la matière sèche.

2.3.5. Teneur en matière sèche

La teneur en matières sèches (%MS) a été déterminée par la méthode proposée par Agbo *et al.* [32]. Elle a consisté à prendre la teneur en eau totale (100 %) et d'y soustraire la teneur en humidité relative obtenue à l'issue de l'étuvage des échantillons du lait cru. La formule ci-dessous a été appliquée pour déterminer la teneur en matières sèches :

$$MS(\%) = 100\% - \%H \quad (3)$$

2.3.6. Détermination de la teneur en calcium

Le calcium a été dosé par complexométrie. Cette méthode utilise le réactif de Patton Reeder (acide calconcarboxylique) comme indicateur coloré acido-basique [39]. Cette teneur découle de la relation ci-dessous :

$$\text{Teneur en Ca (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{40.N.V_1.1000}{V_2} \quad (4)$$

Où : V_1 est le volume (mL) de la solution de l'EDTA¹ ayant servi à la titration du filtrat de l'échantillon de lait jusqu'au point d'équivalence ;

V_2 est le volume (mL) du filtrat de l'échantillon prélevé (10 mL) ; N est la normalité de la solution de l'EDTA (0,01 N).

2.3.7. Mesure de la densité

La densité a été déterminée en plongeant le densimètre dans un pied gradué en verre rempli de 1 L du lait cru, soigneusement homogénéisé au préalable (sans mousse), à la température de 25 °C. La lecture de la valeur stabilisée de la densité a été faite au bord supérieur du densimètre [39].

2.3.8. Analyse microbiologique

L'analyse microbiologique a consisté en l'isolement et le dénombrement de certains microorganismes susceptibles de contaminer les échantillons de lait cru depuis sa traite jusqu'à sa conservation. La flore aérobie mésophile totale (FAMT), les coliformes totaux et fécaux, les *Salmonella spp.* et *Listeria monocytogènes* ont été déterminés par les méthodes décrites par Bacigale *et al.* [25]. Le tableau 1 fournis les résultats de cette analyse.

Le comptage des colonies s'est fait sur les boites qui ont un nombre compris entre 30 et 300 colonies. La formule ci-dessous a été utilisée pour la conversion :

$$N = \frac{\sum C}{v(n_1 + 0,1n_2 + 0,01n_3).d} \quad (5)$$

$\sum C$ étant la somme totale des colonies comptées ; n_1 = nombre de boites comptées dans la première dilution ; n_2 = nombre de boites comptées dans la seconde dilution ; n_3 = nombre de boites comptées dans la troisième dilution ; v = volume de solution déposée (1 mL) et d le facteur de dilution à partir duquel les premiers comptages seront observés (10^{-3}).

¹ L'EDTA est un agent chélatant (ou complexant) utilisé dans de nombreuses industries (traitement de l'eau, détergents, textile, photographie, pâte à papier, agroalimentaire, cosmétique, agriculture...). L'EDTA se présente sous la forme de cristaux incolores, alors que son sel tétrasodique forme une poudre blanche.

Tableau 1.
Germes isolés, Milieux de cultures et caractéristiques des colonies

Germes isolés dans les échantillons de lait	Milieux de culture et Temps d'incubation	Caractéristiques des colonies
FAMT (Flores aérobies mésophiles totales)	La flore aérobie mésophile totale (FAMT) a été dénombrée en milieu de culture spécifique PCA (Plate Count Agar) après 24 heures d'incubation à 30° C [25].	Les colonies des FAMT ont une coloration blanchâtre ou crème, jaunâtre ou orange sur le milieu PCA. Elles sont entourées d'une zone de clairance.
Coliformes (Fécaux et Totaux)	Les germes indicateurs de contamination fécale (coliformes fécaux) et les coliformes totaux ont été mis en évidence sur milieu de culture sélectif MacConkey Agar après 24 heures à 72 heures d'incubation respectivement à 30° C et 44° C [25].	Les coliformes produisent des colonies de coloration rouge foncé ou roses sur le milieu MacConkey Agar et ces colonies sont souvent entourées d'un halo de couleur jaune
<i>Salmonella</i> spp.	Les salmonelles ont été dénombrées sur le milieu de culture sélectif Hektoen Agar après 48 à 72 heures d'incubation à 30° C.	Les colonies de Salmonella sont généralement petites, rondes et translucides à vert clair ou bleu verdâtre. Elles peuvent également être noires.
<i>Listeria monocytogènes</i>	<i>Listeria monocytogènes</i> ont été dénombrées sur le milieu de culture PALCAM AGAR à une température d'incubation de 37 °C pendant 24 à 48 heures [2].	Les colonies de <i>Listeria</i> sont de couleur rouge ou jaune.

2.3.9. Analyse des paramètres organoleptiques

Les propriétés organoleptiques ont été évaluées par un panel de 40 dégustateurs. Les deux méthodes complémentaires d'analyses sensorielles utilisées ont été premièrement le test descriptif (celui d'échelle) portant sur la notation de la qualité suivant 8 descripteurs sensoriels : la couleur, le goût acide, la viscosité, l'arôme, la texture, le goût et l'après-goût. Deuxièmement, le test de préférence ou de classement qui a consisté à indiquer 3 types de lait que le dégustateur a préféré parmi les échantillons.

L'évaluation sensorielle a été effectuée à l'aide d'un formulaire proposé par Costa *et al.* [36] et basé sur une échelle hédonique² à 7 points (1 = extrêmement désagréable, 2 = modérément désagréable, 3 = légèrement désagréable, 4 = ni apprécié ni désagréable, 5 = légèrement agréable, 6 = modérément agréable et 7 = extrêmement agréable).

2.3.10. Analyse statistique des données

Les données collectées ont été encodées sous MS. Excel 2013 et nettoyées avant l'application des

tests statistiques. Des analyses descriptives ont été réalisées pour ressortir les moyennes et écart-types. L'analyse de la variance (ANOVA) a été appliquée pour déterminer l'égalité des moyennes des paramètres physicochimiques du lait cru conservé à température ambiante. Le test LSD de Fisher (*Least Significant Difference*)³ a été appliqué pour comparer les moyennes après qu'une analyse de la variance ait conclu la significativité au seuil de 5 % ($\alpha = 0,05$). Une régression linéaire simple a été faite pour mettre au point l'équation du modèle de conservation et la corrélation entre lesdites variables. Par ailleurs, une classification ascendante hiérarchique (CAH)⁴ a été appliquée pour regrouper les échantillons de lait cru conservés en utilisant les conservateurs acides et les hydrocolloïdes alimentaires suivant leurs caractéristiques sensorielles. Une fois classifiés, les caractéristiques de chaque classe ont été déterminées en analysant les liens entre les scores des paramètres sensoriels évalués et les classes ressorties. Une analyse de la variance suivie du test LSD a été appliquée pour comparer les scores des paramètres sensoriels suivant les différentes classes. Toutes ces analyses ont été réalisées via le logiciel R version 4.3.1 et le logiciel XLSTAT© 2014 version 16.5.

² Test consommateur visant à mesurer le plaisir et/ou la satisfaction éprouvés à la vue ou à la consommation / usage d'un produit. <https://www.definitions-marketing.com/definition/test-hedonique/>

³ <https://ontostats.univ-paris8.fr/omk/s/logicielsStats/item/7010>

⁴ <https://www.ceremade.dauphine.fr/~roche/CAH.pdf>

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Qualité physicochimique du lait cru après la conservation

Les tableaux 2 et 3 présentent les résultats des analyses physicochimiques des échantillons de lait cru après sa conservation au moyen de l'acide citrique (E330) et de l'acide ascorbique (E300).

Tableau 2.

Paramètres physicochimiques de divers échantillons des laits conservés à froid (4 °C) et à la température ambiante (25 °C) par l'acide citrique (AC) (E330) et les hydrocolloïdes alimentaires

Lait	HC	AC	Acidité titrable (°D)	pH	Densité	Teneur en glucides (mg/100mL)	Teneur en eau (%)	Teneur en matière sèche (%)	Teneur en phosphore (mg/100mL)	Teneur en calcium (mg/100mL)
T1	0	0	27,14 ± 0,26	3,55 ± 0,05	1,03 ± 0,00	43,10 ± 1,24	85,15 ± 0,18	14,85 ± 0,18	77,53 ± 9,54	101,99 ± 0,02
T2	0	0	16,96 ± 0,13	5,94 ± 0,03	1,03 ± 0,00	43,77 ± 2,04	88,88 ± 3,40	11,12 ± 3,40	81,71 ± 7,57	100,14 ± 9,86
L01	0	0,1	18,48 ± 0,94	4,08 ± 0,05	1,03 ± 0,00	43,46 ± 2,33	88,01 ± 0,18	11,99 ± 0,18	78,18 ± 8,95	93,93 ± 7,03
L02	0	0,3	17,04 ± 0,15	3,38 ± 0,10	1,03 ± 0,00	44,23 ± 1,22	87,95 ± 0,06	12,05 ± 0,06	73,00 ± 0,09	106,71 ± 4,05
L03	0	0,5	16,68 ± 1,04	3,02 ± 0,00	1,03 ± 0,00	43,39 ± 0,86	88,02 ± 0,04	11,98 ± 0,04	78,10 ± 9,02	94,12 ± 6,79
L1	0,2	0,1	17,04 ± 0,15	4,08 ± 0,01	1,04 ± 0,00	46,11 ± 0,73	87,89 ± 0,20	12,11 ± 0,20	86,81 ± 1,48	106,55 ± 3,94
L2	0,3	0,1	18,10 ± 0,46	3,29 ± 0,01	1,05 ± 0,00	48,33 ± 0,98	87,84 ± 0,04	12,16 ± 0,04	78,20 ± 8,94	94,00 ± 6,99
L3	0,4	0,1	19,62 ± 0,55	3,03 ± 0,01	1,05 ± 0,01	50,44 ± 1,19	77,98 ± 0,58	22,02 ± 0,58	82,61 ± 8,26	94,02 ± 6,93
L4	0,2	0,3	17,04 ± 0,15	3,05 ± 0,04	1,03 ± 0,00	45,15 ± 0,74	87,85 ± 0,03	12,15 ± 0,03	82,52 ± 8,28	96,35 ± 11,15
L5	0,3	0,3	17,24 ± 0,79	3,07 ± 0,01	1,04 ± 0,00	48,63 ± 0,33	78,62 ± 0,03	21,38 ± 0,03	78,24 ± 8,94	93,93 ± 6,95
L6	0,4	0,3	18,61 ± 0,38	3,82 ± 0,66	1,06 ± 0,00	49,84 ± 2,05	76,15 ± 0,66	23,85 ± 0,66	82,48 ± 8,46	102,89 ± 11,24
L7	0,2	0,5	18,48 ± 0,94	3,27 ± 0,02	1,04 ± 0,00	45,18 ± 1,23	87,76 ± 0,04	12,24 ± 0,04	77,25 ± 7,55	100,37 ± 9,66
L8	0,3	0,5	17,85 ± 0,91	3,28 ± 0,06	1,04 ± 0,00	47,94 ± 0,93	78,56 ± 0,07	21,44 ± 0,07	82,62 ± 8,35	93,99 ± 6,87
L9	0,4	0,5	19,41 ± 0,87	3,36 ± 0,04	1,05 ± 0,00	51,18 ± 0,51	75,77 ± 0,03	24,23 ± 0,03	78,28 ± 8,85	102,67 ± 10,95
LSD	AC		1,998	0,5257	0,0083	2,4765	4,4544	4,4545	6,7	7,3197
	HC		2,299	0,6349	0,0042	1,0619	2,1673	2,1673	6,5656	7,064
	Lait		1,0838	0,3017	0,0074	2,178	1,577	1,577	13,298	13,266
P-value	AC		0,0001***	0,0001***	0,7142	0,9700	0,0001***	0,0001***	0,866	0,692
	HC		0,0001***	0,011*	0,0001***	0,0001***	0,0001***	0,0001***	0,456	0,269
	Lait		0,0001***	0,0001***	0,0831	0,915	0,0001***	0,0001***	0,785	0,273

Seuils de signification : *** : 0,001 ; ** : 0,01 ; * : 0,05 et 0,1 les restes

Au regard des résultats présentés dans le tableau 2, il se dénote que la teneur en acidité titrable ainsi que les valeurs de pH, les teneurs en eau et en matière sèche ont hautement varié de manière significative en fonction des doses de l'acide citrique (E330), des doses des hydrocolloïdes alimentaires et du type de lait (P-value < 0,05). En effet, les doses des hydrocolloïdes alimentaires n'ont pas beaucoup fait varier le pH des échantillons. Particulièrement, les échantillons témoins ayant été conservés à la température ambiante (25 °C) ont été caractérisés par le pH final

de l'ordre de 3,55 ± 0,05 contrairement aux échantillons témoins ayant été conservés à froid (4 °C) durant deux semaines qui ont présenté un pH final équivalent à 5,94 ± 0,03. Les pH les plus bas ont été observés chez les témoins qui n'ont reçu aucun traitement (3,55 ± 0,05), chez les échantillons ayant reçu des doses élevées d'acide citrique (soit 0,5 g), et chez les échantillons ayant reçu des faibles doses d'acide citrique (0,1 et 0,3 g) sans HC ou avec des doses élevées d'HC (0,4 g/100 mL de lait). La densité des échantillons de lait a varié de façon très significative

uniquement en fonction des hydrocolloïdes alimentaires (P-value < 0,0001). La teneur en glucides a varié de manière hautement significative en fonction des doses des hydrocolloïdes alimentaires (P-value < 0,0001), ce qui n'a pas été le cas pour les deux autres facteurs de variation : acide citrique (P-value = 0,97), types de lait (P-

value = 0,915). Quant aux autres variables (la teneur en eau et la teneur en matières sèches), la variation a été très significative en fonction des trois facteurs de variation (P-values < 0,05) contrairement à la teneur en phosphore et en glucide (P-values > 0,05).

Tableau 3.

Paramètres physicochimiques de divers échantillons des laits conservés à froid (4 °C) et à la température ambiante (25 °C) par l'acide ascorbique (AC) (E300) et les hydrocolloïdes alimentaires

Lait	HC	AAs	Acidité titrable (°D)	pH	Densité	Teneur en glucides (mg/100mL)	Teneur en eau (%)	Teneur en matière sèche (%)	Teneur en phosphore (mg/100mL)	Teneur en calcium (mg/100mL)
T1	0	0	27,06 ± 0,30	3,43 ± 0,17	1,03 ± 0,00	43,92 ± 0,57	85,15 ± 0,18	14,85 ± 0,18	82,04 ± 8,80	102,42 ± 2,38
T2	0	0	17,20 ± 0,32	5,94 ± 0,03	1,03 ± 0,00	45,20 ± 1,65	88,88 ± 3,40	11,12 ± 3,40	82,40 ± 6,38	100,14 ± 9,86
L01	0	0,1	18,27 ± 0,69	4,08 ± 0,05	1,03 ± 0,00	43,06 ± 1,08	88,08 ± 0,20	11,92 ± 0,20	78,18 ± 8,95	97,98 ± 7,03
L02	0	0,3	17,04 ± 0,15	3,38 ± 0,10	1,03 ± 0,00	44,23 ± 1,22	87,95 ± 0,06	12,05 ± 0,06	73,00 ± 0,09	106,71 ± 4,05
L03	0	0,5	16,26 ± 0,46	3,02 ± 0,00	1,04 ± 0,00	43,39 ± 0,86	85,36 ± 4,64	14,64 ± 4,64	78,10 ± 9,02	98,04 ± 6,79
L1	0,2	0,1	17,04 ± 0,15	4,08 ± 0,01	1,04 ± 0,00	46,11 ± 0,73	87,89 ± 0,20	12,11 ± 0,20	86,81 ± 1,48	106,55 ± 3,94
L2	0,3	0,1	18,10 ± 0,46	3,29 ± 0,01	1,05 ± 0,00	48,33 ± 0,98	87,84 ± 0,04	12,16 ± 0,04	73,04 ± 0,00	94,00 ± 6,99
L3	0,4	0,1	19,31 ± 0,04	3,03 ± 0,01	1,05 ± 0,01	50,44 ± 1,19	77,98 ± 0,58	22,02 ± 0,58	82,61 ± 8,26	98,05 ± 6,90
L4	0,2	0,3	16,97 ± 0,16	3,05 ± 0,04	1,03 ± 0,00	45,15 ± 0,74	87,85 ± 0,03	12,15 ± 0,03	86,80 ± 1,51	102,78 ± 11,15
L5	0,3	0,3	17,24 ± 0,79	3,18 ± 0,10	1,04 ± 0,00	48,63 ± 0,33	78,62 ± 0,03	21,38 ± 0,03	78,24 ± 8,94	93,93 ± 6,95
L6	0,4	0,3	18,61 ± 0,38	3,82 ± 0,66	1,06 ± 0,00	49,84 ± 2,05	76,14 ± 0,67	23,86 ± 0,67	81,65 ± 7,64	100,45 ± 9,83
L7	0,2	0,5	18,42 ± 1,16	3,25 ± 0,03	1,04 ± 0,00	45,18 ± 1,23	87,76 ± 0,04	12,24 ± 0,04	77,25 ± 7,55	94,00 ± 6,97
L8	0,3	0,5	17,85 ± 0,91	3,28 ± 0,06	1,04 ± 0,00	47,94 ± 0,93	78,56 ± 0,07	21,44 ± 0,07	81,75 ± 7,61	97,96 ± 6,87
L9	0,4	0,5	19,41 ± 0,87	3,35 ± 0,08	1,05 ± 0,00	51,18 ± 0,51	75,77 ± 0,03	24,23 ± 0,03	78,28 ± 8,85	96,34 ± 10,95
LSD	AAs		1,946	0,542	0,008	2,465	4,3905	4,3905	6,443	6,682
	HC		2,2925	0,641	0,004	0,984	2,409	2,409	6,198	6,551
	Lait		0,985	0,315	0,0072	1,835	2,606	2,606	11,689	12,735
P-value	AAs		0,002**	0,000***	0,714	0,000***	0,0001 ***	0,0001 ***	0,816	0,486
	HC		0,3220	0,8261	0,0001***	0,0001***	0,0001 ***	0,0001 ***	0,147	0,344
	Lait		0,0001***	0,0001***	0,066.	0,35227	0,0001 ***	0,0001 ***	0,401	0,549

Seuils de signification : *** : 0,001 ; ** : 0,01 ; * : 0,05 et 0,1 les restes

Il ressort des résultats présentés dans le tableau 3 que durant la période de conservation des laits, les deux conservateurs acides dont l'acide citrique et l'acide ascorbique ont présenté les effets très similaires, à quelques différences près. Spécifiquement, la variable « teneur en acidité titrable » et le « pH » n'ont pas varié significativement en fonction des doses hydrocolloïdes alimentaires utilisés (P-value = 0,322 et 0,826 respectivement). Cela signifie que les doses d'hydrocolloïdes alimentaires

n'ont eu aucun effet statistiquement significatif sur le pH final des échantillons.

Pour les échantillons témoins en revanche, les valeurs finales de pH ont grandement varié en ce sens que les laits témoins conservés à la température ambiante (25 °C) ont été caractérisés par le pH final de l'ordre de 3,43 ± 0,17 alors que les laits témoins gardés au réfrigérateur à 4 °C ont présenté le pH final égal à 5,94 ± 0,03. Les valeurs satisfaisantes de pH ont été mesurés chez seulement 4 types de lait ci-après : T2 (5,94 ± 0,03), L01

($4,08 \pm 0,05$), L1 ($4,08 \pm 0,01$) et L6 ($3,82 \pm 0,66$). Il s'agit des échantillons qui ont reçu des faibles doses d'acide ascorbique et des témoins ayant été conservé au réfrigérateur ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$) sans conservateur acide. La variable « densité » a significativement varié uniquement en fonction des doses des hydrocolloïdes alimentaires ($P\text{-value} < 0,05$). La teneur en glucides n'a pas varié de manière significative en fonction des types de lait ($P\text{-value} = 0,352$). Par ailleurs, la teneur en eau ainsi que la teneur en matière sèche ont respectivement varié de manière en fonction des trois facteurs de

variation ($P\text{-values} < 0,05$) contrairement à la teneur en phosphore et en glucide ($P\text{-values} > 0,05$).

La relation entre certaines variables (entre les doses des conservateurs acides apportées et le pH, entre les hydrocolloïdes alimentaires utilisés et la densité finale des échantillons de lait) est illustrée par les graphiques de régression linéaire simple ci-après.

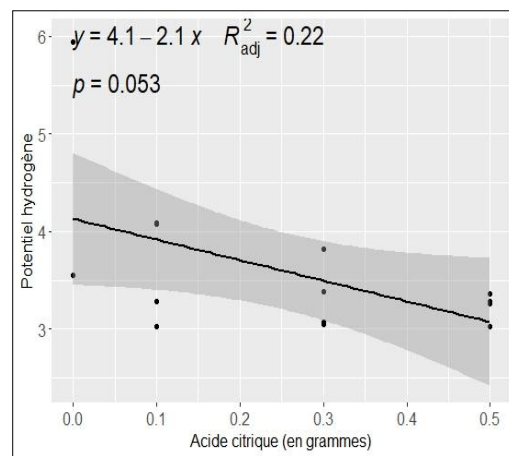
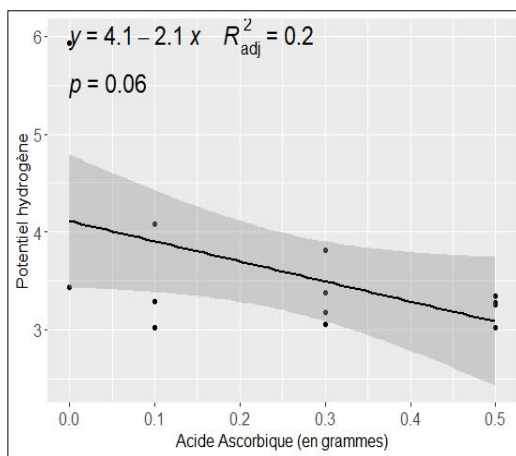


Figure 1. Régression linéaire simple entre les doses d'Acides citrique et Ascorbique sur le pH des échantillons de lait

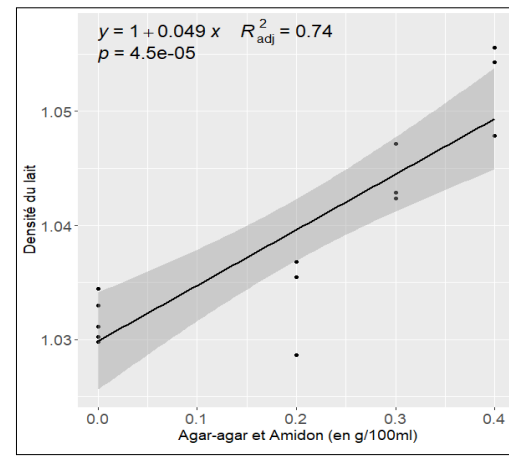
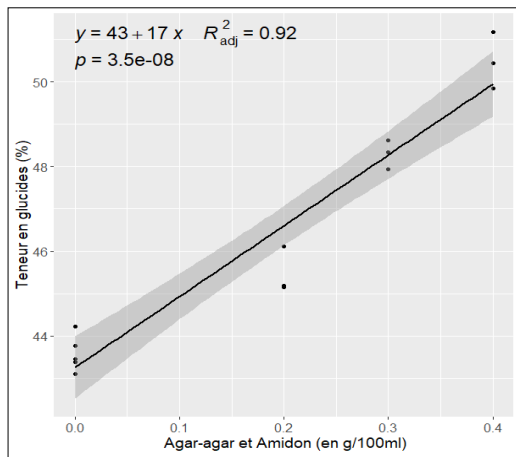


Figure 2. Régression linéaire simple entre les doses d'HC (Agar-agar et Amidon) et la teneur en glucides.

Figure 3. Régression linéaire simple entre les doses d'HC (Agar-agar et Amidon) et la densité du lait.

Au vu des résultats présentés dans la figure 1, il convient de signaler qu'il existe une corrélation négative entre les différentes doses d'acide citrique et d'acide ascorbique avec comme coefficient de corrélation r respectivement de l'ordre de $-0,527$ et $-0,514$. Cela signifie que les différentes doses

d'acide citrique et d'acide ascorbique faisaient diminuer le pH (faisaient augmenter l'acidité finale des échantillons de lait), mais cette corrélation n'est pas statistiquement significative ($R^2 = 0,2$ et $R^2 = 0,22$). Les figures suivantes présentent une

régression linéaire simple entre les doses d'HC avec les deux paramètres (densité et teneur en glucides).

Au regard des résultats mis en évidence par la figure 4, il s'observe une corrélation positive entre les doses d'hydrocolloïdes (HC) et la densité du lait. Cela signifie que lorsque la dose d'HC augmente, la densité du lait augmente également, et cette corrélation est très significative ($R^2 = 0,74$). De même, une relation très significative existe entre la teneur en glucides dans le lait et les doses d'HC testées (figure 3).

3.1.2. *Qualité microbiologique de tous les laits conservés*

Les résultats en rapport avec la qualité microbiologique des laits conservés durant deux semaines sont présentés dans le tableau 4.

Au regard des résultats contenus dans le tableau 4, il s'avère que les doses des conservateurs acides de l'ordre de $0,5 \text{ g.mL}^{-1}$ de lait n'ont pas permis aux échantillons de lait de conserver leurs propriétés physicochimiques de départ et ont donc été écartés de l'analyse microbiologique. En plus, il découle de ce tableau que la plus grande contamination microbienne a été observée chez les échantillons témoins sans conservateurs ayant été gardés à la température ambiante ($25 \text{ }^\circ\text{C}$). Les charges

microbiennes les plus inquiétantes ont été observées chez les témoins T1 ayant été conservés à la température ambiante ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) en l'occurrence $45,27 \pm 2,27 \text{ UFC/mL}$ de la FAMT (flore aérobie mésophile totale), $8,89 \pm 1,00 \text{ UFC/mL}$ des Salmonelles et $5,45 \pm 0,88 \text{ UFC/mL}$ des Coliformes totaux.

Pour ce qui cadre avec d'autres échantillons, les plus faibles contaminations en FAMT et en Salmonelles ont été observées chez les échantillons ayant reçu $0,3 \text{ g}$ de conservateur acide ($2,72 \pm 0,62 \text{ UFC/mL}$ et $2,33 \pm 0,83 \text{ UFC/mL}$ respectivement) tandis que les échantillons conservés au réfrigérateur ($4 \text{ }^\circ\text{C}$) ont présenté la plus faible contamination en coliformes fécaux ($0,85 \pm 0,32 \text{ UFC/mL}$). Aucun des échantillons n'a présenté de contamination au *Listeria*, conformément aux normes requises.

Conformément à la norme, les échantillons ont respecté la norme pour les FAMT excepté les échantillons témoins conservés à la température ambiante. Pour les *Salmonella*, les Coliformes totaux et fécaux, les échantillons n'étaient pas conformes à la norme mais ces valeurs moyennes ne se sont pas trop écartées de la norme. Enfin, aucune présence de *Listeria* n'a été signalée pour tous les échantillons.

Tableau 4. Qualité microbiologique des laits après deux semaines de conservation

Traitements	Code	FAMT ($\times 10^5$) (UFC/mL)	Salmonella ($\times 10^4$) (UFC/mL)	Coliformes totaux ($\times 10^5$) (UFC/mL)	Coliformes fécaux ($\times 10^5$) (UFC/mL)	Listeria (UFC/mL)
Conservation à 25 °C	T1	45,27	3,89	2,45	2,69	0,00
Conservé au réfrigérateur	T2	4,10	1,62	3,9	0,854	0,00
0,2g Ag 0,1g AC	L1	4,10	3,62	2,80	1,74	0,00
0,3g Ag 0,1g AC	L2	4,85	4,11	3,14	2,66	0,00
0,4g Ag 0,1g AC	L3	6,22	4,24	2,63	1,20	0,00
0,4g Ag 0,3g AC	L4	2,28	1,74	3,62	2,80	0,00
0,2g Ag 0,1g AAs	L5	4,85	2,95	5,49	9,82	0,00
0,3g Ag 0,1g AAs	L6	6,22	4,24	2,63	1,20	0,00
0,4g Ag 0,1g AAs	L7	5,07	4,30	3,45	1,71	0,00
0,4g Ag 0,3g AAs	L8	3,38	2,89	2,45	1,69	0,00
0,2g Am 0,1g AC	L9	4,10	2,22	2,23	1,32	0,00
0,3g Am 0,1g AC	L10	3,16	2,91	2,92	1,43	0,00
0,4g Am 0,1g AC	L11	3,38	2,22	2,23	1,32	0,00
0,4g Am 0,3g AC	L12	3,16	2,91	2,92	1,43	0,00
0,2g Am 0,1g AAs	L13	3,23	2,37	3,82	2,58	0,00
0,3g Am 0,1g AAs	L14	4,02	3,45	3,15	2,48	0,00
0,4g Am 0,1g AAs	L15	2,96	5,49	9,82	4,07	0,00
0,4g Am 0,3g AAs	L16	3,16	2,91	2,92	1,43	0,00
Normes		30	0	0,05	0	0

Légende : FAMT = flore aérobie mésophile totale ; UFC/mL = Unité formatrice des colonies par millilitre.

3.1.3. Qualité organoleptique de tous les laits conservés

(CAH) a été effectuée dans le but de regrouper et caractériser les différents échantillons de lait soumis aux tests sensoriels.

3.1.3.1. Typologie et classification des différents échantillons de lait

Après dégustation de différents échantillons de lait, une classification ascendante hiérarchisée

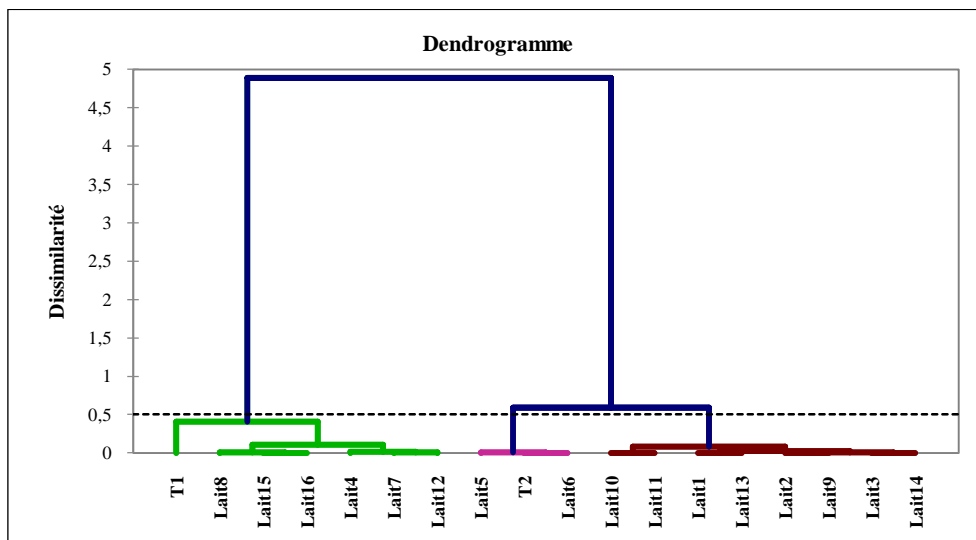


Figure 4. Classification ascendante hiérarchisée (CAH) de différents traitements en fonction des caractéristiques sensorielles

Il ressort de la figure 4 que trois classes (C1, C2 et C3) ont été générées à l'issue de la classification hiérarchisée ascendante. Les échantillons de lait ont été regroupés en ces trois classes suivant leurs caractéristiques sensorielles (Couleur, Acide,

Viscosité, Arôme, Texture, Goût et Après-goût). Les caractéristiques de chaque classe sont présentées dans les figures 4 et 5 en annexe. Le tableau 5 suivant en donne les résultats.

Tableau 5.
Appréciation de la qualité organoleptique des laits conservés à la température ambiante

F	Classes			LSD	P-value
	C1	C2	C3		
Couleur	5,60 ± 0,97	6,50 ± 0,00	6,31 ± 0,37	0,192	0,0002***
Acide	5,73 ± 0,35	6,60 ± 0,17	6,51 ± 0,30	0,1374	< 0,0001***
Viscosité	3,81 ± 0,69	6,33 ± 0,29	5,63 ± 0,52	0,2182	< 0,0001***
Arôme	5,41 ± 0,91	6,40 ± 0,36	5,75 ± 0,78	0,2434	< 0,0001***
Texture	3,86 ± 0,38	6,33 ± 0,29	5,25 ± 0,65	0,2178	< 0,0001***
Goût	5,00 ± 0,41	6,60 ± 0,10	5,73 ± 0,41	0,1635	< 0,0001***
Après-goût	5,21 ± 0,70	6,00 ± 0,00	5,94 ± 0,30	0,1511	< 0,0001***

Seuils de signification : '***' : 0,001 ; '**' : 0,01 ; '*' : 0,05 ; '.' : 0,1. (Supprimez ce qui est en gauche car toutes valeurs sont inf. à 10⁻³)

Il ressort du tableau 5 que toutes les variables ont varié très significativement en fonction des classes. Les caractéristiques de chaque classe sont telles que la classe une (C1) comprend les échantillons de lait (T1, Lait8, Lait15, Lait16, Lait4, Lait7 et le Lait12) qui ont été les moins appréciés par les dégustateurs. Leur score sensoriel moyen a été de 4,9 sur une échelle hédonique de 1 à 7. Ces laits se caractérisent par une grande viscosité (3,81 ± 0,69) et une mauvaise texture (3,86 ± 0,38).

Par ailleurs, les échantillons ayant été les plus appréciés sont ceux de la classe deux (C2) ; il s'agit de 3 échantillons dont leur score sensoriel moyen a été de 6,4 sur 7. Ce sont des laits ayant mieux conservé leurs caractéristiques de départ. C'est cette classe qui a présenté les meilleures qualités sensorielles pour tous les descripteurs. Enfin, les échantillons de la classe trois (C3) ont présenté des caractéristiques intermédiaires, qui leur ont conféré un score sensoriel moyen de 5,7 sur une échelle de 1 à 7. La grande majorité des échantillons de lait a eu des caractéristiques appréciables ; il s'agit de la classe C2 et C3.

3.2. Discussion des résultats

3.2.1. Comparaison de l'efficacité de deux conservateurs acides utilisés

Les résultats ont montré que l'acide citrique (E330) a un potentiel de conservation élevé par rapport à l'acide ascorbique (E300). Cela se justifie par le fait que l'acide citrique a une plus grande affinité à l'enzyme β -galactosidase que l'acide ascorbique [29]. Les différentes doses de conservateurs acides (CA) n'ont pas eu un effet significatif sur le pH final des échantillons après deux semaines de conservation. Cela

est mis en évidence par le fait que les échantillons témoins qui n'ont pas reçu des conservateurs et qui ont été conservés à la température ambiante ont présenté des pH aussi acides que ceux des échantillons qui en ont reçu des fortes doses d'aide citrique et d'acide ascorbique. Cela s'explique par le fait qu'une réaction enzymatique cherche un équilibre lorsqu'il y a autant de substrat que des produits de la réaction [29,34].

3.2.2. Comparaison de l'efficacité des deux hydrocolloïdes alimentaires

Les résultats ont montré que les échantillons conservés avec l'Agar-agar (E406) ont présenté des meilleures propriétés physicochimiques que ceux ayant reçu l'amidon après deux semaines de conservation. Cela s'explique par le fait que les amidons natifs présentent des problèmes liés à la solubilité et aux propriétés rhéologiques tandis que les amidons modifiés (l'amidon oxydé diacétylé (E1451) ou le phosphate de di-amidon acétylé (E1414)) fournissent des meilleures propriétés de viscosité et de stabilité dans les produits laitiers [34].

3.2.3. Effet des doses d'hydrocolloïdes alimentaires

Le choix des doses à apporter dans le lait est discuté par plusieurs facteurs. Pour les HC, il en fallait assez pour empêcher la coagulation du lait (précipitation des protéines du lait) lors de l'ajout des CA sans pour autant modifier le caractère liquide du lait durant toute la période de conservation qui s'est étalée sur deux semaines. Les différentes doses ont donc été de 0,2 ; 0,3 et 0,4 en g pour 100 mL de lait. Par ailleurs, pour les CA, la dose à ne pas dépasser était de 5000 ppm. Ce qui a conduit au choix des doses de 0,1 g ; 0,3 g et 0,5 g

dans 100 mL de lait. Ceci corrobore avec les résultats de l'étude menée par Tesfay *et al.* [10].

Les résultats trouvés ont montré que le pH avant conservation a été de $6,52 \pm 0,16$ pour les différents échantillons de lait collectés, ce qui est conforme aux normes (6,5 - 6,7) de l'Algérie [35]. Le pH variant selon le stade de lactation et l'alimentation de l'animal [36], durant la conservation par cette méthode, il a aussi varié en fonction de la durée de conservation et de la dose des conservateurs acides ajoutés. Ceci ne s'écarte pas du constat [37]. Par ailleurs, une mauvaise conservation acidifie le lait en diminuant le pH au-delà des normes requises et cela déstabilise les propriétés physicochimiques des protéines dans le lait de Costa *et al.* [37]. La majorité d'échantillons des laits ont présenté des pH inférieurs aux normes recommandées, mais certains ne s'en sont pas trop écartés. Il s'agit des échantillons témoins qui ont été conservés au réfrigérateur ($5,94 \pm 0,03$), des échantillons ayant reçu la plus petite dose des CA et la plus petite dose d'HC ($4,08 \pm 0,01$).

Bien que la densité du lait varie avec la race et l'âge de l'animal, l'alimentation, le travail, et présente parfois des variations brusques et accentuées chez le même animal, quoique soumis à la même alimentation durant un laps de temps [38, 39], elle a également varié en fonction des différentes doses d'hydrocolloïdes apportés. Par ailleurs, si la teneur en protéines n'est pas dans les normes édictées, il y a déséquilibre de la densité du lait [10]. Mais la teneur en hydrocolloïdes alimentaire a également eu un effet sur la densité des échantillons de lait parce que ces derniers sont des agents de texture qui ont la capacité de modifier les propriétés rhéologiques des produits laitiers [40, 41]. Seuls 42,8 % des échantillons de lait ont présenté des valeurs de densité conformes aux normes admissibles de l'ordre de 1,028 à 1,036. Par ailleurs, seuls 22,2 % des échantillons ont présenté une teneur en glucides qui est conforme aux normes requises d'au plus 5 %. Les glucides du lait (lactose) sont sensibles aux populations bactériennes et peuvent se transformer en acide lactique [26], cela montre qu'ils varient en fonction de l'hygiène de la traite et de la conservation [42].

Il s'est avéré que les échantillons des laits ayant reçu des faibles doses d'acide ascorbique ainsi que les échantillons témoins des laits sans conservateurs et non réfrigérés ont présenté la charge microbienne la plus

élevée. Toutefois, conformément à la norme telle qu'utilisée par Tir *et al.* [43], les échantillons des laits ayant fait l'objet de l'expérimentation ne présentent pas de risque lié à l'ensemble des microorganismes excepté pour les salmonella dont la présence a été constaté dans tous les types de lait à une concentration alarmantes. Les mêmes constatations ont été signalées par Prado L. d-O. A. [33]. Cela s'expliquerait donc par le fait que les conditions de la traite ne sont pas toujours bien effectuées par les éleveurs dans cette région [43]. Les mêmes chercheurs [43] ont montré que le lait cru traité avec de l'acide citrique pouvait être conservé à température ambiante pendant une période de 24 à 48 heures sans développement significatif de bactéries.

4. Conclusion

La présente recherche consistait à évaluer les effets des conservateurs acides et des hydrocolloïdes alimentaires sur la durée de conservation du lait cru de vache à température ambiante. Les résultats montrent que l'application des CA a un effet positif sur l'état du lait après deux semaines de conservation et que leur potentiel maximal de conservation ne se révèle que lorsque ces derniers sont couplés aux HC qui sont des agents de texture ayant pour effet d'empêcher la précipitation des protéines du lait en présence des conservateurs acides utilisés.

Il a été trouvé que les échantillons de lait conservés par cette méthode ont présenté quasiment les mêmes caractéristiques physicochimiques, microbiologiques et organoleptiques que les échantillons témoins conservés au réfrigérateur (à 4 °C), dans les conditions les plus aseptiques possibles.

Les combinaisons HC- CA recommandées par cette méthode sont de 0,2 - 0,1 ; 0,2 - 0,3 ; 0,3 - 0,1 et 0,3 - 0,3 (en g dans 100 mL de lait). La meilleure combinaison a été celle de 0,2 - 0,3 pour les paramètres physicochimiques ; 0,3 - 0,5 pour la qualité microbiologique et 0,2 - 0,1 pour les descripteurs sensoriels, mais les résultats les plus satisfaisants pour les trois tests ont été obtenues par la combinaison 0,2 - 0,3.

Il a été également constaté que conformément aux résultats escomptés, l'agar-agar (E406) a semblé être plus efficace que l'amidon utilisé. L'amidon utilisé (à l'état natif), a présenté des problèmes liés à la solubilité ainsi qu'aux propriétés rhéologiques car même après

deux semaines de conservation, les dégustateurs ont affirmé avoir senti les granules d'amidon dans les échantillons de lait. Par ailleurs, l'acide citrique (E330) a été plus efficace pour le maintien des qualités physicochimiques et microbiologique tandis que l'acide ascorbique (E300) s'est avéré plus efficace dans la préservation des qualités organoleptiques du lait.

Eu égard aux résultats sus-présentés, il s'avère nécessaire de formuler les suggestions ci-après :

- Qu'il y ait l'utilisation des amidons modifiés à la place des amidons natifs étant donné que ces derniers présentent des problèmes liés à la solubilité et affectent négativement les propriétés rhéologiques du lait ;
- Que d'autres essais puissent être menés ultérieurement, d'une part en utilisant d'autres hydrocolloïdes alimentaires tels que les alginates, et d'autres acides organiques alimentaires pour expérimenter pleinement le potentiel de la méthode de conservation de lait abordée dans la présente étude ; d'autre part, en utilisant des conservateurs acides naturellement disponibles dans la région (le jus de citron) pour en faire une méthode de conservation plus simple et moins coûteuse.

Remerciements

Nous remercions les fermiers du territoire de Kabare (Sud-Kivu) de nous avoir rendus la tâche facile lors de la collecte des échantillons de lait.

Références

1. Selma B, Sabrina B. (2000). "Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique du lait de vache dans la région de Guelma". Mémoire de Master, Université de Guelma, Algérie. Disponible en ligne. <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/10590>.
2. Grillet N, Grimaud P, Loiseau G, Wesuta M, Faye B. (2005). Qualité sanitaire du lait cru tout au long de la filière dans le district de Mbarara et la ville de Kampala en Ouganda. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop.; 58 (4): 245. Disponible en ligne. <https://agritrop.cirad.fr/534430/1/ID534430.pdf>
3. Moullec M. (2002). Les sources de contamination microbiologique du lait de bovins de la production à la consommation dans les pays du sud. Montpellier : UM2, 43 p. Mémoire DESS (Synthèse bibliographique) : Productions animales en régions chaudes : Université Montpellier 2, France. URL <https://agritrop.cirad.fr/511351/>.
4. Benallegue H. et Debbeche S. N. (2015). Etude de la qualité physico-chimique et microbiologique de 3 marques de lait U.H.T, (Candia, Obeï et Hodna). Disponible en ligne. <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/biblio/mmf/2015/80-2015.pdf>.
5. Asefa Z. and Teshome G. (2019). Physical Properties and Chemical Compositions of Raw Cow Milk in Milk Shades Around Addis Ababa, Ethiopia, J. Nat. Sci. Res., 9 (19): 33–7. URL : <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JNSR/issue/view/4215>
6. Messaoudi K. et Abdelmoua N. (2019) Contribution à l'étude des effets de l'addition des huiles essentielles de Genévrier oxycedre et Phénicie et de l'activation de système Lactoperoxydase sur les caractéristiques physicochimique du lait cru de vache. Mémoire de Master, Université de Djelfa, Algérie. URL : <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/3368>
7. Eskin NAM, Goff HD. (2013) Chapter 4-Milk In: Biochemistry of Foods. (3rd edition) Elsevier;. p. 187–214. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091809-9.00004-2>
8. Chatellier V. (2020) La dépendance de l'Afrique de l'Ouest aux importations de produits laitiers. INRAE Prod Anim.;33 (2): 125–40. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.2.4027>
9. Hemme T, Otte J. (2010) Pro-Poor Livestock Policy Initiative, Status and Prospects for Smallholder Milk Production A Global Perspective. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL : <https://www.fao.org/3/i1522e/i1522e00.htm>.
10. Tesfay T., Kebede A. and Seifu E. (2015) Physico Chemical Properties of Cow Milk Produced and Marketed in Dire Dawa Town, Eastern Ethiopia. Food Sci Qual Manag.; 42 : 56–62. URL : <https://iiste.org/Journals/index.php/FSQM/issue/view/2026>
11. Gallacier JP. (2011) Étiquetage De La Matière Grasse Dans Les Produits Laitiers. Sci Aliments. 30 (1–4): 23–32. [doi:10.3166/sda.30.23-32](https://doi.org/10.3166/sda.30.23-32)
12. Alomar J. (2007) Étude de propriétés physiologiques de Lactococcus lactis et de Lactococcus garvieae pour la maîtrise de Staphylococcus aureus en technologie fromagère. URL : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752847>
13. Bachtarzi N, Amourache L, Dehkal G. (2015) Qualité du lait cru destiné à la fabrication d'un fromage à pâte molle type Camembert dans une laiterie de Constantine (Est algérien). Int. J. Innov. Sci. Res., 17 (1): 34–42. URL : <http://ijisr.issr-journals.org/authid.php?id=4774>
14. Vignola CL. *Essai de fabrication d'un fromage frais traditionnel sénégalais, à partir du lait de vache, coagulé par la papaine naturelle*. Science et technologie du lait : Transformation du lait. 2002.
15. Kunes R, Bartos P, Iwasaka GK, Lang A, Hankovec T, Smutny L, et al. (2021) In-Line Technologies for the Analysis of Important Milk Parameters during the Milking Process: A Review. J Agric., 239 (11): 1–17. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030239>
16. Benayache M. et Guenifi C. (2021) Etude comparative des caractéristiques physico- chimiques et microbiologiques du lait de vache et de lait de chèvre. URL: <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/12085>
17. Budza KM : 1995. Evaluation de la qualité physico-chimique du lait cru produit par les petits éleveurs du territoire de Kabare, Sud-Kivu, TFE, Université Evangélique en Afrique, Bukavu, RD Congo, 54 p.
18. Mutwedu VB, Basengere R, Ayagirwe B, Ganza OB, Aksanti CB, Matendo R, et al. (2018) Effets des techniques de transformation sur la qualité du fromage blanc traditionnel « Mashanza » produit au Sud-Kivu , RD Congo. J Anim Plant

- Sci., 38 (1): 6097–110. <https://m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2018/09/5.Mutwedu-Abstract-JAPS-Vol.37.3-1.pdf>
19. Abebe B, Mitiku E, Zelalem Y. (2014) Microbial properties of Ethiopian dairy products: A review, *African J Microbiol Res.*, 8 (23): 2264–71. <https://doi.org/10.5897/AJMR2014.6733>
 20. Taybi N.O., Arfaoui A, Fadli M. (2014) Evaluation de la qualité microbiologique du lait cru dans la région du Gharb , Maroc. *Innov. Sp. Sci. Res. Journals.* 9 (2): 487–93. <http://www.ijisr.issr-journals.org/abstract.php?article=IJISR-14-222-09>
 21. Vatin F., (1993) L'industrie du lait, essai d'histoire économique. *Mouv. Soc.*, (165): 143–7. Editeur : Paris [France] : L'Harmattan, Collection : Logiques Economiques, ISSN 1140-065X. URL : <https://www.jstor.org/stable/4291744>
 22. Montel MC, Bouton Y, Parguel P. (2012) Ecosystemes des laits et des fromages au lait cru - enjeux pour leur maîtrise. In: Actes des 13ème Rencontres Recherche Ruminant, Paris, 19: 233–40. https://ethno-terroirs.cnrs.fr/gestion/applis/apetit/fichiers/2012_MontelEtAl_synthe%CC%80se3R.pdf
 23. Baldwin AJ. (2010) Insolubility of milk powder products – A minireview. 90: 169–79. <https://doi.org/10.1051/dst/2009056>
 24. Felfoul I, Burgain J, Perroud C, Gaiani C, Scher J., Attia H. and Petit J. (2022) Impact of spray-drying conditions on physicochemical properties and rehydration ability of skim dromedary and cow's milk powders. *Drying Technology.* Taylor Francis. 40 (3): 665-677. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1828448>
 25. Bacigale SB, Ayagirwe RB, Mutwedu VB, Mugumaarhahama Y, Mugisho JZ, Nziku Z, *et al.* (2023) Assessing milk products quality , safety , and influencing factors along the dairy value chain in eastern Democratic Republic of the Congo. *Front Sustain Food Syst.*, 7 (3): 1–18. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1105515>
 26. Hamla H., Belgroune K. (2019) "*Fabrication et suivi des paramètres physico- chimiques et microbiologiques de Jben et Klila fabriqués à partir du lait de vache et de chèvre*", Mémoire de Master, Université d'Oum El Bouagh, Algérie, 65p. <http://bib.univ-oeb.dz:8080/jspui/handle/123456789/8644>
 27. Abd EL-Salam M.H, Safinaz E-S. (2011) A comprehensive review on the composition and properties of buffalo milk. *Dairy Sci. Technol.*, 91 (6): 663–99. <https://doi.org/10.1007/s13594-011-0029-2>
 28. Reece J, Urry L, Cain M, Wasserman S, Minorsky P, Jackson R. (2012) *Biologie Campbell.* Richard M, editor. Saint-Laurent (Québec), 1400 p.
 29. Gaspar P, Carvalho AL, Vinga S, Santos H, Neves AR. (2013) From physiology to systems metabolic engineering for the production of biochemicals by lactic acid bacteria. *Biotechnol. Adv.*, 764-788. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.03.011>
 30. Santos A, Ladero M, Garc'a-Ochoa F. (1998) Kinetic modeling of lactose hydrolysis by a β -galactosidase from *Kluyveromyces fragilis*. *Enzyme Microb. Technol.*, 27 (8): 558–592. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00244-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00244-1)
 31. Admassie M. A. (2018) Review on Food Fermentation and the Biotechnology of Lactic Acid Bacteria. *World J. Food Sci. Technol.*, 2 (1): 19–24. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20180201.13>
 32. Agbo GM, Dokui F, Dedome SL, Salifou CFA, Toleba SS, Tchobo FP. (2023) Qualité physique et nutritionnelle du lait des vaches Borgou nourries avec des pierres à lécher mise au point au Bénin. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, 11 (3): 346–350. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/1367
 33. Prado L. d-O. A. Prédiction de la production et de la composition de la matière grasse du lait par modélisation : rôle des flux de nutriments absorbés. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, France, 2019. <https://theses.hal.science/tel-02071453>
 34. Alg P., Direction F. Méthodes Officielles d'Analyses Physico-Chimiques et Microbiologiques du lait. 2016. <https://www.commerce.gov.dz/reglementation/recueil/-85>
 35. Boubezari M.T., Aissi M., Harhoura K., Contribution a l'Etude des Caracteristiques Physicochimiques et Mycologiques du lait chez quelques races bovines, ovines et caprines. 2010.
 36. Costa MP, Balthazar CF, Franco RM, Mársico ET, Cruz AG, Conte Junior CA. (2014) Changes in expected taste perception of probiotic and conventional yogurts made from goat milk after rapidly repeated exposure, *J. Dairy Sci.*; 97 (5): 2610–2618. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7617>
 37. Costa MP, Monteiro MLG, Frasco BS, Silva VLM, Rodrigues BL, Chiappini CCJ, *et al.* (2017) Consumer perception, health information, and instrumental parameters of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) goat milk yogurts., *J. Dairy Sci.*, 100 (1): 157–168. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11315>
 38. Ramya P, Babu A, Reddy E, Reddy Y, Rao L. (2016) Analysis of various physico chemical properties of raw buffalo milk samples marketed in and around Proddatur town, YSR Kadapa district, Andhra Pradesh, India, *J. Livest. Sci.*, 7 : 30–34. Disponible en ligne: <http://livestockscience.in/wp-content/uploads/buff-milk-character-AP.pdf>
 39. Bahramparvar M, Razavi SMA, Khodaparast MHH. (2010) Rheological Characterization and Sensory Evaluation of a Typical Soft Ice Cream Made with Selected Food Hydrocolloids. *Dep. Food Sci. Technol.*, 16 (1): 79–88. <https://doi.org/10.1177/1082013209353244>
 40. Marcotte M, Taherian AR, Trigui M, Ramaswamy HS. (2001) Evaluation of rheological properties of selected salt enriched food hydrocolloids. *Mich. J. Food Eng.*, 48 (2) : 157–167. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00153-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00153-9)
 41. Sissao M, Millogo V, Ouedraogo A. (2015) Composition chimique et qualité bactériologique des laits crus et pasteurisés au Burkina Faso. *Afriq. Sci. Technol.*; 11 (1): 142–154. URL: <http://www.afriqscience.info/document.php?id=4254>
 42. Leyou BF, Bouguetaib H. Evaluation de la qualité de lait de vache à partir de la qualité physico-chimique de l'eau d'abreuvement. 2014. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/7658>
 43. Tir E., Bounoua S., Heddar M., Bouklila N. (2015) Etude de la qualité physico-chimique et microbiologique de laits crus de vache dans deux fermes de la wilaya de Tissemsilt (Algérie). 8 (2): 27. URL: <https://elwahaat.univ-ghardaia.edu.dz/issue/view/37>
 44. NF V05-101 (1974). Produits dérivés des fruits et légumes - Détermination de l'acidité titrable.

Annexes

Les figures ci-dessous présentent les données sur les caractéristiques sensorielles des échantillons analysés. Ces résultats sont obtenus par le test de dégustation réalisés par 40 panélistes.

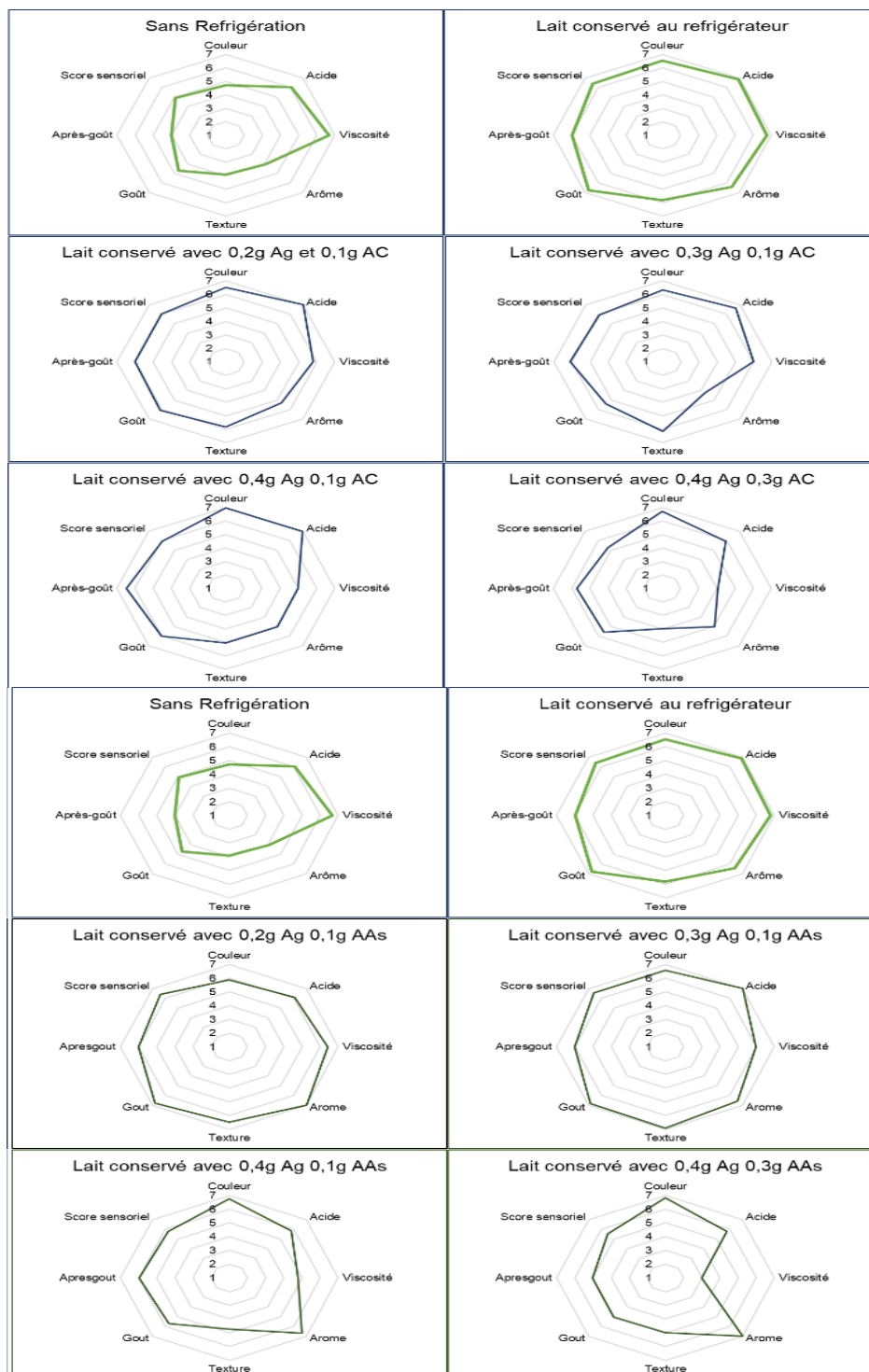


Figure 5. Appréciation organoleptique des échantillons ayant reçu l'Agar-agar (E406)

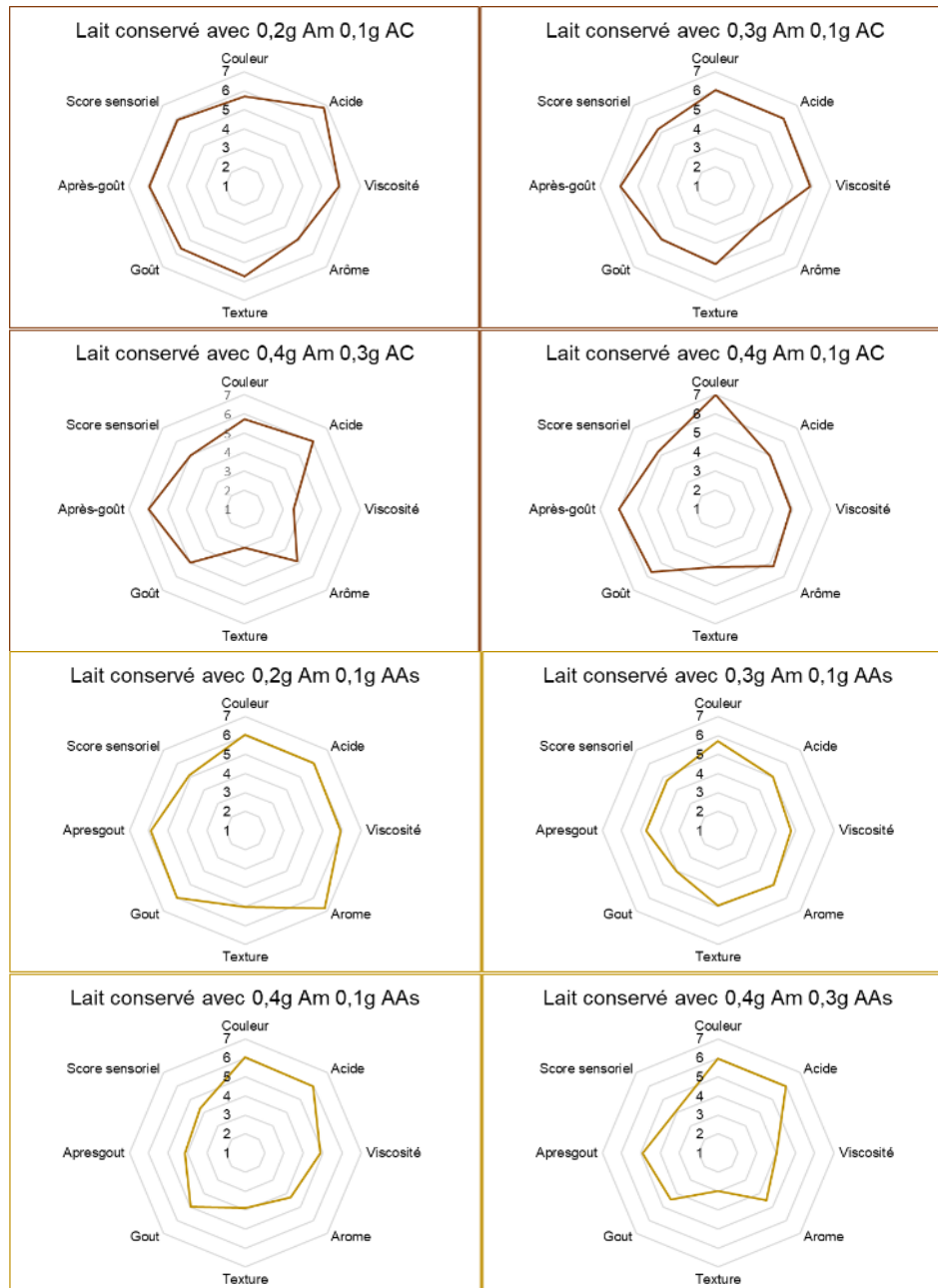


Figure 6. Appréciation organoleptique des échantillons ayant reçu l'Amidon



Cyclostratigraphy of the formations of the Ivorian terminal continental: Case of the "RO" drilling of Aboisso, South-East of Côte d'Ivoire

Jean-Baptiste KASSI^{a,b,*}, Roger Fabus YAO^b

^aLaboratoire de télédétection et des systèmes d'information géographiques (LaTSIG), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

^bU.F.R. Sciences de la terre et Des Ressources Minières (UFR-STRM), Géosciences Marines, Université Félix Houphouët-Boigny Abidjan-Cocody, Côte d'Ivoire

Abstract

The RO drilling is located in the Ivorian Onshore Basin in the Aboisso area. To find a suitable area to meet the potable water needs of Abidjan city, litho-granulometric and log analyzes were carried out on forty-three (43) samples, to understand the sedimentary cyclicities in the establishment of hydraulic reservoirs (aquifers) along the borehole. The lithological results reveal six (6) lithologies which are among others sandy gravels, gravelly sands, kaolins, quartz sands, sandy-muddy gravel, and silty-clayey sand, which alternate all along drilling. These different alternations allowed the establishment of 42 lithological cycles, of which 35 were binary cycles, 6 ternary cycles, and a single quaternary cycle. The grain size results show that the sand fractions of these lithologies are coarse to very coarse, moderately graded to poorly graded, Platikurtic, with negative to positive asymmetries. Through these granulometric parameter arrangements, 23 cycles of grain size, 30 cycles of classification, 27 cycles of asymmetry, and 9 cycles of kurtosis were counted. The log signatures show 12 cylindrical shapes, 4 bell shapes, 3 jagged shapes, 3 egg shapes, and one funnel shape giving a total of 23 cycles. They indicate the existence of anastomosing and meandering fluvial systems.

Keywords: RO drilling; Ivorian Onshore Basin; Drinking water needs; Sedimentary cyclicities; Lithological cycles; Litho-granulometric; log signatures analyze

1. Introduction

According to the World Health Organization (WHO), each year around the world, around 50 million men, women and children are affected by waterborne diseases, of which one million have disabling sequels, and more than a billion working days are lost. In addition, every year around 4 million human beings, especially children, die from diseases related to water and the environment [1]. Water scarcity is the most serious socio-economic and human development issue in the broad sense. Côte d'Ivoire government, through its program of water for all, from the National Office of Drinking Water (ONEP)¹, could carried out several hydraulic drillings. Indeed, in order to respond to the major challenge of supplying drinking water to the populations of Abidjan city, which has experienced a demographic explosion since 2014 with an estimated population of 4,395,243 [2] and whose the usual supply source is not enough.

It was therefore initiated in the South of Côte d'Ivoire, more precisely in the onshore sedimentary basin, the campaign of 55 hydraulic drillings from 2016 to 2018 on the eastern part of the said basin from the region of the large bridges to the region of South Comoé in order to assess the water potential while identifying all the aquifers [3]. Studies were carried out on the Ivorian onshore sedimentary basin to show the sedimentary cyclicities [4-14]. There is, however, a deficit which allows to characterize the formations with a view to providing boreholes for the water supply of the populations.

¹ National Office for Drinking Water: <https://onepci.net/en/>



It is with this in mind that this study of the "cyclostratigraphy of the formations of the Ivorian terminal continental: case of the "RO"² drilling of Aboisso" was initiated to fill this gap. Cyclostratigraphy allows the identification, characterization, correlation and stratigraphic variation interpretations of the formations along the well. It is also the study of sedimentary cycles and their potential correlations to the astroclimatic cycles of Milankovitch³. The objective of this study is to determine the sedimentary cycles for the establishment of reservoirs (aquifer) in the Aboisso region in order to supply the city of Abidjan in drinking water. It will be achieved through the determination of lithological, grain size and log cycles contained in the Aboisso formations.

2. Study area

Aboisso department is located in the southeast of Côte d'Ivoire. It lies between longitudes 4°38' and 2°40'W and latitudes 5°05' and 5°48'N. It is bordered to the east by Ghana, to the south by Krindjabo and Adiaké, to the north by Bédié and to the west by Alépé (Figure 1).

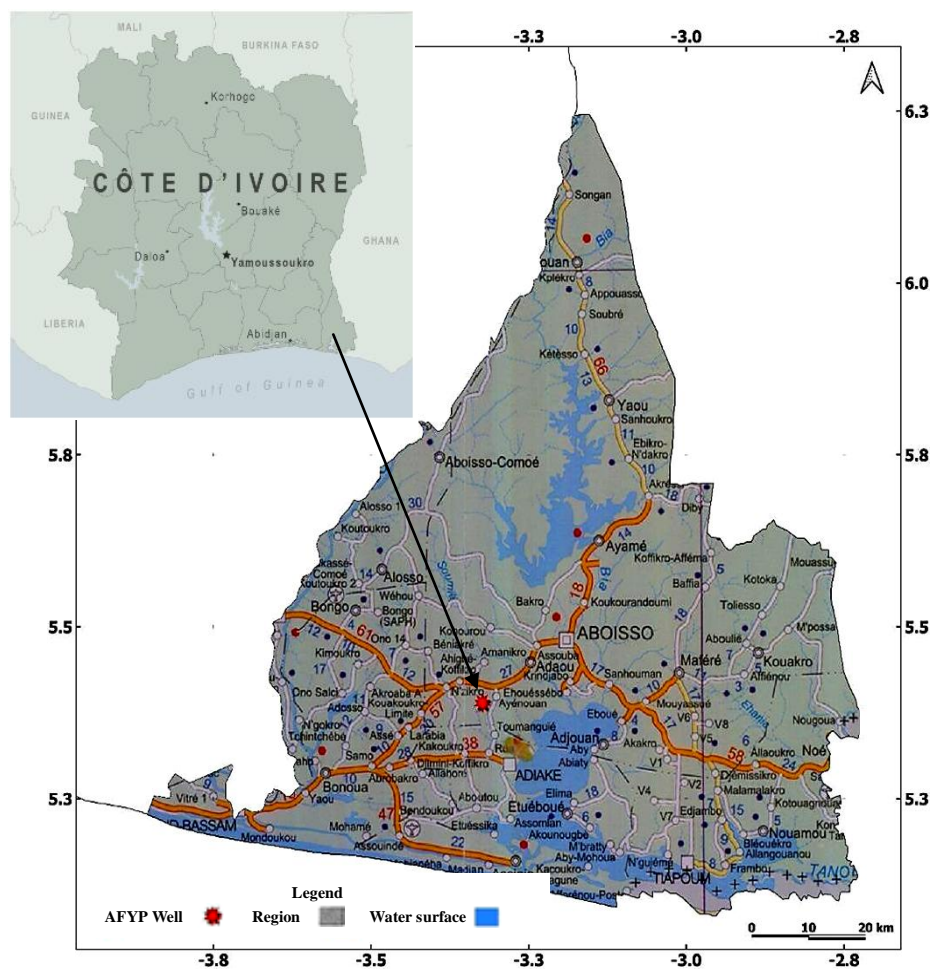


Figure 1 : Presentation of the location of the RO drilling in the department of Aboisso (excerpt from the geographical map of Côte d'Ivoire)

² RO is the drilling name

³ <https://earthhow.com/milankovitch-cycle/>

2. Material and Method

2.1. Sampling and Processing material

The equipment for the field surveys consists of a rotary mud drill for drilling (90° rotary drilling) for future core analyses. A PVC tube to raise the cuttings, surmounted by a drill rod to reach the desired depths. Besides, a shovel to take the samples was also used with a camera for photographs capture in order to find the sampling points. In addition, additional field data for the location of the wells was collected with a GPS.

In the laboratory, working equipment like allure paper to dry the collected sediments, a column of ten sieves to sieve sample in order to know the particle size of the particles which were then weighed using a balance (weighed) giving the mass of each of the fractions according to the diameters of the sieves. A 250 mL bowl was used to determine the porosity and a binocular magnifying glass is used to carry out the morphoscopy of the particles.

The STRATER 5 software was used to produce the stratigraphic logs and diagraphic signatures and EASYSIEVE to determine the granulometric parameters.

2.2. Method

A) Particle size cycle

A total of 92 samples were taken from the RO borehole. Sampling was done through the drilling machine which is connected to a tool called a rotary bit which, by abrasion and grinding, brings up the delays through the PVC tubes by means of a fluid called drilling mud. Once on the surface, drilling mud and amalgams undergone a physical treatment in order to separate them. Thereafter, they were bagged according to depth and taken to the laboratory. The sediments collected were first dried on allure paper, then a part of these sediments was taken and put in a 250 mL bowl in which water is added to determine the porosity. After which, the washing was carried out and the washed sediment was dried on tissue paper. In addition, 100 g of the dried sediments were used for particle size analysis. Using a vibrating sieve set at 50 for 10 minutes and a column of 7 sieves whose meshes are 04,

02, 01 mm, 500, 250, 125 and 63 microns, was used. After the 10 min, the residue from each sieve was then weighed to determine the proportion of each fraction in the sample. The data obtained was reported in Excel file. Also through Easysave software, the granulometric parameters such as the average which gives us precision on the average size of the grains of sand; the standard deviation which makes it possible to classify the sands by giving an idea of the sorting of the sediments, were determine.

B) Lithologic cycle

This will involve determining the nomenclature of the cuttings and the design of the lithological log. The nomenclature of cuttings was based on the different proportions of rudites, arenites and pelites. A name was assigned to each excavation from the GSB ternary diagram. Thus, it was easy to determine the clean sediments, mixed with 2 or 3 elements. In addition, the design of the lithological log was done using the Strater 5 software⁴ which is a software for measuring and interpreting well and borehole parameters. As concerning to the determination of the various cycles, it was a question of determining the lithological cycles which is to count the various lithologies.

C) Logging cycle

The determination of logging cycles consisted to count the different forms of gamma ray observed, in particular the cylinder, funnel, bell, egg and sawtooth shapes. Finally, the granulometric cycles consisted to determine the various granulometric parameters such as; grain size, asymmetry, grading, and kurtosis.

2.3. Results

A) Lithological cycles

The lithologic reconstruction was possible only from the log allowing to specify the limits of the layers, thus distinguishing the false from the true mixtures. Six (6) elementary lithologies constitute our lithological cycle. The mainly quartz sand, with a percentage of 26.42% in all the sediments while the GR signature is in

⁴ <https://www.goldensoftware.com>

the form of peaks with values between 60 and 150 API. The gravelly sands with a mineralization only composed of quartz with a percentage of 24.53% of the sediments of the well with the GR value of these sediments lower than 20 API. Kaolins (or clay siltstones) with a proportion of 13.21% in all sediments with a GR signature values between 60 and 150 API. The silty-clayey sands which are quartzose have a proportion of 30.18% with the GR value of these sediments being at 60 API (Figure 2). The bouo-gravelly sands, made up of quartz grains, have a proportion of 3.77% with a GR signature value less than 30 API. The sandy-muddy gravels, also made up of quartz grains, possess a percentage of 1.897% with a GR value of 20 to 30 API.

B) Logging cycles

The six (6) elements in the lithologic cycle allowed lithologic reconstruction in the RO well. The lithologies associated with each letter are: a = gravelly sands, b = sandy-muddy gravels c = kaolins, d = sands, e = mud-gravelly sands, f = silty-clayey sands.

All binary and ternary cycles were developed in fluvial systems corresponding to periods of decline (a) and flood (b). The periods of decline (low water level) correspond to the activation of the fluvial channel which promotes the deposition of sands (a) where the deposition energy is high. As for the flood periods, they correspond to the deposits of kaolins (b) in the flood plain which is created during these periods by the fine elements. The (a)-(d) and (a)-(c)-(d) cycles thereby reflect a reduction in the deposition energy in the channel. The six elementary lithologies above constitute our lithological cycle, thus there are a total of 10 lithological cycles including four 4 binary cycles, 5 ternary cycles and a single quaternary cycle. All binary and ternary cycles were developed in a fluvial environment. In addition, for the logging cycles 13 cycles were counted including 5 cycles in cylindrical shapes, 2 cycles in egg shape, 2 cycles in sawtooth shape, 2 bell-shaped cycles and 2 funnel-shaped cycles. The RO well is therefore mainly characterized by braided fluvial deposits with a total percentage of 84.24% (Figure 2). From the logging it was possible to identify the limits between the layers and to distinguish six alternating lithologies. These are gravelly sands, sandy-muddy gravels, kaolins, sands, mud-gravelly

sands and silty-clayey sands. In addition, the logging allowed the determination of the different lithological cycles which were highlighted by the lithological log and the logging cycles by the analysis of the different forms of GR. There are 10 lithologic cycles with a maximum of 6 elements (a-b-c-d-e-f) and 13 log cycles, mainly the Rey gamma forms observed are the cylinder, bell, egg, funnel and serrated (sawtooth) forms, (Figure 2).

*Cyclostratigraphy of the formations of the Ivorian terminal continental:
Case of the "RO" drilling of Aboisso, South-East of Côte d'Ivoire*

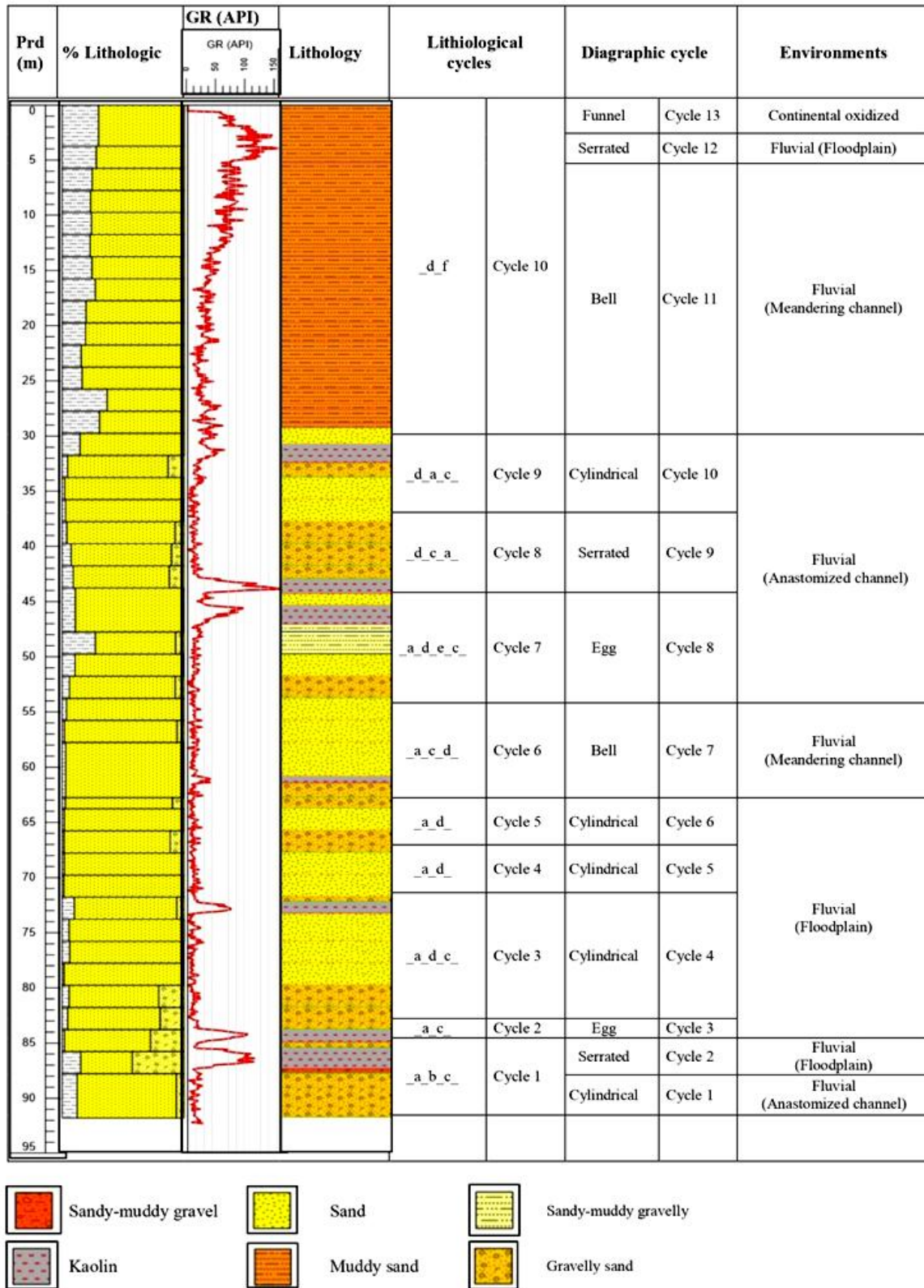


Figure 2: Log presenting the lithological and log cycles

C) Granulometric cycles

In the direction of the drilling sedimentation, there are 7 cycles including: 6 cycles of very coarse sands – coarse sands (TG_G) and 1 cycle of medium sands – coarse sands (M_G) through which the granulometric parameters cycles were identified *i.e.* the size of the grains, the classification, the asymmetry and the flattening of the grains indicated 8 cycles of grain sizes, 6 cycles of classification of the sands, 5 asymmetry cycles and 1 sand kurtosis cycle.

D) Average quartz grain sizes

The average particle size (m1) of the quartz grains vary from 0.451 nm; 0.571 nm and 1.269 nm, from which the classification such as the median size, the coarse size and the very coarse size involving medium sands, coarse sands and very coarse sands were deduced. The proportions of these sizes are respectively 2.4%, 69% and 28.6% (Figure 3). Coarse sands are the most dominant in this well. The median size cycle was composed of medium sand (M), coarse sands (G) and very coarse sands (TG). In the direction of sedimentation, there are 7 cycles including: 6 cycles of very coarse sands – coarse sands (TG_G) and 1 cycle of medium sands – coarse sands (M_G).

The TG_G and G_M cycles reflect a gradual decrease in the energy of deposits in the fluvial channels; each cycle startup begins with strong energy and ends with less strong energy. In the TG_G cycle, the decrease in energy was gradual between the very coarse sands (TG) and the coarse sands (G) while in the M_G cycle the decrease in energy is abrupt between the coarse sands (G) and medium sands (M) probably due to a decrease in slope (Figure 3).

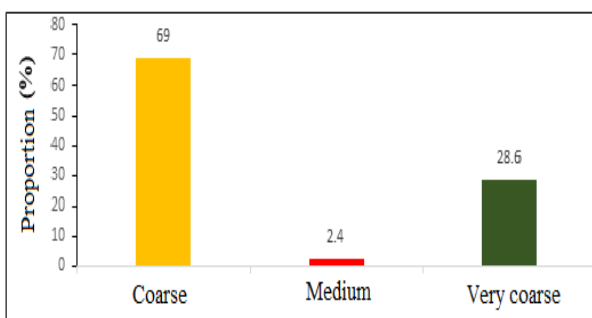


Figure 3: Average sizes proportion of quartz grains.

E) Classification of quartz grains

The classifications are identified in abundance order (Figure 4): moderately classified sands (66.67%), poorly classified sands (28.57%) and fairly well classified sands (4.76%).

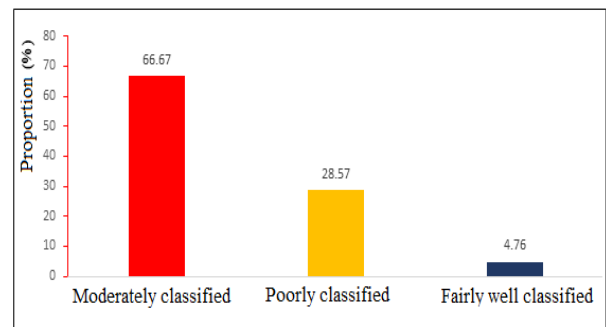


Figure 4: proportion of classification types

The quartz grain grading cycle consists of three elements (medium graded sands (MC), poorly graded sands (MeC) and moderately graded sands (AbC)). In the direction of sedimentation, there are 6 cycles including 2 cycles of moderately classified sands_fairly well classified sands (MC_AbC) and 4 cycles of moderately classified sand_poorly classified sand (MC_MeC) the depths which are summarized in the following table (Tableau I).

Tableau I
Type of classification of quartz grains

Depths (m)	Ranking
91.75m-85.44	MC_AbC
84.91m-75.75	MC_AbC
73.25m-53.75	MC_MeC
51.75m-49.75	MC_MeC
47.75m-21.55	MC_MeC
21.02m-1.83	MC_MeC

In the direction of sedimentation, we note that the very beginning of the cycle is marked by an average classification, namely the MC_AbC cycles, this may be due to a mixture of several coarse and fine fractions from which the deposition energy is low. Beyond this cycle, the classification becomes good until the end, the MC_MeC cycles, hence a high transport energy which sorts the sediments better compared to a low energy in the opposite direction of sedimentation.

F) Skewness or asymmetry

Skewness values are ranged between -0.008 and 1.074. The asymmetries identified are in descending order: negative asymmetries (80.95%) and a symmetrical one (19.05%). The most dominant are the sands whose asymmetry is negative (Figure 5). The cycles of asymmetry of quartz grains consist of two elements (negative asymmetry (N) and a symmetrical (S)). In the direction of sedimentation, 5 cycles are counted, distributed as follows: 4 Negative _Symmetric (N_S) cycles and one single Symmetrical _ Negative (S_N) cycle. N_S cycles show a preponderance of coarse sizes compared to the average of the sample at the beginning of the cycle and evolve at the end of the cycle towards a balance between the fine sizes and the coarse sizes compared to the average. The S_N cycles are located at the top and suggest as many coarse sizes as fine sizes compared to the average of the sample at the end of the cycle where the deposition energy decreases. Therefore, it can be concluded that the ranking is good at the beginning of the cycle then at the end of the cycle it becomes less good.

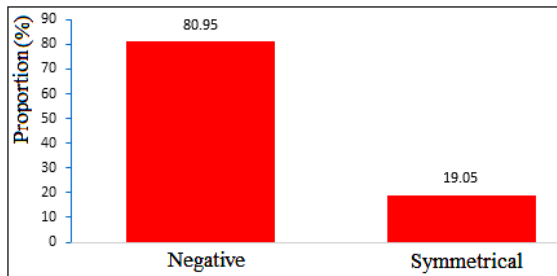


Figure 5: Proportion of asymmetry types

G) Kurtosis

In the analysis of the kurtosis (flattening) parameter, a single element in the cycle was highlighted, namely the platikurtic (P) which spreads over the entire length of the RO well (Figure 6).

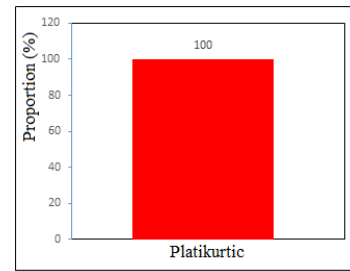


Figure 6: proportion of types of kurtosis

Since the proportion of kurtosis is 100% platikurtic, therefore it indicates that the curves of the sands are much extended in the direction of sedimentation, along the RO well.

These cycles are binary with the exception to the kurtosis cycle which is essentially platikurtic along the well. The quartz grains of Aboisso region are mostly coarse, moderately graded with negative asymmetries and very extensive curves (Figure 7).

Prd(m)	Grain size cycles		Sand gradind cycles		Cycles asymmetry			Kurtosis cycles		
0	coarse		poorly classified			negative				
	coarse		poorly classified			negative				
5	coarse		poorly classified			negative				
	coarse		poorly classified			negative				
10	coarse	_TG_G_ cycle 8	poorly classified	MC_MeC cycle 6		negative	_S_N_ cycle 5			
	coarse		poorly classified			negative				
15	coarse		poorly classified			negative				
	coarse		poorly classified			negative				
20	coarse		moderately classified			negative				
	coarse		poorly classified			symmetrical				
	very coarse		poorly classified			symmetrical				
25	very coarse		poorly classified			symmetrical				
	coarse	_tg_g_ cycle 7	poorly classified			symmetrical				
30	very coarse		poorly classified			symmetrical				
	very coarse		moderately classified			symmetrical				
35	very coarse		moderately classified	MC_MeC cycle 5		symmetrical				
	coarse		moderately classified			negative				
	coarse	_G_TG_ cycle 6	moderately classified			negative	_N_S_ cycle 4			
40	coarse		moderately classified			negative				
	coarse		moderately classified			negative				
45	coarse		moderately classified			negative				
	Moyen	_G_M_ cycle 5	moderately classified			negative		platykurtic	_P_ cycle 1	
50	coarse		poorly classified	MCMcC cycle 4		negative				
	coarse	_TG_G_ cycle 4	moderately classified			negative				
55	very coarse		moderately classified			symmetrical				
	coarse	_TG_G_ cycle 3	moderately classified			negative				
60	very coarse		moderately classified			negative				
	coarse	_TG_G_ cycle 2	moderately classified	MC_MeC cycle 3		negative				
65	coarse		moderately classified			negative	_N_S_ cycle 3			
	very coarse		moderately classified			negative				
70	coarse		moderately classified			negative				
	coarse		moderately classified			negative				
75	coarse		moderately classified			negative				
	coarse		fairly well classified			negative				
	coarse		moderately classified			negative				
80	very coarse	_TG_G_ cycle 1	moderately classified	MC_AbC cycle 2		negative				
	very coarse		moderately classified			symmetrical				
85	very coarse		moderately classified			negative	_N_S_ cycle 2			
	very coarse		moderately classified			negative				
90	very coarse		fairly well classified			symmetrical				
	very coarse		moderately classified	MC_AbC cycle 1		negative	_N_S_ cycle 1			
95										

Figure 7: Particle size cycles of the RO well

3. Discussion

3.1. Lithological and log cycle

The RO well are composed of 10 lithological cycles and 13 log cycles. The cycles are of degree of asymmetry; indicating a duration of passage different from the end of a cycle to the initial phase of another cycle. For example, the passage from (a) to (b) or from (c) to (d) is different from the passage from (b) to (a) or from (d) to (c). This variation is reinforced by the thickness of the layers which is therefore different overall. The deposition time of each layer of sediment is different from the other layers. The logging cycles are also asymmetrical, they are generally called autocycles; which reflects a development in continental (fluvial systems) and coastal (transitional) environments. The establishment of these cycles is due to internal factors which are here the different migrations of the river systems argues that autocycles are characteristic of continental, littoral and platform environments.

These cycles are climate controlled. At the level of fluvial systems, the alternation of wet period and arid period favors the deposition of fluvial sands and kaolins which also alternate. Kaolins are formed during periods of flooding (flood plain) and sands during periods of recession (active channel). During flood seasons, they can occur anytime and anywhere in any climate. But, according to [15], the frequency, intensity and pattern of floods recorded over several years in a stable area are essentially representative of a sustainable climatic environment. Also, states that in a fluvial series composed of an alternation of sandy and clayey facies, one is linked to the activity of the channel (sand) and the other to the flood (clay).

3.2. Granulometric cycles

In the granulometric cycles, the average size of the quartz grains decreases from the beginning to the end of each cycle; *i.e.* a progressive reduction in the energy of deposition in the fluvial channels which acts on the classification of the sands. The higher the energy, the better the grains are sorted, in other words the grains are better classified (medium to fairly good classification). In the RO well, the grains are deposited in this case preferentially and the risk of mixing different sizes is minimized. A slowdown in energy or a sudden loss of

energy leads to poor sorting; there will be a high risk of mixing different sizes. The classification of the sands is therefore not a function of the size of the grains, but depends to the proportion of the granulometric fractions expressed in the sandy sediment [16, 17].

The asymmetry is also related to the deposition energy. A high deposition energy leads to a negative asymmetry which will correspond to a preferential deposition of coarse sizes and are the least sorted platikurtic compared to the average of the sample and vice versa.

As in the classification, the kurtosis is related to the number of granulometric fractions expressed in the sandy sediment. The smaller is this number, the sharper is the curve and vice versa.

According to the work of [18], the transport of sediment with variable grain size (mixture of different sizes) can oppose to a certain extent the preferential transport of fine grains compared to coarse ones. Coarser grains are more exposed to the flow than if they were represented alone in the bed, and vice versa for fine grains. In a sediment with varied grain size, if the transport energy is not sufficient to transport the coarse grains, then there will be sedimentation of sediment with variable grain size; which will favor a bad classification. This explains the poor classifications encountered in coarse gravelly sand and gravel with coarse sand. Additionally, can the particle size mixture result from a sudden loss of transport energy which will deposit all of its solid charge. This mixture can still be the result of the sampling which is done over a given interval. In this interval the energy may have varied during the different deposits.

In the RO well, the sediments encountered are coarse and have a negative asymmetry. The asymmetry is therefore linked to a high deposition energy relative to the average of the sample.

4. Conclusion

The aim of this study was to characterize the sedimentary cyclicities of the formations of the continental terminal of Aboisso locality. At the end of this study, three types of results were obtained: lithological cycles, logging cycles and grain size cycles. Along the RO well, 6 lithologies were identified, namely the gravelly sands (a), sandy-muddy gravels (b),

kaolins (c), sands (d), mud-gravelly sands (e) and silty-clayey sands (f). Thirteen lithological cycles in total were found, distributed in order of abundance: three binary cycles (c-f), two binary cycles (a-d), one binary cycle (a-c), one ternary cycle (a-b-c), one ternary cycle (a-d-c), one ternary cycle (a-c-d), one ternary cycle (d-c-a), one ternary cycle (d-c-a), one ternary cycle (d-c-f) and finally one quaternary cycle (a-d-e-c). It is noticed that no cycle closes the 6 lithologies. The analysis of the gamma ray shapes suggested the identification of 13 logging cycles and 5 logging shapes which are: five cycle of cylindrical shapes, two cycles of egg shape, two sawtooth (serrated) cycles, two bell cycles and two funnel cycles. Cylindrical, egg-like shapes are characteristic of anastomotic fluvial systems. On the other hand, the bell shapes reflect the presence of meandering fluvial deposits, which testifies to a normal grano classification. The sawtooth deposits, on the other hand, show an aggradation of the fluvial floodplain deposits. The funnel shapes testify to an inverse grading whose placement of these deposits is an anatomosed fluvial system. The analysis of the cycles of the grain size parameters including eight cycles of the average grain size, six cycles of the grain classification, five cycles of grain asymmetry and one cycle of kurtosis were identified along the shaft. The quartz grains from Aboisso area were mainly coarse (69%), moderately classified (66.67%) with negative asymmetries (40.48%) and platykurtic flattening (100%).

The different cycles are asymmetrical and autocycles set up by the different migrations of the river systems. These systems created some reservoirs, whose the largest reservoir is located at heights of 47.83 m and 85.42 m, *i.e.* a total of 37.59 m in thickness, which is reservoir 1. Three good reservoirs (aquifers) were observed: reservoir 1 (85.42m_47.83m), reservoir 2 (45.62m_30.85m) and finally reservoir 3 (30.85m_4.80m). All of these reservoirs were developed in fluvial systems and their cap rocks are floodplain deposits and bar land. The floodplain deposits are beveled thus creating a communication between the three sub-reservoirs.

References

- [1] OLIVE J. L. (2020). Communication à l'Académie de l'Eau et Membre de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer (ASOM) au colloque "Médecine et santé internationales: du passé à l'avenir" à l'ASOM le 6 mars 2020.
- [2] RGP. (2014). Résultats principaux du recensement général de la population. <https://www.ins.ci/documents/rgph/ivoirien18plus.pdf> (accessed on: 17 April 2020)
- [3] ASSALE F.Y.P. (2013). "Caractérisation sédimentologique, palynologique, géochimique et paléoenvironnementale des formations sédimentaires connexes à la faille des lagunes (est du bassin onshore de Côte d'Ivoire)" [French] Phd Thesis, Félix Houphouët-Boigny Univ., Abidjan Côte d'Ivoire 361 P. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02070206/file/THESE%2520ASSALE.pdf> (accessed on: 17 April 2020)
- [4] CHIERICI M. A. (1996). Stratigraphy, palaeoenvironments and geological evolution of the Ivory Coast-Ghana basin – In – Jardine S., Klasz I (de) & Debenay J.P. (Eds) – Géologie de l'Afrique et de l'Atlantique Sud, Actes des colloques d'Angers, Mém. 16, ELF AQUITAINE, 16-20 Juillet 1994, pp 293-311. [https://www.scrip.org/\(S\(1z5mqp453edsnp55rrgic55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1779893](https://www.scrip.org/(S(1z5mqp453edsnp55rrgic55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1779893) (accessed on: 17 April 2020)
- [5] DIGBEHI Z. B. (1987). "Etudes comparées de la sédimentation des stades d'ouverture Atlantique-Golfe de Guinée - Golfe de Gascogne. Sédimentologie, biostratigraphie" [French]. Phd Thesis. Pau University, France, 366p.
- [6] MARTIN L. (1973). La sédimentation actuelle sur le plateau continental de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, 5 (2): 155-120. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:17133> (accessed on: 06 February 2020)
- [7] LE BOURDIEC P. (1958) - Contribution de l'étude géomorphologique du bassin sédimentaire et des régions littorales de Côte d'Ivoire. *Etudes éburnéennes*, VII, pp 7-96. <https://www.abebooks.com/Contribution-1%C3%A9tude-g%C3%A9omorphologique-bassin-s%C3%A9dimentaire-r%C3%A9gions/22388317250/bd>. (accessed on: :08 February 2020)
- [8] AKOBE A. C., AMANI M. E., TOURE M., MONDE S., AKA K. and AFFIAN K. (2018) Etude comparative des caractères pétro-sédimentaires des grès du bassin sédimentaire de côte d'ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 31, pp 138 – 160. https://revist.net/REVIST_31/REVIST_31_9.pdf (accessed on: : 25 April 2020)
- [9] BOULVAIN F. (2007). "Diagenèse et dynamisme des bassins sédimentaires". Cours de pétrologie sédimentaire B20, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Liège, B-4000 Liège, (2007)
- [11] SPENGLER A. & DELTEIL J. (1966). Le bassin sédimentaire tertiaire de la Côte d'Ivoire. In : Les bassins sédimentaires du littoral Africain. *Ann. Serv. Géol. Afr.*, Paris, pp. 99 -113.
- [12] MAURICE E. T. (2003). Sedimentary Rocks in the Field. Third EDITION. Department of Geological Sciences University of Durham, UK. John Wiley & Sons Ltd, England, 234p. <https://zarmesh.com/wp-content/uploads/2018/08/Sedimentary-Rocks-in-the-Field.pdf> (accessed on: :28 July2020)
- [13] ASSALE F. Y.P., MONDE S. & AKA K. (2012). Caractérisation litho-stratigraphique et pétro-sédimentologique des formations tertiaire-quatennaires de la région de Bingerville (Côte d'Ivoire). *Afrique SCIENCE*. 08 (2): 93-112. <https://hal.science/tel-02070206/file/THESE%20ASSALE.pdf> (accessed on: : 13 September 2020)
- [14] AFFOUMOU P. (2019). "Caractérisation lithostratigraphique du continental terminal ivoirien : aspects granulométrique et pétrophysique du forage APC de Dabou". Mémoire. Univ F.H.B. Cocody (Abidjan), 38p.
- [15] MACAIRE J. J., (1990). L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels. De la géodynamique à la chronostratigraphie. *Quaternaire*, 1 (1): 41-49.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5782006>

(accessed on: : 10 March 2021)

- [16] GARY N.S., (2009). Sedimentology and stratigraphy. Second edition. Wiley Blackwell Ltd. Hoboken, USA, 419p. [https://books.google.ci/books?hl=fr&lr=&id=zl4L7WqXvogC&oi=fnd&pg=PP10&dq=N.S.+GARY.+\(2009\).+Sedimentology+and+stratigraphy.+Second+edition.+Wiley+Blackwell+Ltd.+Hoboken,+USA,+419p&ots=l4JIUP7orc&sig=ei2aAnlFqiIdBtNE_1Ej7nE8oU&redir_esc=v#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ci/books?hl=fr&lr=&id=zl4L7WqXvogC&oi=fnd&pg=PP10&dq=N.S.+GARY.+(2009).+Sedimentology+and+stratigraphy.+Second+edition.+Wiley+Blackwell+Ltd.+Hoboken,+USA,+419p&ots=l4JIUP7orc&sig=ei2aAnlFqiIdBtNE_1Ej7nE8oU&redir_esc=v#v=onepage&q&f=false) (accessed on: : 29 January 2021)
- [17] BROU K. L., (2018). “*Nouveau essai de classement des sables à partir des relations entre les courbes modales et les interquintiles : cas des sables de plage et fluviatiles de l'est du bassin onshore ivoirien (Côte d'Ivoire)*”. Master's thesis [French]. Univ. F.H.B. Cocody (Abidjan), 52p.
- [18] LINARES M-d., (2007). “*Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc*” [French] Hydrologie. Doctoral thesis, Joseph-Fourier University- Grenoble I, France, 160 p. <https://theses.hal.science/tel-00193119> (accessed on: 15 March 2022)
-



Détermination de la formule appropriée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans une région aride : Application à la station de Béchar (SO Algérien)

Lynda CHEBBAH^a et Abdesselem KABOUR^{b,*}

^a Département Sciences et Techniques, Université Abdelhafid Boussouf de Mila, BP 26 Mila - 43000, Algérie.

^b Laboratory of Modeling and Socio-Economic Analysis in Water Science – MASESE, Mohamed-Cherif Messaadia University - Souk Ahras, Algeria

Résumé

Une gestion durable des ressources en eau nécessite une bonne maîtrise de l'évaluation quantitative des termes du bilan hydrologique, tel que l'évapotranspiration, qui constitue un paramètre relativement difficile à estimer, surtout en présence de plusieurs expressions empiriques, le choix devient délicat. Dans la région aride de Béchar (Sud-ouest Algérien), qui souffre de la rareté des précipitations et d'une demande en eau sans cesse croissante sous l'effet de la pression de la démographie et de l'activité agricole, l'évapotranspiration constitue le facteur de perte hydrique le plus important. Elle est estimée, par un ensemble de méthodes (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et ANRH), sur une série de 1978 à 2010 (32 ans), à partir de données climatiques (température, humidité relative, précipitation, durée d'insolation et la vitesse du vent). L'objectif de ce travail est de choisir, par comparaison entre ces méthodes, celle la plus appropriée pour le calcul de l'évapotranspiration. Les résultats indiquent que sur l'échelle mensuelle pour la station de Béchar, le modèle de TURC fournit la meilleure estimation quantitative de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Mots-clés : Modèle numérique ; Évapotranspiration potentielle (ETP) ; Climat aride ; Béchar

Determination of the appropriate formula for the estimation of potential evapotranspiration "PET" in an arid region: Application to the Bechar station (SW Algeria)

Abstract

The sustainable management of water resources requires a good command of the quantitative assessment of the terms of the hydrological balance, such as evapotranspiration, which is a relatively difficult parameter to estimate, especially in the presence of several empirical expressions, making the choice a delicate one. In the arid region of Béchar (south-west Algeria), which suffers from a lack of rainfall and an ever-increasing demand for water as a result of demographic pressure and agricultural activity, evapotranspiration is the main factor of water loss. The aim of this work is to select the most appropriate method for calculating evapotranspiration by comparing several methods. Evapotranspiration is estimated using different methods (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO and ANRH) over a series from 1978 to 2010 (32 years) based on climatic data (temperature, relative humidity, precipitation, sunshine duration and wind speed). The results indicate that on a monthly scale for the Béchar station, the TURC model provides the best quantitative estimate of potential evapotranspiration (ETP).

Keywords: Numerical modelling; Potential evapotranspiration (PET); Bechar; Arid climate.

1. Introduction

Plusieurs auteurs ont cherché à établir une formule convenable pour estimer l'ETP (l'évapotranspiration potentielle) avec le minimum d'erreurs possible et intégrant une grande partie du nombre des facteurs

climatiques qui régissent le phénomène [1-3]. On estime communément que l'évapotranspiration représente l'évaporation à partir de toute l'eau contenue dans le sol, la neige, la glace, et les autres surfaces à laquelle s'ajoute la transpiration des végétaux. Les



estimations relatives à l'évaporation des nappes d'eau libre du sol, ainsi que la transpiration des végétaux, revêtent une grande importance dans les études hydrologiques. A titre d'exemple, l'évaluation de l'évaporation peut jouer un rôle déterminant dans l'étude de la faisabilité et la gestion d'un site agricole. L'évaporation et l'évapotranspiration constituent enfin deux éléments importants de toute étude du bilan hydrique [4]. Des estimations de l'évapotranspiration moyenne des bassins sont indispensables pour établir des modèles hydrologiques conceptuels [5]. Les moyens techniques actuels ne permettent pas encore de mesurer directement l'évapotranspiration sur de grandes surfaces [6, 7]. On a cependant mis au point plusieurs méthodes d'évaluation indirecte qui fournissent des résultats acceptables, les évaluations peuvent être faites à partir du bilan hydrique, du bilan énergétique et des méthodes basées sur l'aérodynamique des fluides [1,2,8,9], d'autres formules ont été établies à la base de la simplicité et de leurs exigences minimales en matière de paramètres d'entrée, en particulier les éléments climatiques fondamentaux, tel que la température (t), l'humidité relative (HR), l'insolation et vitesse du vent [10,11]. Dans l'ensemble, les études soulignent l'importance de choisir la méthode la mieux adaptée aux conditions locales et à la disponibilité des données météorologiques [12].

L'évapotranspiration en Algérie peut être évaluée à l'aide de différentes méthodes et facteurs. Une approche consiste à estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide de la méthode de Thornthwaite [13]. Une autre méthode consiste à utiliser des modèles de réseaux neuronaux artificiels ¹, qui peuvent estimer l'évapotranspiration de référence quotidienne en fonction de facteurs climatiques tels que la température, l'humidité relative et la vitesse du vent [14]. En outre, l'algorithme S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) peut être utilisé avec des images satellites pour évaluer l'évapotranspiration dans des zones spécifiques, en tenant compte de facteurs tels que la disponibilité de l'eau, la saisonnalité et l'indice de végétation [15]. Ces méthodes fournissent des informations précieuses sur le bilan hydrique et les processus hydrologiques dans les régions arides en l'Algérie.

¹ ANN : Modèles mathématiques dont l'architecture est inspirée de réseaux de neurones biologiques.

L'objectif de ce travail est de comparer plusieurs méthodes le calcul de l'évapotranspiration, pour choisir la plus appropriée à une station située dans un climat aride en l'occurrence la station climatique de Béchar.

2. Matériel et méthode

Dans ce travail, nous avons appliqués six modèles d'estimation de l'évapotranspiration (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et ANRH², sur les données de la station de Bechar, située dans une région à climat aride, pour une série de 1978 à 2010 (32 ans). Nous avons calculées leurs moyennes à l'échelle des valeurs moyennes mensuelles interannuelles (VMMI), et à l'échelle annuelles en calculant les sommes des valeurs moyennes mensuelles interannuelles (SVMMI). Ensuite, nous les avons comparés, à cette moyenne, pour déterminer le model le plus proche de la moyenne considérée, sur les deux échelles, et le proposer comme formule appropriée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle dans la région de Bechar. Nous avons utilisés deux méthodes de comparaison, la première consiste à calculer un écart relatif (ER) à la moyenne, pour les deux échelles des SVMMI et VMMI, et la deuxième est une corrélation linéaire, seulement pour le VMMI.

2.1. Présentation de la station et des données

Pour la réalisation de ce travail le choix est porté sur la station climatique de Bechar, située dans un climat aride, au Sud-Ouest de l'Algérie (Figure 1), elle présente les caractéristiques suivantes : X (Km) : 802.15, Y (Km) : 116, Longitude : 02°14'00"W, Latitude : 31°37'00"N, Altitude : 772 m. Cette station appartient à l'office national de météorologie (ONM). Les observations et les mesures enregistrées sont : la pluviométrie, les températures, l'humidité relative, la vitesse du vent et la durée d'insolation journalière [16]. La série utilisée s'étale de 1978 à 2010, c'est-à-dire 32 années. Les données de l'ONM ont été soigneusement examinées, elles ne présentent aucune lacune.

Les six formules ou modèles utilisés pour estimer l'évapotranspiration, à l'échelle mensuel et annuel, sont : Turc (1960), Thornthwaite (1948, 1955), Blaney-Criddle (1950), Penman (1948), Penman-FAO (Food

² Agence Nationale des ressources Hydriques

and Agriculture Organization) (1965), et celle de l'ANRH. Ces formules sont présentées, en définissant chaque paramètre utilisé, et les résultats sont consignés dans des tableaux et des graphes, pour faciliter leurs comparaisons et leurs interprétations. En fin, une corrélation avec des valeurs d'une ETP de référence est calculée à la base d'une formule de référence [1, 2, 8], notamment celle de Turc, et choisie par rapport à sa proximité de la valeur moyenne des six modèles appliquées, ce qui a permis de déterminer le modèle le plus adéquat pour la région étudiée.

2.2. Aperçu climatique.

Pour caractériser le climat d'une région donnée, le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1953) est considéré comme une méthode graphique, qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec $P=2T$. La courbe des précipitations passe au-dessous (période sèche), ou au-dessus de celle des températures (période humide); la période s'étendant entre les abscisses des points d'intersection des deux courbes, correspond à la durée de la saison correspondante, son intensité et traduite par la surface du graphe comprise entre les deux courbes pendant cette période [2,8,16]. Pour la station de Béchar (1978-2010) (Figure 1), la période sèche s'étend sur toute l'année, à cause de sa situation dans une région à climat aride.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles interannuelles varient de 7,07 mm (Décembre) à 9,73 mm (Juillet), et les températures moyennes mensuelles interannuelles oscillent entre 9,85 °C (Janvier) et 34,5 °C (Août) (Figure 2).

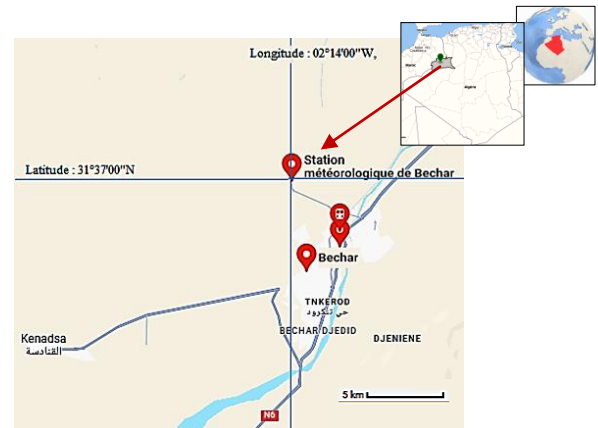


Figure 1. Situation géographique de la station climatique de Bechar
Longitude : 2°14'00" ; Latitude : 31°37'00".

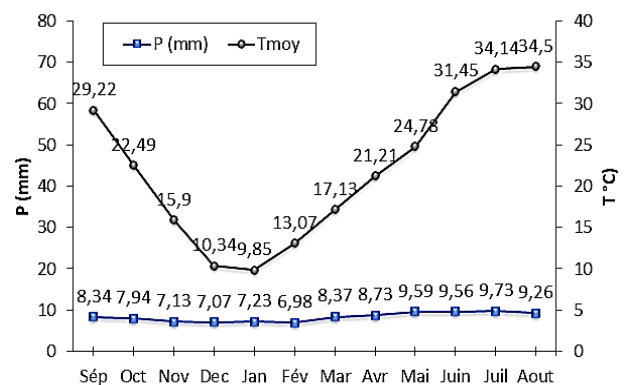


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Gaussen – Bagnouls de la station la station de Béchar, (1978-2010).

2.3. Formule de Turc

L. Turc rechercha à partir de 1945 une expression algébrique représentant au mieux l'évapotranspiration mensuelle et même décadaire observée sur les cases lysimétriques³ de Versailles, Rothamsted, Groningen et d'autres stations situées en Ecosse, en Afrique du Nord et aux Indes. Il aboutit ainsi, vers 1960, à une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'insolation et de la température [2, 6-8, 17]. En 1962, L. Turc a proposé des formules plus simplifiées, séparées par une limite entre deux applications différentes, fonction de l'humidité relative mensuelle de valeur 50 %. Ainsi, on peut évaluer avec une approximation suffisante l'évapotranspiration

³ Appareil de mesure de la quantité d'eau provenant des précipitations qui pénètre dans le sol.

potentielle mensuelle d'un périmètre irrigué par la formule suivante :

$$ETP = 0,40(Ig + 50) \frac{t}{t+15}, \text{ avec } Hr > 50 \%$$

$$ETP = 0,40(Ig + 50) \frac{t}{t+15} \times \left(1 + \frac{50-Hr}{70}\right), \text{ avec } Hr < 50 \%$$

Où :

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm²/jour) ;

t (°C) : Température moyenne mensuelle du mois considéré.

Le coefficient 0,40 est le résultat du produit de 0,013 par le nombre de jours du mois considéré. Ainsi, pour un mois de 31 jours : $0,013 \times 31 = 0.40$

La radiation solaire globale n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations, on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique Iga^4 , calculée d'après les données astronomiques et d'après le rapport h/H de la durée d'insolation effective (mesuré par un héliographe) à la durée du jour astronomique (s'obtient par des tables).

On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Ångström⁵ :

$$Ig = Iga \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H}\right) \quad (1)$$

Si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieur à 50 %, on multiplie l'ETP calculée par le facteur correctif $\left(1 + \frac{50-Hr}{70}\right)$.

En pratique, le terme correctif ci-dessus n'intervient que dans le cas des climats désertiques ou subdésertiques.

2.4. Formule de Thornthwaite (1944) :

Cette formule est basée sur de nombreuses expériences effectuées sur des cases lysimétriques ne faisant intervenir que la température [2, 4, 6, 7, 17, 18] et par laquelle l'évapotranspiration potentielle est donnée par la relation suivante :

$$ETP = C \times t \times a \quad (2)$$

Avec :

ETP : Évapotranspiration mensuelle en millimètre pour un mois fictif de 30 jours et une durée théorique d'ensoleillement de 12 heures sur 24.

C et « a », constantes pour un lieu donné, sont fonctions de l'indice thermique annuel I , égal à la somme des 12 indices thermiques mensuels (i) donnés par $i = \left[\frac{t}{5}\right]^{1.514}$, le terme C variant en sens inverse de i et « a » étant donné par :

$$a = 6,75 \times 10^{-7} i^3 - 7,71 \times 10^{-5} i^2 + 1,70 \times 10^{-2} i + 0,492 \quad (3)$$

Par simplification de la formule de Thornthwaite, la valeur de « a » est donnée par l'expression de L. Serra⁶, $a = 0,016 \times I + 0,50$ de façon à ce que l'équation (1), peut s'écrire :

$$ETP = 16 \times \left(10 \frac{t}{I}\right)^a \quad (4)$$

2.5. Formule de Blaney-Criddle (1950) :

Établi par Blaney Harry et Criddle Wayne, ils pensaient que l'ETP dépendait de deux facteurs essentiels : la force évaporante F , fonction de la température et de la durée d'insolation, et de l'humidité relative de l'air ou le déficit de saturation. D'autre part, ont envisagés une régression linéaire entre l'ETP et la température ; puis ont remarqués, qu'elle ne dépendait pas seulement du potentielle énergétique F , dépensé pour actionner le déficit de saturation, mais aussi de la structure de la surface qui libère les molécules d'eau, appelé facteur de correction K , qui dépend directement du type de culture [2, 4, 6, 7, 17, 19].

La formule de l'ETP climatique s'écrit de la manière suivante :

$$ETP = aF + b \quad (5)$$

Avec :

F : Force évaporante en mm/mois. $F = P (0.46 t + 8.13)$.

⁴ Iga : Rayonnement solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère, c'est une donnée astronomique (ne dépend que de latitude du lieu considéré) indépendante du climat (cal/cm²/j).

⁵ Anders Knutsson Ångström est un physicien et météorologue suédois. On lui crédite l'invention du pyranomètre, le premier instrument à mesurer précisément la radiation solaire directe et indirecte

⁶ Serra L. Le contrôle hydrologique d'un bassin versant. In: Pluie, évaporation, filtration et écoulement. Compte rendu des troisièmes journées de l'hydraulique, Alger, 12-14 avril 1954. Tome 1, 1955. https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1955_act_3_1_3277

P : Durée d'éclairement en %.
 t : Température moyenne mensuelle en °C.
 a et b : Coefficients de correction (Tableau 1) en fonction de trois paramètres climatiques : l'humidité

relative, la vitesse du vent et l'insolation effective (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique de jour).

Tableau 1
 Valeurs des coefficients a et b de l'équation aF+b

Insolation effective	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)					
		Faible Inf. à 20 %		Moyenne 20 % - 50 %		Élevée Sup. à 50 %	
		a	b	a	b	a	b
Élevée 0,70-0,90	Faible 0-2	1,59	-2,02	1,45	-2,18	1,16	-1,96
	Modérée 2-5	1,77	-1,84	1,59	-2,11	1,25	-1,88
	Élevée 5-8	2,00	-1,86	1,73	-2,04	1,36	-2,00
Modérée 0,45-0,70	Faible 0-2	1,45	-2,00	1,30	-2,07	1,05	-1,84
	Modérée 2-5	1,66	-1,98	1,45	-2,00	1,14	-1,84
	Élevée 5-8	2,05	-2,23	1,57	-1,98	1,21	-1,80
Faible 0-0,45	Faible 0-2	1,25	-1,79	1,13	-1,71	0,89	-1,70
	Modérée 2-5	1,45	-1,91	1,23	-1,75	0,96	-1,66
	Élevée 5-8	1,61	-1,88	1,36	-1,82	1,02	-1,59

2.6. Formule de Penman

La formule mise au point par le physicien anglais Howard Penman en 1948 découle directement du bilan d'énergie. Son intérêt est donc primordial quant à la compréhension du phénomène physique, de plus, elle donne les meilleures estimations de l'ETP, et ceci sous tous les climats, son seul inconvénient est de nécessiter un nombre assez important d'informations climatiques.

L'équation simplifiée du bilan d'énergie, appliquée à une surface évaporante de caractéristiques déterminées, et non limitée en eau, s'écrit de la manière suivante [4, 5, 7, 8, 20].

$$ETP = \frac{\Delta/\gamma}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \times \left[\frac{I_{ga}}{59} (1 - a) \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08e(0,10 + 0,90hH)) + 0,261 + \Delta\gamma E - e(1 + 0,54u) \right] \quad (6)$$

Avec :

H : Durée astronomique du jour (heures) à partir des abaques.

u : Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s).

E : Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air (millibars).

T : Température moyenne mensuelle (°K).

e : Tension moyenne est estimé à partir de l'humidité relative Hr en %, et de la température t en degré Celsius par la relation suivante : $e = 0,061 * Hr 10^{\left(7,5 \frac{t}{238+t}\right)}$

t : Température moyenne mensuelle (°C).

C'est l'évaporation qui se produirait si la température de surface était égale à la température de l'air.

Le calcul de l'ETP par la formule de Penman exige l'estimation préalable du rayonnement net Iga souvent estimée à partir de l'équation modifiée d'Angstrom et du pouvoir évaporant de l'air (Equation 1) ainsi que celle des coefficients Δ et γ.

2.7. Formule de Penman – FAO

La formule de Penman a été modifiée par de nombreux auteurs de façon à en simplifier l'écriture ou en adapter les paramètres à des régions particulières. Parmi ces formules modifiées on utilise fréquemment la formule dite de Penman-FAO recommandée pour les régions sèches et arides. Cette formule a la forme suivante [2, 10, 21-24] :

$$ETP = \left[\frac{I_{ga}}{59} (1 - a) \left(0,25 + 0,45 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08e(0,10 + 0,90hH)) \right] \Delta\gamma + \Delta\gamma + 0,261 + \Delta\gamma E - e(1 + 0,864u) \quad (7)$$

On y retrouve les mêmes variables de la formule de Penman seuls quelques paramètres changent, à savoir :

(1 + 0,864 u) au lieu de (1 + 0,54 u) et (0,25 + 0,45 $\frac{h}{H}$) au lieu de (0,18 + 0,62 $\frac{h}{H}$)

Δ : Pente de la courbe de tension de vapeur donnée par :

$$\Delta = \frac{4099 e_a}{(T-237,2)^2} = \frac{2504 \exp(17,27T)}{(T+237,3)^2} \quad (8)$$

Avec T la température de l'air (°C) et e_a (millibar. °C⁻¹) la tension de vapeur saturante à la température T.

2.8. 2.8. Formule dite ANRH

Il arrive souvent que les données climatiques ne soient pas disponibles pour permettre le calcul de l'ETP. Dans ce

Tableau 2

Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH [7, 24] ,

Mois	1	2	3	4	5	6
ai	-0,0218	-0,0110	-0,0012	0,0098	0,0201	0,0248
bi	315	307	371	389	429	429
Km	0,96	1,22	1,11	1,17	1,02	1,00
Mois	7	8	9	10	11	12
ai	0,0230	0,0144	0,0031	-0,0081	-0,0185	-0,0246
bi	436	414	370	351	311	308
Km	0,97	0,97	0,98	0,90	0,90	0,86

3. Résultats et discussion

Les résultats de l'application des formules de l'estimation de l'ETP sus citées, à savoir : Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et la formule de l'ANRH, en utilisant les données climatiques de la station de Bechar sur une période de trente-deux (32) ans (1978 - 2010), sont consignées dans les tableaux correspondants 3 à 8, et les figures 2, 3 et 4.

3.1. Formule de Thornthwaite :

Les résultats de calcul de l'ETP mensuelle par la formule de Thornthwaite sont représentés dans le tableau 3 ; Elle présente de faibles variations mensuelles interannuelles allant de Novembre à Mars. Plus la température augmente, plus les précipitations se raréfient dans la région, dès que le Sirocco souffle, et

cas, on peut utiliser la formule ETP de l'ANRH, qui permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante, pour une position géographique quelconque, par la formule suivante [5, 7, 24]:

$$ETP_{ANRH} = Kr \times Km (H - 187) (0,032 t + 0,077) \quad (9)$$

Avec :

Km : Coefficient mensuel (Tableau 2).

Kr : Coefficient régional Kr = 1,25.

H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) exprimée selon la formule suivante : $H_i = a_i Y + b_i$ avec Y l'ordonnée de Lambert de la zone (Km) ; a_i et b_i des coefficients estimés selon les mois selon le tableau suivant (Tableau 2).

plus la fluctuation mensuelle interannuelle dévient importante et atteint 164,83 mm en Juin, mois caractérisé par des vents forts et secs et une insolation importante. Le cumul annuel est de 1050,02 mm (Tableau 3 et figure 2) et le pic mensuel est obtenu en Août correspond à 206,17 mm.

Tableau 3
Valeurs de l'ETP mensuelle selon Thornthwaite
à la station de Béchar, (1978-2010).

Mois	I	a	ETPmm
Jan	2,79	2,41	9,95
Fév.	4,28	2,41	19,73
Mar	6,45	2,41	37,94
Avr.	8,91	2,41	63,59
Mai	11,28	2,41	92,63
Juin	16,18	2,41	164,83
Juil.	18,32	2,41	201,01
Août	18,62	2,41	206,17
Sep	14,48	2,41	137,98
Oct.	9,74	2,41	73,27
Nov.	5,76	2,41	31,68
Déc.	3,00	2,41	11,19
Somme	119,85		1050,02

3.2. Formule de Turc

Le modèle de Turc donne l'ETP à l'échelle annuelle une valeur de 2012,60 mm, et on observe des valeurs plus élevées pendant la période d'été avec un maximum de 288,02 mm/mois en Juillet, où les températures sont élevées, les vents modérés, l'humidité relative est faible, pour la période de Novembre jusqu'à Février l'ETP est la plus faible avec un minimum de 58,611 mm/mois en Décembre (Tableau 4 et figure 3).

Tableau 4
Valeurs de l'ETP mensuelle selon TURC à la station de Bechar
(1978-2010)

Mois	Ig	ETPmm	C	ETPc mm
Jan	331,25	60,45	1,02	61,71
Fév.	378,15	73,76	1,14	84,40
Mar	510,40	119,51	1,27	152,02
Avr.	580,37	144,00	1,33	191,52
Mai	634,77	170,62	1,37	233,92
Juin	666,90	189,30	1,43	270,51
Juil.	649,26	194,32	1,48	288,02
Août	588,41	177,98	1,46	259,60
Sep	500,39	141,84	1,33	189,03
Oct.	442,66	118,21	1,18	139,32
Nov.	352,64	80,80	1,04	83,92
Déc.	309,09	58,61	1	58,61
Somme		1529,43		2012,61

3.3. Formule de Blaney-Criddle

La méthode de Blaney-Criddle, montre des variations mensuelles interannuelles moyennes. Elles sont surtout minimales de Décembre à Février et atteignent leur maximum en Juin, mois le plus ensoleillé et le plus venté dans la région. L'effet saisonnier est très marqué (Tableau 5 et figure 3).

Tableau 5
Valeurs de l'ETP mensuelle selon Blaney-Criddle à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	P	F	A	b	ETP clim mm	Kc	ETP cult mm
Jan	7,23	91,54	1,59	-2,11	143,44	1,10	157,78
Fév.	6,98	98,71	1,59	-2,11	154,84	1,10	170,33
Mar	8,373	134,05	1,59	-2,11	211,03	1,10	232,13
Avr.	8,73	156,15	1,73	-2,04	268,10	1,10	294,91
Mai	9,59	187,28	1,73	-2,04	321,96	1,10	354,15
Juin	9,56	216,03	2	-1,86	430,20	1,10	473,21
Juil.	9,73	231,91	1,77	-1,84	408,64	1,10	449,50
Août	9,26	222,24	1,77	-1,84	391,53	1,10	430,68
Sep	8,34	179,90	1,59	-2,11	283,94	1,10	312,33
Oct.	7,94	146,70	1,59	-2,11	231,14	1,10	254,25
Nov.	7,13	110,12	1,59	-2,11	172,97	1,10	190,27
Déc.	7,07	91,11	1,25	-1,88	112,00	1,10	123,20
Somme					3129,77		3442,75

3.3. Formule de Penman

Le modèle, comme il a été noté auparavant, prend en considération le plus grand nombre de variables climatiques qui gouvernent l'évapotranspiration. Les résultats de son application sont consignés dans le tableau 6. L'évapotranspiration augmente en été avec un pic en Juin qui correspond à 188,46 mm (Tableau 6 et figure 3).

Tableau 6
Valeurs de l'ETP mensuelle selon Penman à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	T °c	T °Kelvin	Hr %	Iga	h	H	E	Δ	u	E	ETP mm/jour	ETP mm/mois
Jan	9,85	283	48,54	488,27	8,2	10,2	5,88	0,81	1,33	12,13	0,81	25,24
Fév.	13,07	286,22	39,9	606,34	7,8	10,9	5,98	0,98	1,55	15,00	1,36	38,19
Mar	17,13	290,28	30,96	751,53	9,5	11,8	6,02	1,23	1,96	19,47	3,20	99,35
Avr.	21,21	294,36	26,9	873,56	10	12,8	6,74	1,54	2,36	25,09	4,44	133,44
Mai	24,78	297,93	24,03	949,18	10,8	13,6	7,47	1,85	2,49	31,12	5,45	169,09
Juin	31,45	304,6	19,97	973,78	11,4	14	9,14	2,61	2,27	45,83	6,28	188,46
Juil.	34,14	307,29	16,25	955,41	11,2	11,2	8,65	2,99	2,06	53,29	5,98	185,39
Août	34,5	307,65	17,9	886,45	10,3	10,3	9,72	3,04	1,99	54,37	5,23	162,24
Sep	29,22	302,37	26,71	777,32	9,2	9,2	10,76	2,34	1,85	40,35	3,77	113,24
Oct.	22,49	295,64	37,5	641,29	9,3	9,3	10,16	1,64	1,53	27,12	2,67	82,97
Nov.	15,9	289,05	47,3	509,09	8,6	8,6	8,50	1,14	1,40	18,01	1,29	38,94
Déc.	10,34	283,49	53,8	449	8,2	8,2	6,73	0,83	1,26	12,53	0,59	18,34
Somme											1254,93	

3.4. Formule de Penman FAO

Le modèle, comme il a été noté auparavant, prend en considération le plus grand nombre de variables climatiques qui gouvernent l'évapotranspiration, elle augmente en été avec un pic en Juin qui correspond à 205,51 mm (Tableau 7 et figure 3).

Tableau.7
Valeurs de l'ETP mensuelle selon PENMAN FAO à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	T °C	T °Kelvin	Hr %	Iga	h	H	E	Δ	u	E	ETP mm/jour	ETP mm
Jan	9,85	283	48,54	488,27	8,2	10,2	5,88	0,81	1,33	12,13	0,85	26,57
Fév.	13,07	286,22	39,9	606,34	7,8	10,9	5,98	0,97	1,54	15,00	1,54	43,32
Mar	17,13	290,28	30,96	751,53	9,5	11,8	6,02	1,22	1,95	19,47	3,47	107,61
Avr.	21,21	294,36	26,9	873,56	10	12,8	6,74	1,53	2,35	25,09	4,93	147,92
Mai	24,78	297,93	24,03	949,18	10,8	13,6	7,47	1,85	2,49	31,12	6,03	187,21
Juin	31,45	304,6	19,97	973,78	11,4	14	9,14	2,61	2,27	45,83	6,85	205,51
Juil.	34,14	307,29	16,25	955,41	11,2	11,2	8,65	2,99	2,06	53,29	6,54	202,94
Août	34,5	307,65	17,9	886,45	10,3	10,3	9,72	3,04	1,99	54,37	5,83	180,87
Sep	29,22	302,37	26,71	777,32	9,2	9,2	10,76	2,33	1,84	40,35	4,23	126,92
Oct.	22,49	295,64	37,5	641,29	9,3	9,3	10,16	1,64	1,53	27,12	2,81	87,24
Nov.	15,9	289,05	47,3	509,09	8,6	8,6	8,50	1,14	1,40	18,00	1,36	40,87
Déc.	10,34	283,49	53,8	449	8,2	8,2	6,73	0,83	1,25	12,53	0,60	18,64
Somme											1375,67	

3.5. Formule d'ANRH

Elle présente des variations mensuelles interannuelles plus ou moins importantes pour les douze mois de l'année avec un maximum de 356,86 mm en Juillet et un minimum de 54,21 mm en Décembre. Le

cumul annuel est de 2318,97 mm (Tableau 8 et figure 3).

Tableau.8
Valeurs de l'ETP mensuelle selon ANRH à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	Ai	Bi	H	Km	ETPmm
Jan	-0,0218	315	312,47	0,96	59,05
Fév.	-0,11	307	294,24	1,22	80,99
Mar	-0,0012	371	370,86	1,11	159,48
Avr.	0,0098	389	390,13	1,17	224,51
Mai	0,0201	429	431,33	1,02	271,01
Juin	0,0248	429	431,87	1	331,62
Juil.	0,023	436	438,66	0,97	356,86
Août	0,0144	414	415,67	0,97	327,44
Sep	0,0031	370	370,36	0,98	227,31
Oct.	-0,0081	351	350,06	0,9	146,14
Nov.	-0,0185	311	308,85	0,9	80,30
Déc.	-0,0246	308	305,14	0,9	54,21
			Somme		2318,97

3.6. Analyse et comparaison des résultats à l'ETP moyenne

Après avoir calculé les évapotranspirations par les différentes méthodes (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman FAO et ANRH), à la station de Béchar (séries 1978-2010), nous avons calculées les écarts relatifs (ER), par rapport aux valeurs moyennes, et réaliser les différentes corrélations, et consigner les résultats dans des tableaux et sur des graphes, pour dégager les éventuelles convergences et/ou divergences sur les modèles testés, on remarque que :

- Les valeurs de l'ETP des VMMI varient entre 11,20 mm (Thornthwaite) et 473,21 mm (Blaney-Criddle), pour tous les modèles, alors que pour les SVMMI, elles varient entre 1050,02 mm (Thornthwaite) et 3442,75 mm (Blaney-Criddle).
- La figure 3 montre la variation mensuelle de l'ETP des VMMI, qui présente la même allure, avec de faibles valeurs en Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars, et des valeurs élevées en Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre. On note aussi que la courbe la plus élevée est celle du model de Penman et la plus basse est celle du model de Blaney-Criddle.
- Sur la Figure 4, qui présente l'évapotranspiration des SVMMI (mm/an) obtenues par les différentes méthodes, ou les méthodes de Penman, Penman-FAO et Thornthwaite présente des valeurs nettement inférieures à la moyenne, alors que celle de celle de Blaney-Criddle

et L'ANRH sont supérieur à la moyenne (1909,16mm). Celle obtenu par le model de Turc est la plus proche de la moyenne avec 2012,61mm.

- Les différentes corrélations de la figure 5, réalisées entre les douze valeurs (ETP) moyennes mensuelles interannuelles (VMMI) de chaque modèle avec la (Moy mes) moyenne mensuelle de tous les modèles, permettent de constater que toutes les valeurs du coefficient de détermination dépassent 0,96, sauf pour la méthode de Thornthwaite (0,8804). La formule de l'ANRH montre une excellente corrélation, avec $R^2 = 0.9964$.

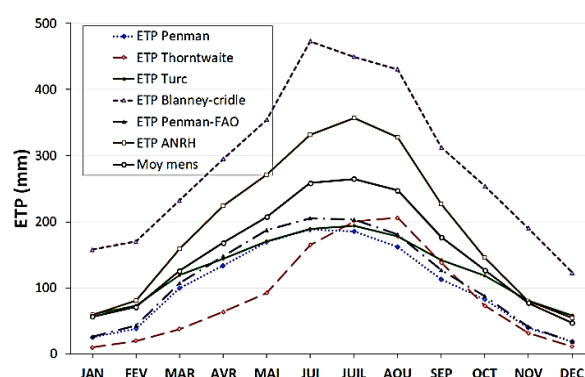


Figure 3. Variation de l'ETP mensuelle interannuelle (VMMI) estimée par les différentes méthodes a la station de Béchar (séries 1978-2010)

La méthode de l'écart relatif (ER en %) consiste à calculer le pourcentage d'écart entre l'ETP_i estimée par les différents modèles et leur moyenne ETP_{moy}, par la formule suivante [2] :

$$ER(\text{Ecart relatif}) = \frac{(ETP_{\text{moy}} - ETP_i)}{ETP_{\text{moy}}} \times 100 \% \quad (11)$$

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, à l'échelle mensuelle (VMMI) ont été comparés à l'ETP (Moyenne), en se basant sur les valeurs de l'écart relatif « ER » (Figure 6 et Tableau 9). Il est à noter que plus les valeurs de « ER » sont faibles, plus la méthode d'estimation de l'ETP donne une estimation satisfaisante [2].

La figure 6 (Tableau 9) représente les ER des différentes méthodes d'estimation de l'ETP des SVMMI, ou les valeurs de la formule de Blaney-Criddle sont les plus loin avec -88,33 % et celle de Turc sont

les plus proche de la moyenne avec -5,42 %. Pour les VMMI, à l'échelle mensuelle, la formule de Turc donne des ER faibles pour les six mois de Février (-3,81 %), Mars (5,15 %), Septembre (19,69 %), Octobre (6,93 %), Novembre (-4,74 %) et Décembre (-23,73 %). Alors que la formule de Penman-FAO présente des ER les plus faibles pour les quatre mois d'Avril (11,98 %), Mai (9,76 %), Juin (20,60 %) et Juillet (23,42 %). Ceux qui reste sont le mois de janvier avec -4,50 % du model de l'ANRH et le mois de Août avec ER=16,72 % du model de Thornthwaite.

Enfin, on peut dire que bien que la méthode de l'ANRH présente un coefficient de détermination excellent (0,9964), à l'échelle mensuelle, ses valeurs d'ER restent relativement élevées par rapport aux autres, ce qui ne lui permet pas d'être sélectionnée pour la détermination de l'ETP dans cette région. Par contre la formule de Turc avec six mois sur douze de valeurs d'ER faibles, reste la plus favorisé à cette fonction, à l'échelle mensuelle (VMMI). A l'échelle annuelle (SVMMI) le modèle de Turc paraît être le plus représentatif avec un ER de -5,42 %.

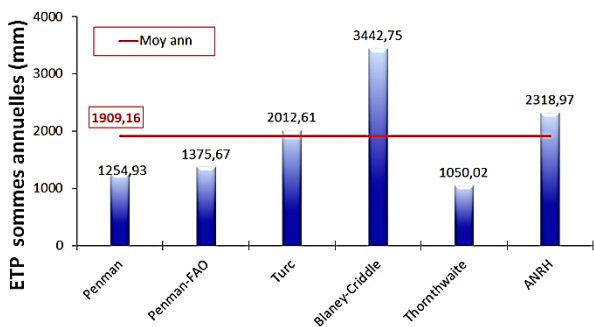


Figure 4. Évapotranspiration annuelle (SVMMI) (mm/an) obtenues par les différentes méthodes a la station de Béchar (séries 1978-2010).

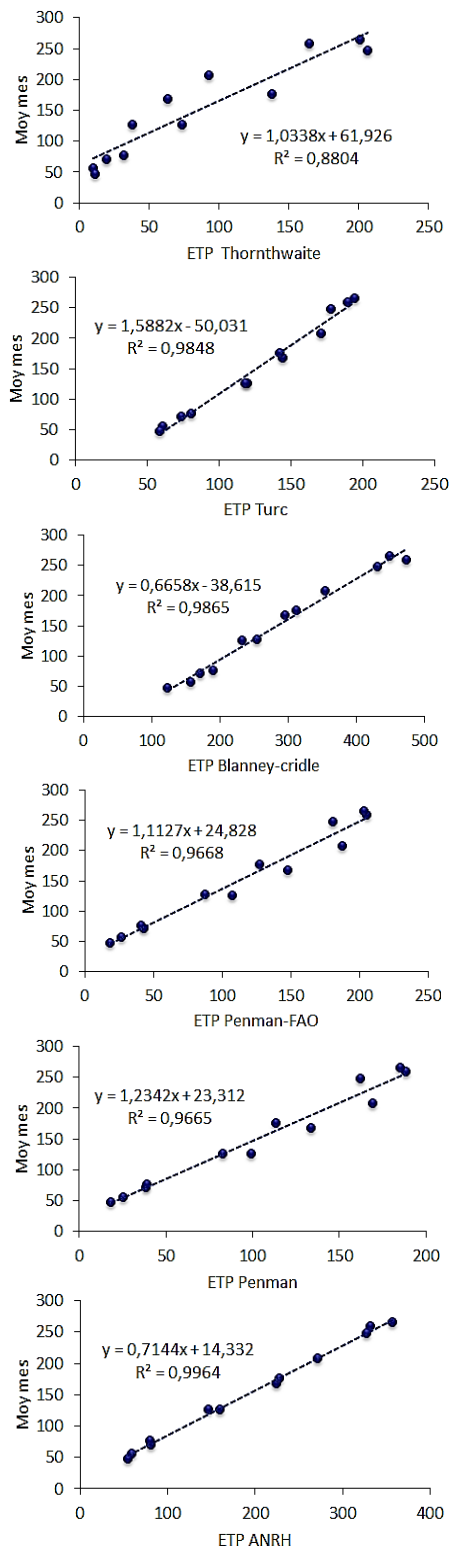


Figure 5. Graphes des corrélations de l'ETP mensuelle des différentes méthodes par rapport à celle de référence (la moyenne). Station de Bechar (1978-2010).

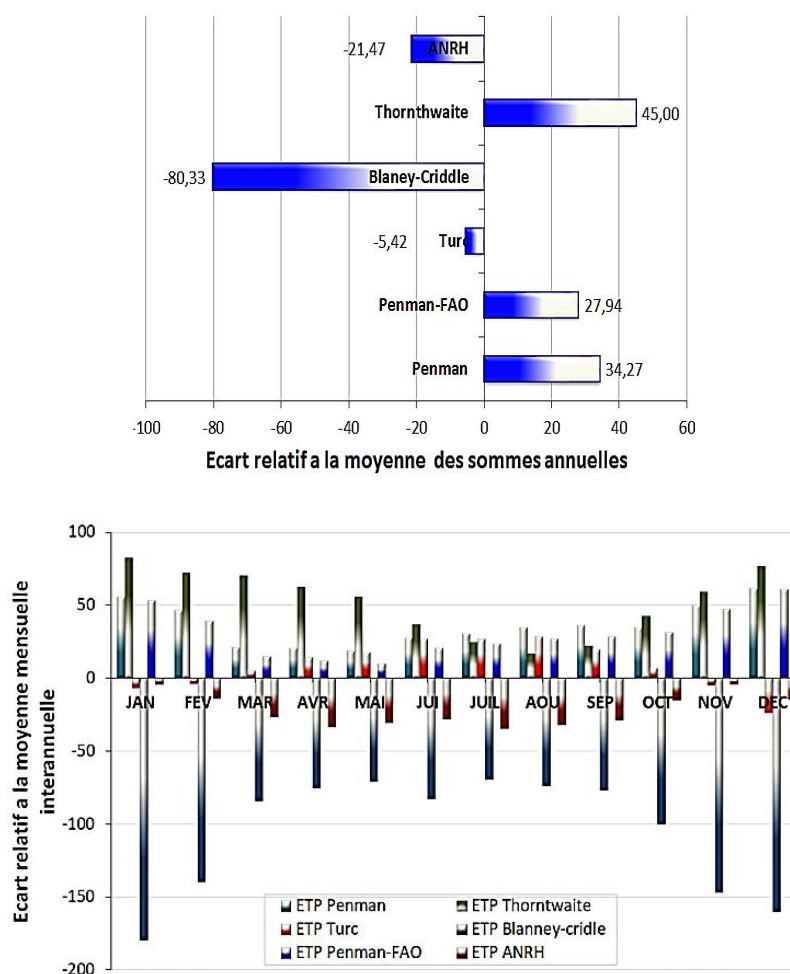


Figure 6. Écart relatif (ER en %) des différentes méthodes d'estimation de l'ETP (VMMI), et des SVMMI, par rapport à celle de référence (Moyenne), station de Béchar (1978-2010).

Tableau 9

Coefficient de détermination (R^2) et l'écart relatif à la moyenne (ER) (Échelle annuelle) (SVMMI) des différentes méthodes, station de Béchar (1978-2010).

Formule	ETP (SVMMI) (mm)	R^2 (VMMI)	ER / (SVMMI) %
ETP Thornthwaite	1050,02	0,8804	45,00
ETP Turc	2012,61	0,9848	-5,42
ETP Blaney-Criddle	3442,75	0,9865	-80,33
ETP Penman-FAO	1375,67	0,9668	27,94
ETP Penman	1254,93	0,9665	34,27
ETP ANRH	2318,97	0,9964	-21,47

4. Conclusion

L'application de plusieurs formules de calcul de l'ETP (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et ANRH), sur les données climatiques de la station de Bechar, qui subit un climat aride, pour la série de 1978 à 2010 (32 ans), et on les comparant, par un calcul de l'écart relatif à leurs moyenne, prise comme référence, donne une vision plus mathématique, du rapprochement des formules à celle de référence. Cette démarche permet d'observer que la formule la plus appropriée à l'estimation de l'ETP dans la région de Bechar est celle de Turc, pour l'échelle annuelle (SVMMI), avec un écart relatif (ER) de -5,42. Pour l'échelle mensuelle, le choix se porte sur celle de Turc,

avec six mois sur l'année (Septembre, Octobre, Novembre, Décembre, février et Mars), qui présentent des écarts relatifs faibles (entre 2 et 7 %).

Sachant que les résultats obtenus sur une seule station ont un impact géographique limité, et dans le souci d'élargir l'application à un espace plus vaste, notre perspective de ce travail est d'appliquer cette approche sur d'autres stations situées dans le même type de climats.

The authors declare no conflict of interest.

Références

- [1] Ndiaye P. M., Bodian A., Diop L. and Djaman K. (2017) Évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso. *Physio-Géo*, 11: 129-146. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5369>
- [2] Bouteldjaoui F., Bessenasse M. and Guendouz A. (2012) Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *Nature & Technology Journal*, 4 (2): 109-116. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/41680> [consulté le 12/02/2023]
- [3] Damagnez J., Riou C., and De Villele O. (1963) Problème d'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Annales agronomiques (Paris. 1931)*, 14 (4) : 543-558.
- [4] Paré S., "Contribution à la détermination d'un terme du bilan hydrologique dans la région d'Errachidia-Tafilelet: Evaluation de l'évapotranspiration de référence et de l'évaporation à travers la zone non saturée de la plaine de Tafilelet". PhD thesis [French], Faculté des Sciences, Université Mohammed V - Agdal, Rabat, Maroc, 2009. <http://www.secheresse.info/spip.php?article8105> [consulté le 10/02/2023]
- [5] Ladlani I., "Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle" ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba", magister thesis [French], Université de Batna 2, 2007. <http://eprints.univ-batna2.dz/806/>
- [6] Lecarpentier C. (1975) L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques (suite). *Annales de géographie*, 464 pp. 385-414. https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1975_num_84_464_18972 [consulté le 18/02/2023]
- [7] Boudjerada I., "Estimation et cartographie de l'évapotranspiration potentielle," *Master en Hydraulique Master en Hydraulique* (ENSH) Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Algérie, 2015.
- [8] Belkhir F. E. (2021) Evaluation de la performance de dix-huit modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence dans les conditions subhumides de la Mitidja. *Recherche Agronomique*, 19 (1): 5-32. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/148748> [consulté le 12/03/2023]
- [9] Tetbirt Z. and Chemani A., "Les méthodes de l'estimation de l'évapotranspiration dans la région du Haut et Moyen Cheliff" Master Master [French], Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, Algérie, 2017. <http://www.secheresse.info/spip.php?article79827> [consulté le 05/12/2022]
- [10] Saad Allah S., "Estimation de l'évapotranspiration potentielle par différents méthodes. Application à un site à climat saharien (Touggourt-w-Ouargla)". Master Thesis [French], Université Kasdi Merbah- Ouargla, Algérie, 2017. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/18201> [consulté le 12/02/2023]
- [11] Samutrak P. and Kangvaravoot C. (2017) Application to Calculate Potential Evapotranspiration. *International Journal of Applied Computer Technology and Information Systems*, 7 (1): 35-40. <http://203.158.98.12/actisjournal/index.php/IJACTIS/article/view/202/114> [consulté le 19/10/2023]
- [12] Carvalho L. G. d., Rios G. F. A., Miranda W. L. and Neto P. C. (2011) Reference Evapotranspiration: Current Analysis Of Different Estimating Methods. *Pesquisa Agropecuária Tropical [Agricultural Research in the Tropics]*, 41 (3): 456-465. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.12760>
- [13] Benaradj A., Boucherit H., Bouderbala A. and Hasnaoui O. "Biophysical Effects of Evapotranspiration on Steppe Areas: A Case Study in Naâma Region (Algeria)". In *Climate Change in Asia and Africa*, P. T. John, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2021, p. Ch. 1. DOI: 10.5772/intechopen.97614
- [14] Laaboudi A., Mouhouche B. and Slama A. (2015) Modeling of daily reference evapotranspiration using climatic factors for arid regions of Algeria. *Sky Journal of Agricultural Research*, 4 (6): 114-122.
- [15] Ababou A., Chouieb M., Saidi D., Bouthiba A. and Mederbal K. (2016). Remote Sensing of Evapotranspiration in a Southern Mediterranean Forest. Application to Bissa Forest, Algeria. *The International Journal of Biotechnology*, 5 (3): 35-44. DOI: 10.18488/journal.57/2016.5.3/57.3.35.44
- [16] Kabour A., Hani A., Mekkaoui A. and Chebbah L. (2011) Evaluation et gestion des ressources hydriques dans une zone aride. Cas de la ville de Béchar. *LARHYSS Journa*, 8 (2): 07-19 <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/54856> [consulté le 06/02/2023]
- [17] Ben Mansour S. and Korichi R., "Etude de l'évapotranspiration réelle liée à l'évapotranspiration potentielle et à la production agricole phœnicicole à l'échelle de l'écosystème de l'ITAS. Mise au point d'un modèle basé sur la consommation de l'eau et la production agricole" Master thesis [French], Université Kasdi Merbeh, Ouargla, Algérie, 2013.

-
- <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/2132> [consulté le 30/01/2023]
- [18] Réméniéras G., *L'hydrologie de l'ingénieur*. Paris [French] : Eyrolles, 1980, 450p
- [19] Blaney H. F., "Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data" (1952).
<https://ia800300.us.archive.org/4/items/determiningwater96blan/determiningwater96blan.pdf> [consulté le 27/01/2023]
- [20] Riou C., "La détermination pratique de l'évaporation. Application a l'Afrique Centrale," (1975).
<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:07889> [consulté le 04/03/2023]
- [21] Doorenbos J. and Pruitt W., "Crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24," Rome., Italy, (1977).
<https://www.fao.org/3/S2022E/s2022e02.htm#TopOfPage> [consulté le 23/02/2023]
- [22] FAO, "*Rapport sur le projet relatif aux zones agro-écologiques: Méthodologie et résultats pour l'Afrique. Ressources en sols du Monde*". Roma: Food and Agriculture Organization, Rome., 1979. 9252005897,
- [23] Jensen M. E., Burman R. D. and Allen R. G., *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York: ASCE, American Society of Civil Engineers 1990.
<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784414057.fm> [consulté le 12/02/2023]
- [24] ANRH (2002), "*Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie*" [French]. Edit. Agence Nationale des Ressources Hydriques Algerie, 42p.



Empreinte anthropique sur la dynamique des écosystèmes de la forêt classée d'Amou-Mono au Togo

Aoufoh KOFFI N'DERE^{a,b,*}, Kokouvi Bruno KOKOU^{a,d}, Wouyo ATAKPAMA^{a,c}, Bimare KOMBATE^a, Hodabalo EGBELOU^a, Madjouma KANDA^{a,d}, Komlan BATAWILA^a

^aLaboratoire de Botanique et Écologie Végétale, Département botanique, Faculté des sciences, Université de Lomé, 01 BP 16515, Togo

^bInstitut Nationale de Formation Agricole (INFA) de Tové, Kpalimé, Togo

^cWest Africa Plant Red List Authority (WAPRLA), IUCN Species Survival Commission, Rue Mauverney 28, 1196 Gland, Switzerland

^dÉcole Régionale Postuniversitaire d'Aménagement et de Gestion Intégré des Forêts et Territoires tropicaux, Université de Kinshasa, Commune de Lemba, - B.P. 15.373 - Kinshasa, République Démocratique du Congo

Résumé

Les aires protégées du Togo connaissent un phénomène d'anthropisation inquiétante ces dernières années entraînant la régression des écosystèmes forestiers, leur biodiversité et leurs fonctions. Cette étude a analysé la dynamique spatio-temporelle de la forêt classée d'Amou-Mono entre 1986 et 2021. Une classification multi des images Landsat des années 1986, 2000, 2013 et 2021 a permis de quantifier et d'apprécier les changements d'occupations. La dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2021 est traduite essentiellement par une régression des Forêts denses/riveraines (81,40 %) et des Forêts claires/Savanes boisées (67,79 %) et la progression des savanes arborées/arbustives (172,93 %). En 2021, les formations anthropogènes Champs/jachères et Agglomérations/Sols nus, qui n'existaient pas en 1986, représentent respectivement 38,1 % et 2,19 % du total. La fragmentation et la régression des formations forestières sont dues à des activités anthropiques, notamment l'exploitation forestière et les défrichements agricoles. Ceci constitue une menace croissante pour la conservation de la biodiversité et les fonctions écosystémiques dans cette forêt classée si aucune mesure n'est prise pour inverser les tendances.

Mots-clés : Anthropisation ; Télédétection, Fragmentation ; Forêt classée d'Amou-Mono ; Togo.

Anthropogenic impact on ecosystem dynamics in the Amou-Mono classified forest in Togo

Abstract

In recent years, Togo's protected areas have been subject to a worrying process of anthropisation. This has led to a decline in forest ecosystems, their biodiversity and their functions. The general objective of this study is to assess the state of conservation of the classified forest of Amou-Mono between 1986 and 2021. More specifically, it aims to: (i) characterize the dynamics of land use from 1986, 2000, 2013 and 2021 and, (ii) assess the impact of changes in land use on the potential for carbon sequestration. A multi-date classification of Landsat images for the years 1986, 2000, 2013 and 2021 made it possible to quantify and assess changes in occupation. The dynamics of land use between 1986 and 2021 is mainly reflected by a regression of dense/riparian forests (81.40%) and open forests/wooded savannahs (67.79%) and the progression of wooded/shrubby Savannah (172.93%). Anthropogenic formations: Fields/fallow and Agglomerations/Bare soils, absent in 1986, occupy in 2021 respective proportions of 38.1 % and 2.19%. Human activities, particularly logging and agricultural clearing, are causing fragmentation and regression of forest ecosystems. Unless action is taken to reverse the trend, the conservation of biodiversity and ecosystem functions in this classified forest will be increasingly threatened.

Keywords: Land cover; Remote sensing; Fragmentation; Amou-Mono Classified Forest; Togo.

1. Introduction

Les écosystèmes forestiers jouent un rôle très important dans la conservation de la biodiversité. Ils fournissent de nombreux services tels que les services d'approvisionnement, services de régulation, etc. [1, 2].

Malgré cette importance capitale reconnue, ces écosystèmes ne cessent de se dégrader d'une manière alarmante en raison de la pression démographique. Afin de résoudre ce problème, la plupart des pays ont pris des décisions stratégiques et politiques afin d'instaurer des aires protégées.



Les aires protégées contribuent non seulement à la protection de la nature, mais constituent également une source de revenus pour de nombreux états [3]. Elles sont aussi source de produits alimentaires, médicinaux, artisanaux et esthétiques [4, 5]. Ce sont des atouts majeurs pour une meilleure résilience contre le changement climatique [2], à travers la conservation de la biodiversité, la séquestration du carbone, la régulation du climat, et par conséquent la résilience des populations humaines face aux effets du changement climatique.

Au Togo, on distingue environ 83 aires protégées (APs) intégrées dans le domaine forestier de l'État depuis l'époque coloniale, entre 1939 et 1958 [6]. Ces classements ont été faits par la confiscation et l'expropriation des terres. La gestion non participative et unilatérale ont créé des frustrations au sein des populations locales. Suite aux troubles socio-politiques de 1990, la plupart des APs ont été envahies par les populations déplacées et riveraines [7]. On note une occupation arbitraire entraînant la déforestation, la perte des habitats et la baisse de fourniture des services écosystémiques [8-11]. Parmi les APs les plus dégradées, on note la forêt classée d'Amou-Mono (FCAM).

La FCAM située dans la région des Plateaux du Togo n'est pas épargnée par le phénomène de la déforestation et de la dégradation. Ladite forêt classée a été envahie par les riverains. Ces pressions ont entraîné la dégradation du couvert végétal. Malgré les actions entreprises pour remédier à la dégradation à travers la réhabilitation et la restauration de son habitat, cette AP continue de subir de fortes pressions anthropiques [12]. Par ailleurs l'on ne dispose pas de données quantitatives sur l'impact de l'anthropisation sur les écosystèmes forestiers pouvant servir de base pour une meilleure planification des actions de restauration.

La présente étude est une contribution à la restauration des écosystèmes dégradés de la FCAM. De façon spécifique, il s'est agi d'analyser la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes et les changements d'affectation des sols à partir des images Landsat de 1986, 2000, 2013 et 2021

2. Méthodologie

2.1 Description du milieu d'étude

D'une superficie de 12 780,578 ha, la forêt classée d'Amou-Mono (FCAM) est située dans la région des Plateaux. Elle est à cheval entre la préfecture de l'Ogou au nord, de Haho à l'ouest et la préfecture de Moyen-Mono à l'est (Figure 1). La FCAM est située dans la zone écologique III, plus précisément entre le canton de Katore au nord, au nord-ouest par le canton de Gleï, au Sud-Ouest par le canton de Wahala et à l'est par le canton de Ahassomé.

Le climat est de type soudano-guinéen marqué par deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses. La moyenne des précipitations est de 1 028,9 mm avec une température moyenne de 27,6°C et une amplitude de 5°C. Le relief est une pénéplaine atteignant moins de 400 m d'altitude avec des pentes variant entre 3 et 8 %. Ce relief conditionne l'écoulement des cours d'eau dont le principal est le fleuve Mono situé à l'est et constituant une limite naturelle de la FCAM. Ces principaux affluents sont les rivières Amou, Tchila et Kra.

L'agriculture est la principale activité économique. Les principales cultures sont le maïs, le niébé, le soja, le coton, l'igname, le manioc. A cette activité s'ajoutent l'élevage, l'exploitation des produits de la forêt (bois de chauffe, charbon de bois, plusieurs produits forestiers non-ligneux), la chasse, la pêche.

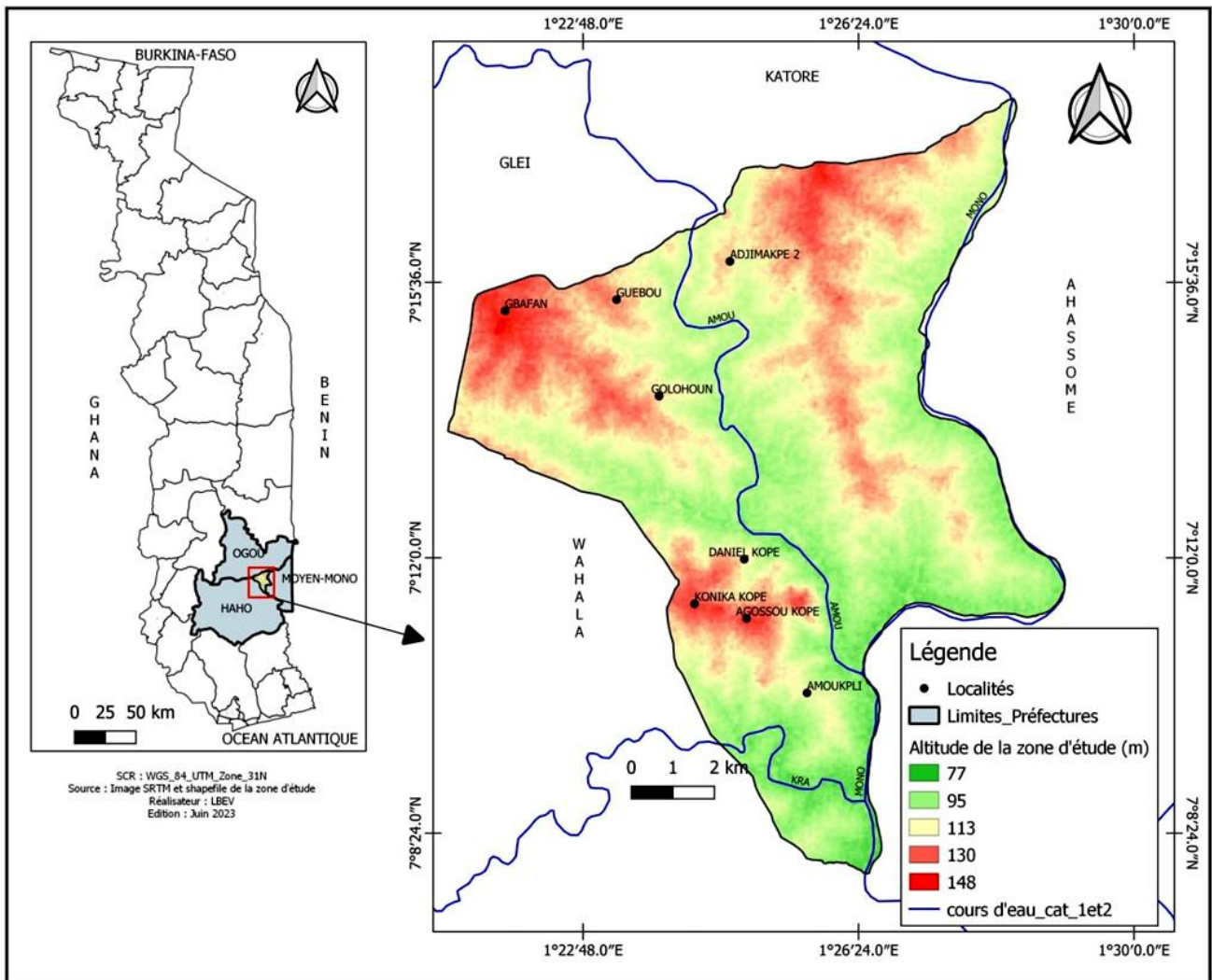


Figure 1 : Localisation de la forêt classée d'Amou-Mono, Togo

2.2. Collecte des données

La dynamique d'occupation du sol de la FCAM a été réalisée grâce aux images LandSat : Landsat 5 TM, LandSat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI/TIRS. Les images ont été téléchargées sur le site web de l'Institut d'études géologiques des États-Unis USGS¹. En raison de la disponibilité des données Landsat, le choix des images s'est porté sur les années 1986, 2000, 2013 et 2021 avec une résolution de 30 m × 30 m. Les dates de prise de ces images correspondent à la période de saison sèche afin de maximiser les différences spectrales entre les éléments de la couverture végétale.

Les images téléchargées ont d'abord subi une

classification non supervisée à l'aide du [logiciel ENVI 4.7](#)². Une composition colorée suivant la fonction K-means a été utilisée. Pour les images Landsat 5, les bandes 5-4-3 ont été utilisées et pour celles de Landsat 7 et 8, ce sont les bandes 6-5-4. Une fois cette pré-classification terminée, ces images cartographiques ont été vectorisées avec le logiciel ENVI 4.7 puis importées dans le logiciel QGIS 3.22 pour les mises en page. Ceci a permis d'obtenir une carte non supervisée pour la collecte de données de vérité-terrain.

2.3. Traitement des données

❖ Classification non-supervisée

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

² <https://envi.software.informer.com/4.7/>

Les images téléchargées ont d'abord subi une classification non supervisée à l'aide du logiciel ENVI 4.7. Une composition colorée suivant la fonction K-means a été utilisée [13]. Pour les images Landsat 5, les bandes 5-4-3 ont été utilisées et pour celles de Landsat 7 et 8, ce sont les bandes 6-5-4. Une fois cette pré-classification terminée, ces images cartographiques ont été vectorisées avec le logiciel ENVI 4.7 puis importées dans le logiciel [QGIS 3.22](https://www.qgis.org/fr/site/forusers/download.html)³ pour les mises en page. Ceci a permis d'obtenir une carte non supervisée pour la collecte de données de vérité-terrain.

❖ Classification supervisée

Une classification supervisée des images a été préconisée après la mission de terrain. Cette classification s'est réalisée avec le logiciel ENVI 4.7 à partir 132 points de vérité-terrain. La méthode de classification supervisée selon l'algorithme du maximum de vraisemblance a été utilisée [14]. La première étape a consisté à définir des zones d'entraînement ROI (Regions of interest), suivie de la description des différentes classes à partir des points vérités-terrain et des images Google Earth. À partir des zones d'entraînement définies, le logiciel a généraliser le traitement sur l'ensemble de la superficie de l'AP. Cinq (5) classes d'occupations ont été définies en tenant compte du système de typologie des unités d'occupation du sol du Togo [15]. Il s'agit de : Forêts denses/riveraines, Forêts claires/Savanes boisées, Savanes arborées/arbustives, Champs/Jachères et Agglomérations/Sols nus.

La composition colorée a permis de mieux discriminer ces différentes occupations. La composition colorée RGB a été faite selon une combinaison des bandes spectrales reposant sur le principe d'affectation des bandes d'images à trois (3) plans d'affichage basé sur trois (3) couleurs primaires : rouge, vert et bleu [16]. La bande 6 correspond à la couleur rouge, la bande 5 à la couleur verte et la bande 4 à la couleur bleue. Pour les images Landsat 5, les bandes 5-4-3 et pour les images Landsat 7 et 8 les 6-5-4 ont été utilisées [16].

Dans le but d'améliorer la netteté des images Landsat traitées, trois (3) opérations de filtrages ont été appliquées : « Sieves classes » pour éliminer les pixels isolés, « Clump classes » pour homogénéiser les classes

et « Majority/minority analysis » pour lisser les classes. Suite à ces opérations, les images rasters ont été vectorisées [17]. Les images vectorisées ont été exportées dans le logiciel QGIS 3.22 pour les mises en pages des cartes. Les tables des attributs des images classifiées ont été exportées sous format « CSV » afin de calculer les superficies des différentes unités d'occupations du sol.

❖ Précision de la classification

Sur le total de 132 points retenu pour valider la classification, on distingue 5, 11, 31, 20 et 65 respectivement pour les Agglomérations/Sol nus, Forêts denses / riveraines, Champs / Jachères, Forêts claires/Savanes boisées et Savanes arborées/arbustives. La vérification de la qualité des classifications s'est faite par calcul des matrices de confusions des images des différentes dates [17].

2.3.2 Analyses des changements d'état de la végétation

❖ Matrice de transition

Les matrices de transition ont permis de mettre en évidence les différentes formes de conversion qu'ont subies les formations végétales de 1986 à 2021. La fonction "Intersect" du logiciel QGIS a été utilisée pour calculer les superficies de ces différentes classes de végétation en croisant des cartes de végétation des différentes dates. Une formule simplifiée des processus REDD+ a été utilisée pour calculer le rythme de conversion (RC) des formes d'utilisation des terres d'une année à l'autre : $RC = (T2 - T1)/n$, où RC = donnée d'activités (ha/an) T2 = la superficie d'une unité d'occupation au temps T2, T1 = superficie d'une unité d'occupation au temps T1, et n = nombre d'années entre T2 et T1. La variation de la superficie d'une forme d'utilisations de la terre entre deux (2) dates (années) données par $\Delta U = T2 - T1$ permet d'apprécier le sens d'évolution entre les deux dates [14]. Il y a stabilité si $\Delta U = 0$. Si $\Delta U < 0$, on peut conclure qu'il y a diminution de cette unité. Elle s'attend si $\Delta U > 0$.

❖ Taux de déforestation

La formule pour déterminer le taux de déforestation

³ <https://www.qgis.org/fr/site/forusers/download.html>

annuel (R) est la suivante (équation 1) :

$$R = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \times 100 \right] \quad (1)$$

$t_2 - t_1$ représente l'intervalle de temps dans lequel les changements de l'occupation des terres sont évalués. A_1 et A_2 représentent la somme de la proportion des formations (forêts galeries, forêts denses, savanes arbustives, arborées et boisées) de chaque année [19].

La formule suivante (équation 2) a été utilisée pour calculer le taux d'évolution (Ta) d'une unité d'occupation donnée entre deux (2) années X et Y :

$$Ta = \frac{SY - SX}{SX} \times 100/I \quad (2)$$

où SX = superficie d'une unité de végétation en année X, SY = superficie de la même unité de végétation en année Y, et I = nombre d'années entre les années X et Y [14].

Le taux de reconstitution des formations naturelles (Trec) entre différentes dates a été calculé en utilisant les données des matrices de confusion. La formule qui suit (Equation 3) a été employée [20] :

$$Trec = \frac{Rn}{S1} \times 100 \quad (3)$$

Rn est somme des superficies des terres non forestières converties en de terres forestières. S1 est la superficie des formations naturelles de l'année 1.

❖ Processus de transformation spatiale

La détermination des processus de transformation spatiale constitue une approche complémentaire à l'étude de la dynamique paysagère. Ces processus sont déterminés sur la base des trois principaux paramètres considérés comme éléments pour la description de la configuration paysagère que sont : (i) la superficie des taches, (ii) le périmètre des taches et (iii) le nombre de taches. Ces paramètres ont été déterminés pour les unités d'occupation et pour les années d'étude.

Bogaert *et al.* (2014) ont distingué 10 processus de transformation spatiale. Il s'agit de l'agrégation, fusion de nouvelles taches (a) ; la suppression, disparition de taches (b) ; la création, formation de nouvelles taches (c) ; la déformation, changement de forme des taches (d) ; la dissection, subdivision d'un secteur continu par

des lignes de largeur uniforme et de petites dimensions(e) ; l'agrandissement, transformation par l'augmentation de taille des taches(f) ; la fragmentation, conversion de paysage par la rupture de la continuité en cinq taches disjointes de tailles et de formes inégales (g) ; la perforation, transformation par la formation de trous (h) ; le déplacement, translocation d'une des taches (i) et le rétrécissement, diminution de la taille des taches (j). Ces processus peuvent fournir des informations assez précises sur les facteurs qui contribuent à la transformation du paysage.

3. Résultats

3.1 Précision de la classification

Les précisions globales des images classifiées sont respectivement de 99,16 % (1986) ; 96,57 % (2000) ; 98,76 % (2013) et 96,26 % (2021) (Tableau 1). On peut donc affirmer que les classifications sont suffisamment bonnes.

Tableau 1

Précision de la classification des images Landsat de 1986, 2000, 2013 et 2021.

1986					
UOS	FD/FR	FC/SB	Sa/SA	Total	
FD/FR	852	3	0	855	
FC/SB	4	460	0	464	
Sa/SA	7	1	462	470	
Total	863	464	462	1789	
Précision globale : 99,16%					
2000					
UOS	FD/FR	FC/SB	Sa/SA	CH/JA	AG/SN
FD/FR	1556	7	0	0	0
FC/SB	41	3384	0	0	0
Sa/SA	0	137	895	28	15
CH/JA	0	0	0	250	0
AG/SN	1	0	5	4	119
Total	1598	4028	900	282	134
Précision globale : 96,57%					
2013					
UOS	FD/FR	FC/SB	Sa/SA	CH/JA	AG/SN
FD/FR	892	0	0	0	0
FC/SB	0	1555	5	2	0
Sa/SA	2	15	2429	2	0
CH/JA	0	0	0	1586	11
AG/SN	1	0	6	40	217
Total	895	1570	2440	1630	218
Précision globale : 98,76%					
2021					
UOS	FD/FR	FC/SB	Sa/SA	CH/JA	AG/SN
FD/FR	467	29	0	1	0
FC/SB	5	290	2	15	0
Sa/SA	0	3	1139	2	0
CH/JA	4	11	6	1151	2
AG/SN	0	0	0	40	64
Total	476	333	1147	1209	67
Précision globale : 96,26%					

UOS = Unité d'occupation spatiale, FD/FR = Forêts denses/ Forêts riveraines, FC/SB = Forêts claires/Savanes boisées, Sa/SA = Savanes arbustives/Savanes arborées, CH/JA = Champs/Jachères, AG/SN = Agglomérations/Sols nus

3.2 . Occupation du sol de la FCAM

Les différentes occupations discriminées dans la FCAM sont inégalement réparties dans le temps. En 1986, la FCAM était composée seulement de trois (3) types d'occupations avec une dominance des Forêts claires/Savanes boisées (53,03 %), suivie des Forêts denses/riveraines (30,76 %) et des Savanes arborées/arbustives (16,21 %).

En 2000 la FCAM était dominée par des Savanes arborées/arbustives (50,09 %) suivies Forêts claires/Savanes boisées (23,05 %), des Forêts denses/riveraines (22,95 %). Les classes de champs/Jachères (3,83 %) et des Agglomérations/Sols nus (0,05 %) sont peu représentées.

En 2013, les classes les plus représentées sont les Savanes arborées/arbustives (42,57 %) et les Forêts claires/Savanes boisées (28,70 %). Ces classes sont suivies par les classes de Champs/Jachères (18,85 %), les Forêts denses/Riveraines (9,44 %) et Agglomérations/Sols nus (0,44 %).

En 2021, les Champs/Jachères (38,10 %) dominent la forêt, elles sont suivies des Savanes arbustives/Savanes arborées (36,92 %). Les Forêts claires/Savanes boisées représentaient 17,07 %. Les Forêts denses/riveraines ne représentent que (5,72 %) tandis que les agglomérations/sols nus progressent (4,12 %).

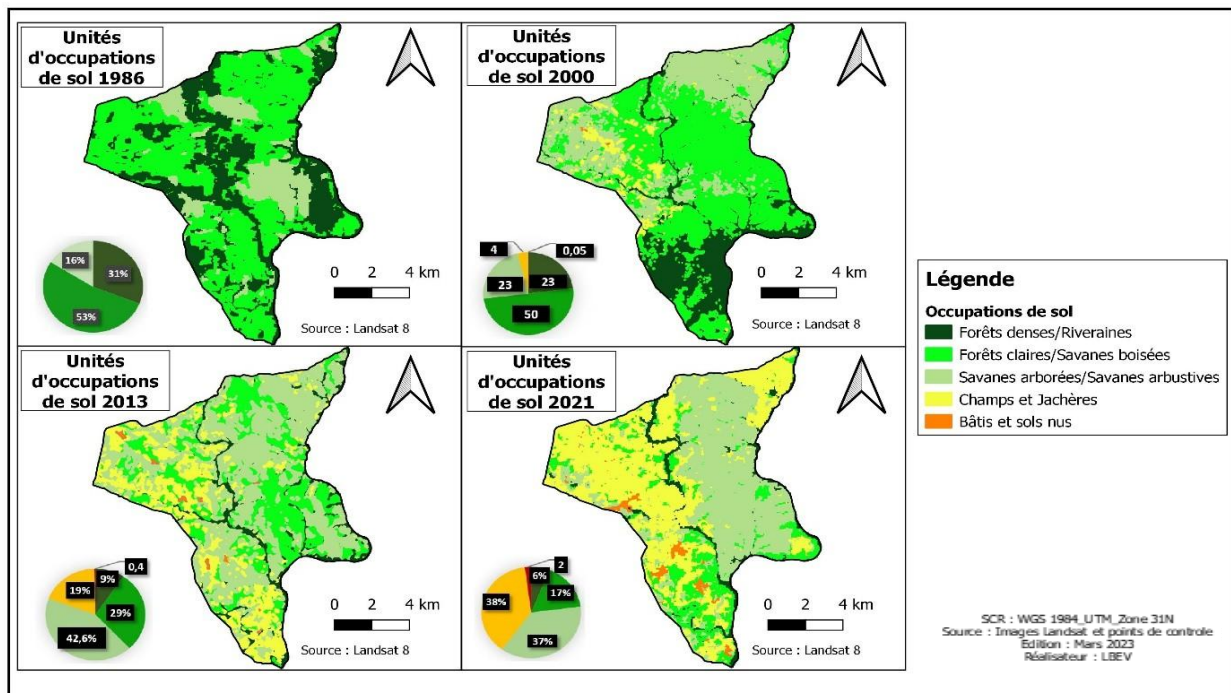


Figure 2: Occupation du sol de la FCAM en 1986,2000, 2013 et 2021

3.3 Dynamique d'occupation du sol de la FCAM

Les résultats cartographiques des différentes images ont permis de ressortir d'importantes informations (Figure 3). Le changement d'occupation du sol entre 1986 et 2000 révèle que les Savanes arborées/arbustives ont connu une progression de 3,03 % soit 62,67 ha/an. On note également l'expansion des Champs/Jachères et Agglomérations/Sols nus. Ces dernières, bien qu'absents en 1986 ont connu une progression de 34,96 ha/an et 0,43 ha/an respectivement. Les Forêts denses/riveraines et les Forêts claires/Savanes boisées ont connu une régression de leur superficie avec un taux respectif de 1,81 % (71,25 ha/an) et 0,40 % (26,81 ha/an). Toutes ces modifications ont entraîné un taux de déforestation de 0,28 % avec un taux de reconstitution nul.

Entre 2000 et 2013, les Agglomérations/Sols nus ont connu une forte expansion estimée à 63,41 % soit 3,83 ha/an. Elles sont suivies par les Champs/Jachères dont le taux d'évolution est de 30,16 % soit 147,66 ha/an. Les savanes quant à elles ont connu une expansion de 6,50 % soit 191,69 ha/an. Dans la même période, les Forêts denses/riveraines ont régressé de 4,53 % soit une perte de 132,95 ha/an. Les Forêts claires/Savanes boisées ont connu une perte de 210,24 ha/an soit

3,28 %. Ces différents changements des unités d'occupation ont entraîné un taux de déforestation de 1,34 % avec une reconstitution de 2,62 %.

Entre 2013 et 2021, les Champs/Jachères et Agglomérations/Sols nu ont progressé. Par contre, les Forêts claires/Savanes boisées, Forêts denses/riveraines et Savanes arborées/arbustives ont subi une régression. Les Agglomérations/Sol nu ont enregistré le plus fort taux d'expansion (44,42 %) soit 27,93 ha/an. Le taux d'évolution des formations Champs/Jachères est de 11,35 % avec une progression de 307,52 ha/an. Les Forêts claires/Savanes boisées ont enregistré un taux de régression de 4,50 % soit 185,73 ha/an. Les Forêts denses/riveraines et Savanes arborées/arbustives ont aussi enregistrée respectivement des régressions de 4,93 % (59,53 ha/an) et 1,47 % (90,20 ha/an). Ces divers changements ont entraîné un taux de déforestation de 3,77 % soit une augmentation de 2 % par rapport à celui de la période 2000 et 2013. Néanmoins le taux de reconstitution est de 9,25 %.

L'analyse des matrices de transition ressort que la FCAM d'une manière générale a subi d'importantes modifications. En effet, entre 1986 et 2000, plus de 16,27 % des Forêts claires/Savanes boisées ont été convertis en Savanes arborées/arbustives. Une

proportion de 22,95 % des Forêts denses/riveraines ont été convertis en Forêts claires/Savanes boisées.

Entre 2000 et 2013, 6,96 % de la superficie des Forêts denses/riveraines ont été transformés en Savanes arborées/arbustives. En ce qui concerne les Forêts claires/Savanes boisées, 21,96 % sont transformés en Savanes arborées/arbustives. Entre 2013 et 2021, Ce sont les Forêts claires/Savanes boisées et les Savanes arborées/arbustives qui sont subi plus de transformations. Plus de 15,78 % se sont transformés en Savanes arborées/arbustives. Les Savanes arborées/arbustives ont vu plus de 16,92 % de leur superficie se transformer en Champs/Jachères (Tableau 2).

Tableau 2
Matrices de transition de la FCAM

1986-2000						
UOS (%)	FD/FR	FC/SB	Sa/SA	CH/JA	AG/SN	Total 1986
FD/FR	11,88	13,91	4,3	0,66	0,01	30,76
FC/SB	9,6	24,37	16,27	2,75	0,04	53,03
Sa/SA	1,47	11,81	2,51	0,42	0	16,21
Total 2000	22,95	50,09	23,08	3,83	0,05	100
2000-2013						
UOS (%)	FD/FR	FC/SB	Sa/SA	CH/JA	AG/SN	Total 2000
FD/FR	7,12	3,59	6,96	5,21	0,08	22,96
FC/SB	1,9	17,14	21,96	8,88	0,21	50,08
Sa/SA	0,33	6,94	12,25	3,48	0,07	23,07
CH/JA	0,09	1,02	1,4	1,28	0,04	3,83
AG/SN	0	0,01	0	0,01	0,03	0,05
Total 2013	9,44	28,7	42,57	18,85	0,44	100
2013-2021						
UOS (%)	FD/FG	FC/SB	Sa/SA	CH/JA	AG/SN	Total 2013
FD/FR	4,14	3,3	0,76	1,19	0,06	9,45
FC/SB	0,3	3,06	15,78	9,18	0,38	28,69
Sa/SA	0,75	6,98	17,19	16,92	0,73	42,57
CH/JA	0,52	3,68	3,18	10,57	0,9	18,85
AG/SN	0,01	0,04	0,03	0,23	0,12	0,44
Total 2021	5,72	17,07	36,92	38,1	2,19	100

UOS = Unité d'occupation spatiale, FD/FR = Forêts denses/ Forêts riveraines, FC/SB = Forêts claires/Savanes boisées, Sa/SA = Savanes arborées/Savanes arborées, CH/JA = Champs/Jachères, AG/SN = Agglomérations/Sols nus

La matrice de transition révèle également qu'entre 1986 et 2000, plus de 38,76 % des superficies sont restées stables et n'ont pas subi de modifications avec un gain de

22,89 %. Les pertes sont estimées à 38,36 %. Entre 2000 et 2013, 37,82 % des formations végétales sont restées stables, 50,49 % ont connu des pertes et 11,70 % comme gain a été enregistré. Entre 2013 et 2021, on note une perte de 49,20 %, une stabilité de 35,07 % et un gain de 15,73 % (Figure 4).

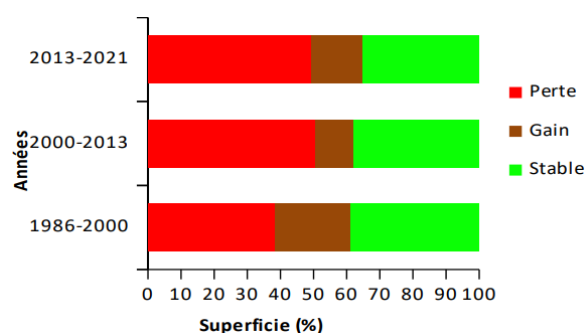


Figure 4 : Changements globaux des unités d'occupations des terres entre les différentes dates

Entre 1986 et 2000, les Forêts denses/riveraines ont conservé 1517,85 ha de leur superficie contre une perte de 2411,70 ha. Cette classe d'occupation du sol n'a pas enregistré de gain. Pour les Forêts claires/Savanes boisées, un total de 2 434,39 ha a été perdu avec une stabilité de 3112,32 ha, contre un gain de 1226,27 ha. La perte au niveau des Savanes boisées/arbustives est estimée à 53,31 ha contre un gain de 1696,92 et 320,19 ha de superficie stable (Figure 5).

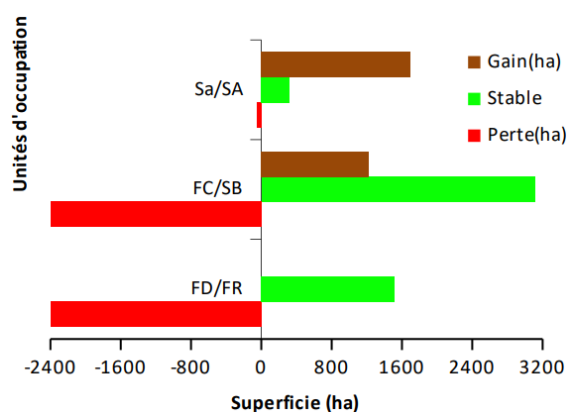


Figure 5 : Changements des unités d'occupations du sol entre 1986 et 2000

Entre 2000 et 2013, les forêts denses/riveraines ont perdu 2025,156 ha et 909,52 ha sont restées stables. Au niveau des forêts claires/savanes boisées, les pertes sont estimées à 3967,57 ha contre un gain de 242,25 ha et

une stabilité de 2190,49 ha. Les champs/Jachères ont enregistré un gain considérable de 320,91 ha avec seulement 5,22 ha de pertes. Les agglomérations et les sols nus ont réussi à conserver 3,69 ha. Quant aux savanes arbustives/arborées, ils ont conservé une superficie de 1565,82 ha avec une perte de 453,86 ha contre un gain de 929,04 ha (Figure 6).

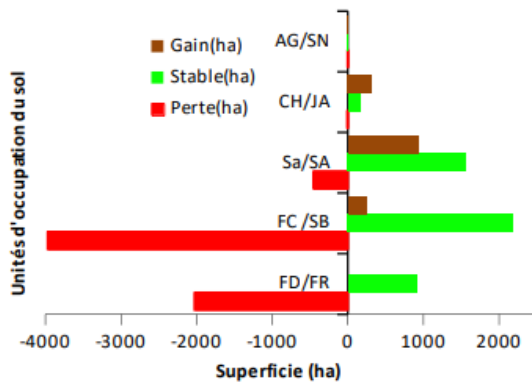


Figure 6 : Changements des unités d'occupations du sol entre 2000 et 2013

Pendant la période de 2013 et 2021, ce sont les Forêts claires/Savanes boisées qui ont connu plus de perte estimée à 3238,17 ha, un gain de 38,22 ha et une stabilité de 390,84 ha. Elles sont suivies par les Savanes arborées/arbustives. Ces derniers ont enregistré une perte de 2255,99 ha, ont enregistré un gain de 988,37 ha et une stabilité de 2196,33 ha. Les Champs/jachères ont perdu 115,11 ha, avec un gain de 943,14 ha et une stabilité de 1350,91 ha. Les Agglomérations/Sols nus ont connu un gain de 40,33 ha (Figure 7).

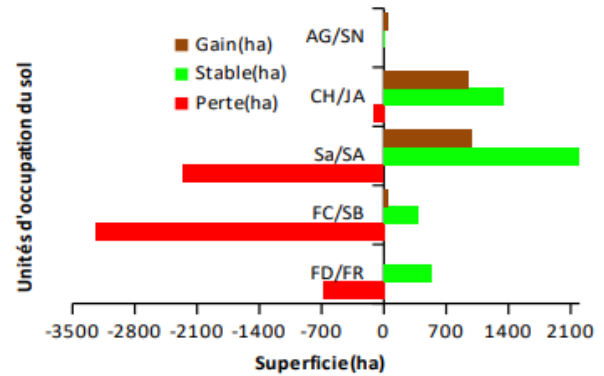


Figure 7 : Changements des unités d'occupations du sol entre 2013 et 2021

3.4 Dynamique de la structure spatiale et processus de transformation du paysage de la FCAM

L'aperçu global des indices de perturbation, de dominance, des taches et de la dimension fractale montre une tendance globale à l'anthropisation. On observe une réduction continue de l'étendue totale des Forêts denses/riveraines et une augmentation continue de l'étendue totale des Agglomérations/Sols nus. Une tendance générale à l'augmentation du nombre des taches dans la classe des forêts denses de 2000 à 2013 est également observée dans le paysage. Cependant, le nombre de taches des forêts denses a diminué de 1986 à 2000 et de 2013 à 2021. De 1986 à 2021, on observe généralement une simplification des formes des taches dans les forêts denses et les forêts riveraines. Par conséquent, il y a deux périodes majeures de simplification qui traduisent l'anthropisation du paysage : la première va de 2000 à 2013 et la deuxième va de 2013 à 2021. L'unique période marquée par une simplification significative des formes des taches des Forêts denses/riveraines va de 2013 à 2021.

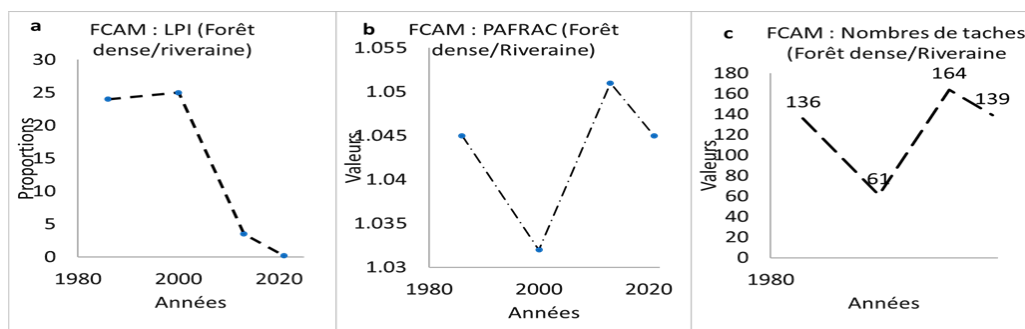


Figure 8 : Indices de la structure spatiale du paysage de la FCAM

L'analyse du tableau 3 indique que le paysage de la FCAM a connu trois (3) processus de transformation dont un positif et deux négatifs qui expliquent les transformations observées dans les classes d'occupation du sol. En effet, les Champs/Jachères pendant la diachronie (1986-2021) sont dominés par la création des nouvelles taches, alors que les Forêts claires/Savanes arborées connaissent une dissection. La période de 1986-2000 et celle de 2013-2021 a révélé une agrégation des classes forestières alors que les classes anthropiques (bâtis et sols nus) connaissent une agrégation des taches dans la dernière diachronie. Ainsi la diachronie (2000 à 2013) marque également une empreinte humaine par la dissection des classes forestières et la création des nouvelles taches des Savanes arborées/arbustives, Champs/Jachères et des Agglomérations/Sols nus.

Tableau 3
Processus de transformation spatiale dans la FCAM

	1986-2000	2000-2013	2013-2021
Forêt dense/riveraine	A	D	A
Forêt claire/Savane boisée	D	D	D
Savane arborée/Arbustive	D	D	C
Champs et jachères	C	C	C
Bâtis et sol nus	C	C	A

Avec D : dissection ; C : création ; A : agrégation.

4. Discussion

L'approche cartographique de l'occupation des sols en utilisant les classifications d'images satellitaires Landsat combinées à une vérité terrain ont été hautement appréciables [16, 21]. Khorram *et al.* [22] et Pham *et al.* [23] ont obtenu lors de leurs études de faibles valeurs d'exactitude des classifications respectivement de 61 % et 51 %. Cette différence serait due à la non-collecte des points de contrôle sur le terrain en vue des vérifications et de la validation des cartes pré-classifiées. Ceci confirme l'importance de la connaissance du milieu et celui de l'acquisition des données auxiliaires pour l'amélioration de la qualité des traitements d'images. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Rachdi *et al.* [24] lors de la recherche sur l'apport de la télédétection et des systèmes d'information géographiques (SIG) pour l'évaluation des mares temporaires dans la province de Benslimane au Maroc. La précision de la classification devient

faible lorsque les unités cartographiques sont plus petites qu'un pixel et difficiles à détecter [25].

Les classifications menées ont permis de distinguer des formations mixtes (Champs/Jachères et Agglomérations/Sols nus) qui pourraient présenter une certaine confusion en raison des réponses spectrales proches [26]. Les différentes cartes d'occupation du sol obtenues montrent l'ampleur de la régression des formations naturelles. De plus la matrice de transition élaborée entre les classes d'occupation du sol montre une forte dynamique de régression des écosystèmes forestiers boisés (forêts denses et forêts claires). Cette régression est due à la conversion des Forêts denses/riveraines et Forêts claires/Savanes boisées en Savanes arborées/arbustives et Champs/Jachères et Agglomérations/Sols nus. Cette dynamique de la dédensification du couvert végétal observé pourrait s'expliquer essentiellement par le fort degré d'anthropisation. La forte anthropisation de la FCAM pourrait remonter aux années 1990 où la majorité des aires protégées du Togo ont été envahies suite aux troubles sociopolitiques. Ceci a été relevé au niveau de la majorité des études sur les aires protégées du Togo [6, 9, 10, 27]. Comparativement aux autres travaux au Togo et dans la sous-région [10, 17], l'anthropisation au sein de ladite forêt classée demeure assez élevée, en particulier entre 2013 et 2021. Au Bénin, les travaux de Dossa *et al.* [28] dans la forêt classée de Pénésoulou est de 0,01 %. Ces résultats sont similaires aux travaux de Ahononga *et al.* [29] qui a rapporté des taux de régression forestières de 0,27 à 2,77% dans les écosystèmes du domaine soudanien au Bénin entre 1995 et 2015.

Dans cette étude, les indices caractérisant la fragmentation ont été utilisés. Elle est un des processus responsables de la dynamique spatiale du paysage [30]. L'action de l'homme conduit à l'anthropisation du paysage dans lesquels les caractéristiques artificielles dominant et les types de parcelles naturelles sont souvent réduits à un modèle dispersé [31]. L'indice de perturbation indique une dominance des classes anthropiques quand il est supérieur à 1 et une dominance des classes naturelles s'il est inférieur à 1 [32]. Les conséquences de la fragmentation sont une réduction de l'aire totale et une augmentation du nombre de taches [33]. De plus, la domination la fragmentation suppose la diminution de la taille des

taches vers de petites taches de tailles similaires [34]. L'existence d'une corrélation entre ces indices, même si cela implique une répétition de l'information, constitue un important argument pour démontrer que les observations ne sont pas dues au hasard [34].

Les résultats montrent que les surfaces agricoles de la FCAM ont connu une augmentation de 1986 à 2021. En effet, elles sont passées de 3,83 % à 38 % tandis que, les espaces Forêts denses/riveraines ont enregistré une diminution de leurs surfaces. Elles sont passées de 30,76 % en 1986 à 17,04 % en 2021. La forte augmentation de la densité de la population (augmentation des agglomérations dans et autour de la FCAM) ainsi que les activités de feu de végétation, d'agricultures sur brûlis et d'abatage anarchique des arbres justifieraient ces résultats. Cela suggère une demande de plus en plus accrue de terres fertiles par la population locale. Le taux de conversion montre une forte anthropisation de ces écosystèmes marquée par l'expansion des champs et de jachères. Ces résultats sont comparables à ceux rapportés dans la zone soudanienne au nord du Bénin [35-37] montrant une régression continue des forêts et des savanes au faveur des champs-jachères et des agglomérations. Cette situation est la conséquence de plusieurs facteurs anthropiques dont le raccourcissement de la durée de la jachère, l'explosion démographique et le développement important des cultures de rentes [38, 39]. Toutes ces transformations perturbent les conditions climatiques qui déterminent les processus écologiques de succession de la végétation. Il est démontré que les populations rurales sont fortement tributaires des ressources phytogénétiques présentes dans leurs environnements immédiats [5, 40, 41]. Par conséquent, l'ampleur de la perte du couvert végétal de la FCAM pourrait impacter la régulation du climat tout en perturbant les conditions socio-économiques de la population rurale qui en dépend directement.

Salomon *et al.* [42] ont démontré que les espaces forestiers naturels en Afrique sont de plus en plus dégradés. La dissection est observée dans la FCAM dans les classes des Forêts denses/riveraines et Forêts claires/Savanes boisées. Barima *et al.* [25] ont observé une suppression des forêts entre 1986 et 2000 tandis que Bogaert *et al.* [31] ont identifié une fragmentation des forêts entre 1999 et 2005 respectivement dans la zone de transition forêts-savanes ivoiriennes et dans la forêt

d'Arivonimamo à Madagascar. Les résultats obtenus pourraient permettre de confirmer l'hypothèse selon laquelle la FCAM connaît une diminution des proportions forestières d'une diachronie à une autre. En effet, l'analyse des processus écologiques renseigne que la classe Forêts denses/riveraines et Forêts claires/Savanes boisées ont connu une dissection, expliquant ainsi l'augmentation du nombre de taches. Par contre, les classes anthropiques ont connu des créations comme processus de transformation spatiale entre 1986 et 2021. La suppression est le processus le plus prépondérant observé dans les régions forestières africaines [34].

On observe dans la FCAM une déforestation totale qualifiée de plus haute [43] entre 1986 et 2021 (3,25 %). Cette forte déforestation est imputable à l'extension des bâtis, champs et jachères qui expliquent des changements observés entre 2013 et 2021. Ce taux de dégradation de la FCAM au cours de la dernière décennie est plus supérieur à celui de la déforestation globale du pays [44].

5. Conclusion

L'étude de la végétation de la FCAM sur 31 ans a révélé des changements dans l'occupation du sol. Le paysage a été profondément modifié par ces changements. La dynamique de l'occupation du sol se manifeste par une régression des espaces naturels. Les résultats confirment que le paysage de la FCAM est en pleine dédensification du couvert végétal. L'agrégation, la dissection et la création des taches sont principales transformations spatiales dominantes du paysage. La régression du couvert forestier et à l'expansion des espaces anthropisés sont les principales causes de ces transformations. La biodiversité animale et végétale se trouve donc en danger dans cette aire protégée. Cette situation doit donc interpeller les décideurs et gages de protection quant au maintien durable de ces écosystèmes.

Remerciements

Nos vifs remerciements à l'équipe technique du Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale (LBEV) de l'Université de Lomé (Togo), à l'École Régionale Post-Universitaire d'Aménagement et gestion Intégré

des Forêts et Territoires tropicaux (ERAIFT), au Ministère chargé de l'environnement. L'implication du Directeur Régional de l'Environnement de la Région des Plateaux et du conservateur de la Forêt Classée d'Amou-Mono a facilité la collecte des données.

Références

- Pramova E., Locatelli B., Djoudi H. & Somorin O., (2012). Le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques. *Brief*, 2(14). <http://hal.cirad.fr/cirad-00937157>
- Madzous I., Ludovic G., Kamgang S.A., Mokpidie D. & Doumenge C., (2021). Les aires protégées : un atout majeur pour la lutte contre les changements climatiques. In Aires protégées d'Afrique centrale. 356-397.
- Koumantiga D., Wala K., Akpavi S., Diwediga B., Batawila K. & Akpagana K., (2021). Écotourisme et aires protégées: L'histoire, un potentiel latent pour le complexe OKM (Togo, Afrique). *Pasos. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 19 : 223-238. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2021.19.015>
- Stolton S., Dudley N., Çokçalışkan B.A., Hunter D., Ivanić K.-Z., Kanga E., Kettunen M., Kumagai Y., Maxted N. & Senior J., (2018). Chapitre 6 : Valeurs et avantages des aires protégées. In Gouvernance et gestion des aires protégées. Canberra: ANU Press 1- 25.
- Badjare B., Woegan Y.A., Folega F., Atakpama W., Wala K. & Akpagana K., (2021). Vulnérabilité des ressources ligneuses en lien avec les différentes formes d'usages au Togo : Cas du paysage des aires protégées Doungh-fosse aux lions (Région des Savanes). *Revue Agrobiologia*, 11(2) : 2552- 2565. <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/255/11/2/173028>
- MERF, (2020). État des lieux du système national d'aires protégées du Togo : Écosystèmes, vulnérabilités aux changements climatiques et valorisation écotouristique. In Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières, Lomé, Togo, 219.
- Tchamiè T.T.K. (1996). Aires protégées du Togo : nécessité d'une redéfinition des stratégies de conservation et de protection de la faune. *Bull. Flamboyant*, 39(12-15).
- Dimobe K., Wala K., Batawila K., Dourma M., Woegan Y.A. & Akpagana K. (2012) Analyse spatiale des différentes formes de pressions anthropiques dans la réserve de faune de l'Oti-Mandouri (Togo). *VertigO Rev. Electro. Sci. Envi.*, hors-série 14. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12423>
- Polo-Akpisso A., Folega F., Soulemame O., Atakpama W., Coulibaly M., Wala K., Röder A., Akpagana K. & Yao T. (2018). Habitat biophysical and spatial patterns assessment within Oti-Keran- Mandouri protected area network in Togo. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 10 (5): 214-229. <https://doi.org/10.5897/IJBC2017.1139>
- Adjonou K., Kémavo A., Fontodji J.K., Tchani W., Sodjinou F., Sebastia M.T., Kokutse A.D. & Kokou K. (2017). Vegetation dynamics patterns, biodiversity conservation and structure of forest ecosystems in the wildlife reserve of Togodo in Togo, West Africa. *International Journal of Development Research*, 7 (8): 14549-14557. <https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/5d6dc5e3-88f5-4c81-97dc-7a2d1a9ef376/content>
- Akodéwou A., Oszwald J., Gazull L., Akpavi S., Akpagana K., Gond V. & Saidi S. (2020). Land Use and Land Cover Dynamics Analysis of the Togodo Protected Area and Its Surroundings in Southeastern Togo, *West Africa. Sustainability*, 12 (9): 1-23. <https://doi.org/10.3390/su12135439>
- MERF (2017). Plan d'aménagement et de gestion de l'aire protégées d'Amou-Mono. In MERF, Lomé, Togo (269).
- Agbessi K.G.E., Fotsing E., Johnson B.D., Foussemi F., Segniagbeto G.H., Badjana H. & Tchotsoua M. (2021). Analysis of the spatial-temporal dynamics of the Missahohe classed forest in southern Togo. *IJAEB*, 06 (98-113). <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2021.5606>
- Kombate B., Dourma M., Folega F., Atakpama W., Wala K. & Akpagana K. (2020). Spatio-temporal dynamics and habitat fragmentation within a central region of Togo. *Agricultural Science Research Journal*, 10 (11): 291 – 305.
- Egbelou H., Atakpama W., Folega F. & Akpagana K. (2021). Dynamique spatio-temporelle et flore de la forêt d'Aboudjokopé au Togo. *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, 27 (2) : 37-50. Disponible sur : <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/34/27/2/173063>
- Kombate B., Atakpama W., Egbelou H., Ahuide K., Dourma M., Folega F., Batawila K. & Akpagana K. (2023). Dynamique de l'occupation de sol et modélisation du carbone de la Forêt Communautaire d'Alibi 1. *Annale de la Recherche Forestière en Algérie*, 12 (2) : 13-26. Disponible sur <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/592/13/1/219326>
- Atakpama W., Egbelou H., Yandja M., Kombate B., Afelu B., Batawila K. & Akpagana K. (2023). Vulnérabilité de la flore de la Forêt Classée de Missahohoe au feu de végétation. *Annale de la Recherche Forestière en Algérie*, 13 (1) : 37-53. Disponible sur <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/592/13/1/219328>
- Mezned N., Chakroun H. & Boussema M.R. (2005). Apport de la télédétection dans la gestion des géorisques : cas des incendies de forêt en milieu semi-aride tunisien. *Télétection*, 5 (1-2-3) : 197-212. Disponible sur : <https://www.academia.edu/download/31039310/20051024135740.pdf>
- Puyravaud J.-P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecol. Manag.*, 177(1-3) : 593-596. https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/2160/Puyravaud_2.pdf?sequence=1
- Djaouga M., Arouna O., Zakari S., Kouta S., Moumouni Y.I., Mertens B., Imorou I.T. & Thomas O. (2021). Cartographie de la déforestation dans le département de l'Alibori (nord du Bénin) grâce aux images satellitaires SPOT. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 223 (200-216). <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.577>
- Dimobe K., Goetze D., Ouedraogo A., Forkuor G., Wala K., Porembski S. & Thiombiano A. (2017). Spatio-temporal dynamics in land use and habitat fragmentation within a protected area dedicated to tourism in a Sudanian savanna of West Africa. *Journal of Landscape Ecology*, 10 (1): 75-95. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0011>
- Khorram S., Biging G.S., Chrisman N.R., Colby D.R., Congalton R.G., Dobson J.E., Ferguson R.L., Goodchild M.F., Jensen J.R. & Mace T.H. (1999) Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection., Bethesda (MD). Bethesda, MD: Natural Resources and the Environment, 64 p.
- Pham T.T., Bonn F. & Dubois J.-M. (2007). Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution spatiale : application à une région littorale au Viêt-Nam. *Télétection*, 7 (5): 302-323.
- Rachdi B., Fougrach H., Hakdaoui M., Hsain M. & Badri W. (2011). Apport de la télédétection et des SIG pour l'évaluation des mares temporaires dans la province de Benslimane (Maroc). *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 11 (2): 165-174. Disponible sur . <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/159625>
- Barima Y.S.S., Barbier N., Bamba I., Traore D., Lejoly J. & Bogaert J. (2009). Dynamique paysagère en milieu de transition

- forêt-savane ivoirienne. Bois et Forêts des Tropiques, 299 (1) : 15-25. Disponible sur : <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/download/20419/20178>
26. N'Guessan K.E., Dibi N'Dah H., Bellan M.-F. & Blasco F. (2006). Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte-d'Ivoire : Apport de la télédétection. *Télédétection*, 5 : 307-323.
 27. Folega F., Dourma M., Wala K., Batawila K., Zhang C.-y., Zhao X.-h. & Akpagana K. (2012). Assessment and impact of anthropogenic disturbances in protected areas of northern Togo. *For. Stud. China*, 14(3) : 216-223. <https://doi.org/10.1007/s11632-012-0308-x>
 28. Dossa L.O.S.N., Dassou G.H., Adomou A.C., Ahononga F.C. & Biauou S. (2021). Dynamique spatio-temporelle et vulnérabilité des unités d'occupation du sol de la Forêt Classée de Pénésoulou de 1995 à 2015 (Bénin, Afrique de l'Ouest). *REV. RAMRES - Sciences de la vie, de la terre et agronomie*, 9 (2) : 55-63. Disponible sur : <http://publication.lecames.org/index.php/svt/article/download/2247/1080>
 29. Ahononga F., Gouwakinnou G.N., Biauou S.S. & Biauou S. (2021). Vulnérabilité des terres des écosystèmes du domaine soudanien au Bénin de 1995 à 2015. *Bois et Forêts des Tropiques*, 346 (35-50). <https://doi.org/10.19182/bft2020.346.a36295>
 30. Mazo I., Arouna O. & Imorou I.T. (2021). Affectation des terres et variabilité de la biomasse ligneuse au Nord-Bénin. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 4 (3): 391-405. <https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v4i3.22930>
 31. Bogaert J. & Mahamane A. (2005). Ecologie du paysage: cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Ann. Sci. Agron.*, 7 (1) : 39-68. <https://doi.org/10.4314/asab.v7i1.43277>
 32. Bogaert J., Vranken I. & André M. (2014). Anthropogenic effects in landscapes: historical context and spatial pattern. In *Biocultural Landscape*. 89-112. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8941-7_8
 33. O'Neill R.V., Krummel J.R., Gardner R.H., Sugihara G., Jackson B., DeAngelis D.L., Milne B., Turner M.G., Zygmunt B. & Christensen S.W. (1988). Indices of landscape pattern. *Lands. Ecol.*, 1 (3) : 153-162. https://www.academia.edu/download/49071003/Indices_of_Landscape_Pattern20160923-5864-pal1tk.pdf
 34. Davidson C., (1998). Issues in measuring landscape fragmentation. *Wild. Soc. Bull.*, 26(1) : 32-37. <https://www.jstor.org/stable/3783798>
 35. Bamba I., Barima Y.S.S. & Bogaert J. (2010). Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en RD Congo. *Trop. Conserv. Sci.*, 3 (1) : 31-44. https://tropicalconservationscience.mongabay.com/content/v3/10-03-29_31-44_bamba_et_al.pdf
 36. Mama A., Sinsin B., De Cannière C. & Bogaert J. (2013). Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *Tropicicultura* 31(1) : 78-88. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/160259/1/2013.mama.trop.pdf> https://www.academia.edu/download/49071003/Indices_of_Landscape_Pattern20160923-5864-pal1tk.pdf (Accessed on 02/10/2023)
 37. Arouna O., Etene C.G. & Issiako D. (2016). Dynamique de l'occupation des terres et état de la flore et de la végétation dans le bassin supérieur de l'Alibori au Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 108 (10543-10552). <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v10i8i1.7>
 38. Avakoudjo J., Mama A., Toko I., Kindomihou V. & Sinsin B. (2014). Dynamique de l'occupation du sol dans le Parc National du W et sa périphérie au nord-ouest du Bénin. *IJBCS*, 8(6) : 2608-2625. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.22>
 39. Kombate B., Dourma M., Folega F., Atakpama W., Wala K., Batawila K. & Akpagana K. (2022). Modélisation spatiale multifactorielle de la vulnérabilité des unités d'occupation du sol face au changement climatique dans la Région Centrale au Togo. *Rev. Écosyst. Pays.* 2 (2) : 34-52. <https://bevi-univlome.com/wp-content/uploads/2022/12/Kombate-et-al.pdf>
 40. Abdou I.K., Abasse T., Massaoudou M., Rabiou H., Soumana I. & Bogaert J. (2019). Influence des Pressions Anthropiques sur la Dynamique Paysagère de la Réserve Partielle de Faune de Dosso (Niger). *IJBCS*, 13 (2) : 1094-1108. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i2.41>
 41. Atakpama W., Asseki E., Kpemissi Amana E., Koudegnan C., Batawila K. & Akpagana K. (2018). Importance socio-économique de la forêt communautaire d'Edouwossi-copé dans la préfecture d'Amou au Togo. *RMSAV*, 6 (1) : 55-63. https://agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/540
 42. Salomon W., Sikuzani Y.U., Kouakou A.T.M., Barima Y.S.S., Theodat J.M. & Bogaert J. (2021). Cartographie et quantification de la perte du couvert forestier dans les parcs nationaux du Sud de la République d'Haïti de 1985 à 2018 : rôle des activités agricoles locales *IJBCS*, 15 (477-496). <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i2.9>
 43. Catalán J., (1991). The relationship between functional anatomy of lakes and primary production. *Oecol. Aquat.*, 10 (10): 77-94. <https://revistes.ub.edu/index.php/oecologiaaquatica/article/download/26979/28031>
 44. Kombate A., Folega F., Atakpama W., Dourma M., Wala K. & Goïta K. (2022). Characterization of Land-Cover Changes and Forest-Cover Dynamics in Togo between 1985 and 2020 from Landsat Images Using Google Earth Engine. *Land*, 11 (11) : 1889. <https://doi.org/10.3390/land11111889>

Nature & Technology Journal

Academic Journal with International Dissemination

Volume 16

Issue 01 – January 2024

