



HAL
open science

Évaluation des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau dans la région d'Akkar (nord du Liban) : le cas du territoire d'Al-Kayteh

Ahmad Kamaledine

► **To cite this version:**

Ahmad Kamaledine. Évaluation des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau dans la région d'Akkar (nord du Liban) : le cas du territoire d'Al-Kayteh. Géographie. Université de Lille; Université Libanaise, 2023. Français. NNT : 2023ULILA028 . tel-04560370

HAL Id: tel-04560370

<https://theses.hal.science/tel-04560370>

Submitted on 26 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat en cotutelle pour obtenir le grade de Docteur, délivré par

L'Université de Lille

Ecole Doctorale SESAM (ED n 73)

Laboratoire Territoires, Villes, Environnement & Société (ULR 4477)

Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale (Section 23)

&

L'Université Libanaise

Ecole Doctorale des Lettres et des Sciences Humaines et Sociales (EDLSHS)

Spécialité : Géographie

Présentée et soutenue publiquement le mercredi 20 décembre 2023, par

Ahmad KAMALEDDINE

**Evaluation des impacts de l'occupation du sol sur la qualité
des ressources en eau dans la région d'Akkar (nord du
Liban). Le cas du territoire d'Al-Kayteh.**

Sous la direction de :

Pierre-Gil SALVADOR (Professeur des Universités, Université de Lille, Directeur)

AbdulRahim IBRAHIM (Professeur des Universités, Université Libanaise, Co-directeur)

Mhamad EL HAGE (Professeur des Universités, Université Libanaise, Co-encadrant)

Membres du jury :

| | |
|-------------------|--|
| Laurence CHARBEL | Professeure des Universités, Université Libanaise, Rapporteuse |
| Alain DEVOS | Professeur des Universités, Université de Reims Champagne-Ardenne, Rapporteur |
| Hervé FLANQUART | Professeur des Universités, Université du Littoral Côte d'Opale, Examineur et Président du jury |
| Yasmine JABALI | Maître de Conférences, Université de Balamand, Examinatrice |
| Guillaume SCHMITT | Maître de Conférences, Université Polytechnique des Hauts-de-France, Examineur |

Evaluation des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau dans la région d'Akkar (nord du Liban). Le cas du territoire d'Al-Kayteh.

Ahmad KAMALEDDINE

All rights reserved. Full or partial reproduction of this thesis is not allowed without a prior written permission from the Lebanese University, Doctoral School of Literature, Humanities & Social Sciences

© Lebanese University, Doctoral School of Literature, Humanities & Social Sciences (2023).

Evaluation des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau dans la région d'Akkar (nord du Liban). Le cas du territoire d'Al-Kayteh.

Ahmad KAMALEDDINE

Résumé

Akkar est une région rurale et économiquement défavorisée, située au nord du Liban. L'agriculture en est le principal secteur d'activité, ce qui en fait la deuxième région agricole du Liban. Notre terrain d'étude, Al-Kayteh, couvre 26 % de la superficie de la région d'Akkar et abrite 60 % de sa population. Il s'étend depuis le littoral de la Méditerranée jusqu'au sommet d'Aarouba, le point le plus élevé d'Akkar culminant à 2230 mètres d'altitude.

Al-Kayteh est actuellement confrontée à un développement urbain important mais désorganisé, ce territoire n'étant pas doté de documents d'urbanisme ni de plans directeurs régissant son aménagement. La plupart de ses communes disposent de réseaux d'égouts obsolètes ou utilisent des fosses septiques pour traiter les eaux usées et par ailleurs, l'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques dans les zones agricoles n'est pas réglementé. Ces facteurs mettent en danger et exercent une pression sur les ressources en eau. Ainsi, Al-Kayteh, tout comme Akkar, doit relever des défis majeurs en matière d'aménagement urbain et de préservation des ressources en eau.

Les études antérieures portant sur la qualité des ressources en eau à Akkar et à Al-Kayteh ont mis en lumière une pollution quasi-généralisée de cette ressource à l'échelle de la région, tant

sur le plan microbiologique par les eaux usées que sur le plan chimique par les engrais chimiques et les pesticides. C'est pourquoi nous avons abordé la question de la pollution de l'eau à Akkar dans une perspective géographique et d'aménagement du territoire en identifiant les modalités de l'occupation du sol depuis 1962 et en mesurant les conséquences sur les ressources en eau.

Nous avons identifié les caractéristiques et les problèmes en relation avec le secteur de l'eau sur le territoire d'Al-Kayteh, ainsi que l'évolution et la répartition de l'urbanisation et des types d'activités agricoles. Des prélèvements ont été réalisés dans 44 puits et sources afin de déterminer la qualité de l'eau puis de caractériser, à l'aide d'outils statistiques, les impacts en lien avec l'occupation du sol.

Les résultats obtenus ont permis de mieux appréhender un terrain encore peu prospecté, l'évolution de l'occupation du sol, et d'identifier les sources de pollution des ressources en eau dans la région. Ce travail pourra contribuer à l'élaboration de plans et de schémas directeurs visant à une gestion durable des ressources en eau, ainsi qu'à la planification du développement urbain et de l'agriculture sur le territoire.

Mots clés : Occupation du sol, Pollution d'eau, Liban, Ressources en eau, Akkar, Aménagement du territoire

Assessment of the impacts of land use on water resource quality in the Akkar region (northern Lebanon): The case of the Al-Kayteh area.

Ahmad KAMALEDDINE

Abstract

Akkar is a rural and economically deprived region located in northern Lebanon. It stands out as the second agricultural zone in Lebanon, where agriculture represents the primary sector of activity. Our study area, Al-Kayteh, covers 26% of the Akkar region's area and houses 60% of its population. It stretches from the Mediterranean coastline to the summit of Aarouba, reaching an elevation of 2230 meters, which is the highest point in Akkar.

Al-Kayteh is currently facing significant yet disorganized urban development. However, this territory lacks urban planning documents or master plans governing its development and urbanization. Furthermore, most of its municipalities have outdated sewage systems or rely on septic tanks to treat wastewater. Moreover, the use of pesticides and chemical fertilizers in agricultural areas is not regulated. These factors pose a threat and exert pressure on the territory's water resources. Thus, Al-Kayteh, like Akkar, faces major challenges in terms of urban planning and water resource preservation.

Previous studies on the quality of water resources in Akkar and Al-Kayteh have revealed that the majority of the region's water resources are contaminated, both microbiologically due to wastewater and chemically due to chemical fertilizers and pesticides. This is why we have approached the issue of water pollution in Akkar from a geographical and land-use planning

perspective. This approach led us to examine land use patterns since 1962 on the ground, their evolution, and their impact on water resources.

To contextualize the issue, we have examined the characteristics and problems of the water sector in Al-Kayteh, as well as the evolution and distribution of urbanization and types of agricultural activities in this area. Subsequently, 44 water samples (in wells and springs) were taken from different sectors of the area to characterize their quality and analyze the impacts of land use. Statistical methods were employed to identify relationships between different variables.

The results obtained have enabled us to gain a better understanding of a still relatively unexplored area, the evolution of land use, and identifying sources of water resource pollution in the region. This will pave the way for the development of plans and master plans aimed at sustainable water resource management, as well as the planning of urban development and agriculture in the area.

Keywords: Land use, Water pollution, Lebanon, Water resources, Akkar, Spatial planning

تقييم تأثير استخدام الأراضي على جودة موارد المياه في محافظة عكار (شمال لبنان): منطقة القيطع مثلاً.

أحمد كمال الدين

مستخلص

تشكل عكار منطقة الدراسة في الأطروحة، وهي محافظة لبنانية تقع شمالي البلاد. تتميز عكار بكونها ثاني أكبر منطقة زراعية في البلاد، إضافة إلى كونها منطقة ريفية وفقيرة. لدراسة الإشكالية في عكار، سنقوم بدراسة حالة منطقة القيطع كمثال. تغطي القيطع 26% من مساحة عكار وتضم 60% من سكانها، وهي تمتد من ساحل البحر الأبيض المتوسط حتى قمة جبل عاروبا، على ارتفاع 2230 متر وهي أعلى قمة في عكار.

تشهد منطقة القيطع اليوم نمواً عمرانياً متسارعاً وغير منظم. ومع ذلك، تفتقر هذه المنطقة لمخططات التنظيم الحضري. إضافة إلى ذلك، تعتمد معظم بلدياتها على نظام صرفٍ صحي قديم أو تلجأ للحفر الصحية لمعالجة مياه الصرف الصحي. كما يتم استخدام المبيدات والأسمدة الكيميائية في المناطق الزراعية بشكل غير منظم أو مدروس. كل هذه العوامل تشكل عوامل ضغطٍ وتهديد على موارد المياه في المنطقة. وبالتالي، فإن القيطع، وكذلك عكار، تواجه تحديات كبيرة في مجال التخطيط الحضري والحفاظ على نوعية المياه.

لقد كشفت الدراسات السابقة حول جودة موارد المياه في عكار والقيطع أن غالبية موارد مياه المنطقة ملوثة، سواء من الناحية الميكروبيولوجية بسبب مياه الصرف الصحي أو من الناحية الكيميائية بسبب الأسمدة الكيميائية والمبيدات. لهذا السبب أردنا معالجة إشكالية تلوث المياه في عكار من منظور الجغرافيا وتنظيم المجال الجغرافي. ارتكز عملنا على دراسة أنواع استخدامات الأراضي في القيطع وتطورها منذ عام 1962، وتأثير ذلك على نوعية موارد المياه.

لذلك قمنا بدايةً بدراسة خصائص ومشاكل قطاع المياه في القيطع، بالإضافة إلى تطور وتوزع المناطق الحضرية والأنشطة الزراعية وأنواعها. بعد ذلك، قمنا بأخذ 44 عينة مياه (آبار ويناابيع) من مختلف مناطق القيطع لدراسة نوعيتها ومن ثم تحليل تأثير استخدامات الأرض عليها. تم استخدام أدوات إحصائية لدراسة العلاقة بين مختلف المتغيرات المدروسة.

أتاحت نتائج دراستنا فهمًا أفضل لمنطقة القيطع وخصائصها، والتي ما زالت غير مدروسة جيداً من قبل، وتطور استخدام الأراضي فيها وتحديد مصادر تلوث مياهها. مما سيفتح الباب أمام وضع خططٍ تهدف إلى الوصول إلى إدارة مستدامة لموارد المياه، وأيضاً وضع خططٍ وبرامج لتنظيم النمو الحضري والأنشطة الزراعية فيها.

الكلمات المفتاحية: استخدام الأراضي، تلوث المياه، لبنان، موارد المياه، عكار، تنظيم المجال الجغرافي

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse. Tout d'abord, je suis reconnaissant envers mon directeur de thèse, M. Pierre-Gil SALVADOR, dont les conseils éclairés, la patience et l'expertise ont été d'une valeur inestimable tout au long de ce projet. Ses encouragements et sa disponibilité ont été essentiels pour mener à bien cette recherche.

Je tiens également à remercier chaleureusement mon co-directeur M. AbdulRahim IBRAHIM et mon co-encadrant M. Mhamad EL HAGE pour leurs précieuses contributions à ce travail. Leurs perspectives et leurs suggestions ont enrichi mes réflexions et m'ont permis de finaliser parfaitement cette thèse.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les membres de mon jury, Laurence CHARBEL, Alain DEVOS, Hervé FLANQUART, Yasmine JABALI et Guillaume SCHMITT, pour leur engagement et leurs précieux commentaires qui ont enrichi ce travail et contribué à sa qualité.

Enfin, un immense merci à ma femme, mes parents, mes beaux parents, ma famille, Monsieur Monzer et mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Leur amour, leur encouragement et leur compréhension ont été une source de motivation inestimable, et je leur suis profondément reconnaissant pour leur soutien inconditionnel.

الحمد والفضل والشكر لله Al-Hamdu lil-Allah

À l'une des plus belles personnes de ma vie, qui nous a quitté deux jours avant la soutenance,

À la personne qui aurait eu la plus grande fierté de voir cette réalisation,

À Papi, dont les prières, l'amour et le soutien ont été la lumière tout au long de cette aventure,



Sauf Dieu puis toi, je ne serai jamais là..

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Résumé | ii |
| Abstract..... | iv |
| مستخلص | vi |
| Remerciements | viii |
| Table des matières..... | X |
| Liste des acronymes | xv |
| Liste des figures..... | xvii |
| Liste des tableaux..... | xx |
| Introduction générale | 1 |
| Partie I : Un état des lieux : pollution de l'eau et occupation du sol, et cadre géographique de la recherche | 12 |
| Chapitre I : La pollution de l'eau et les impacts de l'occupation du sol sur les ressources en eau | 13 |
| 1. Etat de l'art..... | 14 |
| 1.1. La pollution microbiologique et chimique des eaux-souterraines | 14 |
| 1.2. La vulnérabilité des eaux souterraines..... | 18 |
| 1.3. Impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau | 22 |
| 2. Étude bibliographique : la problématique entre le local et l'international | 26 |
| 2.1. Des études internationales avec la même problématique, mais des objectifs différents | 27 |
| 2.2. Études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar : des approches microbiologiques et chimiques pour des résultats alarmants | 33 |
| 3. Les étapes de la méthodologie..... | 39 |
| 4. Conclusion intermédiaire..... | 42 |
| Chapitre II : Cadre géographique de la recherche : Al-Kayteh, une géographie favorable et de nombreux défis..... | 45 |
| 1. La région d'Akkar, une région rurale et pauvre | 46 |
| 1.1. Un aperçu du découpage administratif du Liban : entre politique, géographie et histoire..... | 46 |
| 1.2. Akkar : une région pauvre s'étendant entre plaine et plateaux au nord du Liban..... | 50 |
| 1.3. Al-Kayteh, un territoire représentatif d'Akkar | 53 |

| | |
|---|------------|
| 2. Le territoire d’Al-Kayteh : un territoire méditerranéen à la géographie favorable..... | 56 |
| 2.1. Emplacement stratégique et population importante | 56 |
| 2.2. Paysages et caractéristiques du territoire | 61 |
| 2.3. Un climat méditerranéen typique..... | 67 |
| 2.4. Un territoire aux formations géologiques variés..... | 72 |
| 3. Le secteur de l’eau à Al-Kayteh : un sujet complexe et de multiples défis..... | 77 |
| 3.1. Eau potable et domestique : un accès inéquitable au réseau public et une exploitation massive et non contrôlée des ressources en eau locales | 77 |
| 3.2. La gestion des eaux usées d’Al-Kayteh : un réseau d’égouts déficient, mettant en péril la ressource en eau | 83 |
| 4. Conclusion intermédiaire..... | 86 |
| Partie II : L’occupation du sol et la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh : état, évolution et impacts | 89 |
| Chapitre III : Les modalités de l’occupation des sols à Al-Kayteh : évolution diachronique et situation actuelle..... | 90 |
| 1. Méthodologie de l’étude | 91 |
| 1.1. Les études antérieures portant sur l’occupation du sol au Liban et à Akkar | 91 |
| 1.2. Méthodologie et source de données | 93 |
| 1.3. La méthodologie de construction de la légende..... | 96 |
| 1.3.1. Les territoires artificialisés..... | 99 |
| 1.3.2. Les territoires agricoles | 101 |
| 1.3.3. Les surfaces boisées et naturelles (SBN) | 101 |
| 2. Le territoire d’Al-Kayteh en 1962..... | 103 |
| 2.1. Méthodologie | 103 |
| 2.2. Résultats..... | 107 |
| 3. Le territoire d’Al-Kayteh en 2005..... | 123 |
| 3.1. Méthodologie | 123 |
| 3.2. Résultats..... | 125 |
| 3.2.1. Les territoires artificialisés à Al-Kayteh en 2005 | 127 |
| 3.2.2. L’évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh entre 1962 et 2005 | 131 |
| 3.2.3. Les territoires agricoles et les SBN à Al-Kayteh en 2005 | 135 |
| 4. Le territoire d’Al-Kayteh en 2017..... | 141 |
| 4.1. Méthodologie | 141 |

| | | |
|---|---|------------|
| 4.2. | Résultats..... | 143 |
| 4.2.1. | Les occupations du sol à Al-Kayteh en 2017..... | 143 |
| 4.2.2. | L'évolution des occupations du sol à Al-Kayteh entre 2005 et 2017 et entre 1962 et 2017 | 151 |
| 5. | Conclusion intermédiaire..... | 164 |
| Chapitre IV : Caractérisation de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh à partir des prélèvements réalisés sur le terrain..... | | |
| 1. | Echantillonnage : déroulement et méthodologie | 168 |
| 1.1. | La réalisation de l'échantillonnage..... | 168 |
| 1.1.1. | Conditions et déroulement | 168 |
| 1.1.2. | Difficultés rencontrées | 171 |
| 1.1.3. | Choix des échantillons | 173 |
| 1.2. | Méthodologie de l'échantillonnage | 174 |
| 1.2.1. | Données sur les échantillons prélevés..... | 175 |
| 1.2.2. | Méthode de prélèvement des échantillons..... | 179 |
| 1.2.3. | Le choix des seuils | 182 |
| 2. | Qualité microbiologique et chimique des ressources en eau prélevées à Al-Kayteh..... | 184 |
| 2.1. | Analyses microbiologiques..... | 184 |
| 2.1.1. | Méthodologie : matériels et méthodes..... | 184 |
| 2.1.2. | Marqueurs et seuils..... | 185 |
| 2.1.2.1. | Coliformes totaux (CT)..... | 186 |
| 2.1.2.2. | Coliformes thermotolérants (CTT) | 187 |
| 2.1.2.3. | Streptocoques fécaux (SF)..... | 187 |
| 2.1.3. | Détermination de l'origine d'une contamination microbiologique..... | 188 |
| 2.1.4. | Résultats des analyses microbiologiques..... | 189 |
| 2.2. | Analyses chimiques..... | 192 |
| 2.2.1. | Méthodologie : matériels et méthode..... | 192 |
| 2.2.2. | Marqueurs et seuils..... | 193 |
| 2.2.2.1. | Fluorure (F ⁻) | 194 |
| 2.2.2.2. | Chlorure (Cl ⁻)..... | 194 |
| 2.2.2.3. | Nitrate (NO ₃ ⁻) et Nitrite (NO ₂ ⁻) | 195 |
| 2.2.2.4. | Sulfate (SO ₄ ²⁻)..... | 196 |
| 2.2.2.5. | Phosphate (PO ₄ ³⁻) | 196 |

| | | |
|---|---|------------|
| 2.2.2.6. | Sodium (Na ⁺) | 197 |
| 2.2.2.7. | Potassium (K ⁺)..... | 198 |
| 2.2.2.8. | Calcium (Ca ²⁺)..... | 198 |
| 2.2.2.9. | Magnésium (Mg ²⁺) | 198 |
| 2.2.3. | Résultats des analyses chimiques..... | 199 |
| 2.3. | Résultats des analyses microbiologiques et chimiques..... | 203 |
| 3. | Comparaison de nos résultats avec les résultats des précédentes analyses réalisées à Al-Kayteh | 208 |
| 3.1. | Méthodologie | 208 |
| 3.2. | Les résultats des études réalisées à Al-Kayteh | 209 |
| 3.3. | Résultats de la comparaison..... | 214 |
| 3.4. | Discussion..... | 217 |
| 3.4.1. | Analyses microbiologiques | 218 |
| 3.4.2. | Analyses chimiques | 222 |
| 4. | Conclusion intermédiaire..... | 226 |
| Chapitre V : Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh | | |
| 229 | | |
| 1. | Méthodologie | 230 |
| 1.1. | La construction du tableau de synthèse | 230 |
| 1.1.1. | Sources de données..... | 231 |
| 1.1.2. | Les informations relatives à l'identification de la ressource | 231 |
| 1.1.3. | Les types d'occupation du sol | 232 |
| 1.1.4. | La qualité des ressources en eau..... | 235 |
| 1.1.5. | Le tableau de synthèse | 237 |
| 1.2. | L'analyse statistique | 239 |
| 2. | Résultats..... | 243 |
| 3. | Discussion | 248 |
| 3.1. | Qualité microbiologique | 248 |
| 3.1.1. | Les territoires artificialisés urbains..... | 252 |
| 3.1.2. | Les territoires agricoles | 256 |
| 3.1.3. | Les territoires mixtes | 258 |
| 3.1.4. | Les surfaces boisées et naturelles (SBN) | 261 |
| 3.1.5. | Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique des ressources en eau à Al-Kayteh..... | 262 |
| 3.2. | Qualité chimique | 266 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1. Le nitrate..... | 267 |
| 3.2.2. Le chlorure, le sulfate et le calcium | 270 |
| 3.2.3. Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité chimique des ressources en eau à Al-Kayteh..... | 271 |
| 3.3. Synthèse des impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh..... | 272 |
| 4. Conclusion intermédiaire..... | 276 |
| Conclusion générale, recommandations et perspectives | 279 |
| Bibliographie | 287 |
| Annexes | 299 |
| Annexe 1 : Article Hamze (1996)..... | 300 |
| Annexe 2 : Article Halwani et Hamze (1998) | 312 |
| Annexe 3 : Les cartes topographiques du Liban 1/20 000 (Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques de l'armée libanaise DAGG, 1963)..... | 328 |
| Annexe 4 : La carte hydrogéologie du Liban PNUD (1967)..... | 333 |
| Annexe 5 : Les statistiques quotidiennes du ministère de santé libanaise sur le choléra au Liban, l'exemple du 02/06/2023 | 334 |
| Annexe 6 : Les tableaux de l'ACM..... | 337 |

Liste des acronymes

| | |
|---------------|---|
| ACM | Analyse des Correspondances Multiples |
| ACP | Analyse en Composantes Principales |
| BM | La Banque Mondiale |
| BMAK | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| CAH | Classification Ascendante Hiérarchique |
| CCIAT | Chambre de Commerce et d'Industrie de Tripoli et Liban-Nord |
| CEREMA | Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique |
| CT | Coliformes Totaux |
| CTT | Coliformes Thermotolérants |
| CWP | Center for Watershed Protection |
| DAGG | Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques de l'armée libanaise |
| E. Coli | Escherichia Coli |
| EPA | United States Environmental Protection Agency |
| EPCI | Etablissement Public de Coopération Intercommunale |
| EU | European Union |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| HAK | Haute Al-Kayteh |
| IAEA | International Atomic Energy Agency |
| IGN | Institut Géographique National français |
| INBW | Intercommunale du Brabant Wallon |
| INSEE | L'Institut national de la statistique et des études économiques |
| LARI | Lebanese Agricultural Research Institute |
| LEM | Lebanon Economic Monitor |
| LIBNOR | Lebanese Standards Institution |
| LMSE | Laboratoire Microbiologie Santé et Environnement |
| MEE | Ministère libanais de l'Eau et de l'Énergie |
| NLWE | North Lebanon Water Establishment |
| ONG | Organisation Non Gouvernementale |

| | |
|--------------|--|
| PIB | Produit Intérieur Brut |
| PNUD | Programme des Nations Unies pour le Développement |
| PPC | Périmètres de Protection des Captages d'eau |
| R | le rapport « R » = CTT/SF |
| RGPD | Règlement Général sur la Protection des Données |
| SBN | Surfaces Boisées et Naturelles |
| SDWF | Safe Drinking Water Foundation |
| SF | Streptocoques Fécaux |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| UE | Union Européenne |
| UFC | Unité Formant Colonie |
| ULCO | Université du Littoral Côte d'Opale |
| UNESCO | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization |
| UNHCR | United Nations High Commissioner for Refugees |
| UPJV | Université de Picardie Jules Verne |

Liste des figures

| | |
|---|-----|
| Fig. 1 - L'évolution de la demande en eau au Liban entre 2010 et 2030 (Verdeil et al., 2016) | 2 |
| Fig. 2 - Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref et Bernoussi, 2007) | 19 |
| Fig. 3 - Carte des régions et des départements du Liban (réalisée par Ahmad KAMALEDDINE, 2022) | 47 |
| Fig. 4 - Carte topographique du Liban (Shaban et Hamze, 2017) | 48 |
| Fig. 5 - Les principaux cours d'eau drainant le Liban | 49 |
| Fig. 6 - La plaine et les plateaux d'Akkar | 51 |
| Fig. 7 - La plaine d'Akkar | 52 |
| Fig. 8 - Al-Kayteh dans la région d'Akkar | 55 |
| Fig. 9 - La rivière Al-Bared à proximité de son estuaire à Mhamra (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020) | 57 |
| Fig. 10 - Les limites d'Al-Kayteh | 58 |
| Fig. 11 - Les communes d'Al-Kayteh | 60 |
| Fig. 12 - La topographie d'Al-Kayteh | 62 |
| Fig. 13 - Les zones d'Al-Kayteh | 63 |
| Fig. 14 - Un aperçu de la concentration de l'habitat et les cultures de plein champ dans la Basse Al-Kayteh à Mhamra et Bebnine au loin (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020) | 64 |
| Fig. 15 - L'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq en 2020 | 66 |
| Fig. 16 - Les hautes montagnes d'Al-Kayteh (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020) | 67 |
| Fig. 17 - La distribution de la moyenne annuelle de précipitations (en mm) entre 2011 et 2016 à Al-Kayteh | 69 |
| Fig. 18 - La moyenne mensuelle des précipitations (en mm) dans les stations d'Al-Aabdé et Fnaydek entre les années 2011 et 2016 | 70 |
| Fig. 19 - Les températures mensuelles moyennes (en °C) enregistrées aux stations d'Al-Aabdeh et Fnaydeq entre 2011 et 2016 | 71 |
| Fig. 20 - La distribution de la température annuelle moyenne (en °C) à Al-Kayteh | 71 |
| Fig. 21 - Diagramme ombrothermique de Bebnine pour la période 2011-2016 | 72 |
| Fig. 22 - Carte géologique d'Al-Kayteh | 73 |
| Fig. 23 - Coupe géologique à Ouadi Jhanam | 73 |
| Fig. 24 - Formations karstiques du Jurassique moyen (j4) à Ouadi Jhanamm à Hrar | 74 |
| Fig. 25 - La station de la source Keif-Ettine à Qabaait (Ahmad KAMALEDDINE, 24/09/2020) | 78 |
| Fig. 26 - La station de la source Barghach à Hrar (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020) | 78 |
| Fig. 27 - La station du puits Mbarkine à Bzal (Ahmad KAMALEDDINE, 24/09/2020) | 79 |
| Fig. 28 - La station du puits Wata-Michmich (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020) | 79 |
| Fig. 29 - La station du puits Haj-Obeid à Mhamra (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020) | 80 |
| Fig. 30 - Exemples de puits à Al-Kayteh (Ahmad KAMALEDDINE, septembre 2020) | 81 |
| Fig. 31 - Exemples de sources à Al-Kayteh (Ahmad KAMALEDDINE, septembre 2020) | 82 |
| Fig. 32 - Exemple de transition de figurés sur arrière-plan blanc sur la carte topographique de 1962 | 105 |
| Fig. 33 - Exemples de surfaces en aplat blanc sur les cartes topographiques de 1962 | 106 |
| Fig. 34 - Qarqaf, Berqayel, Aayoun El-Ghezlane et Bzal en 1962 | 108 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 35 - Fnaydeq et Michmich en 1962 | 109 |
| Fig. 36 - Camp de Nahr el Bared en 1962 | 110 |
| Fig. 37 - Les territoires artificialisés à Al-Kayteh en 1962..... | 111 |
| Fig. 38 - La superficie (en ha) des territoires artificialisés des communes d'Al-Kayteh en ha en 1962..... | 113 |
| Fig. 39 - La plaine d'Akkar à Al-Kayteh en 1962..... | 114 |
| Fig. 40 - Les oliviers de la Moyenne Al-Kayteh | 115 |
| Fig. 41 - Les espaces herbacées herbacée au-dessus de Nahr El-Bared | 116 |
| Fig. 42 - Les broussailles (en vert clair) entre moyenne et haute Al-Kayteh | 117 |
| Fig. 43 - Ain El-Dahab en 1962..... | 118 |
| Fig. 44 - La forêt de chênes en 1962..... | 118 |
| Fig. 45 - Hrar en 1962..... | 119 |
| Fig. 46 - Chane en 1962..... | 119 |
| Fig. 47 - L'agglomération de Beit Ayoub – Qorne – Michmich – Fnaydeq en 1962..... | 120 |
| Fig. 48 - Les hautes montagnes d'Al-Kayteh en 1962 | 121 |
| Fig. 49 - Les réservoirs des montagnes d'Al-Kayteh en 1962 | 122 |
| Fig. 50 - Les types des occupations des sols à Al-Kayteh en 2005 | 125 |
| Fig. 51 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN dans les communes et les intercommunalités d'Al-Kayteh en 2005 | 126 |
| Fig. 52 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN en Basse et Moyenne Al-Kayteh, Haute Al-Kayteh et Al-Kayteh en 2005 | 127 |
| Fig. 53 - Les territoires artificialisés à Al-Kayteh en 2005..... | 128 |
| Fig. 54 - L'évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh entre 1962 et 2005..... | 131 |
| Fig. 55 – Les modes d'occupation des sols dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh en 2005 . | 137 |
| Fig. 56 – Les modes d'occupation des sols dans les territoires moyens de Haute Al-Kayteh en 2005..... | 138 |
| Fig. 57 – Les modes d'occupation des sols dans l'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq en 2005 | 139 |
| Fig. 58 - Les types des occupations du sol à Al-Kayteh en 2017 | 144 |
| Fig. 59 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN dans les communes et les intercommunalités d'Al-Kayteh en 2017 | 146 |
| Fig. 60 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN en Basse et Moyenne Al-Kayteh, Haute Al-Kayteh et Al-Kayteh en 2017 | 147 |
| Fig. 61 – Les modes d'occupation des sols dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh en 2017 . | 149 |
| Fig. 62 - Les modes d'occupation des sols dans la Haute Al-Kayteh en 2017..... | 150 |
| Fig. 63 - Evolution en ha des territoires artificialisés dans les communes d'Al-Kayeth entre les années 1962, 2005 et 2017 | 153 |
| Fig. 64 - Evolution en ha des territoires agricoles dans les communes d'Al-Kayeth entre 2005 et 2017..... | 154 |
| Fig. 65 - Evolution en ha des SBN dans les communes d'Al-Kayeth entre 2005 et 2017 | 155 |
| Fig. 66 - Les territoires artificialisés à Al-Kayteh entre 1962, 2005 et 2017 | 156 |
| Fig. 67 - Evolution en ha et en % des territoires artificialisés dans les communes d'Al-Kayteh entre 2005 et 2017..... | 157 |
| Fig. 68 - Evolution en % des territoires artificialisés dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh entre les années 1962, 2005 et 2017 | 160 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 69 - Evolution en % des territoires artificialisés dans les communes de Haute Al-Kayteh entre les années 1962, 2005 et 2017 | 161 |
| Fig. 70 - Evolution en % des territoires agricoles dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh entre 2005 et 2017..... | 161 |
| Fig. 71 - Evolution en % des territoires agricoles dans les communes de Haute Al-Kayteh entre 2005 et 2017..... | 162 |
| Fig. 72 - Evolution en % des SBN dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh entre 2005 et 2017..... | 162 |
| Fig. 73 - Evolution en % des SBN dans les communes de Haute Al-Kayteh entre 2005 et 2017..... | 163 |
| Fig. 74 - Les points d'échantillonnage de l'eau | 175 |
| Fig. 75 - Le prélèvement des échantillons | 180 |
| Fig. 76 - La conservation des échantillons dans des enceintes thermostatées réfrigérées..... | 181 |
| Fig. 77 - Carte de contamination microbiologique des échantillons | 191 |
| Fig. 78 - Carte de la contamination chimique (en mg/l) des échantillons | 203 |
| Fig. 79 - Le nombre de CTT en UFC/100ml et la concentration en nitrate en mg/l des échantillons | 207 |
| Fig. 80 - Les valeurs propres non nulles et le % d'inertie correspondant | 240 |
| Fig. 81 - La carte factorielle des variables actives et supplémentaires (modalités)..... | 244 |
| Fig. 82 - La carte factorielle des sites de prélèvement (observations)..... | 247 |
| Fig. 83 - Résumé de la carte factorielle des observations..... | 249 |
| Fig. 84 - Ain El-Dahab en 2020..... | 253 |
| Fig. 85 - Borj El-Arab en 2020 | 254 |
| Fig. 86 - Aayoun El-Ghezlane en 2020 | 255 |
| Fig. 87 - La station BERKAYEL-1 en 2020..... | 257 |
| Fig. 88 - La station Houweich-1 en 2020 | 257 |
| Fig. 89 - Le site de la source de KARKAF-2 (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020) | 260 |
| Fig. 90 - Des bétails dans les hautes montagnes d'Akkar à Fnaydeq (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020) | 261 |
| Fig. 91 - Les sites de MHAMRA-1 et de MHAMRA-2, Mhamra en 2020..... | 263 |
| Fig. 92 - Les trois groupes d'occupation du sol impactant la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh..... | 265 |
| Fig. 93 - Représentation des concentrations des éléments chimiques sur le premier plan factoriel l'ACM (variables numériques supplémentaires)..... | 266 |
| Fig. 94 - Les concentrations en nitrates des observations (échantillons) de la carte factorielle des observations (F1, F2)..... | 267 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tab. 1 - Comparaison entre les études internationales | 27 |
| Tab. 2 - les méthodologies mises en oeuvre dans les études retenues | 30 |
| Tab. 3 - Synthèse sur les études antérieures portant sur la qualité des ressources en eau d'Akkar..... | 37 |
| Tab. 4 - Les communes d'Al-Kayteh | 58 |
| Tab. 5 - Les types et les sous-types d'occupation du sol choisis..... | 98 |
| Tab. 6 - La superficie des territoires artificialisés d'Al-Kayteh en 1962 | 111 |
| Tab. 7 - La légende de la carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 2005 | 124 |
| Tab. 8 - La superficie des territoires artificialisés à Al-Kayteh en 2005 | 128 |
| Tab. 9 - La superficie des territoires artificialisés à Al-Kayteh et leur évolution en ha et en % entre 1962 et 2005..... | 131 |
| Tab. 10 - La superficie des territoires agricoles et des SBN à Al-Kayteh en 2005 | 135 |
| Tab. 11 - La légende de la carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 2017 | 141 |
| Tab. 12 - La superficie des territoires artificialisés, des territoires agricoles et des SBN à Al-Kayteh en 2017 | 144 |
| Tab. 13 - Evolution en ha et en % des territoires artificialisés dans les communes d'Al-Kayeth entre les années 1962, 2005 et 2017..... | 151 |
| Tab. 14 - Evolution des territoires agricoles et des SBN en ha et en % entre 2005 et 2017 . | 153 |
| Tab. 15 - Principales caractéristiques des prélèvements..... | 175 |
| Tab. 16 - Caractéristiques hydrogéologiques des sites de prélèvement..... | 177 |
| Tab. 17 - Les résultats des analyses microbiologiques | 189 |
| Tab. 18 - Tableau des seuils de contamination chimique | 193 |
| Tab. 19 - Les résultats des analyses chimiques..... | 199 |
| Tab. 20 - Résultats de marqueurs présentant une contamination microbiologique ou chimique | 203 |
| Tab. 21 - Résultats des marqueurs microbiologiques choisis dans toutes les études | 210 |
| Tab. 22 - Résultats des marqueurs chimiques choisis dans toutes les études | 212 |
| Tab. 23 - Les résultats de la comparaison (analyses microbiologiques)..... | 215 |
| Tab. 24 - Les résultats de la comparaison (analyses chimiques) | 216 |
| Tab. 25 - Les informations identifiants la nature de la ressource | 232 |
| Tab. 26 - Les types d'occupation du sol | 232 |
| Tab. 27 - La qualité des ressources en eau..... | 236 |
| Tab. 28 - Légende des résultats des analyses microbiologiques..... | 237 |
| Tab. 29 - Le tableau de synthèse des items retenus | 237 |
| Tab. 30 - Tableau de coordonnées et de contributions des variables actives (et de ses modalités) dans l'espace factoriel | 240 |
| Tab. 31 - Tableau des coordonnées et valeurs tests des variables illustratives..... | 241 |
| Tab. 32 - Les coordonnées et les contributions des observations sur les axes F1 et F2 | 244 |
| Tab. 33 - Les types des occupations du sol et la qualité des égout des sites de prélèvements | 249 |
| Tab. 34 - Synthèse sur l'impact des zones urbaines sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh..... | 263 |

| | |
|---|-----|
| Tab. 35 - Synthèse sur l'impact des territoires mixtes et urbains peu denses sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh | 264 |
| Tab. 36 - Synthèse des impacts de l'occupation des sols sur la qualité chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh..... | 272 |

Introduction générale

L'eau est une ressource précieuse et d'une importance vitale pour le Liban. La ressource y est considérée comme relativement abondante, en raison d'une géologie principalement karstique et de précipitations annuelles moyennes avoisinant les 855 mm, ce qui a valu au Liban une réputation de "château d'eau" (Verdeil *et al.*, 2016). Toutefois, malgré cette apparente richesse, la gestion de l'eau au Liban doit faire face à des défis majeurs, principalement en raison de l'impact des différentes activités humaines sur la disponibilité et la qualité de la ressource.

Les usages de l'eau au Liban sont divers, l'agriculture représente le secteur le plus consommateur d'eau avec environ 72% des ressources disponibles, 26% pour les usages domestiques et 6% pour l'industrie (Shaban, 2017). Cependant, les usages domestiques sont en augmentation au détriment d'autres secteurs, notamment l'agriculture (Halwani, 2008). Mais si pour l'instant la demande en eau au Liban reste en deçà des ressources exploitables, cet équilibre demeure très fragile.

En effet, selon les prévisions optimistes du Ministère libanais de l'Eau et de l'Énergie (MEE) pour l'horizon 2030, la demande en eau devrait augmenter en raison de la croissance démographique mais de manière mesurée grâce au développement des initiatives visant à améliorer l'efficacité de la distribution d'eau potable et des techniques d'irrigation (Verdeil *et al.*, 2016). Cependant, en l'absence de ces mesures, la Banque Mondiale (BM) estime que le Liban pourrait faire face à un déficit en eau considérable d'ici la fin de la décennie (Fig. 1) (Verdeil *et al.*, 2016). De plus, le changement climatique, qui s'est déjà traduit par une augmentation de la température de 1,6 degré au Liban, aggrave encore davantage les enjeux

sécuritaires liés à la disponibilité en quantité de la ressource, ajoutant ainsi un défi supplémentaire (Shaban, 2019).

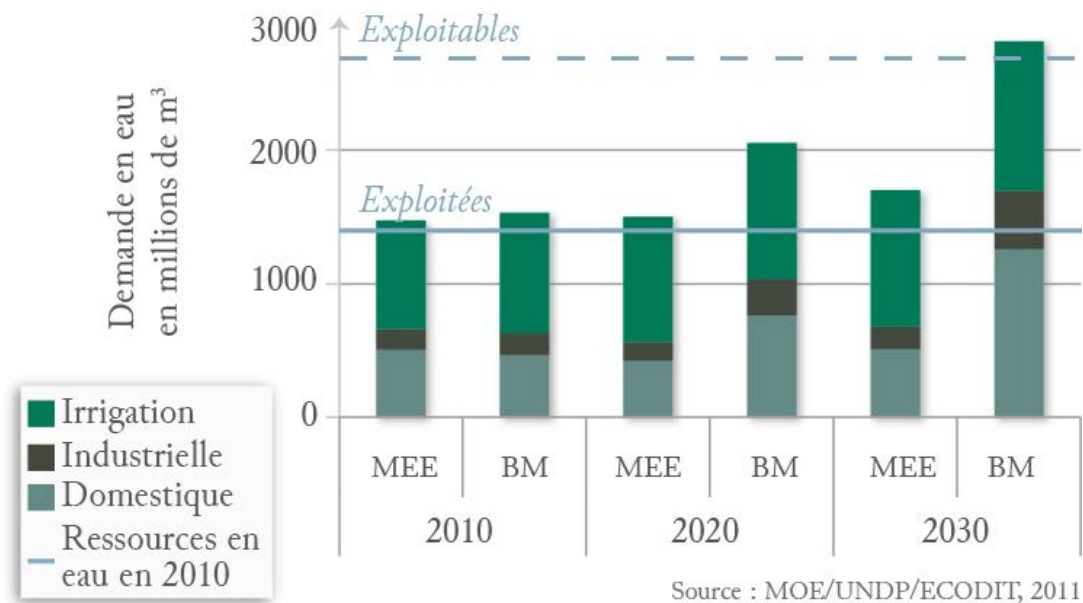


Fig. 1 - L'évolution de la demande en eau au Liban entre 2010 et 2030 (Verdeil *et al.*, 2016)

La question du déficit entre la demande et l'offre en eau prend aujourd'hui une place prépondérante dans les débats au Liban, suscitant une attention particulière à l'échelle nationale. Cette préoccupation découle principalement de la réduction du taux d'approvisionnement en eau par habitant, une diminution dépassant les 60%, plaçant ainsi le Liban parmi les pays confrontés à un stress hydrique aigu (Shaban, 2019). Cette situation inquiétante s'aggrave malheureusement en raison de l'absence persistante d'une stratégie claire visant à résoudre ce problème, une lacune qui perdure depuis les années 1990 (Trésor-International, 2022).

En plus de cette forte pression exercée sur la ressource se posent de graves problèmes de pollution. Les activités agricoles, domestiques et industrielles sont responsables de la libération de polluants chimiques, de métaux lourds et de bactéries dans l'eau (Halwani, 2008), qu'il s'agisse des eaux douces superficielles ou des eaux douces souterraines.

En ce qui concerne les eaux douces superficielles, le Liban est drainé par 15 rivières pérennes. Ces rivières constituent la plus grande partie des ressources en eau superficielles du pays. Malheureusement, toutes ces rivières sont gravement polluées (Shaban, 2019 ; Dagher *et al.*, 2021). La contamination est principalement attribuée à des indicateurs de contamination fécale, en particulier au niveau des estuaires (Dagher *et al.*, 2021). Cette situation exige de toute urgence la mise en place d'une gestion adéquate des eaux usées pour préserver la sécurité et la durabilité des rivières et des écosystèmes du Liban (Dagher *et al.*, 2021).

Outre les rivières, le Liban compte parmi ses ressources en eau douce superficielles le réservoir de Qaraoun, le plus grand du pays avec une capacité de 220 millions de mètres cube. Cependant, la qualité de l'eau de ce réservoir est aujourd'hui également gravement détériorée, avec la présence signalée de bactéries toxiques (Shaban, 2019).

De plus, le débit des rivières et des sources du Liban a diminué aujourd'hui d'environ 55% à 60%, ce qui a entraîné une pénurie d'approvisionnement en eau évaluée de 50% à 55% (Shaban, 2019). Le niveau d'eau du réservoir de Qaraoun a pour sa part également chuté d'environ 45% à 48% (Shaban, 2019).

Quant aux eaux souterraines, elles représentent environ 18% des ressources en eau du Liban (Verdeil *et al.*, 2016). Elles sont largement exploitées et utilisées à différentes fins. Ces eaux alimentent aussi de nombreux cours d'eau grâce aux sources karstiques qui couvrent environ 70% de la superficie du pays (PNUD, 1967). En outre, la fonte printanière et estivale de la couverture neigeuse dans les montagnes du Liban constitue également une source cruciale contribuant à la recharge des réserves en eau. Mais cette géologie spécifique du Liban rend les eaux souterraines vulnérables à la pollution (Halwani, 2008).

Au fil du temps, le volume des eaux souterraines dans les principaux aquifères du Liban a diminué de 35% à 40%, entraînant un abaissement de la nappe phréatique de 30 à 35 mètres et une diminution de son débit de pompage (Shaban, 2019). En 2016, les eaux souterraines couvraient 50% des besoins de l'agriculture et 80% des besoins en eau potable du Liban (Verdeil *et al.*, 2016).

Les eaux souterraines du Liban, en particulier dans les aquifères peu profonds, sont généralement contaminées (Baalbaki *et al.*, 2019). Les contaminants, qu'ils soient microbiologiques ou chimiques, proviennent principalement du ruissellement des eaux contaminées par les engrais et les pesticides agricoles, ainsi que de l'infiltration des eaux usées des fosses septiques vers les nappes phréatiques (Baalbaki *et al.*, 2019).

La pollution des ressources en eau est ainsi un problème majeur au Liban, englobant des aspects chimiques, physiques et bactériologiques. Les systèmes d'égouts défectueux entraînent des infiltrations dans le sol et la pollution des eaux (Trésor-International, 2022). La qualité de l'eau utilisée en agriculture, en particulier pour l'irrigation, a un impact significatif sur la qualité de la production agricole ainsi que sur la santé des consommateurs. En effet, la présence de résidus de métaux lourds dans l'eau se reflète dans les produits agricoles, tandis que l'utilisation d'eau non traitée entraîne des contaminations bactériennes des légumes et des fruits (Trésor-International, 2022).

Cette situation alarmante met en péril la santé des habitants et a un impact économique significatif, en particulier sur le secteur agricole et le PIB. De plus, elle entraîne des charges financières supplémentaires pour les consommateurs, touchant toute la population, en particulier les plus démunis et les plus vulnérables. Face à ces défis complexes, il est impératif de mettre en place des mesures urgentes pour préserver et restaurer la qualité et la quantité des ressources en eau au Liban, garantissant ainsi un avenir plus durable pour le

pays. Confronté à cette situation difficile, notre thèse s'inscrit dans une perspective de gestion et d'aménagement durables de l'urbanisation et de l'agriculture au Liban, tout en visant à améliorer la qualité des ressources en eau souterraines.

Ainsi, pour aborder plus précisément la question de la pollution microbiologique et chimique des ressources en eau au Liban, nous avons élaboré une problématique centrée sur l'identification des impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau dans la région vulnérable d'Akkar, située au nord du Liban. Pour ce faire, nous utiliserons l'exemple du territoire d'Al-Kayteh, un territoire peu étudié qui occupe la partie sud d'Akkar. Cette approche revêt une importance particulière en raison des caractéristiques spécifiques de notre terrain d'étude et des questions qui ont suscité notre recherche.

En effet, Akkar se distingue en tant que région rurale, caractérisée par une population à faibles revenus, vulnérable et marginalisée, notamment en ce qui concerne la faible attention portée par les autorités de l'Etat. L'agriculture y constitue l'activité économique principale, notamment dans la plaine d'Akkar, qui est la deuxième plus grande région agricole du Liban.

La région d'Akkar est réputée pour la qualité de ses eaux, mais durant la période 1976-1992, la consommation de l'eau a engendré beaucoup de problèmes sanitaires (Halwani *et al.*, 2002). Des études antérieures se penchant sur la caractérisation de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau dans la région ont mis en évidence des taux de contamination très élevés, en particulier dans la plaine, révélant ainsi une situation préoccupante. Ces études ont montré que la contamination des ressources en eau d'Akkar se manifeste principalement sous forme de pollution chimique due aux engrais et aux pesticides utilisés dans les pratiques agricoles, ainsi que sous forme de contamination microbiologique liée aux problèmes de gestion des eaux usées. De nombreux villages disposent en effet de

réseaux d'égouts obsolètes ou n'ont pas un réseau, ce qui les pousse à l'utilisation des fosses septiques.

En ce qui concerne la disponibilité en eau, on trouve qu'en 2016, moins de 40% des ménages d'Akkar étaient raccordés au réseau d'eau potable de l'Etat (Verdeil *et al.*, 2016). Les municipalités et les habitants ont donc mis en place des solutions individuelles, telles que l'acheminement de l'eau depuis des sources éloignées à des fins domestiques, voire l'exploitation illégale de puits à des fins individuelles ou collectives. Malheureusement, la qualité de la majorité des ressources en eau consommées n'est pas contrôlée dans la région.

Cette situation représente une préoccupation vitale et d'une urgence extrême. La région d'Akkar est fortement peuplée, et la majorité de la population utilise de l'eau contaminée pour la boisson et l'irrigation. Cette réalité engendre de graves problèmes de santé et économiques, en particulier chez les nourrissons et les personnes âgées. Ainsi, Akkar illustre et représente bien les problèmes de la pollution de l'eau au Liban déjà évoqués.

Les précédentes études sur le sujet et la région ont conclu à des taux très élevés de contamination de l'eau. Cependant, elles n'ont pas abordé la question des impacts de l'occupation des sols sur ce terrain spécifique. Ainsi, l'une des lacunes notables dans ces études réside dans l'identification et la compréhension de l'origine de ces contaminations. C'est précisément cette question qui a suscité notre intérêt et motivé notre recherche, adoptant une approche géographique et d'aménagement du territoire.

Le sujet de la thèse a été proposé au doctorant par son ancien enseignant à l'Université Libanaise M. AbdulRahim IBRAHIM, qui est un enseignant en qualité HDR à l'Université Libanaise et un élu municipal à Bebnine (la commune la plus peuplée d'Al-Kayeth et d'Akkar). Le projet a été élaboré par l'initiative personnelle du doctorant qui a obtenu une bourse de mobilité de la part de l'Université de Lille et de la Lebanese Association for

Scientific Research (LAsER) alors que le financement des analyses microbiologiques et chimiques a été assuré par la Lebanese Development Association, ces deux derniers organismes étant des associations privées basées à Tripoli.

Problématique, objectifs et hypothèses de travail

Cette problématique encore non explorée à l'échelle du Liban constitue une entrée originale à l'étude de la question de la pollution de l'eau dans ce pays. L'objectif principal de la thèse est ainsi l'évaluation des risques liés à l'occupation du sol sur la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh. L'étude portera sur l'identification de la nature de l'occupation des sols et son évolution, afin d'envisager les impacts des zones urbaines, agricoles et naturelles sur la qualité microbiologique et chimique de la ressource en eau.

Nous ferons la distinction entre deux types de variables : les variables dépendantes et les variables indépendantes. Une variable dépendante est la réponse fournie par le sujet, alors qu'une variable indépendante est une caractéristique du sujet, de son environnement physique ou social ou d'une tâche qui est manipulée, elle est dite indépendante car elle ne dépend pas du sujet et est manipulée par le chercheur (Hamon, 2015). Dans notre problématique, la variable dépendante est la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh, tandis que la variable indépendante est l'occupation du sol.

Les objectifs de la thèse appliqués au territoire d'Al-Kayteh sont les suivants :

- Délimiter et caractériser le terrain d'étude, ainsi qu'une partie de ses communes,
- Caractériser les grands types d'occupation du sol à travers l'étude de ses caractéristiques géographiques et historiques, et étudier leur répartition et leur évolution, notamment celles en lien avec l'urbanisation,
- Identifier les problèmes de gestion des eaux usées,
- Caractériser la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau,

- Etudier l'évolution de la pollution de l'eau en réalisant une comparaison diachronique entre nos résultats et les résultats des études antérieures,
- Identifier les types d'occupation des sols ainsi que les activités humaines qui ont des impacts sur la qualité microbiologique et chimique de la ressource en eau,
- Proposer des solutions pour une gestion durable des problèmes de pollution d'eau à Al-Kayteh, à Akkar et au Liban.

En nous appuyant sur les connaissances scientifiques portant sur les impacts de l'occupation des sols sur la qualité de la ressource en eau à Akkar, nous avons orienté notre recherche en formulant plusieurs hypothèses de travail, à savoir pour les principales :

- Les zones urbaines ont un impact sur la qualité microbiologique de la ressource,
- Les territoires agricoles ont un impact sur la qualité chimique de la ressource,
- Les surfaces boisées et naturelles n'ont pas d'impact significatif sur la qualité microbiologique ou chimique de la ressource.

Des hypothèses secondaires sont également formulées :

- Le territoire d'Al-Kayteh connaît un développement urbain,
- L'impact des cultures de plein champ est plus significatif que celui des vergers sur la qualité chimique d'Al-Kayteh.

Cette recherche vise à transcender le cadre théorique et scientifique, car elle touche directement à la santé de la population, à l'environnement et à la durabilité des ressources en eau dans une région vulnérable et marginalisée. Elle espère également contribuer à mieux comprendre les interactions complexes entre les activités humaines, l'occupation des sols et la qualité de l'eau, ouvrant ainsi la voie à des solutions durables pour une région confrontée à des enjeux majeurs en matière de développement et de pollution des ressources en eau.

En somme, notre étude vise à combler une lacune de recherche à l'échelle régionale, à apporter des réponses concrètes aux problèmes de contamination de l'eau et à contribuer à des solutions durables pour la région d'Akkar.

Approche méthodologique générale

Notre démarche méthodologique d'ensemble consiste d'abord en une étude cartographique diachronique de l'occupation du sol (1962, 2005, 2017), au prélèvement d'échantillons d'eau dans des puits et à l'émergence de sources, en vue d'une analyse chimique et microbiologique. Nous avons compilé ensuite toutes les informations relatives à l'occupation des sols sur les sites de prélèvements et à la qualité microbiologique et chimique des eaux prélevées. Enfin, nous avons mené plusieurs analyses statistiques en utilisant différentes méthodes, aboutissant à l'identification de la méthode la plus adéquate, à savoir l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM), pour mettre en évidence les liens potentiels entre les variables en jeu et présenter nos résultats. Une approche méthodologique détaillée sera proposée au sein des chapitres en fonction des différentes investigations menées.

Plan de la thèse

Nous avons structuré notre thèse en deux parties et cinq chapitres de la manière suivante :

La première partie de la thèse fait un point sur la question de la pollution de l'eau et présente le cadre géographique de la thèse, elle est formée de deux chapitres. Dans le premier chapitre, nous procéderons à l'exploration de l'état de l'art de notre sujet en mettant en lumière des concepts clés tels que la pollution microbiologique et chimique des eaux souterraines, leur vulnérabilité et les impacts de l'occupation du sol sur leur qualité, et nous explorerons les études antérieures sur les impacts de l'occupation des sols sur la qualité des ressources en eau à Akkar et à l'étranger. Enfin, nous présenterons en résumé les étapes de la méthodologie.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de notre terrain d'étude. Nous présenterons la région d'Akkar, en évoquant le découpage administratif du Liban et en décrivant la géographie de la région. Nous justifierons ainsi notre choix du terrain, à savoir Al-Kayteh. Ensuite, nous présenterons en détail le territoire d'étude. Cette partie englobera des éléments tels que l'emplacement d'Al-Kayteh, les communes qui le composent, son climat, sa géologie et l'état et les problèmes du secteur de l'eau de ce territoire.

Ensuite, nous présenterons dans la deuxième partie, composée de trois chapitres, les deux variables examinées dans la thèse et le lien entre elles : l'occupation du sol et la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh. Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de l'occupation du sol à Al-Kayteh. Nous détaillerons dans ce chapitre la méthodologie que nous avons employée, en précisant les sources des données utilisées pour examiner l'état et l'évolution des occupations des sols à Al-Kayteh. Cette analyse portera sur les territoires artificialisés, les territoires agricoles, ainsi que les surfaces boisées et naturelles à Al-Kayteh, en explorant leur état et leur évolution entre les années 1962, 2005 et 2017.

Le quatrième chapitre se penchera sur la caractérisation de la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh. Dans ce chapitre, nous décrirons notre méthodologie d'échantillonnage et le processus de sélection des échantillons d'eau. Nous présenterons ensuite la méthodologie d'analyse utilisée, les marqueurs analysés et les résultats des analyses microbiologiques et chimiques des échantillons prélevés à Al-Kayteh. Nous effectuerons ensuite une comparaison de nos résultats avec les résultats des études antérieures réalisées dans les communes d'Al-Kayteh.

Enfin, le cinquième chapitre traitera des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh. Nous expliquerons en détail notre méthodologie pour évaluer ces impacts, qui repose sur des analyses statistiques, en particulier la méthode de l'Analyse

des Correspondances Multiples (ACM). Nous présenterons les résultats de cette analyse statistique, en discutant séparément la variation de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh en fonction des types d'occupation des sols. Enfin, nous synthétiserons les impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh.

**Partie I : Un état des lieux : pollution de l'eau et
occupation du sol, et cadre géographique de la recherche**

**Chapitre I : La pollution de l'eau et les impacts de l'occupation
du sol sur les ressources en eau**

1. Etat de l'art

Dans cette section, nous entreprendrons une exploration des connaissances fondamentales qui éclaireront notre recherche sur la pollution de l'eau. Notre démarche commencera par la présentation du problème de la pollution microbiologique et chimique des ressources en eau. Ensuite, nous aborderons la question de la vulnérabilité des ressources en eau, celle des impacts de l'occupation du sol sur ces ressources. Enfin, nous procéderons à une étude bibliographique concernant les recherches internationales traitant des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau, puis nous examinerons et analyserons les études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar.

1.1. La pollution microbiologique et chimique des eaux-souterraines

L'eau est un élément fondamental de la vie, elle occupe une place centrale au sein de la société humaine, l'environnement et les écosystèmes. Elle joue un rôle vital dans le développement durable, l'économie, la production d'énergie, l'agriculture et en fin de compte, dans la survie de l'humanité (FAO, 2019). Parmi les ressources en eau les plus importantes, on trouve les eaux souterraines, celles-ci constituant un élément important du cycle de l'eau et représentant 98% des réserves d'eau douce non gelée de la planète (UNESCO, 2022).

En outre, ces eaux sont généralement de meilleure qualité que les eaux de surface et sont fréquemment utilisées pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable (Hamze *et al.*, 2010 ; Environnement Poitou Charentes, 2023). Ainsi, elles représentent la principale source d'eau douce pour l'humanité, et leur demande n'a cessé de croître en raison de la croissance démographique, de l'agriculture intensive et de l'industrialisation (IAEA, 2023).

Aujourd'hui, la pollution de cette ressource vitale est devenue un problème mondial, nécessitant une évaluation constante des politiques de gestion des ressources en eau pour faire face à cette crise et garantir l'avenir des générations futures. Cette nécessité est d'autant plus urgente que la demande en eau augmente tandis que l'offre diminue partout dans le monde, même dans les régions dotées de ressources en eau abondantes (Crane et Moore, 1984). Cela affecte tant les pays développés que les pays en développement (Crane et Moore, 1984), et la contamination de l'eau est devenue un problème important dans le monde entier (Sharma et Bhattacharya, 2017), notamment avec la demande croissante des secteurs de l'agriculture et de l'industrie, qui s'ajoute à la demande d'eau potable et domestique (Crane et Moore, 1984).

Le sol joue un rôle dans la purification de l'eau, en éliminant les bactéries, les virus et les produits chimiques alors que l'eau s'infiltré (SDWF, 2017). Cependant, l'efficacité du sol à éliminer les contaminants varie, et les contaminants peuvent dépasser la capacité du sol à les retenir (SDWF, 2017). Ainsi, la pollution des eaux souterraines se produit lorsque des substances nocives, telles que des produits chimiques ou des micro-organismes, altèrent leur qualité, provoquant ainsi leur dégradation (Denchak, 2018). Plus précisément, la pollution de l'eau souterraine se manifeste lorsque les niveaux de contaminants dépassent les normes de qualité établies par les autorités compétentes.

La contamination de l'eau peut comprendre des facteurs d'origine naturelle (Chaudhry et Malik, 2017), mais d'ordinaire, l'eau souterraine est dépourvue de microorganismes qui provoquent des maladies (HAMZE *et al.*, 2010). En effet, la plus grande menace pour la qualité de l'eau est posée par les sources ponctuelles humaines, telles que l'exploitation minière, le développement urbain et l'agriculture (Chaudhry et Malik, 2017). Les pays développés souffrent davantage de problèmes liés aux rejets chimiques, tandis que les pays en

développement sont davantage touchés par les sources agricoles (Sharma et Bhattacharya, 2017), bien que nous allons également observer ce phénomène sur notre terrain.

Par ailleurs, les polluants peuvent être de différents types et avoir différentes propriétés, tels les produits chimiques et les métaux lourds, les bactéries, etc (Chaudhry et Malik, 2017). La pollution de l'eau peut entraîner des pathologies d'origine infectieuse (gastro-entérites, hépatites virales, légionelloses) ou liées à la pollution chimique (Santé Publique France, 2023).

Les pollutions dites diffuses proviennent d'épandages de produits solides ou liquides à la surface du sol sur des superficies importantes : par exemple engrais, herbicides, pesticides...

Les pollutions ponctuelles, par contre, proviennent d'une surface délimitée, faible vis-à-vis du bassin versant des eaux souterraines ou de surface, et définie dans un espace géographique (UPJV, 2002). Elles sont qualifiées quelquefois d'accidentelles, mais elles ont le plus souvent pour origine des fuites sur des conduites ou des cuves, ou l'infiltration de lixiviats d'un dépôt solide. Dans certains cas, le nombre de pollutions ponctuelles peut être tel que la pollution devient généralisée (UPJV, 2002).

Ainsi, les contaminants microbiens comprennent des pathogènes tels que les bactéries, les virus, et des parasites tels que les protozoaires microscopiques et les vers (Chaudhry et Malik, 2017 ; Sharma et Bhattacharya, 2017). Ces organismes vivants peuvent être propagés par les déchets humains et animaux (Sharma et Bhattacharya, 2017). Lorsque de l'eau fécale contenant des agents pathogènes atteint les profondeurs de la terre, elle la rend impropre à la consommation (Chaudhry et Malik, 2017). Les principales sources de cette pollution comprennent les déchets d'origine humaine et animale (OMS, 2017). Elle découle généralement du rejet d'eaux usées non traitées qui contiennent des matières fécales et des déchets organiques (Surfrider Foundation Europe, 2016).

La consommation de l'eau polluée par des micro-organismes peut entraîner des gastro-entérites aiguës, qui peuvent être à l'origine de complications telles que la dyspepsie ou des complications graves, comme l'arthrite réactive, le syndrome de Guillain-Barré et le syndrome hémolytique urémique (Santé Publique France, 2023). Elle peut également entraîner des hépatites virales A ou E, des ulcères ou des cancers de l'estomac liés à *Helicobacter pylori*, des légionelloses, surtout chez les personnes immunologiquement fragiles, etc. (Santé Publique France, 2023).

D'autre part, des contaminants chimiques peuvent être identifiés dans l'eau potable. Les contaminants chimiques pour lesquels des études épidémiologiques ont suggéré un risque lié à leur présence dans l'eau potable comprennent beaucoup d'éléments chimiques comme l'aluminium, l'arsenic, les sous-produits de désinfection, le fluor, le plomb, les nitrates, les pesticides, etc (Calderon, 2000).

La source de ces contaminants peut provenir de sources de pollution ponctuelles et diffuses, ou être d'origine naturelle. Les contaminants d'origine naturelle sont généralement le résultat du lessivage des formations géologiques, alors que les sources ponctuelles de contaminants de l'eau potable comprennent le rejet direct de produits chimiques provenant des eaux usées domestiques et industrielles (Santé Canada, 2020). D'autres sources de pollution comprennent les ruissellements issus de l'application terrestre de produits chimiques ou le lessivage des décharges de déchets solides enfouis (OMS, 2017). Enfin, les pratiques minières ou les opérations de fonderie peuvent augmenter les concentrations de métaux dans les sources d'eau par le biais de la déposition atmosphérique ou de la manipulation inadéquate des résidus miniers (Calderon, 2000).

Les pathologies liées à la pollution chimique dépendent de nombreux facteurs tels que le type de polluant, la dose d'exposition, et la durée d'exposition (Santé Publique France, 2023). Les

maladies qui représentent la plupart des pathologies associées aux polluants chimiques de l'eau de distribution observables aujourd'hui comprennent des intoxications ponctuelles, le plus souvent liées à une détérioration de la qualité de l'eau à l'intérieur des bâtiments (relargage de plomb ou de cuivre), mais surtout des cancers dus à des expositions chroniques (plus de 10 ans et jusqu'à 40 ans) (Santé Canada, 2020 ; Santé Publique France, 2023). De même, on trouve par exemple que les nitrates provoquent des maladies chez les enfants, appelées syndrome du bébé bleu, et le fluorure provoque des problèmes dentaires et squelettiques (Chaudhry et Malik, 2017).

1.2. La vulnérabilité des eaux souterraines

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par Jean Margat dans les années 60 (Amharref et Bernoussi, 2007). Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur l'hypothèse que l'environnement physique peut fournir aux ressources en eaux souterraines un certain degré de protection contre les impacts naturels et humains, et que certains aquifères sont plus vulnérables aux impulsions extérieures que d'autres (Gourcy, 2022).

Cependant, il existe plusieurs types de vulnérabilité comme la vulnérabilité intrinsèque, la vulnérabilité à la sécheresse, la vulnérabilité au changement climatique, la vulnérabilité aux inondations, la vulnérabilité à un contaminant spécifique. En effet, toutes les ressources en eau abordées dans notre thèse sont des eaux souterraines. On parle dans cette section de la vulnérabilité intrinsèque, qui est représentée par la capacité donnée à l'eau (et polluants associés) située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau.

Dans le milieu souterrain, l'évolution des polluants est significativement plus lente que celle observée en surface. Le temps nécessaire au transfert dépend principalement de l'épaisseur de la zone non saturée, qui correspond à la profondeur de la surface piézométrique, et la

perméabilité du réservoir (fissuration) ainsi que les caractéristiques du polluant (Fig. 2). Par exemple, les terrains présentant une perméabilité interstitielle élevée, comme les sables et les grès, ont des temps de transfert très courts, tandis que les roches à perméabilité fissurée, telles que les calcaires, ont des temps de transfert plus longs.

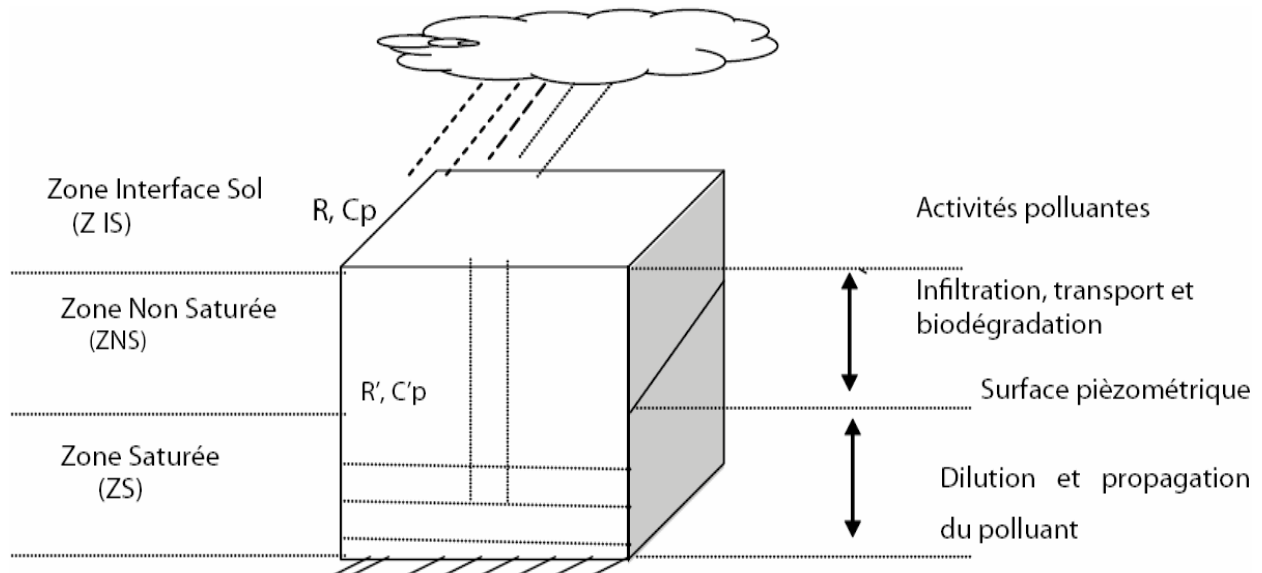


Fig. 2 - Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref et Bernoussi, 2007)

La partie de l'aquifère qui contient la nappe d'eau est appelée la "zone saturée", car tous les pores des roches sont remplis d'eau. C'est dans cet espace que s'effectue l'écoulement de la nappe. En revanche, le reste de l'aquifère est qualifié de "zone non saturée" : il subsiste des vides dans la roche, et l'eau est présente principalement sous forme d'humidité. Ainsi, après avoir traversé la zone interface du sol, les polluants s'infiltrent dans la zone non saturée, qui correspond à l'espace entre la surface du sol et la nappe d'eau souterraine. Finalement, ils atteignent la zone saturée, qui représente la nappe phréatique souterraine (UPJV, 2002).

La gestion des risques de pollution des eaux souterraines requiert une protection efficace des zones proches des captages, garantissant ainsi la sécurité sanitaire de l'eau. Dans ce contexte, les Périmètres de Protection des Captages d'eau (PPC) jouent un rôle essentiel dans la prévention et la réduction des risques de pollution qui pourraient affecter la qualité de l'eau

prélevée (Ministère de la santé et de la prévention français, 2009). Ainsi, lorsque on étudie les impacts de l'occupation des sols sur la qualité des ressources en eau, il est essentiel de ne pas se restreindre uniquement à l'analyse du type d'occupation des sols au niveau du site de prélèvement. Il est tout aussi important d'examiner les types d'occupation des sols environnants à proximité de la station de prélèvement.

En France, les PPC sont définis dans le code de la santé publique en se basant sur des critères hydrogéologiques et hydrologiques (art. L.1321-2 et R. 1321-13). Ces périmètres représentent un outil juridique et d'aménagement rendu obligatoire par la loi pour la protection de la qualité des ressources en eau. Ils délimitent l'espace réglementairement réservé autour d'un point de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine avec consultation d'un hydrogéologue agréé pour déterminer le périmètre de protection. L'objectif principal du PPC est de prévenir les risques de pollution au niveau des points de prélèvement d'eau potable.

Au Liban, le projet de norme libanaise sur l'eau potable (161:2016) établie par la Lebanese Standards Institution (LIBNOR) en 2016 définit le "Harm el-bir حرم البئر" (traduisible par "le périmètre - ou le sanctuaire - du puits") comme la zone située dans un rayon de 40 coudées (environ 20 mètres) autour du puits (LIBNOR, 2016). Malheureusement, en dehors de cette courte définition, nous n'avons pas trouvé d'information liée aux périmètres de protection dans la législation libanaise. Néanmoins, cette question sera abordée dans le chapitre V de notre thèse, où nous présenterons notre méthodologie pour le choix des types d'occupation du sol autour des sites de prélèvements.

Dans la même optique, la vulnérabilité des eaux souterraines est un facteur essentiel à prendre en compte lors de l'évaluation des risques de pollution. Différentes méthodes ont été développées pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de l'eau. Parmi ces méthodes, on distingue notamment les modèles complexes intégrant les processus

physiques, chimiques et biologiques dans la zone saturée et les méthodes pondérées prenant en compte différents critères influençant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998).

Dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères sont largement reconnues et couramment utilisées (Gogu et Dassargues, 2000). Ces méthodes offrent l'avantage de prendre en considération l'importance relative de chaque critère dans l'évaluation globale de la vulnérabilité de la nappe (Gogu et Dassargues, 2000). Plusieurs méthodes de cartographie de la vulnérabilité ont été développées, parmi lesquelles figurent EPIK (pour les milieux karstiques), DISCO, GOD, DRASTIC, et bien d'autres. Les indicateurs et leur pondération varient d'une méthode à l'autre.

Ces méthodes s'appuient sur différents indicateurs tels que la profondeur de la nappe, le taux d'infiltration, la topographie, le degré de développement du réseau karstique, la lithologie, la nature du sol, la présence de discontinuités, le type de nappe, la perméabilité de l'aquifère, ainsi que l'existence d'une zone épikarstique, entre autres. Néanmoins, en raison de la complexité géologique et hydrogéologique particulière de notre zone d'étude à Al-Kayteh, l'application de ces méthodes s'est avérée difficile, principalement en raison du manque de données adéquates et de la précision des données disponibles au Liban.

Afin d'évaluer la vulnérabilité des sols, nous avons donc décrit en détail les principales caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de chaque site de prélèvement dans le chapitre IV de notre thèse. Cette description inclut des informations sur le type de nappe d'eau souterraine, la lithologie, l'âge de l'aquifère et la transmissivité. Ces éléments permettent d'appréhender la vulnérabilité spécifique de chaque station, qui sera utilisée comme indicateur de vulnérabilité des sites de prélèvements. Ces données seront prises en

compte lors de la discussion des impacts de l'occupation des sols sur les ressources en eau et dans nos conclusions.

Il convient de noter que les études antérieures portant sur notre sujet ont également adopté des méthodes similaires pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines. Cette approche, adaptée à notre contexte, assure une bonne évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau, compte tenu des caractéristiques particulières de notre territoire soumis à diverses sources potentielles de contamination comme les eaux usées non traitées et les engrais.

1.3. Impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau

La contamination des eaux souterraines découle des activités humaines. Néanmoins, il est tout aussi important de reconnaître que la contamination des eaux souterraines peut également avoir des origines naturelles, notamment la lixiviation naturelle des minéraux et la présence de déchets organiques. Dans le contexte spécifique d'Al-Kayteh, il est utile de noter que les études antérieures menées à Akkar n'ont pas identifié de contaminations d'origine naturelle ayant un impact polluant sur les ressources en eau locales.

La Commission Européenne définit l'occupation des sols comme étant la couverture (bio)physique observée de la surface terrestre (cultures, herbe, forêts de feuillus ou zones construites), elle se distingue de l'utilisation des sols qui renvoie à l'utilisation socio-économique des sols (par exemple, agriculture, sylviculture, utilisation à des fins récréatives ou résidentielles) (La Commission Européenne, 2018). Ainsi, dans notre thèse, il s'agit des occupations des sols qui seront étudiées.

Pour notre part, nous allons explorer les impacts des types d'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau. Ainsi, les types d'occupation du sol susceptibles d'avoir un impact sur la qualité des ressources en eau comprennent principalement les zones artificialisées,

notamment les zones urbaines et industrielles, ainsi que les zones agricoles. Il convient de noter que ce ne sont pas les modes d'occupation du sol en elles-mêmes qui polluent l'eau, mais plutôt les activités humaines qui se développent dans ces zones.

Les territoires artificialisés urbains

L'urbanisation et la transformation de l'occupation du sol par l'homme, notamment via la construction des bâtiments, routes, stationnements et autres surfaces imperméables, se traduisent par la perte des capacités naturelles des sols d'emmagasiner l'eau et transforment rapidement les précipitations en ruissellement de surface (CWP, 2000). L'eau de ruissellement dans les zones urbaines transporte de nombreux types de polluants tels que de l'huile, des engrais pour pelouses et des produits chimiques directement vers l'eau provoquant sa pollution (Chaudhry et Malik, 2017).

L'infiltration des eaux usées domestiques vers les nappes constitue la source principale de contamination microbiologique des ressources en eau (OMS, 2017 ; Brindha et Schneider, 2019). Elle est en lien avec différentes pratiques urbaines, notamment l'utilisation de fosses septiques et le stockage incorrect des produits contenant des matières chimiques (Brindha et Schneider, 2019). Cependant, les produits chimiques ménagers peuvent également mener à la contamination des eaux souterraines, notamment lorsqu'ils sont entreposés dans les garages, les puits ou les sous-sols. (Lenntech B. V., 2022). Ces phénomènes provoquent l'entraînement de matériaux solubles et insolubles par l'eau de ruissellement vers l'eau, ce qui se traduit par une hausse des concentrations en bactéries, en sédiments, en nutriments, en huiles et graisses, en métaux lourds et en polluants divers (Organisation Agiro, 2023).

Les territoires artificialisés industriels

Bien que notre étude n'ait pas identifié d'activités industrielles significatives à Al-Kayteh (détails chapitre III et IV), les zones industrielles peuvent être à l'origine de graves problèmes

de pollution de l'eau. Les industries de fabrication et de secteur tertiaire ont des demandes élevées en eau pour les procédés de refroidissement, de traitement ou de nettoyage. La pollution des eaux souterraines se produit quand l'eau utilisée est retournée au cycle hydrologique.

L'activité économique moderne exige le transport et le stockage de la matière employée dans la fabrication, le traitement, et la construction. De cette manière, une partie de ce matériel peut être perdue par débordement, par fuite, ou par mauvaise manipulation. Certaines entreprises, habituellement sans accès aux réseaux d'égouts, se servent dans les eaux souterraines peu profondes. Elles emploient des fosses ou des puisards secs, ou envoient l'eau usagée dans les réservoirs septiques (Lenntech B. V., 2022). Tout ceci peut mener à la contamination des sources souterraines d'eau potable.

La majeure partie de l'eau utilisée dans les activités industrielles sert à refroidir, laver ou transporter, et elle retourne dans l'environnement sous forme d'eaux usées, transportant désormais des charges de polluants considérables. Les centrales thermiques, l'industrie du génie, de la papeterie, du textile et de la chimie sont quelques-unes des nombreuses industries qui consomment d'importantes quantités d'eau (Brindha et Schneider, 2019).

Les autres sources industrielles de contamination incluent le nettoyage des réservoirs ou la pulvérisation d'équipement sur la terre, l'évacuation de déchets dans les systèmes septiques ou les puits secs, et le stockage de matériaux dangereux dans des secteurs découverts ou dans les secteurs qui n'ont pas des garnitures avec des drains ou des bassins de captation. D'autre part, les souterrains et les réservoirs de stockage contenant des produits pétroliers, des acides, des dissolvants ou des produits chimiques peuvent avoir des fuites dus à la corrosion, à des défauts, à des problèmes dans les installations (Lenntech B. V., 2022). Les activités industrielles sont également responsables de la contamination des ressources en eau en

métaux lourds toxiques comme le plomb, le cadmium, le manganèse, le mercure, le chrome, le zinc, le fer, l'aluminium et le cuivre (Brindha et Schneider, 2019). Les exploitations minières peuvent aussi créer une contamination des eaux souterraines (Devic *et al.*, 2014).

Les territoires agricoles

L'agriculture représente non seulement le plus grand consommateur mondial d'eau douce, avec environ 70% des réserves d'eau de surface utilisées, mais elle constitue également l'une des principales sources de pollution de l'eau (Denchak, 2018). Dans les zones rurales, où la population est moins nombreuse, les polluants sont principalement constitués de fertilisants, de pesticides et de sol érodé (Keesstra *et al.*, 2012). Ces polluants atteignent les plans d'eau par le ruissellement après la pluie et les inondations. De même, les pesticides sont utilisés pour lutter contre les ravageurs, et ces pesticides s'infiltrant dans les eaux souterraines, polluant ainsi les nappes phréatiques (Chaudhry et Malik, 2017).

Les engrais sont utilisés pour améliorer la croissance et le rendement des plantes. L'azote, le phosphore et le potassium sont les trois principaux nutriments requis par les plantes. La lixiviation de ces nutriments à partir des engrais est une source courante de pollution des eaux souterraines (Brindha et Schneider, 2019). Ainsi, les sources agricoles de contamination sont nombreuses et variées : les puits de drainage, débordement des engrais et des pesticides pendant la manipulation, écoulement du chargement et lavage des pulvérisateurs de pesticide ou de tout autre équipement d'application, utilisation de produit chimique... (Lenntech B. V., 2022)

2. Étude bibliographique : la problématique entre le local et l'international

Dans cette section, nous allons explorer les études antérieures liées à notre sujet. En effet, toutes les études portant sur la pollution de l'eau à Akkar ont principalement cherché à évaluer la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau de la région, sans accorder suffisamment d'attention, du moins selon notre point de vue, à la question de l'occupation du sol. Cette lacune se retrouve également dans les recherches menées sur cette question au Liban.

Ainsi, nous allons dans un premier temps présenter douze études traitant de notre problématique à l'étranger. Ensuite, nous allons examiner les méthodologies de six études parmi elles, provenant de six pays différents, comme exemple. Cette démarche nous permettra d'identifier des études menées à l'international sur notre sujet ainsi que les méthodologies et les outils utilisés à l'échelle. Ce qui nous permettra de découvrir d'autres objectifs et problématiques liés à notre sujet dans des contextes étrangers. Nous allons ainsi mettre en évidence les similitudes et les différences entre ces études et leur méthodologie afin de comprendre les démarches adoptées ainsi que comprendre comment cette problématique peut être adaptée à différentes disciplines et objectifs.

Ensuite, nous allons étudier les onze travaux antérieurs portant sur la pollution de l'eau à Akkar. Cette démarche nous permettra de mieux comprendre le contexte de notre étude et de découvrir les résultats des recherches précédentes, ce qui nous aidera à mieux cerner les problèmes de pollution de l'eau à Akkar. De plus, cette approche nous permettra d'identifier les limites et les lacunes des recherches antérieures qui ont motivé notre travail de thèse. Par ailleurs, il convient de noter qu'aucune étude spécifique sur l'occupation du sol à Akkar n'a été identifiée jusqu'à présent.

2.1. Des études internationales avec la même problématique, mais des objectifs différents

La recherche sur les impacts de l'occupation des sols revêt une grande importance dans l'étude de la pollution et de la gestion de l'eau. Si les études antérieures menées au Liban sur la pollution d'eau n'ont pas examiné suffisamment la question de l'occupation du sol dans l'évaluation de la qualité des ressources en eau, on trouve cependant de nombreuses recherches sur ce sujet à l'étranger (e. g. : Narany *et al.*, 2017 ; Devic *et al.*, 2014 ; Rouabhia *et al.*, 2010 ; Kandler *et al.*, 2017 ; Singh *et al.*, 2010 ; Wafa *et al.*, 2020 ; Carlson *et al.*, 2011 ; Malki *et al.*, 2017 ; Ouyang *et al.*, 2014 ; Brainwood *et al.*, 2004 ; Nafi'Shehab *et al.*, 2021 ; Huang *et al.*, 2013). Le tableau ci-dessous (Tab. 1) présente les principales informations sur ces études ainsi que la nôtre :

Tab. 1 - Comparaison entre les études internationales

| Etude | Pays | Occupation du sol | Analyses microb. | Analyses chimiques | Type d'eau |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| <i>Notre étude</i> | <i>Liban</i> | <i>Plusieurs</i> | <i>Oui</i> | <i>Oui</i> | <i>Souterraines</i> |
| Narany <i>et al.</i> (2017) | Malaisie | Plusieurs | Non | Oui (nitrate) | Souterraines |
| Devic <i>et al.</i> (2014) | Serbie | Plusieurs | Non | Oui | Souterraines |
| Rouabhia <i>et al.</i> (2010) | Algérie | Agricole | Non | Oui | Souterraines |
| Kandler <i>et al.</i> (2017) | Allemagne et Tchéquie | Plusieurs | Non | Oui | Superficielles |
| Singh <i>et al.</i> (2010) | Inde | Plusieurs | Non | Oui | Souterraines |
| Wafa <i>et al.</i> (2020) | Afghanistan | Urbain | Oui | Oui | Souterraines |
| Carlson <i>et al.</i> (2011) | Etats-Unis | Urbain | Non | Oui | Souterraines |
| Malki <i>et al.</i> (2017) | Maroc | Agricole | Non | Oui | Souterraines |
| Ouyang <i>et al.</i> (2014) | Etats-Unis | Plusieurs | Non | Oui | Souterraines |
| Brainwood <i>et al.</i> (2004) | Australie | Plusieurs | Non | Oui | Superficielles |
| Nafi'Shehab <i>et al.</i> (2021) | Malaisie | Plusieurs | <i>E. Coli</i> | Oui | Superficielles |
| Huang <i>et al.</i> (2013) | Chine | Plusieurs | Non | Oui | Superficielles |

La comparaison des études internationales révèle que la problématique des impacts de l'occupation du sol est largement abordée dans des terrains répartis sur toute la planète. La plupart de ces études, comme la nôtre, ont cherché à évaluer les impacts de divers types d'occupation du sol, tandis que certaines se sont restreintes aux zones urbaines (Wafa *et al.*, 2020 ; Carlson *et al.*, 2011) ou agricoles (Rouabhia *et al.*, 2010 ; Malki *et al.*, 2017).

En outre, il est important de noter que toutes les études ont pris en considération les paramètres chimiques et certaines ont réalisé des analyses très avancées. En revanche, à part de notre étude, l'étude Wafa *et al.* (2020) et l'étude de Nafi'Shehab *et al.* (2021) qui a recherché uniquement *E. Coli*, les 10 autres études n'ont pas exploré les paramètres microbiologiques. Cela constitue une originalité pour notre étude.

En effet, le problème de contamination des ressources en eau par les bactéries est plus grave dans les pays en développement comme le Liban et l'Afghanistan, alors que les pays développés sont plutôt confrontés à des problèmes de pollution chimique, provenant des zones industrielles, agricoles, minières... Ainsi on constate que Wafa *et al.* (2020) ont recherché des indicateurs de contamination microbiologique en bactéries d'origine fécale dans des zones urbaines denses de la ville de Kaboul qui connaît, comme Akkar, des problèmes de gestion des eaux usées. Il convient de noter que Wafa *et al.* (2020) et nous-mêmes avons constaté des contaminations microbiologiques dans les zones urbaines. En ce qui concerne le type des ressources en eau examinées, le Tab. 1 a montré que de nombreuses études se sont penchées sur les eaux souterraines, mais certaines ont également examiné des eaux superficielles, notamment des rivières.

En somme, ces études mettent en lumière l'importance cruciale de la problématique de l'occupation des sols dans la gestion des ressources en eau. Elles ont été menées dans divers domaines tels que la géographie, le génie, la chimie, les sciences environnementales,

l'hydrologie. Elles diffèrent dans leurs approches méthodologiques, chaque étude adaptant ses méthodes et ses outils en fonction de ses objectifs spécifiques et du domaine disciplinaire auquel appartiennent les chercheurs. Par conséquent, elles offrent une diversité d'approches qui enrichissent notre compréhension globale de cette question complexe. Ainsi, nous allons réaliser une comparaison entre les méthodologies des six premières études (Narany *et al.*, 2017 ; Devic *et al.*, 2014 ; Rouabhia *et al.*, 2010 ; Kandler *et al.*, 2017 ; Singh *et al.*, 2010 ; Wafa *et al.*, 2020) afin de découvrir les différentes approches méthodologiques adoptées pour aborder cette problématique.

Parmi les recherches que nous avons explorées, on peut citer l'étude de Narany *et al.* (2017) qui porte sur la compréhension et la prédiction de l'impact des changements d'occupation des sols sur la qualité des eaux souterraines, en se concentrant principalement sur la teneur en nitrates, dans la région septentrionale de Kelantan, en Malaisie. Devic *et al.* (2014) a mené des investigations sur les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur la qualité chimique des eaux souterraines en Serbie. Le travail de Rouabhia *et al.* (2010) porte sur la compréhension de l'impact de l'activité agricole et de la lithologie sur la qualité chimique de l'eau souterraine dans la région de Merdja, à Tébessa, en Algérie. Kandler *et al.* (2017) cherche plus largement à évaluer les impacts de l'occupation du sol sur la qualité chimique de l'eau dans le bassin versant transfrontalier de la rivière Nisa, situé dans la zone de convergence entre la République tchèque, l'Allemagne et la Pologne. Singh *et al.* (2010), quant à eux, évaluent les effets de l'évolution de l'occupation du sol sur la quantité et la qualité chimique des eaux souterraines dans les collines du Lower Shiwalik, situées dans la région de Rupnagar, dans l'État du Pendjab, en Inde. Enfin, Wafa *et al.* (2020) étudient les effets de l'urbanisation sur la qualité microbiologique, physique et chimique de l'eau souterraine dans la ville de Kaboul, en Afghanistan.

Ces recherches illustrent la diversité des approches portant sur les impacts de l'occupation des sols sur la qualité des eaux. Elles couvrent un large éventail de régions géographiques, de la Malaisie à l'Algérie, en passant par la Serbie, l'Inde, l'Afghanistan et les régions transfrontalières de l'Allemagne et la Tchéquie. Ce qui montre l'importance internationale accordée de ce sujet. Ces études explorent différents paramètres et contextes comme les types d'occupation du sol (Kandler *et al.*, 2017 ; Devic *et al.*, 2014), l'évolution de l'occupation du sol (Singh *et al.*, 2010 ; Narany *et al.*, 2017), l'urbanisation (Wafa *et al.*, 2020), l'agriculture et la lithologie des formations (Rouabhia *et al.*, 2010). Elles se sont appliquées presque exclusivement à l'analyse des paramètres chimiques, à l'exception de Wafa *et al.* (2020) qui ont pris en compte des paramètres microbiologiques, physiques et chimiques. D'autre part, toutes ces recherches concernent les eaux souterraines, sauf Kandler *et al.* (2017) qui ont étudié une rivière au sein de son bassin versant.

Ces ressemblances et différences peuvent également être observées dans la méthodologie adoptée. Nous avons résumé ci-dessous (Tab. 2) les méthodologies des différentes études :

Tab. 2 - les méthodologies mises en oeuvre dans les études retenues

| Etude | Pays | Méthodologie |
|----------------------------------|-------------|---|
| Narany <i>et al.</i> (2017) | Malaisie | <ul style="list-style-type: none"> - Collecte des données sur les changements d'occupation du sol. - Collecte des données sur la qualité des eaux souterraines. - Analyse des données à l'aide de techniques de séries chronologiques et géospatiales. - Utilisation du modèle ARIMA pour prédire la concentration de nitrate. - Évaluation des résultats. |
| Devic <i>et al.</i> (2014) | Serbie | <ul style="list-style-type: none"> - Collecte de données sur la qualité chimique des eaux souterraines. - Analyse statistique, y compris AFC et ACP. - Utilisation de méthodes chimiométriques, y compris CAH, DA et PCA. - Identification des facteurs influençant la qualité de l'eau souterraine. |
| Rouabhia <i>et al.</i> (2010) | Algérie | <ul style="list-style-type: none"> - Enquête hydrogéologique pour comprendre la géologie et les sources de recharge. |

| | | |
|---------------------------------|--------------------------|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> - Prélèvement d'échantillons d'eau souterraine et analyses chimiques. - Utilisation de modèles géochimiques pour simuler les processus. |
| Kandler <i>et al.</i> (2017) | Allemagne et Tchéquie | <ul style="list-style-type: none"> - Collecte d'échantillons d'eau sur une année. - Analyses chimiques. - Traitement spatial des données à l'aide du SIG. - Analyses statistiques pour explorer les relations entre les occupations des sols et les paramètres chimiques. |
| Singh <i>et al.</i> (2010) | Inde | <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de la télédétection et des SIG. - Classification d'images satellitaires. - Création de couches thématiques. - Évaluation multicritères pour générer une carte de potentiel en eau souterraine. - Étude de l'évolution des occupations des sols et de leur impact sur la qualité de l'eau. |
| Wafa <i>et al.</i> (2020) | Afghanistan | <ul style="list-style-type: none"> - Collecte d'échantillons dans un quartier urbain en plein développement. - Analyse in-situ et ex-situ des paramètres physiques, microbiologiques et chimiques. |

Ainsi, ces études présentent une diversité d'approches méthodologiques et d'outils pour évaluer l'impact de l'occupation du sol sur la qualité de la ressource. Plusieurs tendances et similitudes se dégagent néanmoins :

- une collecte de données diversifiée et approfondie, portant sur les modalités de l'occupation du sol, en utilisant des cartes d'occupation du sol ou en créant leur propre carte, ou encore sur la qualité chimique des eaux souterraines, en réalisant des prélèvements sur le terrain et parfois en utilisant des bases de données. Cette étape a permis d'établir une base solide pour l'analyse ultérieure.
- le traitement statistique des bases de données comme l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP) qui permet de détecter des tendances et des corrélations dans les ensembles de données, ce qui peut aider à identifier les principaux facteurs qui influencent la qualité de l'eau, ainsi que la

Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qui classe les échantillons selon un facteur de proximité de leurs caractéristiques. Cela confirme le rôle crucial des méthodes statistiques pour comprendre les relations complexes entre les différentes variables et classer les échantillons.

- l'utilisation de Système d'Information Géographique (SIG) est fréquente pour analyser les données spatiales, telles que la distribution de l'occupation du sol et les lieux de prélèvements. Cela montre l'importance de la cartographie et des représentations spatiales dans la compréhension des interactions entre l'occupation du sol et la qualité de l'eau.
- la prise en compte des temporalités permet de suivre les tendances à long terme de la qualité de l'eau. En examinant comment les concentrations de contaminants changent au fil des ans en réponse aux variations de l'occupation du sol, les chercheurs peuvent évaluer l'efficacité des mesures de gestion de l'eau et anticiper les défis futurs. Cette approche a été adoptée par Narany *et al.* (2017) en utilisant le modèle ARIMA.
- La modélisation géochimique et géospatiale développe des outils puissants pour simuler les processus complexes qui régissent la qualité de l'eau. Ils permettent de prédire comment les contaminants se déplacent dans les aquifères en fonction des propriétés géologiques et hydrologiques de la région. Cette méthode a été utilisée par Rouabhia *et al.* (2010) dans leur étude qui se distingue par la recherche des impacts de la lithologie et l'agriculture sur les eaux souterraines.

Ces études illustrent aussi l'intérêt majeur d'une approche multidisciplinaire, essentielle pour comprendre l'interaction entre l'occupation du sol et la qualité de l'eau souterraine. Bien que chaque étude ait adopté une approche unique en fonction de ses objectifs spécifiques, elles partagent toutes l'objectif commun d'analyser les liens entre l'occupation du sol et la qualité de la ressources en utilisant des méthodes statistiques, des représentations spatiales ou simplement en décrivant les résultats observés.

Les résultats de ces études montrent l'impact significatif de l'occupation des sols et des activités humaines sur la qualité des eaux souterraines. Dans l'étude menée en Malaisie, il a été observé que les changements d'occupation des sols, tels que la déforestation et l'expansion agricole, ont eu un impact négatif sur la qualité de l'eau souterraine, notamment en augmentant les concentrations de nitrate. En Serbie, l'agriculture, l'industrie et des facteurs naturels ont été identifiés comme des contributeurs importants à la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. En Algérie, l'activité agricole intensive au-dessus de l'aquifère a entraîné des concentrations élevées de nitrates dans les puits d'irrigation, démontrant ainsi l'impact des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau souterraine. L'étude menée en Allemagne a révélé des relations entre l'urbanisation et l'agriculture sur la qualité de l'eau de la rivière Nisa. Tandis que l'étude menée en Inde a révélé des relations entre l'urbanisation et la qualité chimique des ressources en eau, et l'étude en Afghanistan a montré un impact significatif de l'urbanisation sur la qualité microbiologique des eaux souterraines dans la ville de Kaboul.

2.2. Études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar : des approches microbiologiques et chimiques pour des résultats alarmants

Les études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar relèvent toutes des domaines de la microbiologie et de la chimie. Ainsi, ces études ont montré des taux très élevés de contamination dans la région, atteignant jusqu'à 100% (Hamze *et al.*, 2010 ; Baroudi *et al.*, 2012) au cours de la dernière décennie. Elles ont bien questionné les éventuelles sources de pollution de l'eau dans la région, mais sans prendre en considération la question de l'occupation des sols dans leur approche. C'est de cette constatation qu'a émergé l'idée de notre projet de thèse. En outre, aucune étude n'a été réalisée concernant l'occupation du sol à Al-Kayteh ou dans la région d'Akkar. Toutes les études relatives à ce sujet ont été menées à

l'échelle nationale. Par exemple, dans l'Atlas du Liban, il est mentionné que la région d'Akkar connaît un développement urbain dynamique (Verdeil *et al.*, 2016).

Cependant, nous avons recensé onze articles portant la pollution de l'eau dans la région d'Akkar, sur une période allant de 1996 à 2019. Parmi elles, six ont été menées entre 1996 et 2002 (Hamze, 1996 ; Halwani et Hamze 1998 ; Halwani et al. 1999a ; Halwani et al. 1999b ; Halwani *et al.* 2001 ; Halwani *et al.*, 2002), tandis que les cinq autres datent de la période 2010 à 2019 (Hamze *et al.*, 2010 ; Baroudi *et al.*, 2012 ; El Osmani *et al.*, 2014 ; Chbib *et al.*, 2018 ; Moustafa *et al.*, 2019). La majorité de ces études se sont concentrées sur la plaine d'Akkar, reconnue pour ses cultures intensives, en particulier les cultures de plein champ sous serre. Huit des articles identifiés avaient la plaine d'Akkar comme terrain d'étude, dont les cinq publications les plus récentes (2010-2019).

Les chercheurs principaux à l'origine de ces études sont généralement affiliés à des institutions universitaires, notamment l'Université Libanaise et l'Université de Lille. Parmi eux, Monzer HAMZE, biologiste, et Jalal HALWANI, chimiste, de l'Université Libanaise, ainsi que Baghdad OUDDANE, chimiste de l'Université de Lille, ont apporté une contribution significative à la recherche dans ce domaine.

La première étude (Hamze, 1996) a porté sur la caractérisation de la qualité microbiologique des ressources en eau dans le nord du Liban. Elle a impliqué la collecte de 58 échantillons, dont 20 provenaient d'Akkar, entre août et septembre 1994. Les résultats de cette étude ont révélé un taux de contamination de 74% pour l'ensemble des échantillons, 75% pour les échantillons caractérisant la région d'Akkar, identifiant ainsi la présence d'une contamination microbiologique importante dans les ressources en eau du nord du Liban ainsi qu'à Akkar. Halwani et Hamze (1998) ont élargi la recherche en incluant des analyses microbiologiques et chimiques. Les 38 échantillons, provenant de puits, ont été collectés entre le 18 mars et le 6

mai 1997 dans la plaine d'Akkar. Les résultats ont indiqué que 63% des échantillons présentaient une contamination microbiologique, tandis que 87% étaient contaminés chimiquement, mettant en évidence les contaminations chimiques. Ces deux premières études n'étant pas disponibles sur internet, nous les avons mis en annexe (Annexe 1 et 2).

Halwani *et al.* (1999a) ont mis l'accent sur la contamination chimique des ressources en eau de la plaine d'Akkar. Les analyses ont porté sur 15 puits, et les résultats ont révélé une contamination chimique généralisée, avec 100% des échantillons présentant des niveaux de contamination inquiétants. Une autre étude (Halwani *et al.*, 1999b) s'est concentrée sur les plateaux d'Akkar et a porté sur l'analyse chimique. Cette zone est moins marquée par les cultures de plein champ, elle représente plutôt une mosaïque de zones urbaines, d'oliviers, d'arbres fruitiers, de forêts et de cultures de plein champs en terrasses ou petites surfaces. Les 20 échantillons analysés dans cette étude étaient toutes conformes. Cette étude a montré que la contamination de l'eau pouvait varier considérablement d'une zone à l'autre, ce qui nous a incité à explorer davantage les facteurs contribuant à cette variation (détails dans le chapitre IV). L'étude de Halwani *et al.* (2001) a suivi la conductivité électrique de 94 puits de la plaine d'Akkar sur le mois d'avril durant quatre années consécutives, de 1997 à 2000. Elle a également inclus des analyses chimiques approfondies sur 46 échantillons. Les résultats ont montré que 33 échantillons avaient une conductivité très élevée (35%) ce qui indique une salinité très importante, 42 échantillons avaient une conductivité élevée (45%) ce qui montre une minéralisation très accentuée. Ces échantillons se situent à la limite de la potabilité, et 19 échantillons –dont ceux d'Al-Kayteh- (20%) étaient conformes aux normes internationales des eaux destinées à la consommation humaine et pour l'irrigation. Parmi ces 94 puits, 46 puits ont fait objet d'analyses chimiques. Les résultats ont montré que 80% d'entre eux ont présenté une contamination chimique, en particulier des niveaux élevés de nitrates.

L'étude menée en 2002 (Halwani *et al.*, 2002) a porté sur les plateaux de l'intercommunalité d'El-Jouma, situés aux frontières nord des plateaux d'Al-Kayteh. Les 72 échantillons, provenant de 20 puits et 52 sources, ont été prélevés en novembre 2000 et ont fait l'objet d'analyses microbiologiques et chimiques. Les résultats ont montré que 63% des échantillons étaient contaminés du point de vue microbiologique. En revanche, tous les échantillons étaient conformes du point de vue chimique. Une deuxième campagne d'échantillonnage a concerné 12 échantillons en février 2001 et confirmé la contamination microbiologique, avec 93% des échantillons touchés.

L'étude suivante a été publiée en 2010 (Hamze *et al.*, 2010). C'est l'une des études les plus significatives et la plus récente sur la qualité microbiologique de l'eau à Akkar, notamment dans la plaine d'Akkar. Les résultats de cette étude contribueront efficacement à la comparaison des résultats des différentes études réalisées à Al-Kayteh (y compris la nôtre) que nous présenterons dans le chapitre IV de notre thèse. Cette étude a été réalisée par Monzer Hamze, Fouad Dabboussi, Taha Abdou, Mariana Radwan et Zouhour Awad, de l'Université Libanaise. Les trois premiers auteurs nous ont apporté leur soutien dans la réalisation de notre étude et dans l'interprétation des résultats. Elle s'est déroulée entre le 7 avril et le 26 mai 2010 et s'est concentrée sur des analyses microbiologiques de 50 puits de la plaine d'Akkar. Les résultats ont montré que l'intégralité des échantillons présentaient une contamination microbiologique. Cette étude a confirmé la persistance du problème de contamination microbiologique des ressources en eau à Akkar et suggéré une possible augmentation de ce phénomène.

Les études suivantes (Baroudi *et al.*, 2012 ; El Osmani *et al.*, 2014 ; Chbib *et al.*, 2018) présentent des similitudes et s'inscrivent dans une continuité. Elles se sont appliquées à la recherche de traces de pesticides dans les puits de la plaine d'Akkar, avec respectivement neuf échantillons (mai 2012), 10 échantillons (septembre 2012) et 15 échantillons (mars

2015). Elles ont toutes conclu à un taux de contamination de 100% en pesticides. Il est à noter que l'étude de Baroudi *et al.* (2012) a aussi recherché des marqueurs chimiques (nitrates et nitrites) et a également conclu à un taux de contamination chimique de 100%.

La dernière étude (Moustafa *et al.*, 2019) a été axée sur l'analyse des ions chimiques des métaux lourds, ce qui constitue son originalité. Les prélèvements, provenant de 12 puits, ont eu lieu en septembre 2017 dans la plaine d'Akkar. Les résultats ont montré que seulement deux puits, situés en dehors d'Al-Kayteh, étaient contaminés, soit 16%, par des métaux lourds. Le tableau ci-dessous (Tab. 3) synthétise l'ensemble des recherches portant sur la qualité de la ressource en eau à Akkar, parues entre 1996 et 2019.

Tab. 3 - Synthèse sur les études antérieures portant sur la qualité des ressources en eau d'Akkar

| Année de parution | Auteurs | Date de prélèvements | Type d'analyse | Terrain d'étude | Nb. d'échantillons | Résultats |
|-------------------|--|-----------------------------------|--|---------------------|--|--|
| 1996 | HAMZE M. | Août-sept. 1994 | Microbiologique | Nord du Liban | 58 échantillons (dont 20 à Akkar) | 74% contamination microbiologique (75% à Akkar) |
| 1998 | HALWANI J. HAMZE M. | 18 mars - 6 mai 1997 | Microbiologique + Chimique | Plaine d'Akkar | 38 puits | 63% contamination microbiologique 87% contamination chimique |
| 1999a | HALWANI J. OUDDANE B. BAROUDI M. WARTEL M. | | Chimique | Plaine d'Akkar | 15 puits | 100% contamination |
| 1999b | HALWANI J. OUDDANE B. IBRAHIM A.R. WARTEL M. | 2 et 5 février 1998 | Chimique | Plateaux d'Akkar | 20 échantillons | Conformes |
| 2001 | HALWANI J. OUDDANE B. CRAMPON N. WARTEL M. | Avril de 1997, 1998, 1999 et 2000 | Salinité | Plaine d'Akkar | 94 puits | - Conductivité très élevée (33 échantillons) - Conductivité élevée (42 échantillons) - Conformes (19 dont d'Al-Kayteh) |
| | | 1998 | Chimique | | 46 d'entre eux | 80% contamination chimique |
| 2002 | HALWANI J. HAMZE M. OUDDANE B. | Nov. 2000 | Microbiologique + Chimique | Plateaux d'El-Jouma | 72 échantillons (20 puits et 52 sources) | - Microbiologique : 63% contamination - Chimique : conformes |
| | | Fév. 2001 | Microb. | | 13 échantillons | 92% contamination |
| 2010 | HAMZE M. DABBOUSSI F. ABDOU T. RADWAN M. AWAD Z. | 7 avril - 26 mai 2010 | Microbiologique | Plaine d'Akkar | 50 puits | 100% contamination microbiologique |
| 2012 | BAROUDI M. BAKKOUR H. HALWANI J. TAHA S. EL-OSMANI R. MOUNEIMNE AH. | Mai 2011 | Chimique (nitrates et nitrites) + pesticides | Plaine d'Akkar | 9 puits | 100% contamination chimique |
| 2014 | EL-OSMANI R. NET S. DUMOULIN D. BAROUDI M. BAKKOUR H. OUDDANE B. | Sep. 2012 | Pesticides | Plaine d'Akkar | 10 puits | 100% contamination |
| 2018 | CHBIB C. NET S. HAMZE M. DUMOULIN D. OUDDANE B. BAROUDI M. | Mars 2015 | Pesticides | Plaine d'Akkar | 15 puits | 100% contamination |
| 2019 | MOUSTAFA A. HAMZE M. BAROUDI M. | Sep. 2017 | Chimique (métaux lourds) | Plaine d'Akkar | 12 puits | 16% contamination |

3. Les étapes de la méthodologie

Notre méthodologie ressemble effectivement beaucoup à celles décrites dans les études internationales, en l'adaptant aux caractéristiques du terrain et aux marqueurs analysés et leurs résultats, ainsi qu'à nos objectifs. Elle repose ainsi sur une approche cartographique (SIG) et statistique (ACM), conjuguée avec des prélèvements d'échantillons sur le terrain. Cette section en présente les points clés, tandis qu'une information détaillée portant sur la nature des sources de données, les matériels utilisés, la justification des choix méthodologiques, les difficultés rencontrées, ainsi que d'autres informations pertinentes, seront présentés dans les chapitres dédiés (Chap. III, IV et V). Après une première étape portant sur la présentation de la géographie et des problèmes du secteur d'eau sur le terrain, les étapes clés et successives sont les suivantes :

1. L'étude de l'occupation du sol :

Elle vise à distinguer les principaux types et sous-types d'occupation du sol à Al-Kayteh. Ces modalités ont fait l'objet d'une analyse et d'une cartographie sur les trois années sélectionnées (1962, 2005 et 2017), suivi d'une analyse diachronique permettant d'en cerner l'évolution. Les modalités de l'occupation du sol sont définies dans leur nature et leur répartition. Cette étape a été cruciale pour comprendre le contexte territorial.

2. La collecte d'échantillons d'eau

Nous avons prélevé un total de 44 échantillons d'eau (23 puits et 21 sources) représentatifs de la ressource en eau d'Al-Kayteh. Ces échantillons ont ensuite été soumis à des analyses microbiologiques et chimiques approfondies.

3. La caractérisation de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau

Pour évaluer la qualité microbiologique des ressources en eau, nous avons analysé trois marqueurs : les coliformes totaux (CT), les coliformes thermo-tolérants (CTT), et les

streptocoques fécaux (SF). Pour l'évaluation de la qualité chimique, nous avons analysé les concentrations des ions suivants : le fluorure, le chlorure, le nitrite, le nitrate, le sulfate, le phosphate, le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium. Les résultats ont été utilisés pour caractériser la qualité de la ressource en eau d'Al-Kayteh, fournissant des informations représentatives sur la présence de contaminants microbiologiques et chimiques dans les différentes sources d'eau.

4. La construction d'un tableau de synthèse des données

Toutes les données recueillies (types d'occupation du sol, pratiques de gestion des eaux usées, résultats des analyses microbiologiques et chimiques, nature de la station) ont été regroupées dans un tableau de synthèse. Ce tableau a été conçu pour représenter les deux variables retenues dans notre problématique : l'occupation des sols en tant que variable indépendante et la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh en tant que variable dépendante.

5. L'analyse statistique et l'interprétation des résultats

Pour explorer d'éventuels liens entre l'occupation des sols et la qualité des ressources en eau, nous avons réalisé une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) à partir du tableau de synthèse. Cette méthode permet de visualiser les proximités entre les modalités des variables qualitatives (les occupations du sol) et les observations (les échantillons).

Pour l'étude de l'impact de l'occupation des sols sur la qualité chimique de l'eau, nous avons projeté les concentrations des marqueurs chimiques un à un dans l'environnement de l'ACM, qui s'appuie sur l'occupation des sols (modalités). Ainsi, nous avons recherché si des ions s'associaient à des types et sous-types d'occupation des sols, compte tenu du fait que nous avons testé un traitement des données par une ACP et une CAH, telles qu'utilisées dans les études internationales, sans aboutir à des résultats satisfaisants (détails chapitre V).

L'analyse des résultats obtenus a permis d'identifier les impacts de l'occupation des sols sur la qualité des ressources en eau d'Al-Kayteh. Les conclusions ont été étayées par les données recueillies sur le terrain, notamment les cartes, les photographies, les observations, les caractéristiques hydrogéologiques et les images satellites. Ces résultats et arguments ont été discutés de manière approfondie pour mieux comprendre les activités ayant un impact sur la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh.

4. Conclusion intermédiaire

Le Liban, malgré son surnom de "château d'eau", est confronté à des défis majeurs en matière de sécurité en eau. Le déficit entre l'offre et la demande est devenu une préoccupation majeure, avec un déclin de la qualité et de la quantité des ressources en eau du pays. En effet, la pollution de l'eau est un problème très grave, touchant les ressources en eau superficielles et souterraines. Ainsi, les eaux souterraines du pays, bien que constituant une part importante des ressources en eau, sont globalement polluées par l'agriculture et les eaux usées. De plus, les ressources en eau sont sur-exploitées provoquant la baisse des niveaux des nappes. Cette situation a des conséquences graves sur la santé, l'économie et la qualité de vie de la population.

La région d'Akkar, au nord du Liban, est l'une des régions les plus vulnérables et marginalisées au Liban. Cette région rurale, caractérisée par une population pauvre et une agriculture prédominante, connaît des problèmes sérieux de pollution de la ressource. Ainsi, la thèse aborde la question des impacts de l'occupation des sols sur la qualité des ressources en eau d'Akkar, à travers l'exemple du territoire d'Al-Kayteh. Cette problématique, malgré son importance, n'a pas été suffisamment étudiée au Liban ou à Akkar.

L'approche bibliographique a mis en évidence l'importance cruciale de la problématique des impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau à l'échelle internationale. Malheureusement, il n'existe aucune recherche qui a traité suffisamment de cette problématique au Liban. Ainsi, les études internationales examinées dans ce contexte offrent une diversité d'approches méthodologiques, chacune adaptant ses méthodes et outils en fonction de ses objectifs spécifiques et de la discipline à laquelle elle appartient. Ces recherches, bien que variées dans leurs approches, convergent vers une compréhension plus profonde des liens complexes entre les occupations des sols et la qualité de l'eau souterraine.

Cependant, un élément essentiel à noter est que les résultats de ces études ne se limitent pas à une région spécifique, mais présentent des tendances globales qui peuvent être applicables à de nombreuses autres régions du monde : les activités humaines, traduites spatialement par les modes d'occupation des sols, en particulier l'agriculture non réglementée et l'urbanisation, ont un impact significatif sur la qualité de l'eau souterraine. Les résultats de ces études ont montré des variations significatives dans la qualité de l'eau souterraine en relation avec les types d'occupation des sols. Les activités agricoles ont souvent été identifiées comme des sources majeures de pollution, entraînant des concentrations élevées en nitrates et autres ions chimiques, et parfois en métaux lourds. De plus, l'urbanisation a été associée à la contamination microbiologique et parfois chimique, notamment en nitrates, de l'eau souterraine.

En ce qui concerne les études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar, l'analyse de ces études a conduit à plusieurs conclusions significatives et met en lumière certaines lacunes dans la recherche publiée. Tout d'abord, il est manifeste que la région d'Akkar est confrontée à des problèmes importants de contamination de l'eau, atteignant des niveaux très préoccupants. Ces contaminants présentent des risques majeurs pour la santé publique et l'environnement local, en particulier compte tenu des graves problèmes de gestion des eaux usées des zones urbaines et de l'agriculture intensive caractérisant la plaine de la région.

Cependant, en dépit de la qualité des études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar, ces études se sont principalement concentrées sur la contamination microbiologique et chimique de l'eau, sans suffisamment prendre en compte les facteurs de causalité et en particulier les modalités de l'occupation des sols et leurs impacts sur la qualité de l'eau. On relève également que les investigations se sont principalement concentrées sur la plaine d'Akkar, qui avait déjà été identifiée comme étant sujette à la contamination de ses ressources en eau, sans explorer de nouveaux secteurs de ce territoire. Par conséquent, les résultats obtenus ne présentent pas

d'éléments nouveaux significatifs, mais plutôt une redondance d'observations antérieures. Tous ces aspects seront discutés en détail dans le chapitre IV lors de la comparaison des résultats.

Un des objectifs de la thèse est de pallier certaines des limites évoquées. Elle se concentre sur les impacts de l'occupation des sols sur la qualité de l'eau à Akkar, adoptant ainsi une approche nouvelle dans ce pays. Elle s'applique à un territoire (Al-Kayteh), représentatif d'Akkar (détails dans le chapitre II), qui a été largement négligé jusqu'à présent. L'objectif est d'apporter une compréhension plus complète des sources potentielles de contamination de l'eau et de contribuer ainsi à orienter les stratégies de gestion de l'eau à Akkar et au Liban. Ce travail offre l'opportunité d'améliorer notre compréhension des facteurs qui influencent la contamination de l'eau dans cette région du Liban, ainsi que du contexte territorial et de son évolution qui ont conduit à cette situation.

Ainsi, pour répondre à la problématique de la thèse, nous avons construit une méthodologie qui repose sur une approche cartographique et statistique. Elle comprend cinq étapes principales. Tout d'abord, une analyse de l'occupation du sol à Al-Kayteh a été réalisée, identifiant les types et sous-types d'occupation du sol ainsi que les pratiques de gestion des eaux usées. Ensuite, 44 échantillons d'eau représentatifs de la région ont été collectés et soumis à des analyses microbiologiques et chimiques. Les résultats de ces analyses ont été utilisés pour caractériser la qualité de l'eau. Toutes les données, y compris les types d'occupation du sol, les pratiques de gestion des eaux usées et les résultats des analyses, ont été regroupées dans un tableau de synthèse. Enfin, une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a été réalisée sur ce tableau pour explorer les liens entre l'occupation des sols et la qualité de l'eau.

**Chapitre II : Cadre géographique de la recherche : Al-Kayteh,
une géographie favorable et de nombreux défis**

1. La région d'Akkar, une région rurale et pauvre

Pour comprendre le choix et la nature du terrain d'étude, il est nécessaire dans un premier temps de comprendre la logique du découpage administratif du Liban ainsi que découvrir brièvement la région d'Akkar. Ensuite, nous évoquerons le territoire d'Al-Kayteh.

1.1. Un aperçu du découpage administratif du Liban : entre politique, géographie et histoire

Le découpage administratif du Liban est en particulier le résultat de la topographie, de la répartition des confessions religieuses et de l'histoire du pays. Ces éléments jouent un rôle crucial dans la détermination des limites entre les différentes entités administratives.

Le territoire libanais est subdivisé en trois niveaux administratifs :

- Premier niveau : les Régions/Gouvernorat (Mouhafaza *المحافظة*), il en existe huit (Fig. 3). Dans la thèse, nous allons utiliser le terme de « Région » pour les décrire.
- Deuxième niveau : les Départements/Cazas (Qadaa *القضاء*), le Liban en compte vingt-cinq (Fig. 3). Dans la thèse, nous allons utiliser le terme de « Département » pour les décrire.
- Troisième niveau : la commune ou la municipalité (Baladiya *البلدية*), à travers laquelle se pratique la décentralisation territoriale. Dans la thèse, nous allons utiliser le terme de « commune » pour les décrire.

Cependant, plusieurs municipalités peuvent se regrouper et former une Fédération de municipalités (localiban, 2022) ou une Union de municipalités (VERDEIL *et al.*, 2016) qui sont les Ittihad Al-Baladiyat *اتحاد البلديات*. La Fédération de municipalités est la seule forme d'intercommunalité au Liban.

La dernière modification du découpage administratif remonte à 2003. Avec la loi 522 du 16 juillet 2003, le nombre de régions est passé de six à huit. Il y a eu création de la région de Baalbek-El-Hermel (anciennement partie intégrante de la Békaa) et de la région d'Akkar (antérieurement partie intégrante du Liban-Nord) afin de contribuer au développement des régions les plus éloignées de Beyrouth, dans un pays fortement centralisé. Ainsi, Akkar, comme Beyrouth, est à la fois région et département.

La carte ci-dessous (Fig. 3) montre les régions et les départements du Liban :

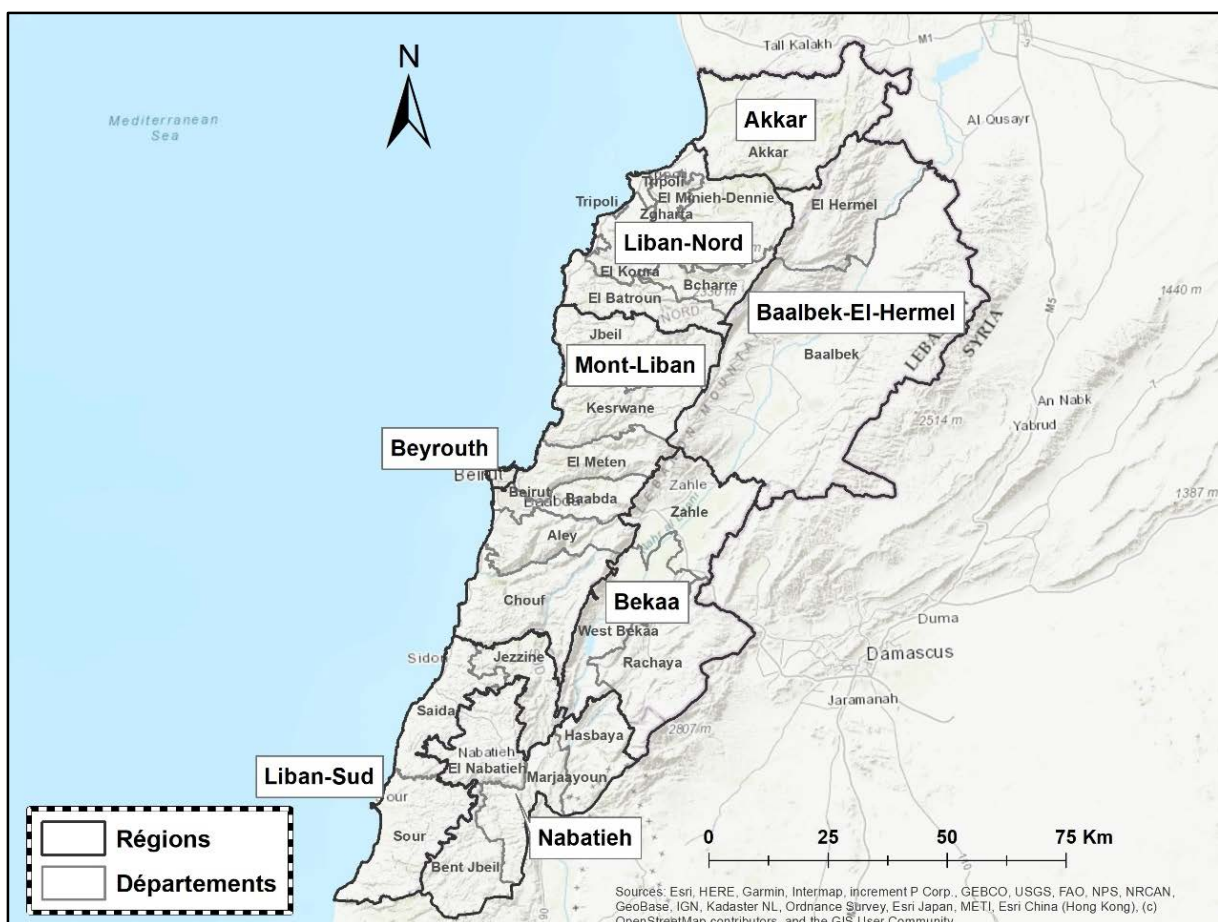


Fig. 3 - Carte des régions et des départements du Liban (réalisée par Ahmad KAMALEDDINE, 2022)

On peut également comprendre le découpage administratif du Liban à travers la géographie du pays. En effet, le Liban est formé de quatre unités topographique (Fig. 4) : la plaine littorale, la chaîne du Liban (ou Chaîne Occidentale) qui atteint 3093m (au niveau de la crête Journat El-Sawdaa du mont Al-Makmel, le point culminant du Levant) au nord du pays, la

plaine de Békaa (900-1200 mètres d'altitude) et la chaîne de l'Anti Liban (ou Chaîne Orientale) qui atteint 2814m (Mont Hermon) au sud-est du pays au niveau de la frontière avec la Syrie. Cette topographie joue également un rôle important dans la délimitation des départements et des régions du Liban. Par exemple, la ligne de crêtes de la Chaîne Occidentale du Liban constitue la limite administrative entre les région d'Akkar, Liban-Nord et Mont-Liban d'une part et les régions Baalbek-el-Hermel et Békaa d'autre part.

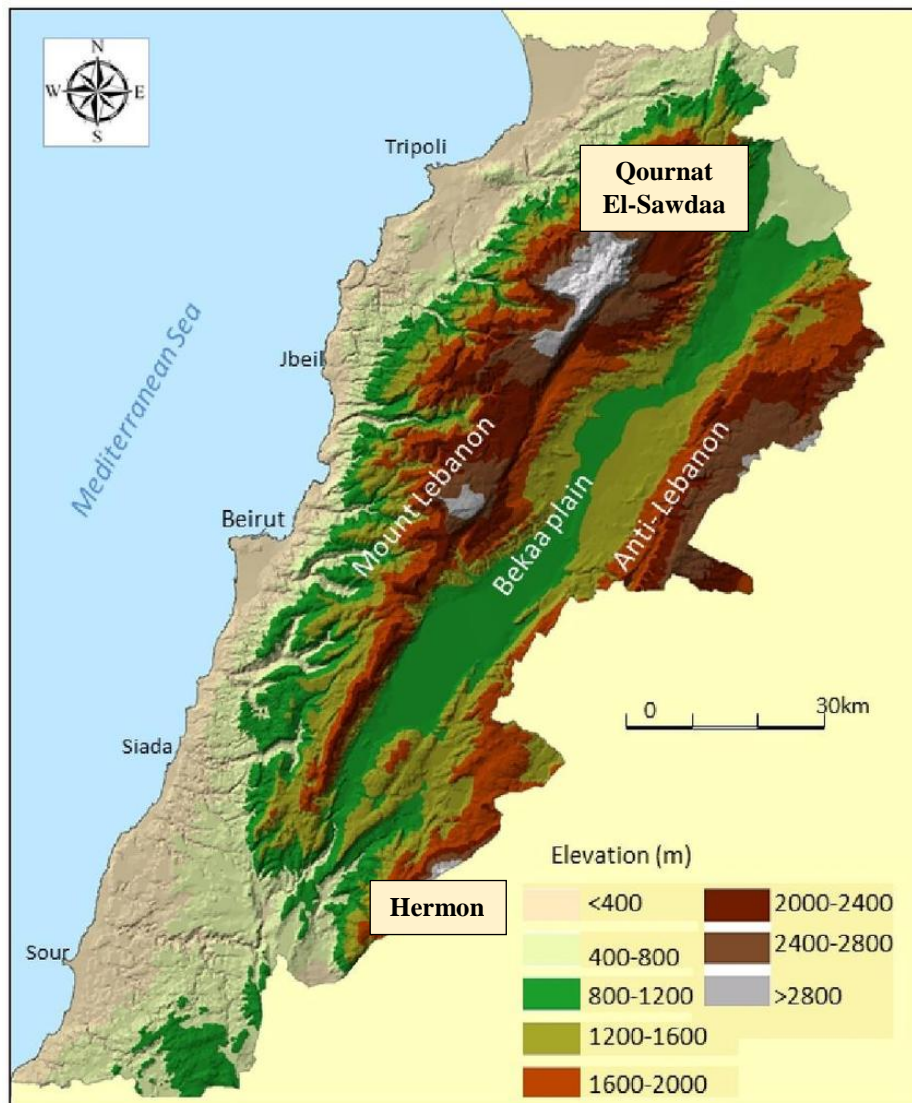


Fig. 4 - Carte topographique du Liban (Shaban et Hamze, 2017)

La ligne de crêtes de la Chaîne du Liban divise le pays en deux parties, chacune ayant ses propres caractéristiques climatiques. La moitié ouest, où se trouve Akkar, est drainée par une

douzaine de rivières (Fig. 5) généralement parallèles entre elles, qui naissent dans les hauteurs de la chaîne du Liban pour se jeter dans la Méditerranée. Elles constituent dans beaucoup de cas les limites administratives des départements.



Fig. 5 - Les principaux cours d'eau drainant le Liban

(source : <https://fr.maps-lebanon.com/liban-de-la-rivi%C3%A8re-de-la-carte>)

1.2. Akkar : une région pauvre s'étendant entre plaine et plateaux au nord du Liban

La région d'Akkar se situe au nord du Liban (Fig. 3). Elle est délimitée au nord par la frontière internationale avec la Syrie, à l'est avec le département de Hermel (région de Baalek-El-Hermel), au sud avec le département de Minieh-Dannieh (région du Liban-Nord) et est bordée à l'ouest par la Méditerranée (Fig. 3). La superficie d'Akkar est de 788 km² et son chef-lieu est Halba. En 2019, elle comptait 428 600 habitants, dont 152 000 (36%) réfugiés syriens et 23 400 (5%) réfugiés palestiniens (UNHCR, 2019). C'est une région rurale et pauvre où l'agriculture constitue la principale activité économique. Les habitants d'Akkar font face « à une pauvreté monétaire, qui se conjugue avec un haut niveau de non-satisfaction des besoins de base » (Verdeil *et al.*, 2016). Cette pauvreté se manifeste à divers niveaux et se mesure selon différents indicateurs. Elle est aggravée par un sentiment d'abandon manifesté par la population envers les autorités publiques.

Au niveau confessionnel, la population d'Akkar est principalement sunnite, comme ses voisins du nord du Liban, Tripoli et Minieh-Dannieh. Les chrétiens sont également bien présents à Akkar, où les grecs-orthodoxes prédominent, reflétant ainsi la tendance générale observée dans plusieurs départements du nord du Liban tels que Tripoli, Koura et Minieh-Dannieh. Les maronites, qui constituent le plus grand groupe chrétien au Liban, forment la deuxième communauté chrétienne la plus importante à Akkar. De plus, une communauté alaouite est présente dans la région, notamment au nord de la région à proximité de la frontière avec la Syrie. Il est à noter qu'Akkar abrite la deuxième plus grande communauté alaouite du Liban après Tripoli. Ces deux départements sont les seuls à avoir des représentants alaouites au Parlement. En ce qui concerne la représentation politique, Akkar dispose de sept sièges au parlement libanais, dont trois sont réservés aux sunnites, deux aux

grecs-orthodoxes, un aux maronites et un aux alaouites. Au niveau géopolitique, en raison de son emplacement géographique et de sa composition confessionnelle, Akkar a été épargnée largement par les conflits au sud du Liban, mais elle a été fortement touchée par les conséquences politiques et humaines de la révolution en Syrie.

Akkar est formée de deux unités principales, la plaine et les plateaux d'Akkar. Ces deux entités sont des ensembles désignés de manière familière par la population plutôt que des unités topographiques au sens géographique du terme. L'autoroute d'Al-Aabdé-Halba tranche Akkar en deux unités (Fig. 6) : à l'est nous avons les plateaux d'Akkar et à l'ouest se trouve la plaine d'Akkar. On peut voir ces deux unités sur la carte ci-dessous (Fig. 6) :

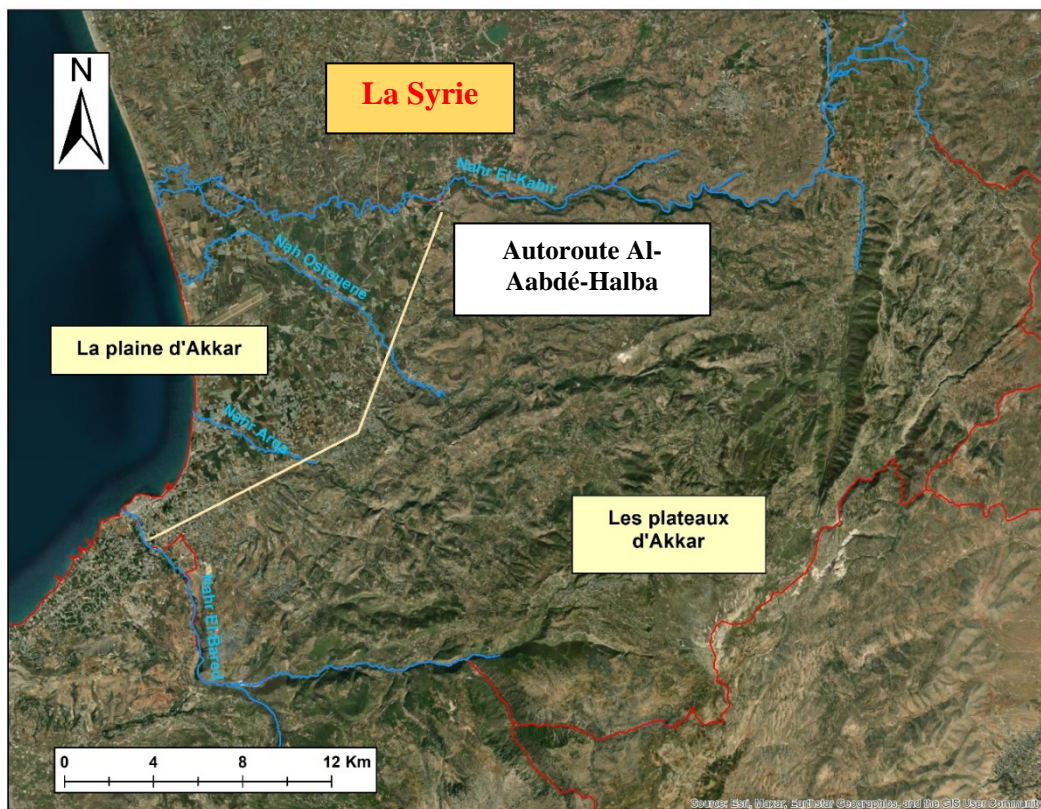


Fig. 6 - La plaine et les plateaux d'Akkar

Ainsi, on peut représenter la plaine et les plateaux d'Akkar de la manière suivante :

- La plaine d'Akkar (Fig. 7) : la plaine côtière du Liban s'élargit à Akkar pour devenir la plaine d'Akkar, une région d'une importance géographique significative dans la

mesure où c'est la plus grande plaine côtière de tout le pays. Cette plaine se présente sous la forme d'un triangle d'environ 110 km², abritant une population d'environ 200 000 habitants répartis dans 60 communes (Halwani *et al.*, 2001). Elle se classe en tant que deuxième région agricole la plus importante du Liban, juste derrière la plaine de la Békaa. Elle est réputée pour ses cultures de plein champ et sous serre, notamment les légumes, et les agrumes. La région se caractérise par une altitude maximale de 150 mètres, et son climat méditerranéen est marqué par des saisons sèches en été et humides en hiver. Les précipitations annuelles atteignent en moyenne entre 750 et 800 mm (Traboulsi, 2010), tandis que les températures moyennes varient de 25 °C en été à 12 °C en hiver.



Fig. 7 - La plaine d'Akkar

- Les "plateaux" d'Akkar (Fig. 6) : ils constituent une région géographiquement remarquable, surplombant la plaine d'Akkar. C'est un terme vernaculaire qui caractérise un ensemble de plateaux et de montagnes sculptés par quatre rivières permanentes (Fig. 7) : le Nahr El-Kabir, qui forme la frontière avec la Syrie, le Nahr Ostouene, le Nahr Arqa et le Nahr El-Bared, qui marque la limite d'Akkar avec le département de Minieh-Dannieh. Toutes ces rivières se jettent finalement dans la Méditerranée, le terme "nahr نهر" signifiant rivière ou fleuve en arabe. L'altitude des zones montagneuses peut atteindre les 2230 mètres au niveau du sommet Aarouba à Fnaydeq au sud-est d'Akkar. Ces plateaux bénéficient d'un climat méditerranéen, caractérisé par des précipitations concentrées en hiver et des étés secs. Les mois d'hiver sont plus froids et pluvieux, avec des précipitations pouvant atteindre 1400 mm, voire davantage sur les sommets les plus élevés d'Akkar (Traboulsi, 2010). Il n'est pas rare que ces plateaux accumulent plusieurs mètres de neige pendant la saison hivernale sur les plus hautes altitudes.

1.3. Al-Kayteh, un territoire représentatif d'Akkar

Pour étudier la question de la pollution des ressources en eau à Akkar, nous avons choisi le territoire d'Al-Kayteh comme représentant la région. Cela s'explique pour plusieurs raisons :

- une étendue représentative de la région d'Akkar : le territoire d'Al-Kayteh englobe partiellement à la fois les deux unités topographiques d'Akkar, la plaine et les plateaux d'Akkar, offrant une diversité topographique exceptionnelle qui lui permet de représenter fidèlement les caractéristiques géographiques de l'ensemble de la région. Ce territoire occupe plus de 26% de la superficie totale d'Akkar (Fig. 8).

- une topographie représentative : Al-Kayteh s'étend des côtes de la Méditerranée jusqu'au sommet d'Aarouba (2230 mètres), le point culminant d'Akkar. Cette amplitude permet d'étudier l'impact de la pollution sur les ressources en eau à différentes altitudes et dans divers types de paysages. Ainsi, Al-Kayteh couvre tout le spectre des altitudes et des caractéristiques topographiques d'Akkar.
- une concentration de la population : Al-Kayteh abrite la majorité de la population d'Akkar, soit environ 60%. De plus, ce territoire comprend les trois plus grandes communes de la région : Bebnine, Fnaydeq et Berqayel (Fig. 8). Cette concentration de la population crée un contexte déterminant pour l'étude de la pollution de l'eau, car elle représente la pression la plus significative sur les ressources hydriques locales et la majorité des activités humaines jugées comme contaminants.
- la proximité de Tripoli : c'est dans Tripoli, deuxième plus grande ville du Liban et capitale de la région du Liban-Nord, que se trouvent les laboratoires des analyses microbiologiques et chimiques d'eau partenaires du projet. Le choix d'Al-Kayteh, situé au sud d'Akkar, facilite grandement l'accès à ces installations essentielles pour les travaux de recherche, garantissant ainsi la qualité des résultats des analyses. Ainsi, Al-Kayteh est le territoire d'Al-Kayteh le plus proche de Tripoli, au carrefour d'autoroutes reliant Tripoli au reste d'Akkar. C'est un emplacement stratégique qui l'a rendu très attractif.
- la richesse des ressources en eau : la topographie, le climat et la géologie d'Al-Kayteh favorisent la ressource en eau.
- la présence de plusieurs sources potentielles de contamination : Al-Kayteh se caractérise par plusieurs types d'agriculture (cultures de plein champs, oliviers, arbres fruitiers...) et différentes manières d'élimination des eaux usées, ce qui permet d'évaluer les impacts de ces problèmes majeurs sur la qualité des ressources en eau.

Ainsi, Al-Kayteh englobe une grande partie des sources potentielles de contamination de la région d'Akkar.

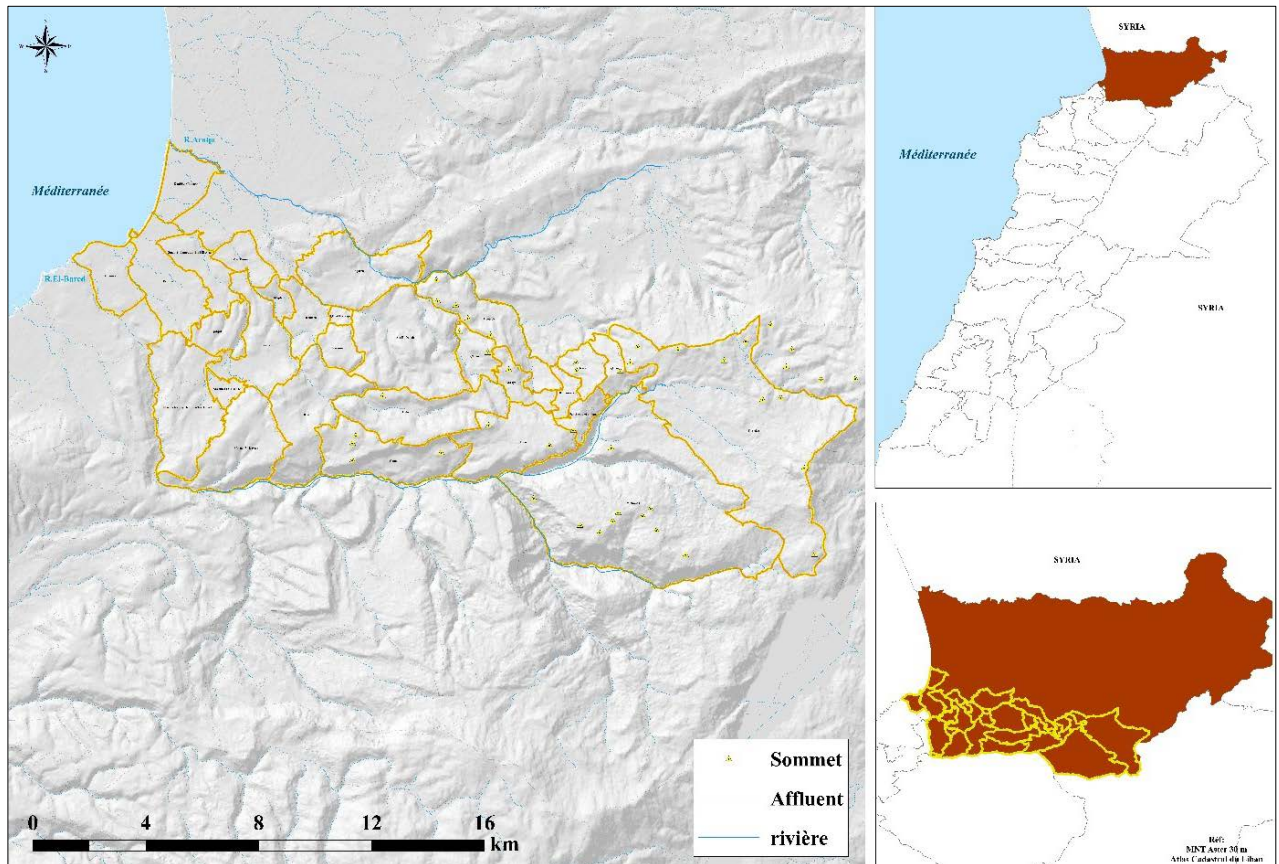


Fig. 8 - Al-Kayteh dans la région d'Akkar

2. Le territoire d'Al-Kayteh : un territoire méditerranéen à la géographie favorable

Le territoire d'Al-Kayteh constitue notre terrain d'étude. Ainsi, la connaissance de sa géographie est indispensable avant de l'étudier. Nous allons donc en caractériser la géographie à travers l'étude de ses caractéristiques humaines, topographiques, climatiques et géologiques. Ces éléments sont liés directement à la question de l'eau dans la région.

2.1. Emplacement stratégique et population importante

Le territoire d'Al-Kayteh est situé au sud de la région d'Akkar, c'est la zone d'Akkar la plus proche de Tripoli, la deuxième ville du Liban derrière Beyrouth. Il est géré par deux intercommunalités : la « Fédération de municipalités de Basse et Moyenne Al-Kayteh (Wasat wa Sahel Al-Kayteh *وسط وساحل القيطع*) » et la « Fédération de municipalités de Haute Al-Kayteh (Jord Al-Kayteh *جرد القيطع*) » qui forment ensemble le territoire connu historiquement sous le nom « Al-Kayteh ».

Ses limites sont les suivantes (Fig. 10) :

- La rivière Al-Bared (Fig. 9) constitue la limite administrative sud d'Al-Kayteh, ainsi que la limite administrative de la région d'Akkar avec la région du Liban-Nord, au niveau du département de Minieh-Dannieh.



Fig. 9 - La rivière Al-Bared à proximité de son estuaire à Mhamra (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020)

- A l'est, les limites d'Al-Kayteh correspondent aux limites administratives d'Akkar avec la région de Baalbek-El-Hermel au niveau du département de El-Hermel. Les limites d'Al-Kayteh sont ainsi la ligne de crêtes de la Chaîne du Liban (jusqu'à 2230m localement).
- Au nord, c'est la rivière Arqa qui sépare Al-Kayteh des autres communes d'Akkar.
- A l'ouest se trouve la Méditerranée.

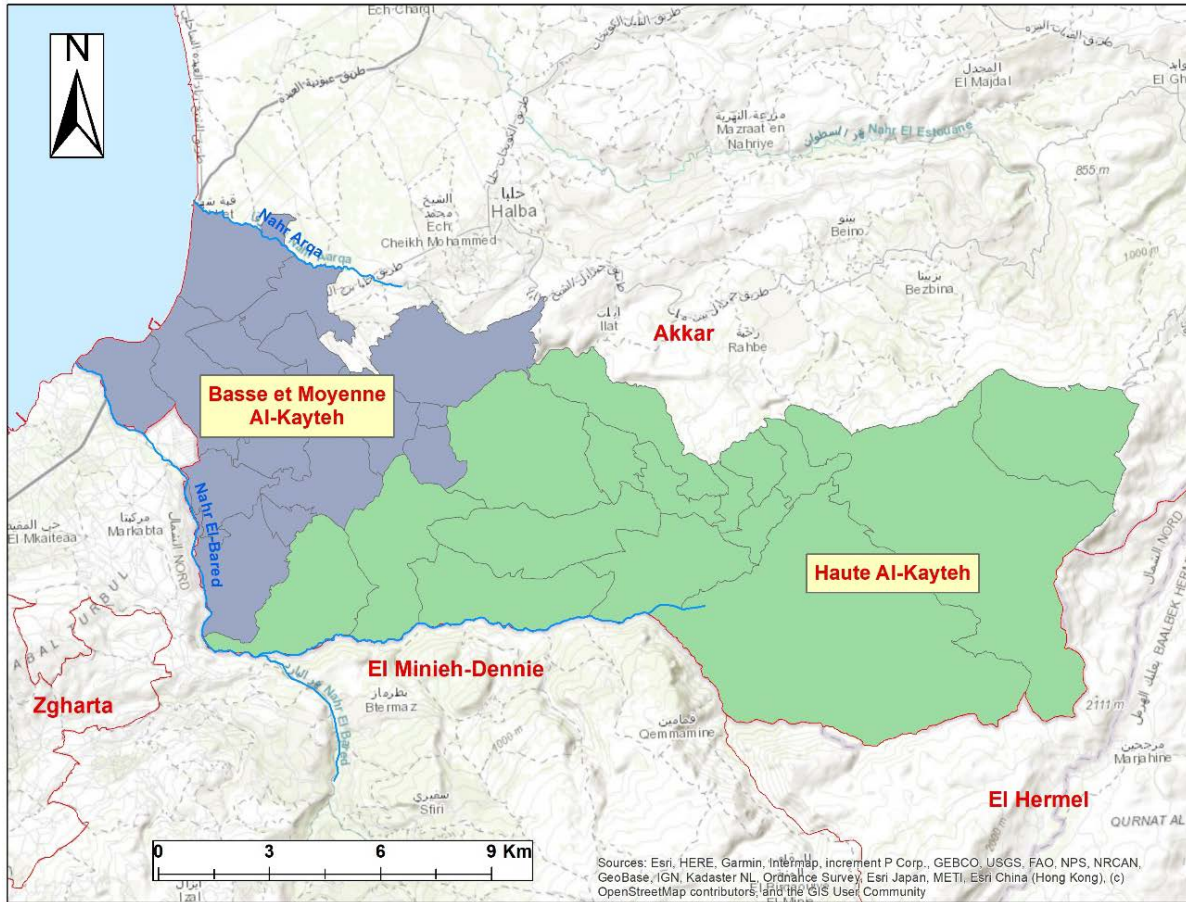


Fig. 10 - Les limites d'Al-Kayteh

Les communes qui forment Al-Kayteh sont les suivantes, à noter que certaines communes par leur petite taille démographique ne constituent pas une municipalité :

Tab. 4 - Les communes d'Al-Kayteh

| Commune | Nom en arabe | Surface (ha) | Population* | Intercommunalité |
|------------------------------|---------------------|--------------|-------------|----------------------------|
| Aayoun El-Ghezlane | عيون الغزلان | 104 | 150 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bebnine | ببنين | 678 | 50 000 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Beit El-Haouch | بيت الحوش | 332 | 0 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Berqayel | برقايل | 629 | 30 000 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Borj El-Arab et Deir Dalloum | برج العرب ودير دلوم | 365 | 10 000 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bqarzla | بقرزلا | 819 | 4 800 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Hmayra | الحميرة | 286 | 1 100 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Jdaydet El-Kayteh | جديدة القيطع | 620 | 6 000 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |

| | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------|---|----------------------------|
| Majdala | مجذلا | 110 | 3 500 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mar Touma | مار توما | 226 | 1 100 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mhamra | المحمرة | 386 | 10 000 habitants + 20 000 palestiniens dans le camp Al-Bared | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Ouadi El-Jamous | وادي الجاموس | 343 | 4 500 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qarqaf | القرقف | 283 | 5 000 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qloud El-Baqie | قلود الباقية | 48 | 100 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qoubbet Chamra | قبة شمرا | 630 | 3 200 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Sayssouq | سيسوق | 195 | 500 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | وسط وساحل القيطع | 6053 | 139 950 | |
| Ain El-Dahab | عين الذهب | 1196 | 17 935 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Ayoub et Sadaqa | بيت أيوب والصدقة | 161 | 2 025 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Younes | بيت يونس | 117 | 2 452 | Haute Al-Kayteh |
| Bzal | بزال | 871 | 4 560 | Haute Al-Kayteh |
| Chane | شان | 238 | 3 841 | Haute Al-Kayteh |
| Fnaydeq | فنديق | 3227 | 35 225 | Haute Al-Kayteh |
| Habchit | حبشيت | 843 | 2 500 | Haute Al-Kayteh |
| Houaich | حويش | 641 | 3 000 | Haute Al-Kayteh |
| Hrar | حرار | 768 | 6 360 | Haute Al-Kayteh |
| Khraybe | الخريبة | 212 | 500 | Haute Al-Kayteh |
| Michmich | مشمش | 3782 | 26 343 | Haute Al-Kayteh |
| Qabaait | قبعيت | 775 | 6 005 | Haute Al-Kayteh |
| Qammouaa (litige) | القموعة | 1025 | 0 | Haute Al-Kayteh |
| Qorne | القرنة | 224 | 4 835 | Haute Al-Kayteh |
| Qraiyyat | القرريات | 197 | 2 039 | Haute Al-Kayteh |
| Sfaynet El-Kayteh | سفينة القيطع | 804 | 4 169 | Haute Al-Kayteh |
| Haute Al-Kayteh | جرد القيطع | 15079 | 121 786 | |
| Al-Kayteh | القيطع | 21132 | 261 736 | |

*Source : les élus locaux + les sites officiels des intercommunalités

La carte ci-dessous représente la distribution des communes d'Al-Kayteh sur le terrain :

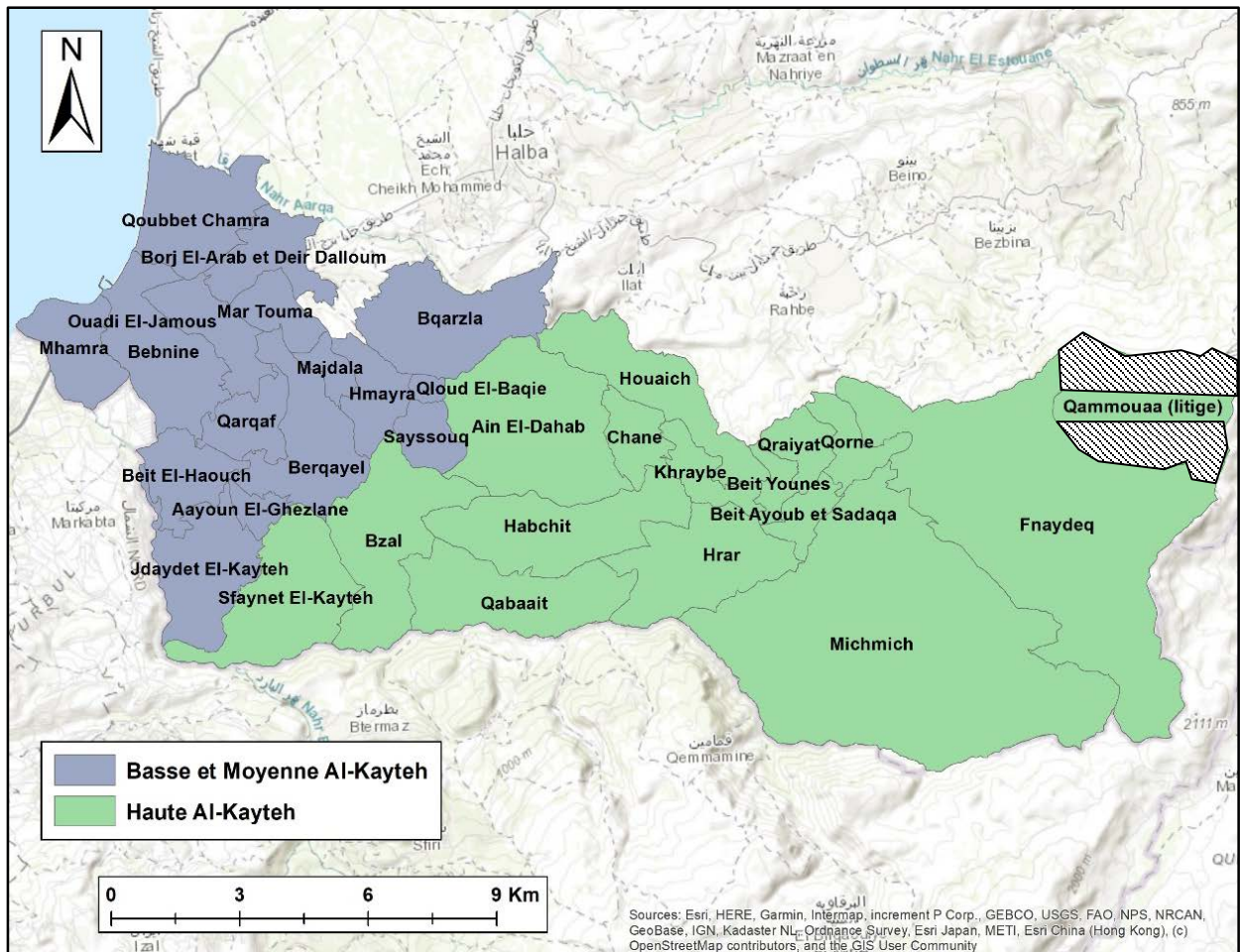


Fig. 11 - Les communes d'Al-Kayteh

Le territoire d'Al-Kayteh couvre une superficie de 211 km², dont le territoire de Qammouaa (sujet de litige entre Fnaydeq et la commune limitrophe nord Aakar Al-Atiqa, située en dehors d'Al-Kayteh), et la commune de Deir Dalloum. Dans la thèse, la commune de Deir Dalloum, bien qu'elle se trouve à Akkar mais en dehors d'Al-Kayteh, sera incluse dans notre étude car toutes les couches compatibles avec le SIG (shapefiles) des communes du Liban que nous avons trouvées ne font pas de distinction entre la commune de Deir Dalloum (en dehors d'Al-Kayteh) et de Borj El-Arab (Al-Kayteh). Par conséquent, nous avons nommé ce terrain Borj El-Arab et Deir Dalloum.

Par ailleurs, le territoire des communes de Mhamra, Bebnine, Qoubbet Chamra et Borj El-Arab et Deir Dalloum appartiennent à la plaine d'Akkar qui s'élève jusqu'à environ 100 mètres d'altitude localement à Al-Kayteh, alors que le reste des communes d'Al-Kayteh sont situées sur le plateau d'Al-Kayteh appartenant aux plateaux d'Akkar.

La population d'Akkar, y compris Al-Kayteh, est principalement confrontée à des défis économiques, avec une grande proportion de résidents vivants dans des conditions de pauvreté (VERDEIL *et al.*, 2016). L'agriculture demeure l'activité économique dominante de la région. Il convient de noter que de nombreux habitants sont également employés dans les forces armées, ce qui contribue à leur revenu et à leur sécurité économique (comm. orale des élus locaux).

Outre l'agriculture, la région bénéficie de certaines autres activités économiques. Le port d'Al-Abdé à Bebnine (Fig. 11) est un centre d'activité pour la pêche. De plus, le tourisme local a commencé à se développer, notamment dans les sites naturels remarquables comme Wadi Jhannam à Hrar et les forêts de Fnaydeq. En complément de ces activités, on trouve également des petits commerces locaux, de l'élevage et de petits artisans.

Bordée par deux rivières, la mer et les crêtes, avec une grande superficie et une très importante population, Al-Kayteh est largement à la hauteur d'un département à l'échelle du Liban, dans une région qui n'est pas dotée de départements.

2.2. Paysages et caractéristiques du territoire

La région d'Al-Kayteh se caractérise par des reliefs variés qui jouent un rôle essentiel dans la configuration de la région. Pour étudier la topographie d'Al-Kayteh, nous allons procéder de

l'ouest à l'est, suivant une altitude croissante de 0 jusqu'au 2230 mètres d'altitude. Plus de détails sur les occupations des sols à Al-Kayteh seront fournis dans le prochain chapitre III.

Ci-dessous (Fig. 12) la répartition des altitudes sur le territoire d'Al-Kayteh :

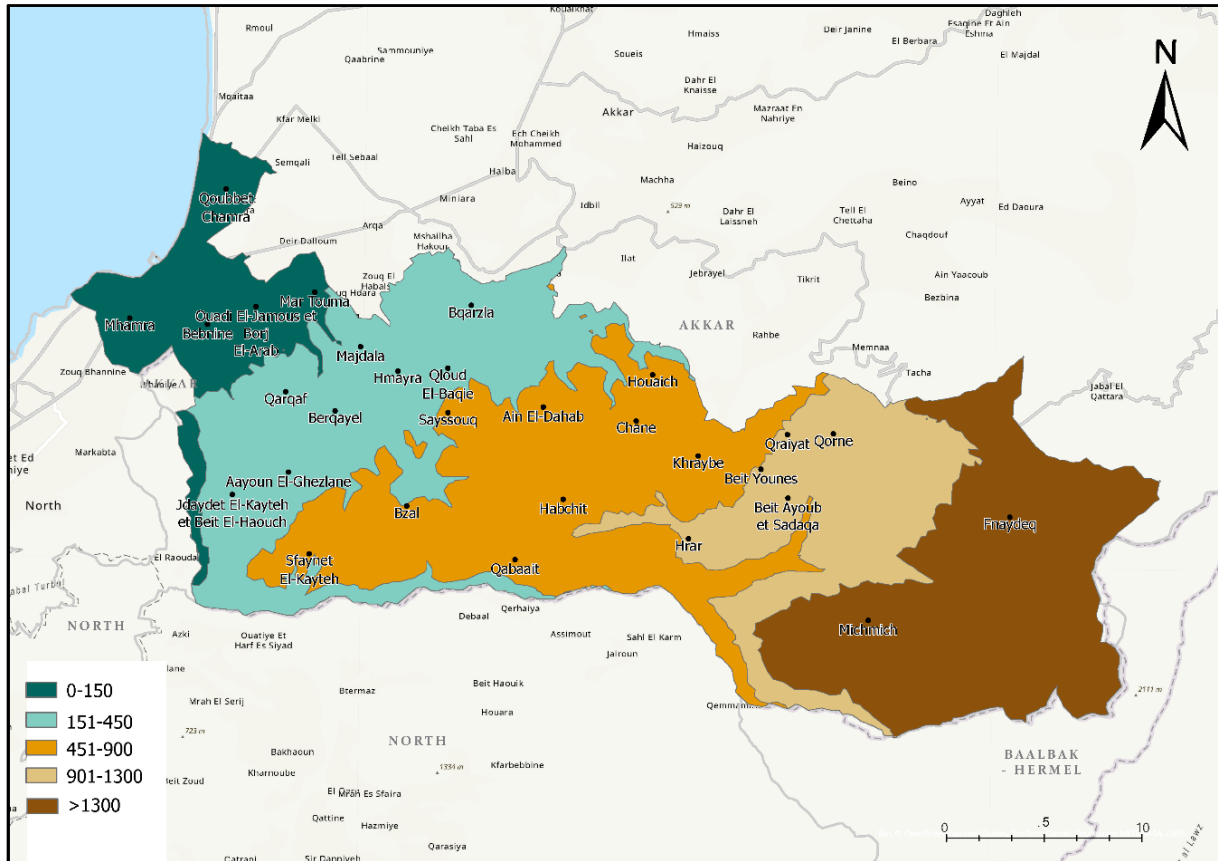


Fig. 12 - La topographie d'Al-Kayteh

Pour comprendre et décrire le territoire d'Al-Kayteh, on se propose de le découper en cinq zones en fonction de la topographie, le climat, l'occupation du sol et les caractéristiques des territoires qui le composent. Ainsi, on propose de diviser la fédération de municipalités de Basse et Moyenne Al-Kayeth en deux zones distinctes : la basse Al-Kayteh et la moyenne Al-Kayteh, et la fédération de municipalités de Haute Al-Kayeth en trois zones distinctes : les territoires d'altitude moyenne de Haute Al-Kayteh, les territoires les plus élevés habités et la montagne. La Basse Al-Kayteh correspond à la partie de la plaine d'Akkar se trouvant à Al-

Kayteh, alors que les quatre autres zones se trouvent sur le plateau d'Al-Kayteh qui fait partie des plateaux d'Akkar. Ces cinq zones sont représentées dans la carte ci-dessous (Fig. 13) :

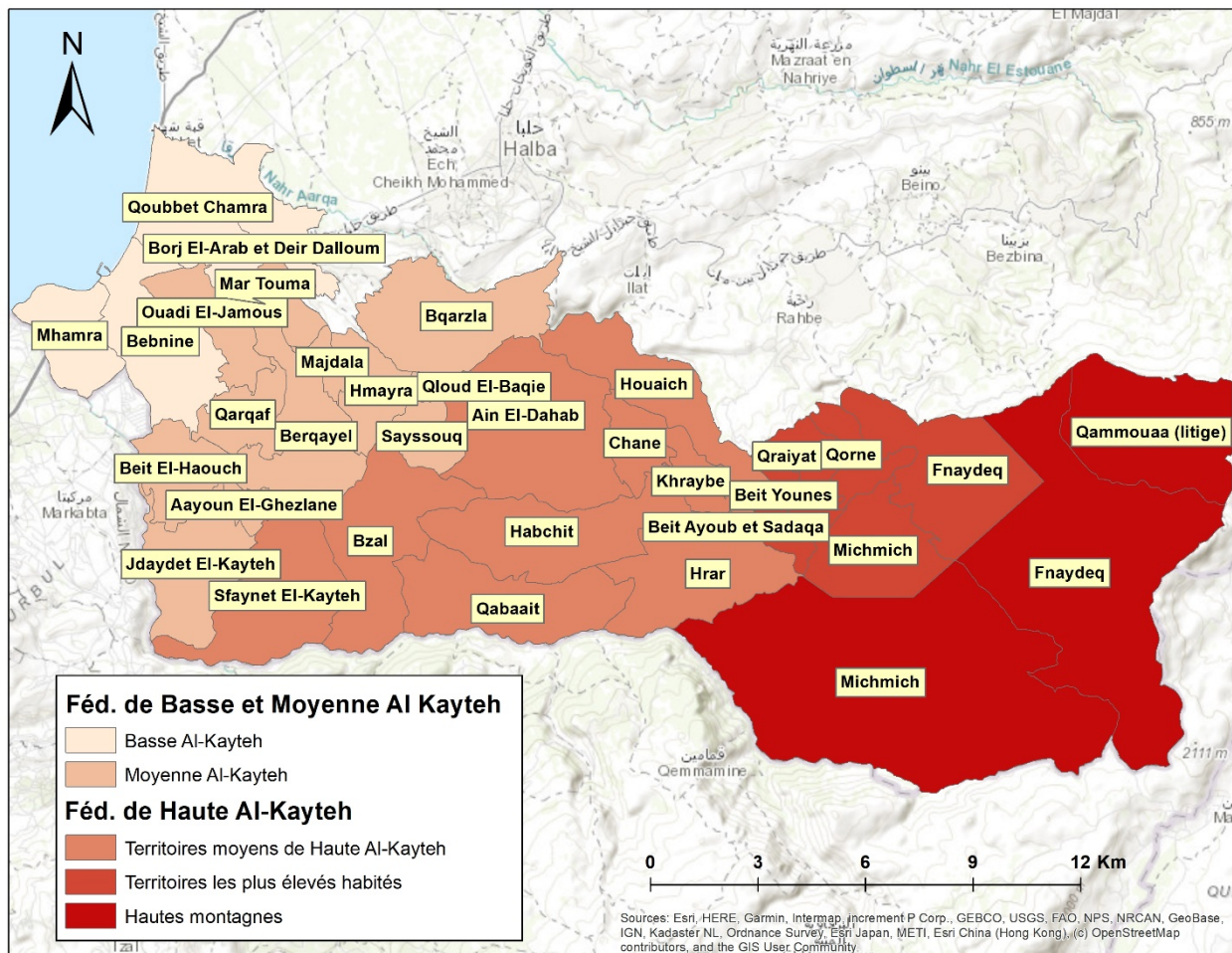


Fig. 13 - Les zones d'Al-Kayteh

Les secteurs de la Basse et Moyenne Al-Kayteh sont décrits de la manière suivante :

- La Basse Al-Kayteh (Fig. 14) : elle appartient à la plaine d'Akkar, c'est la zone littorale du terrain. Elle s'étend le long de la côte méditerranéenne et s'élève progressivement jusqu'à atteindre une altitude maximale de 100 mètres localement. Elle est caractérisée par une densité de population élevée et abrite intégralement ou partiellement quatre villages importants : Mhamra, Bebnine (la plus grande commune d'Akkar), Qoubbet Chamra, et Borj El-Arab. L'agriculture est l'une des activités prédominantes de cette région. Elle englobe la culture de plein champ et sous serre, des légumes ainsi qu'une

production d'agrumes, en particulier dans les villages de Mhamra et Qoubbet Chamra. Toutefois, cette zone agricole connaît un déclin progressif en raison de la croissance urbaine rapide qui s'y produit (détails chapitre III). Les terres autrefois dédiées à l'agriculture se voient de plus en plus converties en zones urbaines pour répondre aux besoins de la population croissante.



Fig. 14 - Un aperçu de la concentration de l'habitat et les cultures de plein champ dans la Basse Al-Kayteh à Mhamra et Bebnine au loin (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020)

- La Moyenne Al-Kayeh : c'est la deuxième partie de la Basse et Moyenne Al-Kayteh, elle correspond aux communes situées entre 100 et 450 mètres d'altitude, elle appartient avec les trois zones restantes au plateau d'Al-Kayteh. Cette région est caractérisée par de petites collines aux pentes douces ou modérées. Elle englobe un ensemble de communes, dont Aayoun El-Ghezlane, Beit El-Haouch, Berqayel, Bqarzla, Hmayra, Jdaydet El-Kayteh, Majdala, Mar Touma, Ouadi El-Jamous, Qarqaf, Qloud El-Baqie, et Sayssouq. L'agriculture dans cette région est dédiée principalement à la culture des oliviers. Cependant, on observe également une tendance marquée à l'artificialisation des sols, résultant de l'expansion urbaine sur place.

En ce qui concerne les secteurs de la Haute Al-Kayteh, on distinguera :

- Les territoires d'altitude moyenne de Haute Al-Kayteh (de 500 à 900 mètres approximativement) : ils comprennent plusieurs communes de taille moyenne, nichées au cœur d'un paysage en mosaïque. On y trouve des vergers d'arbres fruitiers, des cultures en terrasses autour des villages, des forêts et des espaces arbustifs. Ainsi, cette zone sera souvent nommée l'« espace-mosaïque », à cause de la diversité de l'occupation du sol, notamment dans le chapitre III portant sur les occupations du sol à Al-Kayteh. La topographie montre des pentes variables, moyennes à fortes, avec un relief assez montagneux entrecoupé de vallées. Les communes de cette région comprennent Ain El-Dahab, Bzal, Chane, Habchit, Houaich, Hrar, Khraybe, Qabaait et Sfaynet El-Kayteh.
- Les territoires les plus élevés habités (de 900 à 1300 mètres approximativement) : il s'agit principalement de l'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq, centrée autour de Fnaydeq (Fig. 15), la deuxième commune d'Akkar avec 35 225 habitants. Cette agglomération compte environ 65 000 habitants. On y trouve également les deux petites communes de Beit Younes et de Qrayyat. Cette zone se caractérise par un développement

urbain très important, tout en conservant des vergers d'arbres fruitiers autour des zones urbaines.

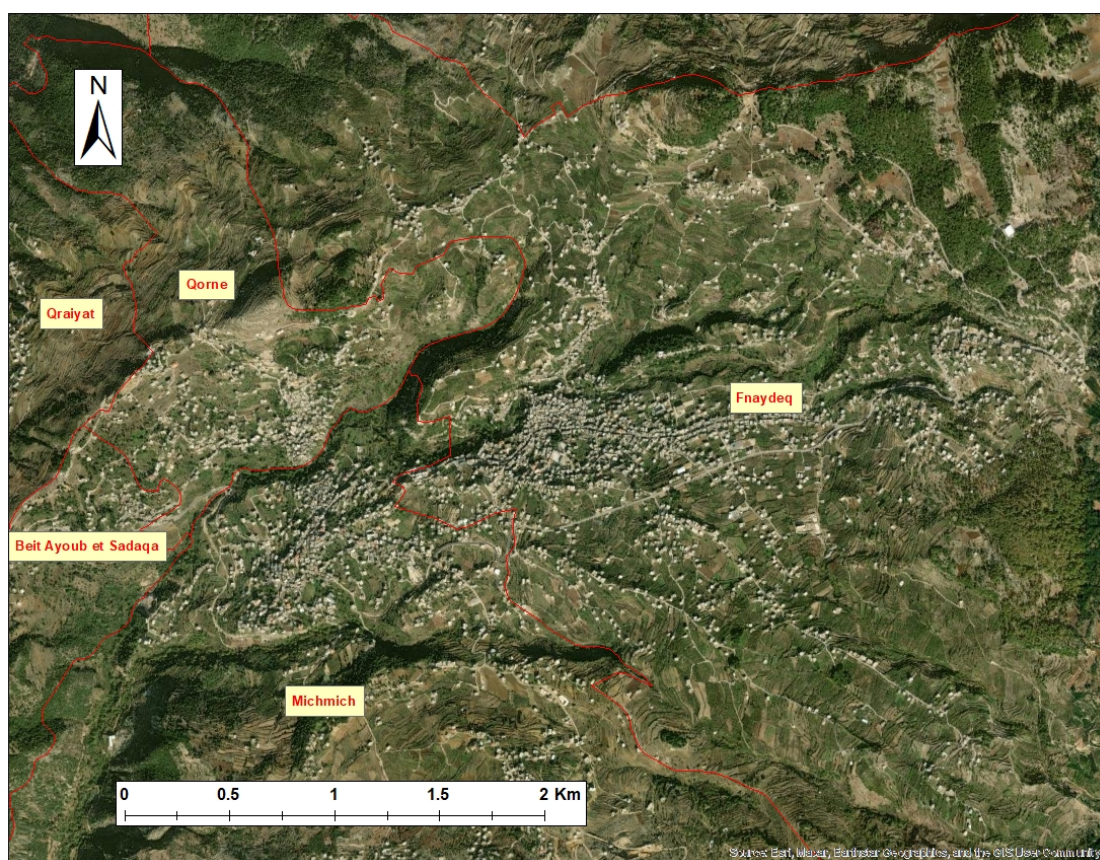


Fig. 15 - L'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq en 2020

- La montagne (1300 - 2230m) (Fig. 16) : elle représente la partie la plus élevée d'Al-Kayteh mais aussi d'Akkar, avec le mont Aarouba atteignant 2230 mètres. Contrairement aux autres zones, elle n'est pas habitée en raison de son climat et de sa topographie. Elle est largement couverte de forêts de chênes et de cèdres, avec des cultures de plein champ saisonnières. Les pentes sont généralement fortes, et cette région est caractérisée par des accidents géographiques marqués. On y trouve certains sommets notables comme Qornet El-Sindyane, qui atteint 1828 mètres. À mesure que l'altitude augmente, les surfaces boisées et naturelles qui dominaient le paysage laissent place à une roche parfois karstifiée, et l'accumulation de neige devient plus importante et durable, atteignant quelques mètres d'épaisseur. Ainsi, cette région, par sa formation géologique et ses

caractéristiques climatiques, constitue le château d'eau de la région. On y trouve de grandes sources abondantes, comme par exemple la source Keif-Ettine (Michmich) qui est canalisée vers une station de distribution à Qabaait (Fig. 25) et nourrit ainsi plusieurs villages des communes moyennes de Haute Al-Kayteh. Plusieurs prélèvements FNAIDEQ-1, FNAIDEQ-2, MECHMEHC-2, etc, ont été réalisés dans cette région.



Fig. 16 - Les hautes montagnes d'Al-Kayteh (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020)

2.3. Un climat méditerranéen typique

Le climat d'Al-Kayteh, tout comme la majeure partie de la moitié ouest du Liban est essentiellement de type méditerranéen, la classification climatique de Köppen plaçant le Liban dans la catégorie Csa (Allam *et al.*, 2020). Cette caractéristique climatique se traduit par des étés chauds et secs, marqués par des températures estivales généralement élevées. Ces mois estivaux sont souvent ensoleillés, mais connaissent très peu de précipitations, ce qui peut engendrer des problèmes de sécheresse à la fin de l'été (Nasser *et al.*, 2020). Par contraste, les hivers sont généralement doux et humides. Pendant cette saison, les précipitations sont plus fréquentes, accompagnées de températures plus fraîches et la neige

tombe sur les hauts villages de la région. Ainsi, on observe une nette variation saisonnière entre l'été et l'hiver, avec des contrastes marqués en termes de températures et de précipitations. Ce climat méditerranéen favorise une végétation adaptée à ces conditions, notamment des arbres à feuilles persistantes comme les oliviers, les pins et les cyprès.

Ainsi, une gestion rigoureuse des ressources en eau au Liban doit impérativement prendre en considération la distribution et la variabilité des précipitations sur son territoire. La saison sèche est très longue au Liban, ainsi que les ressources en eau sont liées directement aux précipitations, avec une topographie qui varient beaucoup dans le temps et dans l'espace (Traboulsi, 2004). Les précipitations neigeuses représentent une part importante au Liban, elles alimentent les nappes souterraines et atténuent les effets de cette variabilité, contribuant ainsi à la réduction du déficit hydrique.

En effet, le climat au Liban est la résultante de plusieurs facteurs géographiques qui, en se conjuguant, contribuent à une originalité climatique frappante qui réside, comme toutes les régions méditerranéennes, dans sa sécheresse estivale associée à des températures élevées et à la douceur de la saison pluvieuse. La disposition du relief joue un rôle très important dans la répartition spatiale de la pluviométrie (Traboulsi, 2010). Ainsi, la moitié ouest du pays, exposée à la mer, reçoit plus de précipitations, notamment sur les hautes montagnes, que la moitié est caractérisée par un climat continental, voire semi-aride au nord-est du pays.

Nous allons étudier les caractéristiques climatiques locales d'Al-Kayteh à travers l'étude des précipitations et de la température sur le terrain. La réalisation de cette partie se fera en utilisant les données météorologiques offertes par le LARI (Lebanese Agricultural Research Institute), qui possède deux stations à Al-Kayteh : la station d'Al-Aabdé à Bebnine et la station de Fnaydeq.

La plaine d'Akkar reçoit entre 750 à 800 mm de précipitations par an (Traboulsi, 2010). Par contre, les parties sommitales de la chaîne occidentale totalisent une quantité annuelle moyenne de plus de 1600 mm selon les altitudes (Traboulsi, 2010), favorisant les précipitations neigeuses sur les hautes montagnes. L'épaisseur de la couche neigeuse peut atteindre quelques mètres vers les plus hautes altitudes présentant ainsi une source importante de recharge des sources.

La carte ci-dessous (Fig. 17) représente la distribution de la moyenne annuelle des précipitations entre 2011 et 2016 à Al-Kayteh :

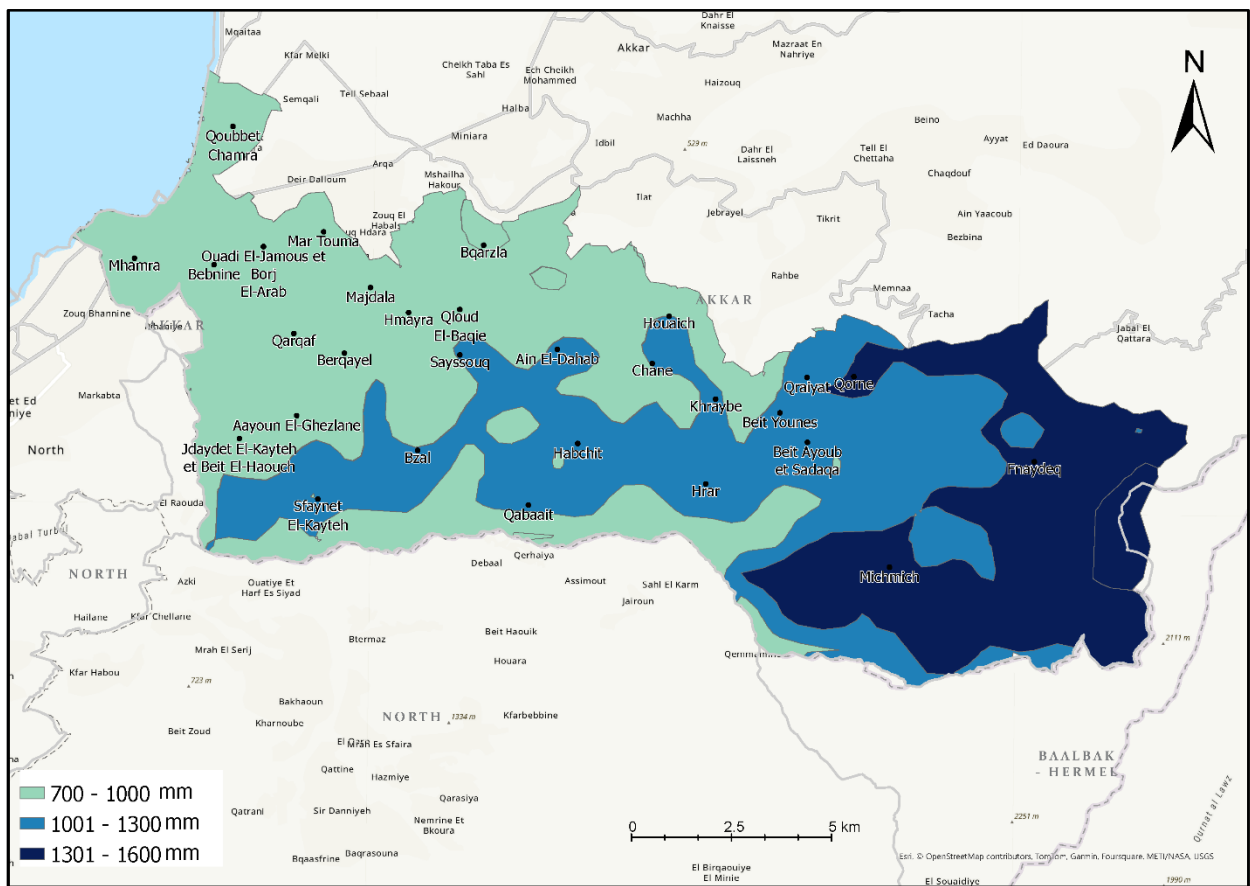


Fig. 17 - La distribution de la moyenne annuelle de précipitations (en mm) entre 2011 et 2016 à Al-Kayteh

Pour préciser l'information, on peut observer la moyenne mensuelle des précipitations à Al-Aabdé (Bebnine) et à Fnaydeq entre 2011 et 2016 :

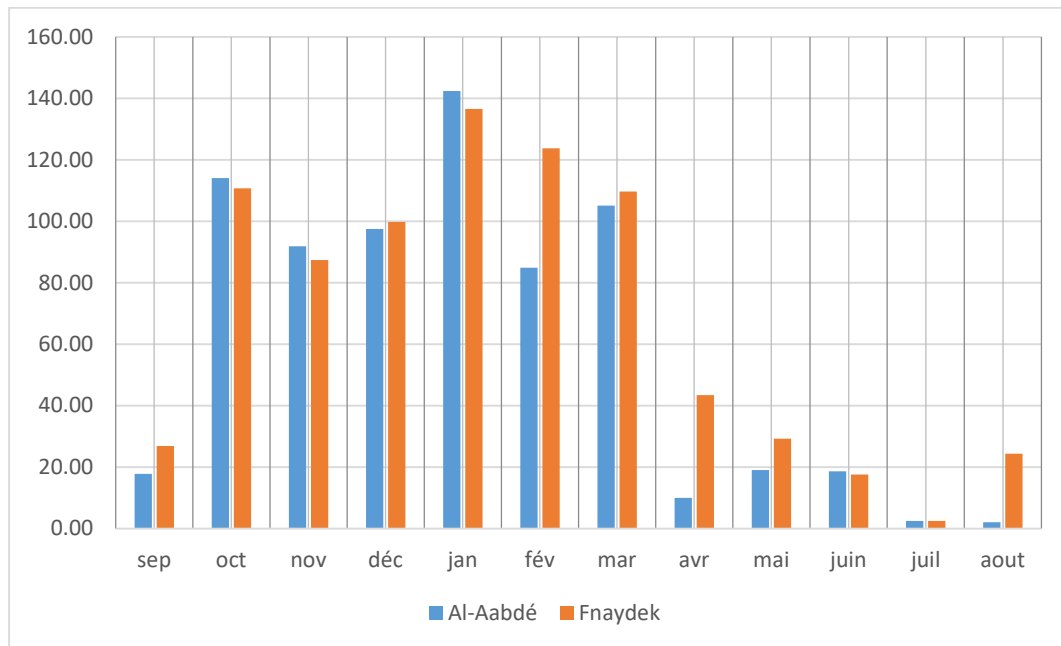


Fig. 18 - La moyenne mensuelle des précipitations (en mm) dans les stations d'Al-Aabdé et Fnaydek entre les années 2011 et 2016

Les précipitations sont plus importantes à Fnaydeq (812 mm) qui se trouve à 1130 mètres d'altitude qu'à Al-Aabdé (706 mm), qui se trouve à 40 mètres d'altitude (Awad et Akkari, 2023). On estime que les données de Fnaydeq ne sont pas très précises et la moyenne annuelle de la station devrait être entre 1000 et 1200 mm selon l'étude de Trabousli (2010).

En général, on observe que les précipitations s'installent sur la région à partir du mois d'octobre jusqu'en avril. Notons que le mois de janvier est le mois le plus pluvieux. Cette période humide est suivie par une longue période de sécheresse allant de cinq à six mois de faibles précipitations, voire sans précipitations pour les mois de juillet et d'août, ces deux mois marquant le minimum de pluviométrie pour la station d'Al-Aabdé.

En ce qui concerne la température, les relevés de température dans les stations de la zone montrent que les températures les plus basses sont enregistrées en janvier et les plus hautes au mois d'août (Fig. 19). La température joue un rôle important dans la fonte des neiges qui est

le facteur principal alimentant les sources d'eau. Il existe donc une relation étroite liant le débit à la température.

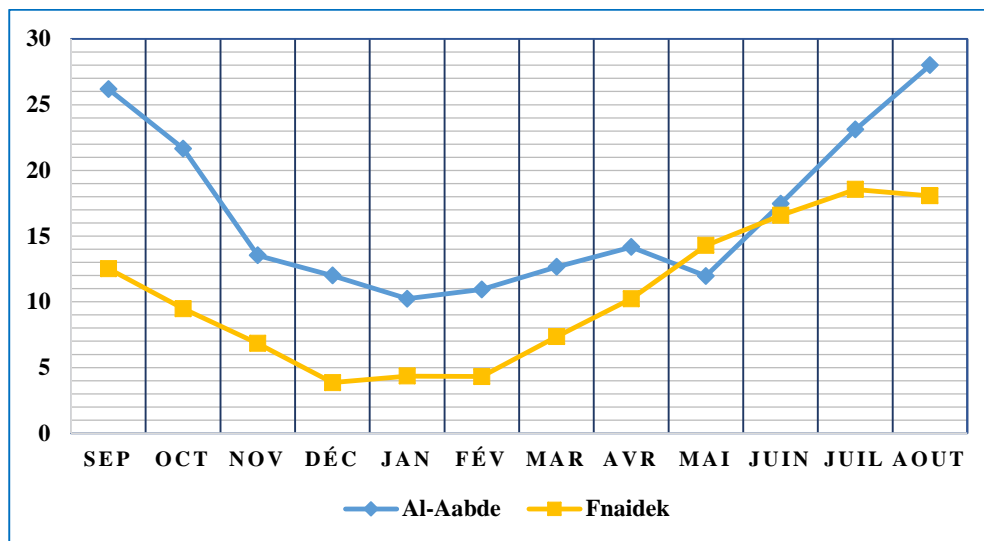


Fig. 19 - Les températures mensuelles moyennes (en °C) enregistrées aux stations d'Al-Aabdeh et Fnaidek entre 2011 et 2016

La carte ci-dessous (Fig. 20) représente la distribution de la température annuelle moyenne sur le terrain d'étude :

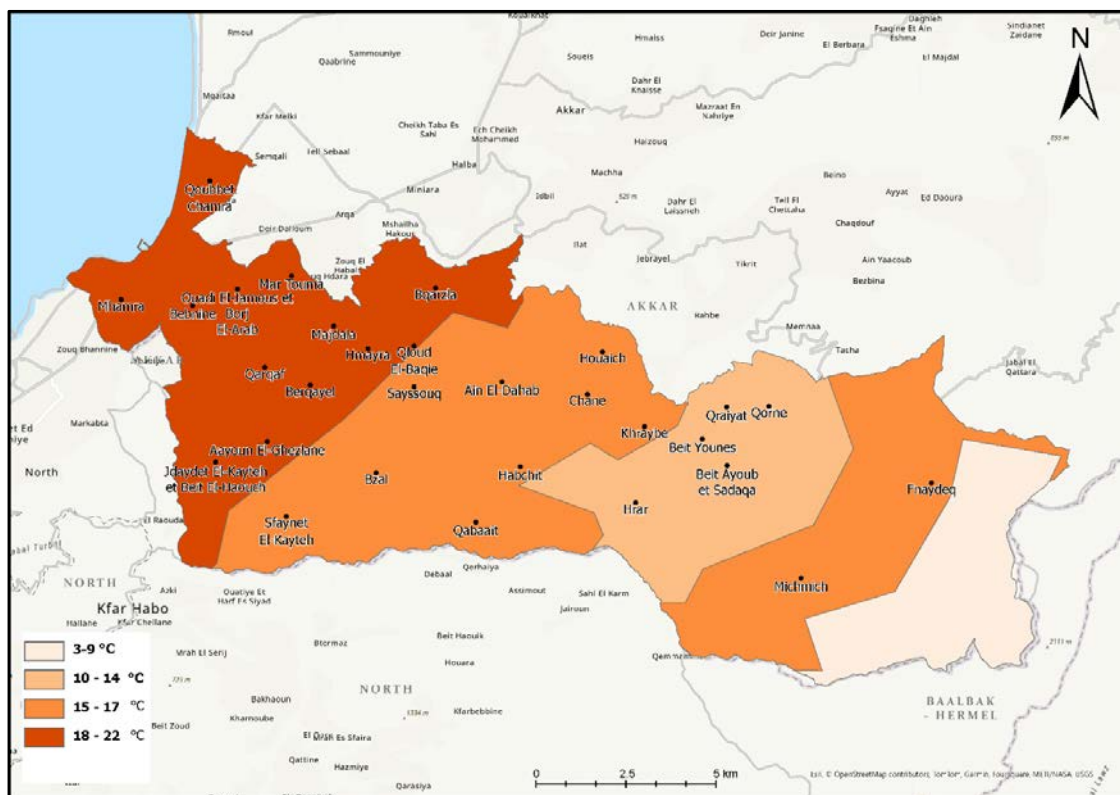


Fig. 20 - La distribution de la température annuelle moyenne (en °C) à Al-Kayteh

La région d'Al-Kayteh, comme la moitié ouest du Liban, est ainsi caractérisée par un climat méditerranéen typique, avec six mois de sécheresse entre avril et septembre (Fig. 21). Le diagramme ombrothermique de la station d'Al-Aabdé (Fig. 21) illustre bien les caractéristiques climatiques du littoral d'Al-Kayteh :

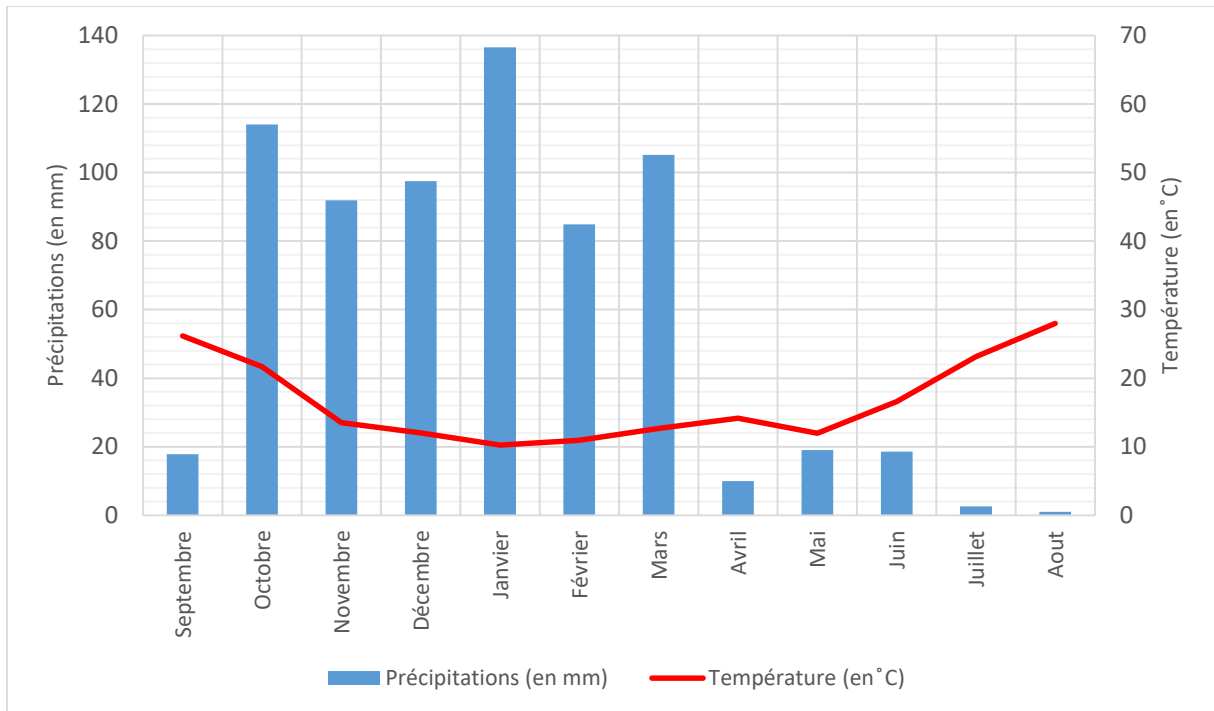


Fig. 21 - Diagramme ombrothermique de Bebnine pour la période 2011-2016

Ce diagramme a été réalisé en se basant sur les données fournies par le LARI (Lebanese Agricultural Research Institute) de la station d'Al-Aabdé (40 m) à Bebnine entre 2011 et 2016.

2.4. Un territoire aux formations géologiques variés

L'étude de la géologie d'Al-Kayteh est essentielle pour compléter notre approche géographique, nous permettant de comprendre la présence, la dimension des nappes souterraines, ainsi que la vulnérabilité des ressources en eau souterraine de la région. La structure géologique de la zone d'étude montre une succession d'affleurements de nature différente. L'étude de la géologie d'Al-Kayteh se fera en s'appuyant sur les feuilles de

HAMIDIYE-HALBA et de SIR ED DANIE des cartes géologiques détaillées du Liban à 1/50 000, établie par Louis DUBERTRET en 1951. Ci-dessous la carte géologique d'Al-Kayteh (Fig. 22) et une coupe géologique à Ouadi Jhanam au sud d'Al-Kayteh (Fig. 23) :

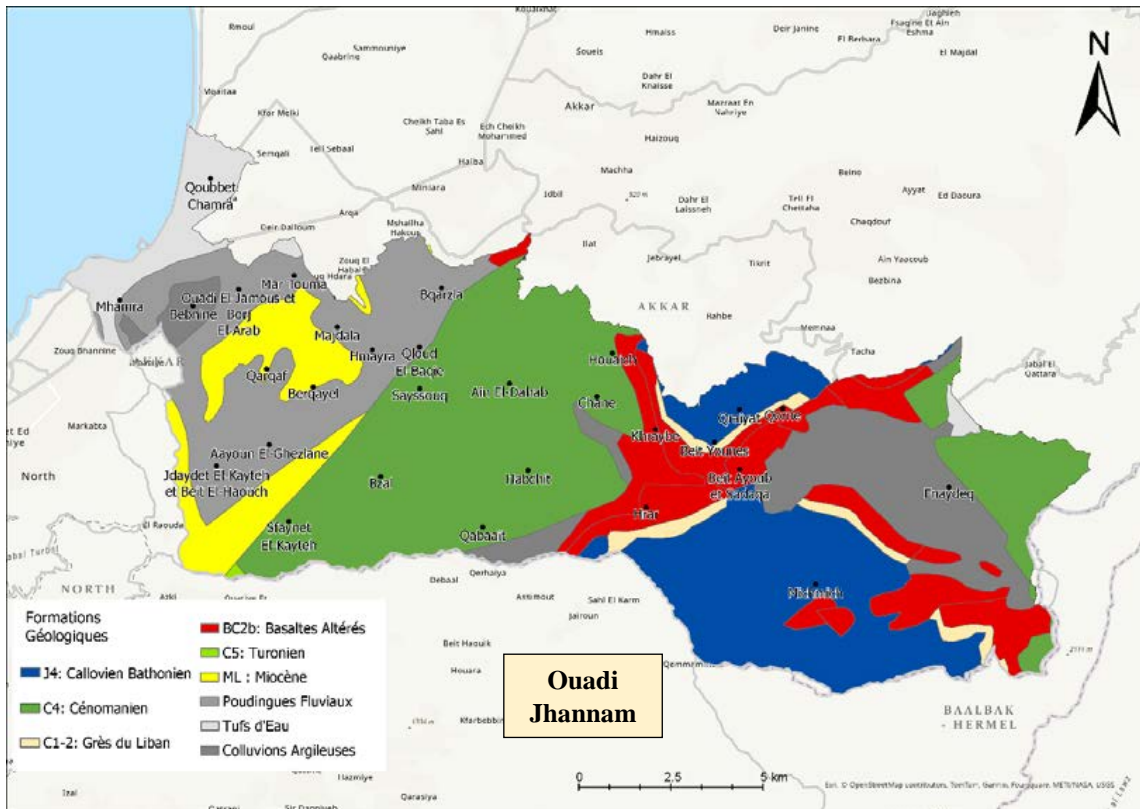


Fig. 22 - Carte géologique d'Al-Kayteh

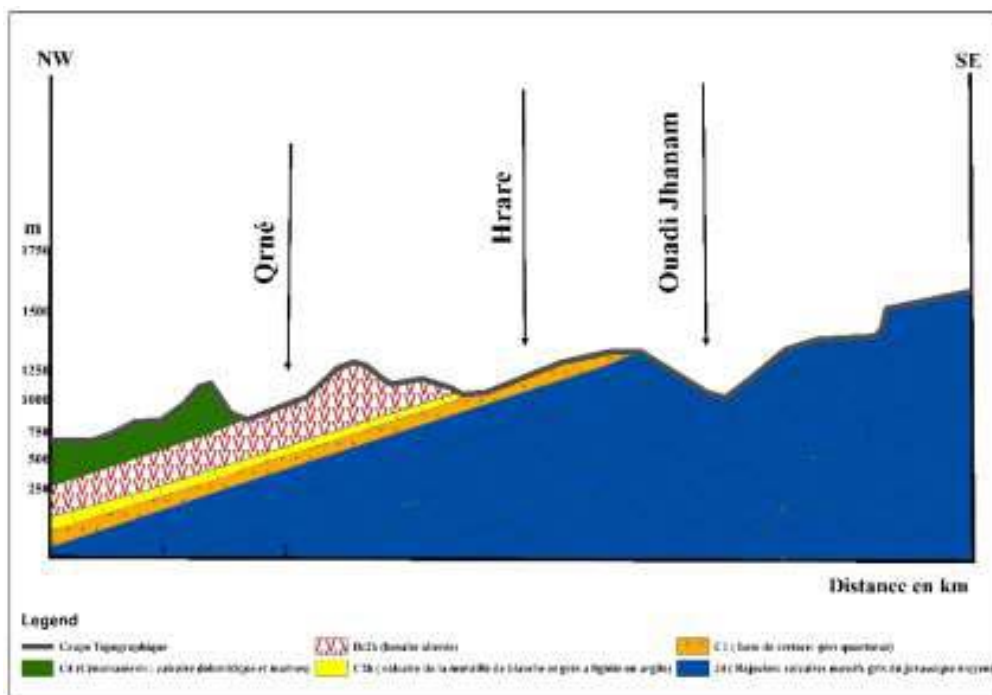


Fig. 23 - Coupe géologique à Ouadi Jhanam

Formations karstiques du Jurassique

Les couches du Jurassique moyen (j4) se composent principalement de calcaires et de dolomie, qui reposent sous les terrains volcaniques. Les affleurements de ces couches sont particulièrement visibles dans la Haute Al-Kayteh, notamment à Beit Younes, les hautes montagnes de Michmich et les versants sud de Hrar à Ouadi Jhannam (Fig. 24).



Fig. 24 – Formations karstiques du Jurassique moyen (j4) à Ouadi Jhanamm à Hrar
Ces roches sédimentaires sont propices à la formation de réservoirs aquifères et de formations karstiques, ce qui signifie qu'elles ont la capacité de stocker et de transmettre d'importantes quantités d'eau souterraine. La porosité et la perméabilité élevées de ces roches en font des terrains particulièrement favorables à l'écoulement de l'eau souterraine. Cependant, cette porosité et perméabilité accrues rendent également ces terrains très vulnérables à la pollution de l'eau.

Formations vulnérables du Crétacé

Elles se développent de l'Aptien (c2) au Turonien (c5) sur ce territoire. Au cours de cette période, on observe deux principaux types de sédiments, chacun ayant ses caractéristiques

particulières. Le premier type de sédiments se compose de conglomérats alternant avec des couches calcaires stratifiées, formés principalement dans des mers peu profondes. Ils sont également entrecoupés par d'épaisses couches de basalte résultant de plusieurs périodes d'activité volcanique. Le deuxième type de sédiments se caractérise par des formations carbonatées plus stratifiées.

Dans la région d'étude, le Crétacé inférieur est caractérisé par une faible proportion de dépôts sableux et une prédominance de roches basaltiques. Ces couches géologiques forment les altitudes moyennes de la Haute Al-Kayteh. Il est essentiel de noter que les ressources en eau du Crétacé, en particulier celles contenues dans les formations du Cénomanién (c4), qui couvrent une grande partie de ce territoire, sont vulnérables à la pollution en raison de leur porosité et de leur perméabilité. Cela peut faciliter la migration de contaminants dans les aquifères jurassiques sous-jacents. Les zones d'affleurements de l'Aptien (c2) et du Turonien (c5), bien que moins poreuses, ne sont pas exemptes de risque de contamination, mais leur vulnérabilité est moindre.

Formations du Miocène avec des nappes étendues

Le Miocène a laissé un héritage géologique dans la région. On observe des affleurements composés principalement de marne lacustre, de conglomérats et d'argile rouge à Ouadi El-Jamous et à Bqarzla, alors que dans la région de Qarqaf, Jdaydet El-Kayteh et Sayssouq se développent des poudingues grossiers et des conglomérats marneux.

En ce qui concerne la vulnérabilité à la pollution de l'eau, ces formations contiennent des nappes étendues (PNUD, 1967), généralement considérées comme ayant une vulnérabilité moyenne à faible. La vulnérabilité dépend de plusieurs facteurs, notamment la perméabilité des roches et la nature des matériaux qui les composent. Les conglomérats et les poudingues

grossiers peuvent avoir une certaine perméabilité, ce qui peut influencer la capacité de ces formations à filtrer les contaminants.

Formations du Pliocène et du Pléistocène faiblement vulnérables

Les formations du Pliocène sont composées principalement de marne, de calcaire et de marno-calcaire, Les formations du Pléistocène quant à elles, sont principalement constituées de grès calcaire et de calcaires gréseux marins.

Ces formations géologiques se trouvent alternativement dans les régions hautes de Basse Al-Kayteh, notamment à Mhamra, Bebnine et Borj El-Arab mais aussi à Bqarzla. Ces régions sont généralement sans nappes ou à nappes très locales (PNUD, 1967) et elles sont considérées comme étant faiblement vulnérables.

Formations du Quaternaire avec des nappes locales ou discontinues

Les formations quaternaires sont assez diversifiées dans la région d'Al-Kayteh. À Michmich, Fnaydeq et dans la montagne de Fnaydeq. Les caractéristiques de ces couches d'éboulis influencent leur vulnérabilité à la pollution de l'eau, qui est généralement considérée comme moyenne à faible. Les nappes de ces régions sont locales ou discontinues (PNUD, 1967).

3. Le secteur de l'eau à Al-Kayteh : un sujet complexe et de multiples défis

Cette section se penche sur le secteur de l'eau à Al-Kayteh, mettant en lumière la complexité des défis et des difficultés qu'il connaît. En effet, ce sujet, d'une grande complexité, constituer un sujet de recherche à part entière. La gestion et la sécurité en eau représentent des enjeux cruciaux dans cette région, avec des questions critiques telles que l'accès inéquitable au réseau d'eau public et l'exploitation massive et non réglementée des ressources en eau de la région. De plus, la gestion des eaux usées à Al-Kayteh présente des défis complexes et urgents en dépit des efforts déployés pour résoudre ces problèmes. Ainsi, les eaux usées représentent un risque majeur pour la qualité des ressources en eau de la région.

3.1. Eau potable et domestique : un accès inéquitable au réseau public et une exploitation massive et non contrôlée des ressources en eau locales

La question de l'eau à Al-Kayteh s'avère être très complexe et présente des défis importants. Les eaux de surface de la région, notamment les rivières d'Arqa et d'Al-Bared, sont malheureusement polluées (Shaban, 2019 ; Dagher *et al.*, 2021). Malgré cette pollution, certaines personnes les utilisent encore pour l'irrigation. En parallèle, l'accès à l'eau potable est inéquitable, avec de nombreuses communes non connectées au réseau public de l'eau. Même dans celles qui sont connectées, les coupures d'eau sont fréquentes, particulièrement en été.

Pour répondre aux besoins en eau, plusieurs approches sont adoptées. Certaines communes ont mis en place des stations qui captent l'eau à partir de sources plus importantes. Ces

sources sont ensuite canalisées puis redistribuées aux villages à l'aide de châteaux d'eau ou de stations spécifiques, suivant un calendrier prédéfini en donnant un quota de temps à chaque village. La construction de ces stations est souvent financée par des gouvernements étrangers ou des ONG, comme par exemple les grandes stations de Qabaait (Fig. 25) et de Hrar (Fig. 26) qui distribuent les eaux des sources de Keif-Ettine et de Braghach respectivement.



Fig. 25 - La station de la source Keif-Ettine à Qabaait (Ahmad KAMALEDDINE, 24/09/2020)



Fig. 26 - La station de la source Barghach à Hrar (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020)

D'autre part, des stations ont été établies autour de puits abondants pour répondre aux besoins en eau de leurs villages respectifs. Des exemples de ces puits peuvent être trouvés à Bzal (Fig. 27), Michmich (Fig. 28) et Mhamra (Fig. 29).



Fig. 27 - La station du puits Mbarkine à Bzal (Ahmad KAMALEDDINE, 24/09/2020)



Fig. 28 - La station du puits Wata-Michmich (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020)



Fig. 29 - La station du puits Haj-Obeid à Mhamra (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020)

Il existe donc des stations de différentes tailles et capacités. Celles construites autour des sources peuvent répondre partiellement ou totalement aux besoins d'un nombre important de villages, tandis que celles basées sur des puits répondent partiellement ou totalement aux besoins d'un village. Toutes ces stations sont gérées par l'État ou les collectivités territoriales, avec parfois un traitement de l'eau avant distribution.

Par ailleurs, l'utilisation des puits reste répandue au Liban en raison de la richesse en eaux souterraines, favorisée par des précipitations relativement abondantes et une géologie majoritairement karstique ou poreuse (Verdeil *et al.*, 2016). Cependant, la grande majorité de ces puits sont illégaux, en grande partie en raison de la complexité et de la lenteur du processus d'obtention de licences d'exploitation. Ainsi la qualité des eaux de ces puits n'est

pas suivie ou contrôlée. Les puits sont souvent creusés pour pallier le manque d'eau public ou pour obtenir une source d'eau plus stable.

Dans de nombreuses communes d'Al-Kayteh, chaque quartier possède un ou plusieurs puits, qui extraient l'eau de la nappe souterraine à des profondeurs variables. Les puits sont couverts et protégés, et l'eau est pompée à l'aide d'un moteur électrique et des tuyaux de différents diamètres en fonction du débit. Certains puits sont à usage individuel, tandis que d'autres sont collectifs, où le propriétaire du terrain creuse le puits et distribue l'eau à ses voisins, souvent contre une somme d'argent. Les réseaux de distribution sont gérés et entretenus par les propriétaires et peuvent desservir jusqu'aux plusieurs dizaines d'habitations. Ci-dessous des exemples de puits situés à Al-Kayteh.



Fig. 30 - Exemples de puits à Al-Kayteh (Ahmad KAMALEDDINE, septembre 2020)

En revanche, les sources représentent également une ressource en eau largement utilisée à Al-Kayteh. Les habitants se rendent fréquemment collectivement aux sources, munis de bidons,

pour s'approvisionner en eau. Ces sources sont souvent utilisées comme source d'eau potable. Les sources au débit important attirent les habitants de plusieurs villages voisins. Dans de nombreux cas, des fontaines équipées de robinets sont installées au-dessus des sources pour faciliter l'accès à l'eau. Dans certains cas, nous avons observé l'utilisation de tuyaux au niveau de la source pour acheminer l'eau vers les habitations voisines à des fins domestiques. Ci-dessous des exemples de sources situées à Al-Kayteh.



Fig. 31 - Exemples de sources à Al-Kayteh (Ahmad KAMALEDDINE, septembre 2020)

Il est important de noter que tous nos échantillons d'eau ont été prélevés au niveau d'un puits ou d'une source. Ces deux sources en eau présentent des caractéristiques différentes. Les puits sont plus profonds que les sources et sont souvent situés à proximité des habitations, tandis que les sources sont plus vulnérables à la pollution en raison de leur proximité à la surface, et elles peuvent être présentes dans des zones agricoles ou naturelles.

3.2. La gestion des eaux usées d'Al-Kayteh : un réseau d'égouts déficient, mettant en péril la ressource en eau

La problématique de gestion des eaux usées à Akkar et à Al-Kayteh est très complexe. En effet, les méthodes de gestion des eaux usées à Al-Kayteh varient sensiblement d'une commune à l'autre, et même au sein de différents quartiers. Étant donné l'absence de publications sur ce sujet à Akkar, nous avons contacté des élus municipaux et des acteurs locaux pour avoir des informations sur le sujet. Les données recueillies, malgré leur aspect non formel et incomplet, ont contribué à la compréhension de la question de l'assainissement à Al-Kayteh et de connaître les modes d'élimination des eaux usées sur chaque site de prélèvement. Ces derniers figureront dans le tableau de synthèse des items retenus dans le chapitre V de la thèse.

Un réseau d'égouts a été mis en place à Al-Kayteh au début des années 2000. Ce réseau n'a pas couvert toutes les communes. De plus, l'état de dégradation actuel du réseau aggrave encore la situation, d'autant plus que les collectivités locales ne disposent pas des moyens nécessaires pour en assurer l'entretien. Par ailleurs, il est crucial de noter que ce réseau n'est pas équipé d'une station de traitement des eaux usées, ce qui conduit au rejet direct de ces eaux souvent dans les vallées environnantes, notamment dans les affluents de la rivière Al-Bared et d'autres cours d'eau.

Les communes non desservies par le réseau d'égout principal ont recours aux fosses septiques pour l'élimination des eaux usées. Cette pratique s'étend également aux quartiers non couverts par l'ancien réseau au sein des communes déjà desservies. Toutefois, il convient de souligner que les fosses septiques ne constituent pas une solution durable et présentent des risques sérieux de contamination des ressources en eau. Les fuites d'eaux usées dans le sol et les nappes phréatiques peuvent altérer la qualité de l'eau et engendrer des problèmes environnementaux.

Cependant, l'ancien réseau d'égouts n'a pas été étendu depuis pour couvrir les nouveaux quartiers et les communes non équipées, créant ainsi des défis supplémentaires, notamment en raison du développement urbain important que connaît la commune. Le manque d'intégration efficace de ces quartiers au réseau d'assainissement peut favoriser une croissance non contrôlée des solutions individuelles, mettant davantage en péril les ressources en eau.

Pour résoudre ce problème, un projet ambitieux de construction d'un nouveau réseau d'égout, accompagné d'une station de traitement des eaux usées à Qoubbet Chamra, a été lancé dans la région de la Basse et Moyenne Al-Kayteh. Un autre excellent projet de création d'une station de traitement des eaux usées à Michmich a été lancée dans la région de Haute Al-Kayteh (Fayssal *et al.*, 2020).

Toutefois, ce projet n'a été que partiellement achevé en raison de la pandémie du COVID-19, de la dévaluation de la monnaie nationale et des difficultés économiques au Liban. Par conséquent, certaines communes sont presque entièrement desservies par ce nouveau réseau, tandis que d'autres ont vu le projet être interrompu avant sa réalisation. La station de traitement des eaux usées de Qoubbet Chamra n'a pas non plus été mise en service, ni celle de Michmich.

D'ailleurs, il est intéressant de noter que la commune de Mhamra a récemment réussi à mettre en place un nouveau réseau d'égout de qualité, grâce au soutien financier de partenaires étrangers. En définitive, la gestion des eaux usées dans la région d'Al-Kayteh demeure un défi complexe aux multiples facettes. Chaque commune, voire chaque quartier, a élaboré ses propres solutions pour traiter les eaux usées.

4. Conclusion intermédiaire

Le territoire d'Al-Kayteh, partie prenante de la région d'Akkar, présente une grande diversité topographique en englobant à la fois la plaine et les plateaux d'Akkar. S'étendant des côtes méditerranéennes jusqu'au sommet d'Aarouba, le point culminant d'Akkar à 2230 mètres, il est administré par deux intercommunalités, la Fédération de municipalités de Basse et Moyenne Al-Kayteh et la Fédération de municipalités de Haute Al-Kayteh. Avec une superficie de 211 km², Al-Kayteh représente 26% de la surface totale d'Akkar et abrite environ 260 000 habitants, soit 60% de la population de la région. C'est une région rurale et pauvre, avec l'agriculture comme principale activité économique.

Sur le plan climatique, Al-Kayteh connaît un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. La zone littorale d'Al-Kayteh reçoit entre 750 et 800 mm de précipitations par an. En revanche, les parties sommitales de la région reçoivent environ 1600 mm de précipitations par an avec des accumulations importantes de la neige, contribuant ainsi à l'alimentation des nappes souterraines et les plans d'eau pendant la longue saison sèche.

Le territoire d'Al-Kayteh peut être divisé en plusieurs zones en fonction de l'altitude et d'autres caractéristiques. La Basse Al-Kayteh, appartenant à la plaine d'Akkar, s'étend le long de la côte méditerranéenne et abrite une densité de population élevée. Elle est principalement consacrée aux cultures de plein champ, bien que l'urbanisation rapide commence à réduire les terres agricoles. Tandis que la Moyenne Al-Kayteh englobe les zones situées entre 100 et 500 mètres d'altitude, caractérisées par de petites collines et des activités oléicoles. Cependant, l'artificialisation des sols due à l'expansion urbaine est de plus en plus visible.

La Haute Al-Kayteh se divise en trois zones distinctes. Les zones moyennes comprennent plusieurs communes entourées de vergers, de cultures en terrasses, de forêts et d'espaces arbustifs. Les zones les plus élevées habitées se caractérisent par un développement urbain important tout en maintenant des cultures d'arbre fruitiers et des forêts. Enfin, les montagnes d'Al-Kayteh, sont inhabitables en raison de leur climat rigoureux.

Du point de vue géologique, la région présente une diversité d'affleurements. Les formations du Jurassique, du Crétacé et du Miocène sont vulnérables à la pollution en raison de leur porosité et possèdent des nappes étendues, tandis que les formations du Quaternaire, du Pliocène et du Pléistocène sont moins vulnérables et avec des nappes très locales.

En ce qui concerne l'accès à l'eau potable, Al-Kayteh connaît un accès inéquitable où de nombreuses communes ne sont pas connectées au réseau public. Ainsi, pour répondre aux besoins en eau, des grandes stations ont été établies pour acheminer l'eau de sources importantes et la distribuer aux villages, les puits abondants alimentent également certaines petites stations. Ces stations sont gérées par l'état ou les collectivités territoriales.

En outre, l'utilisation de puits est une tradition au Liban et elle est très courante à Al-Kayteh. La plupart de ses puits sont illégaux, ainsi que la qualité de leur eau n'est pas suivie. Chaque quartier possède souvent ses propres puits, certains sont à usage individuel et d'autres collectifs. Toutefois, les sources d'eau sont également largement utilisées. Elles sont d'usage collectif et souvent utilisées comme source d'eau potable.

La gestion des eaux usées à Al-Kayteh est complexe, avec des méthodes variées d'une commune à l'autre et d'un quartier à l'autre. Le réseau d'égouts existant est obsolète et déficient. Il ne couvre pas toutes les communes ni les nouvelles constructions, et n'est pas équipé de stations de traitement. Les zones non desservies par le réseau ont recours aux fosses septiques, mais cela pose des sérieux risques de contamination de l'eau. Alors, des

projets de construction de nouveaux réseaux d'égouts et de stations de traitement ont été lancés, mais plusieurs raisons ont entravé leur achèvement. Ainsi, le nouveau réseau d'égouts n'a été construit que partiellement et les stations de traitement ne sont jamais entrées en service.

**Partie II : L'occupation du sol et la qualité des ressources
en eau à Al-Kayteh : état, évolution et impacts**

**Chapitre III : Les modalités de l'occupation des sols à Al-Kayteh :
évolution diachronique et situation actuelle**

Notre étude repose sur l'analyse de l'occupation des sols, qui est la variable indépendante de notre problématique. Nous examinerons les différents types d'occupation du sol à Al-Kayteh sur trois années—: 1962, 2005 et 2017. Les objectifs de ce chapitre sont d'étudier les caractéristiques de l'occupation des sols à Al-Kayteh, de comprendre leur répartition, leur évolution et de caractériser l'état actuel.

1. Méthodologie de l'étude

Avant d'aborder la question de l'occupation des sols à Al-Kayteh, nous allons présenter les études antérieures sur ce sujet, la méthodologie de notre étude et les sources de données que nous allons utiliser.

1.1. Les études antérieures portant sur l'occupation du sol au Liban et à Akkar

Il existe peu de publications traitant de la question de l'occupation des sols et de leur évolution au Liban. La majorité de ces travaux sont des articles publiés dans le "Lebanese Science Journal" qui est le journal du CNRS-Liban (Darwish *et al.*, 2004 ; Faour, 2015 ; Masri *et al.*, 2002), où on retrouve principalement les travaux de monsieur Ghaleb FAOUR, le directeur du CNRS-Liban. En revanche, il existe de nombreuses études sur l'urbanisation au Liban, mais celles-ci se concentrent principalement sur les villes libanaises, notamment Beyrouth (e.g. Davie et Drouot, 2000 ; Faour *et al.*, 2005 ; Faour et Mhawej, 2014 ; Marot, 2018 ; Sinan, 2022). Cependant, la majorité des cartes de l'occupation du sol du Liban sont élaborées par le CNRS-Liban et des partenaires.

On trouve également des Atlas du Liban qui peuvent traiter de manière très générale la question de l'occupation du sol, sans aucun intérêt particulier accordé à Akkar. Nous avons trouvé ainsi dans l'« *Atlas du Liban: Les nouveaux défis* » de Verdeil *et al.* (2016) que le développement urbain à Akkar se caractérise par un fort dynamisme avec un développement urbain de 220% entre 1994 et 2005 et de 125% entre 2005 et 2013 ainsi que de 275% entre 1994 et 2013. Ces atlas sont le fruit de travaux de plusieurs chercheurs, notamment messieurs Ghaleb FAOUR et Éric VERDEIL.

Néanmoins, nous avons tout de même trouvé deux articles qui abordent la question de l'évolution de l'occupation du sol au Liban :

- L'article « Evaluating urban expansion using remotely-sensed data in Lebanon » qui évoque la question de l'évolution urbaine au Liban sur la base de trois années (1963, 1994 et 2005), à l'échelle nationale, départementale et des villes majeures du Liban : Beyrouth, Tripoli, Zahlé, Baalbek, Saida, Sour, Nabatiyeh et Jounié (Faour, 2015).
- L'article « Land Cover change over the last 40 years in Lebanon », qui évoque la question du changement des surfaces agricoles et forestières au Liban entre les années 1963 et 1998 à l'échelle nationale et régionale (Masri *et al.*, 2002).

Ces deux articles ont démontré que le Liban a connu une expansion urbaine importante et anarchique, au détriment des zones agricoles et boisées.

Il existe également des études portant sur le Liban qui essaient d'associer les occupations des sols à des phénomènes relevant de la géographie physique comme la dégradation du littoral libanais (Darwish *et al.*, 2004). On trouve ici principalement deux publications de Mr Hussein EL HAGE HASSAN, enseignant chercheur à l'Université Libanaise, qui a étudié dans sa thèse (El Hage Hassan, 2011) l'évolution de l'occupation du sol sur un terrain de la Békaa (partie occidentale du Liban) afin de rechercher des solutions pour lutter contre

l'érosion hydrique des sols. Il a publié également un article sur le rôle des actions anthropiques dans les changements d'occupation des sols sur une région de la Békaa également (Hassan *et al.*, 2019).

La question de l'occupation du sol n'est donc pas une thématique très abordée au Liban et encore moins dans la région d'Akkar. Ainsi, notre travail constitue l'une des quelques études portant sur cette question au Liban et la première menée sur le territoire d'Akkar.

1.2. Méthodologie et source de données

Au niveau international, de nombreuses études traitent de l'étalement urbain et de l'évolution de l'occupation des sols, et beaucoup d'entre elles les relie à des problématiques environnementales, qui l'on retrouve aujourd'hui dans beaucoup d'inventaires cartographiques (Ouattara *et al.*, 2006 ; Sarr, 2009). C'est dans cette optique que s'inscrit notre thèse, qui vise à étudier l'impact de l'occupation des sols sur la pollution de l'eau, une problématique environnementale d'actualité.

Pour réaliser notre étude, nous avons examiné beaucoup de travaux abordant l'évolution de l'occupation des sols afin d'identifier les méthodologies utilisées et les perspectives pour exploiter les résultats. Parmi les travaux qui ont servi notre démarche, nous pouvons citer ceux du CEREMA (2015), Demza *et al.* (2008), Diedhiou *et al.* (2020), Rousseaux (2009) et Sarr (2009). Nous avons constaté que les méthodes et les outils utilisés étaient très similaires. Ainsi, notre méthodologie s'inspire de ces études en les adaptant à nos objectifs et aux spécificités de notre terrain.

Aujourd'hui, l'observation de l'état et de l'évolution de l'occupation des sols se fait principalement en exploitant les bases de données fournies par les images satellites et les techniques de télédétection de la photographie aérienne (Diedhiou *et al.*, 2020). Le coût, la

fréquence d'acquisition et la précision des techniques utilisées (échelle, marge d'erreur...) sont des données de référence dans le choix des images et l'obtention des cartes des occupations du sol (Rousseaux, 2009).

Pour mettre en évidence les types d'occupation des sols à Al-Kayteh et suivre leur évolution, nous nous appuyerons sur une approche diachronique en utilisant des cartes datant des années 1962, 2005 et 2017. Le caractère multi-temporel de ces données permet de comparer plusieurs états d'occupation du sol à différentes dates et d'observer les dynamiques spatio-temporelles des évolutions (Demaze et Trebouet, 2008 ; Rousseaux, 2009). Cette analyse multi-temporelle est considéré comme l'approche méthodologique la plus utilisée dans l'exploitation des images satellites et la création des cartes d'évolution des modalités de l'occupation des sols (Diedhiou *et al.*, 2020).

Cependant, la réalisation de ce chapitre a constitué un véritable défi en raison du manque de données et de la difficulté d'y accéder, notamment en raison de l'absence de données appropriées en accès libre sur Internet. Cette situation est le résultat de la faible attention accordée à ces questions au Liban, l'absence de culture de diffusion et de partage des données ainsi que les obstacles liés la bureaucratie libanaise. Nous avons donc dû solliciter des organismes publics et privés pour collecter les informations et les données nécessaires à la réalisation de ce chapitre et les autres parties de la thèse, à savoir :

- des organismes publics, notamment les collectivités territoriales et l'Etablissement des eaux du Liban-Nord (NLWE North Lebanon Water Establishment),
- des ONG, en particulier les publications et les cartes de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO),
- le CNRS-Liban.

Notre objectif est de définir l'état de l'occupation du sol à Al-Kayteh à une date aussi proche que possible de notre période d'échantillonnage (septembre 2020, cf chapitre IV) - en prenant en compte son évolution depuis les années 60. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ce travail se fera à travers l'utilisation de trois séries de cartes caractérisant trois périodes différentes :

- Les cartes topographiques du Liban de 1962 réalisées par la direction des affaires géographiques et géodésiques de l'armée libanaise.
- La carte d'occupation du sol du Liban établie par le CNRS-Liban à partir des images satellites de 2005.
- La carte d'occupation du sol du Liban établie par le CNRS-Liban à partir des images satellites de 2017.

Plusieurs raisons expliquent le choix de ces dates :

- Leur disponibilité : les sources de données sur l'occupation du sol à Akkar sont rares et il est difficile d'y accéder. Il n'existe aucune carte d'occupation du sol du Liban fiable et précise en accès libre sur internet. Après de nombreux efforts, nous avons pu obtenir les cartes topographiques de l'armée libanaise (1962) ainsi que les cartes d'occupation du sol de 1998, 2005 et 2017 du CNRS Liban.
- Dans un premier temps, nous avons choisi les cartes de 1962, 1998 et 2017 pour traiter notre thématique car ces dates sont les plus espacées. Cependant, nous avons constaté de nombreuses erreurs, notamment dans la classification des types de végétation, sur la carte de 1998 portant sur le territoire d'Akkar. Par conséquent, nous avons décidé de lui substituer la carte de 2005, qui s'est révélée bien plus précise.
- Nous avons testé et comparé les trois cartes, de manière à s'assurer que les résultats soient comparables et interprétables. Selon nos connaissances sur l'histoire et l'évolution du

territoire, nous avons trouvé que les résultats obtenus reflètent bien la réalité de l'état et des évolutions de l'occupation du sol à Al-Kayteh tout au long de l'histoire moderne du Liban et d'Akkar.

- Les cartes d'occupation des sols du Liban établies par le CNRS-Liban et ses partenaires ont déjà été utilisées dans les études antérieures, en raison de leur fiabilité.

Pour chaque date, nous présenterons la méthodologie utilisée pour créer les cartes et étudier les types d'occupation du sol. Tout le travail cartographique de la thèse sera réalisé à l'aide du SIG (Système d'Information Géographique) en utilisant ArcMap 10.8.1. Les superficies sont calculées en hectares (ha).

Afin de traiter minutieusement la question des occupations du sol à Al-Kayteh et leurs impacts sur la qualité des ressources en eau, nous produirons dans la thèse des cartes à deux niveaux :

- Des cartes à l'échelle régionale ou intercommunale (du 1/130 000 au 1/60 000) qui donneront une vue générale de l'état d'une ou plusieurs observations. Cette vue d'ensemble nous aidera à comprendre et à observer la répartition spatiale des phénomènes étudiés.
- Des cartes locales à l'échelle de plusieurs communes voisines, communale ou infra-communale ($< 1/50\ 000$). Ces cartes permettront d'illustrer un exemple, justifier un argument, visualiser un lieu décrit, ou observer un cas particulier.

1.3. La méthodologie de construction de la légende

Une première étape a été de construire une classification des types d'occupation du sol servant nos objectifs et répondant à notre problématique. La nomenclature proposée doit nous aider à visualiser la réalité du terrain et à démontrer ses caractéristiques. Elle doit permettre

également d'étudier les évolutions de l'occupation du sol sur le terrain. Ainsi, il faut construire une légende selon une classification et une nomenclature commune, pour harmoniser les cartes ainsi que garantir la comparabilité et l'homogénéité des informations entre les différentes dates. Par ailleurs, nous allons utiliser cette classification dans l'identification des types d'occupation du sol sur les sites de prélèvements dans le chapitre V afin de valider les hypothèses de la thèse.

Il existe beaucoup de légendes avec un degré de précision variable dans la classification des types d'occupation des sols. Si on prend par exemple les cartes du CNRS-Liban 1998 et 2017, la résolution des classes des types d'occupation du sol peut aller jusqu'à quatre niveaux, par exemple : Surface boisée → Forêt dense → Forêt de feuillus dense → Forêt de chênes dense. Il existe également d'autres classifications à plusieurs niveaux de complexité, comme celle de Corine Land Cover, qui repose sur une nomenclature standard hiérarchisée en trois niveaux et comprenant 44 postes répartis selon six grands types d'occupation du territoire : territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau.

Notre objectif est de construire une typologie qui aide à identifier les impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau. Elle doit décrire au mieux les territoires agricoles car nous avons vu que l'agriculture est l'activité économique principale d'Al-Kayeth, et les études antérieures ont montré qu'elle contribue de manière significative à la contamination chimique des ressources en eau d'Akkar (Halwani et Hamze, 1998 ; Halwani *et al.*, 1999a ; Halwani *et al.*, 1999b ; Halwani *et al.*, 2001 ; Baroudi *et al.*, 2012). Egalement, l'urbanisation est un fait majeur de ce territoire à prendre en compte, les études antérieures ayant montré que les eaux usées d'origine urbaine contribuent efficacement à la contamination microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh (Hamze, 1996 ; Halwani et Hamze, 1998 ; Hamze *et al.*, 2010).

Un des objectifs principaux de notre travail étant de fournir une observation générale sur l'état et l'évolution de l'occupation du sol sur le terrain, nous avons fait le choix d'une légende simple, d'autant que la représentation cartographique de l'ensemble du territoire d'Al-Kayteh ne pourra se faire qu'à une échelle dépassant le 1/130 000. Ainsi, la légende proposée ci-dessous (Tab. 5) remplit parfaitement sa fonction sans surcharger les cartes avec une classification qui nuirait à leur lisibilité et ne fournirait pas d'informations constructives à notre démarche :

Tab. 5 - Les types et les sous-types d'occupation du sol choisis

| Les types d'occupation du sol | Les sous-type d'occupation du sol |
|--|--|
| Les territoires artificialisés | Urbain, Urbain peu dense, Non urbain |
| Les territoires agricoles | Cultures de pleins champs, Vergers |
| Les surfaces boisées et naturelles (SBN) | |

L'utilisation des sous-types d'occupation du sol dépend des besoins et des thèmes abordés dans les chapitres. Dans ce chapitre et le chapitre V, il se peut que l'on précise les sous-types des territoires agricoles en fonction du contexte. Il sera même possible de fournir davantage de détails sur les types d'agriculture dans ce chapitre. Les sous-types des territoires artificialisés ne seront utilisés que dans le chapitre V. En effet, dans le chapitre V, nous indiquerons le type et le sous-type d'occupation du sol pour chaque site de prélèvement conformément à la légende ci-dessus. Ces types et sous-types d'occupation du sol seront définis et expliqués dans les prochaines pages.

Par contre, nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte les zones humides d'Al-Kayteh, car elles sont faiblement représentées sur le terrain. En effet, on ne trouve pratiquement que la rivière Al-Bared, qui coule dans des profondes vallées (notamment Ouadi Jhannam au sud et sud-est d'Al-Kayteh et qui peut atteindre jusqu'à 500 mètres de profondeur entre Michmich et Al-Dannieh) et constitue la limite administrative sud d'Al-

Kayteh avec le département de Minieh-Dannieh, et la rivière d'Arqa qui constitue partiellement la limite nord entre les communes d'Al-Kayteh et les autres communes d'Akkar.

1.3.1. Les territoires artificialisés

Il est important de rappeler que le phénomène d'artificialisation des sols n'est pas strictement synonyme d'urbanisation. En effet, les territoires artificialisés incluent toute surface retirée de son état naturel, forestier ou agricole, qu'elle soit bâtie ou non et qu'elle soit revêtue (un parking par exemple) ou non (un site d'extraction de minéraux par exemple) (CEREMA Normandie-Centre, 2015).

Ainsi, toutes les zones urbaines sont des surfaces artificialisées, mais tous les territoires artificialisés ne sont pas des zones urbaines. Les surfaces artificialisées regroupent l'habitat et les espaces verts associés, les zones industrielles et commerciales, les équipements sportifs ou de loisirs, les réseaux de transport, les parkings ou encore les mines, décharges et chantiers (INSEE, 2021).

Ce changement d'usage des sols, le plus souvent irréversible, a des conséquences qui peuvent être préjudiciables à l'environnement et à la production agricole. L'artificialisation résulte de l'urbanisation et de l'expansion des infrastructures, sous l'influence de la dynamique démographique et du développement économique (INSEE, 2021).

L'artificialisation des sols, et notamment leur imperméabilisation, amplifie le ruissellement de l'eau au détriment de son infiltration, et participe ainsi à l'érosion des sols, est à l'origine de coulées d'eau boueuse et accentue le risque d'inondation. Le ruissellement contribue également à la dégradation de la qualité chimique et écologique des eaux en intensifiant le transfert de sédiments chargés de contaminants des sols vers les cours d'eau (engrais azotés ou phosphatés, hydrocarbures, métaux lourds, produits phytosanitaires) (INSEE, 2021).

Néanmoins, nous avons constaté qu'en 2017, les zones urbaines représentaient 98% de la superficie des territoires artificialisés d'Al-Kayteh, comme nous le verrons en détail. En effet, Al-Kayteh est composée d'une trentaine de villages de taille différente, allant de quelques centaines d'habitants à plusieurs dizaines de milliers. Certains, de part de leur population, pourraient être considérés comme de petites villes, comme Bebnine (environ 50 000 habitants), qui est la plus grande commune de la région d'Akkar.

En effet, Akkar est perçue au Liban comme une région rurale composée de villages, mais dans la thèse, les villages d'Al-Kayteh seront décrites en tant que communes. Il n'existe pas au Liban de cadre législatif définissant les villes, ni d'outil juridique équivalent aux EPCI (établissements publics de coopération intercommunale) français (avec des critères de population pour la classification). Comme expliqué dans le chapitre II, le seul type d'intercommunalités est la fédération de municipalité comme par exemple la fédération de municipalités de Basse et Moyenne Al-Kayteh et la fédération de municipalités de Haute Al-Kayteh qui forment le territoire d'Al-Kayteh. Ainsi, il n'est pas possible de classer une commune ou une agglomération comme une ville selon la loi libanaise.

Sur le plan économique, Al-Kayteh est un territoire rural et agricole. On n'y retrouve pas les grandes activités et fonctions caractéristiques des centres urbains comme l'industrie, les universités ou les centres commerciaux. Son activité économique principale est l'agriculture, avec la présence d'autres activités artisanales, de petits commerces, de services locaux, de pêche côtière, d'élevage et de tourisme local dans les régions naturelles remarquables.

La connaissance de tous ces éléments est essentielle dans l'étude de ce territoire, pour comprendre nos choix de légende. En effet, la quasi absence des territoires artificialisés non urbains sur le terrain ont fait que tout les sites de prélèvement des territoires artificialisés correspondent aux zones urbaines (la méthodologie de sélection des échantillons est

expliquée dans le chapitre IV). Par conséquent, nous n'avons pas pu étudier les impacts des territoires artificialisés non urbains sur la qualité des ressources en eau.

Au final, les territoires artificialisés d'Al-Kayteh sont distingués en deux grandes catégories :

- Les zones urbaines : ce sont des zones urbanisées de différentes densités ou mitage urbain sur végétation.
- Les zones non urbaines, composées de zones d'activités (comme les zones industrielles, zones commerciales, zones portuaires...) et de zones artificialisées non bâties (comme les zones d'extraction de matériaux, les chantiers...).

1.3.2. Les territoires agricoles

Les territoires agricoles d'Al-Kayteh ont été distingués en deux sous-types :

- Les cultures de plein champ : les cultures de plein champ en parcelles de taille variable ou encore en terrasses ou sous abri.
- Les vergers : notamment les oliviers, les agrumes, les arbres fruitiers, les vignobles...

Ce qui distingue les cultures de plein champ des vergers, c'est que les cultures de plein champ nécessitent l'intervention récurrente de l'homme et font l'objet de divers amendements, alors que les vergers n'ont pas nécessairement besoin d'une attention aussi soutenue. Ils peuvent prospérer dans un environnement peu travaillé par l'homme. L'agriculture constitue l'une des principales sources de pollution des eaux souterraines, notamment à travers l'infiltration des engrais et des pesticides vers les nappes phréatiques.

1.3.3. Les surfaces boisées et naturelles (SBN)

A Al-Kayteh, les surfaces boisées et naturels comprennent :

- Des surfaces à végétation arborée : forêts denses ou clairsemées de conifères (comme les pins, les cyprès et les genévriers), forêts de feuillus (comme les chênes), forêts mixtes,

- Des surfaces à végétation arbustive, parfois avec des arbres dispersés.
- Des surfaces à végétation herbacée,
- Des surfaces peu végétalisées, composées surtout des roches affleurantes, comme c'est le cas dans les montagnes d'Al-Kayteh.

Ces espaces ne sont pas à l'abri de l'intervention humaine. Ils peuvent être impactés par diverses activités humaines notamment l'élevage et le tourisme (randonnée). En effet, certains bergers considèrent ces terrains comme des lieux de pâture et d'abreuvement pour leurs troupeaux, notamment dans les montagnes d'Al-Kayteh.

2. Le territoire d'Al-Kayteh en 1962

La première observation que nous allons faire sur Al-Kayteh remonte à 1962. Elle se fera à partir de l'étude et l'analyse des cartes topographiques du Liban réalisées par la direction des affaires géographiques et géodésiques de l'armée libanaise (DAGG). Au niveau historique et politique, ces cartes sont dans l'époque qui précède la guerre civile libanaise (1975-1990). C'est une époque où les habitants d'Al-Kayteh vivaient d'une manière que l'on peut qualifier de traditionnelle. Ainsi, cette partie va nous permettre de découvrir le terrain d'étude et ses caractéristiques dans un état précédent l'expansion urbaine des années de la guerre civile et du XXI^e siècle.

2.1. Méthodologie

Pour étudier l'état des modes d'occupation du sol à Al-Kayteh en 1962, nous avons utilisé des versions scannées à haute résolution des cartes topographiques du Liban publiés en 1963 par le ministère de la défense nationale, état-major de l'Armée Libanaise. Ces cartes sont établies en collaboration entre la Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques de l'Armée Libanaise (DAGG) et l'Institut Géographique National Français (IGN). En 1962, la DAGG a effectué une couverture aérienne sur l'ensemble du territoire libanais à l'échelle de 1/20 000. A partir de ces photos, la DAGG a établi une série de 121 feuilles topographiques qui couvrent l'ensemble du territoire libanais à l'échelle de 1/20 000. Les cinq cartes couvrant notre région d'étude sont les suivantes : El-Minié, El-Aabde, Halba, Berqayel et Fnaideq. Ces cartes sont données dans l'annexe (Annexe 3). Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Une couverture aérienne au 1/20 000 – 1962.
- Une stéréopréparation et un précomplètement en 1963.
- L'équidistance des courbes est de 10 mètres.

Ces cartes, utilisées jusqu'à aujourd'hui, constituent un excellent témoin de la réalité territoriale du Liban durant les années soixante. Il est difficile de trouver des cartes et des ressources aussi précises qui couvrent l'intégralité du territoire national et datent d'avant la guerre civile libanaise (1975-1990).

Ces cartes topographiques ont déjà été utilisées pour la réalisation de plusieurs études, notamment pour l'analyse de l'étalement urbain des villes libanaises entre les années 1962 et 2005 (Faour, 2015), pour l'étude de l'occupation du sol dans la ville de Tripoli (Darwish *et al.*, 2004) et pour l'étude de l'occupation du sol dans la plaine de la Békaa (El Hage Hassan, 2011).

Malheureusement, nous n'avons pas réussi à produire une carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 1962 à partir de ces cartes topographiques, qui ne sont pas des cartes d'occupation du sol ni des photographies aériennes. Si la détection des bâtiments fut facile, la séparation entre les territoires agricoles et les SBN (surfaces boisées et naturelles) n'a pas toujours été possible.

En effet, dans certains cas, on passe du figuré des territoires agricoles au figuré des SBN, notamment entre les vergers, les bois et les broussailles sur un même arrière-plan blanc. Aucune limite n'est définie entre les figurés, ce qui rend la délimitation et donc la cartographie de ces terrains très délicate. La carte ci-dessous en constitue un très bon exemple (Fig. 32).

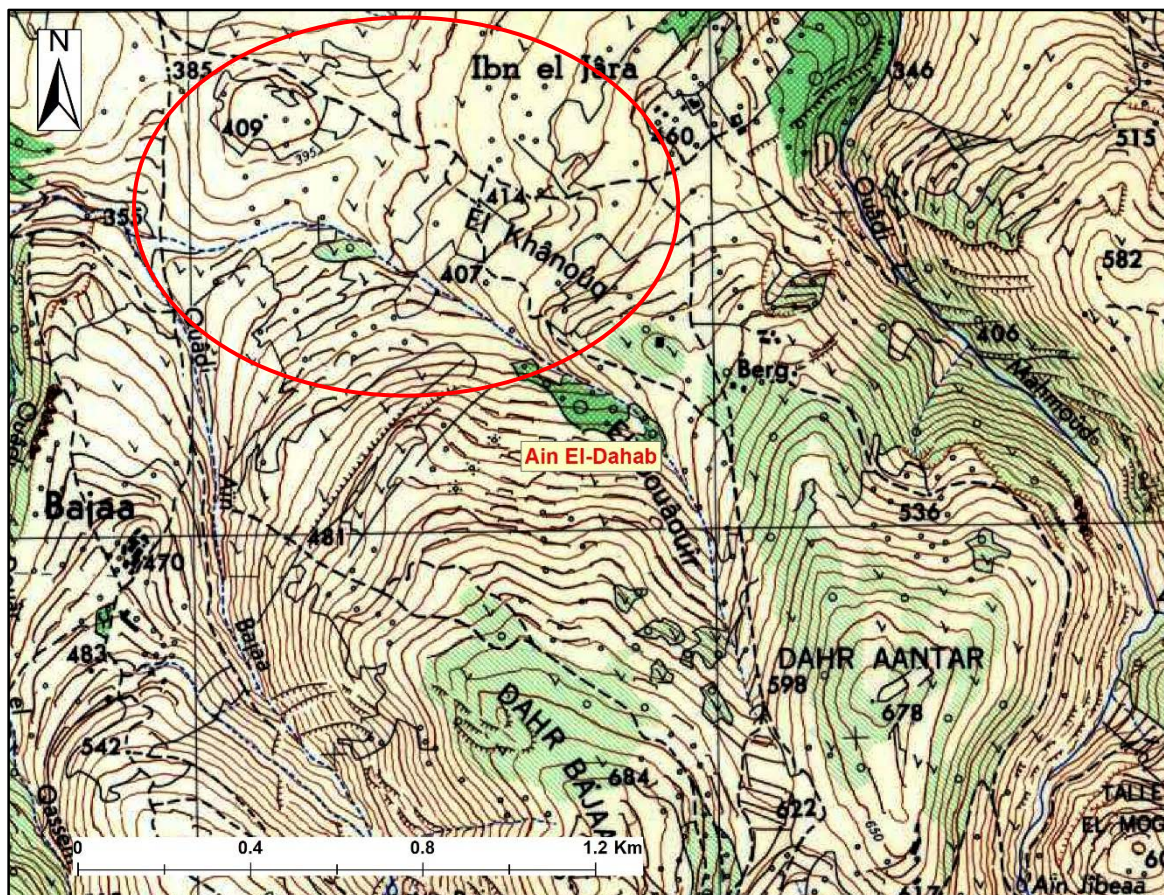


Fig. 32 - Exemple de transition de figurés sur arrière-plan blanc sur la carte topographique de 1962

Par ailleurs, il existe de vastes surfaces distinguées par un aplat blanc qui sont dénuées de figuré (Fig. 33). Normalement, les surfaces en aplat blanc sur les cartes topographiques concernent les territoires agricoles, tandis que les surfaces en aplat vert concernent souvent les SBN. Cependant, selon notre connaissance du terrain et après avoir comparé les cartes topographiques de 1962 avec les cartes d'occupation du sol du Liban de 1998, 2005 et 2017, nous avons constaté que les surfaces blanches des cartes topographiques pourraient dans plusieurs cas représenter des SBN.

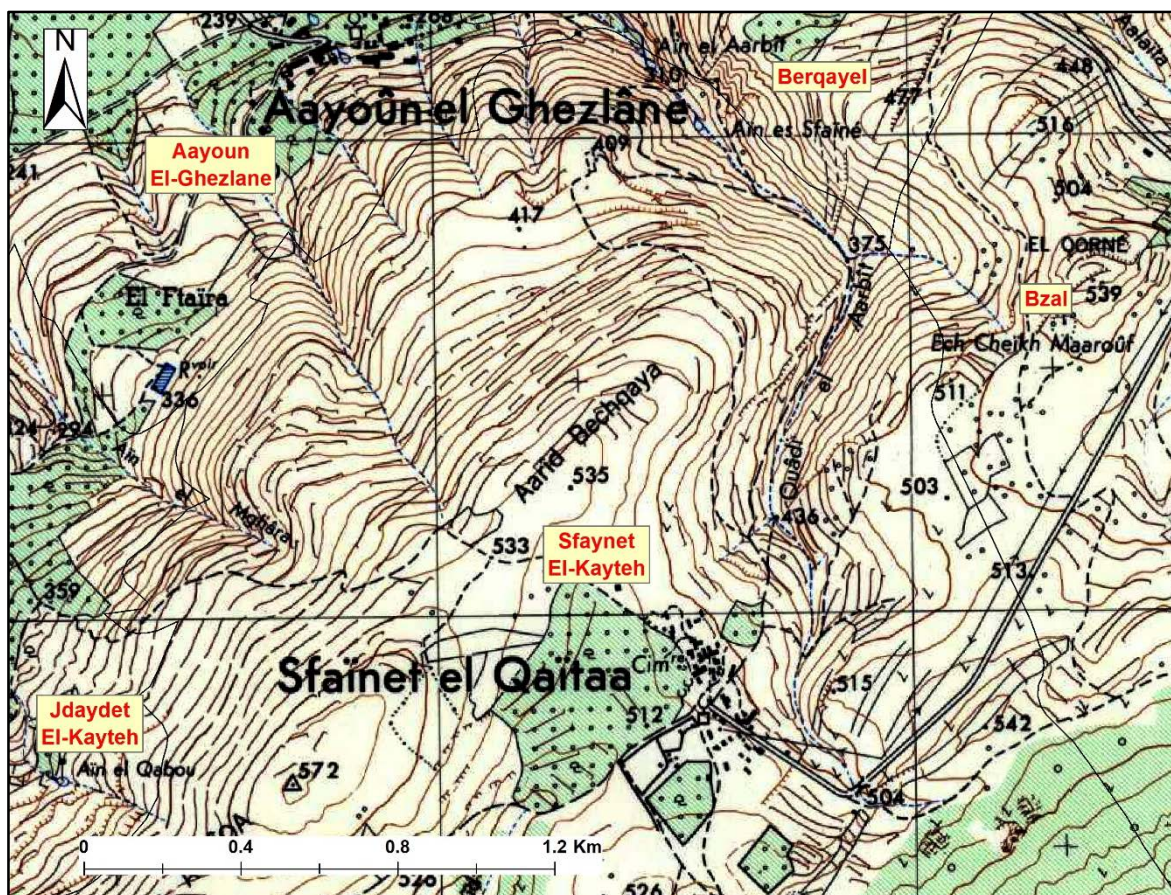


Fig. 33 - Exemples de surfaces en aplat blanc sur les cartes topographiques de 1962

Dans tous ces cas de figure, il est impossible de déterminer le type de couverture végétale des terrains ou de dessiner les limites des territoires agricoles et des SBN. Qui plus est, nous avons observé sur le terrain qu'il existe des surfaces en aplat blanc qui pouvaient qualifier aussi bien des espaces plantés en oliviers, en arbres fruitiers, en forêts, en broussailles, herbacés, des affleurements rocheux, notamment dans la Moyenne Al-Kayteh, l'espace-mosaïque des territoires d'altitude moyenne de Haute Al-Kayteh et les montagnes de la région.

Ainsi, bien que les cartes topographiques de 1962 soient très riches d'information, il reste très difficile de cartographier les territoires agricoles et les SBN à Al-Kayteh. De ce fait, nous allons nous concentrer uniquement sur la cartographie et le calcul de la superficie des

territoires artificialisés. Nous prendrons en compte les territoires agricoles et les SBN selon une approche purement qualitative.

Le commentaire et l'analyse de ces cartes nous permettront de découvrir Al-Kayteh en 1962 et d'étudier ses caractéristiques territoriales. Cette analyse constituera le point de départ de notre étude afin de mieux comprendre l'histoire d'Al-Kayteh ainsi que son évolution. Nous procéderons de l'ouest vers l'est, c'est-à-dire du littoral jusqu'aux montagnes de la région. Nous commencerons par les territoires artificialisés, puis nous étudierons les territoires agricoles et enfin les SBN.

2.2. Résultats

Après une lecture approfondie des cartes topographiques d'Al-Kayteh en 1962, il est évident que les territoires artificialisés du territoire étaient moins développés qu'en 2005 et 2017, les territoires agricoles étaient plus concentrés dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh et les espaces boisés et naturels couvraient une grande partie du territoire.

Tout d'abord, on peut dire que l'urbanisation constitue la seule forme de l'artificialisation des sols à l'époque. On constate que tous les villages existent déjà, mais ils sont moins développés. Les petites communes comme Aayoun El-Ghezlane (Fig. 34), Sayssouq, Khraybe, Beit Younes, Qrayat... sont construites autour de leur centre, de même que les communes moyennes comme Qarqaf (Fig. 34), Bzal (Fig. 34), Chane qui sont relativement plus grandes. Quant aux grandes communes comme Bebnine, Berqayel (Fig. 34), Ain El-Dahab, etc, elles possèdent un noyau urbain plus important, mais elles ne sont pas aussi étendues qu'aujourd'hui.

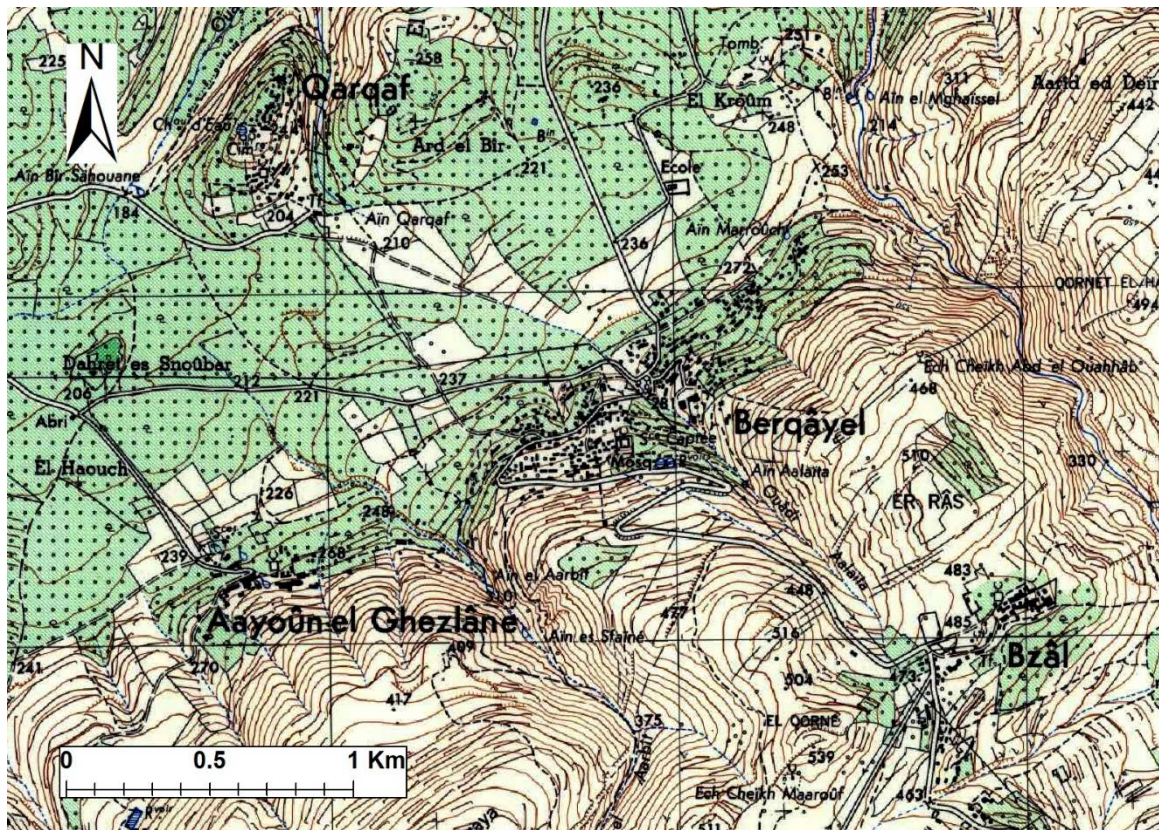


Fig. 34 - Qarqaf, Berqayel, Aayoun El-Ghezlane et Bzal en 1962

On remarque qu'à l'époque l'altitude a eu une influence importante sur la répartition de l'habitat. En effet, les communes situées en altitude (surtout au-dessus de 1000 mètres) étaient de taille beaucoup plus modeste que celle d'aujourd'hui. Ainsi, des communes se trouvant à des altitudes supérieures à 1000 mètres comme Fnaydeq et Michmich (Fig. 35) étaient en 1962 remarquablement plus petites, alors qu'aujourd'hui elles sont parmi les plus grandes communes d'Al-Kayteh (les informations sur l'évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh sont donnés dans les prochaines parties).

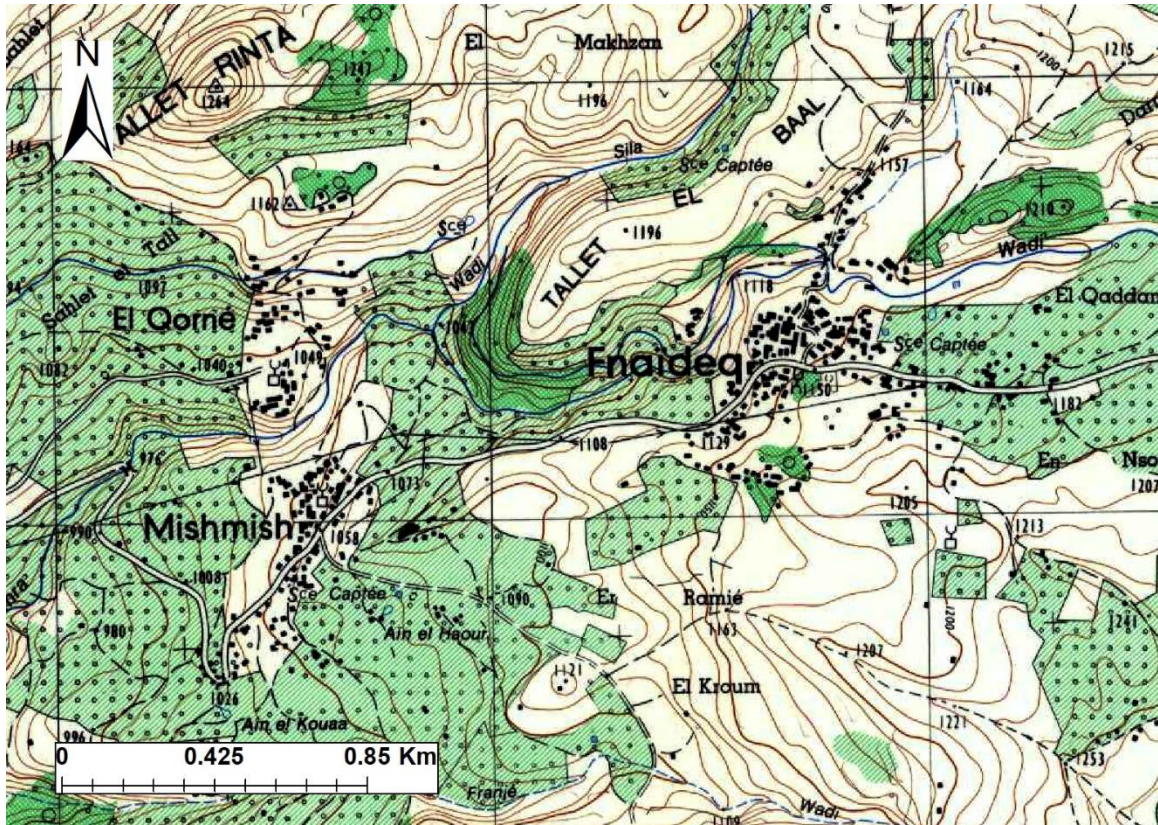


Fig. 35 - Fnaydeq et Michmich en 1962

On remarque également l'absence du port d'Al-Abdé qui n'est pas encore construit, tandis que le Camp de Nahr el Bared est déjà érigé (Fig. 36). En ce qui concerne le réseau routier, il est moins développé en 1962 qu'aujourd'hui. Néanmoins, les autoroutes (Tripoli-Halba, Abdé-Qammouaa, Bebnine-Berqayel, Sahlet Akkar, El-Qlaïaat) ainsi que les principales routes reliant les villages, sont déjà construites à l'époque.

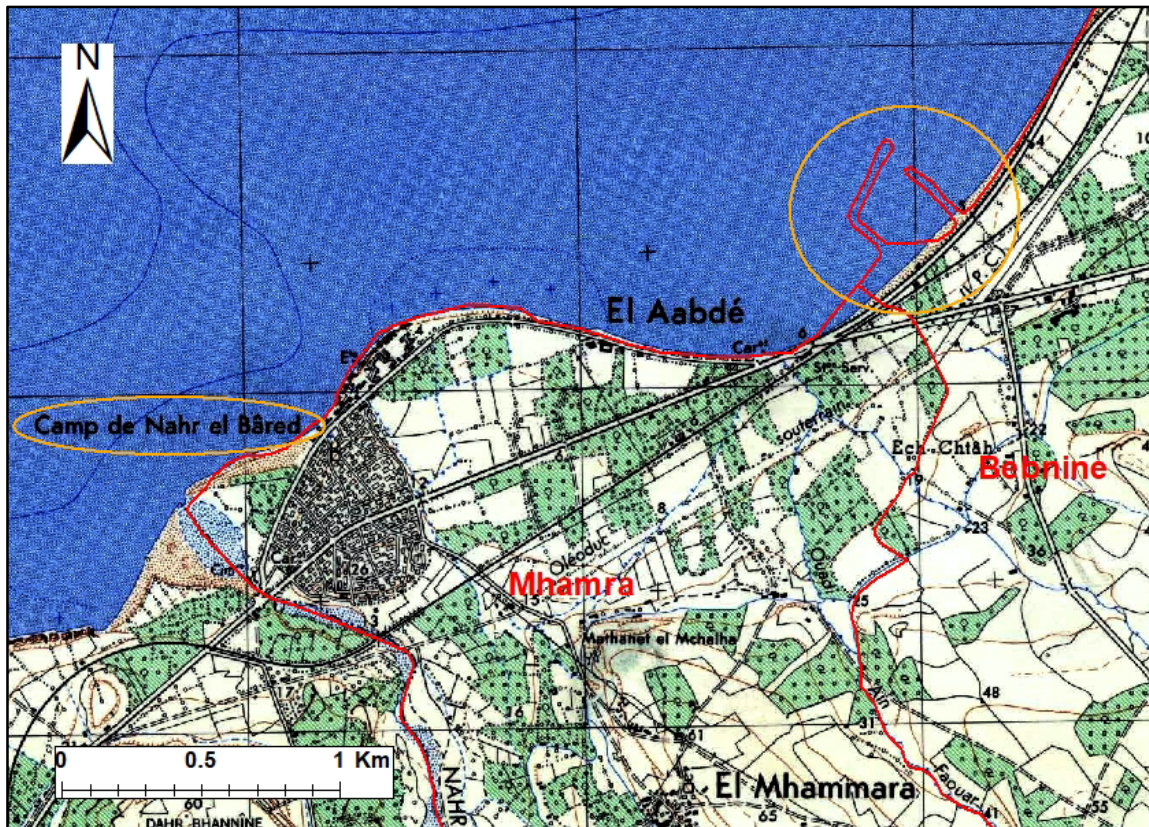


Fig. 36 - Camp de Nahr el Bared en 1962

Par contre, la plupart des routes secondaires que nous connaissons aujourd'hui sont en cours de construction ou n'existent pas encore. Ainsi, les habitations dispersées, situées loin du centre des communes et desservies par ces nouvelles routes, n'ont pas encore été construites. Egalement, les routes reliant les communes élevées d'Al-Kayteh aux montagnes de la région sont rudimentaires et peu développées à l'époque.

Nous avons cartographié les territoires artificialisés -plutôt urbains dans ce cas- d'Al-Kayteh en 1962. La carte et les superficies sont présentées ci-dessous. On rappellera que ces zones ont été cartographiées manuellement à partir des cartes topographiques, les résultats ne sont donc pas exempts d'une petite marge d'erreur.

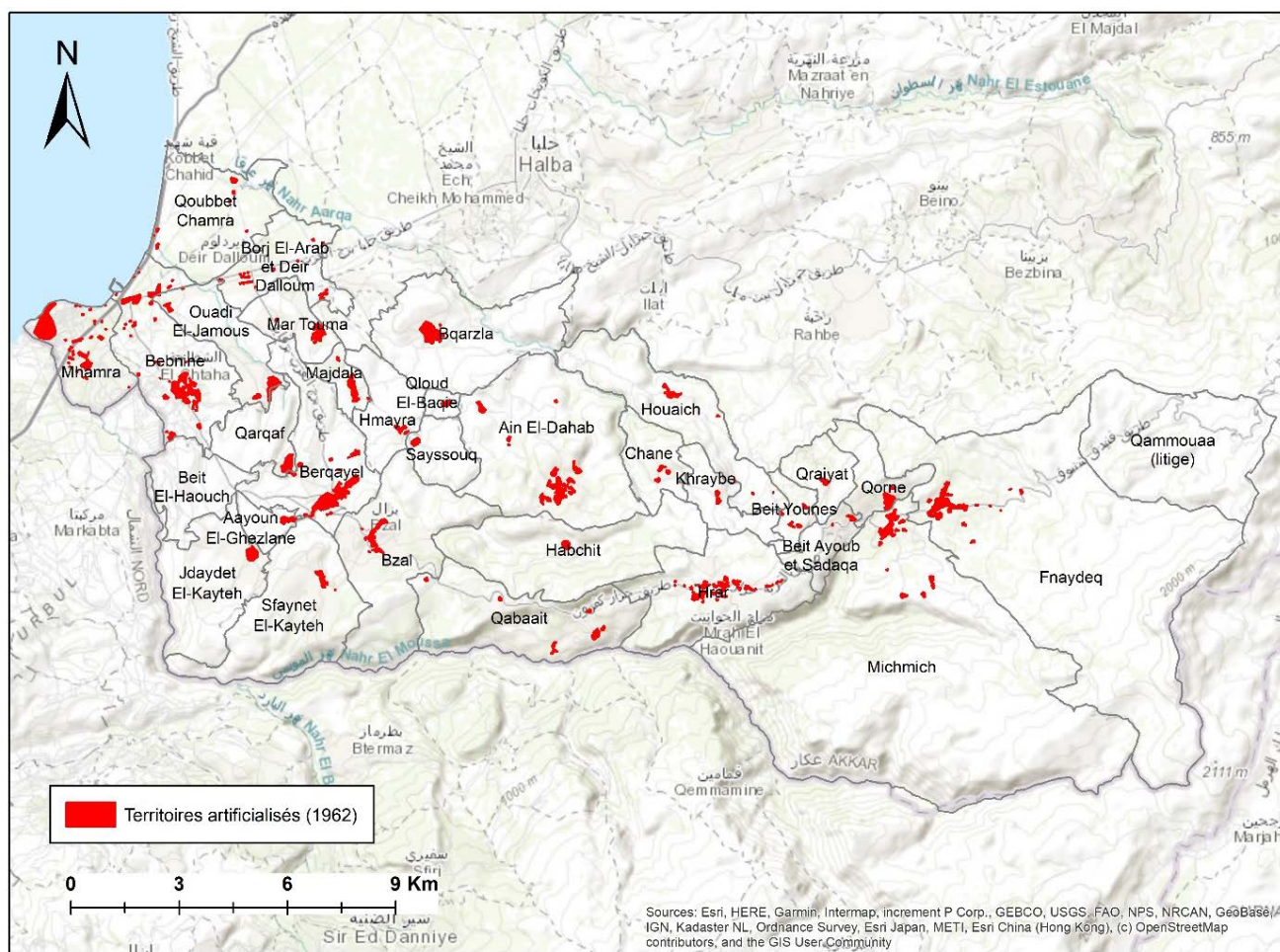


Fig. 37 - Les territoires artificialisés à Al-Kayteh en 1962

Tab. 6 - La superficie des territoires artificialisés d'Al-Kayteh en 1962

| Commune | Surface (ha) | T. Ar. (ha) | T. Ar. (%) | Intercommunalité |
|------------------------------|--------------|-------------|------------|----------------------------|
| Aayoun El-Ghezlane | 104 | 3,7 | 3,5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bebnine | 678 | 36,2 | 5,3 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Beit El-Haouch | 332 | 0 | 0 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Berqayel | 629 | 30,4 | 4,8 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Borj El-Arab et Deir Dalloum | 365 | 4,1 | 1,1 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bqarzla | 819 | 14,8 | 1,8 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Hmayra | 286 | 2,2 | 0,8 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Jdaydet El-Kayteh | 620 | 6,1 | 1 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Majdala | 110 | 7,5 | 6,9 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mar Touma | 226 | 7,9 | 3,5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mhamra | 386 | 33,8 | 8,8 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|------------|----------------------------|
| Ouadi El-Jamous | 343 | 10 | 2,9 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qarqaf | 283 | 8,2 | 2,9 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qloud El-Baqie | 48 | 1,9 | 3,9 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qoubbet Chamra | 630 | 2,8 | 0,4 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Sayssouq | 195 | 2,2 | 1,1 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | 6053 | 171,8 | 2,8 | |
| Ain El-Dahab | 1196 | 22,6 | 1,9 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Ayoub et Sadaqa | 161 | 1,6 | 1 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Younes | 117 | 2,5 | 2,2 | Haute Al-Kayteh |
| Bzal | 871 | 8,7 | 1 | Haute Al-Kayteh |
| Chane | 238 | 2,2 | 0,9 | Haute Al-Kayteh |
| Fnaydeq | 3227 | 20,9 | 0,6 | Haute Al-Kayteh |
| Habchit | 843 | 2,6 | 0,3 | Haute Al-Kayteh |
| Houaich | 641 | 4,5 | 0,7 | Haute Al-Kayteh |
| Hrar | 768 | 16,1 | 2,1 | Haute Al-Kayteh |
| Khraybe | 212 | 1,8 | 0,9 | Haute Al-Kayteh |
| Michmich | 3782 | 16,1 | 0,4 | Haute Al-Kayteh |
| Qabaait | 775 | 5,8 | 0,8 | Haute Al-Kayteh |
| Qammouaa (litige) | 1025 | 0 | 0 | Haute Al-Kayteh |
| Qorne | 224 | 6,5 | 2,9 | Haute Al-Kayteh |
| Qraiyat | 197 | 1,8 | 0,9 | Haute Al-Kayteh |
| Sfaynet El-Kayteh | 804 | 4,2 | 0,5 | Haute Al-Kayteh |
| Haute Al-Kayteh | 15079 | 118 | 0,8 | |
| Al-Kayteh | 21132 | 289,8 | 1,4 | |

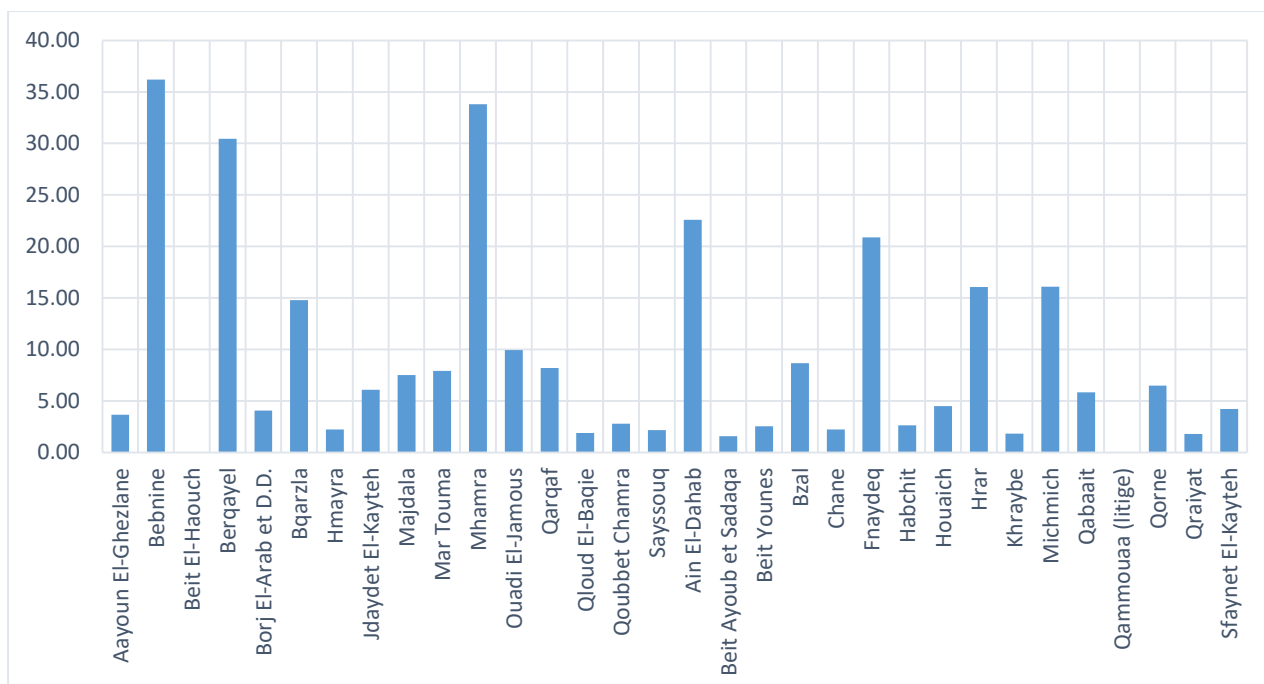


Fig. 38 - La superficie (en ha) des territoires artificialisés des communes d'Al-Kayteh en ha en 1962

On peut conclure que les plus grandes communes d'Al-Kayteh en 1962 étaient Bebnine (36,2 ha), Berqayel (30,4 ha) et Mhamra (33,8 ha) (dont le camp de Nahr El-Bared qui s'étend sur 24 ha). Ces trois communes se trouvent dans la Fédération de municipalités de Basse et Moyenne Al-Kayteh. Elles sont suivies par Ain El-Dahab (22,6 ha), Fnaydeq (20,9 ha), Michmich (16,1 ha) et Hrar (16,1 ha), ces communes se trouvant toutes dans la Fédération de municipalités de Haute Al-Kayteh.

On remarque également que l'urbanisation est toujours plus forte en Basse et Moyenne Al-Kayteh, avec 171,8 ha de territoires urbanisés, contre 118 ha de territoires urbanisés en Haute Al-Kayteh. Cette disparité peut être attribuée à plusieurs facteurs. En effet, les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh bénéficient d'un emplacement stratégique, étant à la fois accessibles et proches de Tripoli, Minié et Halba. En outre, leur faible altitude et leur climat attractif, notamment l'hiver qui est beaucoup plus doux que sur les hauteurs d'Al-Kayteh, attirent ainsi davantage de population.

En ce qui concerne les territoires agricoles, on remarque en premier lieu que la plaine d'Akkar (0-100m à Al-Kayteh) est déjà largement utilisée pour des activités agricoles. Le découpage observé sur la carte (Fig. 39) des terrains d'Al-Kayteh appartenant à la plaine d'Akkar montre une large présence des cultures intensives de maraichage en openfield. La carte (Fig. 39) montre également que ces communes abritent aussi des surfaces de vergers composés majoritairement d'agrumes, et d'oliviers dans une moindre mesure. En effet, la culture des agrumes a une longue tradition sur le littoral et les bas terrains du nord du Liban.



Fig. 39 - La plaine d'Akkar à Al-Kayteh en 1962

Par contre, la culture des oliviers marque le paysage des communes situées dans la moyenne Al-Kayteh (100-450m environ) comme à Qarqaf, Berqayel, Jdaydet El-Kayteh, Bqarzla, Hmayra... (Fig. 40). Les oliviers sont adaptés aux climat méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et des étés chauds et secs, et ces régions offraient des conditions idéales pour leur croissance. Le Liban est un pays réputé pour la culture des oliviers.

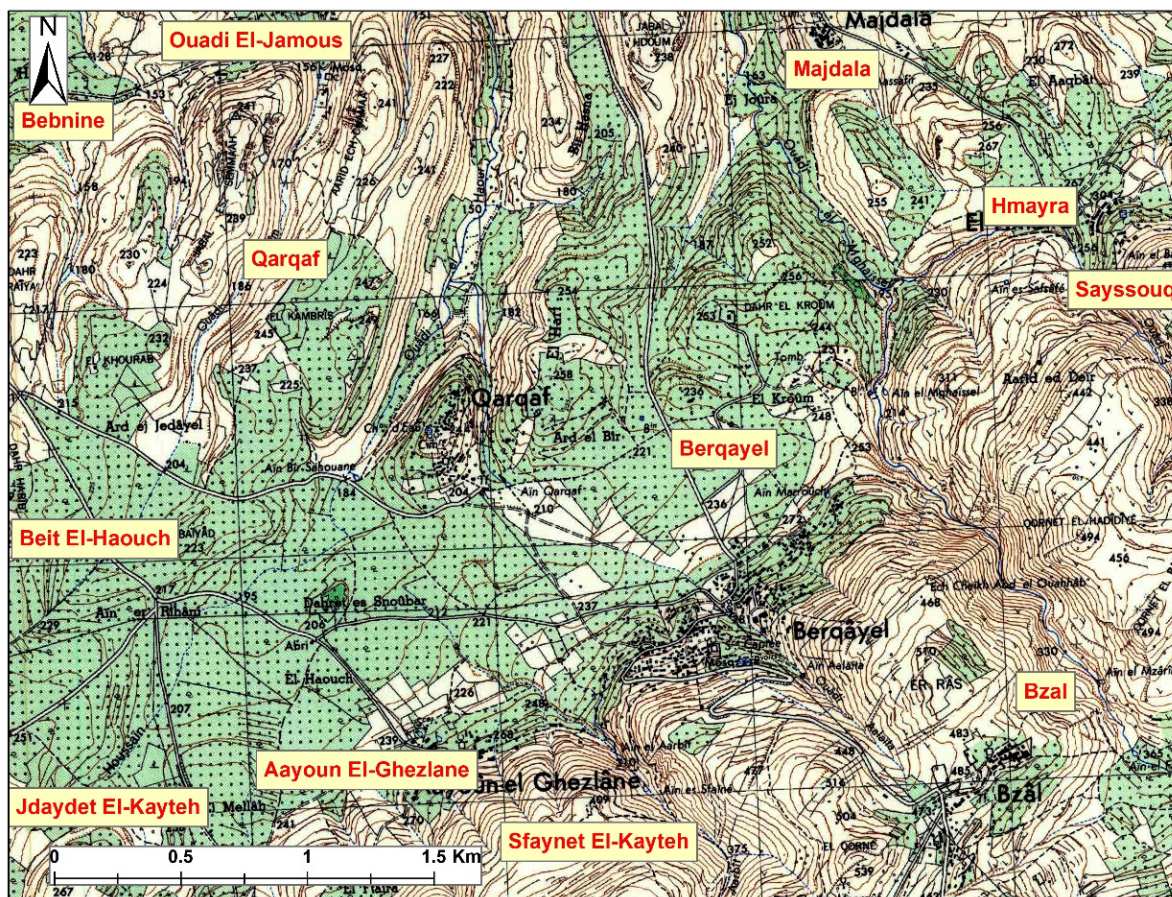


Fig. 40 - Les oliviers de la Moyenne Al-Kayteh

Cette diversité d'activité agricole illustre la géographie du Liban dont la diversité des reliefs et du climat (montagnes, vallées, plaines côtières, régions intérieures) offrent des conditions variées pour l'agriculture. Le choix des cultures, ainsi que les types de végétation, est influencé par des facteurs tels que l'altitude, la température, les précipitations et la disponibilité des ressources en eau.

En résumé, en 1962, le territoire de Basse et Moyenne Al-Kayteh se compose de petits villages, parfois de taille plus importante, entourés d'exploitations agricoles dédiés principalement aux cultures intensives et aux vergers. Par contre, les SBN sont presque absentes dans ces régions, on ne trouve que des espaces herbacés sur les frontières sud d'Al-Kayteh avec le département de Minieh-Dannieh, notamment sur les versant sud des collines de Jdaydet El-Kayteh (Fig. 41), qui font partie du bassin de Nahr El-Bared.

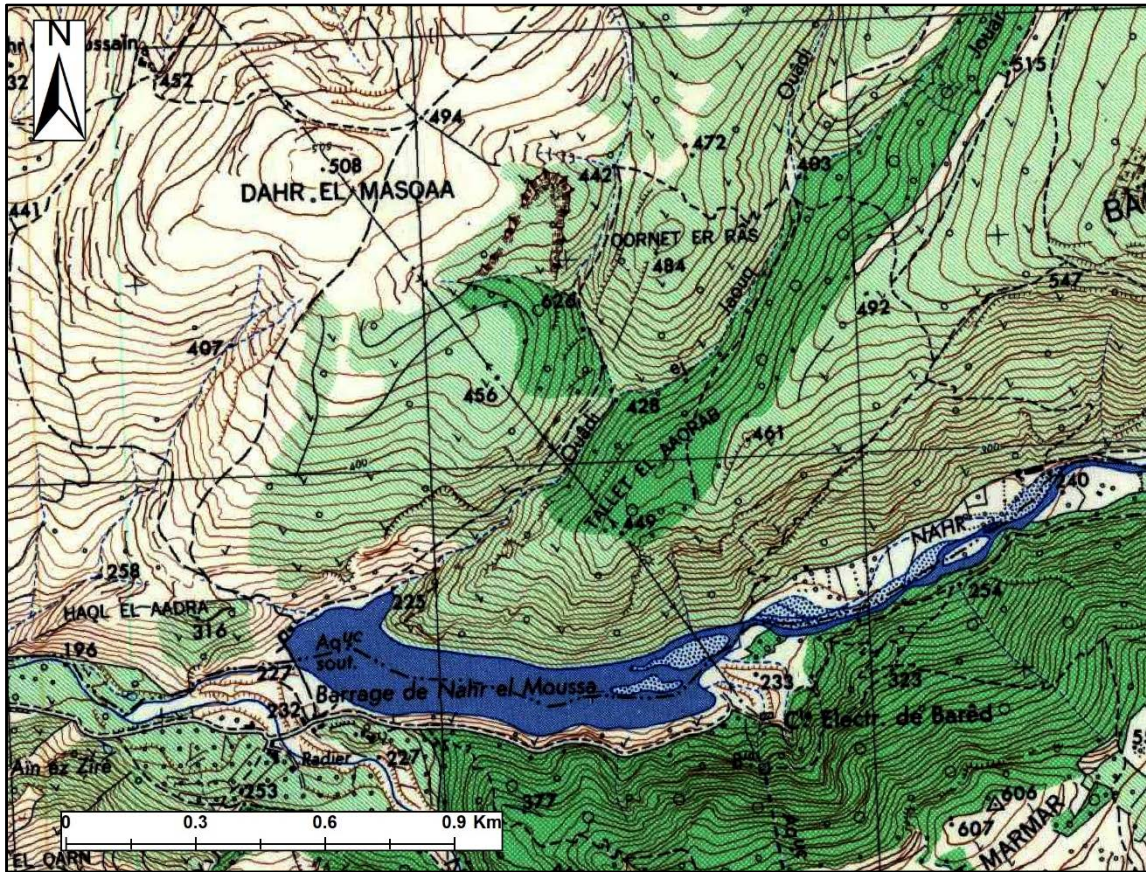


Fig. 41 - Les espaces herbacées herbacée au-dessus de Nahr El-Bared

Lorsque l'on traverse les terrains de Basse et Moyenne Al-Kayteh en direction de la Haute Al-Kayteh, on peut observer l'apparition progressive de broussailles et de végétation arbustive (Fig. 42). Ces formations boisées sont particulièrement visibles entre les communes de Bqarzla, Sayssouq et Berqayel (Basse et Moyenne Al-Kayteh) et les communes de Ain El Dahab, Bzal et Sfaynet El-Kayteh (Haute Al-Kayteh), séparant ainsi les territoires de moyenne Al-Kayteh et les territoires moyens de Haute Al-Kayteh. Elles laissent ensuite place à une mosaïque de vergers -où les oliviers cèdent progressivement la place à des arbres fruitiers-, des SBN (notamment des forêts) et des cultures de plein champs en terrasses. Cette mosaïque s'établit principalement sur les territoires d'altitude moyenne de Haute Al-Kayteh, situés entre 600 à 950 mètres environ.

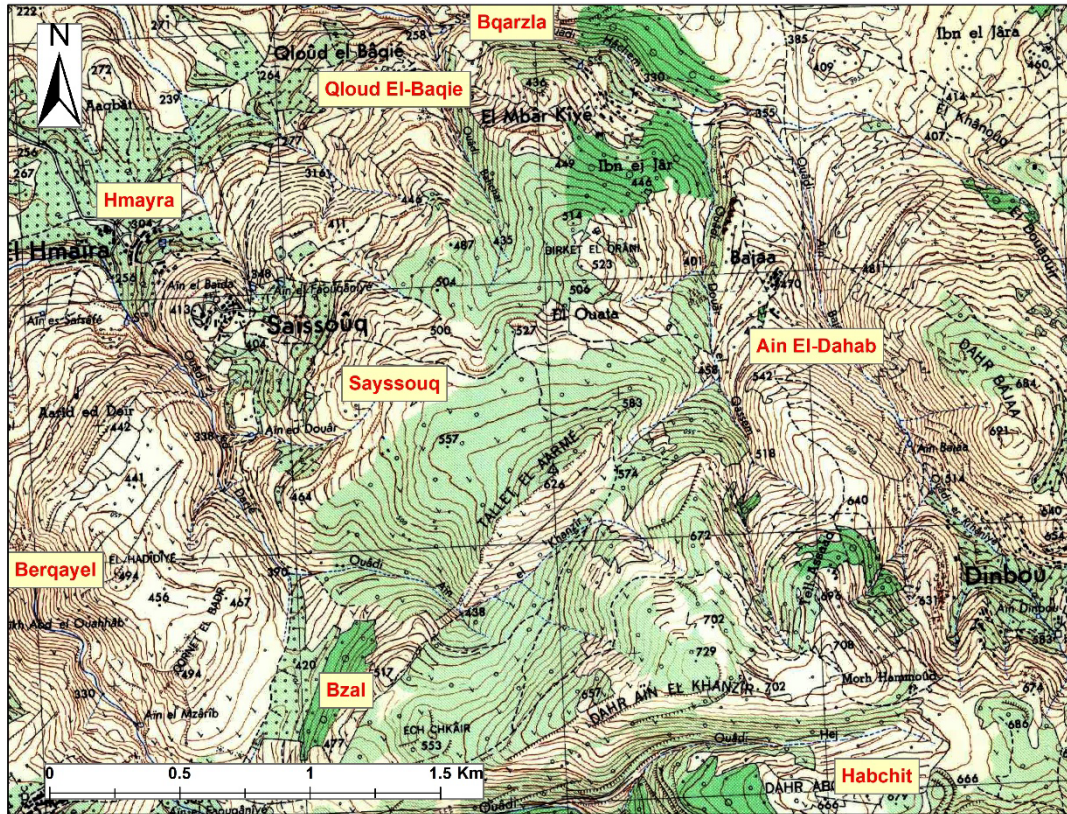


Fig. 42 - Les broussailles (en vert clair) entre moyenne et haute Al-Kayteh

Ainsi, on trouve dans cette zone une mosaïque de végétation autour des zones urbaines. Cette végétation est formée de SBN et de vergers où les arbres fruitiers prennent progressivement le relais des oliviers. La commune de Ain El-Dahab constitue un excellent exemple de cette mosaïque (Fig. 43). On trouve également une grande forêt (Fig. 44) d'un millier d'hectares environ, constituée principalement de chênes, entre les communes de Sfaynet El-Kayteh, Bzal, Ain El-Dahab, Habchit, Hrar et Qabaait.

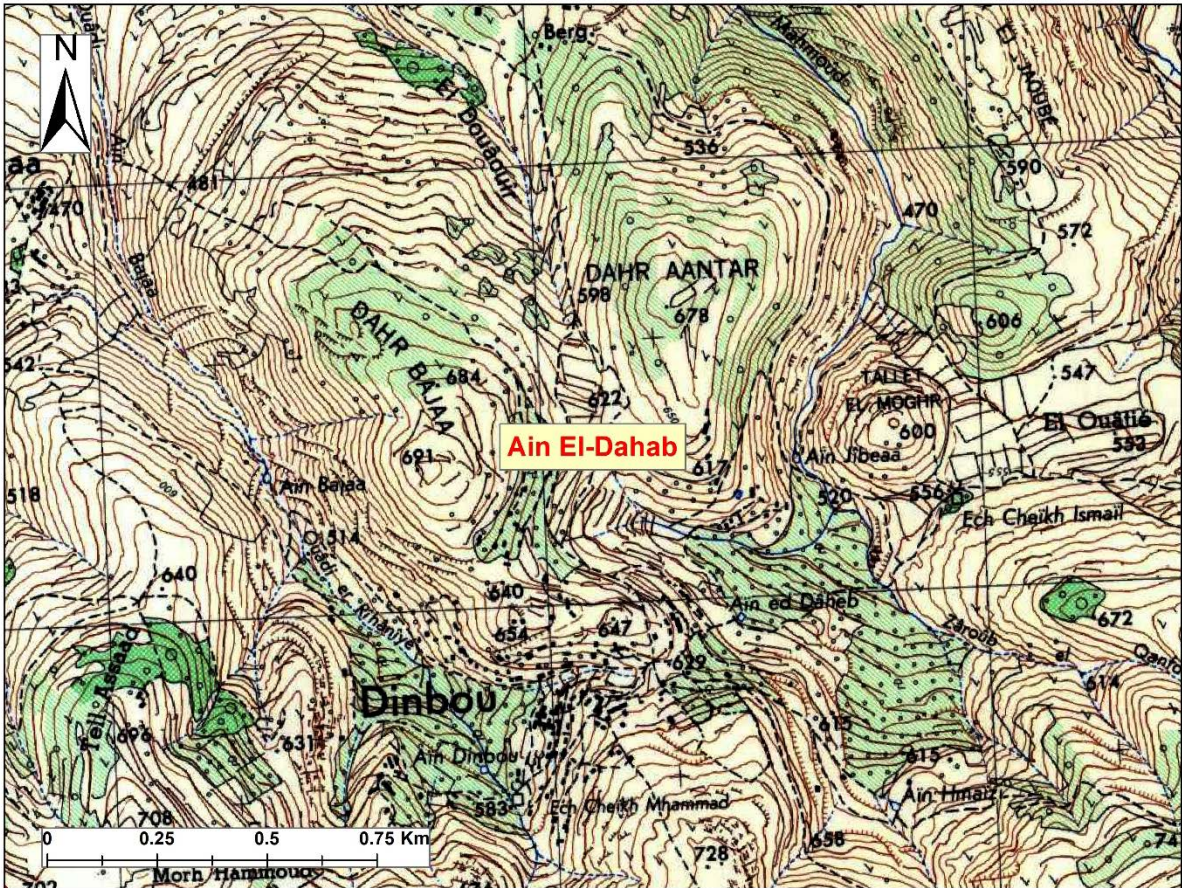


Fig. 43 - Ain El-Dahab en 1962

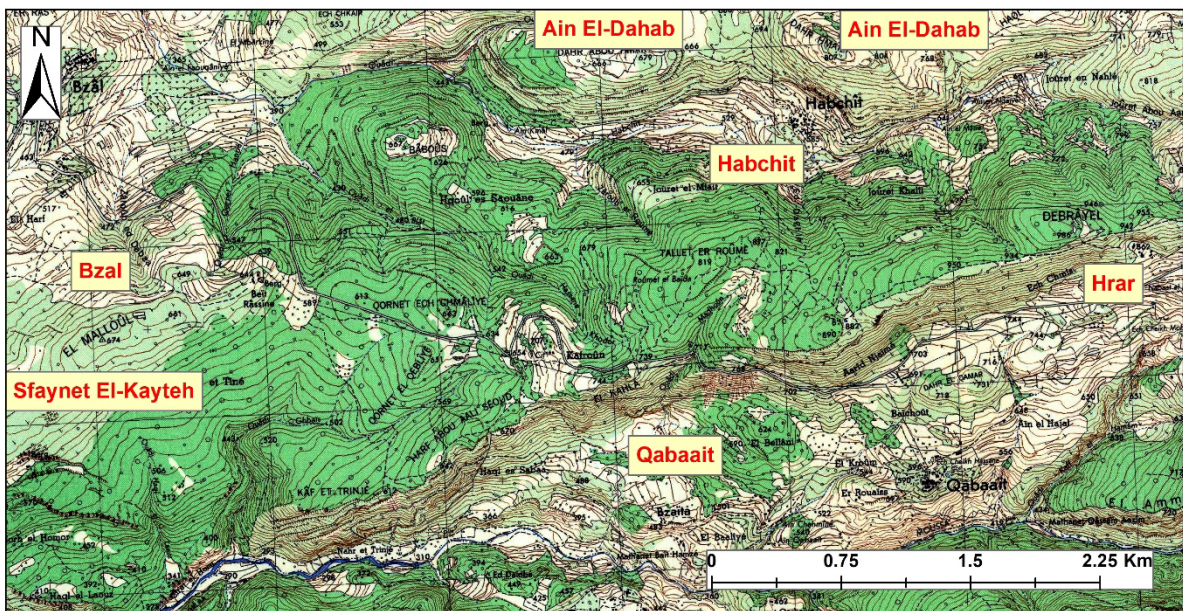


Fig. 44 - La forêt de chênes en 1962

Par contre, les reliefs de cette région ont été dans beaucoup de cas aménagés en terrasses pour permettre la culture des vergers et des cultures de plein champs. Ainsi, on trouve autour des

zones urbaines des exploitations agricoles où des exemples concrets peuvent être observés sur les cartes de Hrar (Fig. 45) et de Chane (Fig. 46). Ce modèle d'aménagement agricole se retrouve également dans la plupart des communes localisées à ces altitudes, et il est d'autant plus développé que les communes sont en altitude.

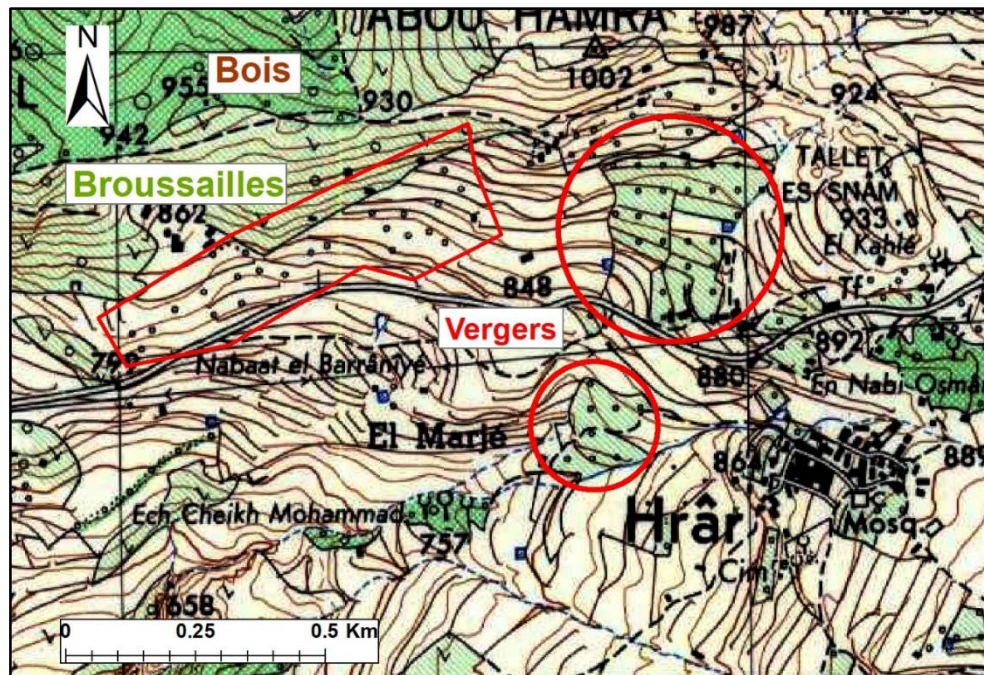


Fig. 45 - Hrar en 1962

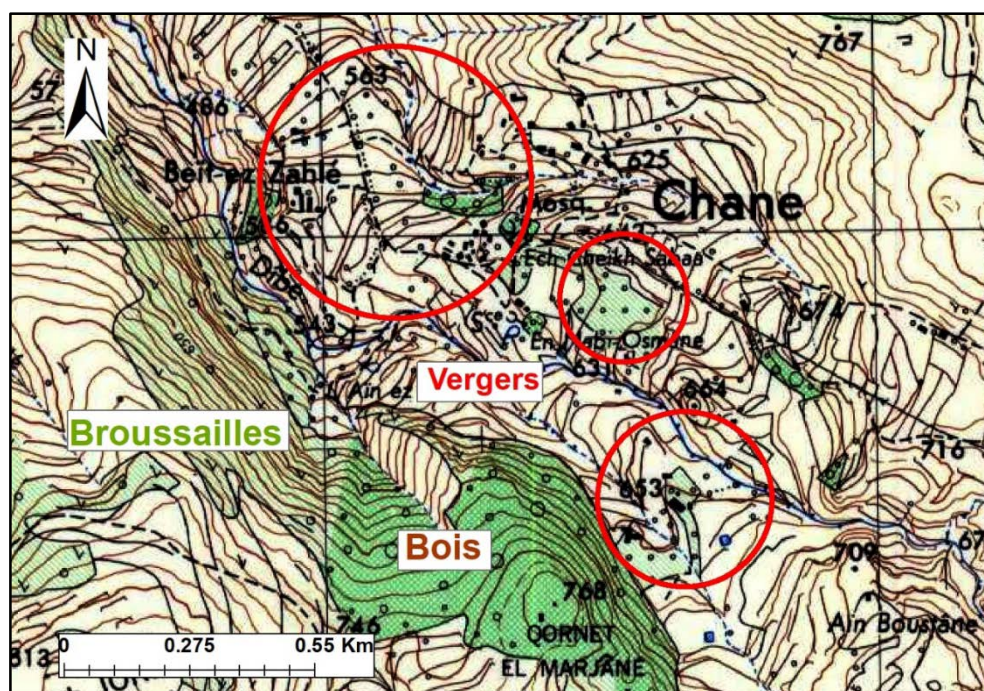


Fig. 46 - Chane en 1962

Ensuite, nous atteignons l'agglomération de Beit Ayoub – Qorne – Michmich – Fnaydeq, qui s'étendait entre 1000 et 1200 m d'altitude environ (Fig. 47), ce sont les territoires les plus élevés habités. Bien que la population de cette agglomération n'est pas aussi importante qu'aujourd'hui, elle présente néanmoins des caractéristiques spécifiques. En effet, les territoires agricoles sont largement présents dans cette région où les vergers constituent le principal type d'agriculture. Ils abritent des arbres fruitiers adaptés au climat de ces altitudes comme les pommiers, les poiriers, les cerisiers, les pêchers, et bien d'autres encore. Les fruits provenant de ces régions sont très appréciés sur le marché libanais et arabe, car les conditions climatiques de ces régions sont très propices à leur culture.

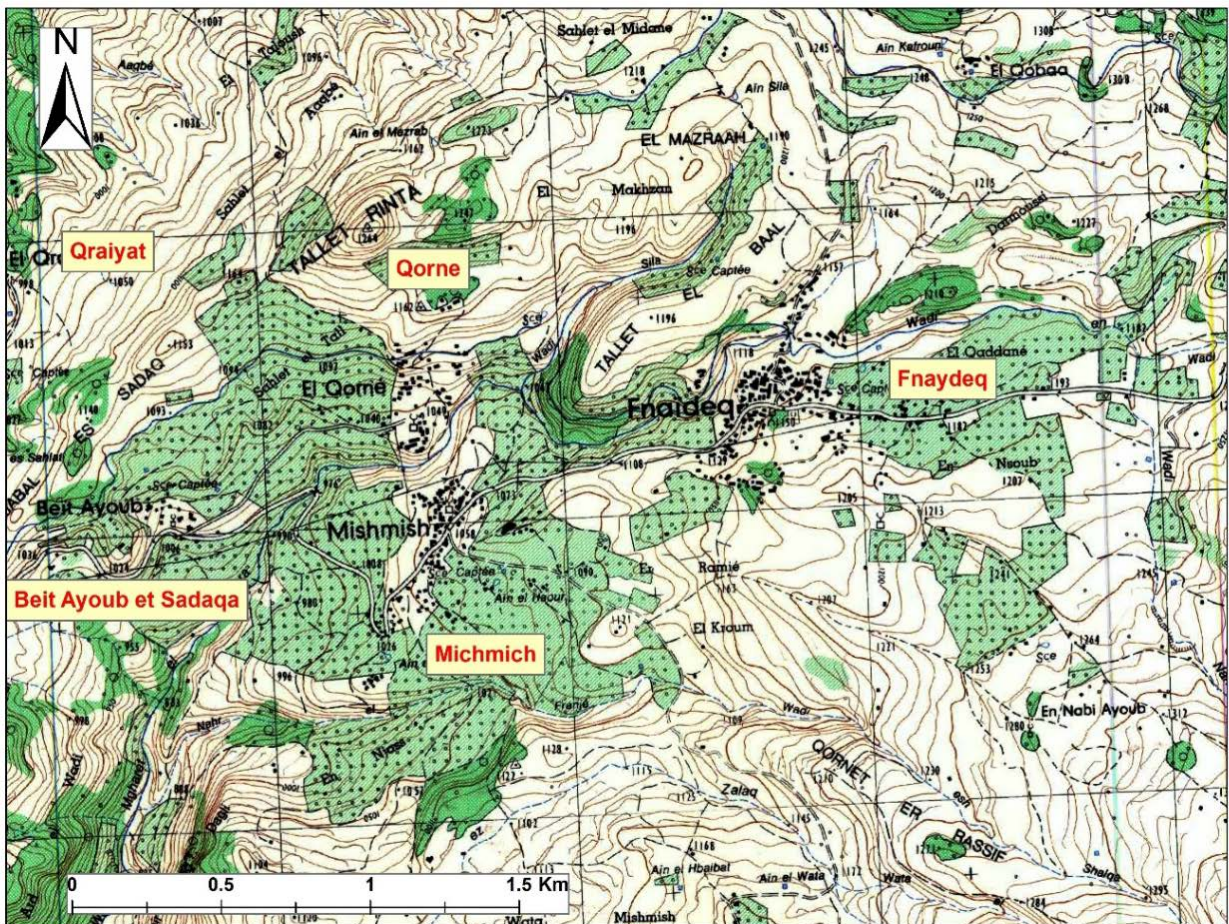


Fig. 47 - L'agglomération de Beit Ayoub – Qorne – Michmich – Fnaydeq en 1962

Au-delà de cette agglomération, nous arrivons aux montagnes d'Akkar qui frôlent les 2230 mètres d'altitude au niveau de la montagne de Aarouba à Fnaydeq et ses environs, qui

constitue le point culminant de toute la région d'Akkar. Le territoire des montagnes d'Al-Kayteh est partagé entre les communes de Michmich et de Fnaydeq (Fig. 48). Le climat de cette région est plus froid, avec une accumulation durable de neige à mesure que l'altitude augmente. Les conditions climatiques difficiles de ces altitudes ont limité son occupation, notamment en hiver. On trouve dans cette région de vastes forêts de chênes, de sapins, de pins et même de cèdres ainsi que des arbres fruitiers. A mesure que l'on s'élève en altitude, la densité des forêts diminue progressivement, laissant place à des sols et des roches nues aux altitudes les plus élevées de la région.

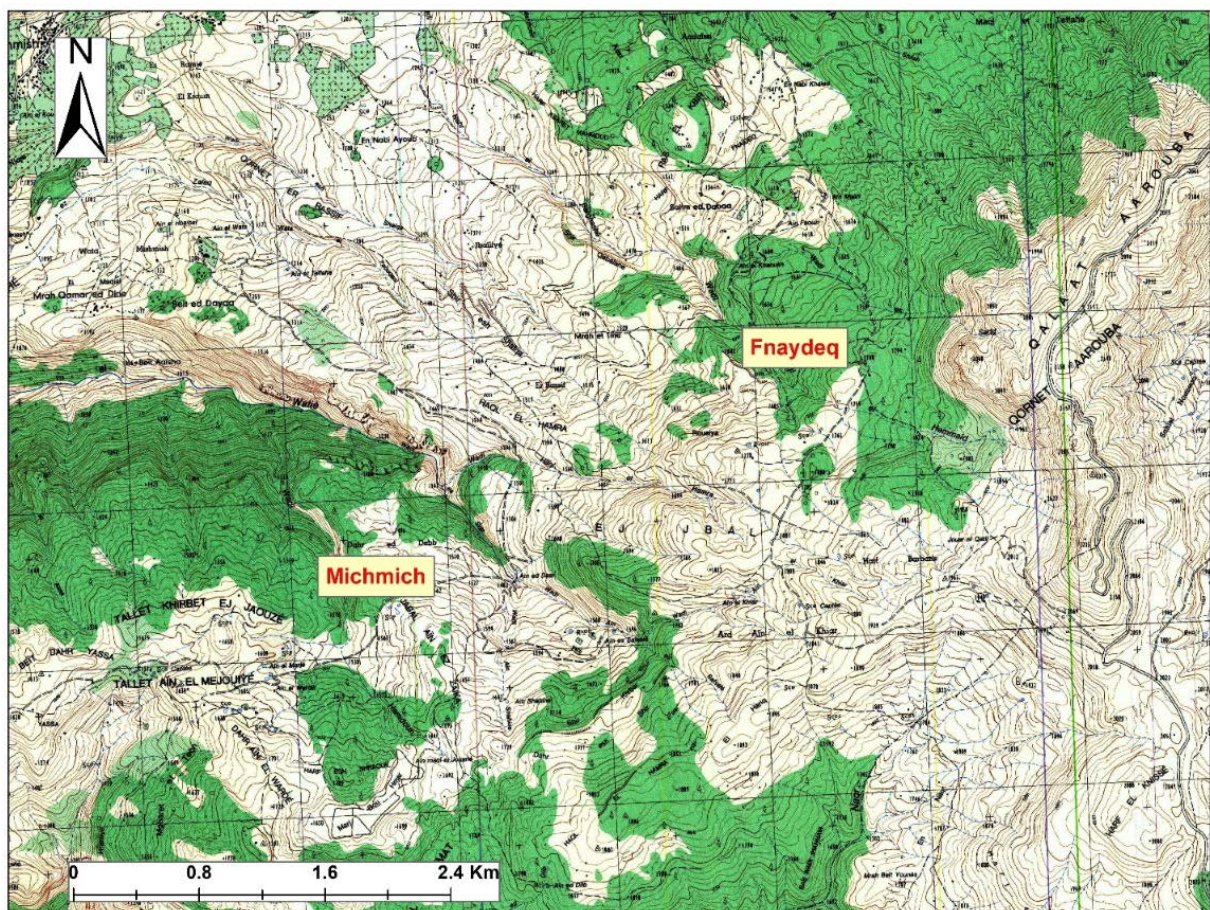


Fig. 48 - Les hautes montagnes d'Al-Kayteh en 1962

On note également, aux alentours de 1600 m, la présence de réservoirs conçus pour la collecte de neige en vue de son utilisation estivale dans l'irrigation des cultures saisonnières (Fig. 49). Ces cultures se développent en plein champ et parfois sur des terrasses.

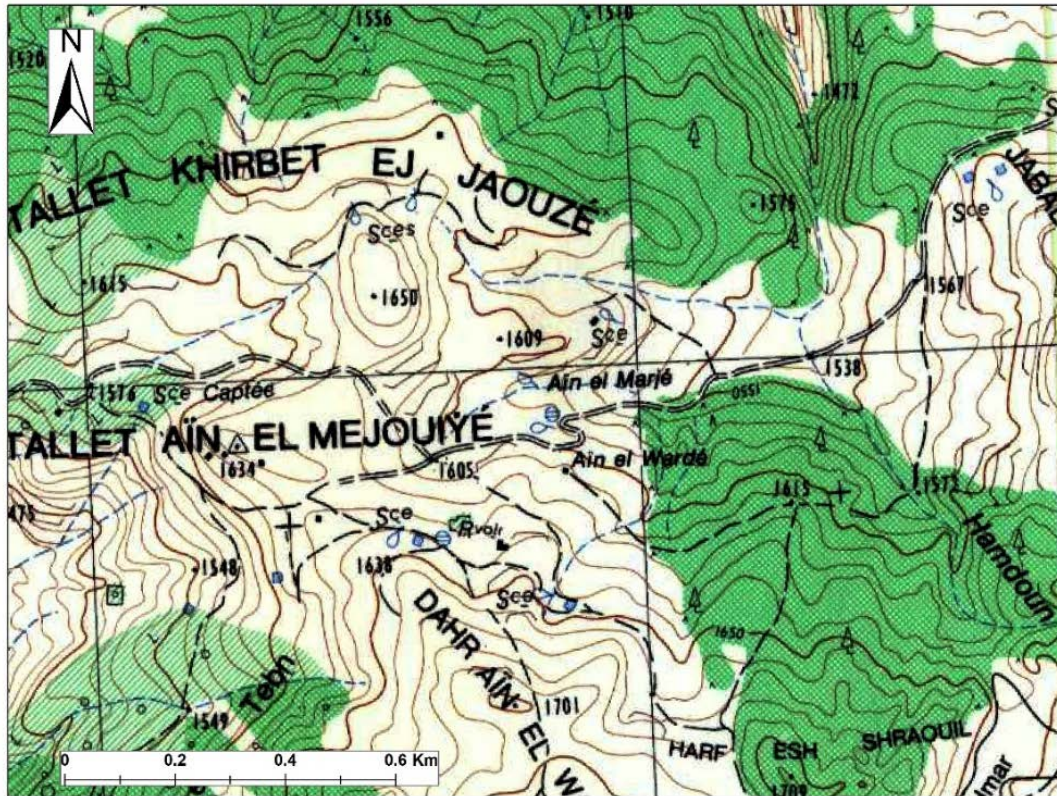


Fig. 49 - Les réservoirs des montagnes d'Al-Kayteh en 1962

3. Le territoire d'Al-Kayteh en 2005

La deuxième observation que nous allons mener sur le territoire d'Al-Kayteh concerne son étude en 2005, en utilisant une carte d'occupation du sol du Liban numérique (Esri Shapefile) établie par le CNRS-Liban. Cette partie consiste à étudier le territoire en 2005 et le comparer à l'état de 1962. Les résultats collectés nous permettront de réaliser une comparaison plus détaillée avec les résultats de 2017.

3.1. Méthodologie

Au départ, nous souhaitons étudier et cartographier les types d'occupation du sol à Al-Kayteh à l'aide d'une carte établie en 1998. Cependant, nous avons identifié certaines erreurs à Akkar, principalement dans la détermination des types de végétation, notamment entre les vergers et les SBN, ce qui conduisait à des résultats approximatifs.

Cela peut être attribué aux méthodes de collecte et d'analyse des données utilisées lors de l'élaboration de cette carte. La classification des espaces végétalisés repose sur différents facteurs tels que la définition des images satellites utilisées et l'utilisation d'autres sources de données. Ainsi, il est possible d'aboutir à certaines imperfections dans la classification des espaces verts en se basant sur la méthodologie et les données utilisées à l'époque.

Par conséquent, nous avons choisi la carte d'occupation du sol du Liban de 2005 réalisée par le CNRS-Liban pour mener à bien cette partie de l'étude. Cette carte, de résolution spatiale d'un mètre, a été établie à l'aide des images du satellite IKONOS à haute résolution spatiale du Liban. Ces images ont été fournies par Space Imaging Middle East (SIME), basée à Dubaï. Ces images satellitaires ont été collectées en 2005 et la carte a été réalisée manuellement. Les données ont été enregistrées en utilisant le système de coordonnées stéréographiques libanais. (Faour, 2015)

La table attributaire de cette carte n'offre pas beaucoup de détails, sa classification s'est fait sur deux niveaux, par exemple : Territoire agricole → Culture de plein champ. Ainsi, nous allons trier les informations offertes par cette carte selon la légende que nous déjà utilisée et les comparer avec les résultats de la partie précédente afin de comprendre l'évolution des occupations du sol entre 1962 et 2005. La légende de la carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 2005 est la suivante, sa résolution est à deux niveaux :

Tab. 7 - La légende de la carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 2005

| Niveau 1 | Niveau 2 |
|--|--|
| Territoire artificialisé | Zone urbanisée |
| | Zone d'activité |
| | Zone artificialisée non bâtie |
| Territoire agricole | Culture de plein champ |
| | Vergers |
| | Culture intensive (maraîchage, petits fruits, pépinières...) |
| | Bâtiment agricole |
| | Mitage urbain sur culture de plein champ |
| | Mitage urbain sur verger |
| Surface boisée | Forêt dense |
| | Forêt clairsemée (couvert moins de 60%) |
| | Zone arbustive |
| | Mitage urbain sur forêt clairsemée |
| Surface à végétation herbacée (naturelles) | Végétation herbacée moyennement dense |
| Terrain naturel sans ou avec peu de végétation (non productif) | Roche nue |
| | Plage |
| | affleurement rocheux |
| Surface en eau | Surface aquatique maritime |
| Fleuve ou rivière | Fleuve ou rivière |
| Réseau routier | Autouroute |

3.2. Résultats

Entre 1962 et 2005, nous avons observé un développement significatif des territoires artificialisés à Al-Kayteh, marqué par de nombreuses nouvelles constructions. Malgré cela, la région a su préserver les caractéristiques mentionnées dans la partie précédente. La carte (Fig. 50) montre la répartition des types d'occupation du sol à Al-Kayteh en 2005 :

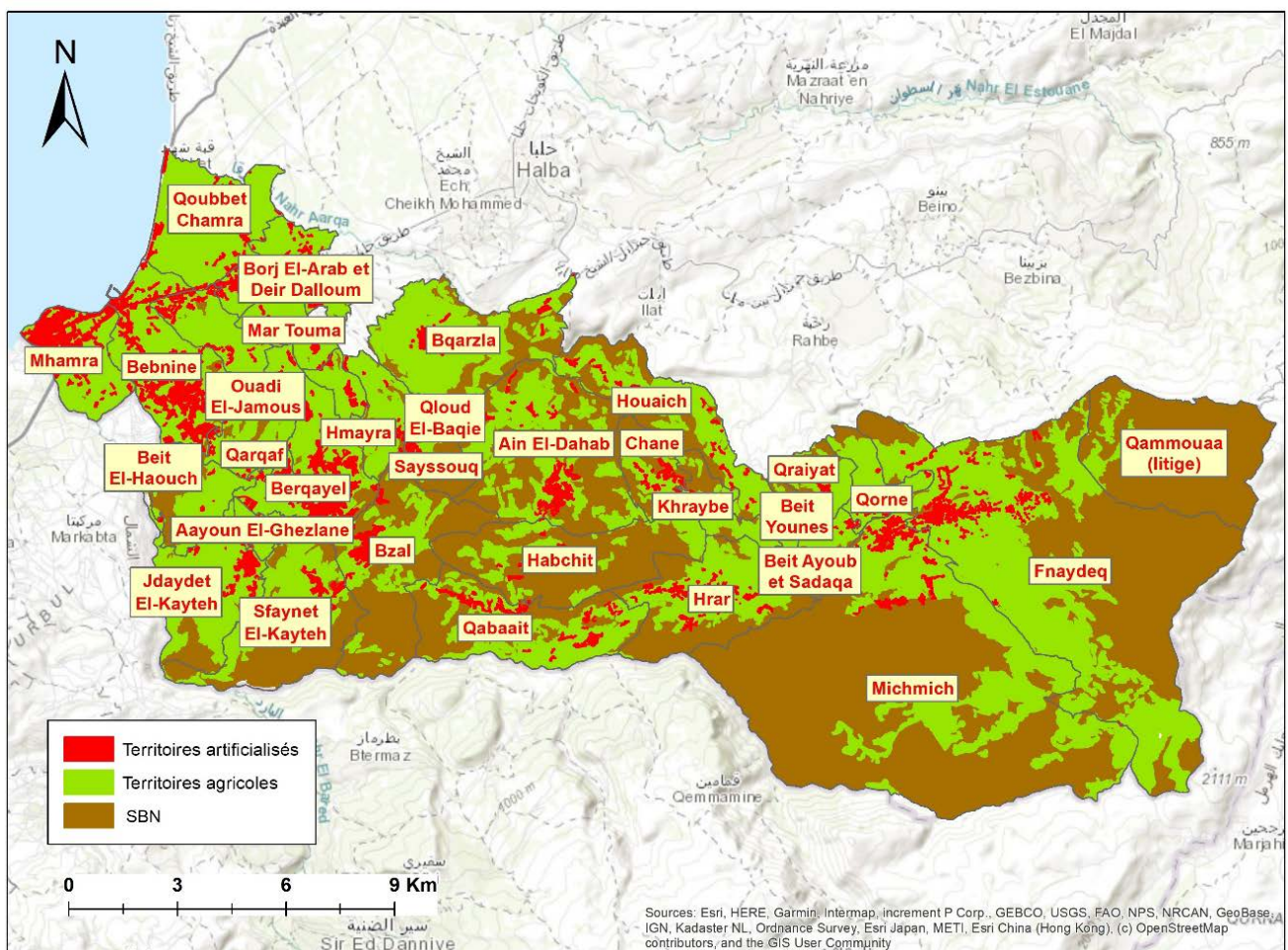


Fig. 50 - Les types des occupations des sols à Al-Kayteh en 2005

Les graphiques ci-dessous (Fig. 51 et Fig. 52) montrent la répartition des territoires artificialisés, des territoires agricoles, et des SBN dans les communes (Fig. 51) et les intercommunalités (Fig. 52) d'Al-Kayteh :

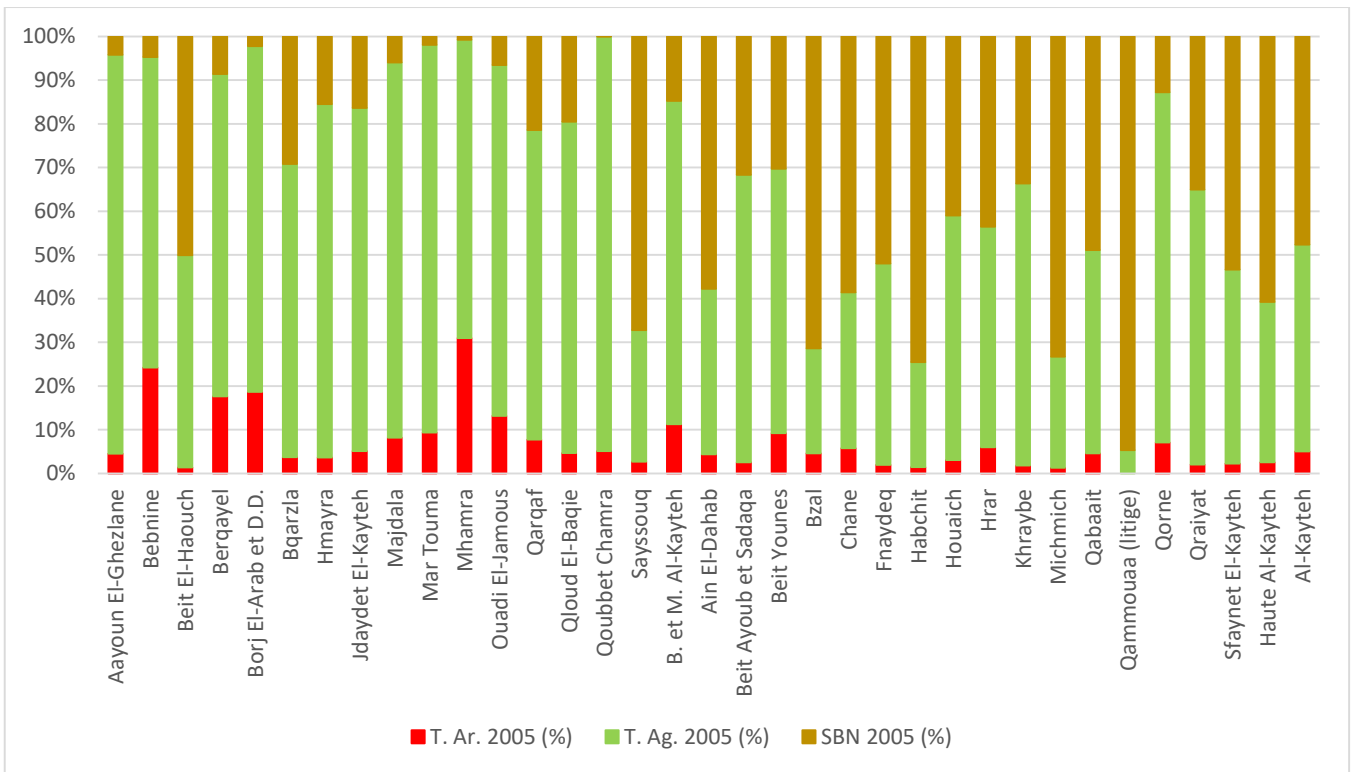
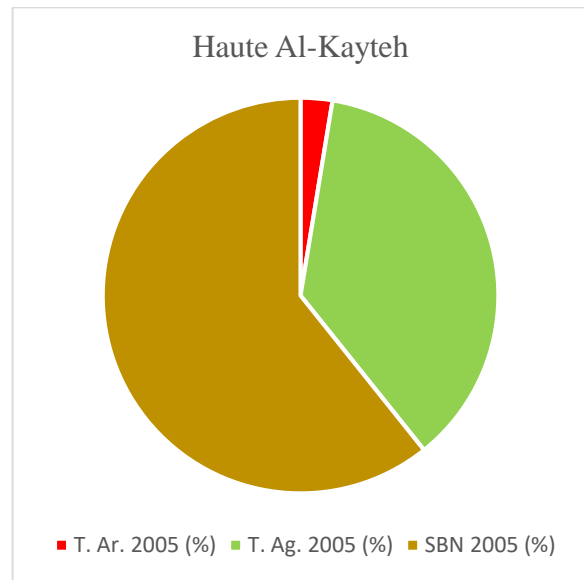
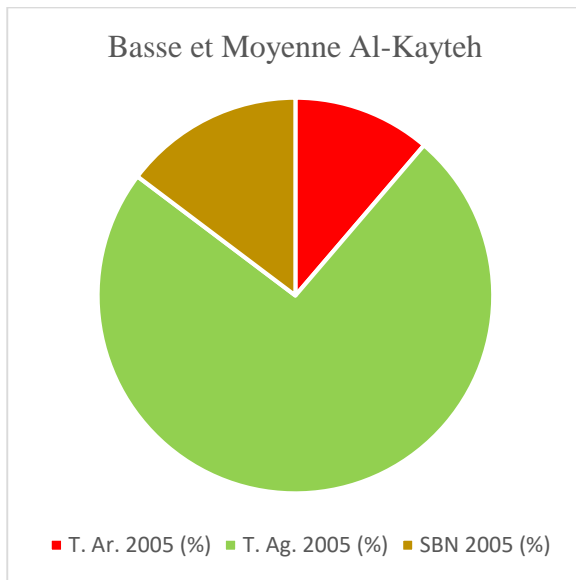


Fig. 51 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN dans les communes et les intercommunalités d'Al-Kayteh en 2005



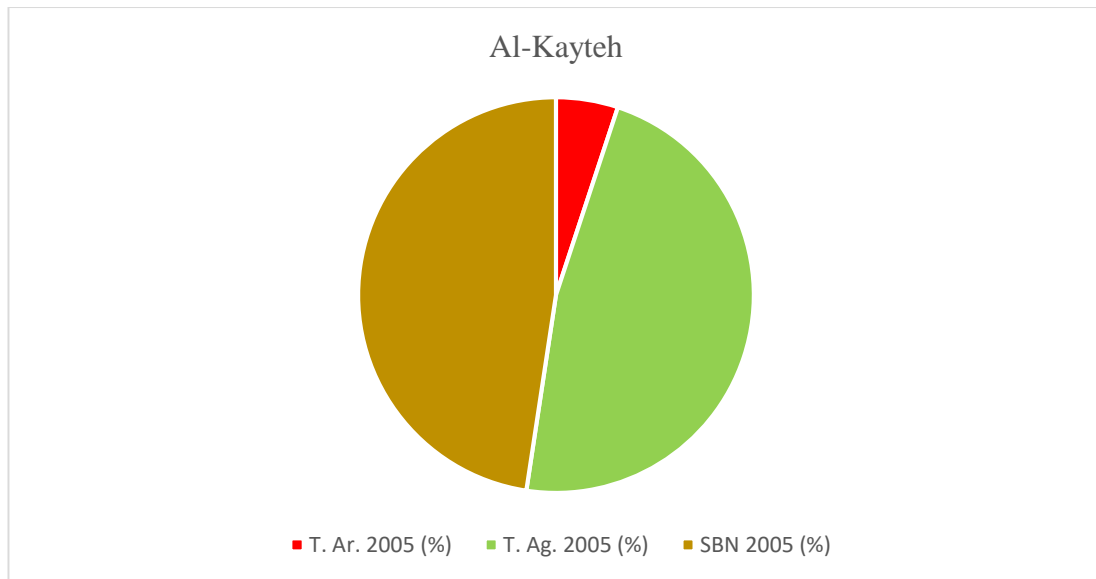


Fig. 52 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN en Basse et Moyenne Al-Kayteh, Haute Al-Kayteh et Al-Kayteh en 2005

3.2.1. Les territoires artificialisés à Al-Kayteh en 2005

Les territoires artificialisés constituent le type d'occupation du sol qui a connu le plus important développement à Al-Kayteh entre 1962 et 2005. Pratiquement, en 2005, tous les territoires artificialisés d'Al-Kayteh sont des zones urbaines sauf quelques sites d'extraction de minéraux auxquels s'ajoutent le port d'Al-Abdé et la zone industrielle du camp d'Al-Bared.

La carte (Fig. 53) et le tableau (Tab. 8) ci-dessous représentent la répartition des territoires artificialisés à Al-Kayteh et leur part dans la superficie des communes et des intercommunalités :

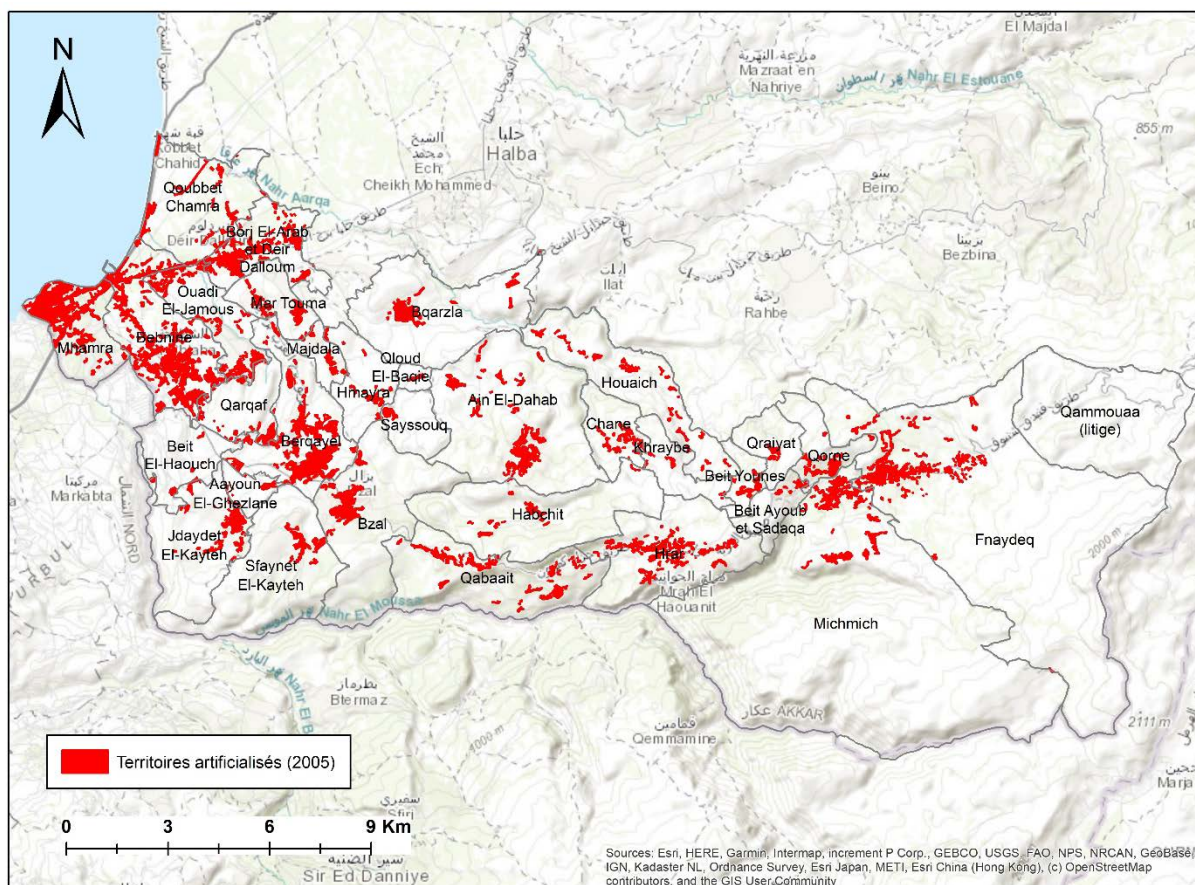


Fig. 53 - Les territoires artificialisés à Al-Kayteh en 2005

Tab. 8 - La superficie des territoires artificialisés à Al-Kayteh en 2005

| Commune | Surface (ha) | T. Ar. (ha) | T. Ar. (%) | Intercommunalité |
|-----------------------|--------------|-------------|------------|----------------------------|
| Aayoun El-Ghezlane | 104 | 4,7 | 5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bebnine | 678 | 162,7 | 24 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Beit El-Haouch | 332 | 4,6 | 1 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Berqayel | 629 | 110,8 | 18 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Borj El-Arab et D. D. | 365 | 68,3 | 19 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bqarzla | 819 | 30,7 | 4 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Hmayra | 286 | 10,4 | 4 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Jdaydet El-Kayteh | 620 | 31,6 | 5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Majdala | 110 | 9 | 8 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mar Touma | 226 | 21,1 | 9 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mhamra | 386 | 117,6 | 30 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Ouadi El-Jamous | 343 | 45,3 | 13 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qarqaf | 283 | 21,9 | 8 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qloud El-Baqie | 48 | 2,3 | 5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qoubbet Chamra | 630 | 31,4 | 5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Sayssouq | 195 | 5,3 | 3 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|-----------|-----------------|
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | 6053 | 677,7 | 11 | |
| Ain El-Dahab | 1196 | 52,3 | 4 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Ayoub et Sadaqa | 161 | 4,2 | 3 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Younes | 117 | 10,8 | 9 | Haute Al-Kayteh |
| Bzal | 871 | 39,9 | 5 | Haute Al-Kayteh |
| Chane | 238 | 13,8 | 6 | Haute Al-Kayteh |
| Fnaydeq | 3227 | 64,2 | 2 | Haute Al-Kayteh |
| Habchit | 843 | 12,3 | 1 | Haute Al-Kayteh |
| Houaich | 641 | 19,7 | 3 | Haute Al-Kayteh |
| Hrar | 768 | 46 | 6 | Haute Al-Kayteh |
| Khraybe | 212 | 3,8 | 2 | Haute Al-Kayteh |
| Michmich | 3782 | 50,1 | 1 | Haute Al-Kayteh |
| Qabaait | 775 | 35,7 | 5 | Haute Al-Kayteh |
| Qammouaa (litige) | 1025 | 0 | 0 | Haute Al-Kayteh |
| Qorne | 224 | 15,9 | 7 | Haute Al-Kayteh |
| Qraiyyat | 197 | 4,1 | 2 | Haute Al-Kayteh |
| Sfaynet El-Kayteh | 804 | 18,1 | 2 | Haute Al-Kayteh |
| Haute Al-Kayteh | 15079 | 390,9 | 3 | |
| Al-Kayteh | 21132 | 1068,6 | 5 | |

D'après la carte (Fig. 53), on peut observer en premier lieu que la plupart des constructions sont situées le long des autoroutes principales, notamment l'autoroute de Halba au niveau des communes de Mhamra, Bebnine, Ouadi El-Jamous et Borj El-Arab, ainsi que l'autoroute d'El-Abdé-Fnaydeq au niveau des communes de Bebnine, Qarqaf, Berqayel, Bzal, Qabaait, Hrar, Beit Ayoub, Michmich et Fnaydeq.

La carte (Fig. 53) montre également la présence de plusieurs agglomérations urbaines, notamment celle de Bebnine et celle de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq. On repère également sur la carte plusieurs communes de taille moyenne (exemples ci-dessous), ce qui indique une urbanisation importante du territoire d'Al-Kayteh, qui s'étale jusque vers 1350 mètres d'altitude.

Le Tab. 8 nous permet de bien identifier les plus grandes communes d'Al-Kayteh en 2005. Bebnine est la plus grande commune d'Al-Kayteh avec une superficie de 162,7 ha, elle est

également la plus grande commune d'Akkar. Elle est suivie par Mhamra (117,6 ha), Berqayel (110,8 ha), Borj El-Arab et Deir Dalloum (68,5 ha) et Fnaydeq (64,2 ha). Il est important de noter que 23 hectares des territoires artificialisés de Mhamra correspondent au Camp de Nahr El-Bared et sa zone industrielle.

On distingue également (Tab. 8) plusieurs communes de taille moyenne comme Ain El-Dahab (52,3 ha), Michmich (50,1 ha), Hrar (46 ha), Ouadi El-Jamous (45,3 ha), Bzal (40 ha) et Qabaait (35,7 ha). On constate un taux d'artificialisation élevé de certaines communes, notamment en Basse et Moyenne Al-Kayteh, comme l'illustre la carte (Fig. 53). Ainsi, le Tab. 8 montre un taux d'artificialisation de 30% des sols de Mhamra en 2005, 24% pour Bebnine, 19% pour Borj El-Arab et Deir Dalloum, 18% pour Berqayel et 13% pour Ouadi El-Jamous.

En conclusion, l'étude de ces résultats et l'analyse des cartes révèlent un phénomène important d'artificialisation des sols à Al-Kayteh, surtout en Basse et Moyenne Al-Kayteh, dans l'agglomération de Fnaydeq et le long des grandes autoroutes. On dénombre ainsi 678 ha de territoires artificialisés en Basse et Moyenne Al-Kayteh, ce qui représente 11% de sa superficie, et 391 ha de territoires artificialisés en Haute Al-Kayteh, soit 3% de sa superficie. Au total, on compte 1068 ha de territoires artificialisés à Al-Kayteh, ce qui équivaut à 5% de sa superficie.

3.2.2. L'évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh entre 1962 et 2005

Le territoire d'Al-Kayteh a connu des évolutions importantes au niveau de l'urbanisation entre 1962 et 2005. La carte (Fig. 54) et le tableau ci-dessous représentent l'évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh durant cette période :

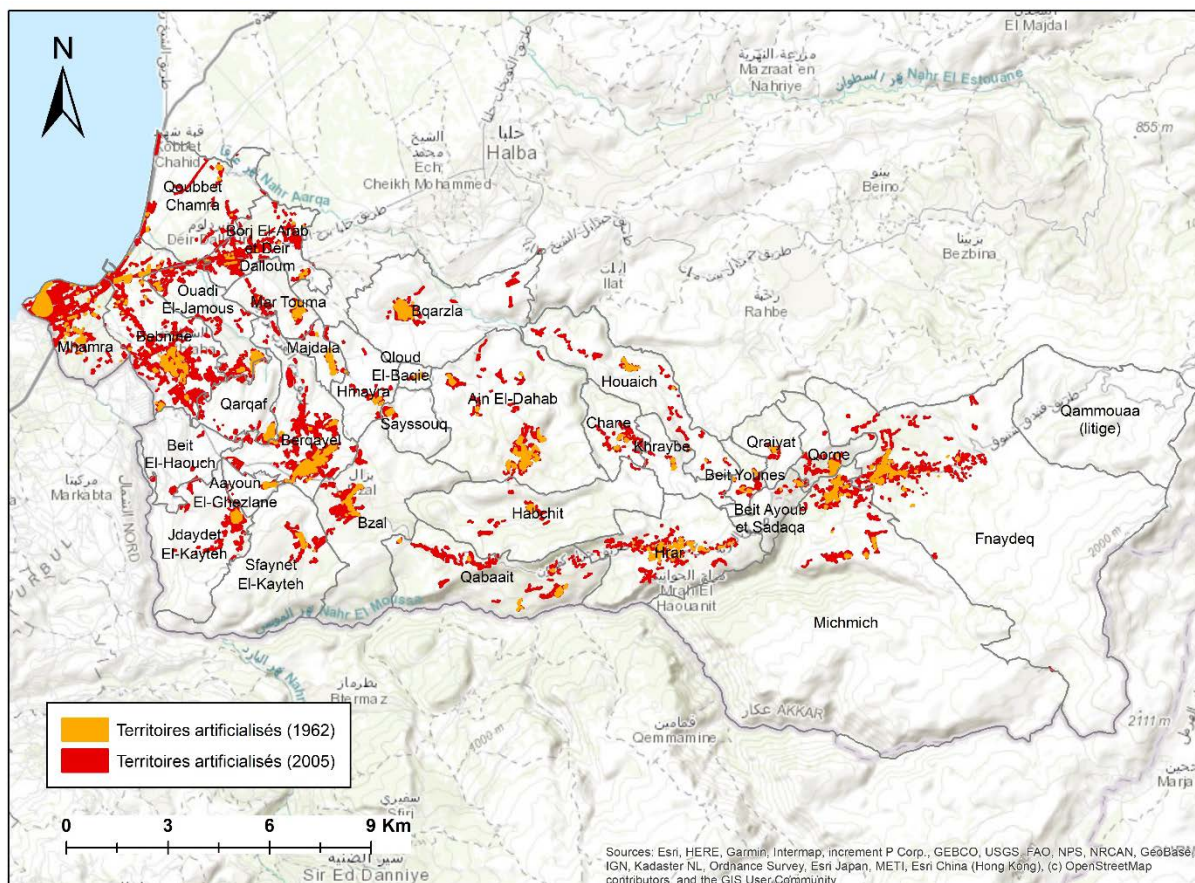


Fig. 54 - L'évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh entre 1962 et 2005

Tab. 9 - La superficie des territoires artificialisés à Al-Kayteh et leur évolution en ha et en % entre 1962 et 2005

| Commune | T. Ar. 1962 (ha) | T. Ar. 2005 (ha) | 62/05 (ha) | 62/05 (%) | Intercommunalité |
|-----------------------|------------------|------------------|------------|-----------|----------------------------|
| Aayoun El-Ghezlane | 3,7 | 4,7 | 1 | 29 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bebnine | 36,2 | 162,7 | 126,5 | 349 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Beit El-Haouch | 0 | 4,6 | 4,6 | 17515 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Berqayel | 30,4 | 110,8 | 80,3 | 264 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Borj El-Arab et D. D. | 4,1 | 68,3 | 64,2 | 1573 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bqarzla | 14,8 | 30,7 | 15,9 | 107 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Hmayra | 2,2 | 10,4 | 8,2 | 363 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |

| | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|--------------|------------|----------------------------|
| Jdaydet El-Kayteh | 6,1 | 31,6 | 25,5 | 418 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Majdala | 7,5 | 9 | 1,4 | 19 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mar Touma | 7,9 | 21,1 | 13,2 | 167 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mhamra | 33,8 | 117,6 | 83,8 | 248 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Ouadi El-Jamous | 10 | 45,3 | 35,4 | 355 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qarqaf | 8,2 | 21,9 | 13,7 | 167 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qloud El-Baqie | 1,9 | 2,3 | 0,4 | 21 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qoubbet Chamra | 2,8 | 31,4 | 28,6 | 1020 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Sayssouq | 2,2 | 5,3 | 3,1 | 144 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | 171,8 | 677,7 | 505,9 | 294 | |
| Ain El-Dahab | 22,6 | 52,3 | 29,7 | 131 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Ayoub et Sadaqa | 1,6 | 4,2 | 2,6 | 161 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Younes | 2,5 | 10,8 | 8,2 | 326 | Haute Al-Kayteh |
| Bzal | 8,7 | 39,9 | 31,3 | 361 | Haute Al-Kayteh |
| Chane | 2,2 | 13,8 | 11,6 | 519 | Haute Al-Kayteh |
| Fnaydeq | 20,9 | 64,2 | 43,3 | 207 | Haute Al-Kayteh |
| Habchit | 2,6 | 12,3 | 9,7 | 367 | Haute Al-Kayteh |
| Houaich | 4,5 | 19,7 | 15,2 | 337 | Haute Al-Kayteh |
| Hrar | 16,1 | 46 | 29,9 | 186 | Haute Al-Kayteh |
| Khraybe | 1,8 | 3,8 | 2 | 107 | Haute Al-Kayteh |
| Michmich | 16,1 | 50,1 | 34 | 211 | Haute Al-Kayteh |
| Qabaait | 5,8 | 35,7 | 29,9 | 512 | Haute Al-Kayteh |
| Qammouaa (litige) | 0 | 0 | 0 | X | Haute Al-Kayteh |
| Qorne | 6,5 | 15,9 | 9,4 | 145 | Haute Al-Kayteh |
| Qraiyat | 1,8 | 4,1 | 2,3 | 128 | Haute Al-Kayteh |
| Sfaynet El-Kayteh | 4,2 | 18,1 | 13,9 | 329 | Haute Al-Kayteh |
| Haute Al-Kayteh | 118 | 390,9 | 272,9 | 231 | |
| Al-Kayteh | 289,8 | 1068,6 | 778,8 | 269 | |

Tout d'abord, il apparait que toutes les communes d'Al-Kayteh ont connu une augmentation de leurs territoires artificialisés entre 1962 et 2005. Cependant, nous avons constaté que les grandes communes en 2005 ont connu le plus important développement urbain (l'urbanisation constituait pratiquement le seul type d'artificialisation des sols d'Al-Kayteh à l'époque) en termes d'hectares entre 1962 et 2005, tandis que les communes de petite taille ont connu un développement moindre, à la fois en termes d'hectares et d'évolution de la surface.

Ainsi, les communes d'Al-Kayteh ayant connu le plus grand développement urbain en hectares entre 1962 et 2005 sont les suivantes : Bebnine avec une augmentation de 126,5 ha, Mhamra avec 83,8 ha, Berqayel avec 80,3 ha, Borj El-Arab et Deir Dalloum avec 64,2 ha, Fnaydeq avec 43,3 ha, Ouadi El-Jamous avec 35,4 ha et Michmich avec 34 ha. Ces communes sont suivies par des communes de taille moyenne : Bzal (31,3 ha gagnés), Hrar (30 ha), Qabaait (30 ha), Ain El-Dahab (29,7 ha), Qoubbet Chamra (28,6 ha) et Jdaydet El-Kayteh (25,5 ha).

En ce qui concerne l'évolution de la surface, les communes d'Al-Kayteh ont globalement enregistré des valeurs comprises entre 107% et 519%. On observe ici que les évolutions les plus élevées ont été enregistrées par des communes de taille moyenne : Borj El-Arab/Deir Dalloum (1573%), Qoubbet Chamra (1020%), Chane (519%), Qabaait (512%), Jdaydet El-Kayteh (418%), Habchit (367%), Hmayra (363%), Bzal (361%) et Ouadi El-Jamous (355%). En revanche, en bas de la liste se trouvent généralement les petites communes : Qraiya (128%), Khraybe (107%), Bqarzla (107%), Aayoun El-Ghezlane (29%), Qloud El-Baqie (21%) et Majdala (19%).

On remarque alors, comme le montre clairement la carte (Fig. 54), l'influence très significative des infrastructures et des autoroutes sur le modèle de développement urbain à Al-Kayteh, en particulier l'autoroute de Tripoli-Halba, qui a eu un impact majeur sur le développement urbain des communes qu'elle traverse : Bebnine, Mhamra, Borj El-Arab et Deir Dalloum, Ouadi El-Jamous et Qoubbet Chamra. Ces communes ont toutes connu une expansion urbaine considérable et une évolution importante de l'urbanisation. Notons que les communes de Borj El-Arab/Deir Dalloum et Qoubbet Chamra ont enregistré de loin une évolution en surface parmi les plus élevées d'Al-Kayteh, avec respectivement 1573% et 1020%.

On peut donc conclure à l'importance cruciale du développement de l'infrastructure routière et des moyens de transport entre 1962 et 2005 dans le développement urbain d'Al-Kayteh. De nombreux commerces, services et habitations ont été construits le long des autoroutes, notamment l'autoroute de Tripoli-Halba, pour profiter du flux de voyageurs. Le développement urbain de ces communes est le résultat de leur emplacement stratégique, étant situées à la jonction de plusieurs artères principales (Tripoli-Halba, Aabdé-Fnaydeq, l'autoroute littorale), à une distance moyenne des grandes villes (Tripoli, Minié et Halba) et jouissant d'une population importante en pleine croissance. Si ce phénomène est très visible et évident sur le terrain ainsi que les cartes le démontrent, il n'existe pas d'études ayant déjà traité la question de la diffusion et de l'évolution de l'urbanisation à Akkar.

En revanche, les petites communes n'ont pas connu de développement urbain significatif. Les communes montrant les plus faibles changements, à savoir Sayssouq, Beit Ayoub, Qraiyat, Khraybe, Majdala et Aayoun El-Ghezlane, n'ont gagné qu'entre un et trois hectares entre 1962 et 2005, tandis que Qloud El-Baqie n'a augmenté que de 0.4 ha. Cependant, les territoires artificialisés de Hmayra ont enregistré une croissance de 8,2 ha (soit une évolution de 363%) entre 1962 et 2005, et le territoire de Beit El-Haouch, qui n'était pas habité en 1962, a gagné 4,6 ha.

Enfin, les territoires artificialisés de la Basse et Moyenne Al-Kayteh ont augmenté de 504,7 ha entre 1962 et 2005, soit +294%, tandis que les territoires artificialisés de la Haute Al-Kayteh ont augmenté de 273 ha, ce qui représente une évolution de +231%. Au total, Al-Kayteh a gagné 778,8 ha de territoires artificialisés entre 1962 et 2005, soit une évolution en surface de +269%.

3.2.3. Les territoires agricoles et les SBN à Al-Kayteh en 2005

Les superficies des territoires agricoles et des SBN à Al-Kayteh en 2005 sont données dans le tableau ci-dessous (Tab. 10) :

Tab. 10 - La superficie des territoires agricoles et des SBN à Al-Kayteh en 2005

| Commune | T. Ag. (ha) | T. Ag. (%) | SBN (ha) | SBN (%) | Intercommunalité |
|-----------------------------------|----------------|---------------|--------------|------------|----------------------------|
| Aayoun El-Ghezlane | 94,5 | 91 | 4,3 | 4 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bebnine | 477,2 | 70 | 31,5 | 5 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Beit El-Haouch | 161 | 49 | 166 | 50 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Berqayel | 463,7 | 74 | 54,2 | 9 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Borj El-Arab et D. D. | 288,5 | 79 | 8 | 2 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Bqarzla | 549,2 | 67 | 238,8 | 29 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Hmayra | 231,8 | 81 | 44,3 | 15 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Jdaydet El-Kayteh | 482,4 | 78 | 100,5 | 16 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Majdala | 94,1 | 86 | 6,5 | 6 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mar Touma | 200,4 | 89 | 4,4 | 2 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Mhamra | 259,3 | 67 | 2,9 | 1 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Ouadi El-Jamous | 275,2 | 80 | 22,5 | 7 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qarqaf | 200,7 | 71 | 60,7 | 21 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qloud El-Baqie | 36,5 | 76 | 9,4 | 19 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Qoubbet Chamra | 579,4 | 92 | 0,3 | 0 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Sayssouq | 58,7 | 30 | 131,2 | 67 | Basse et Moyenne Al-Kayteh |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | 4452,4 | 74 | 885,3 | 15 | |
| Ain El-Dahab | 453,2 | 38 | 690,2 | 58 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Ayoub et Sadaqa | 106 | 66 | 51 | 32 | Haute Al-Kayteh |
| Beit Younes | 70,6 | 60 | 35,4 | 30 | Haute Al-Kayteh |
| Bzal | 209,2 | 24 | 621,7 | 71 | Haute Al-Kayteh |
| Chane | 84,9 | 36 | 139,6 | 59 | Haute Al-Kayteh |
| Fnaydeq | 1484,3 | 46 | 1676,5 | 52 | Haute Al-Kayteh |
| Habchit | 202,3 | 24 | 628,1 | 75 | Haute Al-Kayteh |
| Houaich | 358,8 | 56 | 262,5 | 41 | Haute Al-Kayteh |
| Hrar | 387,5 | 50 | 333,9 | 44 | Haute Al-Kayteh |
| Khraybe | 137,1 | 65 | 71,5 | 34 | Haute Al-Kayteh |
| Michmich | 960,3 | 25 | 2768,9 | 73 | Haute Al-Kayteh |
| Qabaait | 360,1 | 46 | 378,8 | 49 | Haute Al-Kayteh |
| Qammouaa (litige) | 54,8 | 5 | 970,1 | 95 | Haute Al-Kayteh |
| Qorne | 179,2 | 80 | 28,6 | 13 | Haute Al-Kayteh |
| Qraiyyat | 123,7 | 63 | 68,9 | 35 | Haute Al-Kayteh |

| | | | | | |
|--------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|
| Sfaynet El-Kayteh | 352,2 | 44 | 424 | 53 | Haute Al-Kayteh |
| Haute Al-Kayteh | 5524,2 | 37 | 9149,4 | 61 | |
| Al-Kayteh | 9976,6 | 47 | 10034,7 | 47 | |

Après avoir comparé les cartes topographiques de 1962 avec la carte d'occupation du sol de 2005, nous avons constaté que le territoire d'Al-Kayteh a conservé ses caractéristiques entre ces deux années en ce qui concerne les SBN et les territoires agricoles, notamment pour les types d'agriculture, leur répartition et leur régionalisation. Les graphiques (Fig. 52 et Fig. 51) présentent les pourcentages d'occupation du sol dans les communes et les intercommunalités d'Al-Kayteh.

En effet, la basse Al-Kayteh (0-100m) est encore largement dédiée aux activités agricoles en 2005 comme on peut le voir sur la carte ci-dessous (Fig. 55). Elle se caractérise par des cultures de plein champ, des cultures intensives ainsi que des vergers comme à Mhamra, Bebnine, Ouadi El-Jamous, Borj El-Arab et Qoubbet Chamra (Fig. 55). Les territoires agricoles occupent une très grande partie des terrains de ces communes : 92% de Qoubbet Chamra, 80% de Ouadi El-Jamous, 79% de Borj El-Arab et Deir Dalloum, 70% de Bebnine et 67% de Mhamra.

En montant vers le territoire de Moyenne Al-Kayteh, les cultures de plein champ commencent à régresser au profit des vergers, qui dominaient le paysage à des altitudes comprises entre 150 et 450m comme à Jdaydet El-Kayteh, Aayoun El-Ghezlane, Berqayel, Hmayra et Bqarzla (Fig. 55). Les territoires agricoles occupent une grande partie de ces communes encore comme à Aayoun El-Ghezlane (91%), Mar Touma (89%), Majdala (86%), Hmayra (81%), Jdaydet El-Kayteh (78%), Berqayel (74%), Qarqaf (71%), Bqarzla (67%)...

Toutes ces données démontrent l'importance de l'agriculture dans l'économie et la vie des habitants de la Basse et Moyenne Al-Kayteh, où les territoires agricoles occupent 4452 ha,

représentant ainsi 74% de sa superficie. Cependant, les SBN n'occupent que 15% de la superficie de la Basse et Moyenne Al-Kayteh en 2005.

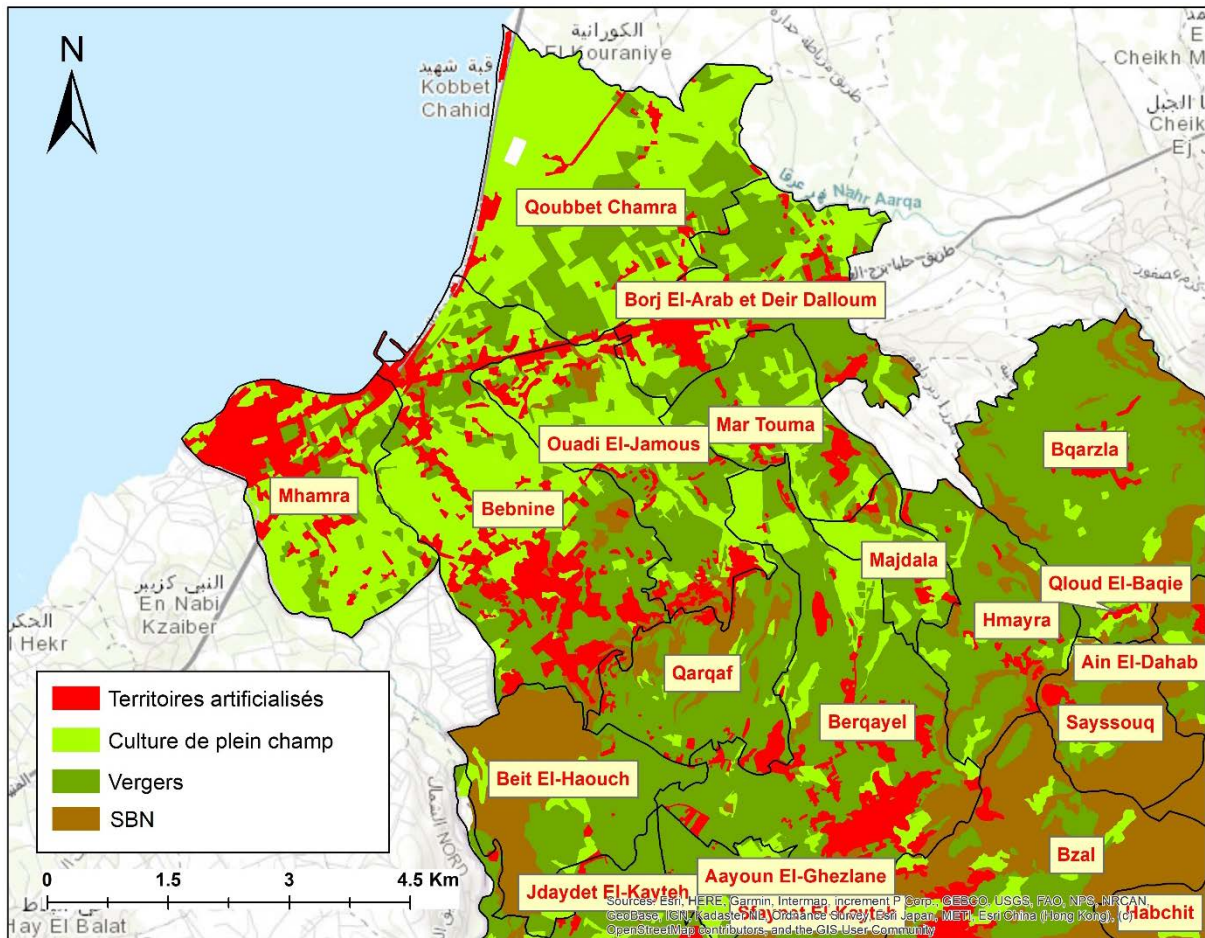


Fig. 55 – Les modes d’occupation des sols dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh en 2005

Malheureusement, la carte d'occupation du sol de 2005 ne fournit pas d'informations sur les types de vergers, mais nous estimons, après avoir comparé la carte de 2005 aux cartes de 1998 et de 2017, que les vergers du littoral et de la plaine d'Akkar étaient principalement composés d'agrumes, tandis que ceux du reste du territoire de Basse et Moyenne Al-Kayteh étaient principalement des oliviers.

Ensuite, tout comme en 1962, un espace de transition composé principalement de végétation arbustive, apparaît entre la Basse et Moyenne Al-Kayteh et la Haute Al-Kayteh, à une altitude

d'environ 500m comme à Bqarzla, Sayssouq, Ain El-Dahab, Bzal, Habchit et Qabaait (Fig. 56).

Après, une mosaïque de territoires agricoles et de SBN, notamment des forêts, se déploie dans les territoires de moyenne altitude de Haute Al-Kayteh comme à Ain El-Dahab, Qabaait, Houaich, Chane, Khraybe et Hrar. La carte (Fig. 56) et le Tab. 10 reflètent très bien cette mosaïque. On prend l'exemple des communes d'Ain El-Dahab, Houaich et Qabaait où les territoires agricoles représentent respectivement 38%, 56% et 46% de leur superficie, et les SBN représentent respectivement 58%, 41% et 49% de leur superficie.

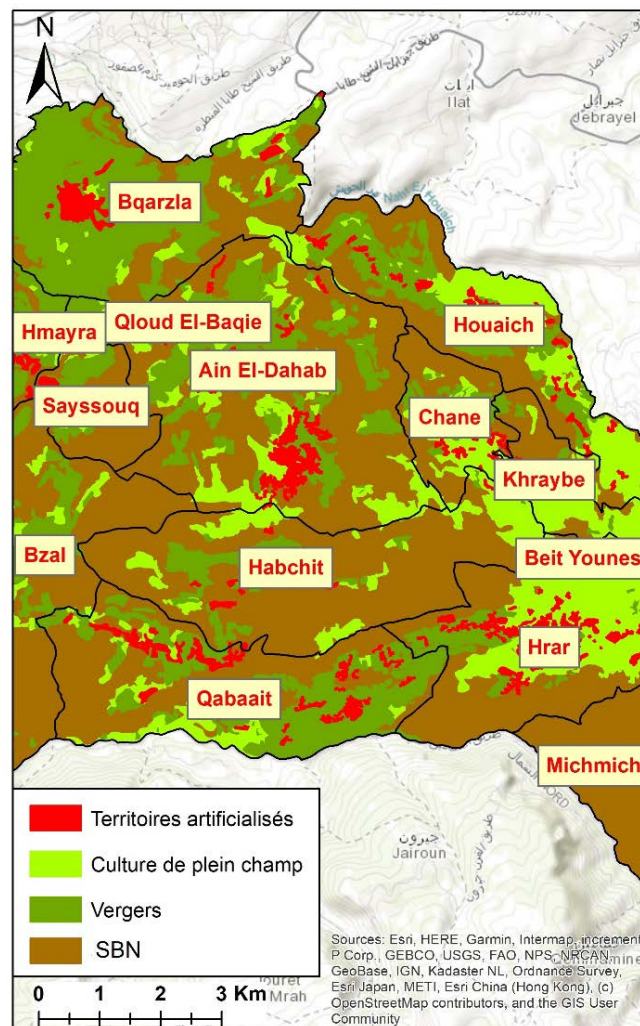


Fig. 56 – Les modes d’occupation des sols dans les territoires moyens de Haute Al-Kayteh en 2005

De son côté, l'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq (1000-1300m) a connu une expansion des territoires artificialisés mais aussi agricoles. Les terrains occupés pour l'habitation et l'agriculture ont dépassé les zones de 1300m d'altitude contre 1200m en 1962. Cette agglomération présente des activités agricoles avec de vastes terrains cultivés abritant des vergers et des cultures de plein champs (Fig. 57). On remarque que les vergers, qui devaient être des arbres fruitiers, sont le type d'agriculture principale, ce qui n'était pas toujours le cas pour les communes plus basses comme nous avons vu.

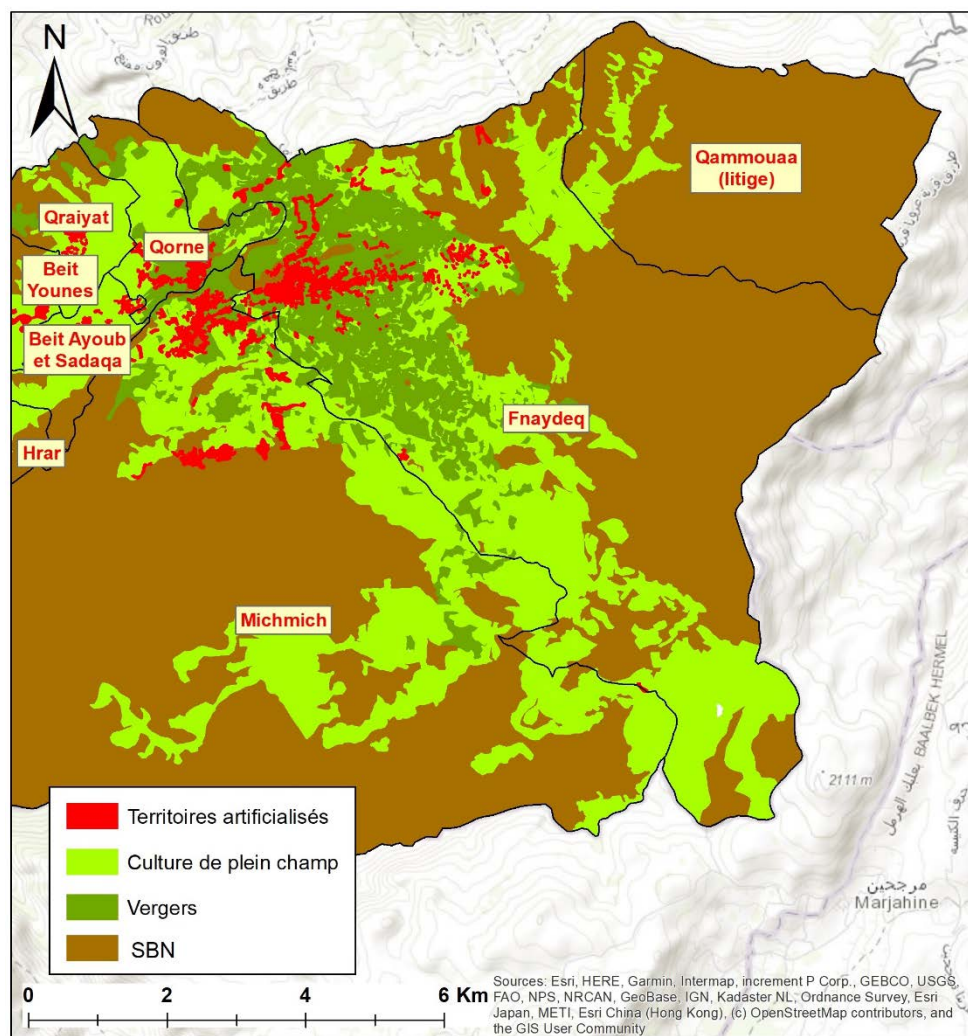


Fig. 57 – Les modes d'occupation des sols dans l'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq en 2005

Les montagnes d'Al-Kayteh, dans les limites administratives de Fnaydeq et Michmich, sont occupées par des SBN, on y trouve également des cultures de plein champs printanières et estivales, après la fonte de la neige (Fig. 57).

Ainsi, en 2005, la Haute Al-Kayteh est moins marquée par l'agriculture que la Basse et Moyenne Al-Kayteh. Les territoires agricoles représentent seulement 37% de la superficie de Haute Al-Kayteh, tandis que les SBN en occupent 61%. Au total, les territoires agricoles et les espaces naturels représentent chacun 47% de la superficie d'Al-Kayteh en 2005.

4. Le territoire d'Al-Kayteh en 2017

La dernière observation que nous ferons de l'état de l'occupation du sol à Al-Kayteh concerne l'année 2017. Il s'agit de la carte d'occupation du sol la plus récente que nous ayons trouvée pour le Liban, établie en collaboration entre le CNRS-Liban et la FAO. Ensuite, nous allons étudier l'évolution de l'occupation des sols à Al-Kayteh entre les trois années retenues : 1962, 2005 et 2017.

4.1. Méthodologie

Nous allons utiliser la carte d'occupation du sol du Liban de 2017 réalisée par le CNRS-Liban et la FAO pour mener à bien cette partie de l'étude. Cette carte nous a été fournie en format numérique (Esri Shapefile) par l'établissement public de l'eau du Liban-Nord (NLWE). La résolution spatiale de la carte est de 1,5 mètres. Elle offre beaucoup d'informations, sa classification peut atteindre quatre niveaux, par exemple : Surface boisée → Forêt dense → Forêt de conifères dense → Forêt de pins dense. La légende de la carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 2017 est la suivante, sa résolution est à quatre niveaux : :

Tab. 11 - La légende de la carte d'occupation du sol d'Al-Kayteh en 2017

| Niveau 1 | Niveau 2 | Niveau 3 | Niveau 4 |
|--------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Territoire artificialisé | Zone urbanisée | Tissu urbain continu | Tissu urbain dense |
| | | | Tissu urbain informel dense |
| | | Tissu urbain discontinu | Tissu urbain moyennement dense |
| | | | Tissu urbain peu dense |
| | Zone d'activité | Zone industrielle ou commerciale | Tissu urbain informel peu dense |
| | | | Zone industrielle ou commerciale |
| | Zone artificialisée | Sites d'extraction de minéraux | Sites d'extraction de minéraux |
| | | | Extension urbaine et/ou chantier |
| | | | Extension urbaine et/ou chantier |

| | | | | |
|---------------------|--|---|---|---------------------|
| | | Terrains urbains vacants | Terrains urbains vacants | |
| | Zone verte artificialisée (non agricole) | Espace vert urbain | Espace vert urbain | |
| Territoire agricole | Culture de plein champ | Mitage urbain sur culture de plein champ | Mitage urbain sur culture de plein champ | |
| | | Culture de plein champ en grandes surfaces | Culture de plein champ en grandes surfaces | |
| | | Culture de plein champ en petites surfaces ou terrasses | Culture de plein champ en petites surfaces ou terrasses | |
| | | Terrain agricole abandonné | Terrain agricole abandonné | |
| | Vergers | Mitage urbain sur vergers | Mitage urbain sur vergers | |
| | | Oliviers | Oliviers | |
| | | Vignoble | Vignoble | |
| | | Arbres fruitiers | Arbres fruitiers | |
| | | Agrumes | Agrumes | |
| | Culture intensive | | | |
| Bâtiment agricole | Elevage volaille | | | |
| Surface boisée | Forêt dense | Mitage urbain sur forêt dense | Mitage urbain sur forêt dense | |
| | | Forêt de conifères dense | Forêt de pins dense Forêt de cyprès dense | |
| | | Forêt de feuillus dense | Forêt de chênes dense | |
| | | Forêt mixte dense | Forêt mixte dense | |
| | Forêt clairsemée | Forêt de conifères clairsemée | Forêt de pins peu dense Forêt de génévriers peu dense | |
| | | Forêt de feuillus clairsemée | Forêt de chênes clairsemée Autre type de forêt feuillue clairsemée | |
| | | Forêt mixte clairsemée | Forêt mixte clairsemée | |
| | Zone arbustive | Mitage urbain sur zone arbustive | Mitage urbain sur zone arbustive | |
| | | Végétation arbustive | Végétation arbustive | |
| | | Végétation arbustive (avec arbres dispersés) | Végétation arbustive(avec arbres dispersés) | |
| | Forêt incendiée | Forêt incendiée | Forêt incendiée | |
| | Surface à | Végétation | Végétation herbacée | Végétation herbacée |

| | | | |
|--|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| végétation herbacée (naturelles) | herbacée moyennemet dense | moyennemet dense | clairsemée |
| Terrain naturel sans ou avec peu de végétation (non productif) | Roche nue | Roche nue | Roche nue |
| | Sol nu | Sol nu | Sol nu |
| | Plage | Plage sable | Plage sable |
| | Affleurement rocheux | Affleurement rocheux | Affleurement rocheux |
| Surface en eau | Surface aquatique continentale | Lac | Lac |
| | | Lac collinaire | Lac collinaire |
| Fleuve ou rivière | Fleuve ou rivière | Fleuve ou rivière | Fleuve ou rivière |
| Réseau routier | Autoroute | Autoroute | Autoroute |

4.2. Résultats

Nous allons présenter dans un premier temps l'état de l'occupation du sol à Al-Kayteh en 2017, ensuite nous allons étudier l'évolution des types d'occupations du sol à Al-Kayeth à travers les trois années 1962, 2005 et 2017.

4.2.1. Les occupations du sol à Al-Kayteh en 2017

La carte ci-dessous représente la répartition des types d'occupation du sol à Al-Kayteh en 2017 :

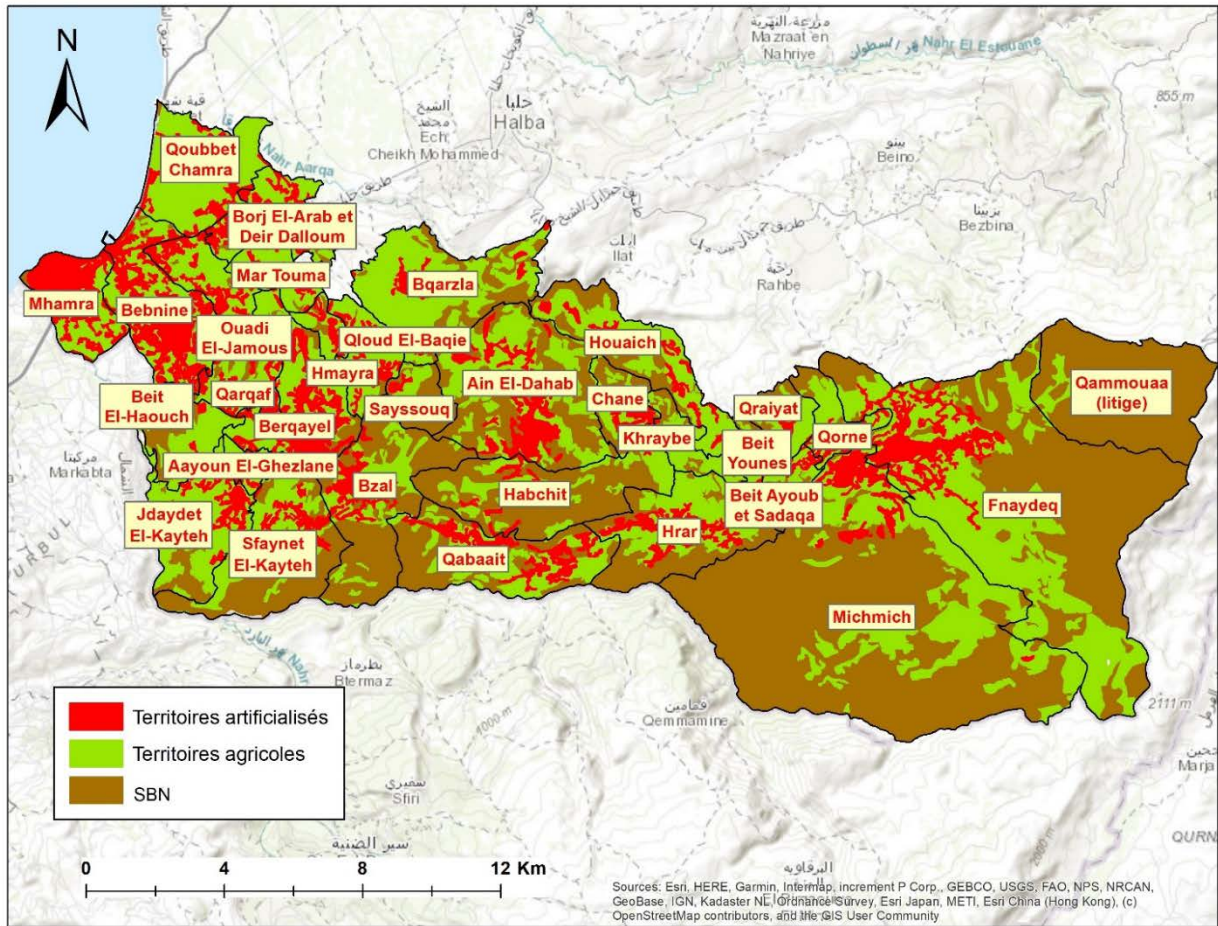


Fig. 58 - Les types des occupations du sol à Al-Kayteh en 2017

Les superficies des types d'occupation du sol dans les communes d'Al-Kayteh en 2017 sont précisées dans le tableau ci-dessous (Tab. 12) :

Tab. 12 - La superficie des territoires artificialisés, des territoires agricoles et des SBN à Al-Kayteh en 2017

| Commune | T. Ar. (ha) | T. Ar. (%) | T. Ag. (ha) | T. Ag. (%) | SBN (ha) | SBN (%) | Intercom.* |
|-----------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|-------------|------------|------------|
| Aayoun El-Ghezlane | 18,7 | 18 | 82,6 | 80 | 2,3 | 2 | BMAK |
| Bebnine | 291,8 | 43 | 354,8 | 52 | 23,9 | 4 | BMAK |
| Beit El-Haouch | 16,3 | 5 | 184,7 | 56 | 130,5 | 39 | BMAK |
| Berqayel | 196,6 | 31 | 361,2 | 57 | 70,7 | 11 | BMAK |
| Borj El-Arab et D. D. | 132,2 | 36 | 214,6 | 59 | 18,1 | 5 | BMAK |
| Bqarzla | 43,8 | 5 | 569,1 | 70 | 205,7 | 25 | BMAK |
| Hmayra | 40,5 | 14 | 218 | 76 | 27,9 | 10 | BMAK |
| Jdaydet El-Kayteh | 77,5 | 13 | 452,7 | 73 | 83,3 | 13 | BMAK |
| Majdala | 25,3 | 23 | 66 | 60 | 18,3 | 17 | BMAK |
| Mar Touma | 48,6 | 22 | 167,8 | 74 | 9,5 | 4 | BMAK |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|------|
| Mhamra | 204,2 | 53 | 171,5 | 44 | 5,2 | 1 | BMAK |
| Ouadi El-Jamous | 116,7 | 34 | 219,1 | 64 | 7,1 | 2 | BMAK |
| Qarqaf | 65,9 | 23 | 169,2 | 60 | 48,2 | 17 | BMAK |
| Qloud El-Baqie | 5,1 | 11 | 32,7 | 68 | 10,4 | 22 | BMAK |
| Qoubbet Chamra | 77,6 | 12 | 533,6 | 85 | 2,3 | 0 | BMAK |
| Sayssouq | 8,5 | 4 | 64,4 | 33 | 122,4 | 63 | BMAK |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | 1369,4 | 23 | 3862 | 64 | 786 | 13 | |
| Ain El-Dahab | 174,4 | 15 | 457,4 | 38 | 563,9 | 47 | HAK |
| Beit Ayoub et Sadaqa | 16,4 | 10 | 79,7 | 49 | 65 | 40 | HAK |
| Beit Younes | 19 | 16 | 62,9 | 54 | 34,9 | 30 | HAK |
| Bzal | 78,1 | 9 | 214 | 25 | 578,8 | 66 | HAK |
| Chane | 38,2 | 16 | 110,4 | 46 | 89,6 | 38 | HAK |
| Fnaydeq | 241 | 7 | 1347 | 42 | 1638,2 | 51 | HAK |
| Habchit | 41,7 | 5 | 223,4 | 27 | 577,6 | 69 | HAK |
| Houaich | 74,2 | 12 | 369,8 | 58 | 197 | 31 | HAK |
| Hrar | 129,4 | 17 | 321,8 | 42 | 316,4 | 41 | HAK |
| Khraybe | 7,5 | 4 | 155,3 | 73 | 49,6 | 23 | HAK |
| Michmich | 124,1 | 3 | 857,7 | 23 | 2799,8 | 74 | HAK |
| Qabaait | 117,8 | 15 | 279,3 | 36 | 378 | 49 | HAK |
| Qammouaa (litige) | 0 | 0 | 49,2 | 5 | 975,7 | 95 | HAK |
| Qorne | 46,6 | 21 | 131,6 | 59 | 45,5 | 20 | HAK |
| Qraiyat | 13,2 | 7 | 115,5 | 59 | 67,9 | 35 | HAK |
| Sfaynet El-Kayteh | 64,6 | 8 | 326,2 | 41 | 406,1 | 51 | HAK |
| Haute Al-Kayteh | 1186,4 | 8 | 5101,3 | 34 | 8783,8 | 58 | |
| Al-Kayteh | 2555,9 | 12 | 8963,3 | 42 | 9569,8 | 45 | |

* Intercommunalité : BMAK = Basse et Moyenne Al-Kayteh et HAK = Haute Al-Kayteh

Les graphiques ci-dessous (Fig. 59 et Fig. 60) représentent la répartition des territoires artificialisés, des territoires agricoles et des SBN dans les communes (Fig. 59) et les intercommunalités (Fig. 60) d'Al-Kayteh :

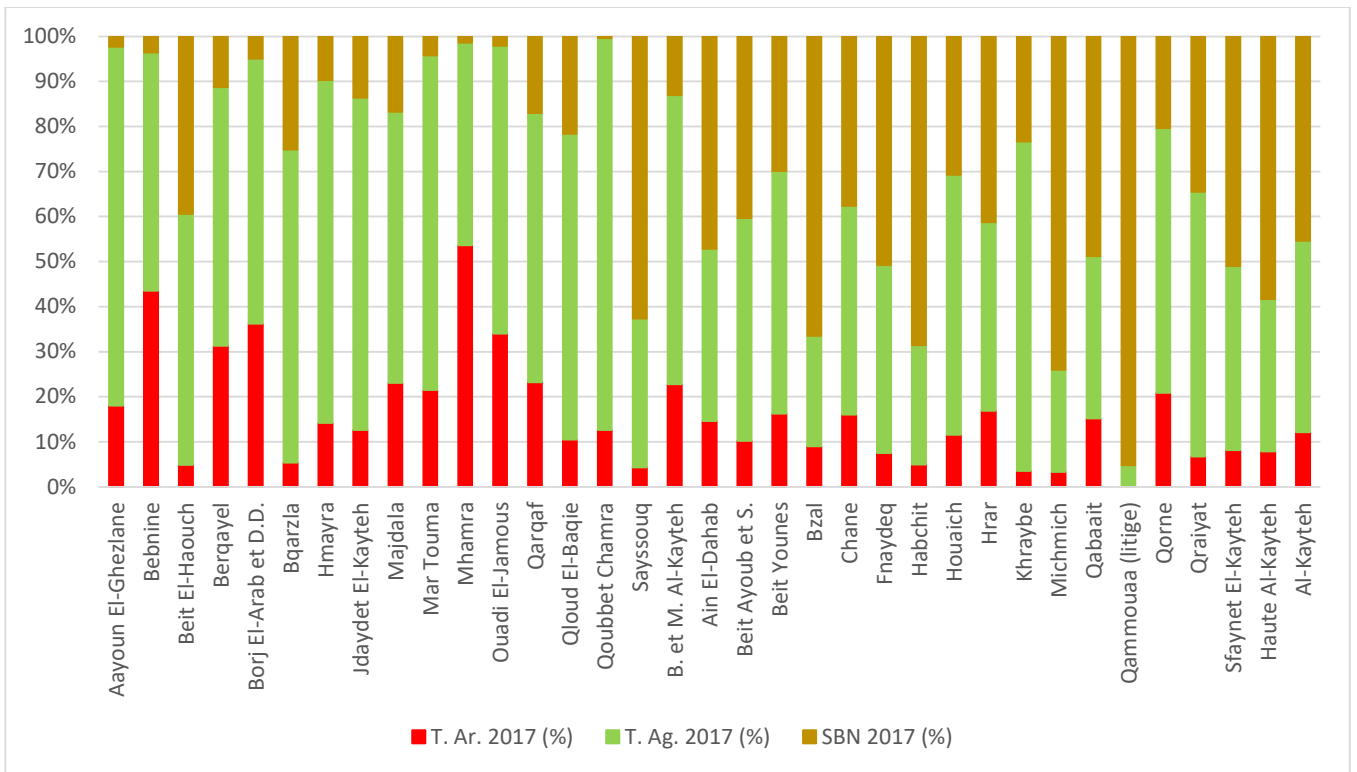
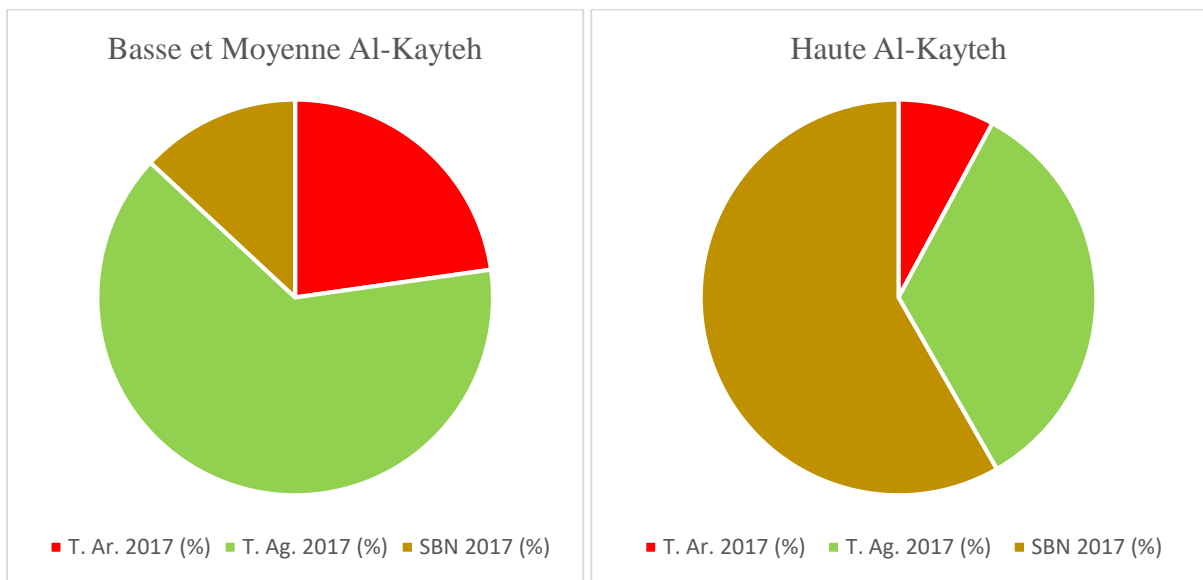


Fig. 59 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN dans les communes et les intercommunalités d'Al-Kayteh en 2017



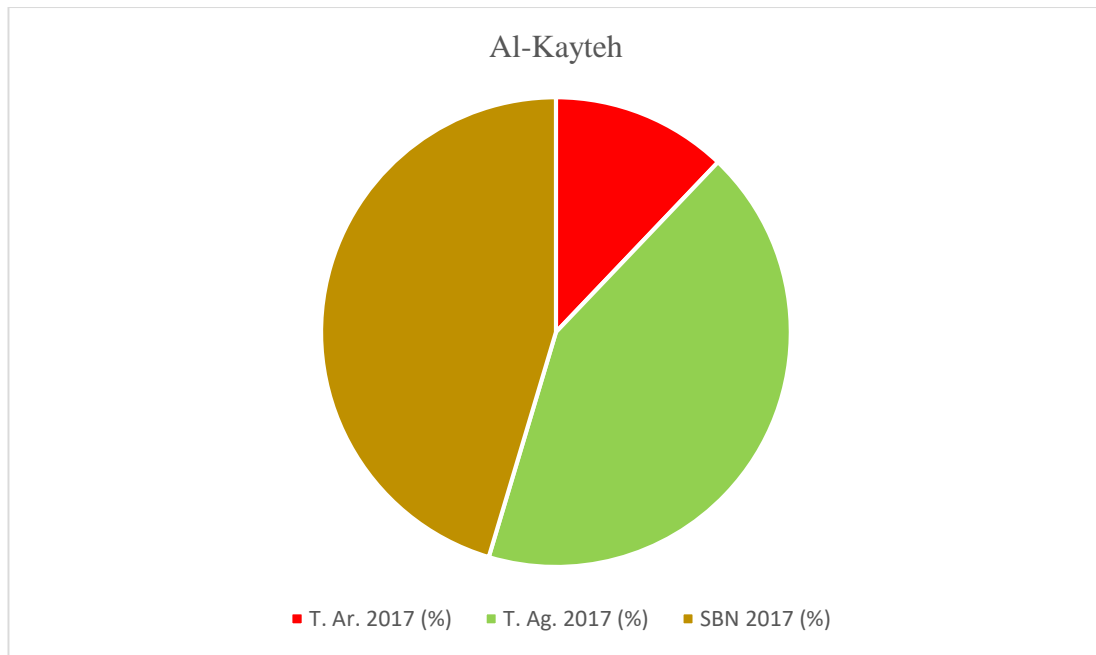


Fig. 60 - Proportions en pourcentage des territoires artificialisés, agricoles et des SBN en Basse et Moyenne Al-Kayteh, Haute Al-Kayteh et Al-Kayteh en 2017

En 2017, le territoire d'Al-Kayteh conserve ses principales caractéristiques, notamment en ce qui concerne les types et la répartition des territoires agricoles et des SBN. Le changement le plus notable entre 2005 et 2017 a été un développement urbain significatif.

Nous allons présenter brièvement les caractéristiques du terrain en 2017, qui n'ont pas beaucoup changé par rapport à celles de 2005. Ensuite, nous allons nous pencher dans la partie suivante sur l'évolution des occupations du sol entre 1962, 2005 et 2017. L'étude de cette évolution devrait nous aider à mieux comprendre les mutations qu'Al-Kayteh a connu ainsi que l'état de l'occupation du sol en 2017.

Tout d'abord, plusieurs noyaux urbains importants sont visibles à Al-Kayteh en 2017, avec une urbanisation significative s'étendant jusqu'à une altitude de 1350 m. La carte montre une artificialisation très marquée des sols dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh, notamment le long de l'autoroute de Tripoli-Halba et à Bebnine et à Berqayel, mais également dans la Haute Al-Kayteh, au niveau de l'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq.

En 2017, l'urbanisation demeure presque exclusivement la seule forme d'artificialisation. En effet, un peu plus de 98% des territoires artificialisés d'Al-Kayteh sont des zones urbaines. Les autres formes d'artificialisation des sols comprennent des terrains urbains vacants, des sites d'extraction de minéraux, des chantiers, ainsi qu'une zone d'activité spécifique, à savoir le site industriel du Camp de Nahr Al-Bared à Mhamra.

Il est particulièrement pertinent de souligner le cas de Mhamra, où la commune affiche la plus grande superficie de territoires artificialisés en dehors des zones urbaines. On y trouve la zone industrielle du Camp de Nahr El-Bared, couvrant 9,2 hectares, ainsi que des terrains urbains vacants occupant 17 hectares, dont la plupart étaient adjacents au Camp.

En outre, Bebnine se révèle être toujours le plus grand village d'Al-Kayteh et d'Akkar, avec 291,8 ha de territoires artificialisés. Il est suivi par Fnaydeq (241 ha), Mhamra (204,2 ha), Berqayel (196,6 ha) et Ain El-Dahab (174,4 ha), qui figure parmi les plus grandes communes d'Al-Kayteh. On note également la présence de nombreuses communes de taille moyenne, en particulier Borj El-Arab et Deir Dalloum (132,2 ha), Hrar (129,4 ha), Michmich (124,1 ha), Qabaait (117,8 ha) et Ouadi El-Jamous (116,7 ha). Il convient de noter qu'en 2017 le Camp de Nahr Al-Bared s'étend sur une superficie de 11,6 hectares.

Enfin, beaucoup de communes ont affiché des très élevés taux d'artificialisation des sols, ce qui crée de sérieux défis en matière d'aménagement des territoires des communes d'Al-Kayteh. Parmi ces communes on trouve principalement Mhamra (53%), Bebnine (43%), Borj El-Arab et Deir Dalloum (36%), Ouadi El-Jamous (34%) et Berqayel (31%). On note également que les huit premières communes ayant les taux d'artificialisation les plus élevés des sols à Al-Kayteh se trouvent dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh.

La Basse et Moyenne Al-Kayteh sont davantage marquées par l'artificialisation des sols, totalisant 1369,4 ha, soit 23% de leur superficie, tandis que la Haute Al-Kayteh affiche

1186,4 ha de territoires artificialisés, représentant 8% de sa superficie. Au total, Al-Kayteh comprend 2556 hectares de territoires artificialisés, soit 12% de sa superficie.

L'agriculture continue à jouer un rôle important dans l'économie et la vie des habitants de la région. Dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh, la plaine d'Akkar est largement utilisée pour des activités agricoles, principalement des cultures de plein champ et des cultures intensives, avec des vergers formés majoritairement d'agrumes (Fig. 61). Ainsi, en dépit de l'urbanisation croissante des communes de la plaine d'Akkar, l'agriculture occupe encore une part considérable de leur territoire : Mhamra (44%), Bebnine (52%), Qoubbet Chamra (85%), Ouardi El-Jamous (64%) et Borj El-Arab et Deir Dalloum (59%).

Dans la moyenne Al-Kayteh, les oliviers constituent le principal type de cultures (Fig. 61). Ces territoires agricoles occupent un pourcentage significatif des communes, notamment à Aayoun El-Ghezlane (80%), Mar Touma (74%), Majdala (60%), Hmayra (76%), Jdaydet El-Kayteh (73%), Berqayel (57%), Qarqaf (60%) et Bqarzla (70%).

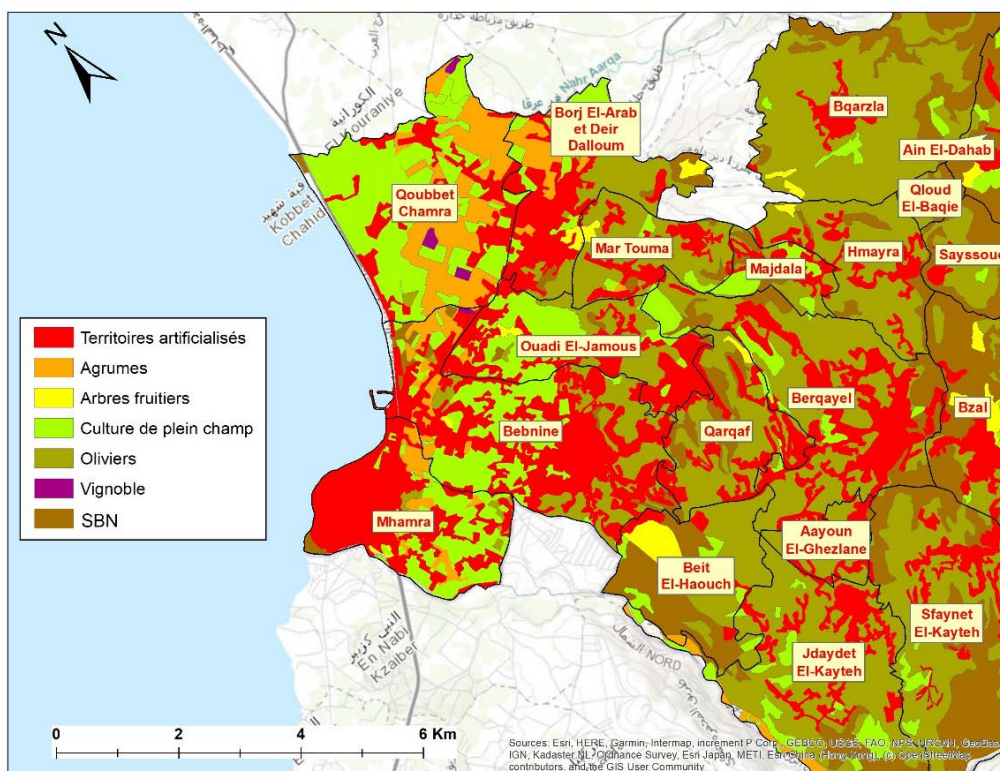


Fig. 61 – Les modes d'occupation des sols dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh en 2017

Ensuite, au niveau des communes de Haute Al-Kayteh, une mosaïque de territoires agricoles, notamment des oliviers, des cultures de plein champ et des arbres fruitiers, et des SBN, notamment des surfaces boisées, se déploient. En ce qui concerne les vergers de cette région, les oliviers reculent progressivement avec l'altitude au profit des arbres fruitiers. Par contre, les hautes montagnes d'Al-Kayteh, au-delà des zones urbanisées de Fnaydeq et Michmich, sont principalement constituées de forêts avec des arbres fruitiers et des cultures de plein champ.

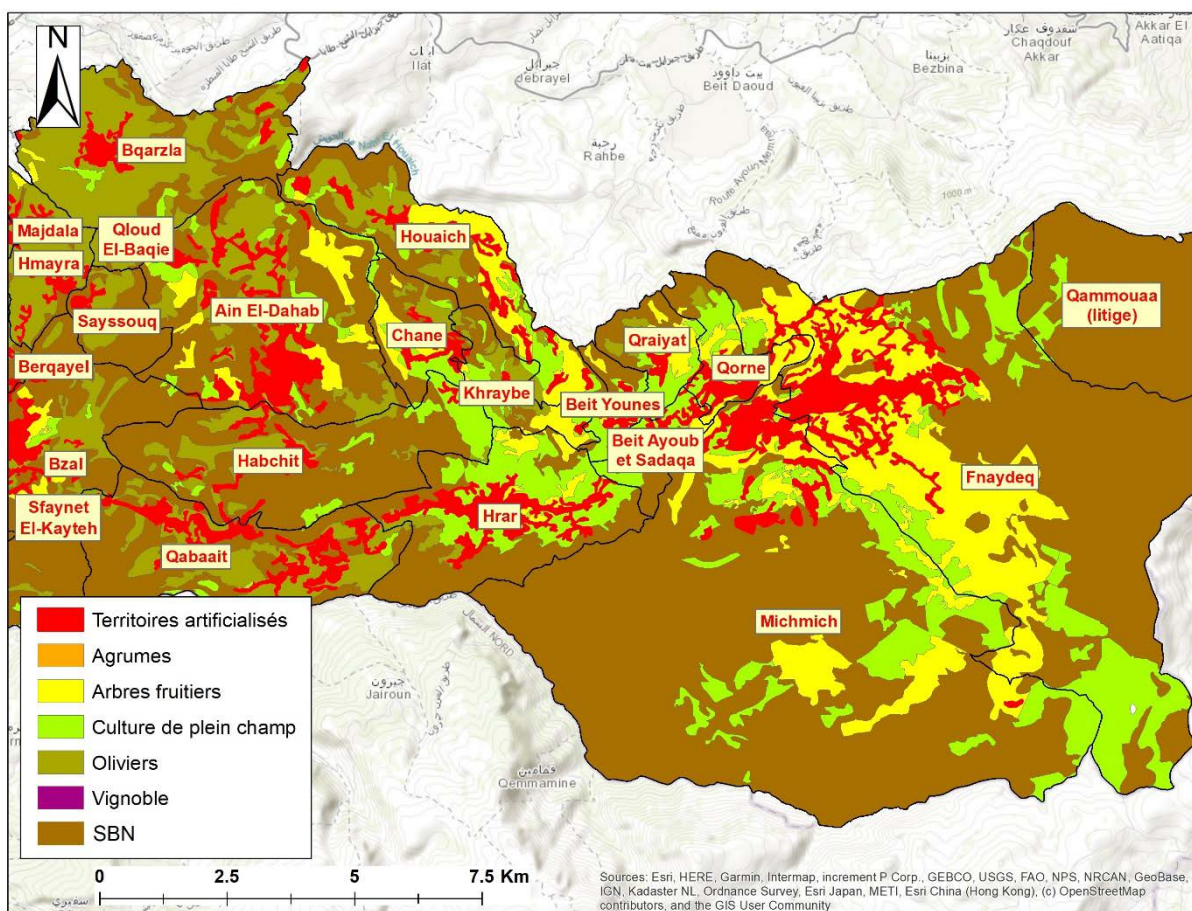


Fig. 62 - Les modes d'occupation des sols dans la Haute Al-Kayteh en 2017

En résumé, la région d'Al-Kayteh à Akkar se caractérise par une urbanisation concentrée le long des principales autoroutes, avec des noyaux urbains importants et une urbanisation s'étendant à des altitudes élevées. L'agriculture demeure une activité économique essentielle, dont les modalités de production sont influencées par l'altitude. Les activités agricoles

prédominant dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh, où les territoires agricoles représentent 64% de sa superficie, comparé à 34% dans la Haute Al-Kayteh. En revanche, les SBN sont plus développées dans la Haute Al-Kayteh, constituant 58% de sa superficie, contre 13% seulement dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh. Au total, les territoires agricoles représentaient 42% de la superficie d'Al-Kayteh en 2017, tandis que les SBN représentent 45% de sa superficie.

4.2.2. L'évolution des occupations du sol à Al-Kayteh entre 2005 et 2017 et entre 1962 et 2017

Dans cette partie, nous allons réaliser une comparaison multi-temporelle entre les surfaces des terrains occupées par chaque type d'occupation du sol entre les années 1962, 2005 et 2017. Cela nous permettra de repérer, comprendre et mesurer les évolutions des modes d'occupations du sol à Al-Kayteh entre ces années.

Le tableau (Tab. 13) et le graphique (Fig. 63) ci-dessous représentent l'évolution des territoires artificialisés à Al-Kayteh entre les années 1962 et 2005, et 2017. Les valeurs exprimées peuvent traduire une évolution à la hausse (e.g. 1,1), à la baisse (e.g. - 3,8) ou nulle (0).

Tab. 13 - Evolution en ha et en % des territoires artificialisés dans les communes d'Al-Kayeth entre les années 1962, 2005 et 2017

| Commune | 1962 /2005 | | 2005 /2017 | | 1962 /2017 | | Intercom.* |
|------------------------------|------------|-------|------------|-----|------------|-------|------------|
| | (ha) | (%) | (ha) | (%) | (ha) | (%) | |
| Aayoun El-Ghezlane | 1,1 | 29 | 14 | 296 | 15 | 409 | BMAK |
| Bebnine | 126,5 | 349 | 129,1 | 79 | 255,6 | 706 | BMAK |
| Beit El-Haouch | 4,6 | 17515 | 11,7 | 252 | 16,3 | 61883 | BMAK |
| Berqayel | 80,3 | 264 | 85,9 | 78 | 166,2 | 546 | BMAK |
| Borj El-Arab et D. D. | 64,2 | 1573 | 64 | 94 | 128,1 | 3141 | BMAK |
| Bqarzla | 15,9 | 107 | 13,2 | 43 | 29 | 196 | BMAK |
| Hmayra | 8,2 | 363 | 30,1 | 290 | 38,3 | 1707 | BMAK |
| Jdaydet El-Kayteh | 25,5 | 418 | 46 | 146 | 71,5 | 1173 | BMAK |
| Majdala | 1,4 | 19 | 16,3 | 182 | 17,8 | 236 | BMAK |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|------|
| Mar Touma | 13,2 | 167 | 27,5 | 130 | 40,7 | 514 | BMAK |
| Mhamra | 83,8 | 248 | 86,6 | 74 | 170,4 | 504 | BMAK |
| Ouadi El-Jamous | 35,4 | 355 | 71,4 | 158 | 106,8 | 1073 | BMAK |
| Qarqaf | 13,7 | 167 | 43,9 | 200 | 57,7 | 703 | BMAK |
| Qloud El-Baqie | 0,4 | 21 | 2,8 | 123 | 3,2 | 169 | BMAK |
| Qoubbet Chamra | 28,6 | 1020 | 46,2 | 147 | 74,8 | 2667 | BMAK |
| Sayssouq | 3,1 | 144 | 3,1 | 59 | 6,3 | 287 | BMAK |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | 505,9 | 294 | 691,7 | 102 | 1197,6 | 697 | |
| Ain El-Dahab | 29,7 | 131 | 122,1 | 234 | 151,8 | 672 | HAK |
| Beit Ayoub et Sadaqa | 2,6 | 161 | 12,3 | 295 | 14,8 | 932 | HAK |
| Beit Younes | 8,3 | 326 | 8,2 | 76 | 16,5 | 651 | HAK |
| Bzal | 31,3 | 361 | 38,2 | 96 | 69,5 | 801 | HAK |
| Chane | 11,6 | 519 | 24,4 | 177 | 36 | 1615 | HAK |
| Fnaydeq | 43,3 | 207 | 176,9 | 276 | 220,2 | 1054 | HAK |
| Habchit | 9,7 | 367 | 29,4 | 238 | 39,1 | 1479 | HAK |
| Houaich | 15,2 | 337 | 54,4 | 276 | 69,6 | 1542 | HAK |
| Hrar | 29,9 | 186 | 83,5 | 182 | 113,4 | 706 | HAK |
| Khraybe | 2 | 107 | 3,7 | 97 | 5,7 | 309 | HAK |
| Michmich | 34 | 211 | 74 | 148 | 108,1 | 671 | HAK |
| Qabaait | 29,9 | 512 | 82,1 | 230 | 111,9 | 1919 | HAK |
| Qammouaa (litige) | 0 | X | 0 | X | 0 | X | HAK |
| Qorne | 9,4 | 145 | 30,7 | 193 | 40,1 | 618 | HAK |
| Qraiyyat | 2,3 | 128 | 9,2 | 223 | 11,5 | 639 | HAK |
| Sfaynet El-Kayteh | 13,9 | 329 | 46,5 | 257 | 60,4 | 1432 | HAK |
| Haute Al-Kayteh | 272,9 | 231 | 795,6 | 204 | 1068,5 | 905 | |
| Al-Kayteh | 778,8 | 269 | 1487,3 | 139 | 2266,1 | 782 | |

* Intercommunalité : BMAK = Basse et Moyenne Al-Kayteh et HAK = Haute Al-Kayteh

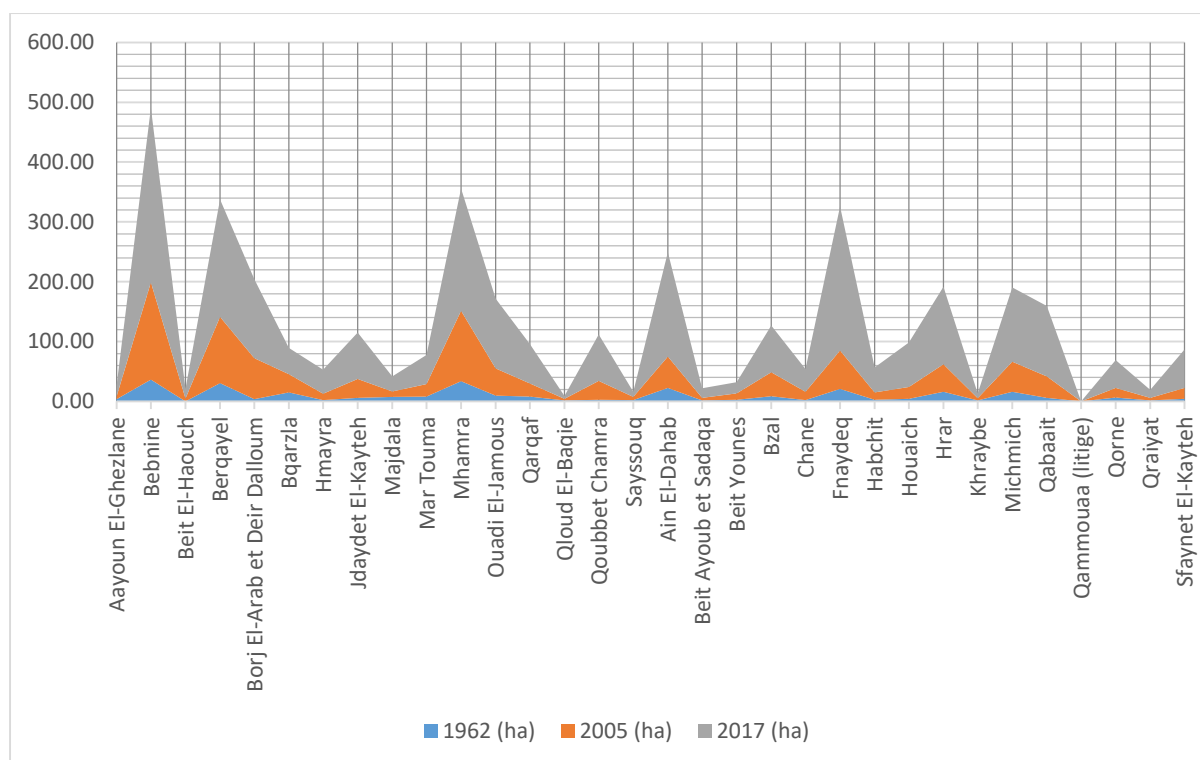


Fig. 63 - Evolution en ha des territoires artificialisés dans les communes d'Al-Kayeth entre les années 1962, 2005 et 2017

Le tableau (Tab. 14) et les graphiques (Fig. 64 et Fig. 65) ci-dessous représentent l'évolution des territoires agricoles et des SBN à Al-Kayeth en ha et en % entre 2005 et 2017 :

Tab. 14 - Evolution des territoires agricoles et des SBN en ha et en % entre 2005 et 2017

| Commune | T. Ag. (2005/2017) | | SBN (2005/2017) | | Intercom.* |
|------------------------------|--------------------|-----|-----------------|-----|------------|
| | (ha) | (%) | (ha) | (%) | |
| Aayoun El-Ghezlane | -12 | -13 | -2 | -46 | BMAK |
| Bebnine | -122,4 | -26 | -7,5 | -24 | BMAK |
| Beit El-Haouch | 23,8 | 15 | -35,4 | -21 | BMAK |
| Berqayel | -102,4 | -22 | 16,5 | 31 | BMAK |
| Borj El-Arab et D. D. | -73,9 | -26 | 10 | 125 | BMAK |
| Bqarzla | 19,9 | 4 | -33 | -14 | BMAK |
| Hmayra | -13,7 | -6 | -16,4 | -37 | BMAK |
| Jdaydet El-Kayteh | -29,7 | -6 | -17,2 | -17 | BMAK |
| Majdala | -28,1 | -30 | 11,8 | 181 | BMAK |
| Mar Touma | -32,6 | -16 | 5,2 | 118 | BMAK |
| Mhamra | -87,8 | -34 | 2,3 | 80 | BMAK |
| Ouadi El-Jamous | -56 | -20 | -15,4 | -68 | BMAK |
| Qarqaf | -31,5 | -16 | -12,5 | -21 | BMAK |
| Qloud El-Baqie | -3,8 | -10 | 1 | 11 | BMAK |
| Qoubbet Chamra | -45,8 | -8 | 2,1 | 770 | BMAK |

| | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|------|
| Sayssouq | 5,7 | 10 | -8,8 | -7 | BMAK |
| Basse et Moyenne Al-Kayteh | -590,4 | -13 | -99,3 | -11 | |
| Ain El-Dahab | 4,2 | 1 | -126,3 | -18 | HAK |
| Beit Ayoub et Sadaqa | -26,3 | -25 | 14 | 27 | HAK |
| Beit Younes | -7,8 | -11 | -0,4 | -1 | HAK |
| Bzal | 4,8 | 2 | -42,9 | -7 | HAK |
| Chane | 25,5 | 30 | -49,9 | -36 | HAK |
| Fnaydeq | -137,3 | -9 | -38,3 | -2 | HAK |
| Habchit | 21,1 | 10 | -50,5 | -8 | HAK |
| Houaich | 11 | 3 | -65,4 | -25 | HAK |
| Hrar | -65,7 | -17 | -17,5 | -5 | HAK |
| Khraybe | 18,2 | 13 | -21,9 | -31 | HAK |
| Michmich | -102,6 | -11 | 31 | 1 | HAK |
| Qabaait | -80,8 | -22 | -0,8 | 0 | HAK |
| Qammouaa (litige) | -5,6 | -10 | 5,6 | 1 | HAK |
| Qorne | -47,6 | -27 | 16,9 | 59 | HAK |
| Qraiyyat | -8,2 | -7 | -1 | -1 | HAK |
| Sfaynet El-Kayteh | -26 | -7 | -17,9 | -4 | HAK |
| Haute Al-Kayteh | -422,9 | -8 | -365,6 | -4 | |
| Al-Kayteh | -1013,3 | -10 | -464,9 | -5 | |

* Intercommunalité : BMAK = Basse et Moyenne Al-Kayteh et HAK = Haute Al-Kayteh

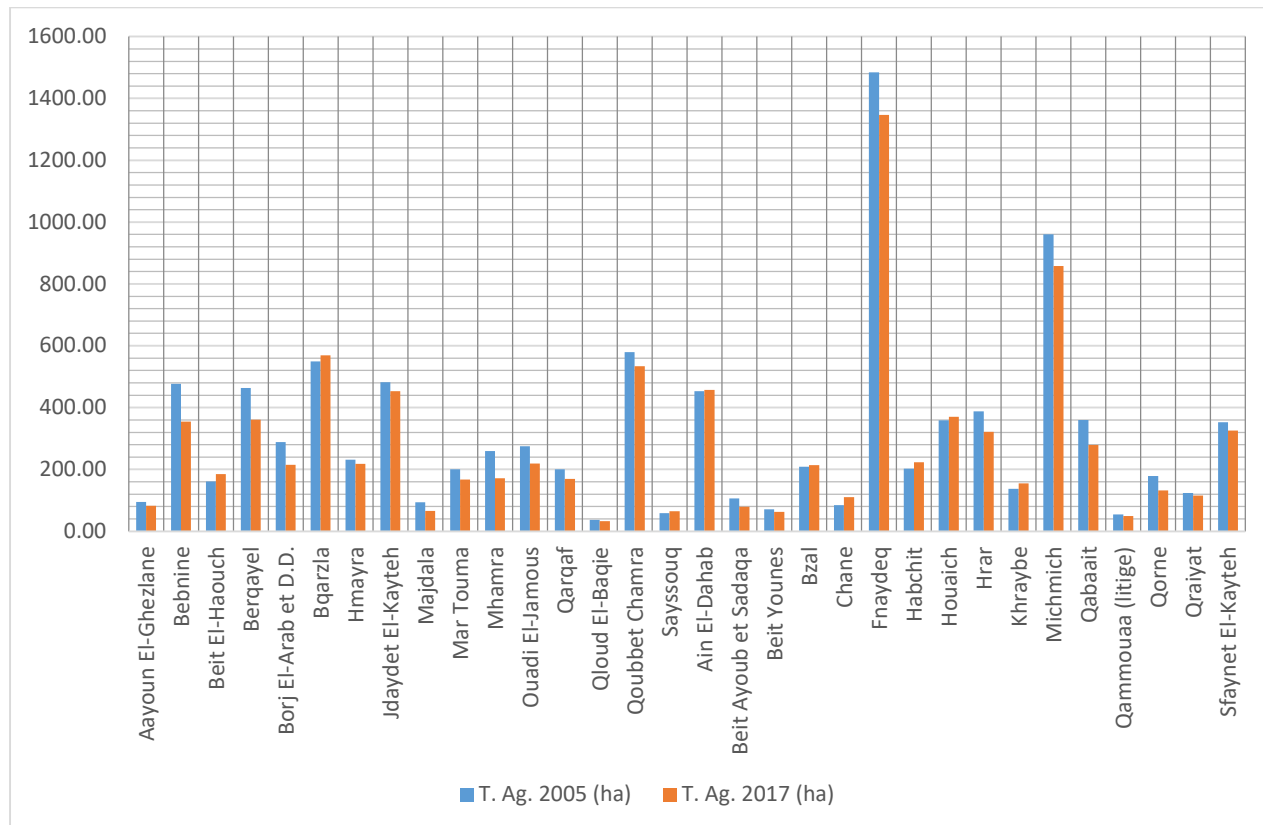


Fig. 64 - Evolution en ha des territoires agricoles dans les communes d'Al-Kayeth entre 2005 et 2017

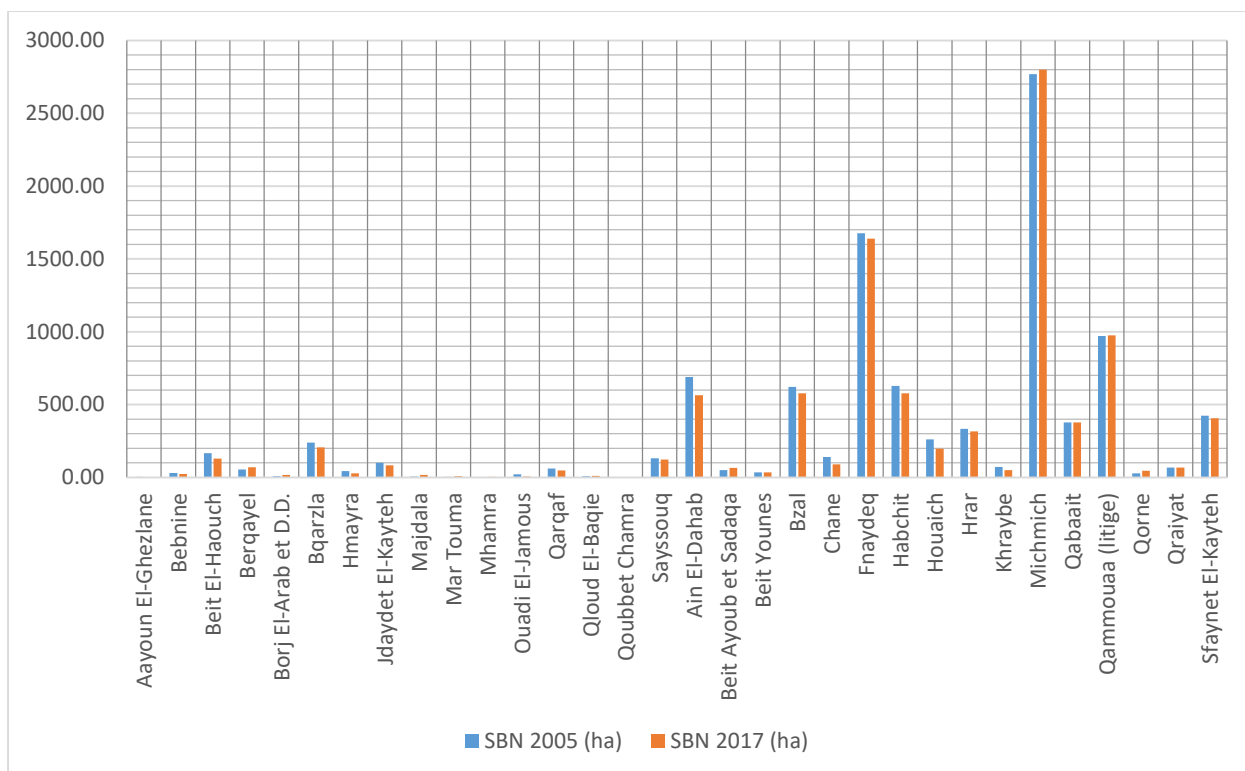


Fig. 65 - Evolution en ha des SBN dans les communes d'Al-Kayeth entre 2005 et 2017

Avant de procéder à la comparaison, il convient de souligner que les chiffres contenus dans les tableaux ci-dessus ont une valeur indicative plutôt que représentative, du fait que les variations en termes de modernité et de précision des sources de données utilisées et des méthodes employées dans la réalisation des cartes d'occupation du sol engendrent des disparités dans la définition des résultats pouvant entraîner une légère marge d'erreur entre les cartes. C'est-à-dire, il faut garder à l'esprit que les chiffres dans les tableaux donnent une idée générale plutôt qu'une image précise, car les différentes méthodes et types de photos utilisées peuvent créer des différences dans les résultats.

On observe en premier lieu que toutes les communes ont gagné des territoires artificialisés entre 2005 et 2017. En revanche, les territoires agricoles et les SBN ont généralement connu un recul.

Concernant les territoires artificialisés, il est tout à fait remarquable que ces zones aient connu un développement très important entre 2005 et 2017. La carte représentée en Fig. 66

montre que les villages d'Al-Kayteh se sont développés au-delà de leur ancien centre urbain avec la construction de nouveaux quartiers et l'apparition d'un habitat dispersé autour des centres des communes, notamment les plus grandes.

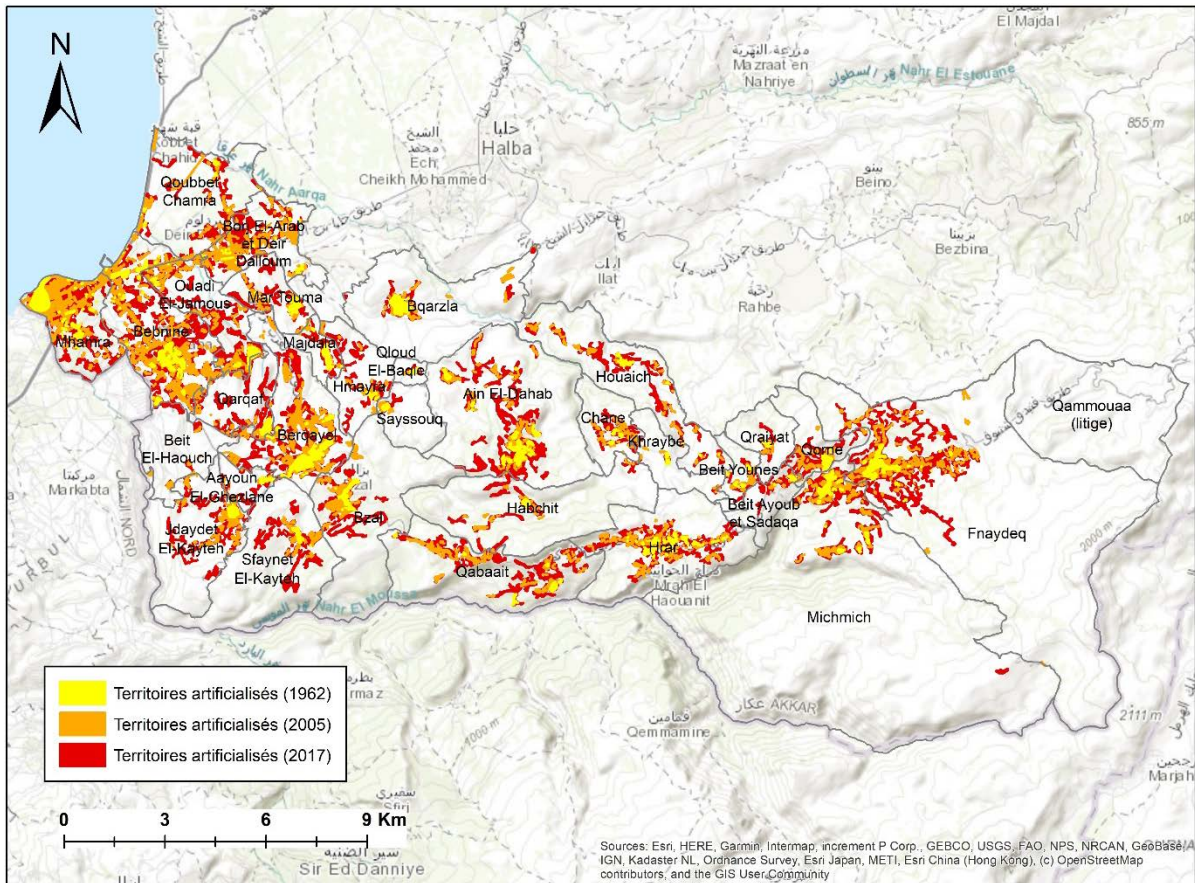


Fig. 66 - Les territoires artificialisés à Al-Kayteh entre 1962, 2005 et 2017

Ce qui est également notable entre 2005 et 2017, contrairement à la tendance observée entre 1962 et 2005, c'est que les communes affichant une extension parmi les plus importantes (Fig. 67) sont généralement de petites communes comme Aayoun El-Ghezlane (296%, soit 14 ha), Beit Ayoub (295%, soit 12,3 ha), Hmayra (290%, soit 30,1 ha), Houaich (276%, soit 54,4 ha), Fnaydeq (276%, soit 177 ha), Sfaynet El-Kayteh (257%, soit 46,5 ha).

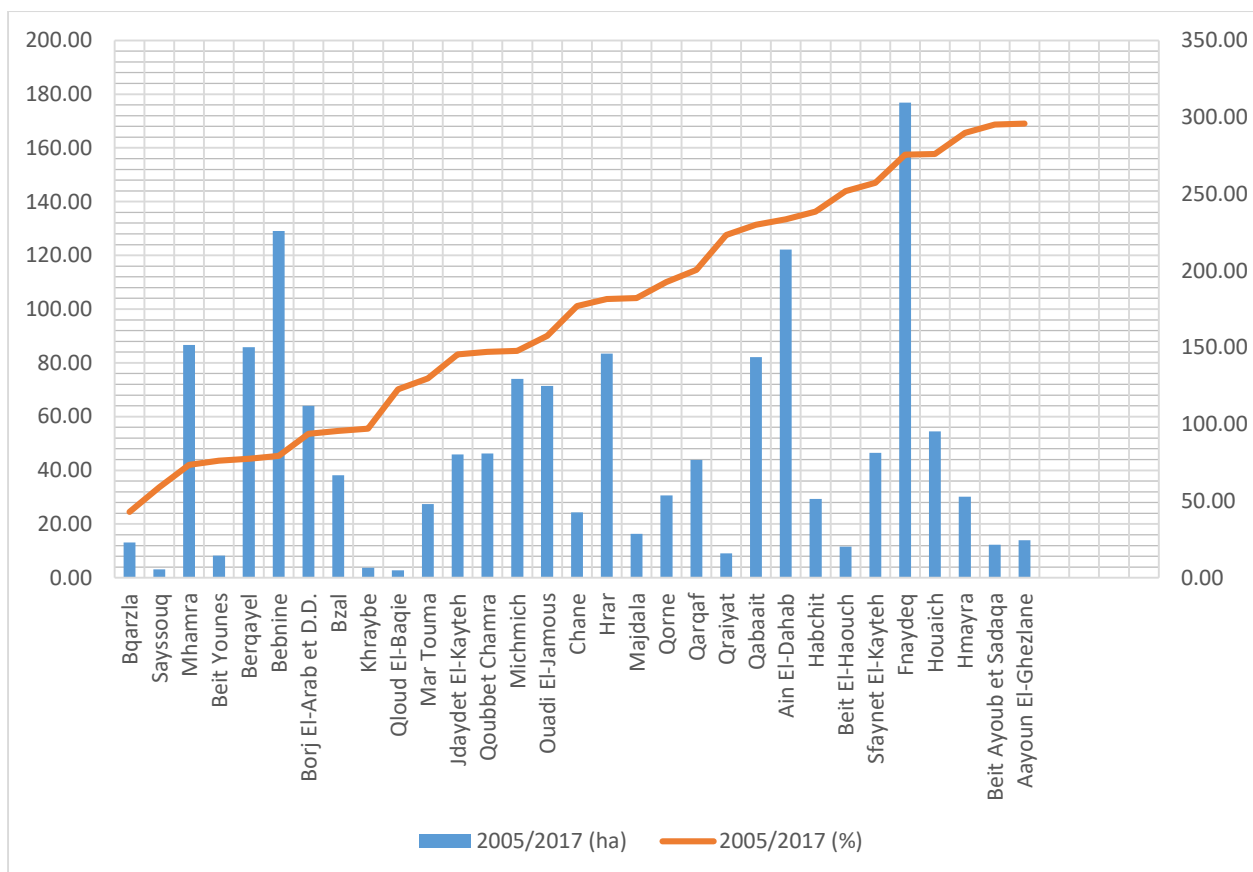


Fig. 67 - Evolution en ha et en % des territoires artificialisés dans les communes d'Al-Kayteh entre 2005 et 2017

En revanche, les centres urbains de taille moyenne et grande connaissent une extension moins marquée (Fig. 67), bien qu'elles aient tout de même connu un développement remarquable de leurs territoires artificialisés, telles Bzal (96%, soit 38,2 ha), Borj El-Arab et Deir Dalloum (94%, soit 64 ha), Bebnine (79%, soit 129,1 ha), Berqayel (78%, soit 86 ha), Mhamra (74%, soit 86,6 ha) et Bqarzla (43%, soit 13,2 ha). On remarque également que l'extension en surface des territoires artificialisés de la Haute Al-Kayteh (204%) est plus importante que celui de la Basse et Moyenne Al-Kayteh (102%).

Ces chiffres témoignent de l'attractivité croissante des petites communes profitant de leur faible taux d'artificialisation des sols, offrant ainsi plus de perspectives de développement urbain à moindre coût foncier. On note également la montée rapide de l'importance et de l'attractivité de l'agglomération de Beit Ayoub – Qorne – Michmich – Fnaydeq, bénéficiant notamment du tourisme grâce à son climat doux en été et à ses lieux naturels uniques.

En somme, les territoires artificialisés de la Basse et Moyenne Al-Kayteh sont passés de 677,7 ha en 2005 à 1369,4 ha en 2017, soit une croissance de 102%. En revanche, les territoires artificialisés de la Haute Al-Kayteh sont passés de 391 ha en 2005 à 1186,5 ha en 2017, soit une croissance de 204%. Au total, les territoires artificialisés d'Al-Kayteh sont passés de 1068,6 ha en 2005 à 2556 ha en 2017, ce qui représente une augmentation de surface de 139%.

Si l'on compare l'artificialisation des sols entre 1962 et 2017, on constate que la croissance des territoires artificialisés dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh entre 1962 et 2017 a enregistré une hausse de 697%. En revanche, ce développement dans la Haute Al-Kayteh entre 1962 et 2017 a atteint 905%. Au final, les territoires artificialisés d'Al-Kayteh ont vu leur surface augmenter de 782% entre 1962 et 2017.

En ce qui concerne les territoires agricoles, on remarque que malgré un déclin général, certaines communes ont gagné en surface. Ce qui est très intéressant, c'est que les communes ayant enregistré les gains les plus importants de territoires agricoles se trouvent dans l'espace-mosaïque situé principalement entre 600 et 900 mètres d'altitude, comme Chane (25,5 ha, +30%), Habchit (21,1 ha, +10%) et Khraybe (18,2 ha, +13%).

Même si la superficie des territoires agricoles gagnés par ces communes semble relativement modeste, il ne faut pas oublier que nous avons démontré que toutes les communes d'Al-Kayteh ont connu un développement urbain. Cependant, les cartes topographiques de 1962 et les cartes (Fig. 50) et (Fig. 58) ont montré que presque toutes les zones urbaines d'Al-Kayteh sont entourées par des territoires agricoles. Par conséquent, le développement urbain qu'Al-Kayteh a connu entre 1962, 2005 et 2017 s'est fait au détriment des territoires agricoles. Ainsi, les communes ayant gagné des surfaces agricoles entre ces années n'ont pas seulement

compensé les territoires agricoles perdus en raison de l'urbanisation au fil des années, mais elles ont également connu une expansion de leurs territoires agricoles au détriment des SBN.

De plus, on remarque que les communes qui ont le plus perdu de terrains agricoles sont les plus grandes : Mhamra (-87,8 ha, -34%), Berqayel (-102,4 ha, -22%), Michmich (-102,6 ha, -11%), Bebnine (-122,4 ha, -26%) et Fnaydeq (-137,3 ha, -9%). D'autres communes ont connu la même évolution, dans la plaine d'Akkar, ainsi que des communes de taille moyenne et les communes de l'agglomération de Fnaydeq : Qabaait (-80,8 ha, -22%), Borj El-Arab et Deir Dalloum (-74 ha, -25%), Hrar (-65,7 h, -17%), Ouadi El-Jamous (-56 ha, -20%), Qorne (-47,6 ha, -27%), Qoubbet Chamra (-45,8 ha, -8%). Toutes ces communes ont perdu des superficies considérables de surfaces agricoles.

En fin de compte, on constate que la Basse et Moyenne Al-Kayteh a perdu 590,4 ha de terres agricoles entre 2005 et 2017, ce qui représente un recul de 13%. D'autre part, la Haute Al-Kayteh a perdu 423 ha, soit un recul de 8%. En conséquence, les territoires agricoles d'Al-Kayteh ont régressé de 1013 ha, soit 10%.

En ce qui concerne les SBN, leur superficie a globalement diminué entre 2005 et 2017. On estime que les quelques communes qui ont enregistré des gains en SBN entre ces années résultent de légères erreurs dans la classification de la carte de 2005 entre les SBN et les vergers.

En revanche, la majorité des communes ont été impactées par la déforestation. Cela est souvent dû au développement des territoires agricoles, mais parfois aussi au développement urbain. Ainsi, on observe que les communes qui ont le plus perdu de SBN entre 2005 et 2017 étaient celles qui avaient gagné des territoires agricoles situés dans l'espace-mosaïque : Ain El-Dahab (-126,3 ha, soit un recul de 18%), Houaich (-65,4 ha, 25%), Habchit (-50,5 ha, 8%), Chane (-50 ha, 36%), Bzal (-43 ha, 7%).

La régression a été plus importante en termes de superficie dans la Haute Al-Kayteh, avec une perte de 365,6 ha entre 2005 et 2017, soit une régression de 4%. En comparaison, la Basse et Moyenne Al-Kayteh a perdu 99,3 ha, soit 11%. Ainsi, Al-Kayteh a connu une régression de 465 ha de SBN entre 2005 et 2017, soit 5%.

Les figures ci-dessous représentent les évolutions des occupations du sol à Al-Kayteh

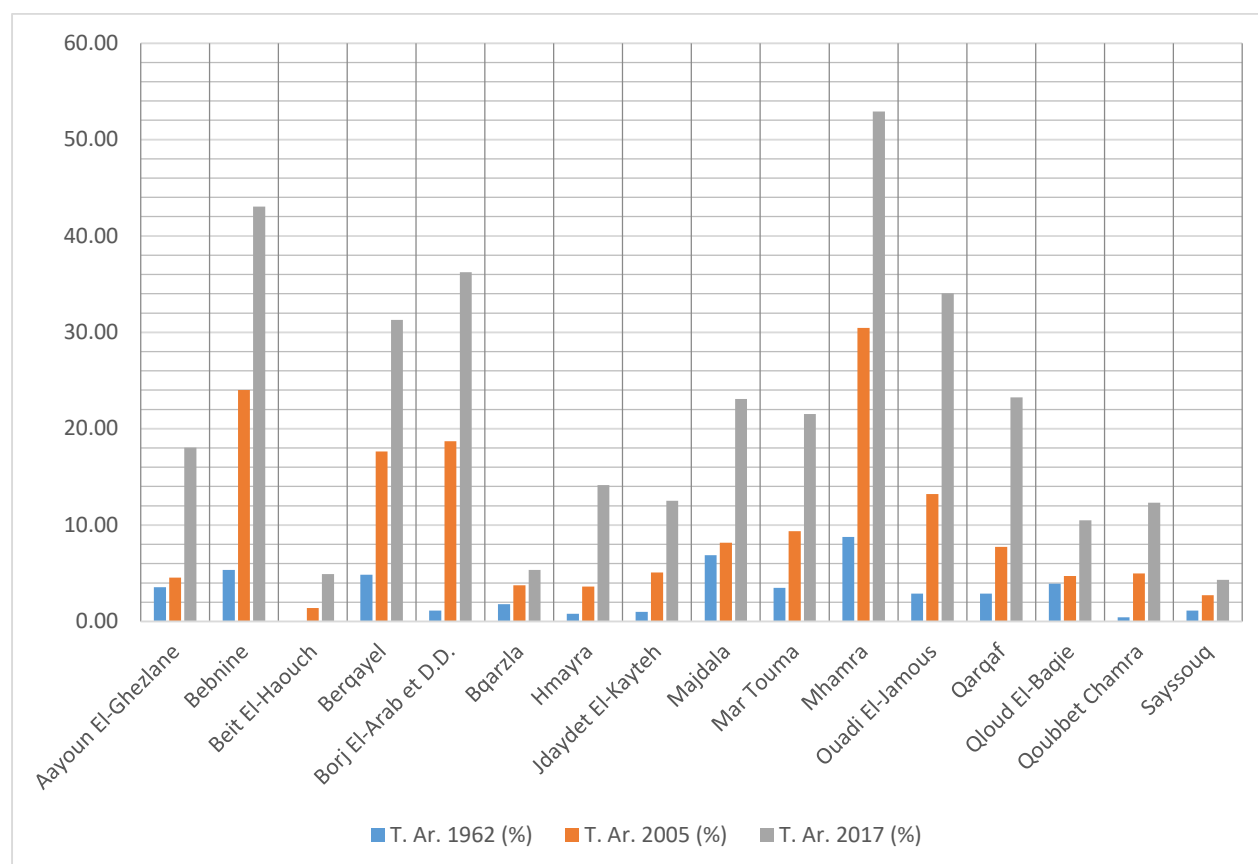


Fig. 68 - Evolution en % des territoires artificialisés dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh entre les années 1962, 2005 et 2017

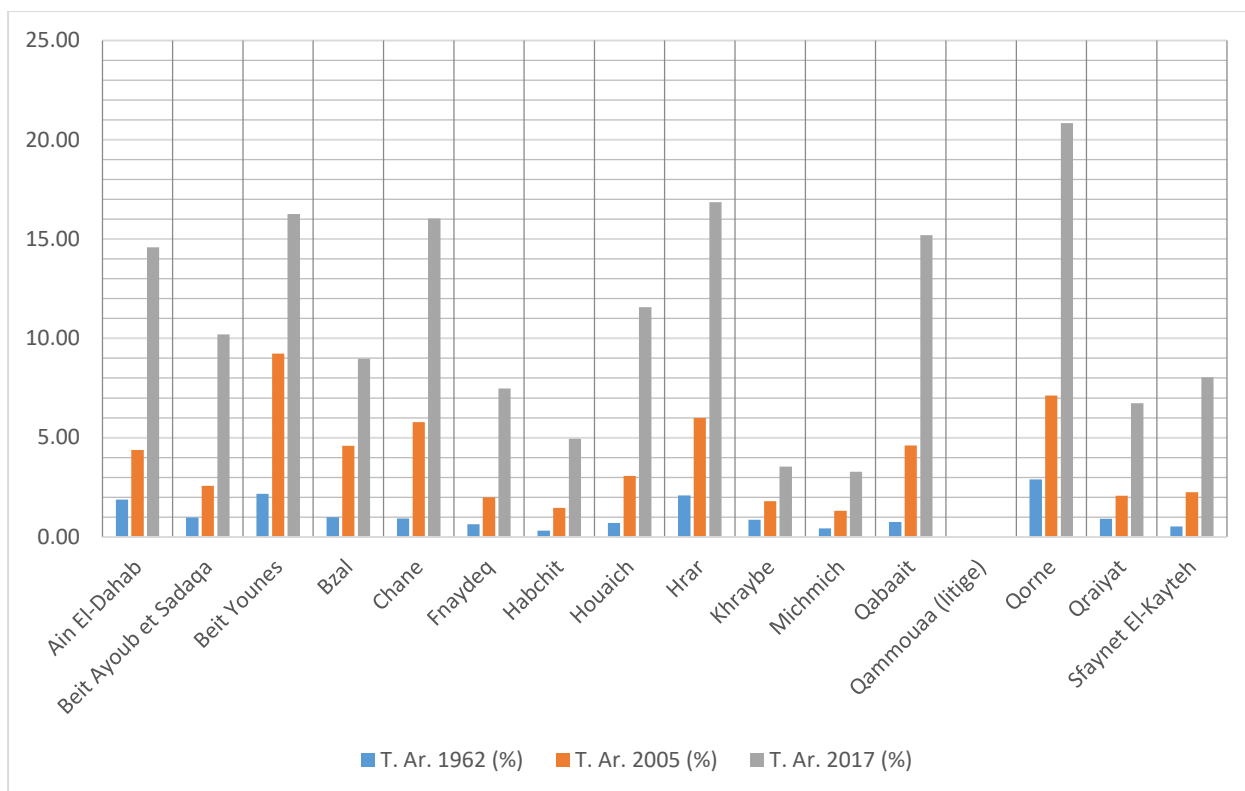


Fig. 69 - Evolution en % des territoires artificialisés dans les communes de Haute Al-Kayteh entre les années 1962, 2005 et 2017

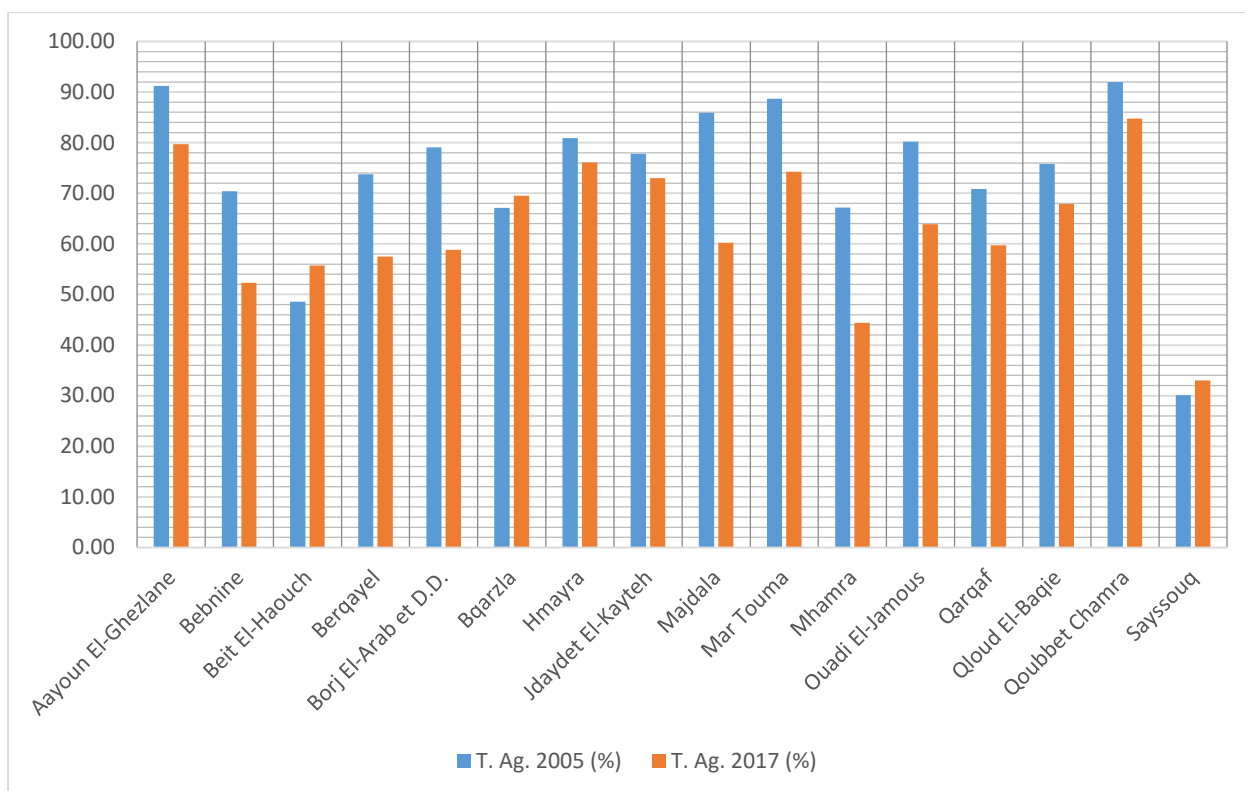


Fig. 70 - Evolution en % des territoires agricoles dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh entre 2005 et 2017

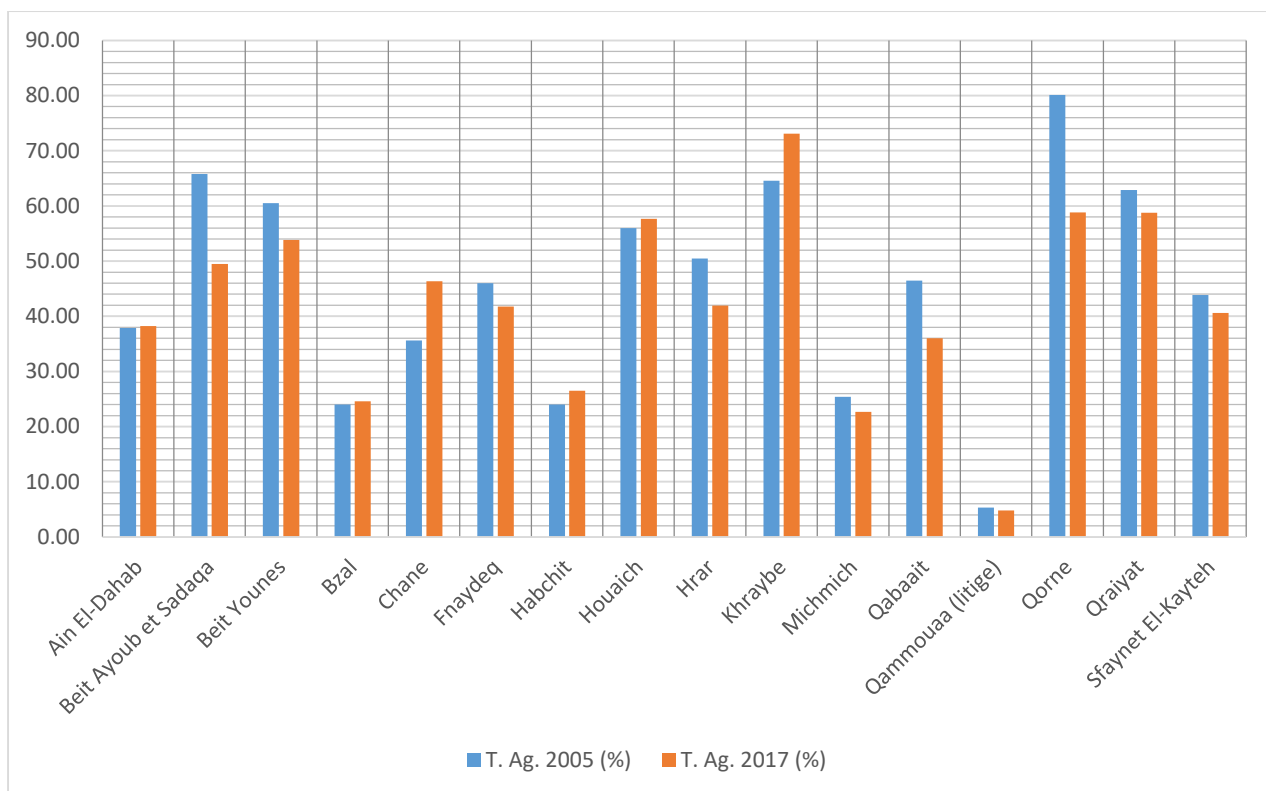


Fig. 71 - Evolution en % des territoires agricoles dans les communes de Haute Al-Kayteh entre 2005 et 2017

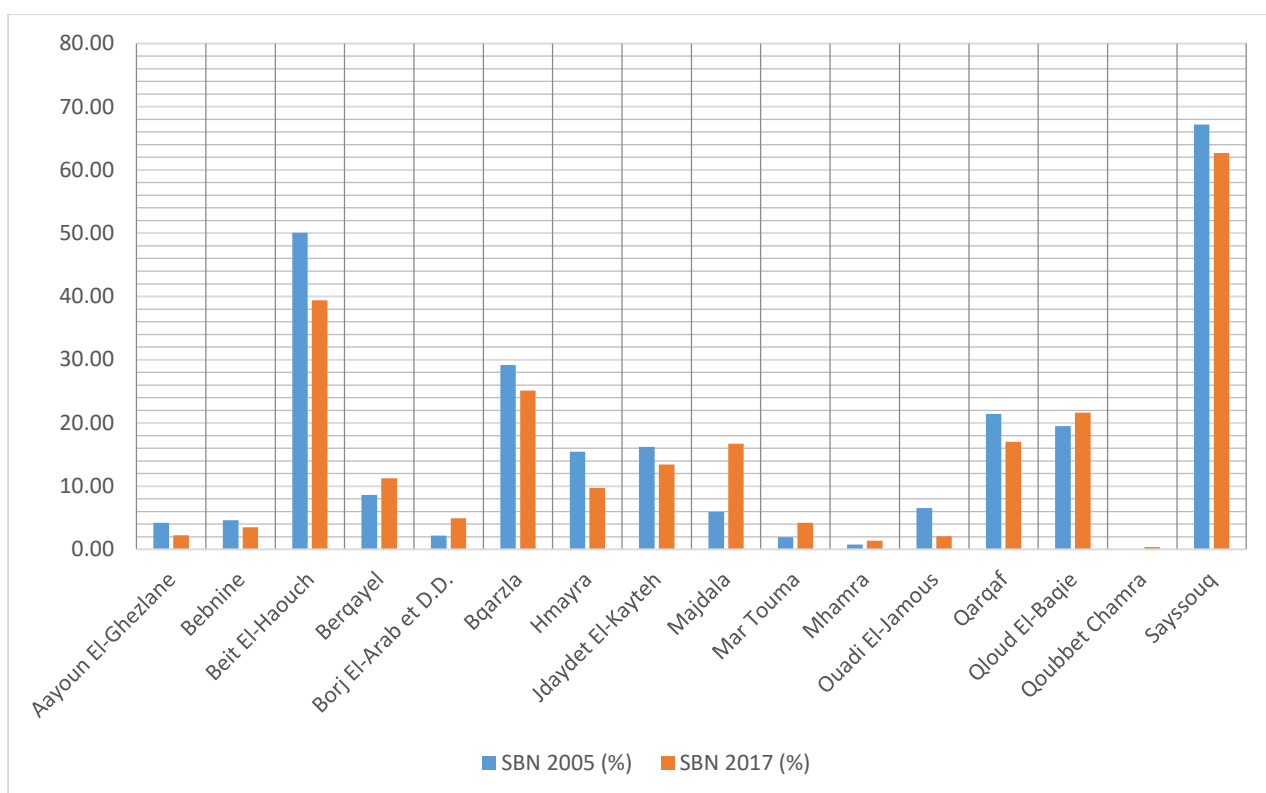


Fig. 72 - Evolution en % des SBN dans les communes de Basse et Moyenne Al-Kayteh entre 2005 et 2017

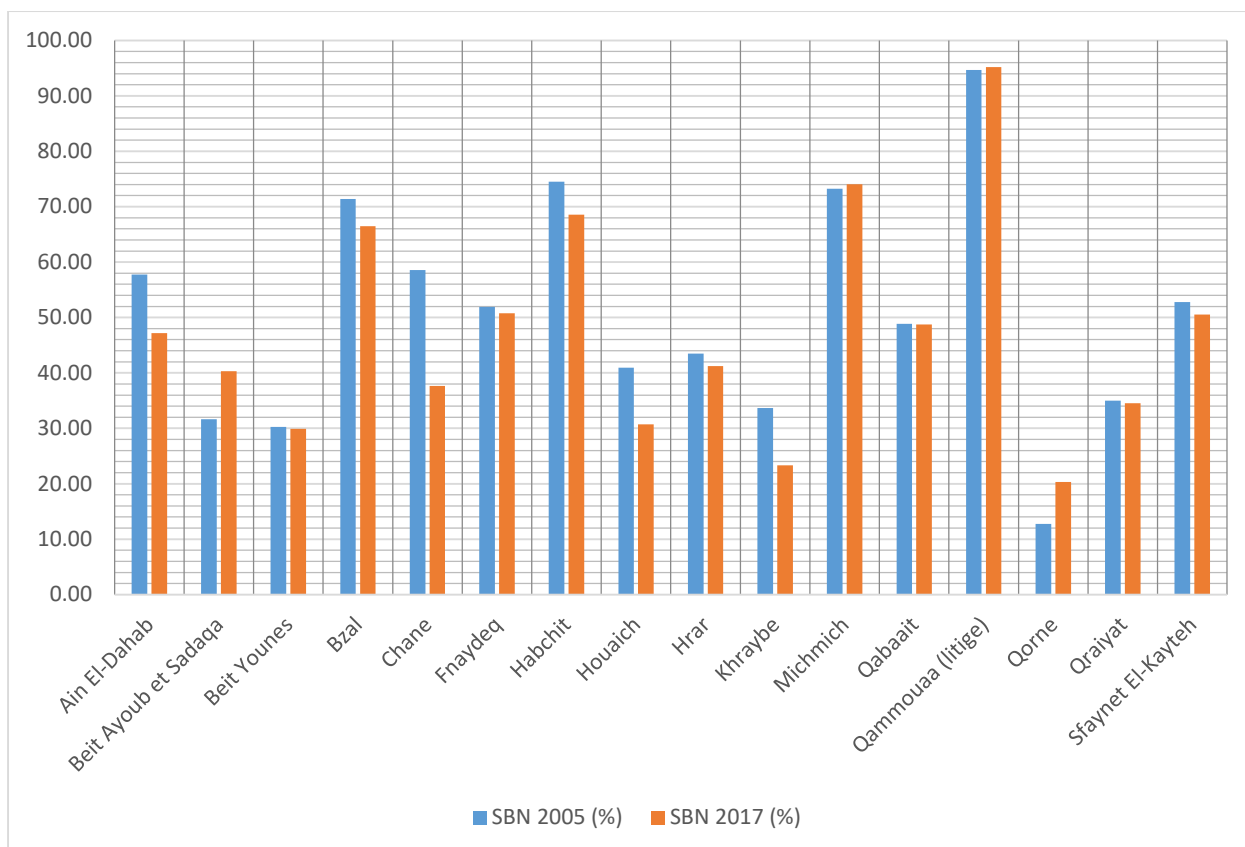


Fig. 73 - Evolution en % des SBN dans les communes de Haute Al-Kayteh entre 2005 et 2017

5. Conclusion intermédiaire

Le territoire d'Al-Kayteh se distingue par une urbanisation importante et en croissance, un rôle prédominant de l'agriculture dans la vie et l'économie locale, ainsi que de vastes SBN (Surfaces boisées et naturelles) dans la Haute Al-Kayteh, notamment dans les montagnes de la région. Les trois types d'occupation du sol coexistent dans la Haute Al-Kayteh (en 2017 : 8% Territoires artificialisés (1186 ha), 34% Territoires agricoles (5101 ha), 58% SBN (8783 ha), tandis que le territoire de la Basse et Moyenne Al-Kayteh (en 2017 : 23% Territoires artificialisés (1369 ha), 64% Territoires agricoles (3862 ha), 13% SBN (786 ha) est principalement constitué de territoires artificialisés et agricoles. Ainsi, le territoire d'Al-Kayteh est composé en 2017 (Fig. 60) de 12% de territoires artificialisés (2556 ha), 42% de territoires agricoles (8963 ha) et 45% de SBN (9570 ha).

En ce qui concerne les territoires artificialisés, l'urbanisation constitue pratiquement le seul type d'artificialisation des sols à Al-Kayteh. Les territoires les plus urbanisés et ayant connu le développement urbain le plus important sont les grandes communes comme Bebnine et Berqayel (Basse et Moyenne Al-Kayteh), Ain El-Dahab et Fnaydeq (Haute Al-Kayteh), l'agglomération de Beit Ayoub-Qorne-Michmich-Fnaydeq (Haute Al-Kayteh), ainsi que le long des autoroutes, notamment celle de Tripoli-Halba dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh.

D'autre part, l'agriculture occupe une place centrale en tant qu'activité économique principale à Al-Kayteh, avec des types d'exploitations influencés par les variations d'altitude. Dans la plaine d'Akkar (0-100m), l'agriculture se compose principalement de cultures intensives en plein champ, avec des vergers composés principalement d'agrumes. Les altitudes moyennes (100-450m) sont dominées par la culture d'oliviers. Les altitudes situées entre 600 et 1000m sont caractérisées par un « espace-mosaïque » constitué de forêts et de vergers en transition des oliviers vers des arbres fruitiers avec l'altitude, ainsi que par l'aménagement des reliefs autour des communes en exploitations agricoles en terrasses. Les altitudes de 1000 à 1300m

se caractérisent par d'importants terrains de vergers avec des arbres fruitiers adaptés à ces altitudes comme les pommiers, les poiriers, les cerisiers et les pêchers...

L'étude de l'évolution de l'occupation des sols à Al-Kayteh entre les années 1962, 2005 et 2017 a révélé un développement très significatif des territoires artificialisés, notamment urbains. Alors qu'en 1962, l'urbanisation était encore plus limitée et centrée principalement autour des noyaux urbains existants, les années suivantes ont connu une expansion rapide des zones urbanisées grâce au développement des noyaux urbains des communes et à l'étalement urbain des grandes et moyennes communes par la construction de nouvelles routes desservant de nouveaux quartiers et des habitations dispersées. Ainsi, la surface des territoires artificialisés à Al-Kayteh a enregistré une augmentation de 782% entre les années 1962 et 2017 et de 139% entre 2005 et 2017.

Pendant cette période, on constate également une diminution considérable de la superficie des zones agricoles et des SBN. En effet, le développement urbain qu'Al-Kayteh a connu entre ces années s'est souvent fait au détriment des terres agricoles et des SBN. Par exemple, entre 2005 et 2017, les territoires agricoles ont diminué de 13% (-590 ha) dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh et de 8% (-423 ha) dans la Haute Al-Kayteh, ce qui représente une diminution totale de 1013 ha, soit 10% à Al-Kayteh. Entre les mêmes années, les SBN ont diminué de 11% (-99 ha) dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh et de 4% (-365 ha) dans la Haute Al-Kayteh, totalisant une diminution de 464 ha, soit 5% à Al-Kayteh. Cependant, malgré la diminution des territoires agricoles pendant cette période, certaines communes, en particulier dans l'« espace-mosaïque » de la Haute Al-Kayteh, ont connu un développement de leurs territoires agricoles au détriment des SBN.

Ce développement urbain important et désorganisé a des conséquences néfastes à plusieurs niveaux, notamment sur la qualité des ressources en eau. Les réseaux d'égouts défectueux et

incomplets, conjugués à l'expansion anarchique des zones urbaines, pourraient entraîner une altération significative de cette qualité, mettant ainsi en danger la santé publique et les écosystèmes.

Chapitre IV : Caractérisation de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh à partir des prélèvements réalisés sur le terrain

La qualité des ressources en eau à Al-Kayteh représente la variable dépendante de la problématique de la thèse. En effet, ce sont les ressources en eau d'Al-Kayteh qui subissent les conséquences des modalités de l'occupation du sol, ce qui engendre l'altération de leur qualité. Notre objectif principal est d'identifier les impacts de l'occupation du sol sur la qualité de la ressource en eau. Pour répondre à cette question, nous avons prélevé 44 échantillons représentatifs de la ressource en eau sur le territoire d'Al-Kayteh pour caractériser leur qualité microbiologique et chimique.

1. Echantillonnage : déroulement et méthodologie

Avant de procéder aux résultats de l'analyse microbiologique et chimique, nous allons d'abord présenter le contexte et les conditions dans lesquels s'est déroulée la campagne d'échantillonnage et les détails méthodologiques tout au long de sa réalisation, ainsi que les informations spécifiques à chaque échantillon.

1.1. La réalisation de l'échantillonnage

Dans cette partie, nous allons présenter les conditions dans lesquels s'est déroulée la campagne d'échantillonnage. Ainsi, nous allons notamment préciser toutes les conditions spécifiques au déroulement de l'opération d'échantillonnage et les difficultés que nous avons rencontrées. Ensuite, nous allons préciser la méthode et les principes que nous avons fixés dans le choix des échantillons.

1.1.1. Conditions et déroulement

Nous avons effectué 44 prélèvements représentatifs des ressources en eau d'Al-Kayteh, dans une vingtaine de communes, sur une période de cinq jours allant du 14 au 24 septembre 2020,

à la fin de la saison sèche (juin/septembre). L'échantillonnage a été réalisé dans des conditions météorologiques stables et homogènes, au cours desquelles aucun changement significatif de température ou de précipitations n'a été enregistré. Parmi les 44 échantillons, 25 ont été prélevés dans la Basse et Moyenne Al-Kayteh, tandis que les 19 autres l'ont été dans la Haute Al-Kayteh. Les prélèvements dans les communes de la Basse et Moyenne Al-Kayteh ont eu lieu les 14, 15 et 16 septembre 2020, tandis que ceux effectués dans les communes de la Haute Al-Kayteh ont été réalisés les 21 et 24 septembre 2020.

Ces prélèvements ont été effectués en collaboration avec les collectivités territoriales, avec un véhicule intercommunal et un guide local nous accompagnant tout au long du travail sur le terrain. En premier lieu, nous nous sommes rendus dans les mairies des communes pour rencontrer les élus et les membres du personnel municipal. Ceci a permis de localiser les principales sources d'approvisionnement en eau de leurs territoires avant de procéder à l'échantillonnage. En général, ces visites durent toute la matinée et offrent l'occasion de rencontrer les acteurs locaux ainsi que les habitants, et de discuter avec eux des questions liées à l'eau, à la pollution, à la santé, au développement territorial, à la pauvreté, etc.

Ainsi, nous avons mené de nombreux échanges informels avec les acteurs locaux (les maires, les élus locaux, les membres du personnel municipal, des techniciens et des spécialistes), ainsi que les habitants et les propriétaires des puits analysés lorsqu'ils sont présents, tout au long de la campagne d'échantillonnage. Parallèlement, des entretiens formels ont été réalisés avec la plupart des maires des communes d'Al-Kayteh, notamment celles faisant l'objet de l'analyse de l'eau, ou d'autres acteurs locaux le cas échéant, sur les questions suivantes :

- Les ressources en eau dans la commune
- Les sources d'eau domestique dans la commune
- La gestion des eaux usées dans la commune

Ces entretiens se sont déroulés en personne ou, le cas échéant, par téléphone. Dans certains cas, nos questions et les réponses ont été relayées par un tiers, tel qu'un élu d'une commune voisine ou un ami ayant une connaissance des acteurs locaux. De plus, sur chaque site de prélèvement, nous avons enregistré les coordonnées géographiques, pris des photos et des notes, et tenté de compléter l'enquête suivante :

- Nom de la source
- Âge et profondeur (pour les puits)
- Utilisations
- Nombre de bénéficiaires
- État du réseau de distribution et mode de distribution (pour les puits et les sources à usage collectif)

Il est à noter que nous n'avons pas toujours réussi à collecter toutes ces informations. Les données collectées restent approximatives, notamment en ce qui concerne l'âge, la profondeur et le nombre de bénéficiaires, et nous ne pouvons pas garantir leur exactitude. Toutes ces informations demeurent confidentielles, conformément au Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD). En outre, toutes les informations recueillies au travers des entretiens, de l'enquête, des photographies, mais surtout des échanges avec les habitants, se sont révélées extrêmement utiles pour une compréhension approfondie de notre sujet. Elles ont enrichi notre manuscrit, notamment les chapitres II et V, en fournissant des informations qu'il aurait été difficile de recueillir autrement, et ont permis de découvrir des aspects sociaux liés à la question de la pollution de l'eau sur le terrain.

Après avoir achevé la collecte des échantillons, nous les avons acheminés au laboratoire LMSE à Tripoli en vue de réaliser des analyses microbiologiques. Le jour suivant, les

échantillons ont été transférés au laboratoire de la CCIAT (Chambre de Commerce et d'Industrie de Tripoli et Liban-Nord) en vue d'effectuer les analyses chimiques.

1.1.2. Difficultés rencontrées

Nous avons l'intention de réaliser un nombre plus conséquent de prélèvements, mais les circonstances exceptionnelles au Liban nous ont contraints à nous limiter aux échantillons déjà collectés.

En effet, et selon la dernière édition du Lebanon Economic Monitor (LEM) de la Banque Mondiale (01/06/2021), « *la crise économique et financière que connaît le Liban pourrait être classée parmi les 10, voire les 3 crises mondiales les plus sévères depuis le milieu du XIXe siècle* (La Banque Mondiale, 2021). » Par ailleurs, les mesures et les restrictions liées à la pandémie de la covid-19, en France et au Liban, ont gravement contraint le travail.

Nous avons rencontré plusieurs difficultés majeures, que nous aimerions évoquer :

- Initialement, la campagne de prélèvement était planifiée pour fin 2019. Cependant, le mouvement populaire du 17 octobre 2019 a paralysé le pays, en particulier les régions du nord. Par conséquent, il nous a été impossible de mener des travaux sur le terrain durant cette période.
- En 2020, nous avons prévu de retourner au Liban au mois d'avril pour effectuer un échantillonnage au début de la saison sèche (juin/septembre). Malheureusement, nous sommes restés bloqués en France jusqu'en juillet en raison des mesures de confinement et de la fermeture des aéroports.
- La dévaluation historique de la monnaie nationale au Liban a engendré des problèmes de financement pour l'achat du matériel nécessaire aux analyses microbiologiques. En effet, une association libanaise, que nous remercions, a finalement accepté de financer cet achat, dont le montant avait été déterminé en livres libanaises au début de l'année 2019.

Toutefois, lors de l'achat, les prix avaient augmenté de six fois en raison de la chute rapide de la valeur de la livre libanaise à partir de l'automne 2019. Il a donc été nécessaire de renégocier pour trouver une solution satisfaisante.

- Fin septembre 2020, à la suite de la deuxième vague de la Covid-19, plusieurs communes du Liban, y compris certaines d'Al-Kayteh, ont été reconfinées par un décret ministériel. Par conséquent, de nouvelles restrictions ont été imposées à ces communes, nous empêchant d'accéder à de nouveaux sites.
- Au Liban, les coupures d'électricité sont fréquentes, d'une durée allant de 10 à 14 heures par jour avant la crise. Après la crise, ces pénuries se sont intensifiées, rendant difficile le pompage de l'eau des puits et l'accès direct à la source. En effet, les habitants utilisent des moteurs électriques pour puiser l'eau et la stocker dans des réservoirs. Par conséquent, nous nous sommes souvent rendus dans des villages où nous ne pouvions pas prélever d'échantillons en raison des coupures de courant. Dans certains cas, les habitants nous ont orientés vers des maisons équipées de générateurs privés. Cependant, la plupart du temps, nous avons dû revisiter les villages plusieurs fois par jour, reporter nos visites au lendemain, voire abandonner complètement. Cette situation a fait en sorte que nous n'avons pas pu collecter d'échantillons dans toutes les communes visitées. Les problèmes d'électricité ont entraîné une perte significative de temps, d'autant plus que les échantillons devaient être transportés au laboratoire en quelques heures, conformément au protocole scientifique d'échantillonnage

Enfin, il n'a pas été possible de réaliser des prélèvements plus tardifs en raison de la fin de la saison sèche, ce qui aurait permis de traiter des échantillons dans des conditions climatiques similaires.

Malgré toutes ces difficultés, les échantillons prélevés sont représentatifs de la diversité et de la richesse du terrain étudié. Ils correspondent aux ressources en eau parmi les plus utilisées

par les habitants, que ce soit pour la consommation, les besoins domestiques, voire parfois pour l'irrigation et l'élevage des animaux.

1.1.3. Choix des échantillons

Notre objectif était d'analyser les ressources en eau les plus largement utilisées par les habitants. Les prélèvements ont couvert la majorité des municipalités d'Al-Kayteh caractérisant la diversité des paysages et des unités topographiques de la région, allant du littoral – la plaine d'Akkar – jusqu'aux montagnes d'Akkar.

Le nombre d'échantillons prélevés dans chaque village a été déterminé en fonction de sa population, de la variété de ses ressources en eau (puits et sources) et de la facilité d'accès à celles-ci. Par exemple, cinq échantillons ont été prélevés dans les plus grandes communes d'Al-Kayteh et d'Akkar Bebnine et Fnaideq, alors que trois échantillons ont été collectés dans chacune des communes de Mechmech, Berkayel et Ain Dahab, ainsi que dans la commune moyenne de Bqarzla, compte tenu de la présence de multiples sources situées dans ses limites administratives. Ces sources sont utilisées à la fois par les résidents de Bqarzla et par ceux des municipalités environnantes.

Egalement, un échantillon a été prélevé par puits dans les villages qui dépendent exclusivement de ces puits pour leurs besoins en eau. Ces puits sont généralement exploités de manière individuelle ou collective. Enfin, nous avons cherché à analyser des sources éloignées, parmi les plus utilisées, tout en respectant le protocole scientifique de prélèvement.

Malheureusement, nous n'avons pas pu effectuer de prélèvements dans toutes les communes faisant partie de nos investigations, bien que nous en ayons couvert une grande partie. Cela s'explique par plusieurs raisons qui viennent s'ajouter aux difficultés déjà évoquées :

- Certaines communes assurent leurs besoins en eau via le réseau d'eau potable de l'Etat ou des stations de distribution gérées par l'Etat.

- Comme précédemment expliqué, les coupures d'électricité ont empêché certains prélèvements dans des villages lors de nos sorties sur le terrain, comme à Mar Touma par exemple. Cependant, cela ne nous a pas empêchés de revenir ultérieurement ou le jour suivant pour effectuer les prélèvements, comme à Bebnine et Kobbet Chamra.
- Certains petits villages sont isolés et difficiles d'accès.
- Il est à noter que les échantillons correspondant à des eaux stockées ou prélevées loin de la source (ce qui ne respecte pas le protocole scientifique détaillé ultérieurement) ne sont pas inclus dans le manuscrit et ne font pas partie des 44 échantillons qui suivent tous le protocole scientifique d'échantillonnage. Ces échantillons ont été collectés et analysés suite à la demande des élus locaux que nous avons rencontrés. C'est pourquoi, par exemple, l'échantillon H MAYRA-2 est présent et non pas H MAYRA-1 (qui correspond à une source d'eau canalisée en amont et acheminée vers le village).

En revanche, nous avons réussi à collecter des échantillons dans pratiquement toutes les communes d'Al-Kayteh ayant fait l'objet de prélèvements dans les études antérieures, ce qui justifie et renforce davantage le choix de nos sites de prélèvement. Cela nous permettra également de comparer nos résultats avec ceux des études précédentes. Finalement, notre objectif était de réaliser des prélèvements représentatifs d'Al-Kayteh, et les échantillons collectés nous permettent largement d'atteindre cet objectif.

1.2. Méthodologie de l'échantillonnage

Dans cette partie, nous allons présenter les détails méthodologiques liés à l'opération d'échantillonnage. Dans un premier temps, nous allons indiquer les caractéristiques des échantillons et les caractéristiques hydrogéologiques de chaque site de prélèvement. Ensuite, nous allons présenter la méthodologie, les outils utilisés et le protocole scientifique suivi dans la prise et le transport des échantillons, de la source au laboratoire. Enfin, nous allons

présenter la méthodologie de choix des seuils des marqueurs d'analyses microbiologiques et chimiques.

1.2.1. Données sur les échantillons prélevés

L'échantillonnage s'est déroulé entre le 14/9/2020 et le 24/9/2020. Au total, 44 échantillons ont été prélevés dans des puits et des sources de la région d'Al-Kayteh à Akkar. Ainsi, tous les échantillons correspondent à des eaux souterraines. Les échantillons sont répartis sur le terrain de la façon suivante :

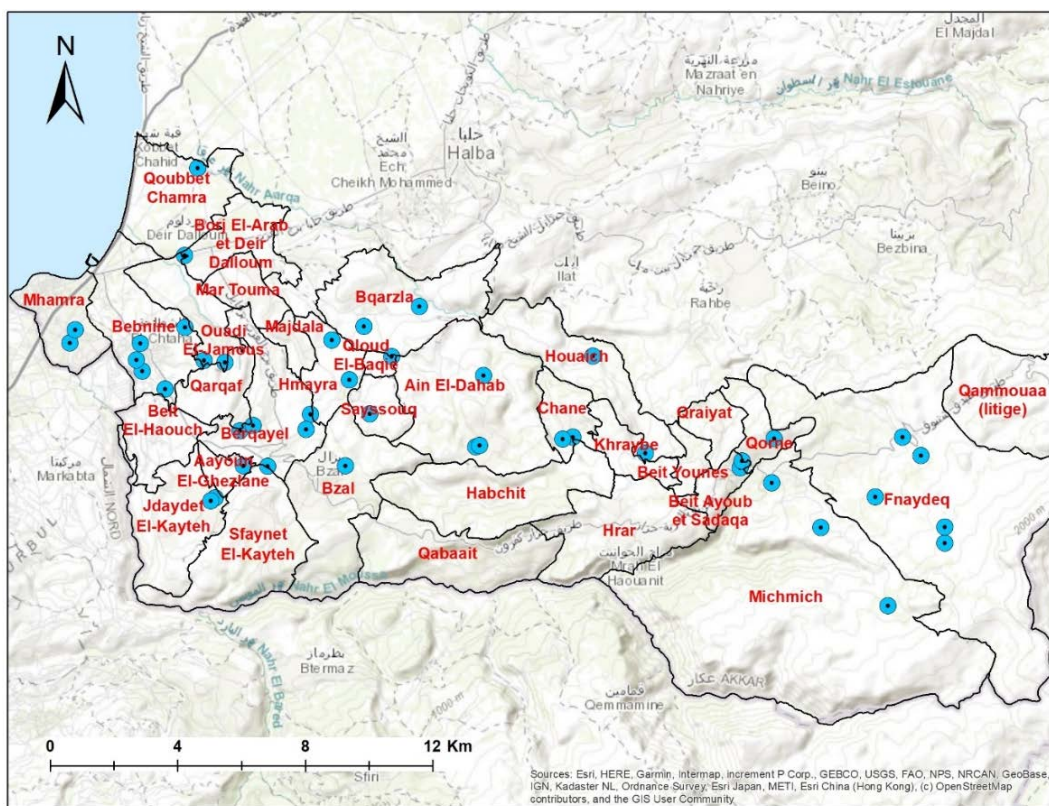


Fig. 74 - Les points d'échantillonnage de l'eau

Les principaux renseignements relatifs aux échantillons sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tab. 15 - Principales caractéristiques des prélèvements

| ID échantillon | Nature | Altitude (en mètre) | Date de prélèvement | Intercommunalité* |
|----------------|--------|---------------------|---------------------|-------------------|
| AIN DAHAB-1 | Puits | 480 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| AIN DAHAB-2 | Source | 595 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| AIN DAHAB-3 | Puits | 595 | 24 - 9 - 2020 | HAK |

| | | | | |
|-------------------------|--------|------|---------------|------|
| BEBNINE-1 | Puits | 110 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| BEBNINE-2 | Puits | 77 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| BEBNINE-3 | Source | 150 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| BEBNINE-4 | Puits | 103 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| BEBNINE-5 | Puits | 95 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| BEIT AYOUB-1 | Puits | 1000 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| BEIT AYOUB-2 | Source | 1044 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| BERKAYEL-1 | Source | 230 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| BERKAYEL-2 | Puits | 290 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| BERKAYEL-3 | Source | 310 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| BORJ ARAB-1 | Puits | 55 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| BQARZLA-1 | Source | 290 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| BQARZLA-2 | Source | 220 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| BQARZLA-3 | Puits | 232 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| BZAL-1 | Puits | 375 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| CHAN-1 | Source | 610 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| CHAN-2 | Source | 575 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| FNAIDEQ-1 | Source | 1580 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| FNAIDEQ-2 | Source | 1590 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| FNAIDEQ-3 | Source | 1350 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| FNAIDEQ-4 | Source | 1310 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| FNAIDEQ-5 | Puits | 1320 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| HMAYRA-2 | Puits | 280 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| HOUWEICH-1 | Source | 665 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| HOUWEICH-2 | Source | 475 | 24 - 9 - 2020 | HAK |
| JDAYDE-1 | Puits | 325 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| JDAYDE-2 | Source | 320 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| KARKAF-1 | Puits | 200 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| KARKAF-2 | Source | 207 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| KOBBET CHAMRA-1 | Puits | 28 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| MAJDALA-1 | Puits | 227 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| MECHMECH-1 | Puits | 1228 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| MECHMECH-2 | Source | 1505 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| MECHMECH-3 | Source | 1043 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| MHAMRA-1 | Puits | 40 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| MHAMRA-2 | Puits | 67 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | Source | 260 | 14 - 9 - 2020 | BMAK |
| QORNE-1 | Puits | 1155 | 21 - 9 - 2020 | HAK |
| SAYSOUQ-1 | Puits | 455 | 16 - 9 - 2020 | BMAK |
| WADI JAMOUS-1 | Puits | 160 | 15 - 9 -2020 | BMAK |
| WADI JAMOUS-2 | Source | 175 | 15 - 9 -2020 | BMAK |

* Intercommunalité : BMAK = Basse et Moyenne Al-Kayteh ; HAK = Haute Al-Kayteh

Ainsi, parmi les 44 échantillons des eaux souterraines prélevés à Al-Kayteh, 23 échantillons proviennent des puits (eaux captées directement au sein de la nappe) et 21 échantillons proviennent des sources (eaux captées aux émergences de la nappe).

Les caractéristiques hydrogéologiques des sites de prélèvement sont identifiées grâce à la carte hydrogéologique du Liban réalisée par le PNUD (PNUD, 1967), la carte est donnée dans l'annexe (Annexe 4). Ces informations seront utilisées dans la discussion des résultats portant sur les impacts des occupations des sols sur la qualité des ressources en eau d'Al-Kayteh (chapitre V). Les informations sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Tab. 16 - Caractéristiques hydrogéologiques des sites de prélèvement

| ID échantillon | Nappes d'eau souterraine | Lithologie | Age | Transmissivité* |
|-----------------------|--|---|--|------------------------|
| AIN DAHAB-1 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| AIN DAHAB-2 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| AIN DAHAB-3 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| BEBNINE-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BEBNINE-2 | Nappes étendues (formations poreuses) | Alluvions anciennes | Quaternaire | Médiocre |
| BEBNINE-3 | Nappes étendues (formations poreuses) | Poudingues grossiers torrentiels-Conglomérats marneux | Néogène : Miocène et Pliocène (faciès continental) | Médiocre ou changeante |
| BEBNINE-4 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BEBNINE-5 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BEIT AYOUB-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Basaltes | Crétacé inférieur, Miocène, Pliocène, Quaternaire | Très faible |
| BEIT AYOUB-2 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Basaltes | Crétacé inférieur, Miocène, Pliocène, Quaternaire | Très faible |
| BERKAYEL-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |

| | | | | |
|--------------------|--|---|--|-----------------------------------|
| BERKAYEL-2 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BERKAYEL-3 | Nappes étendues (formations poreuses) | Poudingues grossiers torrentiels-Conglomérats marneux | Néogène : Miocène et Pliocène (faciès continental) | Médiocre ou changeante |
| BORJ ARAB-1 | Nappes étendues (formations poreuses) | Limons et terra rossa | Quaternaire | Médiocre à faible très changeante |
| BQARZLA-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BQARZLA-2 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BQARZLA-3 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| BZAL-1 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations e de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| CHAN-1 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| CHAN-2 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| FNAIDEQ-1 | Nappes locales ou discontinues (formations poreuses) | Décollements cailloutis de pentes et coulées boueuses | Quaternaire | Médiocre à faible |
| FNAIDEQ-2 | Nappes locales ou discontinues (formations poreuses) | Décollements cailloutis de pentes et coulées boueuses | Quaternaire | Médiocre à faible |
| FNAIDEQ-3 | Nappes locales ou discontinues (formations poreuses) | Décollements cailloutis de pentes et coulées boueuses | Quaternaire | Médiocre à faible |
| FNAIDEQ-4 | Nappes locales ou discontinues (formations poreuses) | Décollements cailloutis de pentes et coulées boueuses | Quaternaire | Médiocre à faible |
| FNAIDEQ-5 | Nappes locales ou discontinues (formations poreuses) | Décollements cailloutis de pentes et coulées boueuses | Quaternaire | Médiocre à faible |
| HMAYRA-2 | Région généralement sans nappes ou a nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| HOUWEICH-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Alternances de terrains argilo-sableux, de bancs calcaires et de marnes | Crétacé : Aptien-Albien | Faible à très faible |
| HOUWEICH-2 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomanién-Turonien | Le plus souvent élevée |
| JDAYDE-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |

| | | | | |
|-------------------------|--|---|--|-----------------------------------|
| JDAYDE-2 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| KARKAF-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| KARKAF-2 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| KOBLET CHAMRA-1 | Nappes étendues (formations poreuses) | Limons et terra rossa | Quaternaire | Médiocre à faible très changeante |
| MAJDALA-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| MECHMECH-1 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Jurassique : Bathonien-Portlandien | Le plus souvent élevée |
| MECHMECH-2 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Jurassique : Bathonien-Portlandien | Le plus souvent élevée |
| MECHMECH-3 | Nappes locales ou discontinues (formations poreuses) | Décollements cailloutis de pentes et coulées boueuses | Quaternaire | Médiocre à faible |
| MHAMRA-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| MHAMRA-2 | Nappes étendues (formations poreuses) | Alluvions anciennes | Quaternaire | Médiocre |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Argiles, marnes sableuses et calcaires | Néogène : Pliocène, Faciès marin | Faible à très faible |
| QORNE-1 | Région généralement sans nappes ou à nappes très locales | Alternances de terrains argilo-sableux, de bancs calcaires et de marnes | Crétacé : Aptien-Albien | Faible à très faible |
| SAYSOUQ-1 | Nappes étendues et riches (formations karstiques) | Calcaires massifs et calcaires dolomitiques avec intercalations de marnes | Crétacé : Cénomaniens-Turonien | Le plus souvent élevée |
| WADI JAMOUS-1 | Nappes étendues (formations poreuses) | Poudingues grossiers torrentiels-Conglomérats marneux | Néogène : Miocène et Pliocène (faciès continental) | Médiocre ou changeante |
| WADI JAMOUS-2 | Nappes étendues (formations poreuses) | Poudingues grossiers torrentiels-Conglomérats marneux | Néogène : Miocène et Pliocène (faciès continental) | Médiocre ou changeante |

*Transmissivité en m²/sec. (PNUD, 1967) : Le plus souvent élevée = $10^{-2} \leq T \leq 1$; Médiocre = $10^{-4} \leq T \leq 10^{-3}$; Médiocre ou changeante = $< 10^{-3}$; Médiocre à faible = $10^{-5} \leq T \leq 10^{-4}$.

1.2.2. Méthode de prélèvement des échantillons

Les 44 échantillons sont prélevés aseptiquement dans des bouteilles en verre d'un litre, stérilisés par autoclavage pendant 15 minutes à 120 degrés. Pour les puits, les prélèvements

sont collectés depuis l'eau du robinet ou d'un tuyau venant directement du puits. Pour les sources d'eau, nous avons essayé de prendre l'échantillon au plus près de la source. Toutes les eaux ont été prélevées dans leur état brut à la source. Aucun échantillon ne correspond à des eaux traitées ou stockées.

Tout d'abord, pour les eaux des puits, on laisse couler l'eau directement pompée de la source souterraine pendant 1 à 2 minutes. On lave ensuite la bouteille avec l'eau en question, puis on remplit environ 90% de la bouteille (Fig. 75). On laisse un volume vide pour faciliter l'homogénéisation de l'échantillon au moment de son analyse au laboratoire. La bouteille est soigneusement bouchée après le prélèvement et étiquetée. On prend des photos et on note les conditions de la collecte, les observations et remarques. Les échantillons sont conservés au froid dans des enceintes thermostatées (réfrigérées grâce à des sacs de glace), pour réduire au minimum les changements qui peuvent survenir dans le contenu bactérien (Fig. 76). Il faut faire attention à ce que les bouteilles ne gèlent pas.



Fig. 75 - Le prélèvement des échantillons



Fig. 76 - La conservation des échantillons dans des enceintes thermostatées réfrigérées

Les échantillons sont ensuite acheminés directement au laboratoire LMSE (Laboratoire Microbiologie Santé et Environnement) pour que l'analyse microbiologique puisse être réalisée, 5 heures après le premier prélèvement. La quantité d'eau restante dans la bouteille après l'analyse microbiologique est envoyée directement au laboratoire de la CCIAT (Chambre de Commerce et d'Industrie de Tripoli et Liban-Nord) pour les analyses chimiques.

1.2.3. Le choix des seuils

Les échantillons sont analysés et comparés aux normes des eaux de boisson destinées à la consommation humaine. Les échantillons qui présentent au moins un marqueur avec une valeur microbiologique ou chimique dépassant la valeur du seuil choisi pour ce marqueur sont considérés comme contaminés. Comme le terrain d'étude est situé au Liban, les plus récentes normes libanaises vont constituer la référence de base pour le choix des seuils. Le « Projet final de norme libanaise : eau potable (161:2016) » (LIBNOR, 2016) sera ainsi le document de référence.

Généralement, chaque pays propose des recommandations spécifiques pour la qualité des eaux destinée à la consommation humaine. Même si tous les projets de normes nationales se ressemblent, on peut trouver tout de même certaines différences. Dans ce sens, l'OMS indique que : *« La nature et la forme des normes s'appliquant à l'eau de boisson peuvent varier d'un pays ou d'une région à l'autre. Il n'existe pas d'approche unique, universellement applicable. Lors du développement et de la mise en œuvre des normes, il est essentiel de prendre en compte la législation actuelle ou en préparation concernant l'eau, la santé et l'administration locale et d'évaluer la capacité du pays à établir des réglementations et à les faire appliquer. Des démarches susceptibles de fonctionner dans un pays ou une région ne sont pas nécessairement transposables à d'autres pays ou régions. Il importe que chaque pays fasse le bilan de ses besoins et de ses capacités pour la mise au point d'un cadre réglementaire (OMS, 2017). »* L'OMS ajoute : *« Si l'OMS s'abstient de promouvoir l'adoption de normes internationales pour la qualité de l'eau de boisson, c'est principalement en raison des avantages procurés par l'application d'une démarche risques/bénéfices (qualitatifs ou quantitatifs) dans la définition des normes et des réglementations nationales. En outre, le meilleur moyen de mettre en œuvre les Directives – de l'OMS – est un cadre de gestion préventive visant à assurer la sécurité sanitaire de l'eau,*

qui s'applique du captage au consommateur. Les Directives –de l'OMS– fournissent aux autorités nationales un point de départ scientifique pour la mise au point de réglementations et de normes relatives à l'eau de boisson adaptées à la situation de chaque pays (OMS, 2017). »

Nous avons ainsi opté pour les normes nationales comme référence de base. Pour les analyses chimiques, les normes libanaises seront comparées avec des normes étrangères. Plusieurs raisons nous ont poussé à faire cette comparaison :

- Contrairement aux normes microbiologiques, les normes des marqueurs chimiques ne sont pas identiques à travers le monde.
- Une homogénéité entre les normes libanaises et les normes étrangères peut « légitimer » les normes libanaises. En effet, il est rassurant de constater que les normes libanaises sont similaires aux projets de normes étrangères.
- En cas d'absence d'une valeur guide pour un marqueur dans les normes libanaises, on utilise la valeur la plus fréquemment utilisée dans les normes étrangères (c'est le cas des sulfates).
- Le document du projet de normes libanaises se limite aux valeurs guides et ne présente pas les marqueurs, leurs sources et leurs effets sur la santé humaine. Les documents étrangers permettent de combler ce vide, en apportant des informations et explications complémentaires.
- Montrer les ressemblances mais aussi les différences entre les différentes normes pour comprendre comment chaque pays établit et applique les normes en matière d'eau de boisson sur son territoire.

2. Qualité microbiologique et chimique des ressources en eau prélevées à Al-Kayteh

Dans cette partie, nous allons indiquer la méthode et les matériels utilisés pour les analyses microbiologiques et chimiques, les marqueurs analysés et les seuils de contamination, ainsi que les premiers résultats.

2.1. Analyses microbiologiques

Cette section est dédiée aux analyses microbiologiques des échantillons. Elle comprend la méthodologie de la réalisation des analyses microbiologiques, une présentation des marqueurs analysés, les seuils choisis, ainsi que les résultats des analyses.

2.1.1. Méthodologie : matériels et méthodes

Les analyses microbiologiques ont eu lieu au laboratoire LMSE (Laboratoire Microbiologie Santé et Environnement) à Tripoli. Dès réception des échantillons par le laboratoire, et pour la mise en évidence de la présence d'une contamination fécale, chaque échantillon a été analysé pour la recherche des marqueurs de contaminations fécales. Les analyses ont été réalisées par l'équipe du laboratoire. Les marqueurs recherchés sont les suivants :

- Les Coliformes Totaux (CT).
- Les Coliformes Thermotolérants (CTT).
- Les Streptocoques Fécaux (SF).

Le contenu de chaque échantillon a été mélangé puis 100 ml ont été filtrés sur membrane millipores dont la porosité est de 0,45 μm pour chaque marqueur recherché. Parallèlement,

afin d'identifier le nombre des marqueurs présents, 1 ml de chaque échantillon et 100 microlitre sontensemencés sur les différents milieux utilisés.

Le milieu de Drygalski (Bio-Rad, France) a été utilisé pour la mise en évidence des coliformes et la gélose Bile-Esculine-Azide (Bio-Rad, France) pour la mise en évidence des Streptocoques fécaux. L'incubation a eu lieu à 37°C pendant 24 heures pour la recherche des CT et des SF et à 44,5°C pendant 24 heures pour la recherche des CTT.

Les résultats sont obtenus après 24 heures d'incubation, les différents types des colonies caractéristiques sont énumérées et exprimées en UFC/100ml.

2.1.2. Marqueurs et seuils

Aujourd'hui, les agents pathogènes d'origine fécale constituent une priorité dans la fixation des normes microbiologiques des eaux de boisson. Le plus grand risque sanitaire lié à la présence de micro-organismes dans l'eau résulte de la consommation d'eau de boisson contaminée par des excréments humains ou animaux. Les fèces peuvent être une source de bactéries pathogènes, de virus, de protozoaires et d'helminthes (OMS, 2017). Les maladies infectieuses provoquées par ces bactéries représentent le risque sanitaire associé à l'eau de boisson le plus courant et le plus répandu (OMS, 2017). L'issue des maladies peut être beaucoup plus grave dans des populations vulnérables et marginalisées comme c'est le cas à Akkar.

Ainsi, les analyses microbiologiques ont été réalisées pour la recherche des bactéries pathogènes d'origine fécale. Les examens ont eu lieu dans le laboratoire de recherche LMSE de l'Université Libanaise à Tripoli, sous la supervision de Mr Monzer HAMZE, un professeur chercheur de référence sur ces thématiques, ayant contribué à la plupart des publications (Hamze, 1996 ; Halwani et Hamze, 1998 ; Hamze *et al.*, 2010) portant sur la contamination microbiologique des eaux au Liban-Nord et à Akkar en particulier. Les

marqueurs de contamination fécale choisis sont les marqueurs de base souvent utilisés dans les analyses d'eau : les coliformes totaux (CT), les coliformes thermotolérants (CTT) et les streptocoques fécaux (SF). Selon Mr Hamzé, plusieurs raisons expliquent le choix de ces marqueurs :

- La présence de ces marqueurs est abondante dans la matière fécale,
- La recherche de ces marqueurs est facile à réaliser,
- Leur présence reflète une contamination fécale, et par conséquent, la présence possible de pathogènes (bactéries et/ou virus) dans la matière contaminante,
- La méthode des analyses n'est pas coûteuse (nous avons déjà expliqué les contraintes financières pour la réalisation des analyses).

En ce qui concerne les seuils, tous les projets de normes ont les mêmes recommandations sur les marqueurs microbiologiques. Ce qui n'est pas exactement la même chose pour les marqueurs chimiques. Bref, pour que l'eau soit potable, il faut qu'aucun microorganisme des CTT ni des SF ne soit détectés dans 100 ml d'eau.

2.1.2.1. Coliformes totaux (CT)

Les coliformes totaux comprennent des organismes qui peuvent survivre et croître dans l'eau. Ce sont des bactéries présentes naturellement dans l'eau, les sols et la végétation, mais aussi dans les matières fécales humaines et animales, donc dans les eaux naturelles et dans les eaux usées (OMS, 2017 ; Santé Canada, 2020). Il n'existe pas de normes pour les coliformes totaux dans les eaux à l'état naturel, même s'il est recommandé de ne pas en trouver dans l'eau de boisson. Ils ne sont donc pas utiles comme indicateurs des organismes fécaux mais comme outil pour déterminer l'efficacité du système de traitement de l'eau et pour indiquer les changements de qualité de l'eau dans le réseau de distribution, ainsi que la présence potentielle de biofilms (OMS, 2017).

2.1.2.2. Coliformes thermotolérants (CTT)

Les coliformes thermotolérants ou les coliformes fécaux sont les bactéries coliformes qui sont capables de fermenter le lactose à 44-45 °C. Dans la plupart des eaux, le genre prédominant est *Escherichia coli*, mais certains types de *Citrobacter*, *Klebsiella* et *Enterobacter* sont également fécaux (OMS, 2017). C'est le premier marqueur de choix dans les programmes de suivi pour la vérification, y compris la surveillance, de la qualité microbiologique de l'eau de boisson. Ils ne doivent pas être détectable dans un échantillon de 100 ml.

L'*Escherichia coli* est présent en grand nombre dans les fèces humaines et animales, dans les eaux usées et les eaux ayant récemment subi une contamination fécale. On ne le retrouve pas habituellement dans les réseaux de distribution car les températures de l'eau et les concentrations de nutriments présentes dans les réseaux de distribution d'eau de boisson sont des conditions qui ne permettraient vraisemblablement pas la croissance de ces organismes (OMS, 2017).

2.1.2.3. Streptocoques fécaux (SF)

Ce sont des bactéries à Gram positif, relativement tolérantes au chlorure de sodium et à des pH alcalins. Ils représentent un excellent indicateur de pollution fécale. L'avantage important de ce groupe d'organismes est qu'ils ont tendance à survivre plus longtemps dans les environnements aqueux que les coliformes fécaux et qu'ils sont plus résistants à la dessiccation et à la chloration que *E. coli* (Lievre *et al.*, 1992 ; OMS, 2017). Ils sont composés de streptocoques du groupe D, qui comprennent des entérocoques et des non-entérocoques (Lievre *et al.*, 1992).

Ils sont généralement excrétés dans les fèces des humains et autres animaux à sang chaud (OMS,2017). Leur présence fournit la preuve d'une contamination fécale récente, ils représentent un indicateur bactériologique de pathogènes fécaux capables de survivre plus

longtemps que les coliformes thermotolérants. Cet indicateur peut compléter les programmes de surveillance des CT et des CTT afin de fournir des informations supplémentaires sur les questions de contamination fécale (Santé Canada, 2020).

2.1.3. Détermination de l'origine d'une contamination microbiologique

Pour tenter de déterminer si une contamination est d'origine humaine ou animale, Geldreich E.-E. et Kenner B.-A. (1969) ont proposé d'utiliser le rapport $R = \text{CTT}/\text{SF}$. Ils affirment que ce rapport est toujours supérieur à 4 chez l'homme (dans l'intestin humain, le rapport CTT/SF est normalement de l'ordre de 5 à 10 selon Leclerc et Mossel., (1989)). En revanche, s'il est inférieur à 0,7 on peut considérer que la contamination est d'origine animale (Lievre *et al.*, 1992), car l'homme excréte beaucoup moins de SF que les animaux. Ainsi, ce rapport « peut donc indiquer l'éventualité d'une contamination humaine lorsqu'il est supérieur à un et d'une contamination animale lorsqu'il est inférieur à un » (Halwani *et al.*, 2002).

Par contre, plusieurs essais, effectués *in situ*, ont clairement démontré que l'établissement du rapport $R = \text{CTT}/\text{SF}$ est extrêmement variable et ne permet malheureusement pas de déterminer l'origine d'une pollution (Lievre *et al.*, 1992). Donc, ce rapport reste estimatif, et ne peut pas être appliqué à de faibles contaminations qui peuvent être liées à des pollutions accidentelles ou être le résultat de minimales erreurs de compte liées à la force d'agitation des bouteilles (Hamze M., comm. pers., 11 mai 2022). Mais, on peut tout de même appliquer le rapport R qui pourra être utile dans certains cas, surtout dans notre approche, tout en tenant en considération qu'il reste variable et incertain (Hamze M., comm. pers., 11 mai 2022). On note que ce rapport a été utilisé dans l'étude Halwani *et al.* (2002) portant sur la caractérisation de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Akkar en étudiant l'intercommunalité El-Jouma, situant aux frontières nord d'Al-Kayteh.

2.1.4. Résultats des analyses microbiologiques

Le tableau ci-dessous (Tab. 17) exprime les résultats des analyses microbiologiques obtenus :

Tab. 17 - Les résultats des analyses microbiologiques

| ID de l'échantillon | CT (UFC/100ml) | CTT (UFC/100ml) | SF (UFC/100ml) | Conclusion | R (CTT/SF) |
|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------|-----------------------|
| AIN DAHAB-1 | 50 | 7 | 16 | Contamination | 0,4375 |
| AIN DAHAB-2 | 1000 | 120 | 110 | Contamination | 1,0909 |
| AIN DAHAB-3 | 12000 | 6000 | 1000 | Contamination | 6 |
| BEBNINE-1 | 12 | 1 | 20 | Contamination | 0,05 |
| BEBNINE-2 | 4 | 0 | 2 | Contamination | Faible contamination |
| BEBNINE-3 | 1 | 3 | 0 | Contamination | Dénominateur (SF) = 0 |
| BEBNINE-4 | 50 | 47 | 4 | Contamination | 11,75 |
| BEBNINE-5 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| BEIT AYOUB-1 | 10 | 3 | 1 | Contamination | Faible contamination |
| BEIT AYOUB-2 | 3000 | 2000 | 5000 | Contamination | 0,4 |
| BERKAYEL-1 | 6 | 8 | 0 | Contamination | Dénominateur (SF) = 0 |
| BERKAYEL-2 | 10 | 12 | 0 | Contamination | Dénominateur (SF) = 0 |
| BERKAYEL-3 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| BORJ ARAB-1 | 10000 | 20000 | 24 | Contamination | 833,3333 |
| BQARZLA-1 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| BQARZLA-2 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| BQARZLA-3 | 1000 | 1000 | 50 | Contamination | 20 |
| BZAL-1 | 4 | 2 | 60 | Contamination | 0,0333 |
| CHAN-1 | 13 | 13 | 21 | Contamination | 0,619 |
| CHAN-2 | 11 | 9 | 18 | Contamination | 0,5 |
| FNAIDEQ-1 | 100 | 14 | 1000 | Contamination | 0,014 |
| FNAIDEQ-2 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| FNAIDEQ-3 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |

| | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|---------------|-----------------------|
| FNAIDEQ-4 | 3 | 2 | 48 | Contamination | 0,0416666 |
| FNAIDEQ-5 | 2 | 2 | 4 | Contamination | Faible contamination |
| HMAYRA-2 | 4 | 4 | 0 | Contamination | Dénominateur (SF) = 0 |
| HOUWEICH-1 | 5 | 2 | 1 | Contamination | Faible contamination |
| HOUWEICH-2 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| JDAYDE-1 | 25 | 3 | 40 | Contamination | 0,075 |
| JDAYDE-2 | 110 | 90 | 76 | Contamination | 1,1842 |
| KARKAF-1 | 0 | 2 | 4 | Contamination | Faible contamination |
| KARKAF-2 | 200000 | 600000 | 100000 | Contamination | 6 |
| KOBKET CHAMRA-1 | 60 | 45 | 60 | Contamination | 0,75 |
| MAJDALA-1 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| MECHMECH-1 | 0 | 0 | 24 | Contamination | 0 |
| MECHMECH-2 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| MECHMECH-3 | 50 | 15 | 18 | Contamination | 0,8333 |
| MHAMRA-1 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| MHAMRA-2 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | 6 | 3 | 11 | Contamination | Faible contamination |
| QORNE-1 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| SAYSOUQ-1 | 0 | 0 | 0 | Absence | Dénominateur (SF) = 0 |
| WADI JAMOUS-1 | 2 | 2 | 25 | Contamination | 0,08 |
| WADI JAMOUS-2 | 100000 | 20000 | 100000 | Contamination | 0,2 |

D'après ce tableau, on constate que :

- 13 échantillons sont conformes du point de vue microbiologique (absence de contamination fécale), ce qui représente 29,5% des échantillons.
- 31 échantillons sont contaminés du point de vue microbiologique, ce qui représente 70,5% des échantillons.

Pour les contaminations par marqueur, on note que :

- 29 échantillons sont contaminés en CT, ce qui représente 66% des échantillons.
- 29 échantillons sont contaminés en CTT, ce qui représente 66% des échantillons.
- 27 échantillons sont contaminés en SF, ce qui représente 61,4% des échantillons.

La carte ci-dessous (Fig. 77) représente les résultats des CTT et des SF :

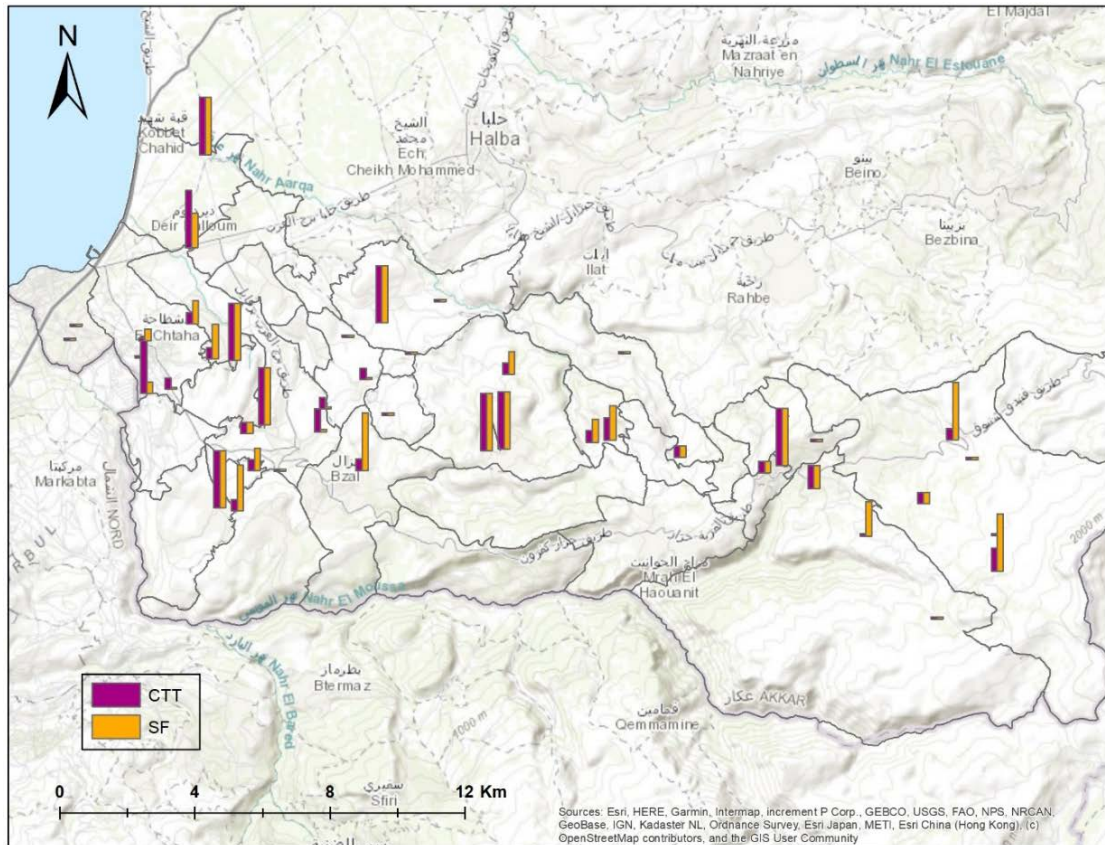


Fig. 77 - Carte de contamination microbiologique des échantillons

Il convient de noter que tous les échantillons ne sont pas contaminés avec la même ampleur. Certains échantillons sont faiblement voire très faiblement contaminés et d'autres sont massivement contaminés, ce qui reflète la gravité du problème de gestion et d'élimination des eaux usées sur ces sites. Cette différence dans l'ampleur de la contamination constitue un élément important de discussion dans la comparaison que nous allons mener ainsi que dans l'étude des impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique des ressources en eau.

2.2. Analyses chimiques

Cette section développe la méthodologie de réalisation des analyses chimiques, une présentation des marqueurs analysés, les seuils choisis, ainsi que les résultats des analyses.

2.2.1. Méthodologie : matériels et méthode

Les analyses chimiques ont eu lieu dans les laboratoires de la CCIAT (Chambre de Commerce et d'Industrie de Tripoli et Liban-Nord) en utilisant la machine Dionex ICS-6000.

Les analyses ont été réalisées par les équipes des laboratoires, sous la supervision de Monsieur Khaled EL OMARI, le directeur des laboratoires de la CCIAT.

Les ions analysés sont le fluorure, le chlorure, le nitrite, le nitrate, le sulfate, le phosphate, le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium. Ces marqueurs sont les plus communs dans les analyses chimiques des eaux et on les retrouve dans la majorité des publications scientifiques portant sur la qualité chimique des eaux. Ils sont parmi les ions les plus importants à analyser dans les programmes de suivi et pour la vérification de la qualité chimique de l'eau de boisson. Cependant, le nitrate reste le plus important marqueur de contamination d'origine chimique, notamment par les engrais. Par contre, il a été jugé inutile de faire des analyses plus avancées, comme la recherche des métaux lourds, en raison de l'absence d'installations industrielles significatives sur place (Halwani *et al.*, 1999b ; Ouddane B., comm. pers., 25 mars 2022). Par ailleurs, l'étude de Moustafa *et al.* (2019) n'a pas trouvé de contamination par les métaux lourds dans l'échantillon prélevé à Al-Kayteh (à Qoubbet Chamra).

La calibration de la machine donne les limites de quantification des ions suivantes : 0,2 mg/l pour le fluorure, 1 mg/l pour le chlorure, 1 mg/l pour le nitrate, 1 mg/l pour le nitrite, 1 mg/l pour le sulfate, 2 mg/l pour le phosphate, 0,4 mg/l pour le sodium, 1 mg/l pour le potassium, 1 mg/l pour le calcium et 0,5 mg/l pour le magnésium.

2.2.2. Marqueurs et seuils

Comme pour l'analyse microbiologique, les seuils des marqueurs seront déterminés selon les directives nationales à travers le document libanais de référence (LIBNOR, 2016). Toutefois, pour les raisons déjà évoquées, les normes libanaises seront comparées aux normes étrangères, à savoir celles issues de la directive de l'OMS (2017), celles de l'Union Européenne « UE » (2020), celles du Canada (2020) et celles des Etats-Unis (2018).

Cependant, nous n'avons pas trouvé dans ces documents de seuils pour le phosphate, le potassium, le calcium et le magnésium. Nous avons donc emprunté pour les caractériser les seuils des anciennes normes libanaises identifiées dans les publications précédentes (en particulier Halwani et Hamze, 1998 ; Halwani *et al.*, 1999a ; Halwani *et al.*, 1999b ; Halwani *et al.*, 2001). Mr Baghdad OUDDANE, enseignant-chercheur à l'Université de Lille, qui a participé à plusieurs études portant sur la qualité de l'eau à Akkar (Halwani *et al.*, 1999a ; Halwani *et al.*, 1999b ; Halwani *et al.*, 2001 ; El-Osmani *et al.*, 2014 ; Chbib *et al.*, 2018), nous a indiqué qu'on peut toujours utiliser ces seuils pour le Liban en cas d'absence de seuils dans les nouveaux projets de normes (Ouddane B., comm. pers., 25 mars 2022). Elles sont indiqués dans le tableau ci-dessous (Tab. 18), dans la colonne « Biblio ».

Ainsi, le tableau ci-dessous (Tab. 18) présente pour chaque ion le seuil retenu dans les projets de normes étrangères et du Liban, ainsi que le seuil que nous avons choisi (en gras) :

Tab. 18 - Tableau des seuils de contamination chimique

| | Liban (LIBNOR) | OMS | EU | Etats-Unis (EPA) | Canada (Santé Canada) | Biblio | Seuil choisi |
|-----------------|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Edition | 2016 | 2017 | 2020 | 2018 | 2020 | 1998, 1999 et 2001 | |
| Unité | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| Fluorure | 1,5 (8-18°C) 0.7 (25-30°C) | 1,5 | 1,5 | 2 (recommandé) / 4 (norme) | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Chlorure | 250 | - | 250 | 250 (effets cosmétiques ou | 250 (objectif esthétique)* | 200 | 250 |

| | | | | esthétiques) | | | |
|------------------|------------|----|------------|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|
| Nitrate | 45 | 50 | 50 | 10 | 45 | 50 | 45 |
| Sulfate | - | - | 250 | 250 (recommandé) | 500 (objectif esthétique)* | 250 | 250 |
| Phosphate | - | - | - | - | - | 6,7 | 6,7 |
| Sodium | 200 | - | 200 | - | 200 (objectif esthétique)* | 150 | 200 |
| Potassium | - | - | - | - | - | 12 | 12 |
| Calcium | - | - | - | - | - | 500 | 500 |
| Magnésium | - | - | - | - | - | 50 | 50 |

* objectif esthétique : « *La qualité esthétique est un critère important à prendre en compte pour assurer le plein usage et la jouissance des eaux à vocation récréative et des plages. [...] Des paramètres qui risquent d'influer sur la qualité esthétique des zones de loisirs aquatiques. Certains paramètres peuvent aussi avoir une incidence sur la santé et la sécurité des êtres humains (Santé Canada, 2022).* »

2.2.2.1. Fluorure (F⁻)

Le fluorure est l'un des produits chimiques pour lesquels la contribution provenant de l'eau de boisson est un facteur important de prévention de maladies (OMS, 2017). D'importantes ingestions de fluorures peuvent avoir des effets graves sur les tissus squelettiques (OMS, 2017) ainsi que causer des maladies osseuses (EPA, 2018). Pour les enfants ils peuvent provoquer des dents marbrées (EPA, 2018).

Dans le projet des normes libanaises, il faut que le fluorure soit analysé régulièrement tous les six mois (LIBNOR, 2016). Les sources de contamination de l'eau potable en fluorure sont les additifs à l'eau qui favorisent des dents fortes, les déversements des usines d'engrais et d'aluminium (EPA, 2018), l'érosion des roches et des sols (Santé Canada, 2020).

2.2.2.2. Chlorure (Cl⁻)

Le chlorure n'est pas préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson (OMS, 2017). Cependant, des concentrations en chlorure supérieures à 250 mg/l dans

l'eau de boisson lui donne un goût détectable. Ainsi l'OMS, Santé Canada et LIBNOR ont proposé 250 mg/l comme seuil de contamination pour le chlorure (OMS, 2017 ; Santé Canada, 2020 ; LIBNOR, 2016). En outre, selon LIBNOR, le chlorure doit être analysé dans l'eau potable tous les six mois (LIBNOR, 2016).

La concentration de l'eau en chlorure peut être plus ou moins élevée en fonction de la géologie des sols et de leur exposition aux pollutions. En général, le chlorure présent dans l'eau provient des sources naturelles, des eaux d'égouts, d'effluents industriels, de l'infiltration des eaux marines dans les nappes, de rejets urbains contenant du sel de déneigement (dissolution des dépôts de sel, sels sur les routes), de l'exploitation des puits de pétrole, de l'écoulement des eaux d'irrigation, des eaux de lixiviation des déchets et d'intrusions d'eau saline (OMS, 2017 ; Nouayti *et al.*, 2015 ; Santé Canada, 2020).

2.2.2.3. Nitrate (NO₃⁻) et Nitrite (NO₂⁻)

Le plus grand risque chimique pour la santé publique dans certaines eaux naturelles est un excès naturel de nitrates/nitrites (OMS, 2017). En effet, le nitrate et le nitrite font partie des produits chimiques clés responsables d'effets sanitaires à grande échelle liés à une exposition via l'eau de boisson. Leurs effets sur la santé sont clairement définis et attribuables dans une large mesure à l'eau, surtout quand ils sont présents en quantités excessives (OMS, 2017).

La concentration des nitrates peut être utilisée comme indicateur pour retracer le lien entre les changements d'utilisation des terres et la qualité des eaux souterraines en raison de sa solubilité et de son transport facile vers les eaux souterraines (Narany *et al.*, 2017). Ainsi, la concentration des nitrates dans les eaux est parmi les plus importants marqueurs de détermination de pollution d'eau d'origine anthropique et agricole. Le nitrate et le nitrite représentent les marqueurs chimiques les plus importants de notre étude.

Les sources des nitrates et des nitrites sont les activités agricoles (notamment, l'application excessive de fertilisants azotés inorganiques et de fumier), le lessivage ou le ruissellement provenant de l'utilisation d'engrais, lessivage des fosses septiques, eaux usées, érosion des dépôts naturels et d'origine naturelle (EPA, 2018 ; Santé Canada, 2020 ; OMS, 2017). En général, la source la plus importante de l'exposition humaine aux nitrates et aux nitrites provient des engrais pour les légumes (OMS, 2017).

A noter que tous nos échantillons avaient des concentrations en nitrites inférieures à la limite de quantification (1 mg/l). C'est pour cette raison qu'ils ne figurent pas dans le tableau des seuils. Les seuils des nitrites sont souvent supérieurs ou égaux à 1 mg/l.

2.2.2.4. Sulfate (SO_4^{2-})

La présence des sulfates dans l'eau de boisson peut lui conférer un goût perceptible et, à des niveaux très élevés, ils peuvent avoir un effet laxatif chez des consommateurs non habitués. L'altération du goût varie avec la nature du cation associé, on considère généralement que l'altération du goût est minimale à des niveaux inférieurs à 250 mg/l (OMS, 2017).

L'OMS n'a pas accordé une valeur guide pour le sulfate parce qu'elle estime qu'il n'est pas préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson (OMS, 2017). Par contre, Santé Canada estime que les concentrations supérieures à 500 mg/l peuvent causer des effets physiologiques comme la diarrhée et la déshydratation (Santé Canada, 2020). La présence de sulfates dans l'eau de boisson peut être d'origine naturelle, à cause de l'application d'engrais sulfatés ou liée à la présence de déchets industriels (Nouayti *et al.*, 2015 ; Santé Canada, 2020).

2.2.2.5. Phosphate (PO_4^{3-})

Les concentrations en phosphate rencontrées dans l'eau distribuée au robinet ne présentent globalement pas de risque pour la santé humaine (Carpenter *et al.*, 1998). Mais, à des niveaux

très élevés, le phosphate est toxique et peut causer des problèmes digestifs chez l'homme (Brindha et Schneider, 2019). En absence d'intervention humaine, les eaux de surfaces contiennent très peu de phosphates. En effet, lors de l'infiltration de l'eau dans les sols, une fraction des phosphates initialement dissous dans l'eau sera retenue par les particules de sol. Une partie est généralement entraînée et contamine les eaux superficielles et les nappes phréatiques (Banas et Lata, 2006).

Les sources des phosphates sont les engrais, les rejets urbains, les rejets industriels (chimie de synthèse, photographie, lithographie...), les rejets d'eaux domestiques, les fosses septiques (urine, fèces excrétées, lessive...), les engrais chimiques, l'élevage et son utilisation comme anticalcaire et inhibiteur de corrosion dans les canalisations de distribution d'eau (Banas et Lata, 2006 ; Brindha et Schneider, 2019).

2.2.2.6. Sodium (Na^+)

Le sodium est considéré comme un produit chimique non préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson, car la contribution de l'eau de boisson à l'ingestion journalière de sodium est faible (OMS, 2017). Mais, il peut quand même sous certaines conditions avoir un goût détectable. En effet, le seuil de concentration du sodium dans l'eau qui est détectable par le goût dépend de l'anion associé et de la température de la solution. À température ambiante, le seuil moyen de détection pour le sodium est d'environ 200 mg/l (OMS, 2017).

Au Liban, il est recommandé d'analyser la concentration de sodium dans l'eau de boisson tous les six mois et quand c'est nécessaire (LIBNOR, 2016). Le sodium dans l'eau est d'origine naturelle (érosion des dépôts de sel et des roches ignées, pénétration de l'eau de mer), ou liée à l'activité urbaine comme les eaux usées et effluents industriels, adoucisseurs d'eau à base de sodium (Santé Canada, 2020).

2.2.2.7. Potassium (K⁺)

Le potassium est un élément indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux (Nouayti *et al.*, 2015). Le potassium est un élément naturellement présent dans l'eau mais peut également provenir de l'activité humaine (INBW, 2018). Il est utilisé dans l'agriculture comme engrais sous forme de sulfate de potassium, de chlorure de potassium ou encore de nitrate de potassium (Nouayti *et al.*, 2015). Il est présent dans l'eau de boisson à des concentrations bien inférieures à celles susceptibles de provoquer des effets toxiques (OMS, 2017). Il assure, entre autres, le bon fonctionnement du système nerveux (INBW, 2018).

2.2.2.8. Calcium (Ca²⁺)

Le calcium est un élément très répandu dans la nature, est généralement l'élément dominant des eaux potables et on le trouve dans presque toutes les eaux naturelles (Nouayti *et al.*, 2015). Il provient de l'érosion des sols, des minéraux et des minerais (Santé Canada, 2020). Il est bien connu pour son rôle majeur dans la croissance et l'entretien des os. Des quantités élevées de calcium dans l'eau de boisson ne présentent aucun risque pour la santé (INBW, 2018). Elles peuvent néanmoins altérer le goût de l'eau et favoriser l'apparition de tartre dans les appareils électroménagers. L'entartrage des réservoirs, des tuyaux et des appareils électroménagers à cause du calcium présent naturellement en teneurs élevées dans l'eau est un phénomène très répandu au Liban à cause de sa géologie. Lors de notre campagne d'échantillonnage, nous avons rencontré beaucoup de personnes qui s'en sont plaint.

2.2.2.9. Magnésium (Mg²⁺)

La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (Nouayti *et al.*, 2015). Il existe en abondance dans la nature, il provient de l'érosion des roches et des minéraux (Santé Canada, 2020). Le magnésium offre de nombreux bienfaits pour la santé

humaine, dont celui de limiter l'anxiété et l'hypersensibilité au stress. Il favorise également la transmission neuromusculaire (INBW, 2018).

2.2.3. Résultats des analyses chimiques

Le tableau ci-dessous (Tab. 19) exprime les résultats des analyses chimiques obtenus :

Tab. 19 - Les résultats des analyses chimiques

| ID échantillon | Fluorure | Chlorure | Nitrate | Sulfate | Phosphate | Sodium | Potassium | Calcium | Magnésium |
|--------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| Ion | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | PO ₄ ³⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ |
| Unité | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| Seuil | 1,5 | 250 | 45 | 250 | 6,7 | 200 | 12 | 500 | 50 |
| Limite de quantification | 0,2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,4 | 1 | 1 | 0,5 |
| AIN DAHAB-1 | <0,2 | 20,73 | 10,64 | 20,18 | <2 | 11,02 | <1 | 49,45 | 26,28 |
| AIN DAHAB-2 | <0,2 | 32,43 | 19,73 | 53,39 | <2 | 25,41 | 3,94 | 78,37 | 38,89 |
| AIN DAHAB-3 | <0,2 | 6,05 | 5,62 | 3,40 | <2 | 10,40 | 1,12 | 69,66 | 35,82 |
| BEBNINE-1 | <0,2 | 35,75 | 18,58 | 42,51 | <2 | 23,28 | 1,24 | 94,01 | 8,05 |
| BEBNINE-2 | 1,33 | 35,60 | 20,80 | 16,30 | <2 | 30,99 | 2,77 | 73,26 | 28,96 |
| BEBNINE-3 | <0,2 | 32,98 | 21,76 | 36,52 | <2 | 18,56 | 1,26 | 98,33 | 6,51 |
| BEBNINE-4 | <0,2 | <1 | <1 | <1 | 2,66 | <0,4 | <1 | 1,99 | 1,66 |
| BEBNINE-5 | 0,84 | 31,49 | 15,84 | 13,13 | <2 | 25,39 | 9,33 | 27,95 | 23,74 |
| BEIT AYOUB-1 | 0,24 | 22,19 | 65,33 | <1 | <2 | 30,97 | 3,79 | 83,29 | 44,06 |
| BEIT AYOUB-2 | <0,2 | 15,57 | 35,88 | <1 | <2 | 27,63 | <1 | 61,54 | 38,11 |
| BERKAYEL-1 | <0,2 | 25,75 | 23,00 | 17,36 | <2 | 16,68 | 2,35 | 99,75 | 12,71 |
| BERKAYEL-2 | <0,2 | 26,38 | 18,66 | 14,51 | <2 | 20,24 | <1 | 75,55 | 16,82 |
| BERKAYEL-3 | <0,2 | 17,89 | 8,63 | 5,23 | <2 | 9,21 | <1 | 27,86 | 5,67 |
| BORJ ARAB-1 | <0,2 | 33,53 | 14,42 | 52,44 | <2 | 30,32 | 1,01 | 81,97 | 13,22 |
| BQARZLA-1 | <0,2 | 24,04 | 19,78 | <1 | <2 | 13,71 | <1 | 34,72 | 7,41 |
| BQARZLA-2 | <0,2 | 20,01 | 16,43 | 26,30 | <2 | 13,29 | 5,53 | 61,17 | <0,5 |
| BQARZLA-3 | <0,2 | 27,10 | 28,80 | 33,53 | <2 | 16,94 | <1 | 36,67 | 11,23 |
| BZAL-1 | <0,2 | 14,69 | 9,06 | 4,38 | <2 | 8,03 | <1 | 72,16 | 10,21 |
| CHAN-1 | 0,23 | 21,39 | 30,31 | 54,92 | <2 | 16,95 | <1 | 111,34 | 37,99 |
| CHAN-2 | <0,2 | 15,82 | 9,05 | 3,70 | <2 | 9,25 | <1 | 38,84 | 32,10 |
| FNAIDEQ-1 | <0,2 | 5,63 | 19,59 | 3,66 | <2 | 7,56 | 1,22 | 23,76 | 20,24 |
| FNAIDEQ-2 | <0,2 | <1 | <1 | <1 | <2 | <0,4 | <1 | 5,20 | <0,5 |
| FNAIDEQ-3 | <0,2 | 5,93 | 6,34 | 3,51 | <2 | 2,74 | <1 | 38,57 | 20,59 |
| FNAIDEQ-4 | <0,2 | 7,84 | 5,70 | 7,19 | <2 | 3,75 | <1 | 58,06 | 24,64 |
| FNAIDEQ-5 | <0,2 | 14,17 | 47,01 | 2,33 | <2 | 8,17 | <1 | 1,22 | <0,5 |
| HMAYRA-2 | 0,24 | 36,75 | 43,52 | 50,26 | <2 | 23,98 | 6,06 | 40,11 | 23,27 |
| HOUWEICH-1 | <0,2 | 17,16 | 67,70 | 10,85 | <2 | 16,28 | 1,05 | 92,87 | 30,02 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|-------|--------|--------|------|--------|-------|--------|-------|
| HOUWEICH-2 | <0,2 | 15,90 | 16,38 | 8,47 | <2 | 9,63 | <1 | 54,41 | <0,5 |
| JDAYDE-1 | <0,2 | 71,98 | 48,06 | 112,14 | <2 | 46,79 | 18,65 | 165,87 | 7,89 |
| JDAYDE-2 | <0,2 | 14,91 | 17,43 | 6,90 | 5,44 | 8,39 | <1 | 88,11 | 2,76 |
| KARKAF-1 | 0,25 | 41,52 | 26,26 | 47,92 | <2 | 24,04 | 7,62 | 79,39 | 20,04 |
| KARKAF-2 | <0,2 | 40,40 | 34,41 | 47,91 | <2 | 26,69 | 2,40 | 64,90 | 7,50 |
| KOBLET CHAMRA-1 | <0,2 | 2,09 | 1,57 | 3,18 | <2 | <0,4 | <1 | 8,60 | 1,14 |
| MAJDALA-1 | 0,56 | 24,06 | 21,77 | 1,67 | <2 | 18,27 | 2,08 | 20,84 | 21,02 |
| MECHMECH-1 | <0,2 | 6,27 | 14,35 | 7,63 | <2 | 4,63 | <1 | 28,37 | 16,31 |
| MECHMECH-2 | <0,2 | 7,60 | 23,54 | <1 | <2 | 26,96 | 2,09 | 47,16 | 13,91 |
| MECHMECH-3 | <0,2 | 19,65 | 30,15 | 25,72 | <2 | 20,15 | 4,83 | 38,76 | 33,03 |
| MHAMRA-1 | 1,54 | 24,74 | 38,99 | 14,04 | <2 | 39,49 | 3,76 | 28,19 | 29,28 |
| MHAMRA-2 | <0,2 | 18,70 | 50,74 | <1 | <2 | 13,53 | 1,83 | 36,04 | 24,80 |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | <0,2 | 17,03 | 7,78 | 8,07 | <2 | 9,21 | <1 | 76,29 | 3,06 |
| QORNE-1 | <0,2 | 16,86 | 17,95 | 32,37 | <2 | 8,68 | 1,07 | 73,82 | 29,61 |
| SAYSOUQ-1 | <0,2 | <1 | <1 | <1 | <2 | <0,4 | 2,37 | <1 | <0,5 |
| WADI JAMOUS-1 | 3,07 | 41,16 | 209,43 | 1,43 | <2 | 415,83 | 6,43 | 6,71 | 4,75 |
| WADI JAMOUS-2 | <0,2 | 24,28 | 21,11 | 22,45 | <2 | 15,20 | <1 | 90,35 | 5,15 |

D'après ce tableau, on constate que :

- Les concentrations de chlorure, sulfate, phosphate, calcium et magnésium sont inférieures aux seuils choisis dans tous les échantillons.
- La concentration de fluorure est supérieure au seuil choisi (1,5 mg/l) dans deux échantillons : WADI JAMOUS-1 (3,07 mg/l) et MHAMRA-1 (1,54 mg/l), avec une valeur plus importante pour WADI JAMOUS-1, ce qui représente 4,55% des échantillons. On note également que les échantillons de BEBNINE-2 (1,33 mg/l) et BEBNINE-5 (0,84 mg/l) possèdent des valeurs relativement plus élevées que les autres échantillons. Par contre, le fluorure n'a été détecté que dans neuf échantillons, ce qui représente 20,45% des échantillons.
- La concentration des nitrates est supérieure au seuil choisi (45 mg/l) dans six échantillons : WADI JAMOUS-1 (209,43 mg/l), HOUWEICH-1 (67,7 mg/l), BEIT

AYOUB-1 (65,33 mg/l), MHAMRA-2 (50,74 mg/l), JDAYDE-1 (48,06 mg/l) et FNAIDEQ-5 (47,01 mg/l), ce qui représente 13,64% des échantillons.

- Pour rappel, tous les échantillons ont des concentrations en nitrites inférieures à la limite de quantification (1 mg/l).
- Pour le phosphate, seulement deux échantillons ont dépassé la limite de quantification (2 mg/l) : JDAYDE-2 (5,44 mg/l) et BEBNINE-4 (2,66 mg/l). Ces valeurs restent quand même sous le seuil choisi (6,7 mg/l).
- La concentration de sodium est supérieure au seuil choisi (200 mg/l) dans un seul échantillon : WADI JAMOUS-1 (415,83 mg/l), ce qui représente 2,27% des échantillons. Cet échantillon possède une valeur dix fois plus élevée que le second JDAYDE-1 (46,79 mg/l) et le troisième MHAMRA-1 (39,49 mg/l). Cependant, ces deux derniers possèdent des valeurs relativement plus importantes que les autres échantillons qui ont des concentrations inférieures ou égale à 30 mg/l.
- La concentration de potassium est supérieure au seuil choisi (12 mg/l) dans un seul échantillon : JDAYDE-1 (18,65 mg/l), ce qui représente 2,27% des échantillons. Par contre, le potassium n'a été détecté que dans 24 échantillons, ce qui représente 54,54% des échantillons.

Il convient de noter la détection de deux points assez particuliers :

- WADI JAMOUS-1 possède des concentrations nettement plus élevées que les autres échantillons en fluorure (deux fois plus élevée que le second), en nitrate (environ trois fois plus élevée que le second) et en sodium (dix fois plus élevée que le second). Cet échantillon possède également la deuxième plus haute valeur en chlorure.

- JDAYDE-1 est contaminé en nitrate et possède des concentrations nettement plus élevées que les autres échantillons en chlorure (environ deux fois plus élevée que le second), en sulfate (deux fois plus élevée que le second), en potassium (environ deux fois plus élevée que le second) et en calcium. Cet échantillon possède également la deuxième plus haute valeur en sodium.
- On pense que les concentrations très élevées observées dans les deux stations de JDAYDE-1 et WADI JAMOUS-1 sont d'origine agricole. Les résultats des analyses chimiques suggèrent, selon la lecture de Mr Ouddane, une utilisation abusive des engrais chimiques sur les deux sites, en particulier sur le site de WADI JAMOUS-1, ainsi qu'une utilisation excessive de chlorures de potassium sur le site de JDAYDE-1. L'échantillon WADI JAMOUS-1 a été analysé deux fois au laboratoire pour confirmer son résultat.

Au final, on peut conclure que sept échantillons (WADI JAMOUS-1, JDAYDE-1, HOUWEICH-1, BEIT AYOUB-1, MHAMRA-2, FNAIDEQ-5 et MHAMRA-1) sont chimiquement contaminés, ce qui représente 16% des échantillons.

La carte ci-dessous (Fig. 78) représente les ions ayant des valeurs dépassants le seuil en excluant les deux échantillons particuliers de WADI JAMOUS-1 et JDAYDE-1 :

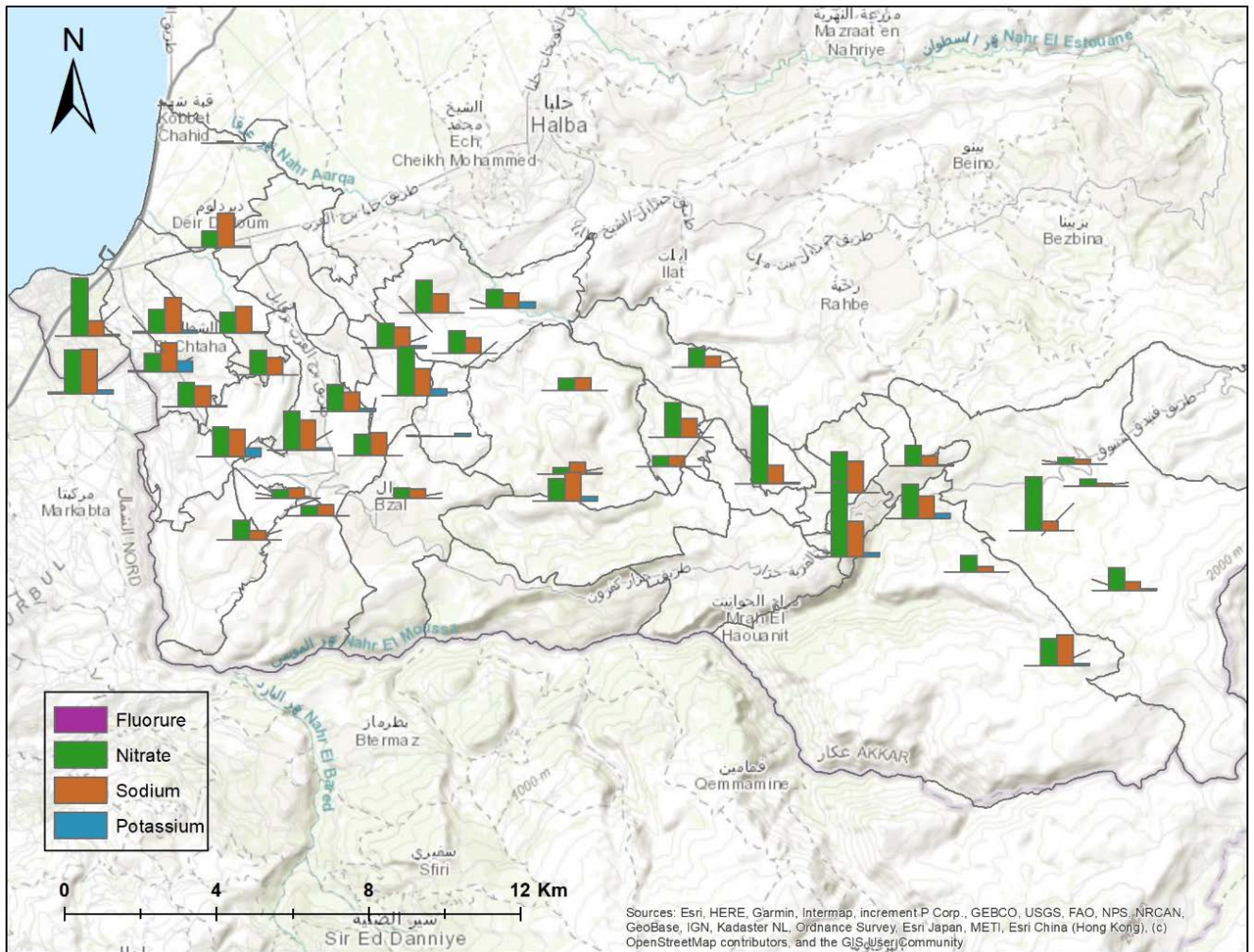


Fig. 78 - Carte de la contamination chimique (en mg/l) des échantillons

2.3. Résultats des analyses microbiologiques et chimiques

Pour déterminer les échantillons contaminés, nous avons créé un tableau (Tab. 20) contenant uniquement les marqueurs (microbiologiques et chimiques) ayant des valeurs supérieures aux seuils choisis :

Tab. 20 - Résultats de marqueurs présentant une contamination microbiologique ou chimique

| ID échantillon | CTT* | SF* | F ⁻ | NO ₃ ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Conclusion |
|----------------|-----------|-----------|----------------|------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|
| Unité | UFC/100ml | UFC/100ml | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | |
| AIN DAHAB-1 | + | ++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| AIN DAHAB-2 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |

| | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---|-------|---|-------|---|
| AIN DAHAB-3 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| BEBNINE-1 | + | ++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| BEBNINE-2 | 0 | + | - | - | - | - | Contamination microb. (SF) |
| BEBNINE-3 | + | 0 | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT) |
| BEBNINE-4 | +++++ | + | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| BEBNINE-5 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| BEIT AYOUB-1 | + | + | - | 65,33 | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) et chimique (nitrate) |
| BEIT AYOUB-2 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| BERKAYEL-1 | + | 0 | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT) |
| BERKAYEL-2 | ++ | 0 | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT) |
| BERKAYEL-3 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| BORJ ARAB-1 | +++++ | +++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| BQARZLA-1 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| BQARZLA-2 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| BQARZLA-3 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| BZAL-1 | + | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| CHAN-1 | ++ | +++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| CHAN-2 | + | ++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| FNAIDEQ-1 | ++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| FNAIDEQ-2 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| FNAIDEQ-3 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| FNAIDEQ-4 | + | +++++ | - | - | - | - | Contamination microbiologique (CTT et SF) |
| FNAIDEQ-5 | + | + | - | 47,01 | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) et chimique (nitrate) |
| HMAYRA-2 | + | 0 | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT) |
| HOUWEICH-1 | + | + | - | 67,70 | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) et chimique (nitrate) |
| HOUWEICH-2 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| JDAYDE-1 | + | ++++ | - | 48,06 | - | 18.65 | Contamination microb. (CTT et SF) et chimique (nitrate et potassium) |
| JDAYDE-2 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| KARKAF-1 | + | + | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| KARKAF-2 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| KOBKET CHAMRA-1 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| MAJDALA-1 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |

| | | | | | | | |
|---|---|--------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| MECHMECH-1 | 0 | +++ | - | - | - | - | Contamination microb. (SF) |
| MECHMECH-2 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| MECHMECH-3 | ++ | ++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| MHAMRA-1 | 0 | 0 | 1,54 | - | - | - | Contamination chimique (fluorure) |
| MHAMRA-2 | 0 | 0 | - | 50,74 | - | - | Contamination chimique (nitrate) |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | + | ++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| QORNE-1 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| SAYSOUQ-1 | 0 | 0 | - | - | - | - | Conforme |
| WADI JAMOUS-1 | + | +++ | 3,07 | 209,43 | 415,83 | - | Contamination microb. (CTT et SF) et chimique (fluorure, nitrate et sodium) |
| WADI JAMOUS-2 | +++++ | +++++ | - | - | - | - | Contamination microb. (CTT et SF) |
| Echantillons contaminés/Tota l (%) | 29/44 (66%) | 27/44 (61,4%) | 2/44 (4,55%) | 6/44 (13,64%) | 1/44 (2,27%) | 1/44 (2,27%) | 33/44 (75%) |
| | Microbiologique: 31/44 (70,5%) | | Chimique : 7/44 (16%) | | | | |

* Légende (empruntée de l'étude de Halwani et Hamze, 1998) : + = 1 à 10 colonies/100ml, ++ = 11 à 20 colonies/100ml, +++ = 21 à 30 colonies/100ml, ++++ = 31 à 40 colonies/100ml, +++++ = 41 colonies/100ml ou plus, - = valeur inférieure au seuil choisi (en mg/l).

D'après ce tableau, on constate qu'au total 33 échantillons sont contaminés du point de vue microbiologique et/ou chimique, ce qui représente 75% des échantillons, répartis de la manière suivante :

- 26 échantillons contaminés du point de vue microbiologique uniquement.
- 2 échantillons contaminés du point de vue chimique uniquement : MHAMRA-1 et MHAMRA-2.
- 5 échantillons contaminés du point de vue microbiologique et chimique : BEIT AYOUB-1, FNAIDEQ-5, HOUWEICH-1, JDAYDE-1 et WADI JAMOUS-1.

La discussion de ces résultats se fera dans un premier temps en comparaison avec les résultats des analyses d'eau des études antérieures réalisées à Al-Kayteh. Dans un deuxième temps, elle se fera à la lumière de la détermination des types d'occupation du sol adjacents et de proximité de chaque site de prélèvement, ainsi que de la présence d'un réseau d'égouts fonctionnel sur place.

Il convient de noter que dans le contexte mondial, la majorité des contaminations des ressources en eau trouve son origine principalement dans la contamination chimique, notamment dans les pays développés. Ces contaminations résultent généralement des activités industrielles. Cette constatation est étayée dans l'état de l'art, où nous avons observé que la majorité des études précédentes menées à l'étranger se sont principalement axées sur l'analyse de la qualité chimique de l'eau (Tab. 1).

En revanche, les contaminations microbiologiques sont plus fréquentes dans les pays en développement. Cette prévalence est principalement due au manque de systèmes d'assainissement adéquats. Le cas d'Al-Kayteh illustre bien ce paradoxe. De plus, nous avons vu également (chap. I) que parmi les 12 études internationales comparées dans le Tab. 1, la seule étude antérieure de l'état de l'art qui a suffisamment exploré les marqueurs microbiologiques était celle de Wafa *et al.* (2020), menée en Afghanistan, démontrant ainsi une contamination microbiologique des eaux souterraines de Kaboul. Cette contamination est directement attribuable aux problèmes liés aux eaux usées urbaines.

Pour finir, la carte ci-dessous (Fig. 79) représente les résultats issus de nos prélèvements en retenant le nombre de colonies de CTT en UFC/100ml comme caractéristiques de la qualité microbiologique et les concentrations des nitrates en mg/l comme caractéristiques de la qualité chimique :

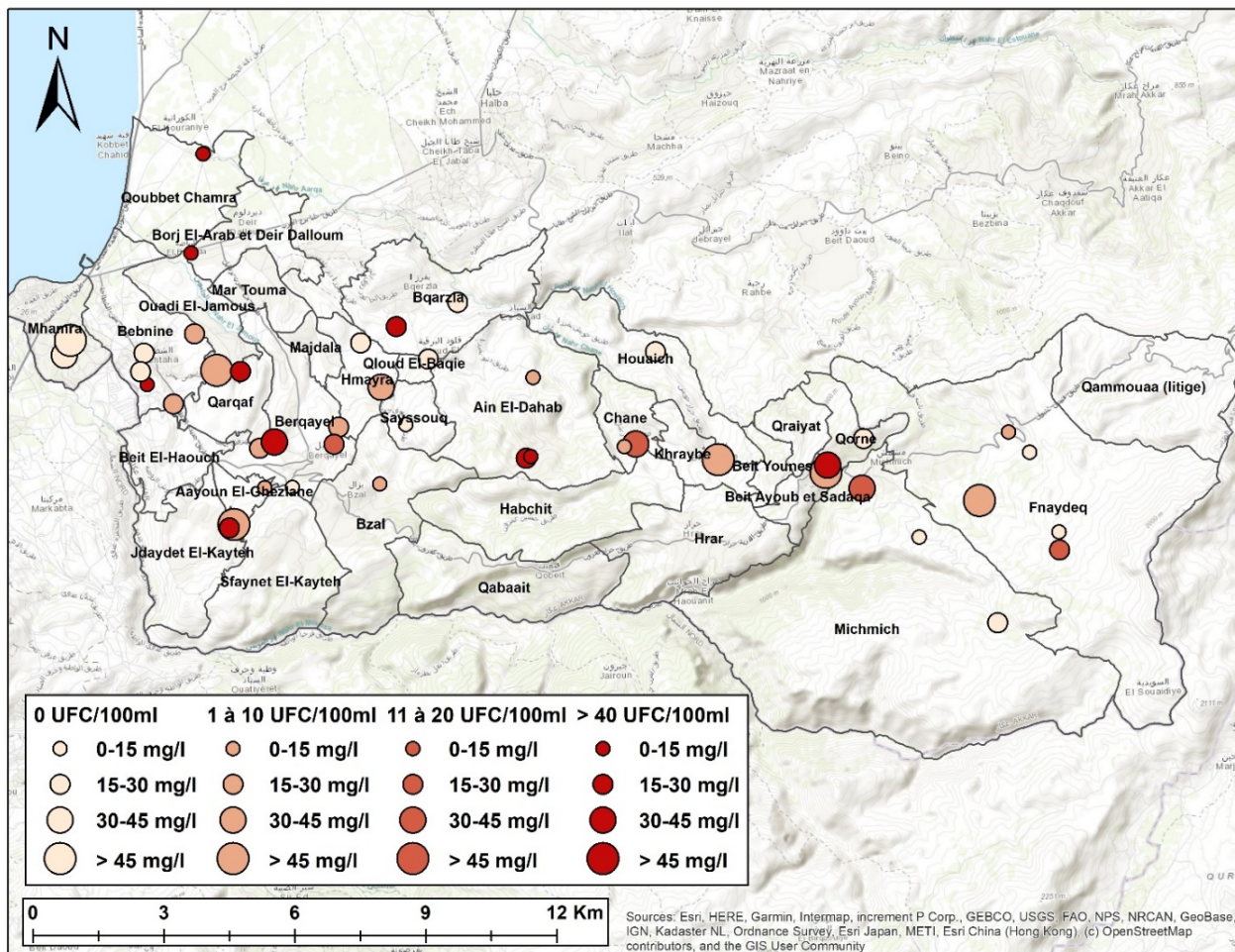


Fig. 79 - Le nombre de CTT en UFC/100ml et la concentration en nitrate en mg/l des échantillons

3. Comparaison de nos résultats avec les résultats des précédentes analyses réalisées à Al-Kayteh

Dans cette section, nous allons effectuer une comparaison entre nos résultats et ceux des études précédentes. Il s'agit de la première revue comparative portant sur l'évolution des ressources en eau à Akkar ou à Al-Kayteh. Cette comparaison nous permettra d'observer, dans la mesure des données disponibles, l'évolution temporelle et spatiale de la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh.

En outre, elle mettra en évidence l'originalité de notre approche et la nécessité de la mener. Cette comparaison contribuera également à l'enrichissement et au développement de la recherche ainsi qu'au débat scientifique concernant la qualité de l'eau à Akkar en général et à Al-Kayteh en particulier.

3.1. Méthodologie

Afin de réaliser cette comparaison, il est nécessaire d'effectuer une synthèse rassemblant les résultats de toutes les études portant sur la qualité de l'eau à Al-Kayteh. Pour ce faire, il convient tout d'abord d'extraire les résultats des analyses de l'eau réalisées exclusivement dans les communes d'Al-Kayteh à partir des études antérieures, telles que présentées dans le chapitre I. Ensuite, il faut extraire de ces données les marqueurs choisis (CT, CTT, SF, fluorure, chlorure, nitrite, nitrate, sulfate, phosphate, sodium, potassium, calcium et magnésium) et les comparer à nos propres résultats. Enfin, les données collectées seront triées commune par commune en fonction de la date des prélèvements. Nous suggérons de présenter les résultats sous la forme de deux tableaux distincts : un tableau pour les marqueurs microbiologiques et un tableau pour les marqueurs chimiques.

3.2. Les résultats des études réalisées à Al-Kayteh

Pour effectuer la comparaison, nous avons extrait les résultats des marqueurs sélectionnés à partir de ces données. Ensuite, nous les avons regroupés avec nos propres résultats dans deux tableaux distincts : un pour les marqueurs microbiologiques et un autre pour les marqueurs chimiques. Les échantillons sont classés par commune, puis selon la date des prélèvements.

Parmi les sources d'Al-Kayteh analysées dans les études antérieures, nous retrouvons plusieurs sources étudiées par nos soins. Ces sources sont les suivantes :

- L'échantillon « OUYOUN GHEZLEN-1 » s'intitule dans le détail « Nabeh Ouyoun Ghezlen ». Il correspond probablement à l'échantillon de « Ouyoun Al-Gozlan » décrit dans HAMZE (1996).
- L'échantillon « BERKAYEL-3 » renvoie à « Nabeh Arbit ». Il correspond à l'échantillon de « Al-Arbid » décrit dans HAMZE (1996) et HALWANI *et al.*, (1999b).
- L'échantillon « FNAIDEQ-3 » renvoie à « Ain Al-Houweh ». Il correspond à l'échantillon de « Al-Houweh » décrit dans HAMZE (1996).
- L'échantillon « FNAIDEQ-4 » renvoie à « Nabeh Fnaideq ». Il correspond à l'échantillon de « Nabaa Fnedik » décrit dans HALWANI *et al.* (1999b).
- L'échantillon « MECHMECH-3 » renvoie à « Ain Al-Ghaba ». Il correspond à l'échantillon de « Ayne Al-Ghaba » décrit dans HAMZE (1996).

Par contre, nous ne pouvons pas dévoiler les noms de toutes les ressources en eau analysées par respect de la confidentialité des propriétaires. Les tableaux de comparaison sont exprimés ci-dessous.

Pour les analyses microbiologiques, les échantillons éligibles à la comparaison sont repartis sur les études antérieures de la manière suivante :

- En 1994 (Hamze, 1996), neuf échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 45% des échantillons de Akkar et 15,5% du total) : un à Aayoun El-Ghezlane, un à Bebnine, deux à Berqayel, deux à Fnaydeq, un à Hrar et deux à Michmich.
- En 1997 (Halwani et Hamze, 1998), sept échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 18,4% des échantillons de l'étude) : quatre à Bebnine, un à Borj El-Arab, un à Mhamra et un à Qoubbet Chamra.
- En 2010 (Hamze *et al.*, 2010), sept échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 14% des échantillons) : un à Bebnine, deux à Borj El-Arab et quatre à Qoubbet Chamra.
- En 2020, 21 de nos échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 47,72% de nos échantillons) : un à Aayoun El-Ghezlane, cinq à Bebnine, trois à Berqayel, un à Borj El-Arab, cinq à Fnaydeq, deux à Mhamra, trois à Michmich et un à Qoubbet Chamra.

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous (Tab. 21), les valeurs sont en UFC/100ml :

Tab. 21 - Résultats des marqueurs microbiologiques choisis dans toutes les études

| Commune | Nom* | Nature | CT | CTT | SF | Date |
|-------------------------|--|---------------|-----------|-----------|------------------|---------------------------|
| Aayoun El-Ghezlane | <u>Ouyoun Al-Gozlan</u> | Source | 0 | 0 | 0 | Août – Sep. 1994 |
| | <u>OUYOUN GHEZLEN-1 (Nabeh Oyoum Ghezlen)</u> | Source | 6 | 3 | 11 | 14 sep. 2020 |
| Bebnine | <u>Ayne Al-Zawarib</u> | Puits | 0 | 1 | 0 | Août – Sep. 1994 |
| | <i>Al-Aabdeh 1</i> | Puits | 0 | 0 | >40 (entéro.)*** | Mars – Mai 1997 |
| | <i>Al-Aabdeh 2</i> | Puits | 0 | 0 | 0 (entéro.) | |
| | <i>Bebnine 1</i> | Source | 0 | 0 | 0 (entéro.) | |
| | <i>Bebnine 2</i> | Puits | Ind. | Ind. | Ind. (entéro.) | 14 et 15 sep. 2020 |
| | <i>Abdeh</i> | Puits | Ind. | Ind. | 0 | |
| | <i>BEBNINE-1</i> | Puits | 12 | 1 | 20 | |
| | <i>BEBNINE-2</i> | Puits | 4 | 0 | 2 | |
| | <i>BEBNINE-3</i> | Source | 1 | 3 | 0 | |
| | <i>BEBNINE-4</i> | Puits | 50 | 47 | 4 | |
| <i>BEBNINE-5</i> | Puits | 0 | 0 | 0 | | |
| Berqayel | <u>Al-Arbid</u> | Source | 10 | 11 | 0 | Août – Sep. 1994 |
| | <u>Ayne Al-Jami</u> | Puits | Ind. | 40 | Ind. | |

| | | | | | | |
|-----------------------|---|---------------|--------------|--------------|-------------|---------------------|
| | <i>BERKAYEL-1</i> | Source | 6 | 8 | 0 | 15 sep. 2020 |
| | <i>BERKAYEL-2</i> | Puits | 10 | 12 | 0 | |
| | <u>BERKAYEL-3 (Nabeh Arbit)</u> | Source | 0 | 0 | 0 | |
| Borj El-Arab | <i>Bourj Al-Arabe 1</i> | Puits | 0 | 0 | 0 (entéro.) | Mars – Mai 1997 |
| | <i>Borj AlArab-1</i> | Puits | Ind. | 246 | Ind. | Avril – Mai 2010 |
| | <i>Borj AlArab-2</i> | Puits | Ind. | 200 | Ind. | |
| | <i>BORJ ARAB-1</i> | Puits | 10000 | 20000 | 24 | 15 sep. 2020 |
| Fnaydeq | <u>Al-Houweh</u> | Source | 0 | 2 | 0 | Août – Sep. 1994 |
| | <u>Ayne Abou-Moustafa</u> | Source | 10 | 12 | 0 | |
| | <i>FNAIDEQ-1</i> | Source | 100 | 14 | 1000 | 21 sep. 2020 |
| | <i>FNAIDEQ-2</i> | Source | 0 | 0 | 0 | |
| | <u>FNAIDEQ-3 (Ain Al-Houweh)</u> | Source | 0 | 0 | 0 | |
| | <u>FNAIDEQ-4 (Nabeh Fnaideq)</u> | Source | 3 | 2 | 48 | |
| | <i>FNAIDEQ-5</i> | Puits | 2 | 2 | 4 | |
| Hrar** | <u>Al-Barghach</u> | Source | 15 | 20 | 20 | Août – Sep. 1994 |
| Mhamra | <i>El-Mhamra 1</i> | Puits | 0 | 0 | 0 (entéro.) | Mars – Mai 1997 |
| | <i>MHAMRA-1</i> | Puits | 0 | 0 | 0 | 14 sep. 2020 |
| | <i>MHAMRA-2</i> | Puits | 0 | 0 | 0 | |
| Michmich | <u>Ayne Al-Ghaba</u> | Source | 7 | Ind. | 0 | Août – Sep. 1994 |
| | <u>Ayne Awad</u> | Source | Ind. | Ind. | 0 | |
| | <i>MECHMECH-1</i> | Puits | 0 | 0 | 24 | 21 sep. 2020 |
| | <i>MECHMECH-2</i> | Source | 0 | 0 | 0 | |
| | <u>MECHMECH-3 (Ain Al-Ghaba)</u> | Source | 50 | 15 | 18 | |
| Qoubbet Chamra | <i>Koubba Bchamra 1</i> | Puits | 1 à 10 | 0 | 0 (entéro.) | Mars – Mai 1997 |
| | <i>Kobbet Chamra-1</i> | Puits | Ind. | 18 | 0 | Avril – Mai 2010 |
| | <i>Kobbet Chamra-2</i> | Puits | 250 | 6 | 2 | |
| | <i>Kobbet Chamra-3</i> | Puits | Ind. | 60 | 2 | |
| | <i>Kobbet Chamra-4</i> | Puits | Ind. | Ind. | Ind. | |
| | <i>KOBBET CHAMRA-1</i> | Puits | 60 | 45 | 60 | 16 sep. 2020 |

Ind. = indénumbrable

* Les noms soulignés sont les échantillons où nous avons le nom véritable de la ressource en eau analysée. Les noms en italique sont les échantillons exprimés sous un ID représentatif. Les lignes en gras correspondent à nos échantillons.

** Pour la commune de Hrar, nous n'avons pas fait de prélèvement en raison de l'indisponibilité de la personne ressource le jour envisagé.

*** entéro. = entérocoques

Pour les analyses chimiques, les échantillons éligibles à la comparaison sont répartis dans les études antérieures de la manière suivante :

- En 1997 (Halwani et Hamze, 1998), sept échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 18,42% des échantillons de l'étude) : quatre à Bebnine, un à Borj El-Arab, un à Mhamra et un à Qoubbet Chamra.
- En 1998 (Halwani *et al.*, 1999a), un seul échantillon à Qoubbet Chamra était éligible à la comparaison (soit 6,66% des échantillons de l'étude). On retrouve cet échantillon dans l'étude de Halwani *et al.* (2001).
- En février 1998 (Halwani *et al.*, 1999b), huit échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 40% des échantillons) : un à Berqayel, quatre à Fnaydeq, deux à Hrar et un à Michmich
- En 1998 (Halwani *et al.*, 2001), cinq échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 10,87% des échantillons de l'étude) : un à Bebnine, un à Borj El-Arab, un à Mhamra et deux à Qoubbet Chamra.
- En 2011 (Baroudi *et al.*, 2012), un seul échantillon à Qoubbet Chamra était éligible à la comparaison (soit 11,11% des échantillons de l'étude).
- En 2020, 20 de nos échantillons étaient éligibles à la comparaison (soit 45,45% de nos échantillons) : cinq à Bebnine, trois à Berqayel, un à Borj El-Arab, cinq à Fnaydeq, deux à Mhamra, trois à Michmich et un à Qoubbet Chamra.

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous (Tab. 22), les valeurs sont en mg/l :

Tab. 22 - Résultats des marqueurs chimiques choisis dans toutes les études

| Ion | | | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | PO ₄ ³⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Date |
|----------|--------------------|--------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|--------------------|
| Seuil*** | | | 1,5 mg/l | 250 mg/l | 45 mg/l | 250 mg/l | 6,7 mg/l | 200 mg/l | 12 mg/l | 500 mg/l | 50 mg/l | |
| Commune | Nom* | Nature | | | | | | | | | | |
| Bebnine | <i>Al-Aabdeh 1</i> | Puits | | 40 | <u>141</u> | 65,3 | | 29 | 0,75 | 124 | | Mars – Mai 1997 |
| | <i>Al-Aabdeh 2</i> | Puits | | 49 | <u>61</u> | 30 | | 47 | 0,62 | 72 | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------------------|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|---------------------------|
| | <i>Bebnine 1</i> | Source | | 34 | <u>66</u> | 23,3 | | 16 | 0,11 | 112 | | |
| | <i>Bebnine 2</i> | Puits | | 64 | <u>100</u> | 35,4 | | 32 | 0,67 | 127 | | |
| | <i>Al-Aabdeh 1</i> | Puits | | | | | | 25 | 1,3 | 50,3 | 28,8 | 1998 |
| | BEBNINE-1 | Puits | <0,2 | 35,75 | 18,58 | 42,51 | <2 | 23,28 | 1,24 | 94,01 | 8,05 | 14 et 15 sep. 2020 |
| | BEBNINE-2 | Puits | 1,33 | 35,60 | 20,80 | 16,30 | <2 | 30,99 | 2,77 | 73,26 | 28,96 | |
| | BEBNINE-3 | Source | <0,2 | 32,98 | 21,76 | 36,52 | <2 | 18,56 | 1,26 | 98,33 | 6,51 | |
| | BEBNINE-4 | Puits | <0,2 | <1 | <1 | <1 | 2,66 | <0,4 | <1 | 1,99 | 1,66 | |
| | BEBNINE-5 | Puits | 0,84 | 31,49 | 15,84 | 13,13 | <2 | 25,39 | 9,33 | 27,95 | 23,74 | |
| Berqayel | <i>Ain Al Arbit</i> | Source | 0,01 | 19,5 | 6,6 | 6 | 0,06 | 1,34 | 0,6 | 81 | 7,15 | Fév.1998 |
| | BERKAYEL-1 | Source | <0,2 | 25,75 | 23,00 | 17,36 | <2 | 16,68 | 2,35 | 99,75 | 12,71 | 15 sep. 2020 |
| | BERKAYEL-2 | Puits | <0,2 | 26,38 | 18,66 | 14,51 | <2 | 20,24 | <1 | 75,55 | 16,82 | |
| | BERKAYEL-3 (Nabeh Arbit) | Source | <0,2 | 17,89 | 8,63 | 5,23 | <2 | 9,21 | <1 | 27,86 | 5,67 | |
| Borj El-Arab | <i>Bourj Al-Arabe 1</i> | Puits | | 30 | 36 | 32,4 | | 18 | 0,14 | 93 | | Mars – Mai 1997 |
| | <i>Borj Al-Arab</i> | Puits | | 30 | 26 | | | 20 | 1,6 | 31,1 | 20,5 | 1998 |
| | BORJ ARAB-1 | Puits | <0,2 | 33,53 | 14,42 | 52,44 | <2 | 30,32 | 1,01 | 81,97 | 13,22 | 15 sep. 2020 |
| Fnaydeq | <i>Nabaa Fnedik</i> | Source | 0 | 11,35 | 10,1 | 7 | 0,05 | 0,84 | 0,91 | 71 | 31,4 | Fév. 1998 |
| | <i>Ain Al Houet</i> | Source | 0,01 | 11 | 7,9 | 8 | 0,07 | 0,8 | 1,09 | 58 | 28,77 | |
| | <i>Ain El Delbet</i> | Source | 0,01 | 11 | 3,1 | 7 | 0,07 | 0,86 | 0,53 | 66 | 33,21 | |
| | <i>Ain El Banat</i> | Source | 0 | 11,35 | 11,9 | 8 | 0,08 | 0,89 | 0,9 | 68 | 28,98 | |
| | FNAIDEQ-1 | Source | <0,2 | 5,63 | 19,59 | 3,66 | <2 | 7,56 | 1,22 | 23,76 | 20,24 | 21 sep. 2020 |
| | FNAIDEQ-2 | Source | <0,2 | <1 | <1 | <1 | <2 | <0,4 | <1 | 5,20 | <0,5 | |
| | FNAIDEQ-3 (Ain Al-Houweh) | Source | <0,2 | 5,93 | 6,34 | 3,51 | <2 | 2,74 | <1 | 38,57 | 20,59 | |
| | FNAIDEQ-4 (Nabeh Fnaideq) | Source | <0,2 | 7,84 | 5,70 | 7,19 | <2 | 3,75 | <1 | 58,06 | 24,64 | |
| | FNAIDEQ-5 | Puits | <0,2 | 14,17 | 47,01 | 2,33 | <2 | 8,17 | <1 | 1,22 | <0,5 | |
| Hrar** | <i>Ain Al Jaouze</i> | Source | 0 | 12,45 | 16,7 | 7 | 0,11 | 0,92 | 0,62 | 7 | 2,71 | Fév. 1998 |
| | <i>Ain Al Masad</i> | Source | 0,01 | 18,1 | 10,55 | 33 | 0,05 | 1,36 | 0,91 | 93 | 21,32 | |
| Mhamra | <i>El-Mhamra1</i> | Puits | | 32 | <u>118</u> | 52,5 | | 20 | 0,38 | 101 | | Mars – Mai 1997 |
| | <i>El-Mhammara 1</i> | Puits | | | | | | 24 | 1,5 | 77 | 25,6 | 1998 |
| | MHAMRA-1 | Puits | 1,54 | 24,74 | 38,99 | 14,04 | <2 | 39,49 | 3,76 | 28,19 | 29,28 | 14 sep. 2020 |
| | MHAMRA-2 | Puits | <0,2 | 18,70 | 50,74 | <1 | <2 | 13,53 | 1,83 | 36,04 | 24,80 | |
| Michmich | <i>Eau souterraine</i> | Puits | 0 | 17,05 | 20,7 | 24 | 0,08 | 1,51 | 1,34 | 95 | 36,03 | Fév. 1998 |
| | MECHMECH-1 | Puits | <0,2 | 6,27 | 14,35 | 7,63 | <2 | 4,63 | <1 | 28,37 | 16,31 | 21 sep. 2020 |
| | MECHMECH-2 | Source | <0,2 | 7,60 | 23,54 | <1 | <2 | 26,96 | 2,09 | 47,16 | 13,91 | |
| | MECHMECH-3 (Ain Al-Ghaba) | Source | <0,2 | 19,65 | 30,15 | 25,72 | <2 | 20,15 | 4,83 | 38,76 | 33,03 | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|--------------|-------------|-------------|---------------------|
| Qoubbet Chamra | <i>Koubba Bchamra 1</i> | Puits | | 40 | <u>64</u> | 32,5 | | 27 | 0,82 | 92 | | Mars – Mai 1997 |
| | <i>Qoubet Chamra 1</i> | Puits | | 7 | <u>71</u> | | | 21 | 1,9 | 70,9 | 30,2 | 1998 |
| | <i>Qoubet Chamra 2</i> | Puits | | 40 | 30 | | | 23 | 2,1 | 31,5 | 30,1 | |
| | <i>Qoubbet Chamra-1</i> | Puits | | | <u>75</u> | | | | | | | Mai 2011 |
| | KOBKET CHAMRA-1 | Puits | <0,2 | 2,09 | 1,57 | 3,18 | <2 | <0,4 | <1 | 8,60 | 1,14 | 16 sep. 2020 |

* Les noms soulignés sont les échantillons où nous disposons du nom véritable de la ressource en eau analysée. Les noms en italique sont les échantillons exprimés sous un ID représentatif. Les lignes en gras correspondent à nos échantillons.

** Pour la commune de Hrar, nous n'avons pas réalisé de prélèvement en raison de l'indisponibilité de la personne ressource le jour envisagé.

*** Les valeurs soulignées sont les valeurs dépassants le seuil.

3.3. Résultats de la comparaison

On remarque que les études antérieures se divisent en deux périodes. Tout d'abord, celles de la fin du XXe siècle : en 1994 (Hamze, 1996), 1997 (Halwani et Hamze, 1998) et 1998 (Halwani *et al.*, 1999a ; Halwani *et al.*, 1999b ; Halwani *et al.*, 2001). L'étude Halwani *et al.* (2002) ne présente aucun échantillon prélevé à Al-Kayteh. Ces études constituent les premières investigations sur le sujet et visaient à caractériser la qualité des ressources en eau d'Akkar, en mettant l'accent sur celle de la plaine d'Akkar, du point de vue microbiologique et chimique.

Par la suite, des études plus récentes ont été menées entre 2010 et 2019 : en 2010 (Hamze *et al.*, 2010), en 2011 (Baroudi *et al.*, 2012), en 2012 (El-Osmani *et al.*, 2014), en 2015 (Chbib *et al.*, 2018) et en 2017 (Moustafa *et al.*, 2019). À l'exception de la première étude (Hamze *et al.*, 2010), qui a cherché des marqueurs microbiologiques, et la dernière étude portant sur les métaux lourds (Moustafa *et al.*, 2019), les autres études (Baroudi *et al.*, 2012 ; El-Osmani *et al.*, 2014 ; Chbib *et al.*, 2018) ont focalisé leur attention sur les résidus de pesticides dans les eaux de la plaine d'Akkar, une zone renommée pour ses activités agricoles intensives.

Ainsi, les résultats de la comparaison ainsi que l'évolution de la qualité des ressources en eau dans les communes d'Al-Kayteh sont donnés dans le Tab. 23 et le Tab. 24 ci-dessous.

Pour les analyses microbiologiques :

Tab. 23 - Les résultats de la comparaison (analyses microbiologiques)

| Commune | Résultat de la comparaison microbiologique | Evolution (partie microbiologique) |
|---------------------------|---|--|
| Aayoun El-Ghezlane | A l'été 1994, la source du village était conforme. A la fin de l'été 2020, elle s'est avérée faiblement contaminée. | Faible contamination relevée entre 1994 et 2020. |
| Bebnine | A l'été 1994, les eaux du puits d'Ain Al-Zawarib étaient conformes. Au printemps 1997, trois autres puits et une source ont été analysés : la source et un puits étaient conformes, un puits était contaminé et un autre fortement contaminé. Au printemps 2010, un puits était massivement contaminé. A la fin de l'été 2020, quatre puits et une source ont été analysés : un puits était conforme, un puits et la source étaient faiblement contaminés et deux puits étaient contaminés. | Les résultats ont montré que la qualité microbiologique des ressources en eau de Bebnine est très variable : certains échantillons sont conformes, d'autres faiblement contaminés et d'autres massivement contaminés. |
| Berqayel | A l'été 1994, la source d'Al-Arbit était contaminée et le puits d'Al-Jami était massivement contaminé. A la fin de l'été 2020, un puits et deux sources dont la source d'Al-Arbit ont été analysés : la source d'Al-Arbit était conforme et les deux autres échantillons étaient contaminés. | -Berqayel : un puits du village était massivement contaminé en 1994. Tandis qu'en 2020, un puits et une source du village étaient contaminés d'une manière moins importante. -La source Al-Arbit était contaminé en 1994 mais conforme en 2020. |
| Borj El-Arab | Au printemps 1997, un puits était conforme. Au printemps 2010, deux puits ont été analysés et ils étaient massivement contaminés. A la fin de l'été 2020, un puits a été analysé et il était massivement contaminé. | Conforme en 1997, mais une très forte contamination a été observée en 2010 et en 2020. |
| Fnaydeq | A l'été 1994, les sources d'Ain Al-Houweh et d'Ain Abou-Moustafa ont été analysées : la source d'Ain Al-Houweh était très faiblement contaminée et la source de Ain Abou-Moustafa était contaminée. A la fin de l'été 2020, un puits et quatre sources dont la source d'Ain Al-Houweh et la source de Nabeh Fnaydeq ont été analysés : la source d'Ain Al-Houweh et une | -Fnaydeq : de faibles contaminations observées en 1994, mais des résultats variables ont été observés en 2020 : deux échantillons conformes, deux faiblement contaminés et un massivement contaminé. -Source Al-Houweh : légèrement contaminée en 1994, conforme en 2020. |

| | | |
|-----------------------|--|---|
| | source étaient conformes, le puits et la source de Nabeh Fnaydeq étaient faiblement contaminés et une source était massivement contaminée. | |
| Hrar | En été 1994, la source d'Al-Barghach était contaminée. | Données insuffisantes. |
| Mhamra | Au printemps 1997, un puits a été analysé et il était conforme. A la fin de l'été 2020, deux puits ont été analysés et ils étaient conformes. | Ressources en eau conformes. |
| Michmich | A l'été 1994, les sources d'Ain Al-Ghaba et d'Ain Awad ont été analysées et les deux sources étaient massivement contaminées. A la fin de l'été 2020, un puits et deux sources dont la source d'Ain Al-Ghaba ont été analysés : la source d'Ain Al-Ghaba était contaminée, la deuxième source était conforme et le puits était faiblement contaminé. | -Michmich : en 1994, deux sources en eau étaient contaminées. En 2020, les résultats des trois échantillons étaient très variés. -Source Al-Ghaba : contaminés en 1994 et en 2020. |
| Qoubbet Chamra | Au printemps 1997, un puits a été analysé et il était conforme. Au printemps 2010, quatre puits ont été analysés et ils étaient massivement contaminés. A la fin de l'été 2020, un puits a été analysé et il était contaminé. | Si un puits était conforme en 1997, des analyses plus récentes (4 prélèvements en 2010 et un en 2020) ont montré une forte contamination. |

Pour les analyses chimiques :

Tab. 24 - Les résultats de la comparaison (analyses chimiques)

| Commune | Résultat de la comparaison chimique | Evolution (partie chimique) |
|---------------------|---|---|
| Bebnine | Au printemps 1997, trois puits et une source ont été analysés et les quatre étaient contaminés par des nitrates. A la fin de l'été 2020, quatre puits et une source ont été analysés et les cinq étaient conformes. | En 1997 tous les échantillons (quatre) de Bebnine étaient contaminés en nitrates. Par contre, en 2020, tous les échantillons (cinq) de Bebnine étaient conformes. |
| Berqayel | En février 1998, la source d'Al-Arbit était conforme. A la fin de l'été 2020, un puits et deux sources dont la source d'Al-Arbit étaient conformes. | -Berqayel : données insuffisantes. -La source Al-Arbit : conforme en 1998 et en 2020. |
| Borj El-Arab | Au printemps 1997, un puits a été analysé et il était conforme. En 1998, un puits a été analysé et il était conforme. A la fin de l'été 2020, un puits a été analysé et il était conforme. | Ressources en eau conformes. |
| Fnaydeq | En février 1998, les sources de Nabaa Fnaydeq, d'Ain Al-Houweh, d'Ain Al-Delbet et d'Ain Al-Banat ont été analysées et les quatre sources | -Fnaydeq : Parmi les quatre échantillons prélevés en 1998 et les cinq échantillons prélevés en 2020, un seul échantillon |

| | | |
|-----------------------|--|--|
| | étaient conformes. A la fin de l'été 2020, un puits et quatre sources dont la source de Nabaa Fnaydeq et la source d'Ain Al-Houweh ont été analysés : les quatre sources étaient conformes mais le puits était contaminé par les nitrates. | (prélevé en 2020) était contaminé en nitrates. -Source Al-Houweh : conforme en 1998 et en 2020. -Source Nabaa Fnaydeq : conforme en 1998 et en 2020. |
| Hrar | En février 1998, les sources d'Al-Jaouze et d'Al-Masad étaient conformes. | Données insuffisantes. |
| Mhamra | Au printemps 1997, un puits a été analysé et il était contaminé en nitrates. A la fin de l'été 2020, deux puits ont été analysés : un puits était contaminé par les nitrates et l'autre était contaminé par les fluorures. | Ressources en eau contaminés. |
| Michmich | En février 1998, un puits a été analysé et il était conforme. A la fin de l'été 2020, un puits et deux sources dont la source d'Ain Al-Ghaba ont été analysés et les trois étaient conformes. | Ressources en eau conformes. |
| Qoubbet Chamra | Au printemps 1997, un puits a été analysé et il était contaminé par les nitrates. En 1998, deux puits ont été analysés : un puits était conforme et l'autre était contaminé par les nitrates. En mai 2011, un puits a été analysé et il était contaminé par les nitrates. A la fin de l'été 2020, un puits a été analysé et il était conforme. | Fluctuation des résultats entre les années. Généralement contaminé par les nitrates. |

3.4. Discussion

Une revue générale des études antérieures suggère que le taux de contamination des ressources en eau d'Akkar s'est accrue, avant de se stabiliser à 100% depuis 2010. Cette situation pourrait laisser supposer que toutes les ressources en eau d'Akkar, ou plutôt celles de la plaine d'Akkar, qui est le terrain de toutes les études menées depuis 2010, sont toutes polluées. L'hypothèse que toutes les ressources en eau d'Akkar sont polluées était également envisagée par les experts que nous avons consultés avant de procéder à l'échantillonnage.

Toutefois, nos résultats ont révélé que 33 des 44 échantillons prélevés à Al-Kayteh étaient contaminés, ce qui équivaut finalement à "seulement" 75% des échantillons (contamination microbiologique à 70,5% et contamination chimique à 16%). Cette proportion de

contamination diffère des taux observés dans les études menées depuis 2010 sur la qualité des ressources en eau à Akkar. Il en découle que les résultats des études antérieures ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble de la région d'Akkar, et il serait inexact d'affirmer que toutes les ressources en eau de la région sont polluées.

Cette disparité découle principalement de la diversité des méthodes d'élimination des eaux usées d'un secteur à l'autre, ainsi que des différences liées aux types d'agriculture pratiquées et l'intensité de leur impact sur le territoire d'Akkar, notamment entre la plaine et les plateaux. Le cas d'Al-Kayteh illustre parfaitement cette variabilité, alors que les études précédentes ne fournissent pas d'informations claires concernant la présence éventuelle de sources potentielles de contamination microbiologique sur chaque site de prélèvement, comme la nature de l'occupation du sol (zone urbaine, agricole ou autre), la présence ou l'absence de réseau d'égouts, etc.

En ce qui concerne la contamination microbiologique, les prélèvements analysés dans les études antérieures aux nôtres couvrent deux périodes : 1994/1997 (Hamze, 1996 ; Halwani et Hamze, 1998) et 2010 (Hamze *et al.*, 2010), alors que nos prélèvements ont eu lieu en 2020. Cela permet de comparer les résultats sur trois périodes distinctes pour certaines communes. En ce qui concerne les analyses chimiques, les résultats remontent souvent aux années 1997, 1998 et 2020. Nous avons donc deux périodes différentes, marquées par un développement urbain considérable, comme exposé dans le chapitre précédent.

3.4.1. Analyses microbiologiques

Pour la partie microbiologique, les analyses révèlent que le taux de contamination des échantillons prélevés dans la région d'Akkar, distribués entre la plaine et les plateaux, s'élevait à 75% en 1994 (Hamze, 1996). En 1997, l'étude menée sur la plaine d'Akkar a montré que 63% des échantillons prélevés dans la plaine d'Akkar étaient contaminés

(Halwani et Hamze, 1998). En 2002, l'étude menée sur le plateau d'El-Jouma (au nord d'Al-Kayteh) a montré que 63% des échantillons étaient contaminés (Halwani *et al.*, 2002). En 2010, l'étude menée sur la plaine d'Akkar a montré que 100% des échantillons prélevés dans la plaine d'Akkar étaient contaminés (Hamze *et al.*, 2010). En revanche, 70,5% de nos échantillons prélevés en 2020 à Al-Kayteh étaient contaminés d'un point de vue microbiologique. Il est donc évident que les ressources en eau d'Akkar, en particulier dans la plaine d'Akkar et à Al-Kayteh, sont globalement polluées du point de vue microbiologique, en particulier dans les zones urbaines, comme nous allons le démontrer dans le chapitre suivant.

D'une manière générale, on peut conclure que les taux élevés de contamination microbiologique observés sur différentes périodes ne montrent pas d'évolutions significatives, car la variable étudiée (les marqueurs microbiologiques) n'a pas significativement changé entre les dates retenues. Par conséquent, la comparaison indique que la pollution est présente à toutes les périodes, ce qui constitue tout de même un résultat. Il est à noter que toutes ces ressources ne sont pas contaminées au même degré, ce qui offre un élément de comparaison et de discussion.

Cependant, une analyse approfondie des résultats obtenus à la suite de la comparaison nous permettra d'explorer et d'analyser les évolutions observées dans la qualité microbiologique des ressources en eau à Al-Kayteh. Dans cette optique, nous aborderons les résultats de la comparaison en nous basant sur diverses sources d'informations : l'étude bibliographique, les résultats des études antérieures, nos résultats ainsi que nos connaissances sur le terrain.

En effet, l'ampleur de la contamination microbiologique n'a pas évolué de la même manière dans toutes les communes, et le regroupement par commune que nous avons effectué (Tab. 23) peut servir à observer les évolutions spécifiques par commune/secteur. On relève

premièrement le cas unique de Mhamra, la seule commune où tous les échantillons étaient conformes du point de vue microbiologique dans toutes les études (un échantillon prélevé en 1997 et deux en 2020 par nous-mêmes). Cette situation peut être expliquée par la présence d'un réseau d'égouts efficace sur la commune comme nous l'avons démontré dans le chapitre II.

Par contre, on distingue le cas de Berqayel, la commune où la contamination considérable des échantillons observée en 1994 a diminué en 2020, voire disparue sur le site de la source "Al-Arbit". Cette amélioration pourrait être liée à la connexion récente de cette commune au nouveau réseau d'égouts.

D'autre part, on constate que la contamination microbiologique des ressources en eau de Bebnine a augmenté en termes du nombre de sources contaminées, mais pas nécessairement en termes d'ampleur. En effet, pendant la période 1994/1997, la moitié des ressources en eau examinées dans la plus grande commune d'Akkar était conforme, tandis que l'autre moitié était fortement contaminée. On notera entre temps l'existence d'un puits fortement contaminé à Bebnine en 2010. Cependant, parmi les cinq échantillons que nous avons prélevés en 2020, un était conforme, un était contaminé, et les trois autres ont présenté des niveaux de contamination faibles voire très faibles. Nous ne pouvons pas étudier cette évolution sans prendre en compte les types d'occupation du sol sur les sites de prélèvements sélectionnés lors des précédentes études.

En revanche, la qualité microbiologique des ressources en eau s'est dégradée dans d'autres communes d'Al-Kayteh. Par exemple, la source d'Aayoun El-Ghezlane, qui était sans pollution en 1994, a présenté une légère contamination microbiologique en 2020. Cette source est située dans une zone urbaine peu dense sans réseau d'égouts (les détails sont fournis dans le chapitre V), une zone qui a connu une croissance urbaine de 295% entre 2005

et 2017 (les détails sont dans le chapitre III). Cette situation pourrait expliquer la dégradation de la qualité microbiologique de la source d'Aayoun El-Ghezlane.

La dégradation de la qualité microbiologique des échantillons de Qoubbet Chamra et de Borj El-Arab est plus prononcée. En effet, un échantillon a été prélevé dans chacune des deux communes en 1997, et les deux échantillons étaient conformes du point de vue microbiologique. Cependant, les échantillons prélevés dans les deux communes en 2010 (deux à Borj El-Arab et quatre à Qoubbet Chamra) et en 2020 (un à Borj El-Arab et un à Qoubbet Chamra) étaient massivement contaminés. Il est important de noter que le réseau d'égouts de Qoubbet Chamra est ancien et obsolète tandis que la commune de Borj El-Arab ne possède pas de réseau d'égouts.

L'évaluation de l'évolution de la qualité microbiologique des ressources en eau de Fnaydeq est plus complexe. Le cas de Michmich, la commune voisine de Fnaydeq, présente des similitudes. En effet, la comparaison entre les prélèvements effectués à Fnaydeq en 1994 et en 2020 n'a pas permis de constater de changements significatifs dans la qualité de ses ressources en eau. Comme nous l'avons constaté, le territoire des communes de Fnaydeq et de Michmich présente des caractéristiques particulières d'occupation du sol : une agglomération fortement peuplée, entourée par des activités agricoles importantes notamment des arbres fruitiers, et de vastes forêts dans les montagnes.

Dans certaines communes assez grandes comme Fnaydeq (3227 ha) et Michmich (3781 ha), qui présentent une diversité plus grande de paysages et de formes d'occupation du sol, il n'est pas possible de tirer de conclusions définitives sans avoir d'informations sur les lieux de prélèvements, d'autant plus que les résultats de nos cinq échantillons étaient très variés. Cependant, dans le chapitre V, nous verrons que l'interprétation des impacts de l'occupation

du sol sur les contaminations microbiologiques observées à Fnaydeq peut produire des résultats très intéressants.

3.4.2. Analyses chimiques

Pour les analyses chimiques, il est important de noter que toutes les études antérieures ont porté sur la plaine d'Akkar, à l'exception des études d'Halwani *et al.* (1999b) qui s'est concentrée sur les plateaux d'Akkar et d'Halwani *et al.* (2002) qui s'est concentrée sur le plateau d'El-Jouma, ne présentant ainsi aucun échantillon éligible à la comparaison. En ce qui concerne les études menées dans la plaine d'Akkar, les taux de contamination chimique étaient très élevés : 87% selon l'étude d'Halwani et Hamze (1998), 100% selon l'étude de Halwani *et al.* (1999a), 80% selon l'étude de Halwani *et al.* (2001) et 100% selon l'étude de Baroudi *et al.* (2012). En revanche, les deux études réalisées sur les plateaux d'Akkar, datant de 1999 et 2002, ont montré que tous les échantillons prélevés étaient conformes (Halwani *et al.*, 1999b ; Halwani *et al.*, 2002). Cette disparité constitue un point sur lequel nous allons revenir.

Dans notre étude, le taux de contamination chimique est seulement de 16%, sachant que nous avons effectué des prélèvements dans toutes les communes d'Al-Kayteh situées dans la plaine d'Akkar : Bebnine, Mhamra, Qoubbet Chamra et Borj El-Arab. Dans ces quatre communes, nous avons prélevé un total de neuf échantillons (20,45% du total) : cinq échantillons à Bebnine, deux à Mhamra, un à Qoubbet Chamra et un à Borj El-Arab. Parmi ces neuf échantillons, uniquement les deux échantillons de Mhamra étaient contaminés du point de vue chimique. Ces résultats sont loin des très élevés taux de contamination observés dans les études antérieures menées dans la plaine d'Akkar.

De plus, nous avons prélevé 35 échantillons (79,54% du total) sur les plateaux d'Akkar, dont 11 sont éligibles à la comparaison : trois à Berqayel, cinq à Fnaydeq et trois à Michmich.

Parmi ces 11 échantillons, un seul était contaminé du point de vue chimique, représentant ainsi 9,1% des 11 échantillons. Ces résultats ne sont pas loin des résultats de l'étude de Halwani *et al.* (1999b) et Halwani *et al.* (2002) menées sur les plateaux d'Akkar.

En ce qui concerne la plaine d'Akkar, un fait remarquable est la contamination chimique de tous les échantillons issus des études antérieures et prélevés à Mhamra, Bebnine et Qoubbet Chamra, à l'exception d'un échantillon prélevé à Qoubbet Chamra en 1998 qui a présenté également des concentrations élevées en nitrates. Toutes les contaminations chimiques jamais observées dans ces communes (Tab. 24) étaient liées à des niveaux élevés de nitrates, à l'exception de l'échantillon MHAMRA-1 prélevé par nous-mêmes, qui a présenté une contamination en fluorure tout en ayant des concentrations importantes en nitrates. Ceci suggère fortement une contamination due aux engrais chimiques, en particulier sur un site de cultures intensives de plein champs et sous abri, comme c'est le cas sur le site de MHAMRA-1.

Si nos deux échantillons de Mhamra étaient chimiquement contaminés, en cohérence avec les études antérieures, la situation est inversée pour les communes de Bebnine et de Qoubbet Chamra :

Pour Bebnine, les quatre prélèvements effectués en 1997 ont révélé une forte contamination en nitrates dans les eaux de la commune. Cependant, les cinq échantillons que nous avons prélevés à Bebnine en 2020 étaient tous conformes de point de vue chimique.

Pour Qoubbet Chamra, les prélèvements réalisés en 1997, 1998 et 2011 ont montré que les eaux de la commune étaient majoritairement contaminées en nitrates. Le seul échantillon conforme prélevé à Qoubbet Chamra en 1998 présentait également des concentrations élevées en nitrates. En revanche, l'échantillon que nous avons prélevé à Qoubbet Chamra en 2020 était conforme du point de vue chimique.

Cette évolution pourrait s'expliquer par le fait que tous les échantillons que nous avons prélevés à Bebnine et à Qoubbet Chamra relèvent de zones urbaines. En revanche, nous supposons que les échantillons issus de ces deux communes lors des précédentes études ont été prélevés dans des zones agricoles. Ces différences illustrent bien l'importance d'identifier le contexte d'occupation du sol lors d'une étude portant sur la pollution de l'eau.

Pour ce qui est de Borj El-Arab, la quatrième et dernière commune d'Al-Kayteh appartenant à la plaine d'Akkar, les échantillons prélevés en 1997, 1998 et 2020 étaient conformes du point de vue chimique. Ainsi, nous supposons que tous ces échantillons ont été prélevés dans des zones urbaines comme notre échantillon, notamment dans une commune fortement urbanisée et en plein développement urbain comme Borj El-Arab.

En revanche, le tableau (Tab. 24) ne révèle pas de changements significatifs dans la qualité chimique des ressources en eau pour les communes des plateaux d'Akkar. Pour rappel, les analyses antérieures réalisées sur le plateaux d'Akkar ont été effectuées en 1998 dans le cadre de l'étude d'Halwani *et al.* (1999b) ou en 2000 dans le cadre de l'étude d'Halwani *et al.* (2002). Dans cette dernière, aucun échantillon n'a été prélevé à Al-Kayteh. D'autre part, parmi les 20 prélèvements réalisés dans l'étude Halwani *et al.* (1999b), huit échantillons ont été prélevés à Al-Kayteh : un à Berqayel, quatre à Fnaydeq, deux à Hrar et un à Michmich. En excluant les deux échantillons de Hrar (car nous n'avons pas réussi à y réaliser de prélèvements malgré notre visite de la commune), les six autres échantillons sont éligibles à la comparaison, ce qui représente 30% des échantillons de l'étude d'HALWANI *et al.* (1999b). Quant à notre étude, nous avons prélevé 11 échantillons dans ces communes, trois à Berqayel, cinq à Fnaydeq et trois à Michmich, représentant ainsi 31,43% des échantillons prélevés sur le plateau d'Akkar et 25% du total. Tous les échantillons, de l'étude HALWANI *et al.* (1999b) et la nôtre, prélevés dans les communes d'Al-Kayteh appartenant aux plateaux

d'Akkar étaient conformes du point de vue chimique, à l'exception de l'échantillon « FNAIDEQ-5 » prélevé par nous-même et qui était contaminé par des nitrates.

Cependant, il serait inapproprié d'affirmer que la qualité chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh s'est dégradée entre 1998 et 2020 en se basant uniquement sur l'échantillon FNAIDEQ-5, car il faut le replacer dans son contexte territorial. En effet, les quatre échantillons prélevés à Fnaydeq en 1998 provenaient de sources, nous laissent supposer qu'ils sont issus des montagnes environnantes. Ces montagnes, ainsi que leurs sources, sont éloignées des zones habitées comme nous l'avons décrit dans les chapitres II et III. Les sources des montagnes d'Akkar sont reconnues pour leur potabilité chimique (Halwani *et al.*, 1999b), une conclusion que notre étude confirme.

En revanche, l'échantillon FNAIDEQ-5, contaminé par les nitrates, est issu d'un puits creusé dans un quartier urbain peu dense en contact direct avec des terrains de cultures de plein champ. Par conséquent, il est probablement contaminé par les engrais chimiques utilisés dans les zones agricoles voisines. Ainsi, il serait inapproprié de le comparer aux échantillons prélevés à Fnaydeq en 1998 dans des sources issues des montagnes voisines, où s'étendent de vastes secteurs de surfaces boisées et naturelles (SBN), comme décrit dans le chapitre précédent. Cette contamination met encore en évidence l'importance de la prise en compte des types d'occupation du sol dans l'étude de la pollution de l'eau.

4. Conclusion intermédiaire

Les résultats des analyses microbiologiques et chimiques réalisés par nos soins en septembre 2020 sur 44 échantillons prélevés à Al-Kayteh ont révélé que 33 échantillons étaient contaminés, ce qui équivaut finalement à "seulement" 75% des échantillons (contamination microbiologique à 70,5% et contamination chimique à 16%). Cependant, les comparaisons réalisées suggèrent que les ressources en eau d'Al-Kayteh n'ont pas montré une évolution nette de leur qualité pour les communes qui ont fait l'objet de cette analyse comparative. Par conséquent, il n'est pas possible de dire de manière catégorique que les ressources en eau d'Al-Kayteh ont connu une amélioration ou une détérioration en termes de qualité microbiologique ou chimique à l'issue de cette comparaison.

En effet, la qualité de l'eau n'a pas connu de changements significatifs entre les années retenues pour la comparaison. Il est important de noter que le nombre limité des échantillons comparés, associé à l'absence d'informations concernant les caractéristiques des sites de prélèvement, restreint la portée de cette analyse. De plus, il est pertinent de mentionner que plus de la moitié de nos échantillons ont été collectés dans des communes non étudiées précédemment, ce qui ajoute de nouvelles données sans toutefois permettre de démontrer une évolution distincte.

Cependant, cette comparaison a permis d'extraire certaines conclusions à partir des études antérieures. En effet, il a été observé que le taux de contamination microbiologique des ressources en eau d'Akkar et d'Al-Kayteh est particulièrement élevé, et cela est vrai depuis la première étude (1994). En outre, les ressources en eau des communes de la plaine d'Akkar présentent des concentrations élevées en nitrates altérant ainsi leur qualité chimique, tandis que les ressources en eau du plateau d'Akkar sont généralement conformes du point de vue chimique.

Egalement, il est possible d'observer une augmentation de la contamination microbiologique pour les communes ayant fait l'objet d'une comparaison, entre les analyses menées de 1994 à 1998 et celles réalisées en 2010, et dans une moindre mesure entre les analyses de 1994 à 1998 et nos propres analyses effectuées en 2020. Cette augmentation peut être attribuée au développement urbain survenu entre ces périodes à Al-Kayteh, une expansion qui n'est pas toujours accompagnée d'infrastructures de traitement des eaux usées, en raison de contraintes administratives et financières.

Ainsi, il est nécessaire d'étudier l'évolution de la qualité des ressources en eau d'un territoire en prenant en compte les caractéristiques de l'occupation des sols, notamment dans le cas d'un territoire marqué par une variété significative de paysages comme Al-Kayteh. En conséquence, une approche basée sur l'identification des types d'occupation des sols et les méthodes d'élimination des eaux usées au niveau des sites de prélèvement pourrait fournir une image plus claire des évolutions ainsi que des sources potentielles de contamination. La comparaison que nous avons réalisée donne de bons exemples de l'intérêt de notre approche, comme l'évolution de la qualité microbiologique des ressources en eau de Aayoun El-Ghezlane et de Borj El-Arab et l'évolution de la qualité chimique des ressources en eau de Bebnine, de Fnaydeq et de Qoubbet Chamra.

Par ailleurs, la comparaison des stations de prélèvement n'a pas permis d'établir un lien clair entre la contamination microbiologique et la contamination chimique, à l'exemple de Mhamra. Cette commune est la seule où tous les échantillons étaient conformes d'un point de vue microbiologique, mais aussi la seule où tous les échantillons ont fait l'objet d'une contamination chimique, indépendamment de la date des prélèvements.

Pour effectuer une comparaison pertinente à terme, il faudra déjà qu'elle s'inscrive dans le cadre d'un programme de surveillance et de gestion des ressources en eau. Il est nécessaire

d'aller vers une meilleure organisation des protocoles de prélèvement, comme d'indiquer systématiquement la nature de l'occupation du sol dans le voisinage de l'échantillon et d'assurer un suivi régulier des mêmes stations.

La contamination microbiologique des ressources en eau à Akkar et à Al-Kayteh est largement répandue. Les chiffres révèlent une situation alarmante mettant en danger la santé des habitants qui consomment ces eaux. Alors que la région d'Akkar est en marge des priorités de l'État, ses habitants se retrouvent dans une situation vulnérable, particulièrement dans le contexte de crise économique et d'effondrement que le Liban traverse actuellement. Cette pollution facilite et accélère la propagation des maladies, en particulier celles transmises par voie fécale comme le choléra, telle l'épidémie en cours au Liban (2022-2023).

Ainsi, le Liban était à la fin de 2022 et au début de 2023 confronté à une épidémie de choléra, principalement dans le nord du pays. D'après les statistiques du ministère de la Santé (les statistiques sont publiées quotidiennement sur le site du ministère de la Santé : moph.gov.lb, un exemple est donné dans l'Annexe 5), plusieurs clusters sont identifiés à Akkar et à Al-Kayteh, en particulier à Bebnine, qui enregistre de loin le plus grand nombre de cas au Liban, bien que cette commune ne soit pas parmi les plus grandes du pays.

Il est impossible de dissocier cette crise sanitaire du contexte et des objectifs de notre étude, qui cherche à identifier et à comprendre les sources de contamination microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh. Par conséquent, le réaménagement du territoire d'Al-Kayteh, la construction d'infrastructures aptes à éliminer correctement les eaux usées, ainsi que la mise en place d'un programme de surveillance et de suivi des eaux, contribueraient à la protection des habitants et des ressources en eau, permettant ainsi une intervention rapide en cas de détection de contamination.

**Chapitre V : Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité des
ressources en eau à Al-Kayteh**

Après avoir étudié l'état et l'évolution de l'occupation des sols à Al-Kayteh, et caractérisé la qualité de la ressource en eau, nous allons chercher à identifier les liens potentiels au sein de ce jeu de données. Nous commencerons par présenter la méthodologie utilisée, puis nous analyserons les résultats obtenus et procéderons à leur spatialisation.

1. Méthodologie

Notre méthodologie repose sur la création d'un tableau de synthèse qui compile toutes les informations relatives aux sites de prélèvement, suivi de leur examen au moyen d'une étude statistique. Ce tableau englobe les deux groupes de variables déjà décrites, à savoir les types d'occupation des sols et la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh. L'étude fait l'objet d'une analyse statistique visant à déceler les liens entre ces différents paramètres et à identifier les impacts de l'occupation des sols sur la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh. Il est essentiel de noter que l'analyse et la discussion des résultats seront réalisées en utilisant d'autres données relatives aux sites de prélèvements, notamment le rapport R (CTT/SF), les données hydrogéologiques des stations, des images satellites, ainsi que les photos et les notes d'observation prises sur place.

1.1. La construction du tableau de synthèse

Le tableau regroupe l'ensemble des informations qui caractérisent chaque site de prélèvement. Les données sont qualitatives, informations relatives à l'identification de la ressource, l'occupation du sol, et quantitatives, critères portant sur la qualité de la ressource en eau.

1.1.1. Sources de données

Pour identifier les types d'occupation des sols sur chaque site de prélèvement, nous utiliserons plusieurs sources de données :

- Les photographies, les entretiens, les observations et les notes prises au cours de la campagne d'échantillonnage,
- La carte de l'occupation du sol au Liban en 2017, établie par le CNRS-Liban et déjà présentée,
- L'application Google Earth Pro, qui propose des images satellitaires de très haute résolution, y compris des photographies d'Al-Kayteh prises à la date des prélèvements (2020). Ces photos possédaient une meilleure définition que les photos satellites open source que nous avons pu consulter ("sentinel 2" par exemple).

Les données relatives à la qualité des ressources en eau à Al-Kayteh proviennent des résultats des analyses microbiologiques et chimiques que nous avons effectuées sur place (cf chap. IV).

1.1.2. Les informations relatives à l'identification de la ressource

Nous avons attribué un code d'identification (ID) à chaque échantillon. Cependant, par souci de respect de la confidentialité des propriétaires, en particulier pour les puits, nous ne pourrions pas divulguer les noms des puits, afin de se conformer au Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) qui régit le traitement des données. Dans le cas des puits, l'anonymat contribue à instaurer un climat de confiance avec les propriétaires.

En ce qui concerne les sources, la situation est moins délicate étant donné qu'elles sont principalement destinées à un usage collectif. Par conséquent, dans ce contexte, nous avons mentionné le nom de certaines sources dans le chapitre IV pour enrichir la comparaison. Nous allons également dévoiler l'emplacement de certaines sources dans ce chapitre au cours

de la discussion des résultats. Il est à noter que les habitants se sont généralement montrés accueillants et très reconnaissants, et aucun problème significatif de sécurité ou de confiance n'a entravé la réalisation de notre travail.

Nous allons également indiquer la nature de chaque ressource, qu'il s'agisse d'un puits ou d'une source. Cette information revêt une importance considérable et se révélera très utile, car les sources sont plus vulnérables à la pollution en raison de leur proximité avec la surface, comme expliqué dans le chapitre II.

Au sein de cette thématique, le tableau de synthèse comportera donc deux colonnes dédiées à ces aspects. :

Tab. 25 - Les informations identifiants la nature de la ressource

| Titre de la colonne | Contenu |
|----------------------------|------------------------------------|
| ID échantillon | Le code ID accordé à l'échantillon |
| Nature | « Source » ou « Puits » |

1.1.3. Les types d'occupation du sol

L'occupation du sol sera représentée dans le tableau de synthèse par les types d'occupation du sol sur les sites de prélèvement. L'objectif principal de cette partie est de préciser le type d'occupation du sol (artificialisé, agricole, mixte, ou surface naturelle), les sous-types (urbain, urbain peu dense, culture de plein champ, vergers ou surface naturelle) et la qualité du réseau d'égouts sur le site de prélèvement

On trouvera sous cette thématique sept colonnes dans le tableau de synthèse :

Tab. 26 - Les types d'occupation du sol

| Titre de la colonne | Contenu |
|----------------------------|---|
| Occupation du sol | « Artificialisé » ou « Agricole » ou « Mixte » ou « Surface naturelle » |
| Urbain | « Oui » ou « Non » |

| | |
|------------------------|---|
| Urbain peu dense | « Oui » ou « Non » |
| Culture de plein champ | « Oui » ou « Non » |
| Vergers | « Oui » ou « Non » |
| Surface naturelle | « Oui » ou « Non » |
| Egouts | « Oui » ou « Ancien » ou « Non » ou « Non Urbaine » |

Comme exposé dans le chapitre III, nous avons classé les types d'occupation du sol en trois catégories principales : les territoires artificialisés, les territoires agricoles et les surfaces boisées et naturelles (SBN). Ces trois catégories ont fait l'objet d'une cartographie et d'une analyse, dans le but de mieux appréhender le contexte, l'évolution et les caractéristiques du terrain.

Pour examiner minutieusement toutes les sources potentielles de contamination des ressources en eau, nous suggérons également d'identifier les sous-types d'occupation du sol présents sur chaque site de prélèvement. Ces sous-types d'occupation du sol permettent de caractériser les différentes activités humaines pouvant se développer sur un même type d'occupation du sol à Al-Kayteh. Les détails concernant la méthodologie de création de la légende et la définition des types et sous-types d'occupation des sols sont fournis dans le chapitre III.

Aucun échantillon n'a été prélevé dans une zone artificialisée non urbaine. Ainsi, tous les échantillons des territoires artificialisés correspondent aux "zones urbaines" et aux "zones urbaines peu denses", tandis que les sous-types des terrains agricoles correspondent aux "cultures de plein champ" et aux "vergers". Pour les SBN (surfaces boisées et naturelles), nous n'avons pas défini de sous-types spécifiques. La précision des sous-types d'occupation du sol (urbain, urbain peu dense, culture de plein champ ou vergers) sur les sites de prélèvements a été établie à l'aide des sources de données déjà présentées.

Ces choix résultent d'un travail de recherche approfondi et de comparaison entre les résultats portant sur les analyses de l'eau, d'une part, et les cartes ainsi que les autres sources de données présentées précédemment et les résultats des études antérieures, d'autre part. Cette démarche vise à découvrir d'éventuelles relations entre les résultats relatifs aux analyses de l'eau et les types d'occupation du sol dans leur ensemble. Elle nous permet d'observer les impacts potentiels de certains sous-types en particulier sur la qualité des eaux. Parallèlement, nous mentionnerons l'état des réseaux d'égouts sur chaque site de prélèvement, car les eaux usées représentent la principale source de contamination microbiologique des ressources en eau dans les zones urbaines.

En effet, il est nécessaire d'établir une zone de protection autour des ressources en eau pour les préserver. Dans cette zone, toutes les activités, dépôts ou installations susceptibles de nuire directement ou indirectement à la qualité de l'eau doivent être interdits ou réglementés. Nous avons montré dans le chapitre I qu'au Liban, le périmètre de protection est initialement fixé à un rayon de 20 m autour des ressources en eau. Cependant, nous avons jugé que ce périmètre était trop restreint. Ainsi, nous avons opté pour un périmètre élargi de 30 mètres. Ainsi, nous avons identifié pour chaque site de prélèvement les types d'occupation du sol dans ce périmètre. Il est important de noter que malgré l'adoption d'un périmètre de 30 mètres, les types d'occupation du sol sur les stations d'échantillonnage n'ont généralement pas connu de changements significatifs jusqu'à une distance d'environ une centaine de mètres. Notre objectif était de décrire la nature de l'occupation du sol, qu'il soit artificiel, agricole, SBN ou mixte, sur les sites de prélèvement, et cette méthode a bien rempli cet objectif. En revanche, nous allons discuter et critiquer dans la discussion et la conclusion l'étendue du périmètre de protection au Liban et montrer qu'il faudrait définir les PPC en tenant compte des facteurs agissant sur la vulnérabilité des eaux souterraines.

Par ailleurs, dans une région confrontée à des problèmes sérieux d'élimination des eaux usées, il est crucial de déterminer la manière dont elles sont traitées dans les zones urbaines. Pour répondre à cette question, il est nécessaire de déterminer si la commune est pourvue d'un réseau d'égouts ou non, ainsi que d'évaluer sa qualité pour apprécier sa capacité à éliminer les eaux usées sur le site de prélèvement.

En somme, la partie du tableau de synthèse concernant l'occupation du sol se décomposera en trois thèmes :

- Le type d'occupation du sol sur le site de prélèvement : "Artificialisé", "Agricole", "Mixte" ou "Surface naturelle". Cette information sera indiquée dans la colonne "Occupation du sol". Si le type d'occupation du sol adjacent et le type de proximité sont différents, le type d'occupation du sol sera "Mixte". Dans notre étude, toutes les zones mixtes sont des zones artificialisés et agricoles.
- Les sous-types d'occupation du sol : Urbain, Urbain peu dense, Culture de plein champ, Vergers ou Surface naturelle. Les sous-types présents dans le périmètre de la station seront évalués en "Oui" ou "Non".
- Le réseau d'égouts : Oui, Ancien, Non ou Non Urbain. Pour les échantillons prélevés dans des zones artificialisées ou mixtes, nous utiliserons "Oui" si la commune dispose d'un réseau d'égouts de bonne qualité, "Ancien" si le réseau est ancien (comme détaillé dans le chapitre II), ou "Non" s'il n'y a pas de réseau. Pour les stations situées dans des zones agricoles ou des SBN, nous indiquerons "Non Urbain".

1.1.4. La qualité des ressources en eau

La qualité des ressources en eau d'Al-Kayteh sera représentée dans le tableau de synthèse par les résultats des analyses microbiologiques et chimiques des prélèvements que nous avons réalisé sur le terrain (détails dans le chapitre III). On trouvera les résultats sur dix colonnes

dans le tableau, deux concernent des marqueurs microbiologiques et huit concernent des marqueurs chimiques :

Tab. 27 - La qualité des ressources en eau

| | Titre de la colonne | Contenu |
|----------------------------|---------------------|---|
| Marqueurs microbiologiques | CTT | Le nombre de colonies de coliformes thermotolérants (en UFC/100 ml) selon l'échelle proposé |
| | SF | Le nombre de colonies de streptocoques fécaux (en UFC/100 ml) selon l'échelle proposé |
| Marqueurs chimiques | Fluorure | La concentration en fluorure (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Chlorure | La concentration en chlorure (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Nitrate | La concentration en nitrate (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Sulfate | La concentration en sulfate (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Sodium | La concentration en sodium (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Potassium | La concentration en potassium (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Calcium | La concentration en calcium (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |
| | Magnésium | La concentration en magnésium (mg/l), ou 0 si la concentration est inférieure à la limite de quantification |

Pour la représentation des résultats des analyses microbiologiques, nous avons décidé de nous limiter aux CTT et aux SF car ils nous fournissent des éléments importants de discussion. Nous avons écarté les coliformes totaux (CT) du tableau parce qu'ils ne donnent aucune information supplémentaire. Nous avons développé une classification inspirée de la légende

présentée dans l'étude de Halwani et Hamze (1998), utilisée également dans le chapitre III, pour simplifier la représentation des résultats.

Tab. 28 - Légende des résultats des analyses microbiologiques

| Valeur observée dans le tableau | Nombre de colonies |
|---------------------------------|---------------------|
| 0 | 0 colonie |
| 1 | 1 à 10 colonies |
| 2 | 11 à 20 colonies |
| 3 | 21 à 30 colonies |
| 4 | 31 à 40 colonies |
| 5 | 41 colonies ou plus |

Les données des analyses chimiques sont des variables quantitatives. Ainsi, nous avons assigné la valeur zéro aux valeurs ne dépassant pas la limite de quantification pour que le tableau soit compatible avec la méthode adoptée. Nous avons écarté le phosphate et le nitrite du tableau de synthèse parce que les résultats de ces marqueurs, sauf pour deux échantillons concernant le phosphate, étaient sous la limite de quantification. De ce fait ils n'offrent pas d'éléments d'analyse et de réponse à la problématique.

1.1.5. Le tableau de synthèse

Ainsi, le tableau de synthèse rassemblant toutes ces informations est exprimé ci-dessous :

Tab. 29 - Le tableau de synthèse des items retenus

| ID échantillon | Nature | Occupation du sol | Urbain | Urbain peu d' | Culture de | Vergers | Surface nat | Egouts | CTT | SF | Fluore | Chlore | Nitrate | Sulfate | Sodium | Potassium | Calcium | Magnésium |
|------------------|--------|-------------------|--------|---------------|------------|---------|-------------|------------|-----|----|--------|--------|---------|---------|--------|-----------|---------|-----------|
| AIN DAHAB-1 | Puits | Mixte | Non | Oui | Non | Oui | Non | Non | 1 | 2 | 0 | 20.73 | 10.64 | 20.18 | 11.02 | 0 | 49.45 | 26.28 |
| AIN DAHAB-2 | Source | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Non | 5 | 5 | 0 | 32.43 | 19.73 | 53.39 | 25.41 | 3.94 | 78.37 | 38.89 |
| AIN DAHAB-3 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Non | 5 | 5 | 0 | 6.05 | 5.62 | 3.40 | 10.40 | 1.12 | 69.66 | 35.82 |
| BEBNINE-1 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 1 | 2 | 0 | 35.75 | 18.58 | 42.51 | 23.28 | 1.24 | 94.01 | 8.05 |
| BEBNINE-2 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 0 | 1 | 1.33 | 35.60 | 20.80 | 16.30 | 30.99 | 2.77 | 73.26 | 28.96 |
| BEBNINE-3 | Source | Mixte | Oui | Non | Non | Oui | Non | Ancien | 1 | 0 | 0 | 32.98 | 21.76 | 36.52 | 18.56 | 1.26 | 98.33 | 6.51 |
| BEBNINE-4 | Puits | Mixte | Oui | Non | Non | Oui | Non | Ancien | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.99 | 1.66 |
| BEBNINE-5 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 0 | 0 | 0.84 | 31.49 | 15.84 | 13.13 | 25.39 | 9.33 | 27.95 | 23.74 |
| BEIT AYOUN-1 | Puits | Mixte | Oui | Non | Oui | Non | Non | Ancien | 1 | 1 | 0.24 | 22.19 | 65.33 | 0 | 30.97 | 3.79 | 83.29 | 44.06 |
| BEIT AYOUN-2 | Source | Mixte | Oui | Non | Oui | Non | Non | Ancien | 5 | 5 | 0 | 15.57 | 35.88 | 0 | 27.63 | 0 | 61.54 | 38.11 |
| BERKAYEL-1 | Source | Agricole | Non | Non | Non | Oui | Non | NonUrbaine | 1 | 0 | 0 | 25.75 | 23.00 | 17.36 | 16.68 | 2.35 | 99.75 | 12.71 |
| BERKAYEL-2 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 2 | 0 | 0 | 26.38 | 18.66 | 14.51 | 20.24 | 0 | 75.55 | 16.82 |
| BERKAYEL-3 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 17.89 | 8.63 | 5.23 | 9.21 | 0 | 27.86 | 5.67 |
| BORJ ARAB-1 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Non | 5 | 3 | 0 | 33.53 | 14.42 | 52.44 | 30.32 | 1.01 | 81.97 | 13.22 |
| BQARZA-1 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 24.04 | 19.78 | 0 | 13.71 | 0 | 34.72 | 7.41 |
| BQARZA-2 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 20.01 | 16.43 | 26.30 | 13.29 | 5.53 | 61.17 | 0.00 |
| BQARZA-3 | Puits | Mixte | Oui | Non | Oui | Non | Non | Non | 5 | 5 | 0 | 27.10 | 28.80 | 33.53 | 16.94 | 0 | 36.67 | 11.23 |
| BZAL-1 | Puits | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 1 | 5 | 0 | 14.69 | 9.06 | 4.38 | 8.03 | 0 | 72.16 | 10.21 |
| CHAN-1 | Source | Mixte | Oui | Non | Oui | Non | Non | Ancien | 2 | 3 | 0.23 | 21.39 | 30.31 | 54.92 | 16.95 | 0 | 111.34 | 37.99 |
| CHAN-2 | Source | Mixte | Oui | Non | Non | Oui | Non | Ancien | 1 | 2 | 0 | 15.82 | 9.05 | 3.70 | 9.25 | 0 | 38.84 | 32.10 |
| FNAIDEQ-1 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 2 | 5 | 0 | 5.63 | 19.59 | 3.66 | 7.56 | 1.22 | 23.76 | 20.24 |
| FNAIDEQ-2 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.20 | 0.00 |
| FNAIDEQ-3 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 5.93 | 6.34 | 3.51 | 2.74 | 0 | 38.57 | 20.59 |
| FNAIDEQ-4 | Source | Surface naturelle | Non | Non | Non | Non | Oui | NonUrbaine | 1 | 5 | 0 | 7.84 | 5.70 | 7.19 | 3.75 | 0 | 58.06 | 24.64 |
| FNAIDEQ-5 | Puits | Mixte | Non | Oui | Non | Oui | Non | Ancien | 1 | 1 | 0 | 14.17 | 47.01 | 2.33 | 8.17 | 0 | 1.22 | 0.00 |
| HMAYRA-2 | Puits | Mixte | Non | Oui | Non | Oui | Non | Ancien | 1 | 0 | 0.24 | 36.75 | 43.52 | 50.26 | 23.98 | 6.06 | 40.11 | 23.27 |
| HOUWEICH-1 | Source | Agricole | Non | Non | Non | Oui | Non | NonUrbaine | 1 | 1 | 0 | 17.16 | 67.70 | 10.85 | 16.28 | 1.05 | 92.87 | 30.02 |
| HOUWEICH-2 | Source | Agricole | Non | Non | Non | Oui | Non | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 15.90 | 16.38 | 8.47 | 9.63 | 0 | 54.41 | 0.00 |
| JDAYDE-1 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 1 | 4 | 0 | 71.98 | 48.06 | 112.14 | 46.79 | 18.65 | 165.87 | 7.89 |
| JDAYDE-2 | Source | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 5 | 5 | 0 | 14.91 | 17.43 | 6.90 | 8.39 | 0 | 88.11 | 2.76 |
| KARKAF-1 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 1 | 1 | 0.25 | 41.52 | 26.26 | 47.92 | 24.04 | 7.62 | 79.39 | 20.04 |
| KARKAF-2 | Source | Mixte | Oui | Non | Oui | Non | Non | Ancien | 5 | 5 | 0 | 40.40 | 34.41 | 47.91 | 26.69 | 2.40 | 64.90 | 7.50 |
| KOBBET CHAMRA-1 | Puits | Artificialisé | Non | Oui | Non | Non | Non | Ancien | 5 | 5 | 0 | 2.09 | 1.57 | 3.18 | 0 | 0 | 8.60 | 1.14 |
| MAJDALA-1 | Puits | Mixte | Non | Oui | Non | Oui | Non | Ancien | 0 | 0 | 0.56 | 24.06 | 21.77 | 1.67 | 18.27 | 2.08 | 20.84 | 21.02 |
| MECHMECH-1 | Puits | Agricole | Non | Non | Oui | Non | Non | NonUrbaine | 0 | 3 | 0 | 6.27 | 14.35 | 7.63 | 4.63 | 0 | 28.37 | 16.31 |
| MECHMECH-2 | Source | Agricole | Non | Non | Oui | Oui | Non | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 7.60 | 23.54 | 0 | 26.96 | 2.09 | 47.16 | 13.91 |
| MECHMECH-3 | Source | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 2 | 2 | 0 | 19.65 | 30.15 | 25.72 | 20.15 | 4.83 | 38.76 | 33.03 |
| MHAMRA-1 | Puits | Agricole | Non | Non | Oui | Non | Non | NonUrbaine | 0 | 0 | 1.54 | 24.74 | 38.99 | 14.04 | 39.49 | 3.76 | 28.19 | 29.28 |
| MHAMRA-2 | Puits | Mixte | Oui | Non | Oui | Non | Non | Oui | 0 | 0 | 0 | 18.70 | 50.74 | 0 | 13.53 | 1.83 | 36.04 | 24.80 |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | Source | Artificialisé | Non | Oui | Non | Non | Non | Non | 1 | 2 | 0 | 17.03 | 7.78 | 8.07 | 9.21 | 0 | 76.29 | 3.06 |
| QORNE-1 | Puits | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 0 | 0 | 0 | 16.86 | 17.95 | 32.37 | 8.68 | 1.07 | 73.82 | 29.61 |
| SAYSOUQ-1 | Puits | Agricole | Non | Non | Non | Oui | Non | NonUrbaine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.37 | 0 | 0.00 |
| WADI JAMOUS-1 | Puits | Mixte | Oui | Non | Non | Oui | Non | Ancien | 1 | 3 | 3.07 | 41.16 | 209.43 | 1.43 | 415.83 | 6.43 | 6.71 | 4.75 |
| WADI JAMOUS-2 | Source | Artificialisé | Oui | Non | Non | Non | Non | Ancien | 5 | 5 | 0 | 24.28 | 21.11 | 22.45 | 15.20 | 0 | 90.35 | 5.15 |

1.2. L'analyse statistique

Les données ont fait l'objet d'une étude statistique afin de rechercher les liens éventuels entre les types d'occupation du sol et la qualité des ressources en eau d'Al-Kayteh. L'analyse statistique a été réalisée avec l'aide de Mr Philippe CHAGNON, ingénieur d'étude à l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO). Cette phase de l'étude a nécessité plusieurs approches afin de déterminer celle qui était la plus appropriée pour synthétiser les différentes situations rencontrées sur le terrain et comprendre les liens qui existaient entre les types d'occupation des sols et la qualité microbiologique et chimique des eaux prélevées. D'autres variables, dites illustratives, sont associées à cet espace factoriel afin de déterminer les liens (par le calcul de valeurs test) qu'elles peuvent entretenir avec les axes factoriels (appelés aussi facteurs). Ici sont retenues la variable relative à la présence ou non d'égout et les concentrations des ions chimiques analysés dans les échantillons prélevés.

Pour les analyses microbiologiques, nous avons donc appliqué une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) qui est une méthode qui permet d'étudier l'association entre des variables qualitatives. Cette méthode permet d'aboutir à des cartes de représentation géométrique sur lesquelles on peut visuellement observer les proximités entre les modalités des variables qualitatives et les observations (xlstat, 2022).

Pour construire cette ACM, nous avons repris les items, ou variables dites actives, relatives au type d'occupation des sols du périmètre et des zones périphériques et aux égouts, soit sept variables. La première phase de l'analyse nous donne la part d'inertie portée par chaque axe factoriel (ou dimension) de l'ACM. Ces valeurs sont rangées par ordre d'importance, de la plus élevée à la plus faible, correspondant à la part d'information portée par le jeu de données des variables utilisées pour construire ces espaces factoriels. Dans le graphique (Fig. 80) suivant sont réparties les valeurs propres non nulles par axe et le pourcentage d'inertie correspondant :

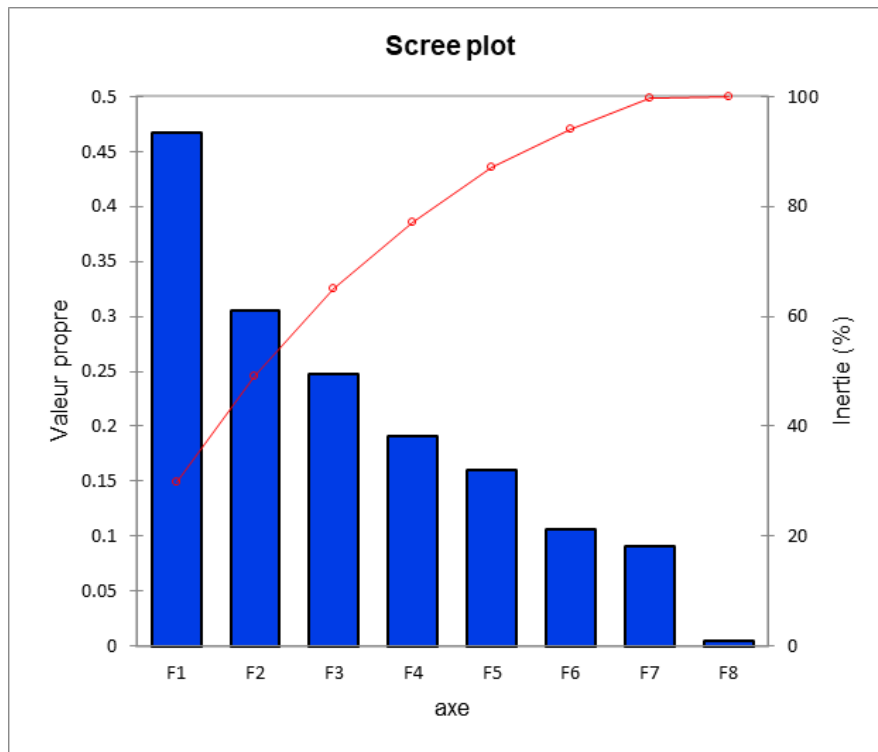


Fig. 80 - Les valeurs propres non nulles et le % d'inertie correspondant

Nous avons ensuite retenu les axes F1 (inertie 29.755%) et F2 (inertie 19.393%), leur inertie cumulée représentant 49,15 %. Le tableau de coordonnées et de contributions des variables actives (et de ses modalités) dans l'espace factoriel apparaît ci-dessous (Tab. 30 - *Tableau*) :

Tab. 30 - Tableau de coordonnées et de contributions des variables actives (et de ses modalités) dans l'espace factoriel

| Modalités | Coordonnées | | Contribution | |
|-------------------------------------|-------------|--------|--------------|--------|
| | F1 | F2 | F1 | F2 |
| Occupation du sol-Agricole | 0.725 | -1.418 | 2.552 | 15.004 |
| Occupation du sol-Artificialisé | -0.654 | 0.817 | 4.451 | 10.659 |
| Occupation du sol-Mixte | -0.698 | -0.625 | 4.734 | 5.835 |
| Occupation du sol-Surface naturelle | 1.813 | 0.804 | 18.256 | 5.514 |
| Urbain-Non | 0.824 | -0.483 | 9.908 | 5.223 |
| Urbain-Oui | -0.753 | 0.441 | 9.047 | 4.769 |

| | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Urbain peu dense-Non | 0.060 | 0.175 | 0.094 | 1.241 |
| Urbain peu dense-Oui | -0.377 | -1.109 | 0.593 | 7.858 |
| Culture de plein champ-Non | 0.092 | 0.097 | 0.207 | 0.351 |
| Culture de plein champ-Oui | -0.359 | -0.377 | 0.807 | 1.363 |
| Vergers-Non | 0.027 | 0.551 | 0.015 | 10.033 |
| Vergers-Oui | -0.063 | -1.314 | 0.036 | 23.926 |
| Surface naturelle-Non | -0.403 | -0.179 | 4.057 | 1.225 |
| Surface naturelle-Oui | 1.813 | 0.804 | 18.256 | 5.514 |
| Egout-Ancien | -0.685 | 0.088 | 7.160 | 0.182 |
| Egout-Non | -0.596 | 0.261 | 1.482 | 0.435 |
| Egout-Non Urbain | 1.305 | -0.233 | 17.738 | 0.867 |
| Egout-Oui | -0.935 | -0.012 | 0.608 | 0.000 |

Le Tab. 31 rassemble les coordonnées et valeurs tests des variables illustratives, les valeurs affichées en gras étant les valeurs test significatives au seuil $\alpha=0,1$:

Tab. 31 - Tableau des coordonnées et valeurs tests des variables illustratives

| Modalités supplémentaires | Coordonnées | | Valeurs tests | |
|---------------------------|-------------|--------|---------------|---------------|
| | F1 | F2 | F1 | F2 |
| Nature-Puit | -0.367 | -0.077 | -2.521 | -0.531 |
| Nature-Source | 0.402 | 0.085 | 2.521 | 0.531 |
| CTT-0 | 0.608 | -0.108 | 2.870 | -0.511 |
| CTT-1 | -0.104 | -0.364 | -0.488 | -1.715 |
| CTT-2 | -0.115 | 0.676 | -0.239 | 1.403 |
| CTT-5 | -0.711 | 0.437 | -2.529 | 1.556 |

| | | | | |
|------|--------|--------|--------------|--------------|
| SF-0 | 0.476 | -0.268 | 2.476 | -1.392 |
| SF-1 | -0.441 | -0.324 | -1.149 | -0.843 |
| SF-2 | -0.574 | -0.069 | -1.347 | -0.162 |
| SF-3 | -0.406 | -0.122 | -0.841 | -0.254 |
| SF-4 | -0.707 | 0.933 | -0.707 | 0.933 |
| SF-5 | -0.022 | 0.581 | -0.085 | 2.200 |

Les valeurs propres, les cosinus carrés des variables actives et illustratives ainsi que la qualité de représentation des stations sur l'espace factoriel, sont donnés dans l'annexe (Annexe 6).

Les cartes factorielles résultantes sont données dans la partie des résultats.

En ce qui concerne les analyses chimiques, l'analyse s'est avérée plus complexe car les résultats des analyses étaient proches et le taux de contamination est globalement faible, rendant difficile les regroupements permettant de distinguer différents ensembles de stations. Cela peut laisser penser également que l'impact lié aux modalités de l'occupation des sols est mineur. De ce fait, par exemple, nous avons essayé plusieurs méthodes d'analyses statistiques telle l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la méthode de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) -qui sont des méthodes parmi celles qui ont été utilisées dans certaines études antérieures internationales vu dans l'état de l'art- mais il s'est avéré qu'ils n'ont pas été probante, ne permettant pas de bien isoler des groupes de marqueurs, notamment car les résultats étaient très proches, comme nous l'avons déjà expliqué.

De plus, compte tenu du faible impact de l'occupation du sol sur la qualité chimique des eaux d'Al-Kayteh, il était difficile de discerner ce qui relève de la pollution et de la nature initiale des sols et des interactions qui existent entre ces différents éléments.

Ainsi, le principal résultat des analyses chimiques que nous retenons est donc que la contamination s'avère relativement faible et que l'impact de l'occupation du sol reste limité pour ce type de pollution. Néanmoins, afin d'identifier les liens entre les valeurs observées dans le tableau de synthèse et les types d'occupation du sol, nous avons analysé les marqueurs chimiques un à un dans l'environnement de l'ACM, qui s'appuie sur les modalités de l'occupation des sols (modalités) et certains résultats ont pu être identifier.

2. Résultats

L'ACM a donné lieu à deux représentations graphiques : la carte factorielle des variables actives et supplémentaires (modalités) et la carte factorielle des sites de prélèvement (observations).

La première reprend la représentation graphique des axes factoriels F1 et F2 qui représentent 49,15% de l'inertie de l'ACM. Les facteurs suivants, de moindre inertie, sont écartés car peu importants dans le cadre de cette étude et finalement dans la compréhension des liens potentiels entre la pollution et la caractérisation de l'occupation des sols. Elle est formée de deux composantes : les modalités (les types des occupations des sols et la qualité des égouts) et les modalités supplémentaires (les valeurs des CTT et des SF), leurs coordonnées sont données dans la méthodologie. Ces deux composantes sont les deux variables de notre problématique. Les barycentres des variables supplémentaires (point moyen des valeurs des CTT et des SF) sont placés sur le plan factoriel F1-F2 étudiés et nous apportent une idée sur les liens qu'ils entretiennent avec ces axes à travers les coordonnées spatiales et les valeurs test associées.

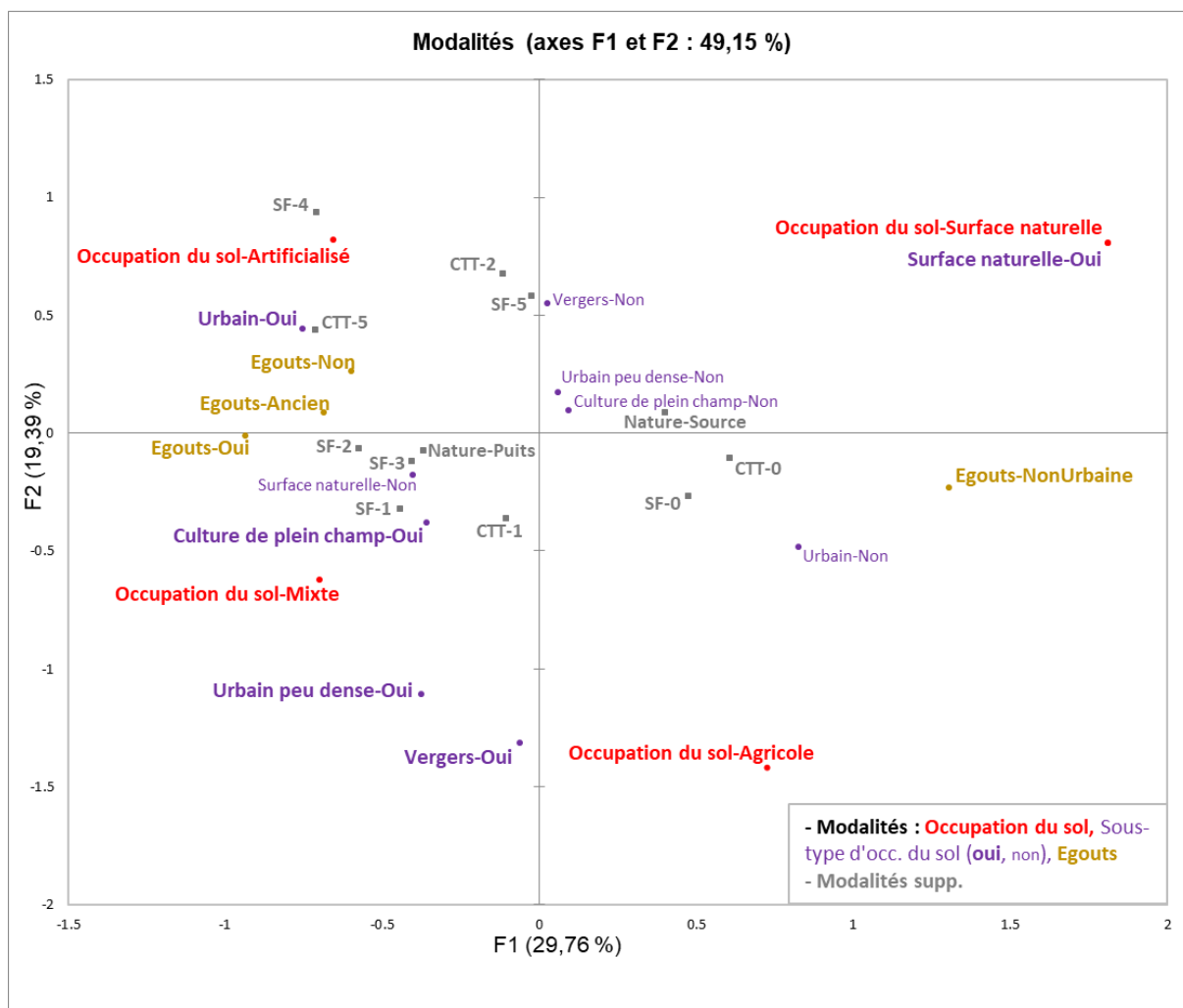


Fig. 81 - La carte factorielle des variables actives et supplémentaires (modalités)

Les coordonnées et les contributions des variables actives sont donnés dans le Tab. 30.

Les coordonnées et les contributions des observations sur les axes F1 et F2 sont donnés dans le Tab. 32 ci-dessous :

Tab. 32 - Les coordonnées et les contributions des observations sur les axes F1 et F2

| Observations | Coordonnées | | Contributions | |
|--------------|-------------|--------|---------------|-------|
| | F1 | F2 | F1 | F2 |
| AIN DAHAB-1 | -0.255 | -0.868 | 0.316 | 5.614 |
| AIN DAHAB-2 | -0.465 | 0.560 | 1.052 | 2.337 |
| AIN DAHAB-3 | -0.465 | 0.560 | 1.052 | 2.337 |
| BEBNINE-1 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |

| | | | | |
|--------------|--------|--------|-------|-------|
| BEBNINE-2 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| BEBNINE-3 | -0.512 | -0.341 | 1.273 | 0.866 |
| BEBNINE-4 | -0.512 | -0.341 | 1.273 | 0.866 |
| BEBNINE-5 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| BEIT AYOUB-1 | -0.587 | 0.019 | 1.676 | 0.003 |
| BEIT AYOUB-2 | -0.587 | 0.019 | 1.676 | 0.003 |
| BERKAYEL-1 | 0.531 | -0.868 | 1.368 | 5.623 |
| BERKAYEL-2 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| BERKAYEL-3 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| BORJ ARAB-1 | -0.465 | 0.560 | 1.052 | 2.337 |
| BQARZLA-1 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| BQARZLA-2 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| BQARZLA-3 | -0.569 | 0.064 | 1.573 | 0.030 |
| BZAL-1 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| CHAN-1 | -0.587 | 0.019 | 1.676 | 0.003 |
| CHAN-2 | -0.512 | -0.341 | 1.273 | 0.866 |
| FNAIDEQ-1 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| FNAIDEQ-2 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| FNAIDEQ-3 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| FNAIDEQ-4 | 1.240 | 0.444 | 7.469 | 1.470 |
| FNAIDEQ-5 | -0.274 | -0.912 | 0.364 | 6.207 |
| HMAYRA-2 | -0.274 | -0.912 | 0.364 | 6.207 |
| HOUWEICH-1 | 0.531 | -0.868 | 1.368 | 5.623 |
| HOUWEICH-2 | 0.531 | -0.868 | 1.368 | 5.623 |

| | | | | |
|------------------|--------|--------|-------|-------|
| JDAYDE-1 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| JDAYDE-2 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| KARKAF-1 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| KARKAF-2 | -0.587 | 0.019 | 1.676 | 0.003 |
| KOBLET CHAMRA-1 | -0.246 | -0.056 | 0.293 | 0.024 |
| MAJDALA-1 | -0.274 | -0.912 | 0.364 | 6.207 |
| MECHMECH-1 | 0.455 | -0.508 | 1.006 | 1.927 |
| MECHMECH-2 | 0.436 | -0.991 | 0.925 | 7.325 |
| MECHMECH-3 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| MHAMRA-1 | 0.455 | -0.508 | 1.006 | 1.927 |
| MHAMRA-2 | -0.640 | -0.007 | 1.989 | 0.000 |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | -0.227 | -0.012 | 0.251 | 0.001 |
| QORNE-1 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |
| SAYSOUQ-1 | 0.531 | -0.868 | 1.368 | 5.623 |
| WADI JAMOUS-1 | -0.512 | -0.341 | 1.273 | 0.866 |
| WADI JAMOUS-2 | -0.484 | 0.515 | 1.137 | 1.979 |

Nous avons également réalisé un graphique de représentation des stations de prélèvement sur le premier plan factoriel de l'ACM (Fig. 82). Sur ce graphique les stations sont distinguées selon que le prélèvement soit issu d'un puits ou d'une source (voir couleurs).

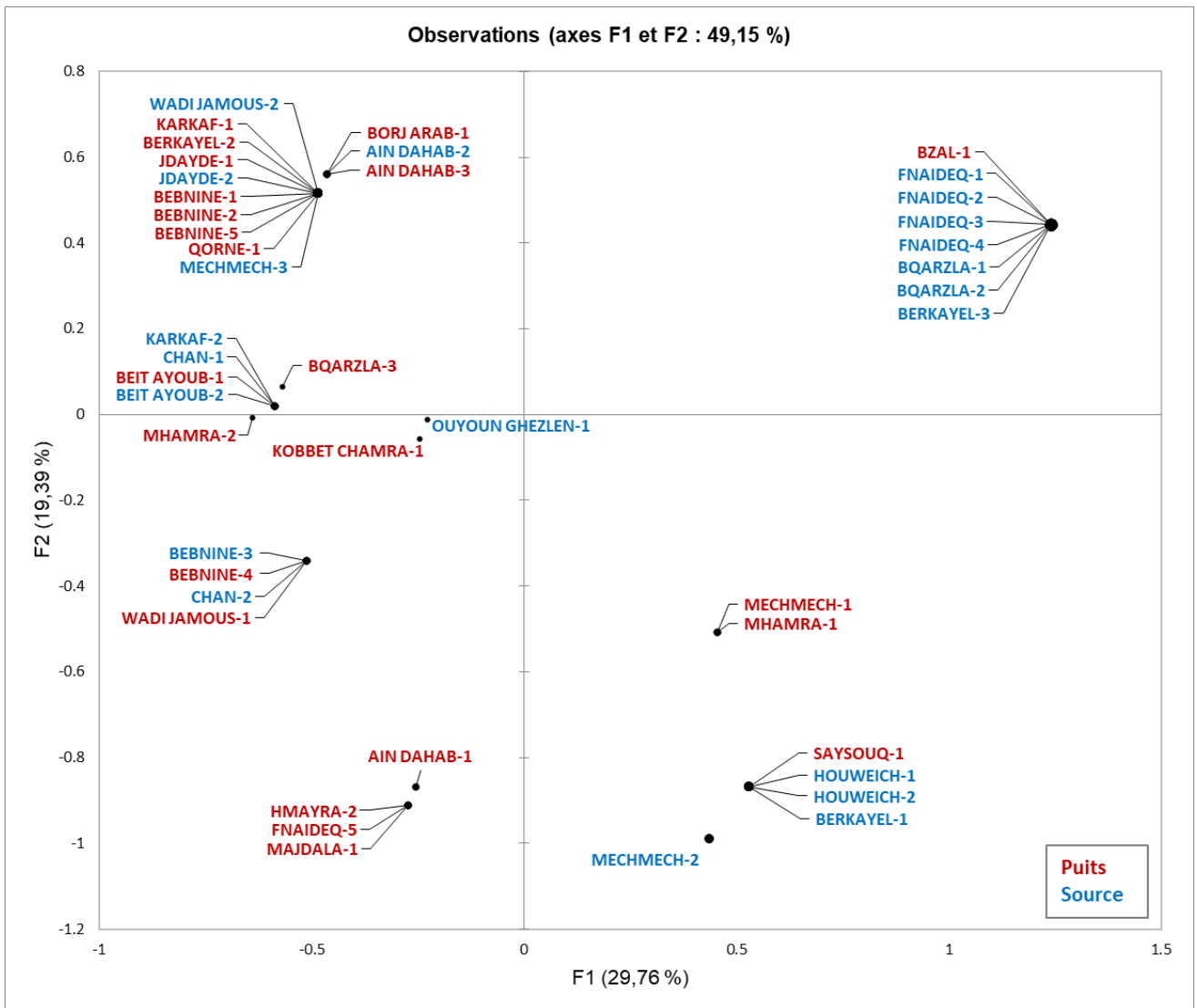


Fig. 82 - La carte factorielle des sites de prélèvement (observations)

Sur la Fig. 81, on voit que l'axe F1 met en relief l'artificialisation des sols de droite à gauche depuis les zones totalement naturelles sans construction ni égout jusqu'aux zones les plus organisées par l'habitat, voire la présence d'égout, à gauche. Ce gradient d'organisation est corrélé avec la pollution microbiologique où on voit que toutes les modalités supplémentaires représentant des contaminations microbiologiques se trouvent à gauche de l'axe F1, tandis que l'axe F2 oppose des milieux très distincts. Ainsi, nous retrouvons en haut de l'axe les zones très forestières et naturelles et les zones fortement urbanisées, et en bas de l'axe se trouvent les territoires agricoles, urbains peu denses et mixtes.

3. Discussion

L'ACM a montré l'existence de liens entre les types d'occupation du sol et la qualité des réseaux d'égouts d'une part, et la qualité microbiologique des ressources en eau d'autre part. Cependant, en tenant compte du faible taux de contamination chimique ainsi que des légères différences entre les résultats des stations, nous n'avons pas réussi à établir un lien fort et linéaire entre les occupations des sols et la qualité chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh. Ainsi, les impacts des occupations du sol sur la qualité chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh sont faibles. Par conséquent, nous avons utilisé une autre méthode pour tenter de déterminer les liens potentiels entre les occupations des sols et les concentrations observées de certains ions.

Nous n'avons pas réussi à mettre en évidence les impacts des territoires artificialisés non urbains sur la qualité des ressources en eau d'Al-Kayteh, car ceux-ci sont très faiblement présents sur le terrain, comme démontré dans le chapitre III. Toutes les stations relevant des territoires artificialisés concernent des zones urbaines (quel que soit leur densité). Ainsi, nous allons discuter les impacts de l'urbanisation sur la qualité des eaux d'Al-Kayteh.

3.1. Qualité microbiologique

Les résultats de l'ACM sur le premier plan factoriel (Fig. 81) mettent en évidence les liens étroits entre les types d'occupation du sol et la qualité microbiologique des eaux prélevées. Ils offrent une vision synthétique des situations rencontrées sur ce territoire, permettant de mettre en évidence une typologie de sites qui présentent des similitudes en ce qui concerne l'occupation du sol, la qualité des égouts et les résultats de l'analyse microbiologique. La Fig. 83 suivante qui exprime la carte factorielle des observations, rassemble ces informations.

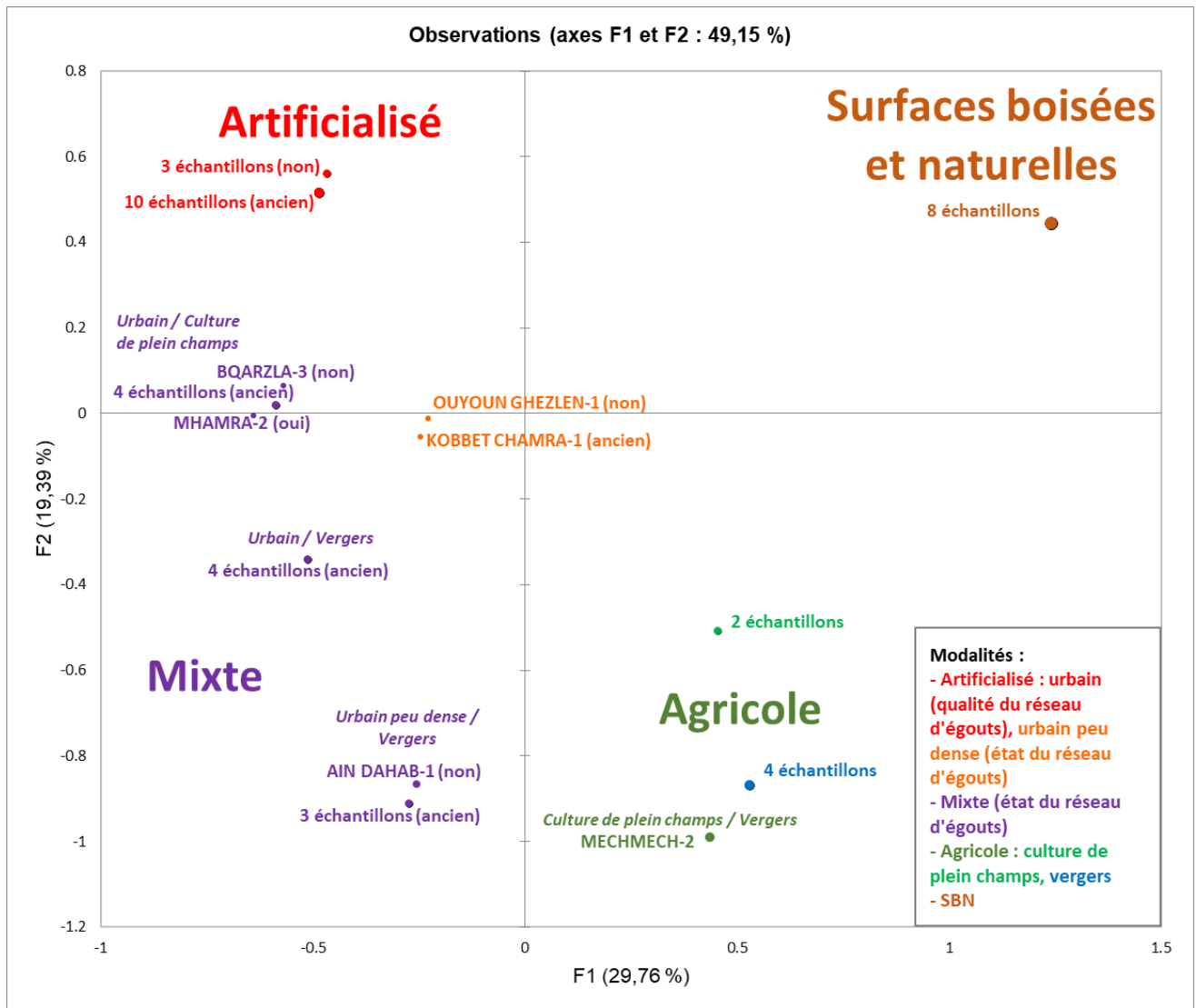


Fig. 83 - Résumé de la carte factorielle des observations

Le tableau (Tab. 33) ci-dessous présentent les échantillons constituant chaque groupe identifié sur le graphique.

Tab. 33 - Les types des occupations du sol et la qualité des égout des sites de prélèvements

| Modalités | | Observations | | Modalités supp. | | |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----|----|
| Occupation du sol | Sous-type d'occupation du sol | Egouts | ID échantillon | Nature | CTT | SF |
| Artificialisé (15 échantillons) | Urbain (13 échantillons) | Non | AIN DAHAB-2 | Source | 5 | 5 |
| | | | AIN DAHAB-3 | Puits | 5 | 5 |
| | | | BORJ ARAB-1 | Puits | 5 | 3 |
| | Ancien | 10 échantillons | BEBNINE-1 | Puits | 1 | 2 |
| | | | BEBNINE-2 | Puits | 0 | 1 |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|---|----------------|------------|--------------------------------------|--------|-----------|-------|---|---------------------|
| | | | | | BEBNINE-5 | Puits | 0 | 0 | | |
| | | | | | BERKAYEL-2 | Puits | 2 | 0 | | |
| | | | | | JDAYDE-1 | Puits | 1 | 4 | | |
| | | | | | JDAYDE-2 | Source | 5 | 5 | | |
| | | | | | KARKAF-1 | Puits | 1 | 1 | | |
| | | | | | MECHMECH-3 | Source | 2 | 2 | | |
| | | | | | QORNE-1 | Puits | 0 | 0 | | |
| | | | | | WADI JAMOUS-2 | Source | 5 | 5 | | |
| | | | | | Urbain peu dense (2 échantillons) | | | | | OUYOUN GHEZLEN-1 |
| KOBLET CHAMRA-1 | Puits | 5 | 5 | | | | | | | |
| Mixte (14 échantillons) | Urbain (10 éch.) | Culture de plein champs (6 éch.) | Non | 1 | BQARZLA-3 | Puits | 5 | 5 | | |
| | | | Ancien | 4 | BEIT AYOUB-1 | Puits | 1 | 1 | | |
| | | | | | BEIT AYOUB-2 | Source | 5 | 5 | | |
| | | | | | CHAN-1 | Source | 2 | 3 | | |
| | | Vergers (4 éch.) | Ancien | 4 | KARKAF-2 | Source | 5 | 5 | | |
| | | | | | MHAMRA-2 | Puits | 0 | 0 | | |
| | | | | | BEBNINE-3 | Source | 1 | 0 | | |
| | Urbain peu dense (4 éch.) | Vergers (4 éch.) | Ancien | 4 | BEBNINE-4 | Puits | 5 | 1 | | |
| | | | | | CHAN-2 | Source | 1 | 2 | | |
| | | | | | WADI JAMOUS-1 | Puits | 1 | 3 | | |
| | | | | | AIN DAHAB-1 | Puits | 1 | 2 | | |
| | | | | | | | FNAIDEQ-5 | Puits | 1 | 1 |
| | | | | | | | HMAYRA-2 | Puits | 1 | 0 |
| | | | | | | | MAJDALA-1 | Puits | 0 | 0 |
| Agricole (7 échantillons) | Culture de plein champs | | 2 | MECHMECH-1 | Puits | 0 | 3 | | | |
| | | | | MHAMRA-1 | Puits | 0 | 0 | | | |
| | Vergers | | 4 | BERKAYEL-1 | Source | 1 | 0 | | | |
| | | | | HOUWEICH-1 | Source | 1 | 1 | | | |
| | | | | HOUWEICH-2 | Source | 0 | 0 | | | |
| | | | | SAYSOUQ-1 | Puits | 0 | 0 | | | |
| | Culture de plein champs/Vergers | | 1 | MECHMECH-2 | Source | 0 | 0 | | | |
| SVN (8 échantillons) | | | 8 échantillons | BERKAYEL-3 | Source | 0 | 0 | | | |
| | | | | BQARZLA-1 | Source | 0 | 0 | | | |
| | | | | BQARZLA-2 | Source | 0 | 0 | | | |
| | | | | BZAL-1 | Puits | 1 | 5 | | | |
| | | | | FNAIDEQ-1 | Source | 2 | 5 | | | |
| | | | | FNAIDEQ-2 | Source | 0 | 0 | | | |
| | | | | FNAIDEQ-3 | Source | 0 | 0 | | | |
| | | | | FNAIDEQ-4 | Source | 1 | 5 | | | |

Une lecture approfondie de la carte factorielle des variables actives et supplémentaires (Fig. 81) nous permet de dégager les premiers résultats des impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh. En effet, en comparant l'emplacement et les coordonnées de chaque groupe de stations avec l'emplacement et les coordonnées des modalités supplémentaires, on peut considérer la contamination microbiologique moyenne de chaque groupe. Les différents modes d'occupation des sols sont répartis sur la Fig. 81, qui est la carte factorielle des modalités (occupation des sols), de la façon suivante :

- La partie haute/gauche correspond aux stations relevant des territoires artificialisés urbains.
- La partie basse/gauche correspond aux stations relevant des zones mixtes.
- La partie haute/droite correspond aux stations relevant des SBN.
- La partie basse/droite correspond aux stations relevant des territoires agricoles.

La Fig. 83 illustre cette distribution.

En parallèle, on peut bien voir sur la carte factorielle des modalités (Fig. 81) que les CTT-0 et les SF-0 sont situés dans la moitié droite du graphique, entre les SBN et les territoires agricoles, alors que les autres valeurs de CTT et de SF représentant une contamination microbiologique sont situées entre les territoires artificialisés urbains et mixtes. Celles-ci sont réparties de manière décroissante, du haut vers le bas de la moitié gauche du graphique. Simultanément, on peut remarquer également que les modalités qui se trouvent dans la moitié gauche du graphique se distribuent encore du haut vers le bas de la manière suivante :

- Occupation du sol : Artificialisé (urbain) → Artificialisés (urbain peu dense) et Mixte
- Egouts : Non → Ancien → Oui

Cela signifie que :

- Les stations relevant des zones urbaines ou mixtes sont généralement contaminées alors que le taux de contamination des zones non urbaines (agricoles et SBN) est remarquablement plus bas.
- Le degré de contamination est plus important dans les zones artificialisées urbaines que dans les territoires artificialisés urbains peu denses et mixtes.
- Le degré de contamination dans les zones urbaines (denses, peu denses et mixtes) est plus important dans les zones sans réseau d'égouts que dans les zones avec un ancien réseau d'égouts, il est également plus important dans les zones avec un ancien réseau d'égouts que dans les zones avec un réseau d'égouts.

3.1.1. Les territoires artificialisés urbains

On compte 15 stations situées dans des territoires artificialisés. La majorité des échantillons sont situés dans des zones urbaines sauf deux qui se trouvent dans des zones urbaines peu denses. Par conséquent, tous les échantillons provenant de territoires artificialisés concernent des zones urbaines. Une grande partie de ces 15 sites est équipée d'anciens réseaux d'égouts (11 échantillons), tandis que les quatre sites restants se trouvent dans des communes ou des quartiers dépourvus de réseau d'égouts. Par conséquent, aucune des stations situées dans des territoires artificialisés n'est équipée d'un réseau d'égouts de qualité. Il est à noter que l'échantillon MHAMRA-2 se trouve dans une zone mixte dotée d'un réseau d'égouts de qualité.

Tout d'abord, il est important de noter que les quatre échantillons prélevés dans des zones non équipées d'un réseau d'égouts sont contaminés : AIN DAHAB-2, AIN DAHAB-3, BORJ ARAB-1 (zone urbaine) et OUYOUN GHEZLEN-1 (zone urbaine peu dense). On peut constater (Tab. 33) que la contamination des trois échantillons prélevés dans des zones

urbaines non équipées (AIN DAHAB-2, AIN DAHAB-3 et BORJ ARAB-1) est extrêmement élevée. Par contre, ces trois échantillons ont été prélevés en plein cœur des communes d'Ain El-Dahab (Fig. 84) et de Borj El-Arab (Fig. 85), qui sont de grandes communes en plein développement, comme nous l'avons vu dans le chapitre III. Nous ne pouvons malheureusement pas localiser les échantillons sur les cartes par respect du Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) qui régit le traitement des données. Par ailleurs, Ain El-Dahab se développe sur des formations calcaires karstifiées, ce qui facilite l'infiltration des eaux usées vers les nappes. Quant à Borj El-Arab, la ville se trouve dans une zone poreuse qui présente une vulnérabilité considérable des sols aux polluants.

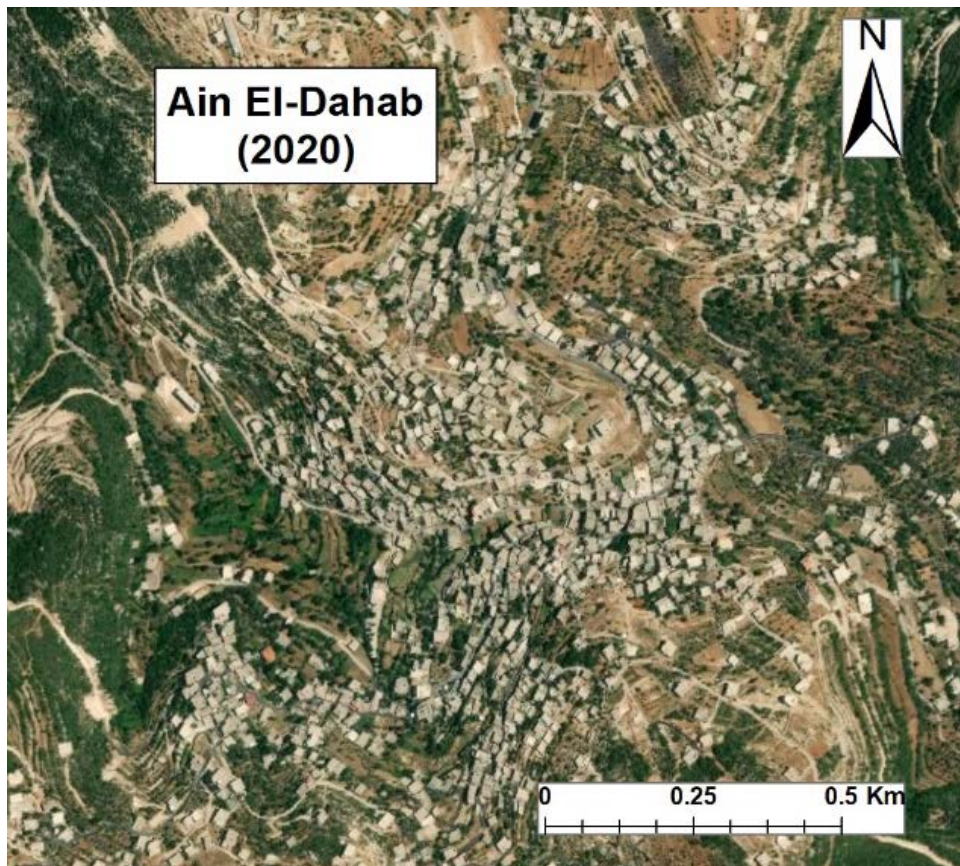


Fig. 84 - Ain El-Dahab en 2020

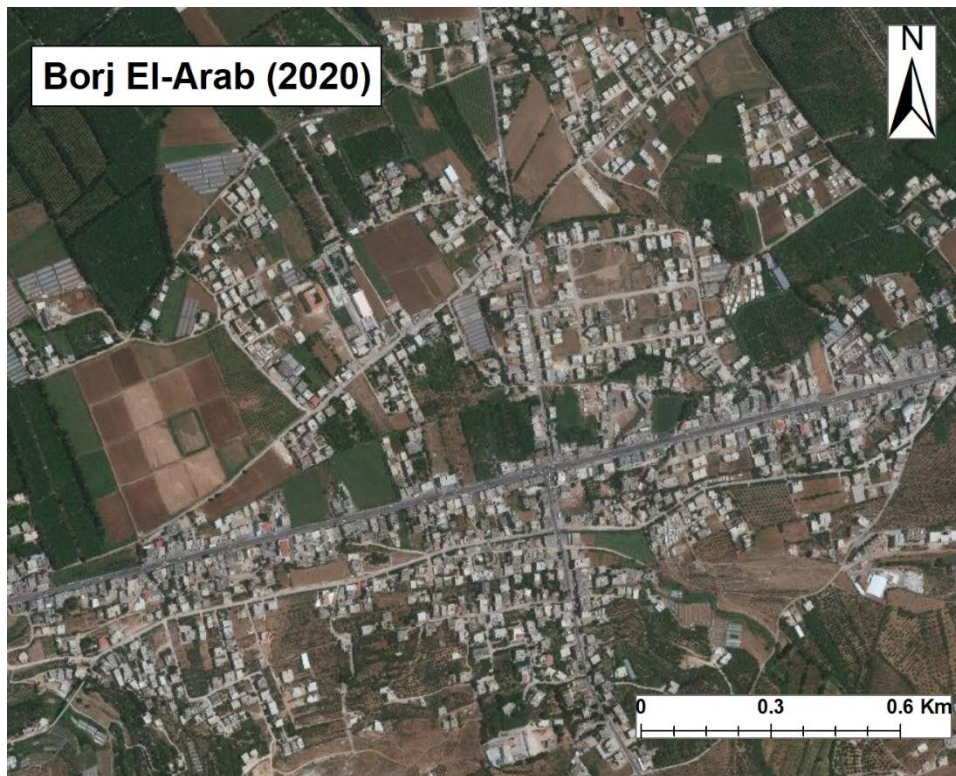


Fig. 85 - Borj El-Arab en 2020

Cependant, et comme nous l'avons démontré dans le chapitre IV, les résultats des études antérieures menées à Borj El-Arab (Halwani et Hamze, 1998 ; Hamze *et al.*, 2010) ont montré que l'échantillon de 1997 était conforme alors qu'une contamination massive est apparue depuis au moins 2010. Ces résultats sont tout à fait logiques quand on sait que Borj El-Arab n'a jamais possédé un réseau d'égouts (le maire de Borj El-Arab, comm. pers.).

En revanche, la contamination de l'échantillon OUYOUN GHEZLEN-1, prélevé dans une zone urbaine peu dense, est faible. Cet échantillon était conforme en 1994 (Hamze, 1996), comme nous l'avons observé dans le chapitre IV. En effet, Aayoun El-Ghezlane est une petite commune (Fig. 86), développée sur des formations argileuses et marno-sableuses qui présentent une très faible transmissivité, ce qui limite sa vulnérabilité. Cependant, Aayoun El-Ghezlane est la commune d'Al-Kayteh qui a connu le développement urbain le plus important en pourcentage (296%) entre 2005 et 2017 (détails chapitre III). Ainsi, l'accumulation de ces facteurs anthropiques et hydrogéologiques sur la commune

explique parfaitement les facteurs qui ont contribué à l'altération de la qualité des eaux de la commune entre 1994 et 2020.

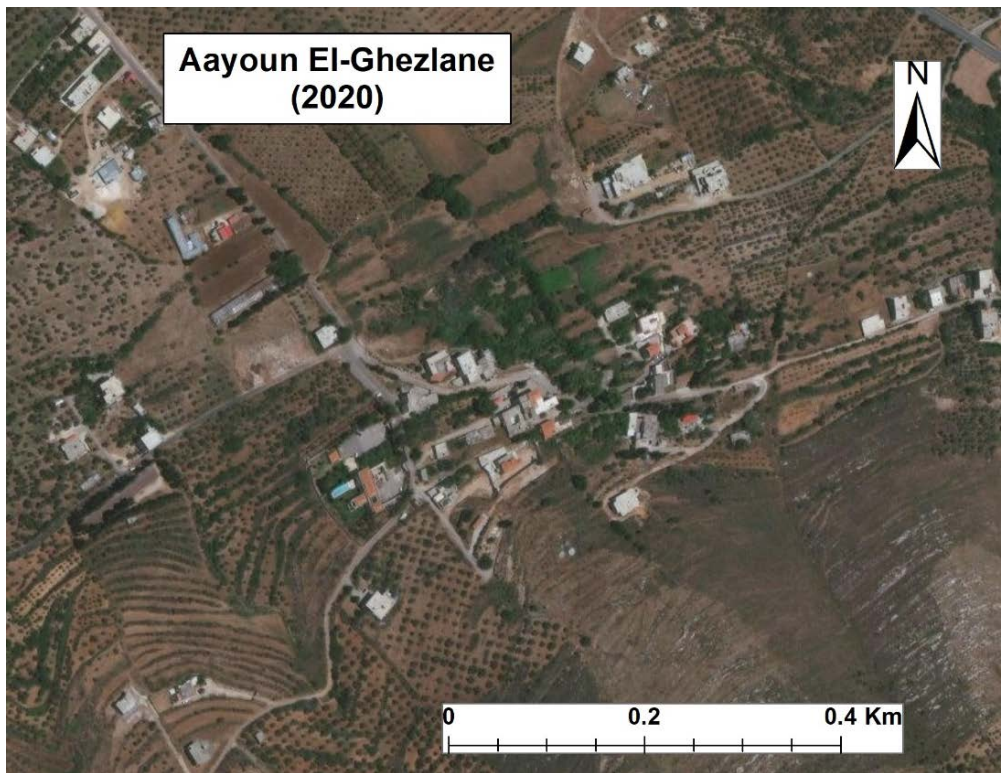


Fig. 86 - Aayoun El-Ghezlane en 2020

Les résultats des 11 autres échantillons (ancien réseau) sont très variés. Nous constatons tout d'abord que les échantillons des puits de QORNE-1 et de BEBNINE-5 sont conformes. A noter que ces deux échantillons ont été prélevés dans des zones à faible transmissivité. A contrario, JDAYDE-2 et WADI JAMOUS-2, qui correspondent tous les deux à des sources se trouvant dans de grandes communes, sont massivement contaminés. Entre ces deux extrêmes, on trouve six échantillons, localisés majoritairement dans des zones à faible transmissivité, qui présentent une contamination faible ou modérée : cinq puits (BEBNINE-1, BEBNINE-2, BERKAYEL-2, JDAYDE-1 et KARKAF-1) et une source (MECHMECH-3). Enfin, l'échantillon de KOBLET CHAMRA-1, situé dans une zone urbaine peu dense au sol filtrant et dotée d'un réseau d'égout ancien, a montré une contamination élevée.

Ces résultats démontrent que l'ancien réseau d'égouts d'Al-Kayteh ne présente pas la même capacité d'élimination des eaux usées dans les différents secteurs de son territoire, même au sein de la même commune, comme c'est le cas à Bebnine. Bien que deux échantillons soient conformes (BEBNINE-5 et QORNE-1), l'ancien réseau d'égouts n'a pas été en mesure de protéger la majorité des ressources en eau d'Al-Kayteh, en particulier les sources, qui sont plus vulnérables à la contamination microbiologique et ont montré des contaminations massives. La situation est pire dans les communes de Ain El-Dahab et Borj El-Arab, sujettes à des contaminations massives, qui ne disposent pas de réseau d'égouts et utilisent des fosses septiques. D'autre part, le sous-sol a contribué par sa géologie à limiter la vulnérabilité de plusieurs sites, comme à Bebnine.

3.1.2. Les territoires agricoles

Il y a sept échantillons prélevés sur des territoires agricoles : deux échantillons localisés dans des zones de cultures de plein champ, quatre échantillons dans des zones de vergers et un échantillon dans une zone mixte de culture de plein champ et de vergers. Parmi ces échantillons, quatre sont exempts de contamination (MHAMRA-1, HOUWEICH-2, SAYSOUQ-1 et MECHMECH-2), les trois autres sont contaminés (MECHMECH-1, BERKAYEL-1 et HOUWEICH-1). Nous allons aborder maintenant les cas de ces trois derniers échantillons.

Dans le détail, on remarque que l'échantillon MECHMECH-1 possède le rapport R (CTT/SF) le plus bas parmi tous les échantillons, avec une valeur de 0. Par conséquent, on suppose que la contamination de cet échantillon est d'origine animale, probablement liée aux activités d'élevage et de pâturage qui se déroulent dans les montagnes d'Al-Kayteh, où l'échantillon a été prélevé.

Les deux autres échantillons, BERKAYEL-1 et HOUWEICH-1, sont tous deux prélevés dans des sources légèrement contaminées. Ils se trouvent dans de petites vallées en dessous des villages. La distance entre BERKAYEL-1 (230 mètres d'altitude) et la maison la plus proche (240 mètres d'altitude) est de 130 mètres (Fig. 87), tandis que la distance entre HOUWEICH-1 (665 mètres d'altitude) et la maison la plus proche (675 mètres d'altitude) est de 80 mètres (Fig. 88).



Fig. 87 - La station BERKAYEL-1 en 2020

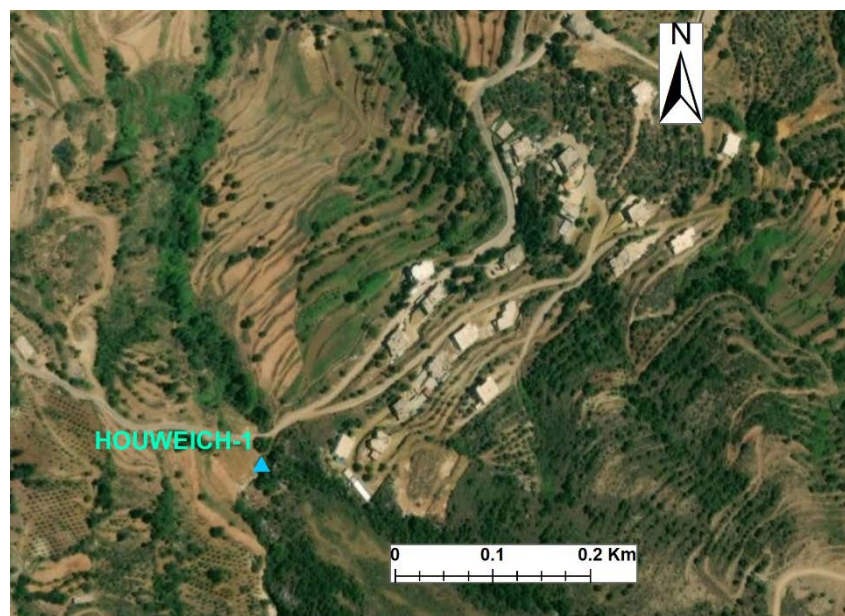


Fig. 88 - La station Houweich-1 en 2020

Ainsi, nous supposons que ces contaminations pourraient provenir des rejets des habitations voisines favorisées par la pente, des personnes qui viennent s'approvisionner en eau, voire même des animaux qui viennent s'abreuver. Ces résultats illustrent les problèmes d'assainissement à Al-Kayteh et la nécessiter de sensibiliser les habitants sur les sources de pollution et les gestes de protection des ressources en eau. Elles soulignent également l'importance d'établir scientifiquement des périmètres de protection autour des sources. Cela met également en évidence l'importance d'un suivi régulier de la qualité de l'eau à Al-Kayteh. Selon nos observations et les notes prises sur place, les habitants utilisent ces deux sources pour s'approvisionner en eau potable.

3.1.3. Les territoires mixtes

Étant donné que l'impact des activités agricoles sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh est très limité, on peut supposer que les contaminations observées dans les zones mixtes proviennent des zones urbaines adjacentes ou à proximité, tout en tenant compte de la présence des activités agricoles sur ces sites. Parmi les 14 échantillons des territoires mixtes, on trouve un échantillon qui se trouve dans une zone équipée d'un bon réseau d'égouts, 11 échantillons qui se trouvent dans des zones équipées d'un ancien réseau d'égouts et deux échantillons qui se trouvent dans des zones sans réseau d'égouts. Ces sites sont répartis entre 10 zones urbaines/agricoles et quatre zones urbaines peu denses/agricoles.

La seule station relevant d'une zone équipée d'un bon réseau d'égouts, MHAMRA-2 (urbain/culture de plein champ), est conforme du point de vue microbiologique, malgré son emplacement sur des sols filtrants. En revanche, les deux stations non équipées étaient contaminées : BQARZLA-3 (urbain/cultures de plein champ) l'est massivement tandis qu'AÏN DAHAB-1 (urbain peu dense/vergers) l'est moyennement.

Pour les 11 sites (six puits et cinq sources) dotés d'un ancien réseau d'égouts, les résultats sont très variés. Les six puits sont répartis entre trois sites urbains/agricoles et trois sites urbains peu denses/agricoles : les trois puits relevant des zones urbaines/agricoles (BEIT AYOUB-1, BEBNINE-4 et WADI JAMOUS-1) sont moyennement contaminés et se trouvent dans des zones allant d'une médiocre à une très faible transmissivité, et les trois puits relevant des zones urbaines peu denses/agricoles sont conformes (MAJDALA-1, sous-sols argileux et marno-sableux) ou faiblement contaminés (FNAIDEQ-5 et HMAYRA-2 sont aussi dans des zones à transmissivité médiocre ou faible). Les sources, quant à elles, sont toutes contaminées (BEBNINE-3, CHAN-1 et CHAN-2) voire extrêmement contaminées (BEIT AYOUB-2 et KARKAF-2).

Ainsi, les résultats issus des zones mixtes confirment ceux obtenus dans les territoires artificialisés. L'ancien réseau d'égout ne semble être efficace que dans le secteur de MAJDALA-1. En revanche, les deux stations relevant des sites sans réseau d'égouts (BQARZLA-3 et AÏN DAHAB-1) sont contaminées, et les sources présentent une très haute sensibilité à la contamination microbiologique.

Par ailleurs, les résultats confirment l'impact de la densité de l'urbanisation sur l'ampleur de la contamination microbiologique :

- Pour les puits, les résultats variaient en fonction de la qualité du réseau d'égouts et de la densité de l'urbanisation sur le territoire. En effet, dans les zones mixtes sans réseau d'égouts, le puits situé dans une zone urbaine/agricole (BQARZLA-3) est massivement contaminé, tandis que le puits situé dans une zone urbaine peu dense/agricole (AÏN DAHAB-1) l'est moyennement. En ce qui concerne les six puits des zones mixtes avec un ancien réseau d'égouts, ils se distribuent entre trois échantillons relevant des zones urbaines/agricoles (BEIT AYOUB-1, BEBNINE-4 et WADI JAMOUS-1), qui sont

moyennement contaminés, et trois échantillons relevant des zones urbaines peu denses/agricoles : deux échantillons sont faiblement contaminés (FNAIDEQ-5 et HMAYRA-2) et un est conforme (MAJDALA-1). Enfin, un échantillon situé dans un territoire mixte urbain/agricole équipé d'un bon réseau d'égouts (MHAMRA-2) est conforme.

- Pour les sources, elles se trouvent toutes les cinq dans des zones mixtes urbaines/agricoles dotées d'un ancien réseau d'égouts. Les échantillons démontrent une contamination, mais son ampleur est plus modérée que celle des sources situées dans des zones urbaines : une source est faiblement contaminée (BEBNINE-3), deux le sont moyennement (CHAN-1 et CHAN-2), et deux le sont très fortement (BEIT AYOUB-2 et KARKAF-2). Il est important de noter que la source KARKAF-2, la plus contaminée de notre étude, se trouve à proximité d'un canal d'évacuation des eaux usées à ciel ouvert (Fig. 89), ce qui remet fortement en question l'importance de régler le problème de l'assainissement et de mettre en service la station de traitement des eaux usées de Qoubbet Chamra.



Fig. 89 - Le site de la source de KARKAF-2 (Ahmad KAMALEDDINE, 14/09/2020)

3.1.4. Les surfaces boisées et naturelles (SBN)

La majorité des huit stations relevant des surfaces boisées et naturelles sont globalement de bonne qualité. On dénombre cinq échantillons conformes (BERKAYEL-3, BQARZLA-1, BQARZLA-2, FNAIDEQ-2 et FNAIDEQ-3) et trois contaminés (BZAL-1, FNAIDEQ-1 et FNAIDEQ-4). Cependant, les valeurs du rapport R (CTT/SF) des trois échantillons contaminés sont les plus basses (après l'échantillon de MECHMECH-1) : BZAL-1 (R = 0,0333), FNAIDEQ-1 (R = 0,014) et FNAIDEQ-4 (R = 0,0416). Par conséquent, nous pensons que ces contaminations pourraient être d'origine animale, d'autant plus que pendant la campagne d'échantillonnage, nous avons eu la chance de voir et de documenter le passage d'un troupeau de bétail dans les montagnes d'Akkar pendant la campagne d'échantillonnage (Fig. 90), non loin des stations de FNAIDEQ-1 (contaminé) et de FNAIDEQ-2 (conforme).



Fig. 90 - Des bétails dans les hautes montagnes d'Akkar à Fnaydeq (Ahmad KAMALEDDINE, 21/09/2020)

3.1.5. Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique des ressources en eau à Al-Kayteh

L'analyse de l'ACM et l'analyse complémentaire des résultats ont permis d'établir un lien et de mesurer les impacts de l'occupation du sol et la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh. Ainsi, nous pouvons regrouper les modes d'occupation du sol en fonction de leur impact en trois catégories :

1. Les territoires urbains : contaminations importantes

Les résultats ont clairement montré une relation entre les zones urbaines et la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh. Les zones urbaines ont un impact significatif sur la qualité de ces eaux, en particulier en ce qui concerne les eaux usées (Wafa *et al.*, 2020). L'absence de systèmes d'égouts a entraîné une contamination massive des puits (AIN DAHAB-3 et BORJ ARAB-1) et des sources (AIN DAHAB-2) en zones urbaines. La présence d'un réseau d'égouts, même ancien, peut réduire l'ampleur de la contamination des puits (BEBNINE-1, BEBNINE-2, BERKAYEL-2, JDAYDE-1 et KARKAF-1) voire en protéger certains (BEBNINE-5 et QORNE-1). Cependant, les sources ont montré une très forte vulnérabilité à la contamination microbiologique. Ainsi, même avec la présence d'un ancien réseau d'égouts, les sources relevant des zones urbaines sont fortement contaminées (JDAYDE-2, MECHMECH-3 et WADI JAMOUS-2). Ceci remet en question la qualité des réseaux d'égouts en service dans les communes d'Al-Kayteh et montre qu'ils ne sont pas tous également efficaces entre les différentes communes, voire entre les différents quartiers de la même commune (comme à Bebnine). Cependant, même si nous n'avons pas prélevé d'échantillon représentatif des zones urbaines dotées d'un bon réseau d'égouts, on pourrait s'attendre à ce que les ressources en eau des zones urbaines d'Al-Kayteh équipées d'un bon réseau d'égouts soient sans contamination. Les échantillons issus de la commune de Mhamra

(MHAMRA-1 : agricole, MHAMRA-2 : mixte), prélevés à proximité de l'agglomération urbaine de la commune (Fig. 91), renforcent cette hypothèse.

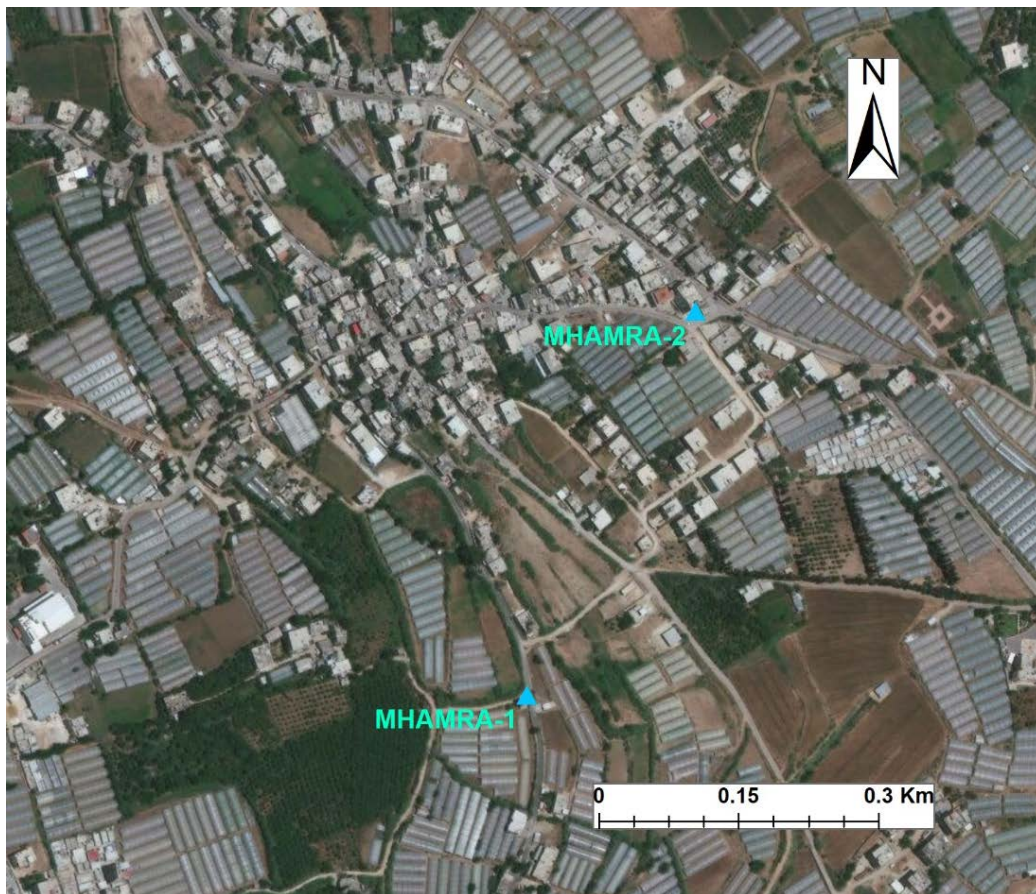


Fig. 91 - Les sites de MHAMRA-1 et de MHAMRA-2, Mhamra en 2020

Le tableau ci-dessous (Tab. 34) synthétise nos principaux résultats. Pour chaque catégorie, nous avons indiqué la qualité microbiologique de la majorité ou de la totalité des stations se trouvant dans ces conditions :

Tab. 34 - Synthèse sur l'impact des zones urbaines sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh

| Nature/Qualité des égouts | Oui | Ancien | Non |
|---------------------------|---|--|-------------------------|
| Puits | Pas de données (Supposition : propres) | Contaminations faibles ou moyennes, parfois propres. | Contaminations massives |
| Sources | | Contaminations fortes ou massives. | |

2. Les territoires mixtes et urbains peu denses : contaminations de moindre ampleur

Nous avons remarqué que la faible densité des zones urbaines réduit le niveau de contamination des ressources en eau d'Al-Kayteh. En effet, les zones urbaines peu denses et/ou mixtes présentent des résultats similaires à celles des territoires urbains (ne présentant pas une faible densité) mais avec des niveaux de contamination des eaux plus faibles. Ainsi, l'accumulation de facteurs considérés comme réduisant la contamination, tels que la faible densité des territoires urbains, la mixité des territoires urbains avec des territoires non urbains, la présence d'un réseau d'égouts même ancien et la faible vulnérabilité des sols, contribue à la réduction de l'ampleur de la contamination microbiologique des ressources. On distingue également le cas de MHAMRA-2, le seul échantillon relevant d'une zone urbaine ou mixte avec un bon réseau d'égouts, qui était conforme du point de vue microbiologique.

Le tableau ci-dessous (Tab. 35) synthétise nos résultats. Le niveau de contamination constaté varie en fonction de la densité et de la mixité des territoires, et il représente la qualité microbiologique de la majorité ou de la totalité des stations se trouvant dans ces conditions :

Tab. 35 - Synthèse sur l'impact des territoires mixtes et urbains peu denses sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh

| Nature/Qualité des égouts | Oui | Ancien | Non |
|---------------------------|--|--|------------------------------------|
| Puits | Propres | Contaminations faibles ou moyennes, voire très faibles pour les territoires peu denses et mixtes. Parfois propres. | Contaminations faibles ou moyennes |
| Sources | Pas de données (Supposition : propres) | Degré de contamination varié (massives, moyennes ou faibles) selon la densité des zones urbaines. | |

3. Les territoires non urbains : parfois affectés par les activités humaines et les animaux

Parmi les 15 prélèvements examinés dans les territoires agricoles et les surfaces boisées et naturelles d'Al-Kayteh, la plupart sont conformes (BERKAYEL-3, BQARZLA-1,

BQARZLA-2, FNAIDEQ-2 et FNAIDEQ-3, MHAMRA-1, HOUWEICH-2, SAYSOUQ-1 et MECHMECH-2). Cependant, nous avons tout de même identifié six échantillons contaminés. Nous pensons que la majorité de ces contaminations pourrait avoir une origine animale (BZAL-1, FNAIDEQ-1, FNAIDEQ-4 et MECHMECH-1). D'autres contaminations ont également été détectées, notamment deux sources (BERKAYEL-1 et HOUWEICH-1), dont la contamination pourrait résulter d'accidents ou provenir des rejets d'habitations situées à proximité, des habitants ou des animaux...

Ces résultats sont cohérents avec l'analyse de la carte factorielle des modalités. Les trois catégories (clusters) sont repérées sur la carte factorielle des observations (Fig. 92) :

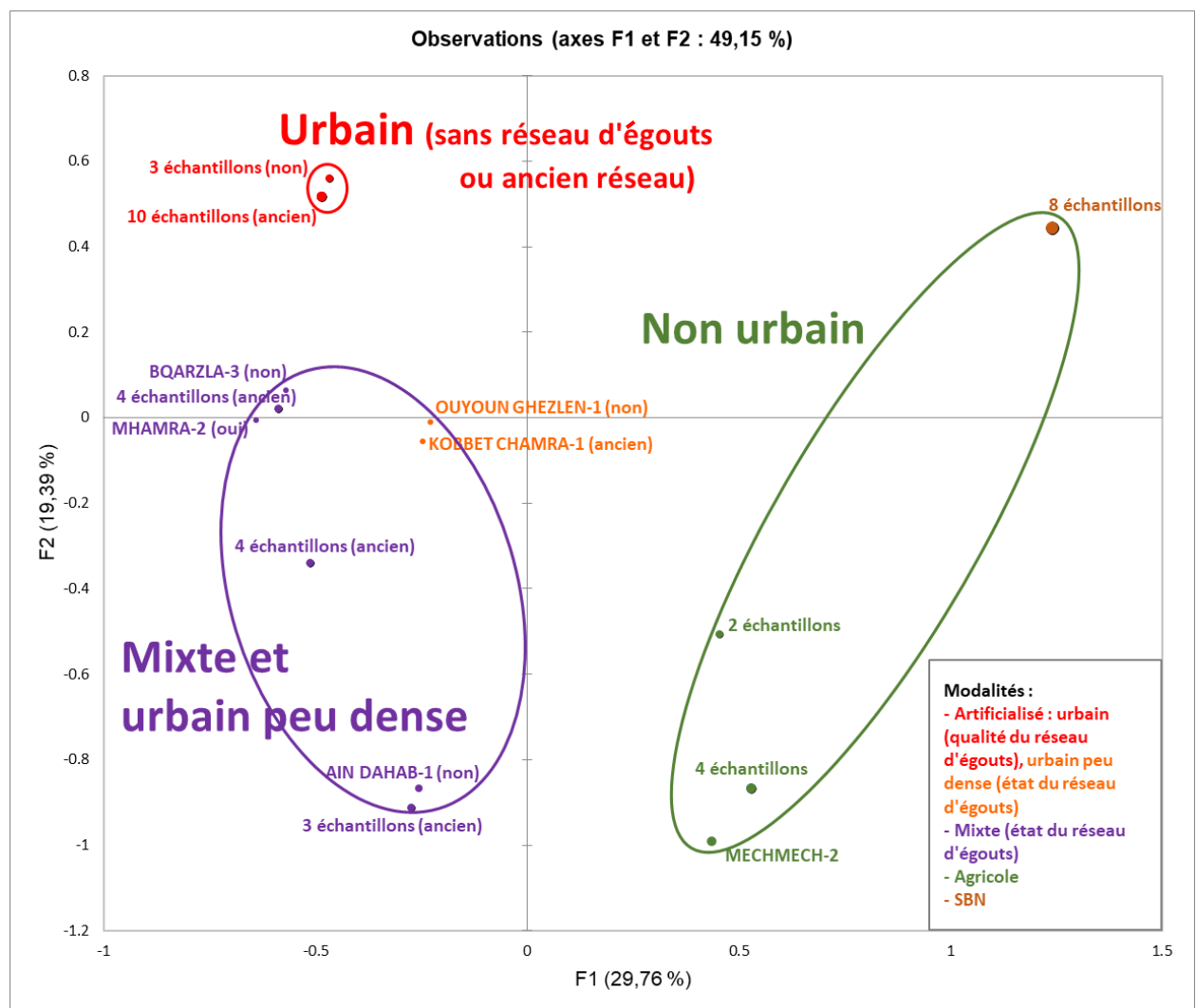


Fig. 92 - Les trois groupes d'occupation du sol impactant la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh

3.2. Qualité chimique

Le taux de contamination chimique des échantillons d'Al-Kayteh est relativement faible (16%), de même l'impact de l'occupation du sol sur la qualité chimique des ressources en eau est limité. Pour rechercher les impacts potentiels de l'occupation des sols d'Al-Kayteh sur les marqueurs chimiques analysés, nous avons simplement projeté les teneurs individuelles des ions en tant que variables numériques supplémentaires sur chacun des sites (observations) au regard des deux axes factoriels étudiés et ainsi éviter les calculs établis à partir de corrélations linéaires qui ne mettent pas en valeur les autres types de liens potentiels. Ainsi, nous avons remarqué que certains ions s'associent à des types et sous-types d'occupation des sols. Mais, comme les liaisons entre les types d'occupation du sol et les concentrations en ions chimiques ne sont pas linéaires, les vecteurs sont faibles. Nous pouvons cependant observer (Fig. 93) une certaine proximité des ions chlorure, sulfate et calcium avec les territoires urbains, et des nitrates avec les territoires mixtes et les cultures de plein champ.

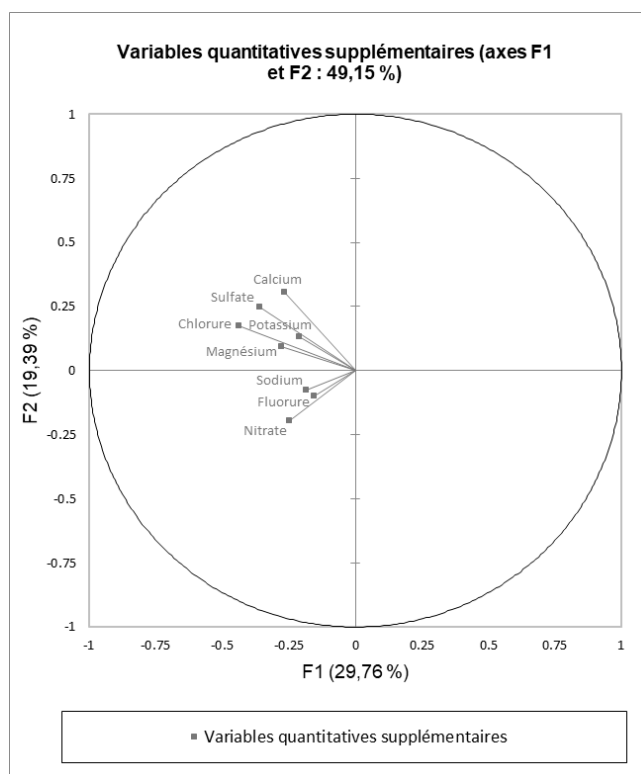


Fig. 93 - Représentation des concentrations des éléments chimiques sur le premier plan factoriel l'ACM (variables numériques supplémentaires)

Les coordonnées des variables numériques supplémentaires sont données dans l'annexe (Annexe 6).

3.2.1. Le nitrate

Pour repérer les stations ayant les concentrations les plus élevées en nitrates selon les types d'occupation du sol, nous avons mis les résultats des analyses portant sur les nitrates dans un espace 3D avec les axes F1 et F2 de l'ACM. L'axe z de profondeur représente la longitude de la station (donc du littoral à l'intérieur du pays) pour éviter le chevauchement des observations des sites. La couleur du point représente sa concentration en nitrate selon l'échelle donné dans le graphique. Le graphique résultant est exprimé ci-dessous (Fig. 94) :

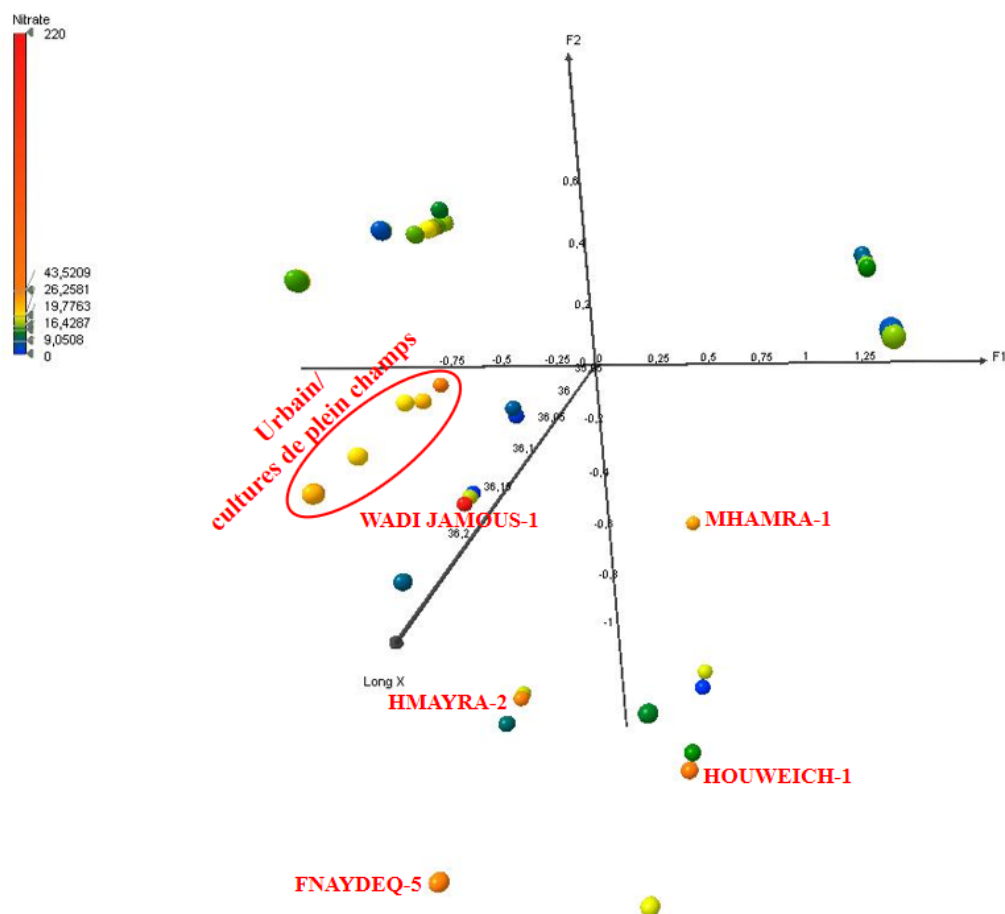


Fig. 94 - Les concentrations en nitrates des observations (échantillons) de la carte factorielle des observations (F1, F2)

Tout d'abord, il est à noter que les stations présentant les concentrations les plus élevées en nitrates à Al-Kayteh se trouvent principalement dans les territoires mixtes et agricoles, en particulier dans les zones mixtes urbaines/cultures de plein champ d'Al-Kayteh, où les stations forment un cluster que nous avons identifié sur le graphique (Fig. 94).

Par ailleurs, on relève neuf stations liées aux cultures de plein champ, réparties entre six stations urbaines/cultures de plein champ (BEIT AYOUB-1, BEIT AYOUB-2, BQARZLA-3, CHAN-1, KARKAF-2 et MHAMRA-2), deux stations exclusivement dédiées aux cultures de plein champ (MECHMECH-1 et MHAMRA-1) et une station associant les cultures de plein champ et les vergers (MECHMECH-2). Toutes ces stations ont présenté des concentrations de nitrates que l'on peut qualifier d'élevées (le seuil de contamination est 45 mg/l) : MHAMRA-1 (38,99 mg/l, cultures de plein champ), BEIT AYOUB-2 (35,88 mg/l, mixte), KARKAF-2 (34,41 mg/l, mixte), CHAN-1 (30,31 mg/l, mixte), BQARZLA-3 (28,8 mg/l, mixte), MECHMECH-2 (23,54 mg/l, cultures de plein champ/vergers) et MECHMECH-1 (14,35 mg/l, cultures de plein champ), avec deux stations dépassant même le seuil de 45 mg/l : BEIT AYOUB-1 (65,33 mg/l, mixte) et MHAMRA-2 (50,74 mg/l, mixte). Parmi ces stations, les concentrations les moins élevées en nitrates ont été observées à MECHMECH-1 et MECHMECH-2, situées dans les territoires agricoles des montagnes d'Akkar à Michmich. En revanche, en cohérence avec les résultats des études antérieures, toutes les stations de cultures de plein champ situées dans la plaine d'Akkar (MHAMRA-1 et MHAMRA-2) présentent des concentrations très élevées en nitrates. Ainsi, il semble que les pratiques agricoles liées aux cultures de plein champ dans la zone des hautes montagnes d'Akkar soient moins polluantes que dans la plaine d'Akkar.

Les résultats des stations situées dans les territoires mixtes urbains/vergers ou dans les zones de vergers sont variés. Dans ces zones, on trouve des stations présentant des concentrations dépassant le seuil de contamination : WADI JAMOUS-1 (209 mg/l, mixte), HOUWEICH-1

(67,7 mg/l, vergers) et FNAIDEQ-5 (47,01 mg/l, mixte), ainsi que des stations présentant des concentrations élevées, comme HMAYRA-2 (43,52 mg/l, mixte) et BERKAYEL-1 (23 mg/l, agricole). En revanche, on trouve également des stations avec des concentrations faibles en nitrates, comme AIN DAHAB-1 (10.64 mg/l, mixte), CHAN-2 (9.05 mg/l, mixte), BEBNINE-4 (0 mg/l, mixte) et SAYSOUQ-1 (0 mg/l, vergers). Ainsi, on peut conclure que les pratiques liées à la culture des vergers à Al-Kayteh peuvent parfois entraîner des contaminations élevées en nitrates.

Pour les territoires urbains, on peut voir sur le graphique (Fig. 94) et dans le tableau de synthèse (Tab. 29) que les concentrations en nitrates sont moins élevées que celles relevées dans les territoires mixtes ou agricoles. Ainsi, l'impact de l'urbanisation sur les concentrations en nitrates est limité. Quant aux stations caractérisant les surfaces boisées et naturelles, les concentrations en nitrates sont généralement faibles et n'ont pas un impact significatif sur la qualité des ressources en eau d'Al-Kayteh.

En conclusion, les pratiques liées à l'agriculture, notamment la sur-utilisation des engrais chimiques, peuvent conduire à des concentrations élevées et des contaminations en nitrates (Narany *et al.*, 2017 ; Rouabhia *et al.*, 2010 ; Brindha et Schneider, 2019) des ressources en eau d'Al-Kayteh. Ainsi, les pratiques agricoles liées aux cultures de plein champ entraînent une augmentation des teneurs, voire des contaminations en nitrates des ressources en eau. Il en est de même dans les secteurs dédiés aux vergers, où on peut parfois observer une pollution chimique par les nitrates ou une augmentation des teneurs en nitrates des ressources en eau. Cela est dû principalement à l'infiltration de la partie non valorisée des nitrates appliqués dans l'agriculture vers les eaux souterraines (Halwani *et al.*, 1999a).

En ce qui concerne l'urbanisation, son impact est moins important, mais elle peut parfois entraîner des contaminations élevées en nitrates dans les territoires mixtes d'Al-Kayteh. Il

convient de noter ici que les auteurs d'une étude réalisée en Malaisie ont obtenu des résultats similaires sur leur territoire (Narany *et al.*, 2017).

3.2.2. Le chlorure, le sulfate et le calcium

On peut observer sur le graphique (Fig. 93) que les concentrations en chlorure, sulfate et calcium des échantillons relevant des zones urbaines ont une faible tendance à être plus élevées que les autres. Il est remarquable que ces trois ions soient corrélés, et les stations présentant les valeurs les plus élevées pour chacun d'entre eux sont presque identiques. Parmi ces stations, on peut citer en particulier JDAYDE-1 (urbain), CHAN-1 (urbain/culture de plein champ), AIN DAHAB-2 (urbain), BORJ ARAB-1 (urbain), HMAYRA-2 (urbain peu dense/vergers), KARKAF-1 (urbain), KARKAF-2 (urbain/cultures de plein champ), BEBNINE-1 (urbain), BEBNINE-3 (urbain/vergers).

Ces stations se situent principalement dans des zones urbaines ou mixtes urbaines/agricoles, et elles sont toutes contaminées du point de vue microbiologique, avec des degrés de contamination très variés. De plus, à l'exception des deux échantillons de Bebnine (qui ne sont pas situés à Al-Abdé et ne sont donc pas vraiment très proches de la mer), ainsi que de l'échantillon de Borj El-Arab, tous les autres échantillons sont éloignés de la mer. Par conséquent, cela nous amène à exclure la possibilité que l'intrusion saline (Halwani *et al.*, 2001) soit à l'origine de ces concentrations. Cela suggère une infiltration des rejets urbains vers les eaux souterraines. De plus, elles présentent toutes des concentrations significatives en nitrates, en particulier celles situées dans des territoires mixtes. Ces résultats confirment que l'urbanisation a un impact, même faible, sur les concentrations en nitrates des ressources en eau d'Al-Kayteh.

3.2.3. Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité chimique des ressources en eau à Al-Kayteh

Les résultats des analyses chimiques des échantillons ont montré que l'impact de l'occupation des sols sur les ressources en eau d'Al-Kayteh est faible, car 84% des échantillons sont conformes du point de vue chimique. Cependant, nous avons tout de même pu établir des relations entre les concentrations observées et les types d'occupation du sol.

En effet, les concentrations les plus élevées des principaux ions chimiques ont été observées dans les territoires urbains, mixtes et agricoles, en particulier dans les secteurs de cultures de plein champ. Quant aux échantillons prélevés dans les secteurs en surfaces boisées et naturelles, ils ont confirmé la faiblesse des impacts (Halwani *et al.*, 1999b ; Halwani *et al.*, 2002), notamment dans les hautes montagnes d'Akkar.

Nous avons constaté que les concentrations les plus élevées en nitrates concernent les échantillons des zones mixtes et agricoles, notamment les cultures de plein champ des régions situées en contrebas des montagnes. Il apparaît également que la contamination en nitrates et en engrais chimiques des territoires agricoles peut s'accompagner de concentrations élevées voire de contaminations par d'autres ions chimiques majeurs, comme la contamination en fluorures dans le cas de l'échantillon MHAMRA-1 ou même la majorité des ions majeurs, comme dans les cas de deux échantillons particuliers, WADI JAMOUS-1 et JDAYDE-1.

Concernant les zones urbaines mais aussi mixtes, les échantillons de ces territoires ont généralement enregistré des concentrations relativement plus élevées que les autres en chlorure, sulfate et calcium. On pense que dans la majorité des cas, ces concentrations proviennent des rejets urbains, étant donné le mauvais état des réseaux d'égouts et l'absence d'activités industrielles sur les sites de prélèvements. Par ailleurs, l'urbanisation a un impact mineur sur les teneurs en nitrates observées sur les ressources en eau d'Al-Kayteh. En

revanche, nous n'avons pas remarqué de lien entre la nature de la station (puits ou source) et la qualité chimique de la ressource en eau.

Le tableau ci-dessous (Tab. 36) synthétise les impacts de l'occupation du sol sur la qualité chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh :

Tab. 36 - Synthèse des impacts de l'occupation des sols sur la qualité chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh

| Occupation du sol | Sous-type | Impact sur la qualité chimique |
|----------------------|------------------------|--|
| Agricole | Culture de plein champ | - Risque élevé de contamination par les nitrates. - Risque faible de contamination en ions majeurs, notamment le fluorure, le sodium et le potassium. |
| | Vergers | Même risques que les cultures de plein champ, mais de moindre importance. |
| Artificialisé urbain | | - Impact limité sur la concentration en nitrate. - Concentrations plus élevées que les autres échantillons en chlorure, sulfate et calcium. |
| SBN | | Pas d'impact détecté. |

3.3. Synthèse des impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau à Al-Kayteh

Les impacts de l'occupation du sol sur la qualité microbiologique et chimique des ressources en eau d'Al-Kayteh sont les suivants :

- Dans les territoires urbains :

La contamination microbiologique de ressources en eau d'Al-Kayteh est principalement causée par les eaux usées. En effet, les déchets humains et le système d'égouts déficient sont des éléments majeurs pour expliquer la pollution de l'eau dans les zones urbaines, eaux de surface qui peuvent s'infiltrer vers les eaux souterraines (Rashid *et al.*, 2018 ; Wafa *et al.*, 2020). Par conséquent, l'examen des réseaux d'égouts est essentiel pour comprendre l'impact des territoires urbanisés sur la qualité, notamment microbiologique, des ressources en eau

d'Al-Kayteh (Hamze *et al.*, 2010). Par ailleurs, outre la qualité des réseaux d'égouts, la densité de l'urbanisation, la nature des points de collecte (puits ou source) et la géologie jouent également un rôle significatif dans l'ampleur de la contamination microbiologique

Les sources situées dans les territoires urbanisés sont microbiologiquement contaminées en raison de leur proximité à la surface, les rendant vulnérables. En revanche, les puits situés dans des zones équipées d'un réseau d'égouts adéquat sont généralement propres, tandis que ceux situés dans des zones non équipées sont souvent fortement contaminés. Dans les communes dotées d'un ancien réseau d'égouts, qui représente la majorité des cas à Al-Kayteh, le réseau a réussi dans la plupart des cas à réduire l'ampleur de la contamination microbiologique des puits, et parfois à protéger les eaux souterraines.

Cependant, la faible densité de l'urbanisation, qu'elle soit due à la faible densité du tissu urbain ou à sa mixité avec des territoires non urbains, contribue également à la réduction du degré de contamination microbiologique des ressources en eau. De plus, la faible transmissivité du sous-sol peut également contribuer à réduire l'ampleur de la contamination microbiologique.

En ce qui concerne la qualité chimique, les ressources en eau d'Al-Kayteh situées dans des zones urbaines ont globalement tendance à avoir des concentrations relativement plus élevées en chlorure, sulfate et calcium que les autres. Par ailleurs, ces territoires ont également un impact limité sur les teneurs de nitrates observés (Narany *et al.*, 2017).

- Dans les territoires agricoles :

L'impact des territoires agricoles sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh est limité. Cependant, des contaminations légères ont été observées, nécessitant une meilleure gestion du secteur de l'élevage, ainsi une surveillance accrue et une meilleure protection de ces sources dans un périmètre de protection mieux défini à l'aide des modèles

multicritères ou en développant un modèle de vulnérabilité scientifiques. Cette recommandation concerne tous le Liban, mais les caractéristiques territoriales des territoires agricoles, notamment les plus proches des zones urbaines, ont permis de bien repérer le problème.

Les pratiques agricoles liées aux cultures de plein champ génèrent généralement des concentrations élevées en nitrates, tandis que les pratiques liées à la culture des vergers n'entraînent pas toujours une augmentation des niveaux de nitrates. Cette tendance est observée dans les territoires agricoles et mixtes situés en contrebas des montagnes.

Des études antérieures (Halwani et Hamze, 1998 ; Halwani *et al.*, 2001 ; Baroudi *et al.*, 2012), ainsi que la nôtre, ont montré que les engrais chimiques sont utilisés de manière excessive et inappropriée à Akkar, notamment dans la plaine d'Akkar caractérisée par des cultures de plein champ intensives en grandes surfaces, entraînant une augmentation des teneurs en nitrates, dépassant parfois les seuils réglementaires. Ces concentrations élevées en nitrates sont dans certains cas accompagnés par des concentrations élevées, voire dépassant les seuils de contamination, en ions chimiques majeurs (Halwani *et al.*, 1999a).

- Dans les territoires de type surfaces boisées et naturelles :

Les ressources en eau d'Al-Kayteh relevant des surfaces boisées et naturelles sont généralement propres et de bonne qualité (Halwani *et al.*, 1999b). Les échantillons, notamment ceux des hautes montagnes d'Akkar, présentent une très bonne qualité chimique. Cependant, la qualité microbiologique des échantillons des SBN peut parfois être affectée par le bétail et les animaux, entraînant ainsi une contamination microbiologique.

Malheureusement, nous n'avons pas pu créer une carte des risques de contamination des ressources en eau sur le terrain en raison du manque de plusieurs données nécessaires à la

création de la carte, notamment les moyens de gestion des eaux usées de chaque quartier et une carte des zones de pâturage.

4. Conclusion intermédiaire

Les types d'occupation du sol ont un impact très important sur la qualité microbiologique des ressources en eau d'Al-Kayteh, alors que l'impact sur la qualité chimique reste limité. Ainsi, la qualité microbiologique a été davantage affectée que la qualité chimique, en particulier dans les zones urbaines où la majorité des ressources en eau, notamment les sources, sont contaminées à cause de la mauvaise gestion des eaux usées. Cependant, nous n'avons pas pu étudier les impacts d'autres types d'artificialisation des sols sur les ressources en eau d'Al-Kayteh en raison de l'absence quasi totale de territoires artificialisés non urbains à Al-Kayteh. Par ailleurs, les territoires agricoles et mixtes ont également un impact significatif sur la qualité chimique des ressources en eau à cause de l'utilisation excessive d'engrais chimiques, ce qui entraîne des concentrations élevées et des contaminations en nitrates, en particulier dans les zones de cultures de plein champ. Enfin, bien que les sources situées sur des territoires moins impactés par les activités humaines (surfaces boisées et naturelles) soient généralement propres, certaines d'entre elles ont été contaminées d'un point de vue microbiologique par le bétail.

Les résultats ont permis de comprendre les impacts de l'occupation du sol sur une question vitale et environnementale telle que la pollution de l'eau. Ainsi, nous avons pu identifier les activités humaines polluantes associées à chaque type d'occupation du sol dans notre région. Les types d'occupation du sol polluants à Al-Kayteh sont principalement liés au manque d'infrastructures adéquates, à l'utilisation excessive d'engrais chimiques, à la gestion inadéquate du secteur de l'élevage et à la faible surveillance et protection des ressources en eau. Par conséquent, il est nécessaire de réaménager le territoire afin de résoudre ces problèmes de manière durable, en élaborant des schémas directeurs du territoire, en sensibilisant les habitants et en révisant les lois en vigueur, tout en veillant à leur application.

Ces pollutions ont d'importantes conséquences sanitaires et économiques pour les habitants. En effet, elles sont responsables de maladies surtout gastro-intestinales liées à la consommation d'eau contaminée, favorisent la propagation des maladies (OMS, 2017). En effet, les maladies liées à la consommation des eaux polluées sont très variées et importantes (Hamze *et al.*, 2010), le cas du choléra mentionné dans la conclusion du chapitre IV constitue un excellent exemple.

Sur le plan économique, elles entraînent des coûts élevés liés au traitement des maladies, au gaspillage d'engrais chimiques, à l'impossibilité d'utiliser les ressources en eau en raison de leur pollution, aux coûts du traitement préalable de l'eau avant sa distribution (nous avons identifié sur le terrain des installations de filtration sur certains puits et sources pour purifier l'eau avant distribution), aux pertes liées à la production de produits agricoles contaminés, aux coûts d'entretien et de construction des réseaux d'égouts, etc.

Le développement urbain dynamique à Al-Kayteh (Verdeil *et al.*, 2016) ne fera qu'accentuer la pression sur les ressources en eau. Pour répondre à ces besoins croissants, la région doit protéger ses ressources en eau existantes, les consommer raisonnablement et rechercher de nouvelles sources d'eau de boisson et d'irrigation. De plus, tout processus de développement économique ou d'établissement d'activités industrielles ou agroalimentaires sur le territoire doit être accompagné de la construction d'infrastructures appropriées, faute de quoi cela entraînera de graves problèmes de pollution, en particulier chimique, des ressources en eau de la région. Par conséquent, des plans et des schémas directeurs visant le développement durable à Al-Kayteh sont nécessaires pour gérer l'utilisation des ressources en eau, l'élimination des eaux usées et la planification du développement urbain.

Notre problématique, nouvelle dans son application à ce territoire, et notre travail constituent une contribution originale à l'étude de la pollution des ressources en eau à Akkar et au Liban,

en l'abordant du point de vue géographique et de l'aménagement du territoire. Les résultats sont prometteurs, et notre approche, qui combine plusieurs méthodes (statistiques, photographiques et cartographiques), enrichit notre étude.

L'aspect synthétique de l'analyse factorielle offre une vue d'ensemble de la zone ou du territoire étudié. À partir de cette vision globale, chaque élément peut être examiné et mis en perspective avec les autres. Les méthodes statistiques et la méthode de construction du tableau de synthèse des items retenus ont été choisis et développés par nous-mêmes après beaucoup d'essais, et ils ont fourni des résultats très intéressants et cohérents pour une problématique complexe. Cette méthodologie pourrait être confortée et adaptée à des terrains à l'étranger en ajustant le tableau de synthèse aux caractéristiques spécifiques du terrain en question, ce qui constitue un aspect innovant de notre thèse. Ainsi, la problématique, la méthodologie, le terrain et les outils utilisés pour répondre à ce problème environnemental et vital constituent des éléments très fondamentaux de notre travail, offrant des perspectives précieuses pour une gestion durable des ressources en eau à Al-Kayteh.

Conclusion générale, recommandations et perspectives

La région d'Akkar, située dans le nord du Liban, se trouve parmi les régions les plus vulnérables et marginalisées du pays. Cette zone rurale est caractérisée par une population défavorisée et une économie agricole prédominante, tout en étant confrontée à des problèmes graves de pollution de ses ressources en eau. Ainsi, cette thèse a cherché à identifier les sources de pollution de l'eau dans la région d'Akkar en étudiant les impacts de l'occupation du sol sur la qualité de ses ressources en eau, par une approche géographique. Nous nous sommes concentrés sur l'exemple du territoire d'Al-Kayteh, un territoire parfaitement représentatif d'Akkar mais qui n'a pas encore fait l'objet de beaucoup d'investigations dans ce domaine.

L'examen des études antérieures sur la pollution de l'eau à Akkar a permis de mettre en lumière plusieurs constatations significatives tout en révélant des lacunes dans la recherche existante. Ces études ont montré que la région est confrontée à d'importants problèmes de contamination de l'eau, atteignant des niveaux préoccupants. Cependant, le constat a principalement porté sur l'évaluation de la qualité des ressources en eau, sans tenir suffisamment compte des facteurs impactants, en particulier les modalités de l'occupation du sol. Nous avons donc essayé de combler cette lacune dans notre thèse en adoptant une méthodologie originale à l'échelle du Liban, combinant des analyses statistiques et cartographiques des phénomènes étudiés.

Ainsi, nous avons examiné les modalités de l'occupation du sol à Al-Kayteh, montrant un développement urbain croissant et anarchique, qui s'est souvent fait au détriment des terrains agricoles et des surfaces boisées et naturelles. Il convient de noter que cette urbanisation n'a pas été accompagnée par la construction d'un réseau d'égouts adéquat et couvrant toute les communes. L'étude de l'évolution de l'occupation du sol entre 1962, 2005 et 2017 a montré

une expansion significative des zones urbaines avec une augmentation de 782 % entre 1962 et 2017 et de 139 % entre 2005 et 2017. A contrario, on trouve qu'entre 2005 et 2017 par exemple, les territoires agricoles ont diminué de 10% à Al-Kayteh, tandis que les surfaces boisées et naturelles ont diminué de 5%. En 2017, les zones les plus urbanisées d'Al-Kayteh sont Bebnine, Fnaydeq et Berqayel, qui sont également les plus grandes communes d'Akkar.

Quant à l'évaluation de la qualité des ressources en eau, il s'est avéré que parmi les 44 échantillons analysés (23 puits et 21 sources), 31 échantillons étaient contaminés du point de vue microbiologique (soit 70,5 % des échantillons), sept échantillons étaient contaminés du point de vue chimique (soit 16 % des échantillons), ce qui a représenté un total de 33 échantillons contaminés, soit 75 % des échantillons. Ainsi, le problème de la pollution de l'eau dans la région est très critique et de grande ampleur.

L'analyse des impacts de l'occupation des sols sur la qualité des ressources en eau a révélé que les types d'occupation avaient un impact significatif sur la qualité microbiologique de l'eau à Al-Kayteh, tandis que leur impact sur la qualité chimique était plus limité. Les zones urbaines ont été identifiées comme les principales sources de contamination microbiologique en raison de problèmes de gestion des eaux usées et du caractère déficient et incomplet des infrastructures d'assainissement. Les zones agricoles ont également contribué à la contamination chimique en raison de l'utilisation excessive d'engrais chimiques, principalement dans les zones de cultures de plein champ. En revanche, malgré la potabilité de la majorité des sources localisées dans des surfaces boisées et naturelles, nous avons découvert que la qualité microbiologique de certaines d'entre elles a été impactée par le bétail.

Face à cette situation alarmante, il est essentiel de protéger et de gérer durablement les ressources en eau d'Al-Kayteh. Plusieurs recommandations et solutions peuvent être

formulées à la lumière des résultats de la thèse. Tout d'abord, des plans et des schémas directeurs doivent être développés pour mettre en place des documents pour une gestion durable des eaux et des différents secteurs de la région. Cette planification devrait inclure des mesures de protection de l'environnement et des ressources en eau, un contrôle du développement urbain aujourd'hui anarchique, la gestion des eaux usées, le contrôle du secteur agricole ainsi que la préservation des forêts et des espaces verts. L'absence de planification est l'une des principales lacunes de la région.

Ainsi, il est impératif de résoudre le problème de l'assainissement des eaux usées. Le réseau d'égouts doit être modernisé et étendu pour couvrir l'ensemble des communes. De plus, un entretien régulier doit être assuré, et des interventions immédiates doivent avoir lieu en cas de fuite détectée. La construction et la mise en service de stations de traitement des eaux usées sont également essentielles.

En ce qui concerne l'agriculture, elle doit alors être mieux gérée en promouvant des pratiques agricoles durables. Cela passe notamment par l'encouragement de l'utilisation responsable d'engrais chimiques et la mise en place de méthodes de gestion de l'eau efficaces pour minimiser la pollution chimique. Il est également nécessaire d'organiser le secteur de l'élevage en garantissant que les points d'abreuvement des animaux soient isolés des sources d'eau.

D'autre part, il est crucial de connecter toutes les habitations au réseau d'eau potable public et d'investir dans l'exploitation de nouvelles ressources en eau. La qualité de l'eau potable distribuée doit faire l'objet d'une surveillance étroite en mettant en place un système de suivi de la qualité de l'eau pour détecter rapidement toute contamination et prendre des mesures correctives. De plus, il convient de simplifier les procédures de légalisation des puits privés et de surveiller leur qualité.

Du point de vue juridique, il est nécessaire de moderniser et d'appliquer strictement les lois et réglementations relatives à la protection de l'eau et de l'environnement. Des outils juridiques adaptés à l'aménagement et à la protection des ressources en eau, tels que les périmètres de protection, doivent être développés. De plus, des campagnes de sensibilisation doivent être menées pour informer la population sur les problèmes de pollution de l'eau dans leur région, ainsi que sur les sources et les conséquences de cette pollution.

Toutes ces mesures doivent être mises en œuvre de manière coordonnée, impliquant les collectivités territoriales, les associations civiles, les experts et toute autre partie prenante. La préservation de la qualité de l'eau est essentielle pour la santé publique, le développement territorial, la protection de l'environnement et le développement durable de la région d'Akkar.

Dans ce sens, la thèse a apporté une contribution scientifique significative à ce terrain et à cette problématique. Elle a permis d'approfondir notre connaissance d'Al-Kayteh, un territoire libanais qui n'avait pas fait l'objet d'études spécifiques auparavant. L'exploration de cette région a révélé ses caractéristiques géographiques, les problèmes liés au secteur de l'eau, ainsi que la répartition des différents types d'occupation des sols, notamment l'urbanisation, l'agriculture et les surfaces boisées et naturelles sur son territoire. Ainsi de nombreuses communes ainsi que deux intercommunalités ont été documentées et étudiées pour la première fois dans une publication scientifique.

Nous souhaiterions que l'impact de cette thèse s'étende au-delà de la recherche académique et qu'elle ait le potentiel d'influencer positivement la santé publique, la gestion durable des ressources en eau, la planification territoriale, la lutte contre la pollution de l'eau et la préservation de l'environnement dans la région d'Akkar. Notre travail pourrait servir de base, par sa méthodologie et ses résultats, au développement d'autres études pouvant être adaptées à d'autres régions du Liban. En outre, notre recherche a fourni des données, des cartes, des

arguments et des recommandations, constituant des pistes importantes pour la création d'outils ou de schéma visant à une gestion durable des ressources en eau, de l'urbanisme et de l'agriculture sur son terrain.

Pour compléter notre travail, plusieurs projets de recherche futurs peuvent être envisagés, tels que l'étude approfondie des questions liées à la gestion du secteur de l'eau à Akkar, notamment l'exploitation intensive des ressources en eau, l'accès inéquitable au réseau public et la gestion des eaux usées. Nous proposons de dresser un état des lieux, puis d'étudier les échecs qui ont conduit à la situation actuelle ainsi que leurs impacts en matière de sécurité de l'eau, d'environnement, d'économie et de santé.

Il serait également pertinent d'examiner de manière critique l'absence de plans directeurs encadrant l'urbanisation dans la région et d'explorer les effets du développement important et anarchique dans la région d'Akkar, ou d'autres régions rurales du Liban comme Dennié. Nous supposons que ce développement affecte fortement le réaménagement et la construction d'infrastructures, la mobilité et la circulation, et engendre un impact environnemental significatif, notamment la destruction d'habitats naturels, la perte de biodiversité et la fragmentation et la réduction des espaces verts.

Une étude géographique sur les problèmes du secteur agricole à Akkar serait également très importante. L'agriculture y est l'activité économique principale, et la région est la deuxième zone agricole du Liban. Cependant, c'est une région pauvre et elle est confrontée à des problèmes de pollution de l'eau due à une utilisation irresponsable des engrais chimiques et des pesticides. Il serait donc nécessaire d'étudier en profondeur le secteur agricole sur le terrain, la répartition des types d'agriculture, de réexaminer l'application des lois et règlements en vigueur, ainsi que de proposer des mesures pour un aménagement durable de ce secteur sur le plan économique et environnemental.

Il serait également intéressant d'étudier les impacts de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau en réalisant des prélèvements mensuels ou, à défaut, trimestriels. Cette fréquence permettrait de prendre en compte les variations saisonnières des pluies et d'acquies une compréhension plus approfondie des impacts de l'occupation du sol.

Il est envisageable aussi d'appliquer notre méthode à une plus grande échelle, telle que celle de plusieurs communes voisines, en effectuant un grand nombre de prélèvements sur une surface plus petite. Cette intensité d'échantillonnage sur une zone plus limitée conduirait à des résultats généralisables pour l'ensemble du territoire étudié, ainsi que pour d'autres régions présentant des caractéristiques et des défis similaires. Cela permettrait également la création d'une carte exhaustive des risques de pollution de l'eau liés à l'occupation du sol sur le terrain étudié. En conséquence, des ressources cartographiques seraient mises à disposition, facilitant la conception d'outils d'aménagement et de schémas directeurs visant à protéger les ressources en eau.

Notre problématique pourrait également être étudiée dans d'autres régions d'Akkar ou du Liban afin d'identifier les impacts de l'occupation du sol sur des zones présentant des caractéristiques différentes, comme la présence d'installations industrielles. Il serait également possible de réaliser ultérieurement une étude comparative entre les résultats de la recherche proposée et les nôtres, dans le but d'améliorer la compréhension de la problématique à différentes échelles, comme à l'échelle nationale par exemple.

Par ailleurs, l'exploration de nouveaux aspects des impacts de l'occupation du sol est cruciale. Par exemple, du point de vue microbiologique, des analyses plus avancées pourraient être effectuées pour identifier les bactéries présentes dans l'eau et leurs effets sur la santé. Du point de vue chimique, de nouveaux indicateurs pourraient être découverts, et des analyses plus approfondies pourraient être réalisées pour catégoriser les échantillons en fonction de

leurs caractéristiques chimiques, en s'inspirant des approches statistiques menées sur d'autres territoires (e.g. Devic *et al.*, 2014 ; Kandler *et al.*, 2017), ou l'utilisation du Diagramme Piper par exemple (e.g. Malki *et al.*, 2017 ; Rouabhia *et al.*, 2010 ; Singh *et al.*, 2010).

Il serait également intéressant d'examiner en parallèle les caractéristiques physiques de l'eau comme dans l'étude Wafa *et al.* (2020), présentée dans l'état de l'art, qui ont mesuré la température, le pH, l'oxygène dissous (DO), la conductivité électrique (EC), les solides totaux dissous (TDS), la salinité, la couleur, la turbidité et la dureté totale dans les eaux souterraines de la ville de Kaboul en Afghanistan.

Une autre approche consiste à étudier les impacts d'un type spécifique d'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau. Par exemple, examiner les effets de l'agriculture sur la qualité chimique des ressources en eau en analysant en détail les différents types d'agriculture présents sur le terrain et les pratiques associées à chaque type. Ensuite, évaluer les potentiels impacts de chaque type de culture sur la qualité des ressources en eau, ce qui contribuera à mieux comprendre la variable en question et à rechercher minutieusement ses effets sur les ressources en eau.

Il est également essentiel d'étudier les impacts de la géologie et de l'occupation du sol sur la qualité des ressources en eau en effectuant des prélèvements sur des sites présentant un ou plusieurs types de roches et d'occupation du sol. La caractérisation de la nature géologique des sols, ainsi que la profondeur des puits en utilisant les outils appropriés permettra de mieux comprendre les interactions entre les eaux et les roches sur le terrain étudié. Ainsi, cette démarche offre une vision plus complète et détaillée des facteurs ayant les plus minimes impacts sur la composition chimique des ressources en eau. Une démarche semblable a été observé dans l'étude Rouabhia *et al.* (2010), présentée dans l'état de l'art, qui ont étudié

l'impact de l'agriculture et de la lithologie sur la qualité chimique de l'eau souterraine en Algérie.

Enfin, il est recommandé d'étudier la problématique des impacts du développement urbain non contrôlé et de la mauvaise gestion des eaux usées, du secteur agricole et industriel sur les eaux de surface, telles que les rivières. Il serait pertinent de suivre l'évolution de la qualité de l'eau de la rivière le long de son cours, depuis les différents points de rejet des eaux usées dans son bassin, comme dans l'étude de Kandler *et al.* (2017) présentée dans l'état de l'art. Cette approche permettrait d'explorer en détail les problèmes et les défis liés à la pollution des eaux de surface et ses conséquences sanitaires et environnementales. Plusieurs recherches similaires ont déjà été menées au Liban (Dagher *et al.*, 2021 ; Jabali *et al.*, 2020 ; Awad et Akkari, 2023), fournissant ainsi une base solide pour entreprendre une étude géographique et d'aménagement du territoire sur cette problématique en étudiant le bassin versant de la rivière en question d'un point de vue géographique. Cette étude consisterait à caractériser les occupations des sols, à enquêter sur les potentielles sources de pollution et à suivre l'évolution des contaminants de l'amont à l'aval. Elle donnerait lieu à une proposition d'outils de planification à l'échelle d'un bassin versant, une échelle de gestion intercommunale "géographique et naturelle" peu exploitée au Liban. Ainsi, elle permettrait aux collectivités territoriales d'élaborer des schémas directeurs et des pistes d'aménagement visant à une gestion collective durable et une mise en valeur à l'échelle du bassin versant, et plus largement d'élargir les bases de cette gestion à l'ensemble du territoire.

Bibliographie

- Allam, A., El Hassan, J., Najem, W., Bocquillon, C., et Moussa, R., (2020). Classification climatique méditerranéenne pour l'hydrologie. *La Houille Blanche*, 106(1), 60-69.
- Amharref, M., et Bernoussi, A., (2007). Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, 10.
- Awad, S., et Akkari, D., (2023). Le fonctionnement hydrodynamique et géochimique des aquifères jurassique et crétacé dans le bassin versant du Nahr El-Bared (Liban Nord). *Belgeo. Revue belge de géographie*, (1).
- Baalbaki, R., Ahmad, S. H., Kays, W., Talhouk, S. N., Saliba, N. A., et Al-Hindi, M., (2019). Citizen science in Lebanon-a case study for groundwater quality monitoring. *Royal Society open science*, 6(2), 181871. <https://doi.org/10.1098/rsos.181871>
- Baroudi, M., Bakkour, H., Halwani, J., Taha, S., El-Osmani, R., et Mouneimne, A. H., (2012). Determination of pesticide, nitrates and nitrites level in groundwater of akkar plain in north Lebanon. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(8), 4663-4667.
- Brainwood, M. A., Burgin, S., et Maheshwari, B., (2004). Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources. *Agricultural Water Management*, 70(2), 151-175.
- Brindha, K., et Schneider, M., (2019). Impact of urbanization on groundwater quality. *GIS and geostatistical techniques for groundwater science*, 179-196.
- Calderon, R. L., (2000). The epidemiology of chemical contaminants of drinking water. *Food and chemical toxicology*, 38, S13-S20.
- Carlson, M. A., Lohse, K. A., McIntosh, J. C., et McLain, J. E., (2011). Impacts of urbanization on groundwater quality and recharge in a semi-arid alluvial basin. *Journal of Hydrology*, 409(1-2), 196-211.

- Carpenter S. R., Caraco N., Correll D. L., Howarth R. W., Sharpley A. N., et Smith V.H., (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen, *Ecol. Applic.* 8, 559-568.
- Chaudhry, F. N., et Malik, M. F., (2017). Factors affecting water pollution: a review. *J. Ecosyst. Ecography*, 7(1), 225-231.
- Chbib, C., Sopheak, N., Mariam, H., David, D., Baghdad, O., et Moomen, B., (2018). Assessment of pesticide contamination in Akkar groundwater, northern Lebanon. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 14302-14312.
- Crane, S. R., et Moore, J. A., (1984). Bacterial pollution of groundwater: a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 22, 67-83.
- CWP (Center for Watershed Protection), (2000). *The Practice of Watershed Protection : Why Stormwater Matters. Article 63. Maryland, U.S., 25-30.*
- Dagher, L. A., Hassan, J., Kharroubi, S., Jaafar, H., et Kassem, I. I., (2021). Nationwide Assessment of Water Quality in Rivers across Lebanon by Quantifying Fecal Indicators Densities and Profiling Antibiotic Resistance of *Escherichia coli*. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*, 10(7), 883. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10070883>
- Darwish, T., Faour, G., et Khawlie, M., (2004). Assessing soil degradation by landuse-cover change in coastal Lebanon. *Lebanese Science Journal*, 5(1), 45-59.
- Davie, M. F., et Drouot, J. L., (2000). La périphérie urbaine et les extensions de la ville de Beyrouth (Liban): étude par traitement d'une image SPOT. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Demaze, M. T., et Trebouet, A., (2008, November). Cartographie et évaluation multi-échelle de l'étalement urbain à l'aide d'images Spot XS: Exemple du Mans (Ouest-France). In *Cartographie et évaluation multi-échelle de l'étalement urbain à l'aide d'images Spot XS: Exemple du Mans (Ouest-France)*.

- Devic, G., Djordjevic, D., et Sakan, S., (2014). Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia. *Science of the Total Environment*, 468, 933-942.
- Diedhiou, I., Mering, C., Sy, O., et Sané, T., (2020). Cartographie par télédétection l'occupation du sol et ses changements. Application à l'analyse de la dynamique des paysages forestiers sénégalais entre 1972 et 2016. *EchoGéo*, (54).
- El Hage Hassan, H., (2011). Les apports d'un SIG dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Bekaa (Liban): exemple d'un secteur du Bekaa el Gharbi (Doctoral dissertation, Orléans).
- El-Osmani, R., Net, S., Dumoulin, D., Baroudi, M., Bakkour, H., et Ouddane, B., (2014). Solid phase extraction of organochlorine pesticides residues in groundwater (Akkar Plain, North Lebanon). *International Journal of Environmental Research*, 8(4), 903-912.
- EU (European Union), (2020). DIRECTIVE (EU) 2020/2184 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) , *Official Journal of the European Union*, L 435/1.
- Faour, G., (2015). Evaluating urban expansion using remotely-sensed data in Lebanon. *Lebanese Science Journal*, 16(1), 23.
- Faour, G., et Mhawej, M., (2014). Mapping urban transitions in the Greater Beirut area using different space platforms. *Land*, 3(3), 941-956.
- Faour, G., Haddad, T., Velut, S., et Verdeil, É., (2005). Beyrouth: quarante ans de croissance urbaine. *M@ ppemonde*, 3(79), 12.
- Fayssal, F., Mortada, A., et Ghandour, M., (2020). Wastewater Treatment: Overview, Types, Energy Consumption et Actual State in Lebanon with Proposal of Using Renewable Energy. *Acta Materialia Turcica*, 4(2), 1-9.

- Geldreich, E. E., et Kenner, B. A., (1969). Concepts of fecal streptococci in stream pollution. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, R336-R352.
- Gogu, R. C., et Dassargues, A., (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39, 549-559.
- Gogu, R., et Dassargues, A., (1998). A short overview on groundwater vulnerability assessment: basic statements for use in the framework of the Cost 620 action.
- Halwani, J., et Ouddane, B., (1999a). Contamination par les nitrates des eaux souterraines de la plaine. *Cahiers Santé*, 9, 219-23.
- Halwani, J., (2008, November). Assessment of the water situation in Lebanon. In *The 3rd International Conference on Water Resources, Arid Environments and the 1st Arab Water Forum*.
- Halwani, J., et Hamze, M., (1998). Pollution chimique et microbiologique des eaux souterraines de la plaine du Akkar (Liban du Nord), et leurs conséquences éventuelles sur la santé humaine. *Leban. Sci. Res. Rep*, 3, 33-47.
- Halwani, J., Ouddane, B., Crampon, N., et Wartel, M., (2001). Contamination saline dans les eaux souterraines de la plaine d'Akkar au Liban. *Journal Européen d'hydrologie*, 32(1), 93-108.
- Halwani, J., Ouddane, B., Ibrahim, A. R., et Wartel, M., (1999b). Caractéristiques de ressources en eaux des plateaux de Akkar au Nord du Liban. *Cahiers Assoc. Sci. Euro. Eau Sante*, 4, 3-13.
- Hamon, J. F., (2015). La démarche de recherche en sciences humaines et sociales. *Travaux et documents*, (49), 11-18.

- Hamze, M., (1996). Résultats préliminaires des examens bactériologiques des eaux de 58 sources naturelles et puits dans le nord du Liban, *Lebanese Scientific Bulletin*, volume 9, No. 1, p. 45-56.
- Hamze, M., Dabboussi, F., Abdou, T., Radwan, M., et Awad, Z., (2010). Étude sur la qualité bactériologique et recherche des bactéries multirésistantes aux antibiotiques dans 50 puits à Akkar au nord du Liban. *Cahiers de l'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé*, 15(1), 45-53.
- Hassan, H. E. H., Ardillier-Carras, F., et Charbel, L., (2019). Les changements d'occupation des sols dans la Béqaa Ouest (Liban): le rôle des actions anthropiques. *Cahiers Agricultures*, 28, 10.
- Huang, J., Zhan, J., Yan, H., Wu, F., et Deng, X., (2013). Evaluation of the impacts of land use on water quality: a case study in the Chaohu Lake Basin. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Jabali, Y., Millet, M., et El-Hoz, M., (2020). Spatio-temporal distribution and ecological risk assessment of pesticides in the water resources of Abou Ali River, Northern Lebanon. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 17997-18012.
- Kandler, M., Blechinger, K., Seidler, C., Pavlů, V., Šanda, M., Dostál, T., et Štich, M., (2017). Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany. *Science of the total Environment*, 586, 1316-1325.
- Keesstra, S.D., Geissen, V., Mosse, K., Piirainen, S., Scudiero, E., Leistra, M., et Van Schaik, L., (2012). Soil as a filter for groundwater quality. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4 (5), 507–516.
- Leclerc, H., et Mossel, D. A. A., (1989). *Microbiologie: le tube digestif, l'eau et les aliments*.

- LIBNOR (Lebanese Standards Institution), (2016). *Projet final de norme libanaise : eau potable (161:2016)*, Deuxième édition, Numéro de référence DNL 161 (A), ICS : 13.060.20.
- Lievre, A., Fernex, J., et Atudorei, V., (1992). Contamination bactérienne des eaux de boisson: recherche de l'origine (humaine ou animale) par l'identification des streptocoques fécaux. *GWA. Gas, Wasser, Abwasser*, 72(12), 895-901.
- Malki, M., Bouchaou, L., Hirich, A., Brahim, Y. A., et Choukr-Allah, R., (2017). Impact of agricultural practices on groundwater quality in intensive irrigated area of Chtouka-Massa, Morocco. *Science of the Total Environment*, 574, 760-770.
- Marot, B., (2018). *Developing Post-war Beirut (1990–2016): The Political Economy of 'Pegged Urbanization'*. McGill University (Canada).
- Masri, T., Khawlie, M., et Faour, G., (2002). Land cover change over the last 40 years in Lebanon. *Lebanese Science Journal*, 3(2), 17-28.
- Moustafa, A., Hamze, M., et Baroudi, M., (2019). Assessment of heavy metal and metalloids pollution in soils and groundwater in Akkar Northern Lebanon. *Journal of Applied Sciences Research*, 15(6), 28-38.
- Nafi'Shehab, Z., Jamil, N. R., Aris, A. Z., et Shafie, N. S., (2021). Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia. *Ecological indicators*, 122, 107254.
- Narany, T. S., Aris, A. Z., Sefie, A., et Keesstra, S., (2017). Detecting and predicting the impact of land use changes on groundwater quality, a case study in Northern Kelantan, Malaysia. *Science of the Total Environment*, 599, 844-853.
- Nasser, T., Faour, G., et Touchart, L., (2020). Suivi de la sécheresse dans un territoire agricole du Liban: la plaine de la Beqaa. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography*, (131).

- Nouayti, N., Khattach, D., et Hilali, M., (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc)[Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco)]. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(4), 1068-1081.
- OMS, (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson: 4e éd. intégrant le premier additif.
- Ouattara, T., Dubois, J. M., et Gwyn, J., (2006). Méthodes de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multi-sources et de l'indice de végétation TSAVI. *Téledétection*, 6(4), 291-304.
- Ouyang, Y., Zhang, J. E., et Cui, L., (2014). Estimating impacts of land use on groundwater quality using trilinear analysis. *Environmental monitoring and assessment*, 186, 5353-5362.
- Rashid, H., Manzoor, M. M., et Mukhtar, S., (2018). Urbanization and its effects on water resources: An exploratory analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 15(1), 67-74.
- Rouabhia, A., Baali, F., et Fehdi, C., (2010). Impact of agricultural activity and lithology on groundwater quality in the Merdja area, Tebessa, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 3(3).
- Rousseaux, F., (2009). Une méthode d'analyse pour mesurer l'impact des documents d'urbanisme sur la maîtrise de l'étalement urbain: l'exemple de La Rochelle, France. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 9(2).
- Santé Canada, (1996). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, Sixième édition, Santé Canada, p. 102.

- Sarr, M. A., (2009). Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeog: European Journal of Geography*.
- Shaban, A., (2017). *Water Resources of Lebanon* (chapter 2). Springer Cham.
- Shaban, A., (2019). Striking Challenges on Water Resources of Lebanon. In *Hydrology-The Science of Water*. IntechOpen.
- Shaban, A., et Hamzé, M., (2017). *Shared water resources of Lebanon*. Nova Science Publishers.
- Sharma, S., et Bhattacharya, A. J. A. W. S., (2017). Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied water science*, 7(3), 1043-1067.
- Sinan, R., (2022). *The Urbanization of Displacement in Informal Settlements: The Case of Raml-al-Ali in Beirut* (Doctoral dissertation).
- Singh, S., Singh, C., et Mukherjee, S., (2010). Impact of land-use and land-cover change on groundwater quality in the Lower Shiwalik hills: a remote sensing and GIS based approach. *Open geosciences*, 2(2), 124-131.
- Traboulsi, M., (2004). *Les précipitations au Proche-Orient: variabilité spatio-temporelle et relations avec la dynamique de l'atmosphère (1960-1961-1989-1990)*.
- Traboulsi, M., (2010). La pluviométrie moyenne annuelle au Liban, interpolation et cartographie automatique. *Lebanese Science Journal*, 11(2), 11-25.
- Verdeil, E., Faour, G., et Hamze, M. (Eds.) (2016). *Atlas du Liban : Les nouveaux défis*. Beyrouth, Liban : Presses de l'Ifpo. doi :10.4000/books.ifpo.10709
- Wafa, W., Hairan, M. H., et Waizy, H., (2020). The impacts of urbanization on Kabul City's groundwater quality. *Int J Adv Sci Technol*, 29(4), 10796-10809.

Webographie :

- Banas, D., et Lata, J-C., (2006). Les phosphates, https://www.researchgate.net/publication/338901338_Les_phosphates
- Beaulieu, P., (2016). Des nitrates dans l'eau ?, <https://www.cieau.com/leau-et-votre-sante/qualite-et-sante/des-nitrates-dans-leau/>
- CEREMA Normandie-Centre, (2015). La mesure de l'étalement urbain, http://www.etudes-normandie.fr/upload/crbn_cat/1/1084_3313_Mesure_de_l_etalement_urbain.pdf
- Denchak, M., (2018). Water Pollution: Everything You Need to Know, Natural Resources Defense Council, <https://www.nrdc.org/stories/water-pollution-everything-you-need-know>
- Environnement Poitou Charentes, (2023). Quelle différence entre eaux de surface, eaux souterraines et eaux côtières ?, <https://www.environnement-poitou-charentes.org/eaux-surface-souterraines-cotieres/>
- EPA (United States Environmental Protection Agency), (2018). 2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables, <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-01/dwtable2018.pdf>
- FAO, (2019). Comprendre pour mieux gérer les ressources en eau, FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture - Bureau régional de la FAO pour l'Afrique, <http://www.fao.org/africa/news/detail-news/fr/c/1187380/>
- Gourcy, L., (2022). Les vulnérabilités des eaux souterraines, Les vulnérabilités des eaux souterraines, Ministères Écologie Énergie Territoires, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/JME_2022_ppt_laurence_gourcy_vulnerabilite_eaux_souterraines.pdf

- IAEA (l'agence international de l'énergie atomique), (2023). Gestion des eaux souterraines, <https://www.iaea.org/fr/themes/les-eaux-souterraines>
- INBW, (2018). Paramètres et normes, <https://www.inbw.be/parametres-et-normes#:~:text=La%20norme%20I%20A%20gale%20%20C%20A%20ne,aucun%20risque%20pour%20la%20sant%C3%A9>.
- INSEE, (2021). Artificialisation des sols - Définition – Insee, <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2190#:~:text=Les%20surfaces%20artificialis%C3%A9es%20regroupent%20l,les%20mines%20C%20d%C3%A9charges%20et%20chantiers>.
- La Banque Mondiale, (2021). Le Liban s'enfoncé dans l'une des crises mondiales les plus graves, sur fond d'inaction délibérée, <https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2021/05/01/lebanon-sinking-into-one-of-the-most-severe-global-crises-episodes>
- La Commission Européenne, (2018). Archive:Occupation et utilisation des sols, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Occupation_et_utilisation_des_sols#:~:text=l'occupati on%20des%20sols%20C%20qui,des%20fins%20r%C3%A9cr%C3%A9atives%20ou%20r%C3%A9sidentielles.
- Lenntech B. V., (2022). Sources de pollution des eaux souterraines, <https://www.lenntech.fr/eaux-souterraines/pollution-sources.htm>
- Localiban (Centre de ressources sur le développement local au Liban), (2022). <https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.localiban.org%2F#federation=archive.wikiwix.com&tab=url>
- Ministère de la santé et de la prévention français, (2009). Protéger les captages destinés à la production d'eau potable, https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/CAPTAGE_WEB.pdf.

- Organisation Agiro, (2023). Impacts de l'urbanisation sur l'eau, <https://agiro.org/apprendre/leau-expliquee/impacts-de-lurbanisation-sur-leau/>
- Santé Canada, (2020). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada Tableau sommaire, https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/sc-hc/H129-24-2020-fra.pdf.
- Santé Canada, (2022). Recommandations au sujet de la qualité des eaux utilisées à des fins récréatives au Canada : Caractéristiques physiques, esthétiques et chimiques, <https://www.canada.ca/fr/services/sante/publications/vie-saine/recommandations-qualite-eaux-utilisees-fins-recreatives-caracteristiques-physiques-esthetiques-chimiques.html>
- Santé Publique France, (2023). Quels sont les risques liés à la pollution de l'eau ?, <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/eau/les-enjeux-de-sante/quels-sont-les-risques-lies-a-la-pollution-de-l-eau>
- SDWF (Safe Drinking Water Foundation), (2017). Fiche d'information : eau souterraine, <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/3/12/eau-souterraine>
- Surfrider Foundation Europe, (2016). La pollution de l'eau, <https://fr.oceancampus.eu/cours/7Mc/la-pollution-de-leau>.
- Trésor-International (de la Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique de la France), (2022). Le secteur de l'eau au Liban, <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Pays/LB/le-secteur-de-l-eau-au-liban>
- UNESCO, (2022). Eaux souterraines, <https://fr.unesco.org/themes/eaux-souterraines#:~:text=Les%20eaux%20souterraines%20constituent%20un,non%20gel%C3%A9%20de%20la%20plan%C3%A8te>.
- UNHCR (United Nations High Commissioner for Refugees), (2019). Akkar Governorate profile, <https://data.unhcr.org/en/documents/download/72397>

- UPJV (Université de Picardie Jules Verne), (2002). Pollution des nappes d'eau souterraines, <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/pol-sout/pol-sout.htm>
- Xlstat.com, 2022. ANALYSE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES (ACM OU AFCM), <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/analyse-des-correspondances-multiples-acm-ou-afcm>

Références cartographiques :

- Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques de l'armée libanaise (DAGG), (1963). Cartes topographiques du Liban au 1/20.000 : Berqayel (Feuille R-8), Fnaideq (Feuille R-9), El-Aabdé (Feuille S-9), El-Miné (Feuille R-7) et Halba (Feuille S-8)
- Dubertret, L., (1950), Carte géologique détaillée 1/50.000 de SIR ED DANIE et de HAMIDIYE-HALBA, République Libanaise, Ministère des travaux publics, Beyrouth.
- Lebanese Agricultural Research Institute (LARI) ; données climatiques : les données de pluie journalières des stations Al-Aabdé et Fnaydek de l'année 2011 jusqu'à l'année 2016.
- PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement - Fonds Spécial), (1967). Carte hydrogéologique du Liban, <https://storage.googleapis.com/fao-maps-catalog-data/uuid/cf8d2c50-88fd-11da-a88f-000d939bc5d8/resources/libano-988-carte-hidrogeologique-du-liban-geology-1-200-000.zip>

Annexes

LEBANESE SCIENCE BULLETIN VOLUME 9 NUMBER 1 1996

RESULTATS PRELIMINAIRES DES EXAMENS BACTERIOLOGIQUES DES EAUX DE 58 SOURCES NATURELLES ET PUIITS DANS LE NORD DU LIBAN

Monzer Hamzé

Université Libanaise, Faculté de Santé Publique, Section III
Tripoli , Liban et
Centre de Recherches Marines/CNRS
Jounieh, Liban

RESUME

Cinquante - huit échantillons d'eau (sources naturelles: 20 échantillons, puits: 38 échantillons) sont analysés pour la recherche de la présence ou l'absence de contamination fécale. Les résultats obtenus montrent que 43 échantillons sont considérés contaminés soit 74,14% (15/20 sources: soit 75% et puits: 28/38: soit 73,68).

INTRODUCTION

Le Liban est considéré comme un pays riche en eau. Il existe dans ce pays près de 1500 sources d'eaux. Avant la guerre, il existait en 1975, 19 stations d'eaux et plus de 120 points de chloration en bon état de fonctionnement.

D'après les données officielles en 1975, la majorité des citoyens sont approvisionnés par l'eau potable (à peu près 97%) : 98% de la population urbaine et 85% de la population rurale. Sur le plan régional, au Nord du Liban (10% de la population) et dans la vallée de Békaa (4% de la population), il existe des difficultés dans l'approvisionnement en eau potable (Kouyoumjian et Rabbat, 1994).

La situation est tellement dégradée après de longues années de sécheresse. Actuellement, nous ne possédons pas beaucoup d'informations sur la qualité microbiologique des eaux de sources au Liban, sachant qu'il existe des données non publiées dans les archives des Ministères concernés par les problèmes de l'eau et de la santé, et à l'Université Américaine de Beyrouth.

Au Nord du Liban, où il y a un grand changement démographique, la majorité des citoyens consomme l'eau sans aucun contrôle ou traitement; ceci peut expliquer la propagation des infections microbiennes digestives dans la région.

D'après la littérature, l'eau et les aliments peuvent être les agents de transmission de micro-organismes pathogènes ou (et) de leurs métabolites susceptibles d'engendrer des infections ou des intoxications (Leclerc et Moriametz., 1980; Zmirou *et al.*, 1987). L'analyse microbiologique fait appel à des germes tests qu'on appelle des marqueurs ou plus communément des indicateurs et dont la présence peut faire suspecter celle de micro-organismes pathogènes d'origine fécale (Leclerc et Mossel, 1989).

Les indicateurs de contamination fécale correspondent le plus souvent à des populations bactériennes globales mal connus désignés sous des appellations vagues des coliformes, des coliformes fécaux (Oger *et al.*, 1981), des streptocoques fécaux, des streptocoques du groupe D.

D'après les définitions admises sur le plan international (ISO) les coliformes sont des bacilles Gram \ominus , non sporulés, oxydase \ominus , aérobies ou anaérobies facultatifs, capables de se multiplier en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface ayant des propriétés équivalentes et capables de fermenter le lactose avec production d'acide et de gaz en 48h à une température de 35°C - 37°C ($\pm 0,5$ °C) (Gavini *et al.*, 1985). Le terme de "Coliformes thermotolérants" se rapporte aux coliformes ayant les mêmes propriétés à +44°C; celui de "E. coli présumés" concerne les coliformes thermotolérants qui produisent de l'indol à +44°C à partir du tryptophane; enfin E. coli est un "E. coli présumé" qui, de plus, est rouge de méthyle \oplus , acétoïne \ominus , citrate \ominus ; KCN \ominus , et possède une glutamique décarboxylase (Buttiaux *et al.*, 1956, Fennel, 1972).

Dans le cadre de l'examen microbiologique de l'eau; les streptocoques possédant l'antigène de groupe D sont généralement considérés comme indicateurs de pollution fécale (Ferley *et al.*, 1986). Ces sont des bactéries Gram positives, sphériques à ovoïdes, formant des chaînettes, catalase négative.

MATERIELS ET METHODES

Cinquante-huit échantillons provenant des différentes sources et puits d'eaux au Nord du Liban sont analysés entre Août et Septembre 1994. Les échantillons sont prélevés dans des récipients stériles avec toutes les précautions

d'asepsie nécessaires. Ils sont maintenus à une température comprise entre 1°C et 4°C dès leur prélèvement. L'ensemencement est réalisé dès leur arrivés au laboratoire (entre 2 à 4 heures).

Recherche et dénombrement des coliformes et des coliformes thermotolérants:

La recherche de chaque marqueur est effectuée de la façon suivante :

100 cc d'eau sont filtrés sur une membrane de nitrocellulose type millipore (Φ : 0.45 μ).

Après filtration, chaque membrane est déposée sur un milieu spécifique : Gélose lactosée au TTC et au Tergitol - 7 (Sanofi Diagnostics Pasteur - France : SDP).

Milieu complet

| | |
|----------------------|--------|
| Milieu de base | 100 ml |
| Solution de TTC | 5 ml |
| Solution de Tergitol | 5 ml |

Au milieu de base maintenu en surfusion aux environs de 50°C, on ajoute les autres composants dans l'ordre ci-dessus, en opérant de façon stérile. On mélange bien après chaque addition en évitant la formation de bulles.

Le milieu complet est transvasé dans des boîtes de pétri stériles. L'épaisseur du milieu doit être de 5 mm environ.

Ce milieu peut être conservé jusqu'au moment de l'emploi à 4°C à l'obscurité pendant une période de 10 jours maximum.

Après déposition des membranes, les boîtes sont incubées:

- dans l'étuve à 37°C \pm 1°C durant 24h à 48h pour la recherche des coliformes;
- dans l'étuve à 44° \pm 0,5°C durant 24h pour la recherche des coliformes thermotolérants.

INTERPRETATION

Les membranes sont examinées dès la fin de la période d'incubation prescrite.

Coliformes

Sont considérées comme caractéristiques les colonies qui présentent, après incubation à $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; une coloration jaune au orangée, correspondant plus ou moins nettement à un halo jaune du milieu sous la membrane.

La recherche de l'oxydase est réalisée selon la mode opératoire suivante:

Une colonie des différents types de colonies caractéristiques identifiées sur la membrane est repiquée sur une gélose nutritive, après incubation à $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, durant 18 à 24h, les colonies développées sont émulsionnées dans un peu d'eau stérile puis déposée à l'aide d'un enseigneur en verre sur un papier filtre imprégné de 2 à 3 gouttes d'une solution aqueuse à 1% de chlorhydrate de tétraméthyl paraphénylènediamine (préparée extemporanément). En présence d'une oxydase; une coloration violet brun apparaît immédiatement (une réaction tardive est sans valeur) et infirme la présence des coliformes.

Nous avons compté comme coliformes toutes les colonies appartenant à des types de colonies caractéristiques qui ne présentent pas d'oxydase.

Coliformes Thermotolérants

Sont considérées comme coliformes thermotolérants, les colonies qui présentent, après incubation à $44^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, les mêmes caractéristiques que celles décrites pour les coliformes.

En l'absence de colonies typiques à 44°C , une colonie des différents types de colonies identifiées comme coliformes, est identifiée sur un milieu de Schuber (SDP), après incubation à $44^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, sont considérés comme coliformes thermotolérants les colonies donnant lieu à une production de gaz (Normes *Afnor*, 1985).

A signaler; que les autres genres bactériens sont identifiés grâce au système API 20 E et API NE (Biomérieux - France), le protocole proposé par le fabricant est suivi.

Recherche et dénombrement des streptocoques du groupe D

100 cc d'eau sont filtrés comme précédemment, la membrane est déposée à la surface d'un milieu sélectif pour la mise en évidence des streptocoques: nous avons utilisé le milieu de Slanetz et Bartley (SDP):

| | |
|-----------------------|--------|
| Milieu complet | |
| milieu de base | 100 ml |
| solution de TTC | 10 ml |

Cette solution est stérilisée par filtration.

La TTC est ajoutée au milieu de base refroidi entre 50°C et 60 °C

S'il est nécessaire, le pH est ajusté à 7,2 avec une solution stérile de carbonate de sodium à 100g/l (Fluka).

Le milieu est réparti en boîtes de pétris sur une épaisseur d'environ 5 mm et laissé refroidir sur une surface horizontale.

Après disposition de la membrane, la boîte est incubée à 37°C ± 1°C pendant 48h.

Après incubation, toutes les colonies apparues présentant une coloration rouge, marron ou rose sont dénombrées.

Mise en évidence des streptocoques du groupe D (test confirmatif)

Pour ce test le milieu de Litsky est utilisé (SDP).

Les composants du milieu sont dissous dans l'eau par chauffage doux, après répartition par fraction de 10 ml dans des tubes de 160 mm x 16 mm, puis stérilisé à 121°C ± 1°C pendant 10 min.

Une subculture d'un échantillon représentatif des colonies typiques sur le milieu de Litsky est préparée:

si n est le nombre de colonies typiques dénombrées. Les colonies sont repiquées selon les modalités suivants:

- si $n < 5$ $n' = n$

- si $5 \leq n < 25$ $n' = 5$

- si $25 \leq n$ $n' = \sqrt{5}$ arrondi au nombre entier supérieur.

L'incubation a eu lieu à 37 °C ± 1°C pendant 24 et 48h.

Sur le milieu confirmatif, l'apparition d'un trouble dû à une croissance bactérienne, avec ou sans dépôt violet, confirme la présence des streptocoques du groupe D. Les tubes présentant un trouble sont considérés comme correspondant à des colonies typiques (Normes Afnor, 1985).

RESULTATS ET DISCUSSION

Les Tableaux 1, 2, 3, 4, 5 et 6 indiquent que sur les 58 échantillons d'eau examinés, 43 contiennent des bactéries considérées comme indicateurs de contaminations fécales: soit (74,14%). Selon les normes de la Communauté Européennes eaux sont considérées non potable (Oger, 1981).

TABLEAU 1
Répartition des échantillons analysés dans le Département de Tripoli

| RÉGION | NOM DE L'ÉCHANTILLON | MARQUEURS RECHERCHÉS | | | AUTRES | CONCLUSION |
|------------|-----------------------------------|--|-----------------------------|-------------------|---|-------------------------------|
| | | Coliformes thermotolérants | Coliformes fécaux | Streptocoques "D" | | |
| ABOU-SAMRA | AL-HADIKA ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence contamination fécale |
| | AL-JADID ⁽²⁾ | 0 | 6 <i>E.coli</i> | 0 | 0 | Présence contamination fécale |
| | HAOUZ ⁽³⁾ | 1 <i>E.coli</i> | 2 <i>E.coli</i> | 0 | 0 | Présence contamination fécale |
| AL-KOUBBÉ | AL-SELEFTENIEH ⁽¹⁾ | 2 <i>E.coli</i> | 0 | 0 | 0 | Présence contamination fécale |
| | AL-KASR AL-MAI ⁽²⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence contamination fécale |
| | HARET AL-TANAK ⁽³⁾ | 4 <i>E.coli</i> | 4 <i>E.coli</i> | 0 | 0 | Présence contamination fécale |
| AL-JENNEH | AL-KHAZAN AL-KABIR ⁽³⁾ | 1 <i>E.coli</i> | 1 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Aeromonas sobria</i> <i>Enterobacter sp.</i> <i>Pseudomonas sp.</i> <i>Aeromonas hydrophila</i> | Présence contamination fécale |
| | AL-SOUKAR ⁽³⁾ | 0 | 0 | 0 | <i>Hafnia alvei</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> | Absence contamination fécale |
| | AL-KASSAM ⁽¹⁾ | 3 <i>E.coli</i> | 1 <i>E.coli</i> | 3 | 0 | Présence contamination fécale |
| | SIR ⁽¹⁾ | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable | <i>Erwinia sp.</i> <i>Pseudomonas sp.</i> | Présence contamination fécale |
| AL-MINIEH | AL-KARM ⁽⁴⁾ | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable | 0 | Présence contamination fécale |
| | AL-KATTINE ⁽²⁾ | 2 <i>E.coli</i> 8 <i>Klebsiella oxytoca</i> | 1 <i>Klebsiella oxytoca</i> | 4 | 0 | Présence contamination fécale |
| AL-MINIEH | AL-NABI YOUGH ⁽¹⁾ | 2 <i>E.coli</i> | 0 | 0 | <i>Enterobacter aerogenes</i> | Présence contamination fécale |

Légendes :

- (1) - Grand source naturelle qui aliment une région par l'eau potable.
- (2) - Petite source naturelle qui aliment une région par l'eau potable.
- (3) - Grand puit qui alimente une région par l'eau potable.
- (4) - Petit puit qui alimente une région par l'eau potable.

TABLEAU 2
Répartition des échantillons analysés dans le Département de Akkar

| RÉGION | NOM DE L'ÉCHANTILLON | MARQUEURS RECHERCHÉS | | | AUTRES | CONCLUSION |
|---------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|------------------|--|----------------------------------|
| | | Coliformes thermotolérants | Coliformes fécaux | Streptocoque "D" | | |
| DALBA | AI-MACHOAL AI-ZIRAJ ⁽¹⁾ | 0 | 10 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Pseudomonas sp</i> | Présence de contamination fécale |
| | MATRANIEH AKKAR ⁽¹⁾ | 3 <i>E.coli</i> | 25 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Aeromonas sobria</i> | Présence de contamination fécale |
| DIYOUN AL-SSAMAK | OYOUN AL-SSAMAK ⁽¹⁾ | Indénombrable <i>E.coli</i> + <i>Klebsiella pneumoniae</i> | Indénombrable <i>E.coli</i> | 40 | <i>Hydrophilus</i> | Présence de contamination fécale |
| PAHBA | AYNE AL-DAYA ⁽¹⁾ | 0 | 2 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Enterobacter aerogenes</i> | Présence de contamination fécale |
| BAZBINA | BAZBINA ⁽¹⁾ | 4 <i>E.coli</i> | 0 | 0 | <i>Aeromonas sp</i> <i>Enterobacter intermedium</i> | Présence de contamination fécale |
| HAIZOUK | AYNE HAYZOUK ⁽¹⁾ | 0 | 20 <i>E.coli</i> | Indénombrable | <i>Aeromonas hydrophila</i> | Présence de contamination fécale |
| | HAYZOUK ⁽¹⁾ | 2 <i>E.coli</i> | 0 | 1 | 0 | Présence de contamination fécale |
| MECHMECH | AYNE AL-OHABA ⁽¹⁾ | 7 <i>E.coli</i> | Indénombrable | 0 | <i>Flavobacterium</i> | Présence de contamination fécale |
| | AYNE AWAD ⁽¹⁾ | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable <i>E.coli</i> | 0 | <i>Aeromonas hydrophila</i> | Présence de contamination fécale |
| FNAYDEK | AL-HOUWEH ⁽¹⁾ | 0 | 2 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Xanthomonas maltophilia</i> | Présence de contamination fécale |
| | AYNE ABOU-MOUSTAFA ⁽¹⁾ | 10 <i>E.coli</i> | 12 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Serratia plymuthica</i> | Présence de contamination fécale |
| BERKAYE | AL-ARBID ⁽¹⁾ | 10 <i>E.coli</i> | 11 <i>E.coli</i> | 0 | <i>Flavobacterium</i> | Présence de contamination fécale |
| | AYNE AL-JAMR ⁽¹⁾ | Indénombrable <i>E.coli</i> | 40 <i>E.coli</i> | Indénombrable | 0 | Présence de contamination fécale |
| HIRAR | AL-BARGACH ⁽¹⁾ | 15 <i>E.coli</i> | 20 <i>E.coli</i> | 20 | <i>Pseudomonas sp</i> | Présence de contamination fécale |
| DIET EL-HAJ | AYNE BEIT AL-HAJ ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |
| AL-ABDEH | AYNE AL-ZAWARIB ⁽¹⁾ | 0 | 1 <i>Klebsiella sp</i> | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |
| DIYOUN AL-GOZLAN | OYOUN AL-GOZLAN ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | <i>Aeromonas hydrophila</i> | Absence de contamination fécale |
| AL-KOBAYAT | NEBEH AL-GOZ ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |
| | AYNE AL-DOSEH ⁽¹⁾ | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable <i>E.coli</i> | Indénombrable | <i>Enterobacter agglomerans</i> | Présence de contamination fécale |
| | AL-KHRAYBEH ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |

Légendes :

Se référer au tableau 1

TABEAU 3
Répartition des échantillons analysés dans le Département de Koura

| RÉGION | NOM DE L'ÉCHANTILLON | MARQUEURS RECHERCHÉS | | | AUTRES | CONCLUSION |
|------------|----------------------------------|--|------------------------------|------------------|--|----------------------------------|
| | | Coliformes thermotolérants | Coliformes fécaux | Streptocoque "D" | | |
| BECHMEZINE | BECHMEZINE ⁽¹⁾ | 0 | 1 <i>E. coli</i> | 0 | <i>Vibrio metchnikovii</i> | Présence de contamination fécale |
| | KOSBA ⁽²⁾ Sans chlore | indénombrable <i>E. coli</i> | indénombrable <i>E. coli</i> | indénombrable | 0 | Présence de contamination fécale |
| KOSBA | KOSBA ⁽²⁾ Avec chlore | indénombrable <i>E. coli</i> | 15 <i>E. coli</i> | 100 | <i>Vibrio metchnikovii</i> | Présence de contamination fécale |
| BTORRAM | BTORRAM ⁽¹⁾ | 20 <i>E. coli</i> | 0 | 0 | 0 | Présence de contamination fécale |
| ABA | ABA ⁽¹⁾ | 40 <i>E. coli</i> | 0 | 3 | <i>Pseudomonas sp</i> | Présence de contamination fécale |
| AMYOUNE | AMYOUNE ⁽¹⁾ | 1 <i>E. coli</i> | 0 | 0 | <i>Aeromonas sp</i> | Présence de contamination fécale |
| DEDEH | DEDEH ⁽¹⁾ | 0 | 2 <i>E. coli</i> | 0 | 0 | Présence de contamination fécale |
| FIH | FIH ⁽¹⁾ | 2 <i>E. coli</i> | 30 <i>E. coli</i> | 0 | 0 | Présence de contamination fécale |
| ANFEH | AL-JARADEH ⁽¹⁾ | 3 <i>E. coli</i> | 0 | 10 | 0 | Présence de contamination fécale |
| | AYNE ANFEH ⁽¹⁾ | 50 <i>E. coli</i> 17 <i>Klebsiella pneumoniae</i> | Indénombrable <i>E. coli</i> | 1 | 0 | Présence de contamination fécale |
| KEFRAYA | KEFRAYA ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |
| BARSA | BARSA ⁽¹⁾ | Indénombrable | 30 <i>E. coli</i> | 50 | <i>Aeromonas sobria</i> | Présence de contamination fécale |
| KFAR HAZIR | KFAR HAZIR ⁽¹⁾ | 9 <i>E. coli</i> | 0 | 10 | - <i>Pseudomonas sp</i> - <i>Acinetobacter baumannii</i> - <i>Aeromonas hydrophila</i> | Présence de contamination fécale |
| KFAR HATA | KFAR HATA ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | - <i>Aeromonas hydrophila</i> | Absence de contamination fécale |
| MALLIS | MALLIS ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | | Absence de contamination fécale |
| BETROUMINE | BETROUMINE ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | - <i>Chromomonas violacium</i> - <i>Flavimonas oryzae</i> - <i>Flavimonas oryzae</i> | Absence de contamination fécale |
| TAABOURA | TAABOURA ⁽¹⁾ | 4 <i>E. coli</i> | 0 | 3 | <i>Pseudomonas sp</i> | Présence de contamination fécale |

Légendes :

Se référer au tableau 1

TABLEAU 4
Répartition des échantillons analysés dans le Département de Bchari

| RÉGION | Nom de l'échantillon Date | MARQUEURS RECHERCHÉS | | | AUTRES | CONCLUSION |
|----------|----------------------------------|---------------------------------|--|---------------------|--------|-------------------------------------|
| | | Coliformes thermotolérants | Coliformes fécaux | Streptocoque "D" | | |
| HERKACHA | AYNE MALEK ⁽¹⁾ | Indénombrable <i>E. coli</i> | Indénombrable <i>E. coli</i> | Indénombrable | 0 | Présence de contamination fécale |
| HASROUN | AYNE GHERRKYA ⁽¹⁾ | 50 <i>E. coli</i> | Indénombrable <i>E. coli</i> <i>Citrobacter</i> <i>freundii</i> | 3 | 0 | Présence de contamination fécale |
| AL-HADAD | AL-HADAD ⁽¹⁾ | 2 <i>E. coli</i> | 3 <i>E. coli</i> | 0 | 0 | Présence de contamination fécale |
| HAZOUNN | AYNE AL-BARIEH ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |
| BCHARI | AYNE MAR-SABA ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 2 | 0 | Présence de contamination fécale |

TABLEAU 5
Répartition des échantillons analysés dans le Département de Zghorta

| RÉGION | NOM DE L'ÉCHANTILLON | MARQUEURS RECHERCHÉS | | | AUTRES | CONCLUSION |
|---------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------|-------------------------------------|
| | | Coliformes thermotolérants | Coliformes fécaux | Streptocoque "D" | | |
| EHDEN | MAR-SARKIS ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | 0 | Absence de contamination fécale |
| | AYNE AL-WAHACH ⁽¹⁾ | 10 <i>E. coli</i> | Indénombrable <i>E. coli</i> | 10 | 0 | Présence de contamination fécale |
| RACHINE | RACHINE ⁽¹⁾ | 0 | 1 <i>E. coli</i> | 0 | 0 | Présence de contamination fécale |

TABLEAU 6
Répartition des échantillons analysés dans le Département de Batroun

| RÉGION | Nom de l'échantillon Date | MARQUEURS RECHERCHÉS | | | AUTRES | CONCLUSION |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|------------------------------------|
| | | Coliformes thermotolérants | Coliformes fécaux | Streptocoque "D" | | |
| AJDA IBRINE | AJDA IBRINE ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 0 | <i>Vibrio cholerae</i> | Absence de contamination fécale |

Légendes :

Se référer au tableau 1

Sur les 20 échantillons qui proviennent des sources naturelles, 15 sont contaminés (soit 75%). En ce qui concerne les échantillons d'eau des puits, 28 de 38 sont contaminés (soit 73,68%).

Les coliformes fécaux isolés lors de cette étude sont: *E. coli*, *Klebsiella oxytoca*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter aerogenes* et *Citrobacter freundii*. Ces bactéries qui sont représentatives du groupe des coliformes thermotolérants sont des indicateurs de contamination fécale de haute signification et que l'on doit continuer à prendre en considération.

En ce qui concerne les coliformes non fécaux et les autres bactéries qui sont présents dans les échantillons analysés, on constate la fréquence du genre *Aeromonas* (isolés dans 11 échantillons) avec les espèces suivantes: *A. hydrophila* 6/11; *A. sobria* 3/11 et *Aeromonas sp.* 2/11.

Les *Aeromonas* se rencontre habituellement dans les eaux douces et par conséquent, dans les eaux de mer recevant des apports réguliers d'eau douce (ils sont isolés des huîtres, moules et autres coquillages).

Chez l'homme *A. hydrophila* et *A. sobria* sont le plus souvent considérés comme des pathogènes opportunistes; il faut signaler que ces bactéries sont à l'origine de diarrhées sévères dans certaines régions tropicales; dans ce cas, toutes les souches isolées produisent une entérotoxine (Ljungha *et al.*, 1977).

Actuellement, les *Aeromonas* retiennent l'attention pour des raisons multiples: leur pouvoir pathogène chez l'homme et l'animal n'est pas négligeable, mais leur rôle est encore mal connu; leur intérêt en bactériologie alimentaire est certain, car ils peuvent altérer les aliments. Leur présence dans l'environnement et l'eau en particulier doit être décelée pour éviter de les confondre avec des coliformes.

Parmi les coliformes non fécaux et qui sont généralement aquatiques ou telluriques: *Enterobacter intermedium* et *Serratia phymuthica* sont isolées; et parmi les non fécaux : *Enterobacter agglomerans* (généralement isolé en clinique).

Les vibrions des eaux sont présents avec prédominance de l'espèce *V. metschnikovii* (3/4) suivi par l'espace *V. hollisae* (1/4).

Les souches de *V. metschnikovii* proviennent rarement d'échantillons d'origine humaine et le pouvoir pathogène de cette espèce est mal établi; quelques cas d'infections opportunistes chez le vieillard ou le sujet immunodéprimé ont été cependant signalés.

Les souches de *V. hollisae* peuvent être isolés chez l'homme surtout dans des infections intestinales (Morris et Black, 1985).

Les *Acinetobacter*, ont classiquement l'environnement (sol, eau) comme habitat. Ils représentent 0,001% de la flore hétérotrophe aérobie du sol et de l'eau

(Baumann, 1968). Ils font aussi partie de la flore bactérienne résidente de la peau chez l'adulte sain.

Cette étude montre la présence de certaines espèces des eaux douces comme: *Pseudomonas*, *Flavimonas*, *Xanthomonas* et *Chromomonas*.

Les résultats obtenus montrent, malheureusement, que la plupart des sources naturelles étudiées sont contaminées, ainsi que la majorité des puits qui sont utilisés au Liban pour alimenter les régions du nord du pays par l'eau potable - soit seule soit après mélange avec l'eau d'une source naturelle. Cette étude préliminaire indique aussi que la situation bactériologique d'eau potable n'est pas adéquate ; ceci peut expliquer la haute prévalance de certaines maladies dans cette région transmises généralement par l'eau comme la typhoïde, la gastroentérite infantile à *E.coli* et la cholera.

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Fouad Dabboussi pour sa collaboration technique lors de la réalisation de ce projet, ainsi que M. Adnan Ismail. De même M. Wassim Chehadé et Rami Kamaledine pour leur aide dans la collection des échantillons.

BIBLIOGRAPHIE

- Baumann, P. 1968. Isolation of *Acinetobacter* from soil and water. *J. Bacteriol.*, 96: 39 - 42.
- Buttiaux, R., Samaille, J. et Pierens, Y. 1956. L'identification des *Escherichia* des eaux, test d'Eijkman et production d'indole à 44°C - Test IMVIC. *Ann. Inst Pasteur (Lille)*, 8: 137 - 149.
- Fennel, H. 1972. A single tube confirmatory test for *Escherichia coli* at 44°C. *Proc. Soc. Water Treatm. Exam.*, 21: 13 - 20.
- Ferley, J. P., Zmirou, D., Collin, J.F. et Charrel, M., 1986. Etude longitudinale des risques liés à la consommation d'eaux non conformés aux normes bactériologiques., *Rev. Epidém. et Santé Publ.*, 34: 89 - 99.
- Gavini, F., Leclerc, H. et Mossel, D.A.A. 1985. *Enterobacteriaceae* of the "coliform group" in drinking water: identification and worldwide distribution. *Syst. Appl. Microbiol.*, 6: 312 - 318.
- Kouyoumjian, H. H., et Rabbat, A. 1994. Lebanon report on integrated water resources management. *PAP/RAC-MWI* workshop of application of

integrated approach to development, management and use of water resources. Marseille, France.

- Leclerc, H., et Moriamez, J.C. 1980. Étude quantitative de la flore fécale de l'adulte et du nourrisson alimenté artificiellement. *Path. biol.*, 4: 217 - 226.
- Leclerc, H., et Mossel, D.A.A. 1989. *Microbiologie- Le tube digestif, l'eau et les aliments*. Doin Ed.
- Ljungha, A., Popof, M.E. and Wadsworth, T. 1977. *Aeromonas hydrophila* in acute diarrheal disease: detection of enterotoxin and biotyping of strains. *J. Clin. Microbiol.*, 6: 96 - 100.
- Morris, J G. Black RE.. 1985. Cholera and other vibrioses in the United States *New Engl. J. Med.*, 312: 343 - 350.
- Normes Afnor, norme française.. 1985. Essais des eaux. Recherche et dénombrement des streptocoques du groupe D. Méthode générale par filtration sur membrane. NFT90-416.
- Normes Afnor, norme française, 1985. Essais des eaux. Recherche et dénombrement des coliformes et des coliformes thermotolérants. Méthode générale par filtration sur membrane. NFT90-414.
- Oger, C., Gavini, F., Delatre, J.M. et Leclerc, H. 1981. A propos des coliformes et de la colimétrie des eaux d'alimentation. *Ann. Microbiol. (Inst. Pasteur)*, 132A: 183 - 189.
- Zmirou, D., Ferley, J. P., Collin, J. F., Charrel, M., Berlin, J. 1987. A follow-up study of gastro-intestinal diseases related to bacteriologically substandard drinking water. *Am. J. of Public Health*, 5: 582 - 584.

Pollution chimique et microbiologique des eaux souterraines de la plaine du Akkar (Liban Nord), et leurs conséquences éventuelles sur la santé humaine

J. Halwani, M. Hamzé

Université Libanaise - Faculté de Santé Publique - Branche 3 - Tripoli - Liban. P. O. Box 246, Tripoli - Liban.

Abstract: *Chemical, physicochemical and microbiological analysis had been done over 38 samples of groundwater wells used in human consumption and agriculture in the plains of Akkar in North Lebanon. These analyses show serious nitrates' contamination in 33 samples (86%), faecal contamination in 24 samples (63%) and exceed salinity in the North of tested area. In this paper, reasons & possible consequences on human health of this pollution will be discussed. In the conclusion proposals and solutions will be presented for this dramatic situation.*

Résumé: *L'analyse chimique, physico-chimique et microbiologique effectuée sur 38 échantillons des eaux souterraines de la plaine du Akkar au Liban Nord utilisées dans la consommation humaine et en agriculture révèle une contamination grave par les nitrates dans 33 échantillons (86%), une pollution fécale dans 24 échantillons (63%) et une salinité excessive au nord de la plaine. Les causes de cette pollution et les conséquences éventuelles sur la santé humaine sont présentées. Des propositions pour remédier à cette situation dramatique sont avancées.*

Introduction

La plaine côtière du Akkar s'étend sur une surface de près de 130 km², du Nahr El-Kabir au poste douanier Libano-Syrien Al-Arida au nord, jusqu'au Nahr El-Bared au sud; à l'est elle est limitée par la ligne Bebnine - Halba - poste douanier Libano-Syrien Al-Aabboudié (fig. 1). Deux fleuves importants traversent cette plaine : Nahr Arka et Nahr El-Ostouane. Une baie donne à la plaine une très belle morphologie défigurée au sud par les nomades et le dépôt sauvage des ordures ménagères et au nord par l'exploitation d'une importante couche géologique sableuse. La plaine connaît une agriculture intensive, une petite industrie est en train de se développer à proximité de l'aéroport El-Qlaiaat. Sa population est estimée à 75 000 habitants, répartie sur près de 45 villages et hameaux.

Le réseau public de distribution d'eau potable ne couvre pas toute la plaine, la population même si elle est desservie par ce réseau, puise depuis toujours, sans aucun contrôle sanitaire, dans la nappe phréatique l'eau nécessaire pour l'alimentation, l'industrie et l'irrigation. Pour les petits villages, il y a presque un puits (pompage manuel ou motorisé, profondeur de 5-15 m) devant chaque habitation; les villages les plus importants sont mieux organisés, des points de captage sur la route principale (profondeur de 15-35 m) sont proposés gratuitement aux personnes désirant remplir les fûts et les

bidons; dans les nouvelles constructions, un puit est mis à la disposition des habitants qui alimente les réservoirs des différentes habitations. Quant aux champs fertiles importants, ils sont équipés de plusieurs points de captage (profondeur de 25-60 m). Il n'existe pas de données précises sur le nombre de puits forés, leurs débits, l'année et le type de construction, la profondeur exacte et le flux annuel d'eau prélevée.

D'un autre côté, il n'y a pratiquement pas de réseau d'égouts dans cette plaine, la majorité des maisons déverse dans des fosses "septiques" situées à proximité des habitations; le reste raccordent leurs canalisations d'égouts aux cours d'eau de la plaine. Etant donné le caractère campagnard de la région, un élevage de bétail existe dans pratiquement chaque village.

La qualité des eaux souterraines de la plaine du Akkar n'a jamais été étudiée auparavant, la croyance populaire prétend que les eaux souterraines bénéficient d'une protection naturelle et sont donc en général de bonne qualité. Etant donné la vulnérabilité de ces ressources naturelles dû à la diffusion progressive au travers du sol, des pollutions superficielles, ponctuelles ou diffuses, nous avons donc pris l'initiative d'analyser les eaux de certains puits forés, et rechercher les pollutions susceptibles de s'y trouver. En effet, les nappes peuvent être atteintes par plusieurs types de pollution, notamment la pollution diffuse agricole (nitrates et pesticides) et la pollution fécale.

Echantillonnage

Les prélèvements ont été effectués avec des flacons stériles en verre ordinaire, dans certains points de captage de la région étudiée, dont la localisation est répartie sur la carte de la figure 2, puis sont transportés au laboratoire dans des glacières. Le tableau 1 regroupe les informations utiles sur les sites sélectionnés.

Les analyses des échantillons prélevés ont été réalisées immédiatement après leurs arrivées aux laboratoires de la Faculté de Santé Publique de l'Université Libanaise à Tripoli (maximum 6h entre le prélèvement et l'analyse pour la partie microbiologique).

L'ensemble de l'étude porte sur 38 analyses effectuées pendant la période allant du 18 mars au 6 mai 1997.

Matériels et méthodes

Les méthodes d'analyse chimique et physico-chimique utilisées sont celles décrites par les normes françaises AFNOR [1]:

- Dosage des nitrates : Méthode spectrométrique avec l'acide sulfosalicylique (NFT 90-045 : ISO 7890-3).

- Dosage du sodium et du potassium : Méthode par spectrométrie d'émission de flamme, (NFT 90-019).
- Dosage du fer : Méthode spectrométrique à la phénantroline 1,10 (NFT 90-017, ISO 63332).
- Dosage des ions sulfates : Méthode néphélométrique, par précipitation en présence de chlorure de baryum en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum (NFT 90-040).
- Dosage des ions chlorures : Méthode titrimétrique par le nitrate d'argent en présence de chromate de potassium comme indicateur (NFT 90-014).
- Dosage du calcium : Méthode titrimétrique à l'EDTA (NFT 90-016).
- Mesure de la conductivité électrique par un conductimètre portable Schott (NFT 90-031).
- Mesure de la turbidité par un turbidimètre Jenway.
- Mesure électrométrique du pH avec électrode de verre Schott, (NFT 90-008).

Pour des raisons matérielles, nous n'avons pas pu effectuer toutes les analyses chimiques et physico-chimiques souhaitées, surtout les pesticides et les métaux lourds toxiques.

Pour la mise en évidence de la pollution fécale des eaux, nous avons appliqué la colimétrie et la streptométrie. La première consiste à dénombrer des *Escherichia coli* (coliformes thermotolérants) et des bactéries apparentées, les coliformes. La deuxième, vise à dénombrer les streptocoques fécaux : les entérocoques (*E. faecalis*, *E. faecium*, *E. durans*) et *streptococcus bovis*, tous appartiennent au groupe antigénique D de Lancefield.

Trois marqueurs sont recherchés, les coliformes totaux, les coliformes thermotolérants et les streptocoques fécaux. Pour la mise en évidence de chaque marqueur 100 cc d'eau sont filtrés sur membrane de nitrocellulose (Cole Parmer - USA) dont le diamètre de porosité est égale à 0.45 μ .

Trois milieux sélectifs ont été utilisés [2]:

- La gélose d'Endo (Becton Dickinson BD - USA) pour la mise en évidence des coliformes totaux: après déposition du membrane, la boîte est incubée à 37°C pendant 24 heures. Les coliformes dégradent le lactose donnant un aldéhyde et de l'acide. L'aldéhyde libère la fuchsine de la fuchsine sulfitée et cette dernière va colorer les colonies en rouge avec un reflet métallique constant vert chatoyant (reflet de la fuchsine).
- La gélose MFC (BD - USA) est utilisée pour la mise en évidence des coliformes thermotolérants. Elle contient le lactose, la bile, le bleu d'aniline et l'acide rosolique. Après déposition du filtre la boîte est incubée à 44°C. Les coliformes thermotolérants y forment des colonies bleues.
- La gélose BEA (Sanofi Diagnostics Pasteur - France) est utilisée pour la mise en évidence des streptocoques fécaux. Après déposition du filtre et in-

cubation à 37°C, les colonies de streptococcus sont petites et entourées d'un halo noir très net dû à l'hydrolyse de l'esculine.

Résultats

Le tableau 2 rend compte des résultats d'analyses chimiques et physico-chimiques obtenus. Le tableau 3 montre les résultats bactériologiques obtenus après détermination des marqueurs de pollution fécale.

Afin de juger de la qualité de ces eaux, les résultats obtenus seront comparés aux normes françaises et internationales OMS, CEE, EPA, [3-6], ainsi qu'au décret libanais 1/52 du 29/7/96 du Ministère de l'Environnement.

A- pH

Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une eau, toutes les valeurs mesurées respectent les normes et se situent dans la fourchette de 6.84 à 7.65.

B- Conductivité

Les normes ne font pas état de valeurs maximales admissibles, mais si on retient la valeur maximale de 1500 mg pour les résidus secs [3-6], l'équivalent en conductivité serait de l'ordre de 2 mS/cm; en effet, la conductivité est proportionnelle au degré de minéralisation qui représente la teneur globale en substances minérales généralement ionisées, la minéralisation de l'eau est liée à la conductivité par la relation :

$$\text{Minéralisation (mg/l)} = 0.716 \times \text{Conductivité } (\mu\text{S/cm}) \text{ [7].}$$

On rappelle que les eaux potables ont généralement une conductivité comprise entre 200 et 1000 $\mu\text{S/cm}$.

Les eaux souterraines de la plaine du Akkar se répartissent en 3 zones en fonction de la conductivité mesurée:

1- $\text{CE} > 1.4 \text{ mS/cm}$, qui correspond aux villages situés dans la partie nord de la plaine et qui s'étend du village El-Qlaiaat (Haret el Jadideh) jusqu' à Al-Arida au nord et Hekr El-Dahri à l'est avec un point noir à Cheikh Zennad. Les eaux souterraines de cette partie présentent une conductivité très élevée qui se traduit par une salinité très importante jusqu'à une profondeur de 30 mètres.

2- $0.95 < \text{CE} < 1.23 \text{ mS/cm}$, qui correspond à la région située juste en dessous, limitée par la ligne El-Abdeh - Ckeikh Ayyache; dans cette zone la minéralisation est très accentuée et se situe à la limite de la potabilité.

3- $\text{CE} < 0.9$, qui correspond au sud de la plaine, partie marquée par la ligne El-Mahmra - Halba, les valeurs de la conductivité sont conformes aux normes.

C- Turbidité

La turbidité représente une mesure non spécifique de la concentration des particules en suspension. Le niveau guide est de 0.4 NTU, la valeur maximale admissible est de 4 NTU. Les valeurs mesurées se situent donc dans l'intervalle autorisé des normes.

D- Calcium

Le calcium est l'élément principal de la dureté de l'eau, sa teneur est directement liée à la nature géologique des terrains traversés. La valeur de référence est de 100 mg/l, des concentrations élevées dans l'eau ne présentent pas de danger pour la santé mais favorisent l'entartrage des canalisations. Si on se réfère à l'OMS qui recommande une valeur indicative globale de 500 mg/l, les valeurs mesurées se situent globalement dans les directives sanitaires.

E- Sodium

Les concentrations du sodium dans l'eau potable sont normalement comprises entre 20 et 150 mg/l, la forme la plus répandue étant le chlorure de sodium. Les eaux souterraines des villages situés au nord de la plaine ont une teneur supérieure à la concentration maximum admissible.

F- Potassium

Le potassium se trouve en général en faible quantité dans l'eau, la concentration maximum admissible a été fixée à 12 mg/l. Comme pour le cas du sodium, les eaux souterraines des villages situés au nord de la plaine ont une teneur supérieure à la valeur limite.

G- Fer

Les valeurs mesurées sont inférieures à la valeur indicative de 0.3 mg/l retenue par l'OMS et ne représentent donc pas de danger pour la santé.

H- Nitrates

Tous les échantillons ont une teneur en nitrates supérieure à 25 mg/l et ne conviennent donc pas aux enfants de moins de 2 ans et aux femmes enceintes, 33 échantillons sur 38 (86%) ont une teneur supérieure à 50 mg/l, limite pour déclarer l'eau non potable, avec une répartition inégale en fonction de la profondeur du point de captage et l'activité agricole des villages. 11 échantillons ont une teneur comprise entre 50 et 100 mg/l, intervalle de risque pour la consommation d'eau polluée par les nitrates. Le reste, soit 22 points de captage d'eau souterraine sont fortement pollués et représentent un danger pour les habitants s'ils sont utilisés en tant que eau de boisson.

I- Chlorures

Les chlorures sont présents dans toutes les eaux, leurs concentrations doivent se situer entre 25 et 250 mg/l. On assiste dans les villages situés au nord de la plaine à des concentrations très élevées dans les eaux souterraines qui nuisent à leur goût en leur conférant une saveur salée.

K- Sulfates

En Europe, la concentration maximale admissible a été fixée à 250 mg/l, l'OMS a choisi la valeur de 400 mg/l en se basant sur des critères gustatifs. Les valeurs mesurées se situent en conséquence dans les normales. Les concentrations élevées mesurées à certains endroits, sont dues à la présence des roches volcaniques au Akkar.

Discussion

Cette région a fait l'objet de nombreux captages pour les besoins en eau potable, industrielle et agricole. Les résultats obtenus mettent en évidence l'hétérogénéité et la complexité réelle de la nappe de cette plaine. En effet, le lessivage des sols entraîne la dissolution de sels présents (carbonates, bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, calcium, sodium, potassium, magnésium), ce qui provoque un accroissement de la conductivité des eaux souterraines.

La conductivité en tant que telle n'a pas d'effet sur la santé, puisqu'elle reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous, mais la minéralisation de l'eau peut entraîner selon les cas un goût salé, une accélération de la corrosion, et des dépôts dans les tuyauteries [8].

Les eaux souterraines des villages situés dans la partie nord de la plaine sont en conséquence impropres à la consommation et peuvent même entraîner des dégâts aux cultures. Leur salinité excessive s'explique par le fait que pendant la période 1980-1994, des personnes ont extrait illégalement pour leur besoin de la construction le sable et les cailloux de la côte. Selon les habitants, on estime le tonnage extrait à des centaines de millions de tonnes, c'est pour cela que la nappe phréatique est probablement entrée en communication avec la mer, d'où une invasion saline par inversion de charge entre le potentiel de la Méditerranée et celui de la nappe des sables [8].

Ceci est net au vu des teneurs très élevées en sodium et chlorure; en effet, indépendamment de la nature de la formation géologique traversée, la présence excessive de ces ions dans les eaux souterraines est attribuée à la pénétration de l'eau de mer dans les régions cotières, aux embruns, aux drainages d'irrigation, et au fait que le pompage dans certains villages est réalisé au contact de la formation géologique [7].

D'un autre côté, les eaux souterraines de la plaine sont fortement polluées par les nitrates et représentent un danger potentiel pour la population qui l'utilisent en tant que eau de boisson. Il est signalé que dans les pays à agriculture intensive, la consommation de l'eau est absolument interdite si elle contient plus de 100 mg/l de nitrates. La présence de nitrates à des concentrations très élevées est due à l'utilisation massive sans aucun contrôle des engrais azotés en agriculture. L'excès est entraîné aux eaux souterraines par lessivage du sol.

Les résultats d'analyse microbiologique obtenus ont montré la présence d'une pollution fécale dans 24 échantillons des 38 analysés, soit un pourcentage de l'ordre de 63%. Ces résultats rejoignent les résultats précédemment obtenus lors d'une étude sur 58 échantillons d'eau des sources naturelles et puits au nord Liban où 75% d'entre eux présentaient une pollution fécale [9]. D'après le tableau 3, on remarque une présence importante des entérocoques dans la plupart des échantillons testés.

La colimétrie fait aujourd'hui de la législation dans tous les pays. En effet, les *E. coli* et coliformes présentent la plupart des qualités requises des indicateurs de pollution fécale: accompagner les pathogènes entériques, être plus nombreux et plus faciles à dénombrer, ne pas se multiplier dans l'environnement, résister au moins autant que les pathogènes aux traitements d'épuration / désinfection [10-12].

En ce qui concerne les entérocoques, ils sont peu pathogènes et peuvent être manipulés sans danger, ils sont abondants dans les fèces (10^5 à 10^8 /g); ils abondent dans les eaux contaminées et sont absents des eaux pures, ils résistent bien dans l'environnement, sans se multiplier [13-15].

D'un autre côté, les eaux souterraines de la plaine sont fortement polluées par les nitrates et représentent un danger potentiel pour la population qui l'utilisent en tant que eau de boisson. Il est signalé que dans les pays à agriculture intensive, la consommation de l'eau est absolument interdite si elle contient plus de 100 mg/l de nitrates. La présence de nitrates à des concentrations très élevées est due à l'utilisation massive sans aucun contrôle des engrais azotés en agriculture. L'excès est entraîné aux eaux souterraines par lessivage du sol.

Les résultats d'analyse microbiologique obtenus ont montré la présence d'une pollution fécale dans 24 échantillons des 38 analysés, soit un pourcentage de l'ordre de 63%. Ces résultats rejoignent les résultats précédemment obtenus lors d'une étude sur 58 échantillons d'eau des sources naturelles et puits au nord Liban où 75% d'entre eux présentaient une pollution fécale [9]. D'après le tableau 3, on remarque une présence importante des entérocoques dans la plupart des échantillons testés.

La colimétrie fait aujourd'hui de la législation dans tous les pays. En effet, les *E. coli* et coliformes présentent la plupart des qualités requises des indicateurs de pollution fécale: accompagner les pathogènes entériques, être plus nombreux et plus faciles à dénombrer, ne pas se multiplier dans l'environnement, résister au moins autant que les pathogènes aux traitements d'épuration / désinfection [10-12].

En ce qui concerne les entérocoques, ils sont peu pathogènes et peuvent être manipulés sans danger, ils sont abondants dans les fèces (10^5 à 10^8 /g); ils abondent dans les eaux contaminées et sont absents des eaux pures, ils résistent bien dans l'environnement, sans se multiplier [13-15].

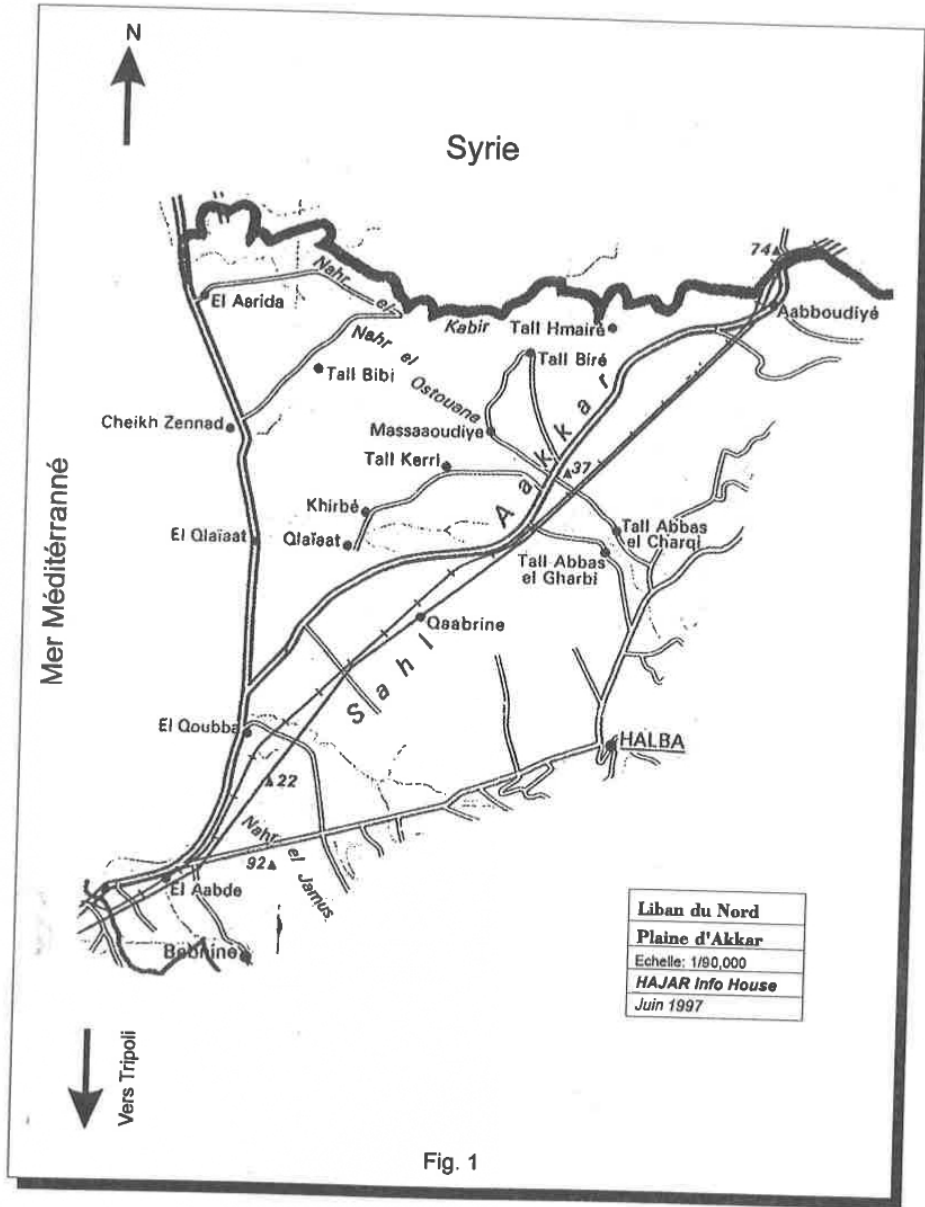
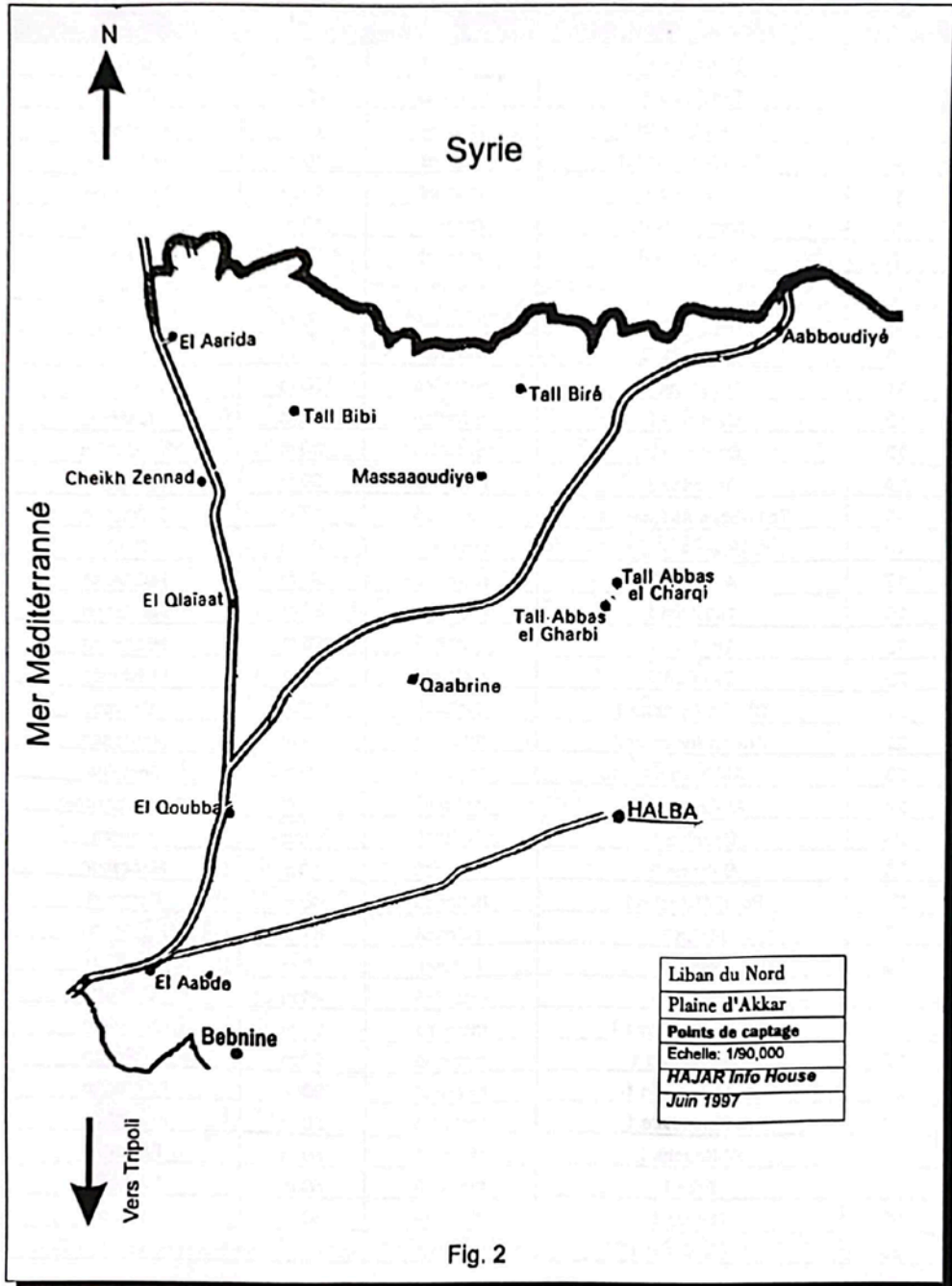


Fig. 1

| Num. | Site | Pompage | Prof. | Location |
|------|------------------------|----------|---------|-----------------|
| 1 | El-Aarida 1 | manuel | 10 m | Habitation |
| 2 | Tall Farès 4 | motorisé | 40 m | Champ |
| 3 | Cheikh Zennad 1 | manuel | 10 m | Habitation |
| 4 | Cheikh Zennad 3 | manuel | 10 m | Habitation |
| 5 | El-Qlalaat 1 | manuel | 10 m | Habitation |
| 6 | Sammakié 3 | manuel | 10 m | Habitation |
| 7 | Sammakié 4 | manuel | 10 m | Habitation |
| 8 | Tall Hayat 1 | motorisé | 50 m | Champ |
| 9 | Tall Hayat 2 | motorisé | 50 m | Champ |
| 10 | Tall Hayat 3 | motorisé | 50 m | Ecole |
| 11 | Tall Hayat 4 | motorisé | 50 m | Dispensaire |
| 12 | Qaabrine 1 | motorisé | 40 m | Champ |
| 13 | Qaabrine 2 | motorisé | 30 m | Habitation |
| 14 | Qaabrine 3 | motorisé | 30 m | Habitation |
| 15 | Tall Abbas Al-Gharbi 1 | motorisé | 47 m | Habitation |
| 16 | Tall Abbas Al-Charki 1 | motorisé | 45 m | Ecole |
| 17 | Al-Hisah 1 | motorisé | 35 m | Habitation |
| 18 | Tall Andi 1 | motorisé | 38 m | Habitation |
| 19 | Tall Biré 1 | motorisé | 60 m | Habitation |
| 20 | Tall Biré 2 | motorisé | 38 m | Habitation |
| 21 | Cheikh Ayyache 1 | Naturel | surface | Source |
| 22 | Cheikh Ayyache 2 | motorisé | 35 m | Habitation |
| 23 | Al-Aabdeh 1 | motorisé | 30 m | Fontaine |
| 24 | Al-Aabdeh 2 | motorisé | 45 m | Centre agricole |
| 25 | Bebnine 1 | Naturel | Surface | Source |
| 26 | Bebnine 2 | motorisé | 10 m | Habitation |
| 27 | Bourj Al-Arabe 1 | motorisé | 40 m | Fontaine |
| 28 | Halba 1 | motorisé | 100 m | Habitation |
| 29 | Halba 2 | Naturel | 10 m | Fontaine |
| 30 | Tall Bibi 1 | motorisé | 40 m | Champ |
| 31 | Koubba Bchamra 1 | motorisé | 35 m | Habitation |
| 32 | Hakr Aldahri 1 | motorisé | 22 m | Habitation |
| 33 | Al-Massoudie 1 | motorisé | 30 m | Habitation |
| 34 | Al-Kouakhate 1 | motorisé | 20 m | Habitation |
| 35 | Al-Koucha 1 | motorisé | 60 m | Fontaine |
| 36 | Arka 1 | motorisé | 50 m | Fontaine |
| 37 | Ransie 1 | motorisé | 50 m | Fontaine |
| 38 | El-Mhahmra 1 | motorisé | 40 m | Habitation |

Tableau 1- Echantillonnage



| Echan. | pH | CE mS/cm | NTU | Ca ⁺⁺ mg/l | Na ⁺ mg/l | K ⁺ mg/l | Fe ⁺⁺ mg/l | NO ₃ mg/l | Cl mg/l | SO ₄ ²⁻ mg/l |
|--------|------|----------|------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|---------------------------------------|
| 1 | 7.20 | 2.05 | 0.15 | 177 | 184 | 9.85 | 0.086 | 180 | 48 | 40 |
| 2 | 7.59 | 0.81 | 0.04 | 68 | 34 | 2.62 | 0.006 | 38 | 52 | 15 |
| 3 | 6.84 | 12.1 | 0.50 | 39 | 2700 | 98 | 0.198 | 251 | 2950 | 129 |
| 4 | 7.24 | 6.02 | 0.62 | 182 | 1005 | 16.5 | 0.106 | 161 | 1536 | 48 |
| 5 | 7.39 | 1.55 | 0.14 | 105 | 168 | 12 | 0.081 | 76 | 178 | 102 |
| 6 | 7.05 | 2.89 | 0.16 | 225 | 320 | 52 | 0.143 | 1076 | 270 | 69 |
| 7 | 7.23 | 1.42 | 0.06 | 118 | 90 | 22 | 0.112 | 118 | 16 | 43 |
| 8 | 7.33 | 0.99 | 0.06 | 109 | 57 | 1.32 | 0.062 | 286 | 88 | 73 |
| 9 | 7.20 | 1.01 | 0.06 | 112 | 60 | 1.35 | 0.054 | 310 | 60 | 72 |
| 10 | 7.26 | 1.12 | 0.05 | 104 | 71 | 2.33 | 0.059 | 294 | 82 | 31 |
| 11 | 7.36 | 1.06 | 0.04 | 109 | 68 | 1.25 | 0.055 | 290 | 73 | 76 |
| 12 | 7.30 | 0.88 | 0.02 | 106 | 51 | 1.14 | 0.064 | 298 | 62 | 30 |
| 13 | 7.33 | 0.87 | 0.02 | 103 | 54 | 3.95 | 0.068 | 232 | 58 | 49 |
| 14 | 7.30 | 0.98 | 0.04 | 114 | 54 | 3.97 | | 210 | 57 | 57 |
| 15 | 7.24 | 1.18 | 0.05 | 77 | 35 | 0.61 | 0.132 | 193 | 76 | 48 |
| 16 | 7.29 | 0.83 | 0.04 | 66 | 27 | 1.12 | 0.014 | 93 | 38 | 50 |
| 17 | 7.38 | 0.81 | 0.02 | 70 | 22 | 0.85 | 0.009 | 37 | 36 | 37.5 |
| 18 | 7.65 | 1.58 | 0.16 | 107 | 90 | 5.84 | 0.001 | 128 | 183 | 96.5 |
| 19 | 7.44 | 0.88 | 0.04 | 99 | 32 | 0.82 | 0.008 | 166 | 54 | 62.5 |
| 20 | 7.29 | 1.16 | 0.08 | 99 | 58 | 2.11 | 0.009 | 203 | 87 | 101 |
| 21 | 7.50 | 0.70 | 0.02 | 71 | 35 | 0.98 | 0.007 | 28 | 50 | 16.5 |
| 22 | 7.13 | 1.23 | 0.13 | 96 | 46 | 0.45 | 0.047 | 70 | 96 | 78 |
| 23 | 7.04 | 0.95 | 0.05 | 124 | 29 | 0.75 | 0.105 | 141 | 40 | 65.3 |
| 24 | 7.73 | 0.81 | 0.04 | 72 | 47 | 0.62 | 0.011 | 61 | 49 | 30 |
| 25 | 7.18 | 0.74 | 0.02 | 112 | 16 | 0.11 | 0.051 | 66 | 34 | 23.3 |
| 26 | 7.06 | 0.88 | 0.03 | 127 | 32 | 0.67 | 0.012 | 100 | 64 | 35.4 |
| 27 | 7.40 | 0.77 | 0.02 | 93 | 18 | 0.14 | 0.093 | 36 | 30 | 32.4 |
| 28 | 7.71 | 0.74 | 0.02 | 71 | 28 | 0.64 | 0.251 | 34 | 84 | 14 |
| 29 | 7.48 | 1.01 | 0.06 | 119 | 32 | 0.88 | 0.014 | 162 | 84 | 44.4 |
| 30 | 7.23 | 3.00 | 0.21 | 165 | 360 | 55 | 0.095 | 79 | 652 | 51 |
| 31 | 7.35 | 0.83 | 0.04 | 92 | 27 | 0.82 | 0.125 | 64 | 40 | 32.5 |
| 32 | 6.98 | 2.55 | 0.16 | 188 | 300 | 48 | 0.136 | 365 | 500 | 107.5 |
| 33 | 7.33 | 1.04 | 0.07 | 93 | 33 | 0.78 | 0.054 | 163 | 60 | 55 |
| 34 | 7.29 | 0.82 | 0.06 | 60 | 39 | 0.86 | 0.212 | 79 | 68 | 17.5 |
| 35 | 7.66 | 0.98 | 0.05 | 98 | 53 | 2.8 | 0.135 | 102 | 80 | 30 |
| 36 | 7.60 | 0.69 | 0.02 | 74 | 20 | 0.35 | 0.211 | 59 | 28 | 2 |
| 37 | 7.36 | 0.74 | 0.02 | 80 | 20 | 0.37 | 0.196 | 111 | 40 | 37 |
| 38 | 7.70 | 0.84 | 0.03 | 101 | 20 | 0.38 | 0.075 | 118 | 32 | 52.5 |

Tableau 2- Analyse chimique et physico-chimique des eaux souterraines de la plaine d'Akkar.

* CE (Conductivité électrique spécifique à 20°C).

| Num. | Coliformes totaux | Coliformes thermotolérants | Entérocoques | Conclusion |
|------|-------------------|----------------------------|---------------|---------------|
| 1 | + | + | indénombrable | Contamination |
| 2 | 0 | + | + | Contamination |
| 3 | 0 | 0 | +++ | Contamination |
| 4 | indénombrable | indénombrable | indénombrable | Contamination |
| 5 | +++ | ++ | ++ | Contamination |
| 6 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 7 | + | + | 0 | Contamination |
| 8 | 0 | + | 0 | Contamination |
| 9 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 10 | 0 | 0 | indénombrable | Contamination |
| 11 | + | + | +++ | Contamination |
| 12 | + | + | 0 | Contamination |
| 13 | + | 0 | + | Contamination |
| 14 | ++++ | +++ | +++ | Contamination |
| 15 | +++ | 0 | + | Contamination |
| 16 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 17 | 0 | 0 | + | Contamination |
| 18 | 0 | + | ++++ | Contamination |
| 19 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 20 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 21 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 22 | ++ | ++ | ++++ | Contamination |
| 23 | 0 | 0 | ++++ | Contamination |
| 24 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 25 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 26 | indénombrable | indénombrable | indénombrable | Contamination |
| 27 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 28 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 29 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 30 | indénombrable | indénombrable | indénombrable | Contamination |
| 31 | + | 0 | 0 | Contamination |
| 32 | + | + | indénombrable | Contamination |
| 33 | 0 | + | indénombrable | Contamination |
| 34 | indénombrable | indénombrable | indénombrable | Contamination |
| 35 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 36 | 0 | 0 | + | Contamination |
| 37 | 0 | 0 | 0 | Absence |
| 38 | 0 | 0 | 0 | Absence |

Tableau 3- résultats de l'analyse microbiologique
 Légende: +: 1-10 colonies, ++ :10-20 colonies, +++: 20-30 colonies, ++++: >40 colonies.

Conséquences de la pollution présente sur la santé humaine

Ces résultats montrent l'ampleur de la situation, les conséquences de cette pollution sur la santé humaine sont très graves. En effet, beaucoup des maladies infectieuses dont l'eau est le vecteur peuvent provoquer des maladies tel que la diarrhée, la fièvre, la typhoïde, le choléra, la dysenterie, la gastro-entérite à *E. coli* surtout chez les enfants, les hépatites (A et E), la poliomyélite et différentes affections parasitaires [12].

En plus du goût salé, la présence excessive des chlorures dans l'eau peut être préjudiciable aux personnes atteintes de maladies rénales ou cardiovasculaires. L'ingestion chronique de fortes doses de sodium joue un rôle important dans le développement de l'hypertension chez les sujets prédisposés et une ingestion excessive de chlorure de sodium provoque en général des vomissements. Les dangers dus à l'excès de sodium dans l'eau concernent principalement deux catégories de sujets : les personnes atteintes de troubles cardiaques, vasculaires et rénaux qui doivent suivre un régime hyposodé et les nourrissons en raison de l'immaturation de leurs reins ou du fait d'affections gastro-intestinales des nourrissons risquent une déshydratation avec élévation du niveau de sodium dans le sang (hypernatrémie) [16].

Les effets des nitrates ne sont pas en eux-mêmes dangereux pour la santé mais c'est leur transformation en nitrites dans l'organisme qui représente un risque potentiel toxique surtout chez les nourrissons et les femmes enceintes. En effet, les nitrites issus de la transformation des nitrates dans l'estomac, oxydent l'hémoglobine en méthémoglobine, inapte au transport de l'oxygène des poumons aux tissus. Cette affection ou méthémoglobinémie, se manifeste par une cyanose (ou maladie bleue) et touche essentiellement les nourrissons du fait de la part prépondérante de l'eau comme aliment lors de la reconstitution de lait en poudre (un enfant de 6 mois peut consommer jusqu'à 1 litre d'eau par jour) [17-18].

Des études récentes mettent en cause les nitrates, qui peuvent favoriser l'apparition de certains cancers digestifs, urinaires et gastriques par l'élaboration de substances N-nitrosés réputées cancérigènes : les nitrosamines et les nitrosamides, synthétisées dans l'estomac à partir des nitrates. Par ailleurs, il est estimé que l'absorption de 500 mg de nitrates par jour peut provoquer une inflammation des muqueuses intestinales chez les adultes. Il est à noter que la dose journalière admissible est de 255 mg/jour pour un adulte (eau+aliment) [19-20].

Conclusion

Les eaux souterraines de la plaine du Akkar présentent une pollution chimique et microbiologique importante qui peut entraîner des problèmes de

santé très graves à la population et dont les conséquences peuvent être ressenties à le long terme.

Le phénomène de pollution des nappes suppose qu'il y a dans l'eau propagation entre le site polluant et le captage pollué. Une étude hydrogéologique doit être effectuée rapidement afin de déterminer la vulnérabilité de la nappe, approfondir le problème de l'infiltration de l'eau de mer dans les eaux souterraines et étudier d'une part les possibilités de transit des polluants de la surface du sol vers la nappe en question et d'autre part la propagation dans la nappe phréatique elle-même.

Afin de protéger la santé des citoyens et préserver la qualité des eaux souterraines, un plan d'action urgent doit être déclenché rapidement. Il faut construire un réseau d'égouts et une unité de traitement des eaux usées avant qu'ils rejoignent les cours d'eau. D'un autre côté un réseau de distribution d'eau potable dans la plaine du Akkar sera alimenté à partir des sources montagneuses. Il doit être installé le plus tôt possible. Tous les puits utilisés actuellement pour la consommation humaine devront être fermés.

Par ailleurs, une politique d'irrigation à partir des eaux souterraines est à définir. Il faudrait lancer une campagne de sensibilisation pour les agriculteurs afin de leur expliquer la gravité de la situation et les conseiller pour leurs besoins en eau, en engrais, fertilisants et pesticides.

Enfin un système de gestion et de contrôle de la nappe phréatique doit être mis en place surtout que le plan de développement de l'Office des Eaux du Akkar prévoit le recours aux nappes des eaux souterraines de la région montagneuse pour servir la population en eau potable. En effet, ces sources ont été préférées aux eaux de surface en raison de leur abondance et leur bonne qualité microbiologique.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil National de la Recherche Scientifique au Liban, pour le soutien accordé à la réalisation de cette étude.

Références

1. Association Française de Normalisation (AFNOR). 1990. Eaux méthodes d'essai, Recueil des normes françaises, Paris la Défense, 4 ème édition.
2. Marchal, N., Bourdon, J.L. et Richard, Cl. 1982. *Les milieux de culture*, Paris: Doin Editeurs.
3. European Community. 1980. *Guidelines for Drinking Water Quality*, Brussels.
4. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1976. *Quality Criteria for Water*, Washington D.C.
5. Ministère de la Santé Publique et de l'Assurance Maladie. Juin 1995. *Décret 89/3 modifié : Eaux destinées à la consommation humaine*, Paris.
6. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 1986. *Directives de la qualité pour l'eau de bois*

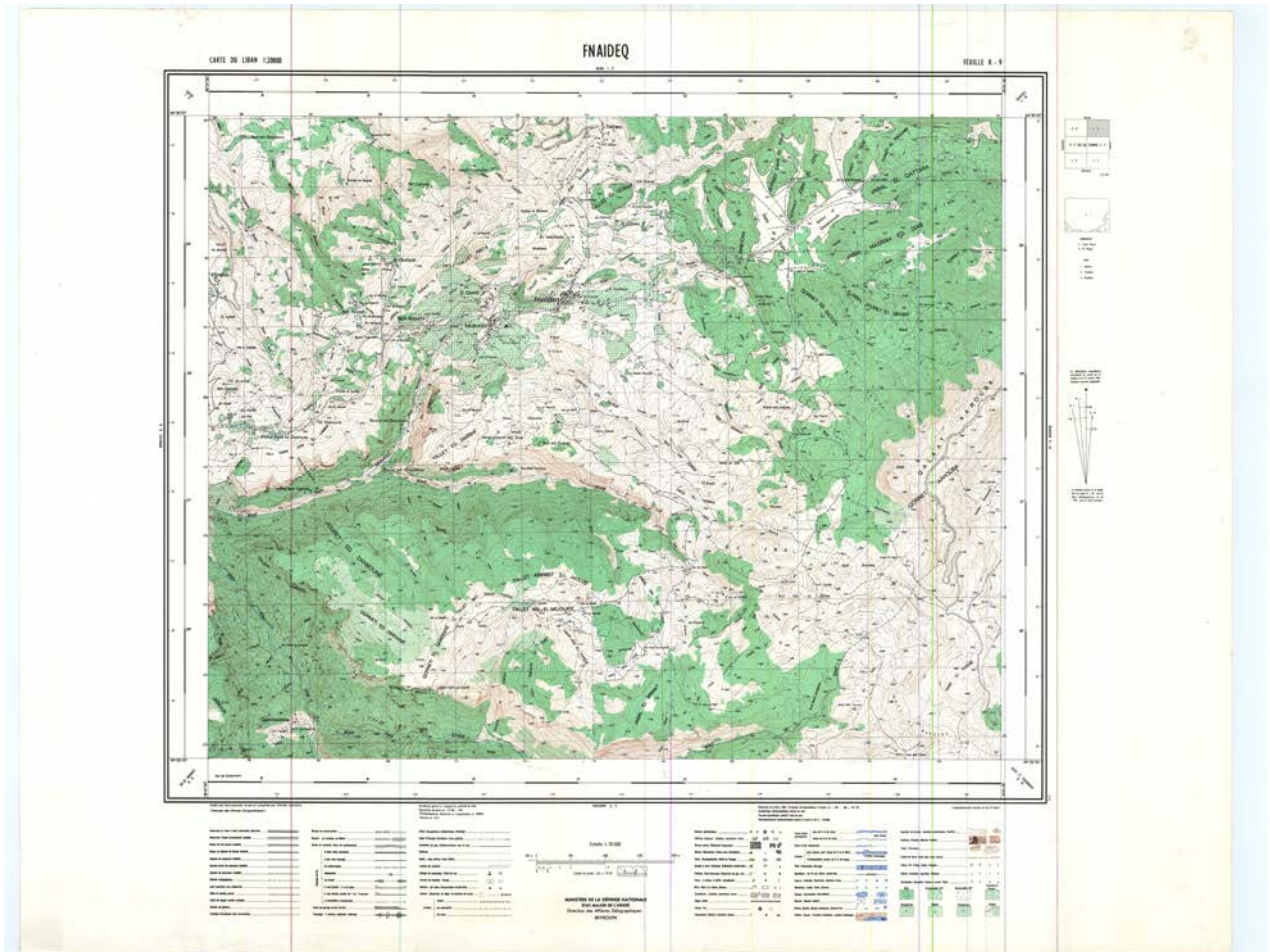
- son, Genève, 2 volumes.
7. Rodier, J. et coll., 1984. *Analyse de l'eau*, Paris: Editions Dunod, 7^{ème} édition.
 8. Dégremont. 1989. *Memento technique de l'eau*, Paris; Diffusion Lavoisier, 2 vol., 9^{ème} édition.
 9. Hamzé, M., 1996. Résultats préliminaires des examens bactériologiques des eaux de 58 sources et puits dans le nord du Liban, *Lebanese Science Bulletin*, vol. 9, pp. 45-56.
 10. Gavini, F., Leclerc, H., et Mossel, D. A., 1985. Enterobacteriaceae of the coliform group in drinking water: Identification and worldwide distribution. *Syst. Appl. Microbiol.*, vol. 6, pp. 312-318.
 11. Oger, C., Gavini, F., Delattre, J.M., et Leclerc, H., 1981. A propos des coliformes et de la colimétrie des eaux d'alimentation. *Ann. Microbiol. Institut Pasteur*, vol. 132A, pp. 183-189.
 12. Ferley, J.P., Zmirou, D., Collin, J.F. et Charrel, M., 1986. Etude longitudinale des risques liés à la consommation d'eaux non conformes aux normes bactériologiques. *Rev. Epidém. et Santé Publ.*, vol. 34, pp. 89-99.
 13. Devese, L.A., Van de Kerckhove, Kilpper-Balz et Schleifer, K., 1987. Characterization and identification of *enterococcus* species isolated from the intestines of animals, *Int. J. Syst. Bacteriol.*, vol. 37, pp. 257-259.
 14. Buttiaux, R., 1958. Les entérocoques fécaux des intestins humains et animaux. *Ann. Institut Pasteur*, vol. 94, pp. 778-782.
 15. Farrow, J.A.E., Jones D., Phillips B.A. et Collins M.D., 1983. Taxonomic studies on some group D streptococci. *J. Gen. Microbiol.*, vol. 129, pp. 1423-1432.
 16. Brucker, G., Fassin, D., 1989. *Santé publique*, Paris: Editions Ellipses.
 17. Miller, D. G. *Nitrate in Drinking Water*, United Kingdom: WRC, 1981.
 18. European Chemical Industry Ecology and Toxicology Center (ECETOC). 1988. *Nitrate and drinking water*, Brussels, Technical report N° 27.
 19. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 1977. *Nitrates, Nitrites et Composés N-nitroso*, Genève: dans: Critères de salubrité de l'environnement, pp. 82-84.
 20. Leclerc, H., Vincent, P. et Vandevienne, P., 1991. Nitrates de l'eau de boisson et cancer, *Bulletin Académique Nationale de Médecine*, vol. 175, no. 4, pp. 651-667.

Annexe 3 : Les cartes topographiques du Liban 1/20 000 (Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques de l'armée libanaise DAGG, 1963).

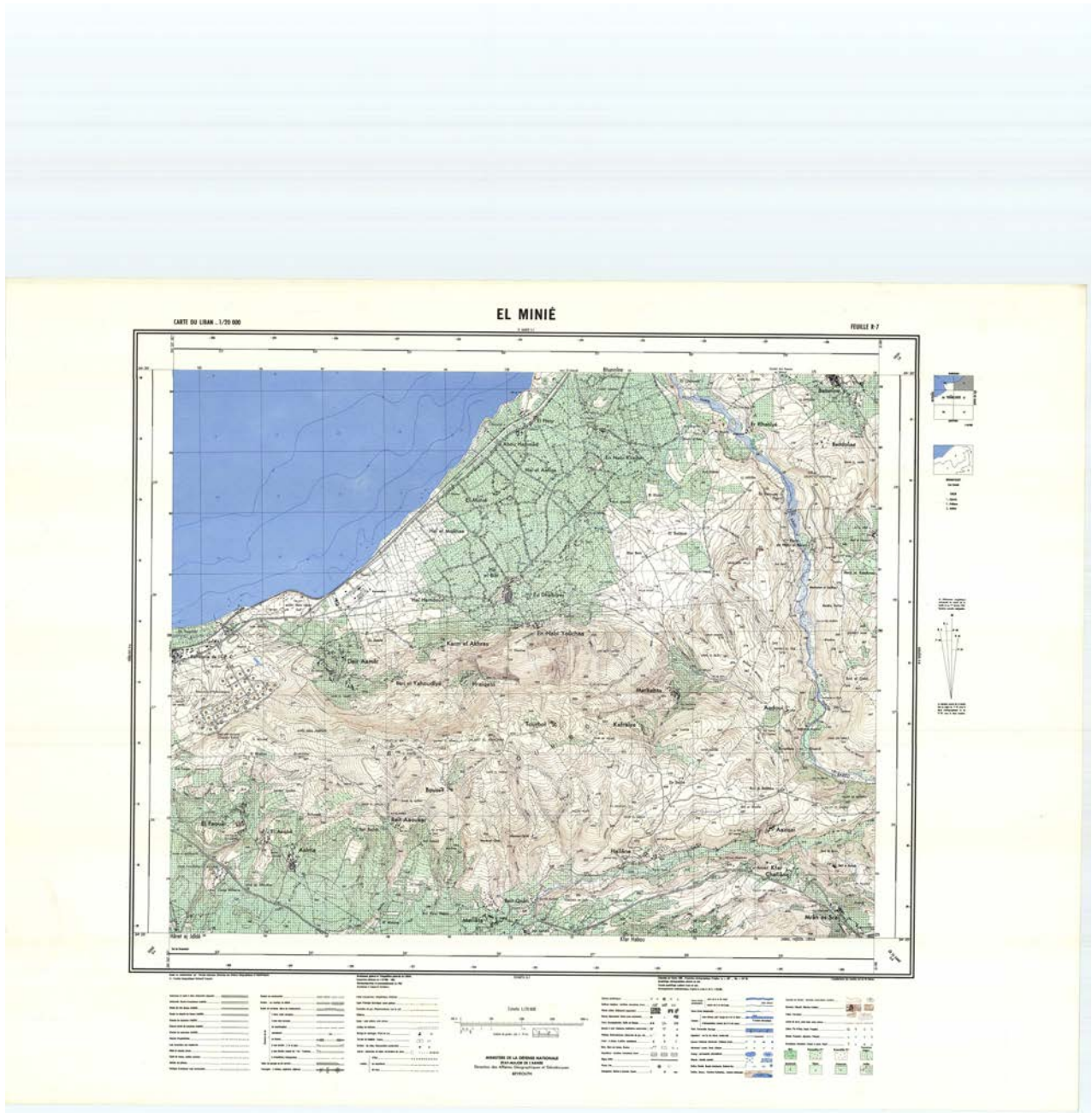
La feuille de Berqayel (Feuille R-8) :



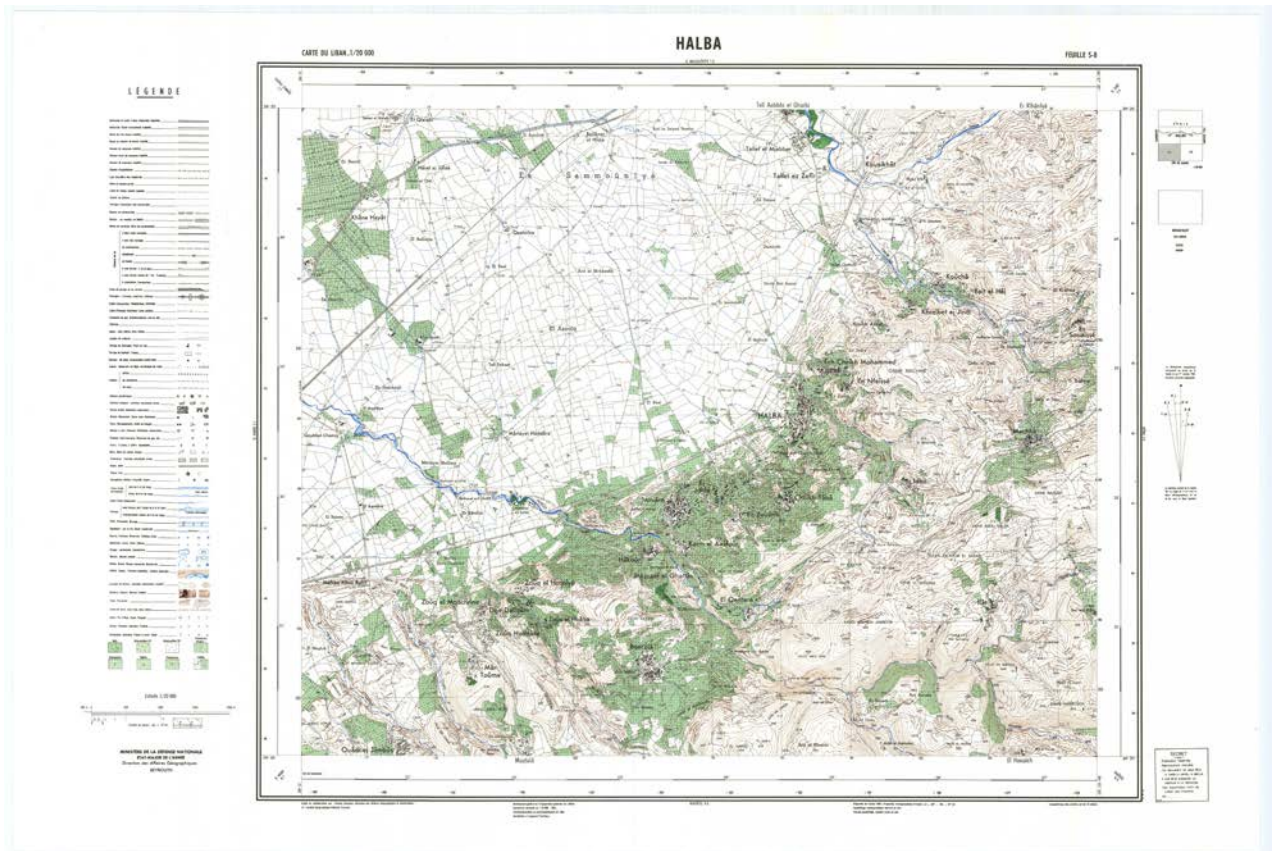
La feuille de Fnaideq (Feuille R-9) :



La feuille d'El-Miné (Feuille R-7) :

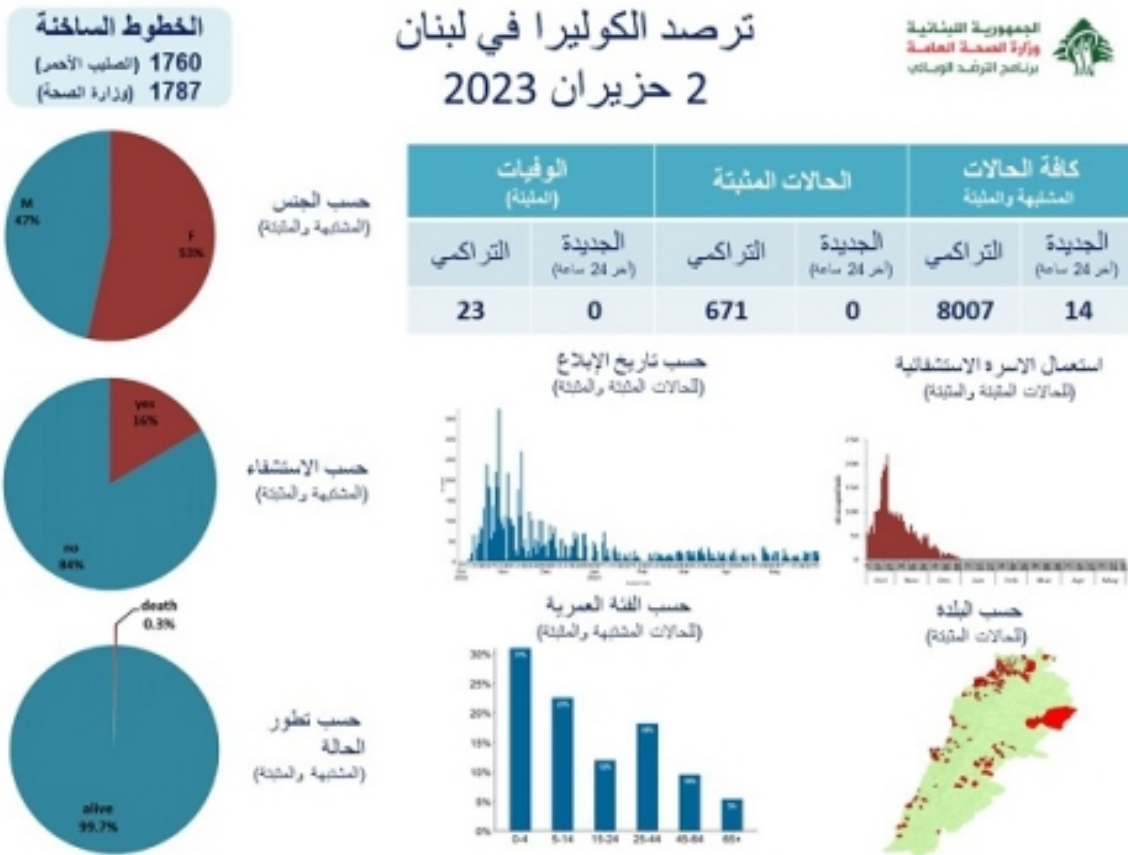


La feuille de Halba (Feuille S-8) :



Annexe 5 : Les statistiques quotidiennes du ministère de santé libanaise sur le choléra au Liban, l'exemple du 02/06/2023

Lien électronique des statistiques : <https://www.moph.gov.lb/en/Pages/127/64744/cholera-surveillance-in-lebanon>

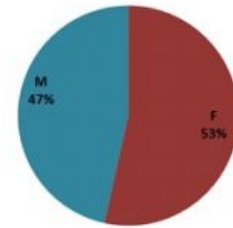


Cholera Surveillance Report 2 June 2023

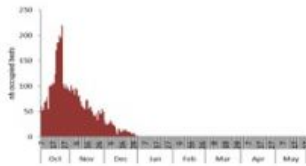
Call Centers
1760 (Red Cross)
1787 (MOPH)

| All cases (suspected and confirmed) | | Confirmed Cases | | Deaths (confirmed) | |
|--|------------|--------------------|------------|-----------------------|------------|
| New (past 24 h) | Cumulative | New (past 24 h) | Cumulative | New | Cumulative |
| 14 | 8007 | 0 | 671 | 0 | 23 |

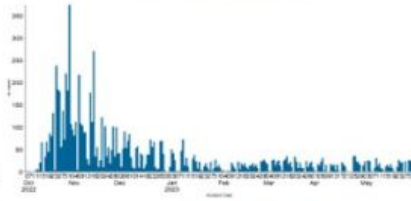
By Sex
(suspected and confirmed)



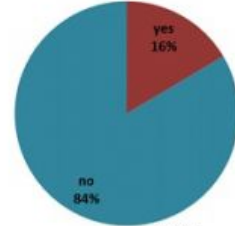
Occupied hospital beds
(suspected and confirmed)



By date of report
(suspected and confirmed)



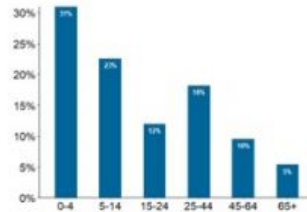
By Hospital Admission
(suspected and confirmed)



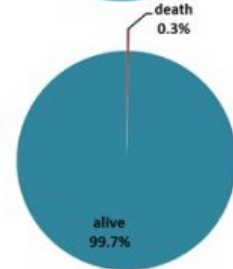
By locality (confirmed cases)



By age group
(suspected and confirmed cases)



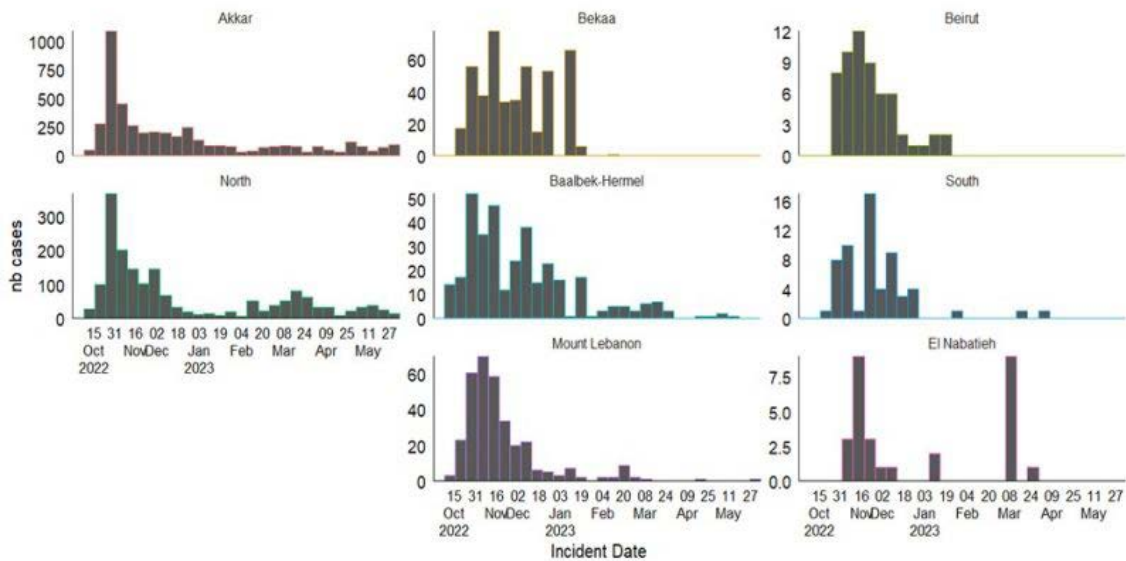
By Outcome
(suspected and confirmed)



Cholera Surveillance Report 2 June 2023

3

Epicurves by date of reporting by province
(suspected and confirmed)



Annexe 6 : Les tableaux de l'ACM

Valeurs propres :

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Valeur propre | 0.468 | 0.305 | 0.248 | 0.191 | 0.160 | 0.106 | 0.090 | 0.004 |
| Variabilité (%) | 29.755 | 19.393 | 15.763 | 12.130 | 10.176 | 6.749 | 5.752 | 0.282 |
| % cumulé | 29.755 | 49.148 | 64.911 | 77.040 | 87.217 | 93.966 | 99.718 | 100.000 |

Cosinus carrés des variables actives et illustratives :

| | F1 | F2 |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Occupation du sol-Agricole | 0.099 | 0.381 |
| Occupation du sol-Artificialisé | 0.221 | 0.345 |
| Occupation du sol-Mixte | 0.227 | 0.183 |
| Occupation du sol-Surface naturelle | 0.730 | 0.144 |
| Urbain-Non | 0.620 | 0.213 |
| Urbain-Oui | 0.620 | 0.213 |
| Urbain peu dense-Non | 0.022 | 0.194 |
| Urbain peu dense-Oui | 0.022 | 0.194 |
| Culture de plein champ-Non | 0.033 | 0.037 |
| Culture de plein champ-Oui | 0.033 | 0.037 |
| Vergers-Non | 0.002 | 0.724 |
| Vergers-Oui | 0.002 | 0.724 |
| Surface naturelle-Non | 0.730 | 0.144 |

| | | |
|-----------------------|-------|-------|
| Surface naturelle-Oui | 0.730 | 0.144 |
| Egout-Ancien | 0.469 | 0.008 |
| Egout-Non | 0.056 | 0.011 |
| Egout-NonUrbaine | 0.881 | 0.028 |
| Egout-Oui | 0.020 | 0.000 |
| Nature-Puit | 0.148 | 0.007 |
| Nature-Source | 0.148 | 0.007 |
| CTT-0 | 0.192 | 0.006 |
| CTT-1 | 0.006 | 0.068 |
| CTT-2 | 0.001 | 0.046 |
| CTT-5 | 0.149 | 0.056 |
| SF-0 | 0.143 | 0.045 |
| SF-1 | 0.031 | 0.017 |
| SF-2 | 0.042 | 0.001 |
| SF-3 | 0.016 | 0.001 |
| SF-4 | 0.012 | 0.020 |
| SF-5 | 0.000 | 0.113 |

Qualité de représentation des stations sur l'espace factoriel étudié :

| | F1 | F2 |
|-------------|-------|-------|
| AIN DAHAB-1 | 0.024 | 0.281 |
| AIN DAHAB-2 | 0.148 | 0.214 |
| AIN DAHAB-3 | 0.148 | 0.214 |
| BEBNINE-1 | 0.334 | 0.379 |

| | | |
|--------------|-------|-------|
| BEBNINE-2 | 0.334 | 0.379 |
| BEBNINE-3 | 0.259 | 0.115 |
| BEBNINE-4 | 0.259 | 0.115 |
| BEBNINE-5 | 0.334 | 0.379 |
| BEIT AYOUB-1 | 0.276 | 0.000 |
| BEIT AYOUB-2 | 0.276 | 0.000 |
| BERKAYEL-1 | 0.174 | 0.466 |
| BERKAYEL-2 | 0.334 | 0.379 |
| BERKAYEL-3 | 0.836 | 0.107 |
| BORJ ARAB-1 | 0.148 | 0.214 |
| BQARZLA-1 | 0.836 | 0.107 |
| BQARZLA-2 | 0.836 | 0.107 |
| BQARZLA-3 | 0.161 | 0.002 |
| BZAL-1 | 0.836 | 0.107 |
| CHAN-1 | 0.276 | 0.000 |
| CHAN-2 | 0.259 | 0.115 |
| FNAIDEQ-1 | 0.836 | 0.107 |
| FNAIDEQ-2 | 0.836 | 0.107 |
| FNAIDEQ-3 | 0.836 | 0.107 |
| FNAIDEQ-4 | 0.836 | 0.107 |
| FNAIDEQ-5 | 0.039 | 0.434 |
| HMAYRA-2 | 0.039 | 0.434 |
| HOUWEICH-1 | 0.174 | 0.466 |
| HOUWEICH-2 | 0.174 | 0.466 |

| | | |
|------------------|-------|-------|
| JDAYDE-1 | 0.334 | 0.379 |
| JDAYDE-2 | 0.334 | 0.379 |
| KARKAF-1 | 0.334 | 0.379 |
| KARKAF-2 | 0.276 | 0.000 |
| KOBLET CHAMRA-1 | 0.037 | 0.002 |
| MAJDALA-1 | 0.039 | 0.434 |
| MECHMECH-1 | 0.111 | 0.139 |
| MECHMECH-2 | 0.089 | 0.459 |
| MECHMECH-3 | 0.334 | 0.379 |
| MHAMRA-1 | 0.111 | 0.139 |
| MHAMRA-2 | 0.056 | 0.000 |
| OUYOUN GHEZLEN-1 | 0.022 | 0.000 |
| QORNE-1 | 0.334 | 0.379 |
| SAYSOUQ-1 | 0.174 | 0.466 |
| WADI JAMOUS-1 | 0.259 | 0.115 |
| WADI JAMOUS-2 | 0.334 | 0.379 |

Coordonnées des variables numériques supplémentaires :

| | F1 | F2 |
|----------|--------|--------|
| Fluorure | -0.154 | -0.098 |
| Chlorure | -0.439 | 0.176 |
| Nitrate | -0.248 | -0.194 |
| Sulfate | -0.359 | 0.247 |
| Sodium | -0.185 | -0.076 |

| | | |
|-----------|--------|-------|
| Potassium | -0.211 | 0.131 |
| Calcium | -0.267 | 0.304 |
| Magnésium | -0.277 | 0.095 |