



Évaluation de la gestion environnementale de la réserve naturelle d'Ammiq (Liban) par une approche multicritère floue (FAHP).

Assessment of the environmental management of the Ammiq nature reserve (Lebanon) using a fuzzy multi-criteria approach (FAHP).

Laurence CHARBEL¹

Abstract: The Ammiq Nature Reserve, situated in the Bekaa Valley, is one of the last remaining freshwater marshes in Lebanon and serves as a strategic site for biodiversity conservation at both national and regional levels. However, this vulnerable ecosystem is increasingly exposed to mounting pressures, including the overexploitation of water resources, the expansion of agricultural activities, and the impacts of climate change, all of which threaten its ecological balance. In this context, the present study aims to identify environmental management priorities to ensure the long-term sustainability of the reserve in the face of these growing challenges. To this end, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) method was applied, involving a panel of experts to weigh four main criteria (biodiversity, ecosystem quality, anthropogenic pressures, and management measures) and their associated sub-criteria. The consistency of pairwise comparison matrices was validated using the Fuzzy Consistency Index (FCI). The results highlight the preeminence of biodiversity and hydrological functionality as key drivers of ecological resilience, while also underscoring the need to reduce anthropogenic pressures. Five strategic axes for integrated management are proposed: targeted biodiversity conservation, improved hydrological management, reduction of anthropogenic pressures, strengthening of governance and management capacities, and the establishment of a long-term monitoring and evaluation system.

Keywords: FAHP, biodiversity, wetlands, integrated management, Ammiq, Lebanon.

Résumé : La réserve naturelle d'Ammiq, située dans la plaine de la Békaa, représente l'un des derniers marais d'eau douce du Liban et constitue un site stratégique pour la conservation de la biodiversité à l'échelle nationale et régionale. Toutefois, cet écosystème vulnérable est confronté à des pressions croissantes, telles que la surexploitation des ressources hydriques, l'expansion des activités agricoles et les effets du changement climatique, qui altèrent son équilibre écologique. Dans ce contexte, la présente étude vise à identifier les priorités de gestion environnementale afin de garantir la durabilité de la réserve face à ces menaces multiples. Pour ce faire, la méthode Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) a été mobilisée, en sollicitant un panel d'experts pour pondérer quatre critères (biodiversité, qualité des écosystèmes, pressions anthropiques et mesures de gestion) et leurs sous-critères, avec validation de la cohérence des jugements par l'indice de cohérence flou (FCI). Les résultats révèlent la prééminence de la biodiversité et de la fonctionnalité hydrologique comme leviers de résilience écologique et mettent en évidence la nécessité de réduire les pressions anthropiques. Cinq axes stratégiques de gestion intégrée sont proposés : conservation ciblée de la biodiversité, gestion hydrologique renforcée, réduction des pressions anthropiques, consolidation de la gouvernance et suivi-évaluation à long terme.

Mots clés : FAHP, biodiversité, zones humides, gestion intégrée, Ammiq, Liban.

INTRODUCTION

La gestion environnementale des réserves naturelles au Liban s'inscrit dans un contexte complexe, marqué par des enjeux écologiques, socio-économiques et institutionnels interdépendants. Le pays bénéficie d'une biodiversité exceptionnelle, attribuable à sa position géographique stratégique et à la diversité de ses écosystèmes. Toutefois, ses richesses naturelles sont de plus en plus menacées par l'urbanisation rapide, l'intensification agricole, la pollution diffuse et les effets du changement climatique. Malgré la désignation de plusieurs espaces protégés – dont la réserve naturelle d'Ammiq – la gestion de ces territoires reste entravée par des contraintes majeures : insuffisance des financements, absence de plans de gestion intégrés, et faible application des réglementations environnementales. Par ailleurs, la multiplicité des acteurs institutionnels (ministères, ONG, municipalités, communautés locales) induit des conflits d'intérêts potentiels et un déficit de coordination.

¹ Département de Géographie, Université Libanaise, Beyrouth, Liban et laboratoire de recherche GEOSPATIAL. laurence.charbel@ul.edu.lb

Dans ce contexte, l'adoption d'outils d'aide à la décision multicritères, tels que la méthode FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process), apparaît comme une solution pertinente pour améliorer la gestion durable des réserves naturelles libanaises. Cette méthode permet d'évaluer objectivement les enjeux environnementaux, en intégrant à la fois des données quantitatives et des jugements d'experts, et de hiérarchiser les priorités d'intervention en matière de conservation.

La réserve naturelle d'Ammiq, située dans la plaine de la Békaa, constitue l'un des derniers vestiges fonctionnels de zones humides au Liban. Elle fait face à une série de pressions environnementales majeures qui compromettent l'équilibre de ses écosystèmes. La dégradation de la biodiversité y est préoccupante, en raison de la fragmentation des habitats et de la régression de certaines espèces emblématiques. La pollution des eaux – issue principalement de l'agriculture intensive, des intrants chimiques et du rejet non contrôlé des eaux usées – affecte la qualité écologique du site. L'expansion des activités humaines, telles que l'urbanisation périphérique, le surpâturage et un écotourisme mal encadré, engendre des perturbations écosystémiques supplémentaires et accentue la surexploitation des ressources naturelles. Le changement climatique, en modifiant les régimes hydrologiques saisonniers, amplifie ces déséquilibres en réduisant la résilience écologique du site face aux sécheresses récurrentes et à la variabilité interannuelle des apports en eau, dans un contexte où la pluviométrie libanaise est fortement saisonnière et spatialement contrastée (Traboulsi, 2010) et où les projections issues du modèle climatique régional PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) indiquent une baisse des précipitations d'environ 10-20 % d'ici 2040 et 25-45 % d'ici 2090 (Haddad *et al.*, 2014).

Face à ces enjeux, la méthode FAHP constitue un outil méthodologique robuste pour évaluer les impacts cumulés des pressions environnementales et orienter les choix de gestion. Contrairement aux méthodes hiérarchiques classiques, la FAHP permet de prendre en compte l'incertitude et la subjectivité inhérentes aux évaluations environnementales grâce à l'intégration de la logique floue. Elle facilite la hiérarchisation et la pondération de critères d'ordre écologique, économique et social, en mobilisant les savoirs d'experts et les représentations des parties prenantes. Cette approche multicritère améliore ainsi la transparence du processus décisionnel et permet d'identifier des scénarios de gestion optimisés. Dans le cas de la réserve d'Ammiq, la FAHP peut être mobilisée pour analyser des critères tels que la qualité des eaux souterraines, l'état de conservation de la biodiversité, ou encore les impacts anthropiques directs et indirects. Elle permet, en ce sens, de proposer des orientations de gestion adaptées, scientifiquement fondées et opérationnellement réalistes.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq à travers l'application de la méthode FAHP, en vue d'identifier et de prioriser les facteurs influençant sa durabilité. L'intégration de critères relatifs à la qualité de l'eau, à la biodiversité et à l'impact des activités humaines vise à formuler des stratégies de conservation optimisées. Les résultats obtenus ont vocation à éclairer la prise de décision environnementale et à contribuer à la mise en place d'une gouvernance durable de cet écosystème humide d'importance nationale et régionale.

CADRE GÉOGRAPHIQUE DE LA RÉSERVE D'AMMIQ

La réserve d'Ammiq constitue l'une des dernières grandes zones humides naturelles du Liban. Située à une altitude d'environ 860 mètres, à proximité du village éponyme, elle présente une superficie variable selon la dynamique hydrologique saisonnière, avec une surface inondée oscillant généralement entre 150 et plus de 250 hectares en fonction des précipitations et du niveau phréatique (Ramadan-Jaradi *et al.*, 2004 ; BirdLife International, 2022).

Le climat de la plaine de la Békaa, où se situe la réserve d'Ammiq, est de type méditerranéen à influence continentale. Il se caractérise par une saison froide et humide s'étendant de l'automne au printemps, suivie d'un été chaud et sec. Les précipitations annuelles moyennes varient entre 400 et 600 mm, concentrées principalement entre les mois de novembre et d'avril, ce qui induit une forte saisonnalité hydrologique (Laborde & Traboulsi, 2002). L'hiver peut être marqué par des épisodes de gel, tandis que l'été est dominé par une évaporation intense, contribuant à l'assèchement partiel des zones marécageuses. Par ailleurs, la fonte tardive des neiges accumulées sur les versants du Mont Liban constitue une ressource hydrique essentielle, participant à l'alimentation différée des nappes phréatiques régionales.

La zone humide d'Ammiq, située sur la partie occidentale de la plaine de la Békaa, s'étend au pied du massif calcaire du Mont Barouk (Photo 1 et Figs. 1 et 2). Le substrat géologique est principalement constitué de calcaires jurassiques fracturés et karstifiés (Walley, 1996), qui forment le principal aquifère de la région. Les précipitations annuelles sur les versants du Mont Barouk varient entre 900 et 1600 mm selon l'altitude et l'exposition (MOE/UNDP/GEF, 2019 ; SPNL, 2022). Ces précipitations, en grande partie sous forme de neige hivernale, s'infiltrant rapidement dans les formations karstiques, en raison de leur forte perméabilité et de la faible épaisseur des sols, contribuant ainsi à la recharge de l'aquifère jurassique qui alimente les sources pérennes de la zone humide d'Ammiq.

Sous la plaine, la nappe phréatique est confinée par les épais sédiments argileux quaternaires déposés dans un ancien bassin lacustre (UNDP, 1970 ; Besançon, 1993). Toutefois, au niveau de la zone humide d'Ammiq,

des affleurements calcaires favorisent la résurgence des eaux souterraines sous forme de sources majeures (Haas, 1954), qui alimentent une superficie d'environ 280 hectares avant de rejoindre le fleuve Litani, situé à 3 km à l'est (Fig. 2). La direction dominante des écoulements souterrains est orientée de l'ouest vers le sud sous la plaine (UNDP, 1970 ; Besançon, 1993).

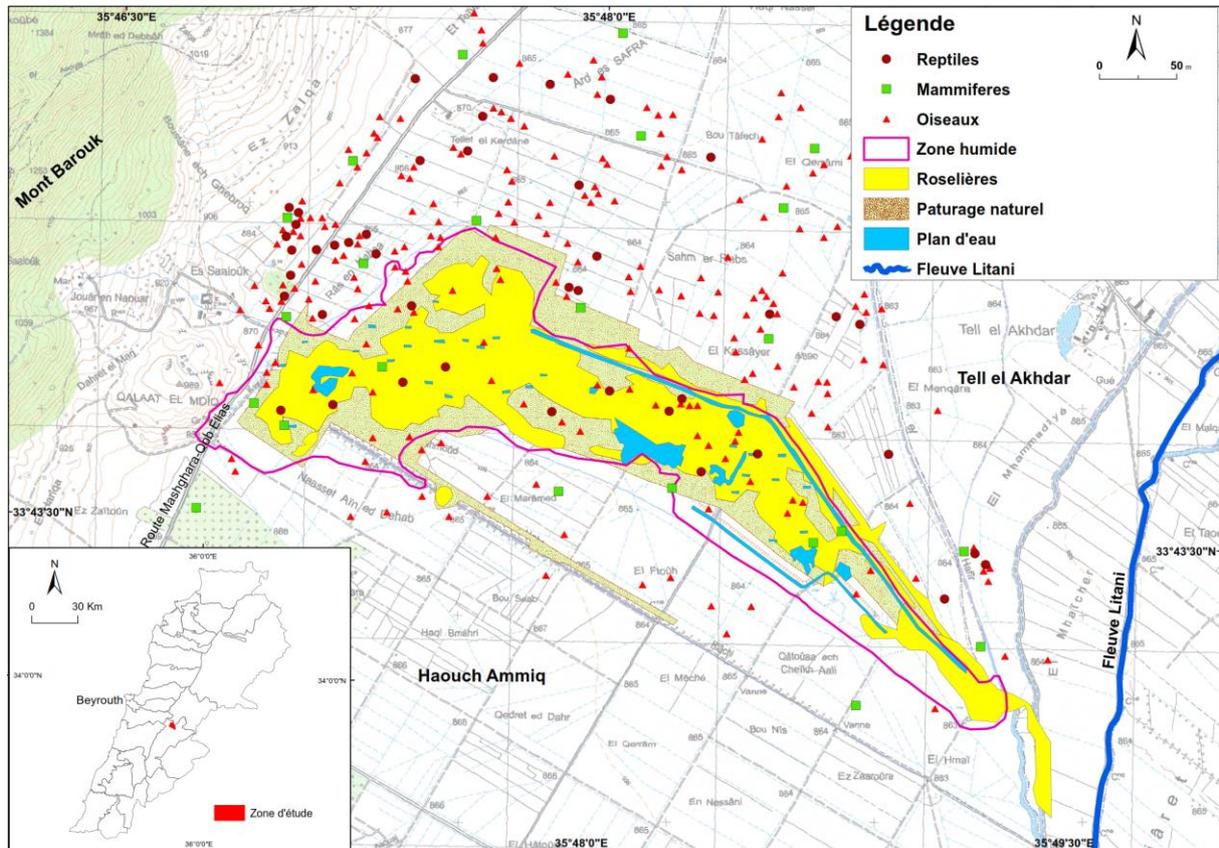


Figure 1.- Carte de localisation de la réserve naturelle d'Ammiq et de son environnement géographique.
Source : Fond topographique de la Direction des Affaires Géographiques et Géodésiques de l'Armée (2005) et, pour la faune et les habitats de la réserve, Ramsar Convention Secretariat (2005)



Photo 1.- Zone humide peu profonde de la réserve d'Ammiq, partiellement recouverte d'hydrophytes flottants et immergés, associés à une végétation riveraine de type héliophyte. En arrière-plan, le Mont Barouk marque la limite occidentale du bassin. Photo prise le 17 mai 2025. (Crédit photo : Laurence Charbel)

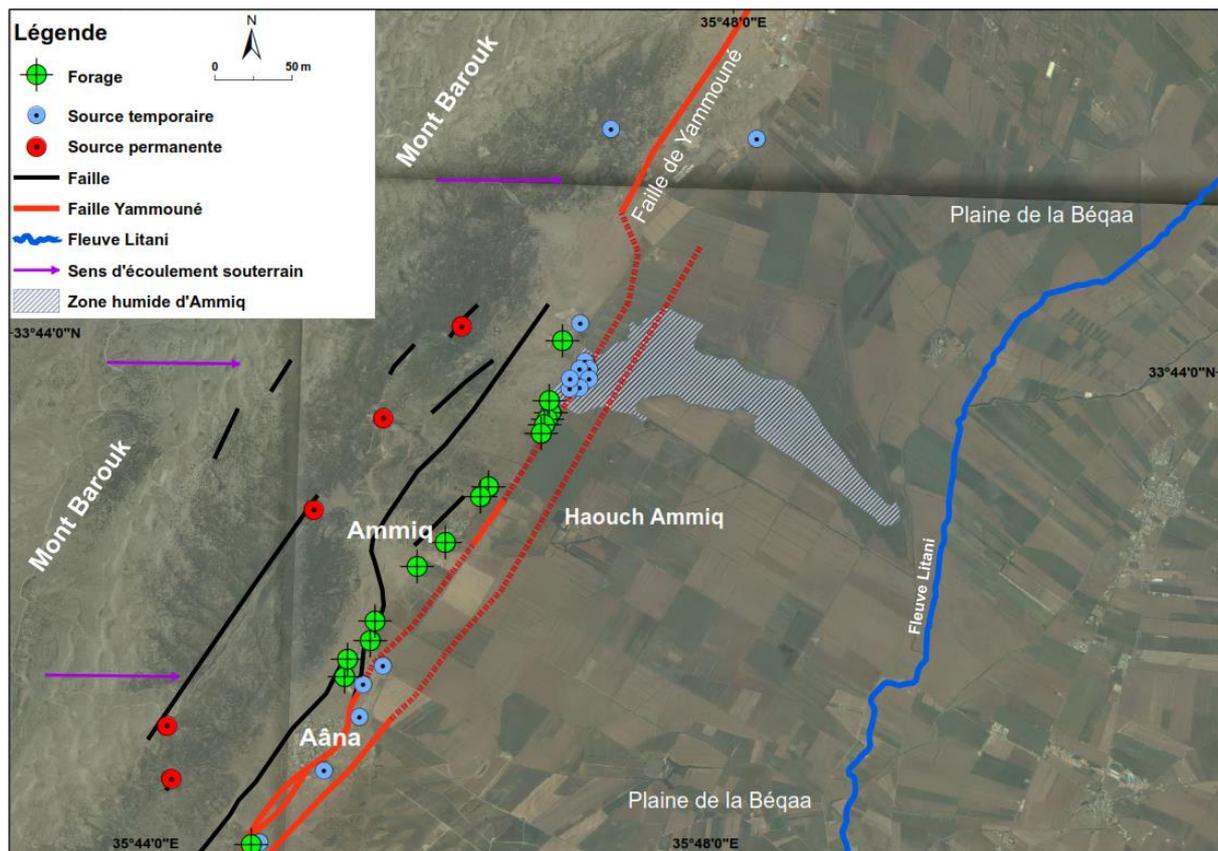


Figure 2.- Carte de la zone humide d'Ammiq et de son contexte hydrogéologique et tectonique.

Le secteur est structuré par la faille de Yammouné, une branche majeure du système transformant de la mer Morte, dont plusieurs segments parallèles déterminent le contact entre les unités géologiques (Walley, 1988) (Fig. 2). Ce dispositif tectonique a généré un anticlinal majeur orienté NNE-SSW (Walley, 2008), dont le flanc oriental plonge vers la plaine de la Békaa, favorisant l'écoulement des eaux vers la zone humide. Les failles secondaires, multiples et parfois perpendiculaires à la structure principale, créent des compartiments géologiques dont le rôle hydrogéologique est contrasté : certaines favorisent la transmission des eaux, tandis que d'autres, colmatées par des broyats calcaires, agissent comme des barrières hydrauliques.

Les sédiments de la plaine sont très hétérogènes et constitués de marnes, d'argiles carbonatées, de sables fins, de graviers calcaires et de matières organiques (Walley, 2008). Cette variabilité traduit une mosaïque complexe de milieux de dépôts, allant des lits de graviers favorisant la circulation de l'eau, aux horizons durs enrichis en fer et en carbonates résultant de phases d'assèchement et d'oxydation. Ces processus de pédogenèse, s'ils se généralisent, pourraient durablement réduire la capacité de la plaine à stocker l'eau et altérer la qualité des sols.

Depuis les années 1960-1970, l'exploitation croissante des ressources en eau, avec plus de 30 forages réalisés à l'ouest de la zone humide (Haas, 1954 ; Besançon, 1993) (Fig. 2), a provoqué une baisse significative des apports naturels, transformant ce marais autrefois permanent en une zone temporairement inondée, durant seulement 5 à 6 mois par an. Les observations hydrologiques ont montré que les pompages situés au nord du marais affectent particulièrement les débits des sources, confirmant ainsi une connexion directe entre ces captages et la zone humide (A Rocha Lebanon, 2004).

Le comportement vertical des flux à travers les sédiments tourbeux et argileux reste mal connu, bien que des essais de conductivité hydraulique aient été recommandés pour mieux caractériser la perméabilité des couches superficielles (A Rocha Lebanon, 2004). Par ailleurs, le réseau de canaux artificiels d'irrigation et de drainage altère les régimes naturels d'écoulement, complexifiant davantage la dynamique hydrique du site.

Les sédiments quaternaires de la plaine témoignent d'une histoire paléogéographique marquée par l'existence d'anciens lacs qui occupaient le sud de la Békaa durant les périodes humides du Pléistocène et de l'Holocène (Rosenthal *et al.*, 1989, Besançon, 1993 ; Lateef, 2007). La zone humide d'Ammiq constitue aujourd'hui le dernier vestige de ces anciens milieux lacustres, dont l'équilibre écologique est aujourd'hui menacé par les pressions anthropiques croissantes, en particulier le pompage excessif et la conversion des terres humides en zones agricoles.

Malgré cette pression, le niveau de la nappe reste relativement proche de la surface, entre 3 et 5 mètres en saison sèche (A Rocha Lebanon, 2004), offrant des perspectives de restauration par une gestion durable des ressources hydriques. La qualité des eaux émergentes est typique des aquifères carbonatés, dominée par des bicarbonates de calcium (Ca-HCO_3^-) avec une minéralisation modérée (UNDP, 1970). Toutefois, l'intensification agricole expose le système à une contamination diffuse par les nitrates et les résidus phytosanitaires, constituant une menace pour la qualité écologique du marais (Besançon, 1993).

La réserve d'Ammiq constitue l'un des hauts lieux de la biodiversité au Liban et dans le Levant, en raison de la diversité exceptionnelle de ses habitats naturels, de ses conditions hydriques particulières et de sa position stratégique au croisement de plusieurs zones biogéographiques (Ramsar Convention Secretariat, 2005). Cette zone humide abrite une mosaïque d'écosystèmes, comprenant des roselières denses à *Phragmites australis*, des prairies humides, des mares temporaires, des bosquets riverains ainsi que des surfaces d'eau libre (Ramadan-Jaradi *et al.*, 2004). Cette diversité d'habitats favorise la coexistence d'une faune et d'une flore particulièrement riches. Sur le plan floristique, plus de 200 espèces de plantes ont été recensées, incluant des taxons hygrophiles caractéristiques des milieux humides, ainsi que plusieurs espèces endémiques de l'est méditerranéen (Photo 3) (BirdLife International, 2022).

La faune de la réserve est particulièrement remarquable par son importance ornithologique : Ammiq est reconnue comme une zone clé pour la conservation des oiseaux (Important Bird Area - IBA) par BirdLife International (Fig. 1). La zone constitue un site de halte migratoire essentiel sur la voie de migration des oiseaux paléarctiques-africains. Plus de 250 espèces d'oiseaux ont été observées, dont des espèces menacées telles que le Balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*), la Spatule blanche (*Platalea leucorodia*), et l'Ibis chauve (*Geronticus eremita*). Les milieux aquatiques et les berges humides offrent également un habitat critique pour de nombreux amphibiens, reptiles et mammifères (Photo 2), notamment la loutre d'Eurasie (*Lutra lutra*), une espèce indicatrice de la qualité écologique des milieux aquatiques (Ramadan-Jaradi *et al.*, 2004).



Photo 2.- Troupeau de buffles d'eau (*Bubalus bubalis*) pâturant dans les prairies humides de la réserve naturelle d'Ammiq. Photo prise le 17 mai 2025. (Crédit photo : Laurence Charbel)

La géomorphologie de la région, façonnée par les dépôts alluviaux et lacustres issus des massifs environnants, favorise une mosaïque de milieux humides diversifiés. Ce paysage, caractérisé par des mares permanentes, des prairies inondables, des zones tourbeuses et des anciens chenaux abandonnés, constitue un réservoir écologique majeur pour la biodiversité locale (A Rocha Lebanon, 2004).

Les eaux stagnantes et les mares temporaires sont peuplées d'une riche diversité d'invertébrés aquatiques, essentiels au bon fonctionnement de la chaîne trophique locale. La présence de ces habitats humides, en milieu semi-aride, confère à Ammiq une valeur écologique majeure pour le maintien des populations faunistiques régionales, particulièrement en période estivale où les ressources en eau se raréfient ailleurs dans la plaine de la Békaa. Cette biodiversité remarquable est cependant vulnérable aux pressions anthropiques, notamment l'intensification agricole, les modifications hydrologiques, les risques de pollution et l'introduction d'espèces exotiques susceptibles de devenir envahissantes (IPBES, 2023). Malgré cette haute valeur patrimoniale, la zone humide d'Ammiq est concernée par ce risque : une espèce exotique envahissante est définie comme une espèce introduite hors de son aire naturelle dont l'introduction et/ou la propagation menace la diversité biologique

(Convention on Biological Diversity, 2024). À Ammiq, des poissons introduits ont été signalés, notamment la carpe commune (*Cyprinus carpio*) et la gambusie (*Gambusia affinis*), ainsi qu'une présence probable de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) (Ministry of Environment, 2004). Ces introductions peuvent affecter la biodiversité par compétition, prédation, transmission d'agents pathogènes et modification des habitats (IPBES, 2023). Reconnu comme site Ramsar depuis 1999, et intégrée dans la réserve de biosphère du Chouf, Ammiq joue un rôle écologique fondamental dans le maintien de la biodiversité régionale et la régulation hydrologique de la Békaa. La réserve constitue un écosystème unique au carrefour des influences climatiques, géologiques et biologiques du Liban, et représente une zone prioritaire pour la conservation des milieux humides en Méditerranée orientale.



Photo 3.- Alignement arboré dense en bordure de la zone humide d’Ammiq, constitué principalement de saules blancs (*Salix alba*) et de peupliers noirs (*Populus nigra*), espèces autochtones des zones humides libanaises. Photo prise le 17 mai 2025. (Crédit photo : Laurence Charbel)

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Collecte des données

La collecte des données sur la réserve naturelle d’Ammiq a reposé sur une combinaison de sources qualitatives et quantitatives afin de garantir une analyse complète et rigoureuse des enjeux environnementaux. D’une part, des observations de terrain ont été réalisées permettant de documenter les caractéristiques physiques du site, les dynamiques hydrologiques, ainsi que les principales pressions anthropiques affectant les écosystèmes locaux. Ces observations ont été complétées par des enquêtes semi-structurées menées auprès des parties prenantes – représentants des autorités de gestion, membres des communautés locales, ONG environnementales – afin de recueillir des perceptions, des priorités de gestion et des informations contextuelles sur les usages des ressources naturelles. Enfin, un examen critique des études existantes (rapports institutionnels, publications scientifiques, documents de gestion) a été conduit pour compléter les informations collectées et assurer une triangulation des données. L’ensemble de ces sources a constitué la base pour la structuration du modèle d’évaluation multicritère appliqué dans cette étude.

Principe de la méthode FAHP

La méthode FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) constitue une extension de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), initialement développée par Thomas Saaty et formalisée dans son ouvrage de référence (Saaty, 1980). L’intégration de la logique floue dans l’AHP a été introduite par différents chercheurs afin de mieux prendre en compte l’incertitude, l’ambiguïté et la subjectivité intrinsèques aux jugements des experts. Parmi les premières contributions majeures au développement de cette approche floue, on retrouve les travaux pionniers de Van Laarhoven et Pedrycz (1983), qui ont proposé l’emploi de nombres flous triangulaires pour modéliser les comparaisons par paires. Depuis lors, la méthode FAHP a été approfondie et appliquée dans divers contextes scientifiques et décisionnels, notamment en gestion de l’environnement, en aménagement des ressources naturelles et en ingénierie décisionnelle.

L'application du FAHP dans l'évaluation environnementale se justifie par la complexité et l'incertitude inhérentes aux processus écologiques et aux interactions entre les activités humaines et les écosystèmes naturels. Contrairement aux approches classiques, qui exigent souvent des données quantitatives précises difficiles à obtenir en milieu naturel, le FAHP permet d'intégrer des jugements qualitatifs et des données imprécises grâce à la logique floue. Cette méthode s'avère particulièrement pertinente pour hiérarchiser et pondérer des critères environnementaux multiples, tels que la biodiversité, la qualité des écosystèmes ou les pressions anthropiques, en mobilisant efficacement l'expertise des spécialistes concernés. En offrant une prise en compte plus souple et réaliste des incertitudes, elle améliore sensiblement la robustesse et la qualité des décisions prises dans le cadre d'une gestion durable adaptée à des milieux complexes comme celui de la réserve naturelle d'Ammiq.

Dans le cadre du processus de décision multicritère flou, les préférences des experts sont modélisées à l'aide de nombres flous triangulaires (Triangular Fuzzy Numbers, TFNs), qui permettent d'intégrer l'incertitude, l'imprécision et la subjectivité inhérentes aux jugements humains, tout en assurant une représentation souple et graduelle des relations d'importance relative entre les critères. Conformément aux recommandations méthodologiques de Van Laarhoven et Pedrycz (1983), Chang (1996) et Kahraman *et al.* (2003), une échelle linguistique floue progressive a été adoptée. Elle se compose de six niveaux croissants d'importance relative, représentés par les triplets flous suivants : (1, 1, 1) pour une importance égale, (1, 1, 3) pour une importance très faible, (1, 3, 5) pour une importance faible, (3, 5, 7) pour une importance moyenne, (5, 7, 9) pour une importance forte, et (7, 9, 9) pour une importance très forte.

Par ailleurs, afin d'assurer la réciprocité dans la matrice floue de comparaison par paires, chaque jugement possède un inverse multiplicatif flou, défini par le triplet (1/u, 1/m, 1/l) utilisé lorsque le critère comparé est jugé moins important que son homologue. Cette structuration permet de garantir la cohérence interne des jugements et constitue une condition préalable essentielle à la fiabilité de la pondération obtenue. Elle permet également de mettre en œuvre une méthode de validation rigoureuse, telle que celle proposée par Gogus et Boucher (1998), qui repose sur la vérification de la compatibilité entre les jugements flous initiaux et les rapports dérivés des poids défloutés. Cette validation est développée dans la section suivante.

Choix des critères et sous-critères

L'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq s'appuie sur un ensemble de critères conçus pour analyser l'état écologique du site, les pressions qui s'y exercent, ainsi que les dispositifs de conservation en place. Ces critères sont regroupés en quatre grandes catégories : la biodiversité, la qualité des écosystèmes, les pressions anthropiques, et les mesures de gestion et de conservation. Chacune de ces catégories est déclinée en plusieurs sous-critères, présentés dans le tableau 1.

Tableau 1.-Critères et sous-critères retenus pour l'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq.

Critères	Sous-critères
1. Biodiversité	<ul style="list-style-type: none"> a. Diversité floristique b. Diversité faunistique c. Espèces endémiques ou menacées d. Espèces migratrices ou emblématiques e. Espèces indicatrices
2. Qualité des écosystèmes	<ul style="list-style-type: none"> a. Intégrité écologique b. Fonctionnalité hydrologique c. Diversité des habitats d. Capacité de résilience écologique e. État de conservation des habitats clés
3. Pressions anthropiques	<ul style="list-style-type: none"> a. Urbanisation périphérique b. Pollution hydrique et agricole c. Surfréquentation ou perturbation humaine d. Exploitation des ressources naturelles e. Introduction d'espèces exotiques
4. Mesures de gestion et de conservation	<ul style="list-style-type: none"> a. Existence d'un plan de gestion opérationnel b. Efficacité de la surveillance et du contrôle c. Programmes de restauration écologique d. Sensibilisation et éducation environnementale e. Implication des parties prenantes

Critères liés à la biodiversité

Le critère « Biodiversité » est décliné en cinq sous-critères, sélectionnés en fonction de leur pertinence écologique et de la disponibilité des données :

1. *Diversité floristique* : richesse spécifique des communautés végétales présentes dans les zones humides, les prairies et les formations riveraines.
2. *Diversité faunistique* : nombre et variété d'espèces animales recensées (oiseaux, mammifères, amphibiens, reptiles, invertébrés).
3. *Espèces endémiques ou menacées* : présence d'espèces figurant sur les listes rouges nationales ou internationales (UICN).
4. *Espèces migratrices ou emblématiques* : espèces à forte valeur de conservation, telles que le pélican blanc (*Pelecanus onocrotalus*), la spatule blanche (*Platalea leucorodia*) ou la cigogne noire (*Ciconia nigra*), observées régulièrement à Ammiq.
5. *Espèces indicatrices* : espèces sensibles aux modifications de l'habitat, utilisées pour évaluer la qualité écologique des milieux.

Les espèces exotiques envahissantes sont traitées dans ce travail comme une pression (voir sous-critère « Introduction d'espèces exotiques » au sein des pressions anthropiques), susceptible d'altérer la composition et l'abondance des communautés. Leurs effets sont ensuite reflétés par les indicateurs d'état (diversité floristique/faunistique, espèces indicatrices) et discutés conjointement à ceux-ci, afin d'éviter tout double comptage dans l'agrégation FAHP. Cette structuration hiérarchique permet une évaluation fine de la biodiversité, en tenant compte à la fois de la richesse spécifique, de la rareté biologique et du rôle écologique des espèces présentes.

Critères liés à la qualité des écosystèmes

Le critère « Qualité des écosystèmes » a été décliné en cinq sous-critères reflétant l'intégrité écologique, la fonctionnalité des milieux et leur capacité à maintenir les processus naturels :

1. *Intégrité écologique* : niveau de naturalité des écosystèmes, en termes de continuité spatiale, de connectivité et de degré d'artificialisation.
2. *Fonctionnalité hydrologique* : qualité des fonctions hydrologiques assurées par les zones humides (rétention d'eau, régulation des crues, recharge des nappes).
3. *Diversité des habitats* : variété des types d'habitats naturels présents (roselières, plans d'eau permanents, prairies humides, zones boisées).
4. *Capacité de résilience écologique* : aptitude des écosystèmes à se maintenir ou à se rétablir après perturbation (naturelle ou anthropique).
5. *État de conservation des habitats clés* : évaluation de l'état écologique des habitats d'intérêt prioritaire selon des critères de structure, fonction et composition.

Cette déclinaison permet d'évaluer la qualité écologique des milieux naturels d'Ammiq, en tenant compte de leur diversité, de leur stabilité fonctionnelle et de leur rôle dans la dynamique écologique régionale.

Critères liés aux pressions anthropiques

Le critère « Pressions anthropiques » regroupe les principaux facteurs d'origine humaine susceptibles d'altérer les écosystèmes de la réserve d'Ammiq. Cinq sous-critères ont été retenus :

1. *Urbanisation périphérique* : étendue des constructions et infrastructures autour de la réserve, et leur impact sur la connectivité écologique.
2. *Pollution hydrique et agricole* : présence de rejets domestiques, d'engrais ou de pesticides affectant la qualité des eaux et des sols.
3. *Surfréquentation ou perturbation humaine* : intensité des activités humaines (promenades, visites, véhicules motorisés) à l'intérieur ou à proximité immédiate de la zone.
4. *Exploitation des ressources naturelles* : prélèvement non réglementé de bois, d'eau, de plantes ou de faune sauvage.
5. *Introduction d'espèces exotiques* : présence d'espèces allochtones pouvant perturber les équilibres écologiques locaux.

L'identification de ces pressions permet de quantifier les risques pesant sur la réserve et d'évaluer les niveaux de vulnérabilité des écosystèmes.

Critères liés aux mesures de gestion et de conservation

Le critère « Mesures de gestion et de conservation » évalue la pertinence, l'efficacité et l'intégration des actions entreprises pour protéger et valoriser la réserve d'Ammiq. Cinq sous-critères ont été sélectionnés :

1. *Existence d'un plan de gestion opérationnel* : présence d'un document de référence définissant les objectifs de conservation et les actions à entreprendre.
2. *Efficacité de la surveillance et du contrôle* : capacité à détecter et à gérer les intrusions, pollutions ou dégradations. Cette efficacité peut être affectée par des contraintes externes (accessibilité, contexte sécuritaire), susceptibles de limiter la fréquence des patrouilles et la capacité d'intervention.
3. *Programmes de restauration écologique* : existence de projets de réhabilitation d'habitats dégradés ou de réintroduction d'espèces locales.
4. *Sensibilisation et éducation environnementale* : initiatives visant à impliquer les visiteurs, les écoles et les communautés locales.
5. *Implication des parties prenantes* : degré de participation des acteurs locaux (municipalités, ONG, agriculteurs) dans la gouvernance de la réserve.

Ce critère permet d'apprécier non seulement les efforts de protection en place, mais aussi leur durabilité et leur ancrage territorial.

Justification du choix des critères en fonction des problématiques locales et des études antérieures :

L'identification des critères environnementaux retenus pour l'évaluation de la gestion de la réserve d'Ammiq repose sur une démarche scientifique articulée autour des problématiques locales spécifiques, des pressions anthropiques exercées sur la zone humide, ainsi que des référentiels méthodologiques issus d'études antérieures. Cette sélection vise à garantir la pertinence, la robustesse et l'applicabilité des critères dans le contexte particulier de la plaine de la Békaa.

a. Problématiques écologiques locales

La réserve naturelle d'Ammiq, en tant que l'une des dernières grandes zones humides du Liban et du Levant, est confrontée à des défis écologiques majeurs ayant motivé le choix des critères environnementaux :

- *Dégradation des habitats naturels* : plusieurs recherches ont documenté la régression progressive des zones humides au Liban, notamment en raison du drainage des terres à des fins agricoles et de la fragmentation croissante des habitats naturels provoquée par l'expansion des infrastructures rurales et urbaines. Ces dynamiques ont été particulièrement observées dans la région d'Ammiq, où la surface humide a connu une réduction significative au cours des dernières décennies (Storey, 2003 ; El Hage Hassan *et al.*, 2019). Ces transformations altèrent la structure des écosystèmes, réduisent la connectivité écologique et contribuent à la diminution de la richesse floristique et faunistique locale.
- *Variations hydrologiques et pollution de l'eau* : en tant que zone humide dépendante de la nappe phréatique et des précipitations saisonnières, Ammiq est particulièrement vulnérable aux déséquilibres hydriques. Ministry of Environment & Lebanese University (2004) ont mis en évidence l'impact des intrants agricoles et des rejets domestiques sur la qualité de l'eau et les communautés aquatiques.
- *Déclin de la biodiversité* : la pression anthropique croissante a entraîné un déclin observé de certaines espèces sensibles, notamment parmi les oiseaux migrateurs et les amphibiens. De plus, l'introduction d'espèces exotiques invasives constitue une menace reconnue pour l'équilibre écologique du site (Tohme & Tohme, 2014).

b. Pressions anthropiques spécifiques à la région

L'analyse des pressions humaines est indispensable pour comprendre les facteurs de perturbation affectant directement la réserve d'Ammiq :

- *Intensification agricole et irrigation* : l'expansion des cultures et l'utilisation intensive des ressources en eau modifient l'équilibre hydrologique de la zone (MoE/UNDP, 2019).
- *Urbanisation et artificialisation des sols* : la proximité croissante d'agglomérations humaines, ainsi que la construction d'infrastructures, fragilisent la connectivité écologique et contribuent à l'artificialisation du paysage (Sattout *et al.*, 2006).
- *Tourisme et activités récréatives* : bien que l'écotourisme soit encouragé pour sensibiliser à la préservation des milieux naturels, une mauvaise gestion des flux touristiques peut entraîner une détérioration des écosystèmes (Ramadan-Jaradi, 2015).

c. Alignement avec les études antérieures et référentiels internationaux

La sélection des critères s'appuie sur les référentiels méthodologiques reconnus à l'échelle nationale et internationale pour l'évaluation de la gestion des aires protégées, notamment :

- Les indicateurs de la Convention de Ramsar relatifs à la conservation et à l'utilisation rationnelle des zones humides ;
- Les critères de l'IUCN pour l'évaluation de l'efficacité des aires protégées ;
- Les études nationales sur la biodiversité et les écosystèmes libanais (MoE, 2019).

Ainsi, les critères environnementaux sélectionnés sont directement liés aux enjeux de conservation, aux pressions locales et aux recommandations scientifiques antérieures. Cette approche garantit une évaluation contextualisée, scientifiquement fondée et opérationnelle pour orienter les stratégies de conservation durable.

Processus de pondération des critères à l'aide de la méthode FAHP

Dans le cadre de cette étude, la méthode FAHP a été mobilisée afin de déterminer les poids relatifs des critères influençant la gestion environnementale de la réserve naturelle d'Ammiq. Cette approche, fondée sur la logique floue, permet de prendre en compte l'incertitude et la subjectivité inhérentes aux jugements d'experts dans les processus décisionnels multicritères.

Construction des matrices de comparaison floues

Des matrices de comparaison par paires ont été construites pour chaque niveau hiérarchique, en sollicitant les avis d'un panel d'experts (gestionnaires de la réserve, chercheurs en écologie, représentants d'ONG environnementales). Les jugements ont été exprimés à l'aide d'une échelle floue triangulaire allant de 1 (égale importance) à 9 (extrême importance d'un critère sur un autre). Chaque jugement a été modélisé par un nombre flou triangulaire, ce qui permet de traduire la variabilité des perceptions expertes.

Agrégation, normalisation et défloutisation des poids

Les jugements individuels ont été agrégés selon la méthode de la moyenne géométrique, assurant une prise en compte équilibrée des opinions expertes. Le poids flou agrégé pour un critère \check{C}_i , évalué par k experts, est calculé par :

$$\check{C}_i = \left(\prod_{j=1}^k \check{C}_{ij} \right)^{\frac{1}{k}}$$

où \check{C}_{ij} est le jugement flou donné par l'expert j pour le critère i .

Ensuite, le calcul des poids flous agrégés a été réalisé selon la méthode de Chang (1996). Cette approche est fondée sur le degré de possibilité qu'un critère soit supérieur aux autres à travers la comparaison des nombres flous triangulaires obtenus dans la matrice agrégée. Une normalisation des poids obtenus a ensuite été effectuée par la méthode vectorielle, définie comme suit :

$$X'_i = \frac{X_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2}}$$

où X'_i est la valeur normalisée du critère i , et X_i sa valeur initiale. Cette étape garantit la comparabilité des poids entre critères, en les projetant dans l'intervalle $[0,1]$.

Enfin, la défloutisation des poids a été réalisée à l'aide de la méthode du centre de gravité, selon la formule :

$$C_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3}$$

où l_i , m_i , u_i , sont respectivement les bornes inférieure, moyenne et supérieure du nombre flou triangulaire représentant le critère C_i .

Construction des matrices de comparaison floues

La cohérence des matrices de comparaison floues a été évaluée à l'aide de l'indice de cohérence floue (FCI) selon Gogus et Boucher (1998), adapté au FAHP. Cet indice vérifie, pour chaque paire de critères, si le rapport pondéral obtenu après défloutisation reste compatible avec l'intervalle du jugement flou initial. Le FCI global, calculé comme la proportion de comparaisons incohérentes parmi toutes les comparaisons possibles, permet d'identifier d'éventuelles incohérences majeures.

Bien qu'aucun seuil normatif ne soit universellement établi, la littérature suggère que des valeurs de FCI inférieures à 0,4 peuvent être considérées comme acceptables, notamment dans des contextes impliquant l'expertise humaine et l'incertitude décisionnelle (Bozbura & Beskese, 2007 ; Kaya & Kahraman, 2011). Le FCI est ainsi mobilisé comme un outil d'appréciation qualitative, permettant d'identifier d'éventuelles incohérences sans recourir à des ajustements arbitraires des jugements exprimés.

Ce processus méthodologique, intégrant une approche floue de la prise de décision, permet de mieux capturer la complexité des enjeux environnementaux et d'assurer une priorisation cohérente et scientifiquement fondée des critères de gestion de la réserve d'Ammiq.

RÉSULTATS

Poids des critères et résultats de l'évaluation FAHP

L'attribution des poids aux différents critères dans le cadre de la méthode FAHP repose à la fois sur une analyse écologique approfondie de la réserve d'Ammiq et sur une appréciation experte des enjeux environnementaux et de gouvernance. Les valeurs des poids ont été déterminées à partir des matrices de comparaison par paires, mais leur signification écologique et stratégique mérite d'être précisée. Le tableau 2 synthétise les justifications avancées pour chaque paire de critères, servant de base à l'élaboration des matrices floues et à la hiérarchisation finale des enjeux.

Tableau 2.- Justification des jugements par paires entre les critères principaux pour l'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq.

Critères	Justification par paires
Biodiversité vs Qualité des écosystèmes	La biodiversité est souvent la principale raison de la création et du maintien d'une réserve naturelle, notamment dans le cas d'Ammiq, classée site Ramsar. Même si la qualité des écosystèmes est essentielle pour maintenir cette biodiversité, c'est la diversité des espèces (notamment les oiseaux migrateurs et les espèces endémiques) qui confère à Ammiq sa valeur patrimoniale la plus reconnue à l'échelle internationale. → <i>Biodiversité légèrement plus importante que Qualité des écosystèmes.</i>
Biodiversité vs Pressions anthropiques	La biodiversité représente l'état final recherché (ce que l'on veut protéger), tandis que les pressions anthropiques sont des facteurs de risque à surveiller. Dans la hiérarchie des priorités environnementales, la biodiversité demeure l'objectif central, alors que les pressions en sont des menaces. → <i>Biodiversité beaucoup plus importante que Pressions anthropiques.</i>
Biodiversité vs Mesures de gestion	Les mesures de gestion sont des moyens pour atteindre un but, qui est la conservation de la biodiversité. Sans biodiversité remarquable, la mise en œuvre de mesures de gestion serait beaucoup moins prioritaire. → <i>Biodiversité nettement plus importante que Mesures de gestion.</i>
Qualité des écosystèmes vs Pressions anthropiques	La qualité des écosystèmes est un indicateur positif de la santé environnementale, tandis que les pressions anthropiques sont des indicateurs de risque. Améliorer ou maintenir la qualité écologique est plus stratégique que seulement surveiller les pressions, même si les deux sont liés. → <i>Qualité des écosystèmes plus importante que Pressions anthropiques.</i>
Qualité des écosystèmes vs Mesures de gestion	Une bonne qualité écologique peut exister même en l'absence de gestion active (ex. zones naturelles peu accessibles), tandis que la gestion vise souvent à corriger ou préserver cette qualité. En termes de finalité écologique, la qualité prime sur les actions de gestion. → <i>Qualité des écosystèmes plus importante que Mesures de gestion.</i>
Pressions anthropiques vs Mesures de gestion	Les mesures de gestion sont la réponse directe aux pressions anthropiques. La connaissance des pressions permet d'adapter les actions de gestion. Cependant, sans évaluation des pressions, la gestion devient inefficace. → <i>Pressions anthropiques légèrement plus importantes que Mesures de gestion.</i>

Poids des sous- critères et résultats de l'évaluation FAHP

Dans cette section, les résultats de la pondération des différents sous-critères sont présentés, tels qu'obtenus à partir des comparaisons par paires effectuées selon la méthode FAHP. Les tableaux 3 à 6 synthétisent les justifications écologiques et scientifiques sous-jacentes à chaque comparaison, illustrant la logique qui a guidé l'attribution des poids relatifs aux sous-critères.

Résultats

Suite à la présentation du processus de pondération des critères par la méthode FAHP et à la justification des jugements experts retenus, cette section présente les résultats obtenus. Les tableaux 7 à 11 détaillent les poids relatifs des critères et sous-critères, calculés à partir des matrices de comparaison par paires et validés par l'indice de cohérence flou (FCI). Ces résultats mettent en évidence les priorités relatives attribuées aux différents aspects de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq. Dans un second temps, ils sont analysés et discutés au regard des priorités écologiques identifiées et des principaux défis de gestion. Les valeurs de l'indice de cohérence flou (FCI) obtenues pour l'ensemble des matrices de comparaison par paires varient entre 0,26 et 0,39, ce qui demeure inférieur au seuil recommandé de 0,4 (Bozbura & Beskese, 2007 ; Kaya & Kahraman, 2011). Ces valeurs confirment la cohérence globale des jugements exprimés par les experts.

Tableau 3.- Justification des jugements par paires entre les sous-critères du critère « biodiversité » dans le cadre de l'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq.

Sous-critères comparés	Justification
Diversité floristique vs Diversité faunistique	La diversité faunistique, notamment ornithologique, est l'un des atouts majeurs de la réserve d'Ammiq, classée site Ramsar pour ses oiseaux migrateurs.
Diversité floristique vs Espèces endémiques	Les espèces endémiques ou menacées possèdent une valeur patrimoniale plus élevée que la simple diversité floristique locale.
Diversité floristique vs Espèces migratrices	Les espèces migratrices et emblématiques confèrent à Ammiq une reconnaissance internationale, supérieure à l'intérêt purement floristique.
Diversité floristique vs Espèces indicatrices	Les espèces indicatrices sont importantes pour le suivi, mais la richesse floristique globale est plus déterminante pour la structure de l'habitat.
Diversité faunistique vs Espèces endémiques	Les espèces endémiques/menacées ont une priorité de conservation plus forte, même si la faune globale est diversifiée.
Diversité faunistique vs Espèces migratrices	Les espèces migratrices ont une importance internationale, plaçant ce sous-critère légèrement au-dessus de la diversité faunistique locale.
Diversité faunistique vs Espèces indicatrices	La faune indicatrice est utile pour le suivi écologique, mais la diversité faunistique globale a une valeur plus large pour la réserve.
Espèces endémiques vs Espèces migratrices	Ces deux sous-critères sont jugés équivalents : l'un valorise le caractère unique local, l'autre l'importance internationale.
Espèces endémiques vs Espèces indicatrices	Les espèces endémiques ou menacées ont une priorité bien supérieure à celles servant uniquement de bioindicateurs.
Espèces migratrices vs Espèces indicatrices	Les espèces migratrices ont une valeur patrimoniale et une reconnaissance internationale, supérieure à celle des indicateurs écologiques locaux.

Tableau 4.- Justification des jugements par paires entre les sous-critères du critère « qualité des écosystèmes » dans le cadre de l'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq.

Sous-critères comparés	Justification
Intégrité écologique vs Fonctionnalité hydrologique	L'intégrité écologique globale inclut les processus hydrologiques ; elle est donc légèrement plus importante car elle conditionne la fonctionnalité de tout l'écosystème.
Intégrité écologique vs Diversité des habitats	L'intégrité est un indicateur de santé écologique globale, alors que la diversité des habitats en est une composante ; l'intégrité est donc prioritaire.
Intégrité écologique vs Capacité de résilience	La résilience est une fonction, mais l'intégrité écologique est un état global qui englobe cette capacité. Elle est donc jugée plus fondamentale.
Intégrité écologique vs État de conservation des habitats	L'état de conservation est une mesure ponctuelle, tandis que l'intégrité reflète un état dynamique et fonctionnel. L'intégrité est donc priorisée.
Fonctionnalité hydrologique vs Diversité des habitats	La fonctionnalité hydrologique est cruciale dans une zone humide comme Ammiq ; elle structure la diversité des habitats. Elle est donc légèrement plus importante.
Fonctionnalité hydrologique vs Capacité de résilience	Les processus hydrologiques soutiennent la résilience écologique, en maintenant les cycles d'eau et de nutriments. D'où une priorité pour la fonctionnalité hydrologique.
Fonctionnalité hydrologique vs État de conservation	La fonctionnalité hydrologique est plus stratégique, car sans elle, l'état de conservation des habitats clés se dégrade rapidement.
Diversité des habitats vs Capacité de résilience	Une grande diversité d'habitats favorise la résilience écologique en offrant plus de niches et d'options adaptatives. Les deux sont proches, mais la diversité est légèrement priorisée.
Diversité des habitats vs État de conservation	La diversité des habitats est une richesse structurelle, tandis que l'état de conservation est une mesure ponctuelle. La diversité est donc légèrement plus importante.
Capacité de résilience vs État de conservation	La résilience est une capacité dynamique à réagir aux perturbations, ce qui est plus stratégique que le simple constat de l'état actuel des habitats.

Tableau 5.- Justification des jugements par paires entre les sous-critères du critère « pression anthropique » dans le cadre de l'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq.

Sous-critères comparés	Justification
Urbanisation périphérique vs Pollution hydrique et agricole	L'urbanisation est plus structurelle et irréversible, modifiant les sols et l'occupation du territoire, alors que la pollution est plus diffuse mais parfois réversible. → Urbanisation légèrement plus importante.
Urbanisation périphérique vs Surfréquentation humaine	L'urbanisation change le paysage de façon permanente, tandis que la surfréquentation est une pression plus temporaire et gérable. → Urbanisation nettement plus importante.
Urbanisation périphérique vs Exploitation des ressources	L'urbanisation induit une transformation massive, alors que l'exploitation des ressources est souvent plus localisée et régulable. → Urbanisation plus importante.
Urbanisation périphérique vs Introduction d'espèces exotiques	L'introduction d'espèces peut avoir des effets graves, mais l'urbanisation affecte directement les écosystèmes et leurs habitats. → Urbanisation légèrement plus importante.
Pollution hydrique et agricole vs Surfréquentation humaine	La pollution impacte directement l'eau et les sols, avec des effets cumulatifs et invisibles, tandis que la fréquentation agit par perturbations directes. → Pollution plus importante.
Pollution hydrique et agricole vs Exploitation des ressources	La pollution affecte l'ensemble du système, tandis que l'exploitation est souvent ciblée sur des espèces ou des zones spécifiques. → Pollution légèrement plus importante.
Pollution hydrique et agricole vs Introduction d'espèces exotiques	Les espèces exotiques peuvent devenir envahissantes, mais la pollution est une menace constante et généralisée. → Pollution légèrement plus importante.
Surfréquentation humaine vs Exploitation des ressources	La surexploitation impacte directement les ressources naturelles, mais la surfréquentation a des effets multiples (trampling, bruit, dérangement). → Exploitation légèrement plus importante.
Surfréquentation humaine vs Introduction d'espèces	La surfréquentation est une pression locale, alors que l'introduction d'espèces exotiques peut avoir des effets écologiques profonds et durables. → Introduction plus importante.
Exploitation des ressources vs Introduction d'espèces	Les deux sont graves, mais l'introduction d'espèces peut provoquer des déséquilibres écologiques majeurs, parfois irréversibles. → Introduction légèrement plus importante.

DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence une hiérarchisation nette des priorités de gestion, traduisant la volonté des experts de privilégier les fondements écologiques du système étudié. Le poids relativement élevé accordé à la biodiversité (38 %) et à la qualité des écosystèmes (27 %) illustre une perception selon laquelle la conservation des composantes biologiques et fonctionnelles constitue un préalable à la durabilité des actions de gestion. Cette orientation témoigne d'une approche écosystémique, centrée sur le maintien de l'intégrité écologique, qui considère la diversité spécifique, l'état des habitats et la fonctionnalité hydrologique comme des leviers majeurs pour préserver la résilience de la réserve. Par ailleurs, l'importance conférée aux espèces endémiques (22 %) et migratrices (22 %) ou encore à l'intégrité écologique (35 %) souligne un souci de protéger les éléments les plus vulnérables ou stratégiques des écosystèmes. Ces priorités invitent à renforcer les actions de suivi scientifique et à cibler les interventions sur les habitats clés, tout en développant des mesures de restauration adaptées aux zones les plus dégradées (Bozbura & Beskese, 2007 ; Kaya & Kahraman, 2011 ; Margules & Pressey, 2000 ; Mace *et al.*, 2014). Parallèlement, la pondération notable des pressions anthropiques (21 %) révèle une prise de conscience des menaces structurelles qui pèsent sur la pérennité des écosystèmes. L'urbanisation périphérique, la pollution hydrique et agricole ou encore l'exploitation des ressources naturelles apparaissent comme des facteurs majeurs de déstabilisation écologique, appelant des mesures de régulation et de contrôle plus strictes. Enfin, le poids accordé aux mesures de gestion et de conservation (14 %) traduit un consensus sur la nécessité d'un plan de gestion opérationnel capable d'articuler l'ensemble des interventions de manière cohérente. Cette dimension organisationnelle, couplée à un dispositif de surveillance performant et à l'implication des parties prenantes, constitue une condition essentielle pour garantir l'efficacité des actions dans le temps. Pris dans leur ensemble, ces résultats plaident pour une stratégie de gestion intégrée, associant réduction des pressions, renforcement de la gouvernance et consolidation de la résilience écologique, afin d'anticiper et d'atténuer les impacts des changements futurs (Gogus & Boucher, 1998 ; Lockwood, 2010 ; Dudley *et al.*, 2017 ; Bennett & Satterfield, 2018).

Tableau 6.- Justification des jugements par paires entre les sous-critères du critère « mesures de gestion » dans le cadre de l'évaluation de la gestion environnementale de la réserve d'Ammiq.

Sous-critères comparés	Justification
Existence d'un plan de gestion opérationnel vs Efficacité de la surveillance et du contrôle	L'existence d'un plan de gestion est la base de toute démarche de conservation, tandis que l'efficacité de la surveillance et du contrôle dépend de sa mise en œuvre. → Plan de gestion plus important.
Existence d'un plan de gestion opérationnel vs Programmes de restauration écologique	Le plan de gestion englobe souvent les programmes de restauration, mais sans plan opérationnel, les programmes de restauration ne sont pas efficaces. → Plan de gestion plus important.
Existence d'un plan de gestion opérationnel vs Sensibilisation et éducation environnementale	La sensibilisation est un levier pour renforcer l'efficacité du plan de gestion, mais sans un plan structuré, la sensibilisation perd en efficacité. → Plan de gestion plus important.
Existence d'un plan de gestion opérationnel vs Implication des parties prenantes	La mise en place du plan de gestion nécessite une implication effective des parties prenantes, mais le plan reste la structure principale autour de laquelle les actions sont coordonnées. → Plan de gestion plus important.
Efficacité de la surveillance et du contrôle vs Programmes de restauration écologique	L'efficacité de la surveillance garantit que les programmes de restauration se déroulent correctement, mais ces derniers sont essentiels pour l'amélioration concrète de l'environnement. → Programmes de restauration plus important.
Efficacité de la surveillance et du contrôle vs Sensibilisation et éducation environnementale	La surveillance vise à évaluer les impacts des actions et la sensibilisation, bien qu'importante, intervient après la mise en œuvre des programmes de gestion. → Surveillance et contrôle plus important.
Efficacité de la surveillance et du contrôle vs Implication des parties prenantes	L'implication des parties prenantes est indispensable, mais sans un système de surveillance en place, la gestion environnementale devient inefficace. → Surveillance et contrôle plus important.
Programmes de restauration écologique vs Sensibilisation et éducation environnementale	Les programmes de restauration ont un impact direct sur l'environnement, tandis que la sensibilisation vise à préparer le terrain pour des actions durables. → Programmes de restauration plus importants.
Programmes de restauration écologique vs Implication des parties prenantes	L'implication des parties prenantes est essentielle pour le succès de la gestion, mais les programmes de restauration ont un impact direct et immédiat sur la biodiversité. → Programmes de restauration plus importants.
Sensibilisation et éducation environnementale vs Implication des parties prenantes	L'implication des parties prenantes est fondamentale pour soutenir la mise en œuvre des actions de gestion, mais sans sensibilisation préalable, leur implication pourrait être faible. → Implication des parties prenantes plus importante.

Tableau 7.- Matrice de comparaison par paires des critères principaux selon la méthode FAHP, avec poids défloutés. Indice de cohérence flou (CFI) = 0.34. l, m, et u, sont respectivement les bornes inférieure, moyenne et supérieure du nombre flou triangulaire représentant les jugements.

Critères	C1 (Biodiversité)			C2 (Qualité écosystème)			C3 (Pressions anthropiques)			C4 (Mesures de gestion)			Poids %
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
C1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	5.00	38
C2	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	1.00	3.00	27
C3	0.33	1.00	1.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	21
C4	0.20	0.33	1.00	0.20	0.33	1.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	14

Tableau 8.- Matrice de comparaison des sous-critères du critère « biodiversité ». CFI = 0.35

Sous-critère	C1.1 (diversité floristique)			C1.2 (diversité faunistique)			C1.3 (espèces endémiques)			C1.4 (espèces migratrices)			C1.5 (espèces indicatrices)			Poids %
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
C1.1	1	1	1	0.33	1	1	0.33	1	1	0.33	1	1	1	1	3	19
C1.2	1	1	3	1	1	1	0.33	1	1	0.33	1	1	1	1	3	21
C1.3	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	22
C1.4	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	22
C1.5	0.33	1	1	0.33	1	1	0.33	1	1	0.33	1	1	1	1	1	16

Tableau 9.- Matrice de comparaison des sous-critères du critère « qualité des écosystèmes ». CFI = 0.39

Sous-critère	C2.1 (intégrité écologique)			C2.2 (fonctionnalité hydrologique)			C2.3 (capacité de résilience écologique)			C2.4 (état de conservation des habitats clés)			C2.5 (diversité des habitats)			Poids %
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
C2.1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	3	5	1	3	5	35
C2.2	0.3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	21
C2.3	0.3	1	1	0.33	1	1	1	1	1	1	1	3	0.3	1	1	14
C2.4	0.2	0.3	1	0.33	1	1	0.33	1	1	1	1	1	0.3	1	1	13
C2.5	0.2	0.33	1	0.33	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	17

Tableau 10.- Matrice de comparaison des sous-critères du critère « pressions anthropiques ». CFI = 0.34

Sous-critère	C3.1 (urbanisation périphérique)			C3.2 (pollution hydrique et agricole)			C3.3 (perturbation humaine)			C3.4 (exploitation des ressources naturelles)			C3.5 (introduction d'espèces exotiques)			Poids %
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
C3.1	1	1	1	1	1	3	1	3	5	1	1	3	1	1	3	28
C3.2	0.3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	24
C3.3	0.2	0.33	1	0.33	1	1	1	1	1	0.33	1	1	0.33	1	1	14
C3.4	0.3	1	1	0.33	1	1	1	1	3	1	1	1	0.33	1	1	15
C3.5	0.3	1	1	0.33	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	19

Tableau 11.- Matrice de comparaison des sous-critères du critère « mesures de gestion et de conservation ». CFI = 0.26

Sous-critère	C4.1 (plan de gestion opérationnel)			C4.2 (efficacité de surveillance et de contrôle)			C4.3 (programmes de restauration écologique)			C4.4 (sensibilisation et éducation environnementale)			C4.5 (implication des parties prenantes)			Poids %
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
C4.1	1	1	1	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	40
C4.2	0.2	0.33	1	1	1	1	0.33	1	1	1	1	3	1	1	3	17
C4.3	0.2	0.33	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	3	18
C4.4	0.2	0.33	1	0.33	1	1	0.33	1	1	1	1	1	0.33	1	1	11
C4.5	0.2	0.33	1	0.3	1	1	0.33	1	1	1	1	3	1	1	1	14

RECOMMANDATIONS POUR LA GESTION

Les recommandations issues de l'évaluation FAHP mettent en évidence cinq axes d'action prioritaires et complémentaires, visant à renforcer la conservation écologique tout en améliorant l'efficacité organisationnelle et sociale de la gestion de la réserve. Chaque axe décline des mesures spécifiques qui, mises en œuvre de manière intégrée, devraient accroître la résilience du socio écosystème face aux pressions actuelles et futures.

Axe 1 – Conservation ciblée de la biodiversité

Le renforcement de la conservation de la biodiversité constitue un levier prioritaire pour la pérennité de la réserve. Il est essentiel d'identifier et de cartographier les habitats critiques accueillant les espèces endémiques, migratrices et menacées, puis de prioriser les actions de restauration écologique dans les secteurs les plus dégradés, tels que les roselières et les plans d'eau temporaires. La mise en place de zones de tranquillité et de régulation des accès, en particulier en période de migration, apparaît également indispensable afin de limiter les perturbations liées aux activités humaines (Margules & Pressey, 2000 ; Mace *et al.*, 2014).

Axe 2 – Amélioration de la gestion hydrologique

La fonctionnalité hydrologique, déterminante pour le maintien de l'intégrité écologique des zones humides, nécessite un dispositif de gestion renforcé. Il est recommandé d'élaborer un plan intégré de régulation

des usages de l'eau, incluant la maîtrise des pompes agricoles et la gestion des canaux d'irrigation en concertation avec les acteurs locaux. Ce plan doit être complété par un suivi hydrologique continu des niveaux de la nappe phréatique et des débits des sources alimentant la réserve. Par ailleurs, la promotion de pratiques agricoles économes en eau et de techniques d'irrigation durable contribuerait à réduire la pression sur les ressources hydriques (Dudley *et al.*, 2017).

Axe 3 – Réduction des pressions anthropiques

La maîtrise des pressions anthropiques identifiées comme majeures constitue un troisième axe stratégique. Il s'agit de renforcer les contrôles sur l'utilisation des intrants chimiques (pesticides et engrais) dans les périmètres agricoles adjacents, de limiter l'expansion urbaine et les aménagements non planifiés à proximité de la réserve, et de développer des programmes de sensibilisation adaptés à destination des agriculteurs, des visiteurs et des communautés locales. Ces actions visent à accroître la compréhension et l'adhésion des acteurs locaux aux enjeux de conservation des zones humides (Lockwood, 2010 ; Bennett & Satterfield, 2018).

Axe 4 – Renforcement de la gouvernance et des capacités de gestion

Un quatrième axe repose sur l'amélioration de la gouvernance et des capacités opérationnelles de gestion. Il est recommandé d'initier dès l'amont un partenariat multi-acteurs (collectivités locales, secteur agricole, usagers, ONG, institutions publiques) pour renforcer l'appropriation sociale de la réserve en tant que patrimoine naturel commun et consolider une responsabilité partagée dans sa gestion. Ce partenariat peut être opérationnalisé par un comité de concertation formalisé, une charte d'engagement et des mécanismes de dialogue régulier, afin de prévenir les conflits d'usage et de soutenir la co-construction des mesures. L'actualisation et l'opérationnalisation du plan de gestion de la réserve sont prioritaires afin de coordonner l'ensemble des actions de manière cohérente. Ce processus doit inclure le renforcement des compétences des gestionnaires et des équipes de surveillance via des programmes de formation et un meilleur accès aux ressources techniques. Plus largement, la mise en place d'un modèle de gouvernance participative, fondé sur la concertation et l'implication des parties prenantes dans la planification et la mise en œuvre des actions, constitue une condition déterminante de succès (Kaya & Kahraman, 2011). Dans certains contextes, des contraintes d'accès et de sécurité peuvent limiter la surveillance de terrain ; il est donc recommandé d'adopter une organisation des patrouilles fondée sur l'analyse de risque, et de formaliser une coordination avec les acteurs locaux compétents. En complément, le recours à des outils de suivi indirect (caméras-pièges, points d'observation, signalements communautaires) permet de maintenir la capacité de détection et de réponse.

Axe 5 – Mise en place d'un dispositif de suivi-évaluation à long terme

Enfin, il est recommandé d'instaurer un dispositif de suivi-évaluation à long terme fondé sur des indicateurs écologiques (abondance d'espèces clés, état des habitats), hydrologiques (niveaux d'eau, débit des sources) et socio-économiques (implication des parties prenantes, intensité des pressions). Ce système permettra d'évaluer régulièrement l'efficacité des mesures prises, d'ajuster les stratégies de gestion de manière adaptative et de capitaliser l'expérience acquise pour alimenter les politiques nationales et internationales de conservation des zones humides (Bozbura & Beskese, 2007 ; Dudley *et al.*, 2017).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'évaluation multicritère menée dans cette étude, fondée sur l'application de la méthode Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), a permis de structurer une analyse rigoureuse des priorités de gestion environnementale de la réserve naturelle d'Ammiq. Les résultats obtenus révèlent une hiérarchisation cohérente avec les dynamiques écologiques observées sur le terrain, en plaçant au premier plan la conservation de la biodiversité, la gestion durable des ressources hydriques, la maîtrise des pressions anthropiques et le renforcement des dispositifs de gouvernance.

Ces résultats soulignent que la biodiversité, et en particulier les espèces migratrices et patrimoniales, constitue l'enjeu central de la gestion du site. La régulation des apports hydrologiques, affectés par les prélèvements agricoles et les aménagements hydrauliques, apparaît comme une condition préalable à la résilience écologique de la zone humide. Par ailleurs, la pression croissante exercée par l'agriculture intensive, l'urbanisation et les usages non régulés confirme la nécessité de renforcer les actions de contrôle, de restauration écologique et d'implication des parties prenantes.

Sur le plan méthodologique, cette recherche met en évidence l'intérêt de la FAHP comme outil d'aide à la décision dans des contextes caractérisés par une forte incertitude, une complexité écologique et une multiplicité d'acteurs. La capacité de cette approche à intégrer des jugements experts tout en structurant une hiérarchie des enjeux en fait une méthode particulièrement adaptée à la gestion des espaces naturels protégés, non seulement à Ammiq, mais aussi dans d'autres réserves libanaises confrontées à des problématiques similaires.

Les perspectives ouvertes par cette étude invitent à approfondir l’approche multicritère par la mobilisation d’outils complémentaires, tels que les analyses spatialisées (SIG), les méthodes participatives ou les modèles hydrologiques intégrés. De même, la mise en place d’un dispositif de suivi à long terme basé sur des indicateurs scientifiques robustes est indispensable pour évaluer l’efficacité des actions engagées, ajuster les stratégies de gestion et accompagner la gouvernance adaptative des zones humides libanaises face aux défis climatiques et socio-économiques à venir.

En conclusion, cette recherche propose un cadre méthodologique transférable et des recommandations stratégiques susceptibles de renforcer durablement les capacités de gestion intégrée des zones humides de Méditerranée orientale. Elle s’inscrit pleinement dans les objectifs des conventions internationales de conservation, notamment la Convention de Ramsar sur les zones humides et la Convention sur la diversité biologique (CDB), et contribue aux Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies, en particulier les ODD 6 (eau propre et assainissement), 13 (lutte contre le changement climatique) et 15 (vie terrestre).

BIBLIOGRAPHIE

- A Rocha Lebanon. (2004). Assessing groundwater and surface water flows through Aammiq Wetland. IUCN Resource Kit on Environmental Flows in Mediterranean Watercourses.
- Bennett, N. J., & Satterfield, T. (2018). Environmental governance: A practical framework to integrate social dimensions in protected area conservation. *Biological Conservation*, 227, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.08.020>
- Besançon, J. (1993). Notes sur l’hydrologie du Liban intérieur. *Hannon, Revue Libanaise de Géographie*, 22, 7-57.
- BirdLife International. (2022). State of the world’s birds 2022. BirdLife International. https://www.birdlife.org/wp-content/uploads/2022/09/SOWB2022_EN_compressed.pdf
- Bozbura, F. T., & Beskese, A. (2007). Prioritization of organizational capital measurement indicators using fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1100–1112. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.02.005>
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Dudley, N., Shadie, P., & Stolton, S. (2017). Guidelines for applying protected area management categories (2nd ed.). IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.PAPS.2.en>
- El Hage Hassan, H., Ardillier-Carras, F., & Charbel, L. (2019). Les changements d’occupation des sols dans la Béqaa Ouest (Liban) : le rôle des actions anthropiques. *Cahiers Agricultures*, 28, 10. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019010>
- Gogus, O., & Boucher, T. O. (1998). Strong transitivity, rationality and weak monotonicity in pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems*, 94(1), 133–144. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(96\)00375-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(96)00375-0)
- Haas, J. O. (1954). Report on preliminary geological and hydrological studies in Aammiq [Unpublished report].
- Haddad, E. A., Farajalla, N., Camargo, M., Lopes, R. L., & Vieira, F. V. (2014). Climate change in Lebanon: Higher-order regional impacts from agriculture. *REGION*, 1(1), 9–24. <https://doi.org/10.18335/region.v1i1.19>
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2008). Evaluating effectiveness: A framework for assessing management effectiveness of protected areas (2nd ed.). IUCN.
- IPBES. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2023). The thematic assessment report on invasive alien species and their control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (H. E. Roy, A. Pauchard, P. Stoett, & T. Renard Truong, Eds.). IPBES Secretariat. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430682>
- Kahraman, C., Cebeci, U., & Ruan, D. (2003). Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2), 171–184. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00099-9)
- Kaya, T., & Kahraman, C. (2011). A fuzzy approach to e-government evaluation from the user’s perspective. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1623–1632. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.081>
- Laborde, J. P., & Traboulsi, M. (2002). Cartographie automatique des précipitations moyennes annuelles au Moyen-Orient. *Publications de l’Association Internationale de Climatologie*, 14, 296–303.
- Lateef, A. S. A. (2007). Geological history of the Bekaa Valley (pp. 391–402). In Proceedings of the Second International Conference on the Geology of the Tethys (Cairo University, March 2007).
- Lockwood, M. (2010). Good governance for terrestrial protected areas: A framework, principles and performance outcomes. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 754–766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.10.005>
- Mace, G. M., Norris, K., & Fitter, A. H. (2014). Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006>
- Margules, C. R., & Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405(6783), 243–253. <https://doi.org/10.1038/35012251>

- Ministry of Environment. (2004, August). (MoE). Final report: Biodiversity assessment and monitoring in the protected areas/Lebanon (LEB/95/G31): Aammiq Swamp. Author. <https://moe.gov.lb/ProtectedAreas/publications/FinalReportAammiq.pdf>
- Ministry of Environment (Lebanon) & Lebanese University, Faculty of Science. (2004). Biodiversity assessment and monitoring in the protected areas/Lebanon LEB/95/G31: Aammiq Swamp (Final report). <https://www.moe.gov.lb/ProtectedAreas/publications/FinalReportAammiq.pdf>
- Ministry of Environment (MOE). (2019). The sixth national report of Lebanon to the Convention on Biological Diversity (CBD). Republic of Lebanon.
- MOE/UNDP/GEF. (2019). Sixth national communication of Lebanon to the UNFCCC. Ministry of Environment. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NC6_Lebanon.pdf
- Ramadan-Jaradi, G., Ramadan-Jaradi, M., & Itani, M. (2004). Final report: Biodiversity assessment and monitoring in the protected areas – Aammiq Swamp (Lebanon). Lebanese University – Faculty of Science & Ministry of Environment. <https://www.moe.gov.lb/ProtectedAreas/publications/FinalReportAammiq.pdf>
- Ramadan-Jaradi, G., & Ramadan-Jaradi, M. (2015). Spring flyways of migrating soaring birds in Akkar/Northern Lebanon. *Lebanese Science Journal*, 16(1), 15–21. <https://lsj.cnrs.edu.lb/wp-content/uploads/2015/12/grjaradi.pdf>
- Ramsar Convention Secretariat. (2005). Map of Aammiq Wetland Ramsar Site (Site no. 978) [Map]. Ramsar Sites Information Service. https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/37502429/pictures/LB978_map170706.pdf
- Rosenthal, Y., Katz, A., & Tchernov, E. (1989). Reconstruction of Quaternary freshwater lakes from chemical and isotopic composition of gastropod shells: The Dead Sea Rift, Israel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 74, 241–253.
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill.
- Sattout, E., Naylor, C., & Abi-Said, M. (2006). Integrated and practical ecological monitoring manual for Tyr(e) Coast Nature Reserve. MedWetCoast Project, GEF/UNDP/Ministry of Environment (MoE), Beirut, Lebanon.
- SPNL. (2022). Annual monitoring report – Shouf Biosphere Reserve. Society for the Protection of Nature in Lebanon. <https://www.spnl.org>
- Storey, R. (2003). Assessing groundwater and surface water flows through Aammiq Wetland (Mediterranean case study). In Assessment and provision of environmental flows in Mediterranean watercourses: Basic concepts, methodologies and emerging practice (Resource kit). International Union for Conservation of Nature (IUCN). https://www.pseau.org/outils/ouvrages/a_rocha_assessing_groundwater_and_surface_water_flows_through_aammiq_wetland_2003_en.pdf
- Tohmé, G., & Tohmé, H. (2014). Illustrated flora of Lebanon (2nd ed.). National Council for Scientific Research of Lebanon.
- Traboulsi, M. (2010). La pluviométrie moyenne annuelle au Liban : Interpolation et cartographie automatique. *Lebanese Science Journal*, 11(2), 11–25.
- UNDP. (1970). Liban : Étude des eaux souterraines. United Nations Development Programme.
- Van Laarhoven, P. J. M., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1–3), 229–241. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7)
- Walley, C. D. (1988). A braided strike-slip model for the northern continuation of the Dead Sea Fault and its implications for Levantine tectonics. *Tectonophysics*, 145(1–2), 63–72.
- Walley, C. D. (1996). The geology and hydrogeology of the Aammiq wetlands region [Unpublished report].
- Walley, C. D. (2008). Some further thoughts on the geology of the Aammiq wetland [Unpublished report].

Communication présentée lors du IX^e colloque de l'Association francophone de géographie physique (AFGP), en séance plénière, le 10 octobre 2025. Manuscrit reçu le 18 octobre 2025, soumis à l'évaluation par les pairs et accepté le 27 janvier 2026.

Communication presented at the 9th Conference of the Francophone Association of Physical Geography (AFGP), plenary session, 10 October 2025. Manuscript received on 18 October 2025, peer-reviewed, and accepted on 27 January 2026