

UN INDICE ÉCOLOGIQUE POUR LA SURVEILLANCE DES ZONES HUMIDES BASÉ SUR L'AVIFAUNE AQUATIQUE : CAS DE LA TUNISIE

Nabil HAMDI^{1*} & Sihem ISMAIL-HAMDI²

¹ U/R de BioÉcologie et Systématique Évolutive ; Faculté des Sciences de Tunis, 2092, Campus El Manar, Tunis, Tunisie.

² Laboratoire des Sciences Fondamentales, École Nationale de Médecine Vétérinaire de Sidi Thabet, Université La Manouba, 2020, Ariana, Tunisie.

* Auteur correspondant : Téléphone : 0021698252884, Fax : 002161885480, E-mail : nabilhamdimd@yahoo.fr ou Nabil.Hamdi@fsg.nmu.tn

SUMMARY.— *Waterbirds as an ecological indicator for monitoring wetlands: an application to Tunisia.*—

We propose a simple ecological index to monitor wetlands, based on interannual changes in waterbird numbers and the hydro-ecological characteristics of their wintering sites. This new method provides a simple tool applicable to most types of wetlands in northern Africa with comparable waterbird species and hydrological attributes. Scores of this ecological index are calculated through a four-steps approach: (1) discriminate prospected sites into different associations based on their hydro-ecological characteristics; (2) compute indicator values for each waterbird species considered to quantify the strength of species-habitat relationships in each wetland associations; (3) calculate the relative rate of temporal change in indicator species abundances between two sampling events (in our example 2001-2013 and 1970/2000); (4) compute the weighted sum across species of the product of these two metrics within a given wetlands association. The application of our index to the monitoring of Tunisian wetlands suggests the degradation of wintering lagoons and salt pans and coastal environments. Nevertheless, applying the index in floodplains and garaets tends to indicate improved overwintering conditions, especially for man-tolerant waterbird species. Our new index targets environmental stakeholders seeking for an efficient tool for biodiversity monitoring.

RÉSUMÉ.— Nous proposons dans ce travail un indice écologique pour la surveillance des zones humides tunisiennes, basé sur la variation des effectifs annuels moyens d'oiseaux d'eau. Ce nouvel outil offre une méthode applicable à la surveillance de toutes les catégories de zones humides du Nord de l'Afrique ayant des similitudes avifaunistiques et hydrologiques. Cet indice écologique se calcule en quatre étapes : (1) discriminer les zones humides en associations partageant des caractéristiques hydro-écologiques communes ; (2) déterminer la valeur indicatrice de chaque espèce sur ces différentes associations, quantifiant la relation d'une espèce à l'une des associations ; (3) calculer les variations temporelles des effectifs moyens de chacune de ces espèces entre deux périodes de suivi (dans notre cas 1970/2000 et 2001/2013) ; (4) calculer la somme pondérée des produits des deux métriques de toutes les espèces indicatrices pour chaque association. L'application de notre indice aux zones humides tunisiennes suggère une dégradation des conditions d'hivernage des lagunes et des sebkhas ainsi que des milieux côtiers. À l'inverse, les conditions d'hivernage dans les plaines inondées et les garaets semblent s'améliorer, notamment pour les espèces anthropophiles. Cette méthode de surveillance des zones humides constitue un nouvel outil de travail simple et efficace pour les professionnels de l'environnement.

Dans le monde, la dynamique écosystémique des zones humides (ZH) subit de fortes pressions anthropiques. Une perturbation fréquente et d'intensité élevée peut conduire à une altération des réseaux trophiques, une baisse de la disponibilité et de la stabilité des ressources exploitables, pouvant éventuellement aboutir à une érosion profonde de la biodiversité (Angermeier & Karr, 1994). Aux pressions locales s'ajoutent les effets des changements globaux, incluant les modifications du climat, de la composition biochimique de l'eau, des habitats, mais aussi l'introduction d'espèces invasives et la surexploitation des ressources (GIEC, 2007).

La situation préoccupante des ZH nécessite une surveillance continue au moyen de méthodes susceptibles de détecter les changements de leurs composantes biophysiques et d'aider à la mise en

place de stratégies de protection ou de restauration adéquates (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2007). Puisqu'il est impossible de mesurer toutes les composantes biotiques et abiotiques d'un écosystème, il est nécessaire d'en sélectionner des éléments indicateurs dont la dynamique est représentative de celle des autres éléments. Souvent, ces indicateurs sont suivis dans le temps et dans l'espace à travers les traits démographiques d'une espèce ou d'un groupe d'espèces, occupant généralement des niveaux trophiques supérieurs (Hilty & Merenlender, 2000 ; Everard, 2008). Ces paramètres biotiques sont intégrés dans des indices écologiques dont les scores sont supposés refléter l'état de santé du milieu et doivent permettre l'évaluation de la pertinence des programmes de conservation ou de restauration (Bartoldus, 1999 ; Fennessy *et al.*, 2007). Ils sont également utilisés comme des signaux d'alarme précoce d'une perturbation environnementale ou pour diagnostiquer les changements survenus dans le milieu soumis à des perturbations anthropiques ou naturelles (Niemi & McDonald, 2004). Les inconvénients de la majorité des méthodes existantes sont liés aux efforts considérables qui doivent être déployés, aux contraintes techniques et à leur inapplicabilité sur une aire géographique étendue (Finlayson, 2003). À titre d'exemple, sur quarante indices groupés par Bartoldus (1999), seulement six ont été définis par Fennessy *et al.* (2007) comme simples, rapides et efficaces.

Compte-tenu de l'importance des oiseaux dans le fonctionnement des écosystèmes (Ma *et al.*, 2010) et de la relative simplicité des protocoles d'échantillonnage avifaunistique, ils sont utilisés à plusieurs reprises comme outils pour le suivi des milieux auxquels ils sont associés (O'Connell *et al.*, 2000 ; Niemi & McDonald, 2004). En effet, la large distribution géographique d'espèces d'oiseaux communs permet une comparaison standardisée des tendances entre différents habitats et zones géographiques (Owino *et al.*, 2001). Finalement, la connaissance approfondie de leur écologie facilite l'interprétation des changements mesurés (De Luca *et al.*, 2004).

En Tunisie, le manque d'information ornithologique et la carence des moyens logistiques alloués à la surveillance des ZH, fortement dégradées, encouragent le recours aux indices écologiques. En effet, pendant les 50 dernières années, sous l'effet des pressions anthropiques, la superficie globale des ZH a régressé d'environ 30 % (Hollis, 1992). La superficie résiduelle est elle-même menacée et est actuellement soumise à des pressions liées aux activités industrielles, aux aménagements et aux pratiques agricoles qui ne cessent de s'amplifier (Hamdi, 2008 ; Hamdi & Charfi, 2011).

Pour pallier ces problèmes, nous avons proposé dans ce travail un indice écologique simple d'interprétation, facile à implémenter et adapté à la surveillance des ZH tunisiennes, mais extensible à d'autres contextes géographiques. Notre indice se base sur un nombre limité d'espèces d'oiseaux d'eau à forte valeur indicatrice et sur la variation moyenne annuelle de leurs effectifs. Les résultats sont illustrés à partir de données issues de la prospection de 150 ZH et des effectifs d'oiseaux ayant été dénombrés durant deux périodes de suivi : 1970-1971/1999-2000 et 2001-2002/2012-2013. Nous montrons comment les scores de notre indice écologique de surveillance reflètent l'évolution de l'état des ZH entre les deux périodes de suivi et son interprétation comme un signal concernant les risques encourus et la nécessité de modifier les pratiques de gestion de ces milieux.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

CALCUL DE L'INDICE ÉCOLOGIQUE DE SURVEILLANCE DES ZONES HUMIDES (IES)

Notre indice est fondé sur une approche statistique, en quatre étapes, qui se base sur deux métriques décrivant d'une part les relations espèces-habitats (valeurs indicatrices en %), d'autre part les variations temporelles de la densité moyenne des espèces (taux de variation annuel en %). L'application de l'indice proposé nécessite une logistique modérée et peu coûteuse avec des moyens techniques et financiers limités. Cet outil vise principalement les agents impliqués dans les programmes de surveillance, d'aménagement, de restauration et de conservation des ZH.

À titre d'illustration, nous appliquons cet indice aux ZH tunisiennes, mais il est transférable à d'autres ZH dès lors que des données hydrobiologiques et des comptages avifaunistiques de deux longues périodes sont disponibles.

Étape 1 : Typologie des ZH tunisiennes

Dans la littérature, pour identifier les espèces indicatrices et calculer leurs valeurs indicatrices en % (VI), deux approches majeures ont été proposées.

La première approche, dite « site-spécifique », ne nécessite pas le développement préalable d'un système de catégorisation des sites (Oberdorff *et al.*, 2001). Cette procédure utilise les espèces en fonction de leur valeur économique et/ou de leur intérêt public, ou bien parce qu'elles sont supposées indicatrices d'un habitat particulier. Un problème majeur associé à cette approche est que les espèces sélectionnées ne sont pas nécessairement sensibles à la dégradation de leurs milieux (Roberts & O'Neil, 1985).

La deuxième approche, dite « type-spécifique », se base sur des groupements hiérarchiques de sites ou d'habitats à partir de certains critères écologiques, comme l'homogénéité taxinomique et les attributs hydrologiques. Cette procédure, que nous adoptons, est plus appropriée pour l'identification des bioindicateurs (Kremen, 1992, 1994 ; Dufrière & Legendre, 1997 ; Wright *et al.*, 2000 ; De Cáceres *et al.*, 2010).

Dans ce travail, la méthode de la Classification à Ascendance Hiérarchique a permis de grouper les ZH en un nombre restreint d'associations. Les calculs de la similarité en % entre les sites de la même association sont basés sur une matrice sites*espèces exprimée en densités d'individus / an / ha. La ségrégation entre les différentes associations est également soumise à l'effet de deux facteurs hydrologiques catégoriels : la salinité des eaux (douce, saumâtre ou salée) et le degré de permanence des eaux (permanente ou temporaire). Le principe de cette méthode se base sur la construction des groupements par agglomérations successives des ZH deux à deux. Nous vérifions la significativité des ségrégations inter-associations des ZH au moyen du test ANOSIM.

Étape 2 : Identification des espèces indicatrices et de leurs valeurs indicatrices (VI en %)

La littérature qui concerne les méthodes de sélection des espèces indicatrices est particulièrement abondante. Une première approche basée sur l'occurrence des espèces dans une série de milieux définie au préalable a été développée par Hutto (1998). D'autres auteurs ont utilisé des méthodes d'ordination permettant d'associer, selon leur affinité, l'importance numérique des espèces aux plus importants attributs hydrologiques de leurs milieux (Kremen, 1992 ; Dufrière & Legendre, 1997).

Dans le cadre de notre travail, au niveau de la même association de ZH, les espèces indicatrices retenues sont, à la fois, les plus abondantes et les plus largement distribuées entre les sites relevant de cette association. Dans les autres associations, elles sont à la fois moins abondantes et avec une occurrence faible.

Nous déterminons la valeur indicatrice (VI, exprimé en %) des espèces pour chaque association de ZH au moyen de l'analyse SIMPER. Cette méthode permet de quantifier la contribution en % des espèces dans la ségrégation des associations de ZH et d'identifier les espèces spécialistes d'habitat (Clarke & Warwick, 2001). Pour chaque association, parmi la liste des espèces spécialistes, l'analyse SIMPER a permis également d'identifier les espèces que l'on considère comme indicatrices et qui présentent des VI en % significatives (définies comme les $VI \geq 5\%$). Pour une analyse suffisamment exhaustive, la valeur cumulée des VI propres aux espèces indicatrices doit dépasser 50 % pour chaque association (Clarke & Warwick, 2001).

Étape 3 : Calcul des taux de variation (TV en %) des densités moyennes annuelles des espèces indicatrices.

Le calcul du taux de variation des densités moyennes des espèces indicatrices (TV en %) de chaque association fait référence à deux périodes de suivi qui reflètent deux états différents des ZH tunisiennes. Un premier état de référence se base sur des recensements effectués de 1970 à 2000 (Goldshmit & Hafner, 1973 ; Smart, 1974 ; Smart, 1976 ; Isenmann *et al.*, 2005), le second état sur des recensements effectués sur les mêmes sites de 2001 à 2013 (données personnelles). Le TV en % de la densité de chaque espèce indicatrice au niveau de chaque association de ZH se calcule de la façon suivante :

$$TV_{ik} = \frac{(DMA_{ik(\text{période2})}) - (DMA_{ik(\text{période1})})}{(DMA_{ik(\text{période2})})}$$

avec :

TV_{ik} : Taux de variation de la densité moyenne de l'espèce indicatrice i dans l'association k entre les deux périodes ;

$DMA_{ik(\text{période 1 ou 2})}$: Densité moyenne de l'espèce indicatrice i dans l'association k pendant chaque période d'échantillonnage.

Étape 4 : Application de l'indice écologique de surveillance des ZH tunisiennes (IES)

Pour calculer les scores de l'IES, nous avons utilisé la moyenne pondérée de la somme des produits des valeurs en % de VI et TV. Les scores obtenus permettent des comparaisons entre deux états écologiques d'une même association de ZH. La moyenne pondérée de l'IES de chaque association se calcule de la manière suivante :

$$\overline{IES}_k = \frac{\sum_{i=1}^m (VI_{ik} \times TV_{ik})}{\sum_{i=1}^m VI_{ik}}$$

avec :

- IES_k : Moyenne arithmétique pondérée de l'indice écologique de surveillance des ZH tunisiennes de l'association k ;
- VI_{ik} : Valeur indicatrice en % de l'espèce indicatrice i spécifique à l'association k ;
- TV_{ik} : Taux de variation en % de l'espèce indicatrice i spécifique à l'association k ;
- (m) : nombre d'espèces indicatrices.

Un score négatif de l'IES reflète une baisse des effectifs des espèces indicatrices de l'association. À l'inverse, une hausse du score de l'IES reflète une augmentation des effectifs des espèces indicatrices de l'association concernée. Finalement, un score tendant vers 0 désigne une stabilité relative des conditions écologiques de l'association entre les deux périodes de suivi.

Dans notre exemple, le test ANOSIM, l'analyse SIMPER et la Classification Ascendante Hiérarchique ont été implémentés dans le logiciel Primer « 5.2.2. ». Les valeurs de la densité des espèces d'oiseaux aquatiques ont été transformées en Ln (x+1) pour minimiser l'effet des valeurs extrêmes sur les moyennes statistiques.

ZONES HUMIDES PROSPECTÉES

En Tunisie, selon le Ministère de l'Environnement, les ZH sont « des étendues permanentes ou temporaires d'eaux douces ou saumâtres et des terres qui leurs sont adjacentes ». C'est sur cette base que les sites ont été sélectionnés dans ce travail.

Depuis l'hiver 2001-2002 jusqu'à l'hiver 2012-2013, nous avons prospecté 150 sites couvrant pratiquement toute la Tunisie, avec une fréquence moyenne de 42 sites/an (Fig. 1). Les types de ZH visitées sont :

(1) *Des segments littoraux* qui subissent fortement les actions marines comme l'adoucissement des températures, les vents fréquents, les embruns et les marées. Ces systèmes naturels s'étendent sur environ 1270 km et concernent la façade littorale occidentale au Nord et Nord-Ouest et la façade littorale orientale au Nord-Est et Sud-Est.

(2) *Des milieux lagunaires* qui communiquent avec les franges littorales ; les eaux marines (salées) se mélangent continuellement aux eaux terrestres (douces). Ce sont des milieux peu profonds, à eaux saumâtres, reliés à des oueds et séparés de la mer par un cordon dunaire (lagunes primaires) ou par un chenal (lagunes secondaires). La salinité des eaux des lagunes dépend donc des volumes des eaux drainées d'origines fluviales et marines.

(3) *Des plaines humides* qui sont des terrains relativement plats, temporaires et majoritairement exondés même en période pluvieuse. La durée de submersion de ces milieux est dépendante des microreliefs et de la crue des oueds avoisinants. Durant les années de sécheresse, ces milieux constituent un terrain favorable pour les activités agricoles.

(4) *Des sebkhas* et (5) *des garaets* qui constituent des milieux naturels et temporaires. La période annuelle de mise en eau est comprise entre 0 et 11 mois. Elle débute communément pendant la seconde moitié de l'automne avec les premières pluies et parfois même plus tardivement. La moyenne annuelle de la salinité est plus importante pour les eaux des sebkhas que celles des garaets.

(6) *Des réservoirs d'eau* qui sont artificiels et relativement profonds, et dont le fonctionnement hydrologique est en partie dépendant des besoins humains. Selon la superficie et l'altitude des sites, on distingue trois types de réservoirs : les barrages (superficie importante et à basse altitude), les lacs de barrage (superficie et altitude moyennes) et les lacs collinaires (superficie réduite et à haute altitude).

RECENSEMENT DES OISEAUX AQUATIQUES

Nous avons estimé la taille des populations hivernantes d'oiseaux d'eau au moyen de la méthode absolue de comptage au sol (Bibby *et al.*, 1993). Elle consiste à compter le plus exactement possible un petit nombre (10, 50, ou 100 sujets) du contingent d'oiseaux observé sur un site et à reporter ensuite autant de fois la surface couverte par ce sous-échantillon que nécessaire pour couvrir la totalité du contingent. Pour les groupes de grande taille (plusieurs milliers), le sous-échantillon de référence peut être étendu à 200 ou 500 sujets, voire même 1000 sujets. Pour limiter les erreurs d'estimation, nous avons régulièrement eu recours à un double comptage, notamment dans le cas où les groupes dénombrés seraient de tailles importantes (>5000 sujets). Dans ce cas, seuls les effectifs minimaux sont retenus.

Le grégarisme caractéristique des oiseaux aquatiques facilite leur comptage d'une part, mais d'autre part, il complique l'identification des espèces apparentées dans les groupes multispécifiques. Pour éviter ce problème, chaque comptage nécessite la présence d'au minimum deux observateurs expérimentés. Les individus non identifiés avec certitude sont écartés des analyses statistiques.

Pour les vasières du golfe de Gabès, dont la dynamique des marées est plus importante que dans les autres milieux littoraux, les recensements d'oiseaux ont été fixés aux premières journées de vives-eaux, à marée haute. Au cours de cette période, une grande surface des habitats intertidaux demeure immergée et les bandes d'oiseaux sont forcées à rejoindre les reposoirs situés au niveau de l'estran. Sous cet effet contraignant, les oiseaux limitent leur mobilité et sont alors directement exposés aux observateurs (Bos *et al.*, 1999).

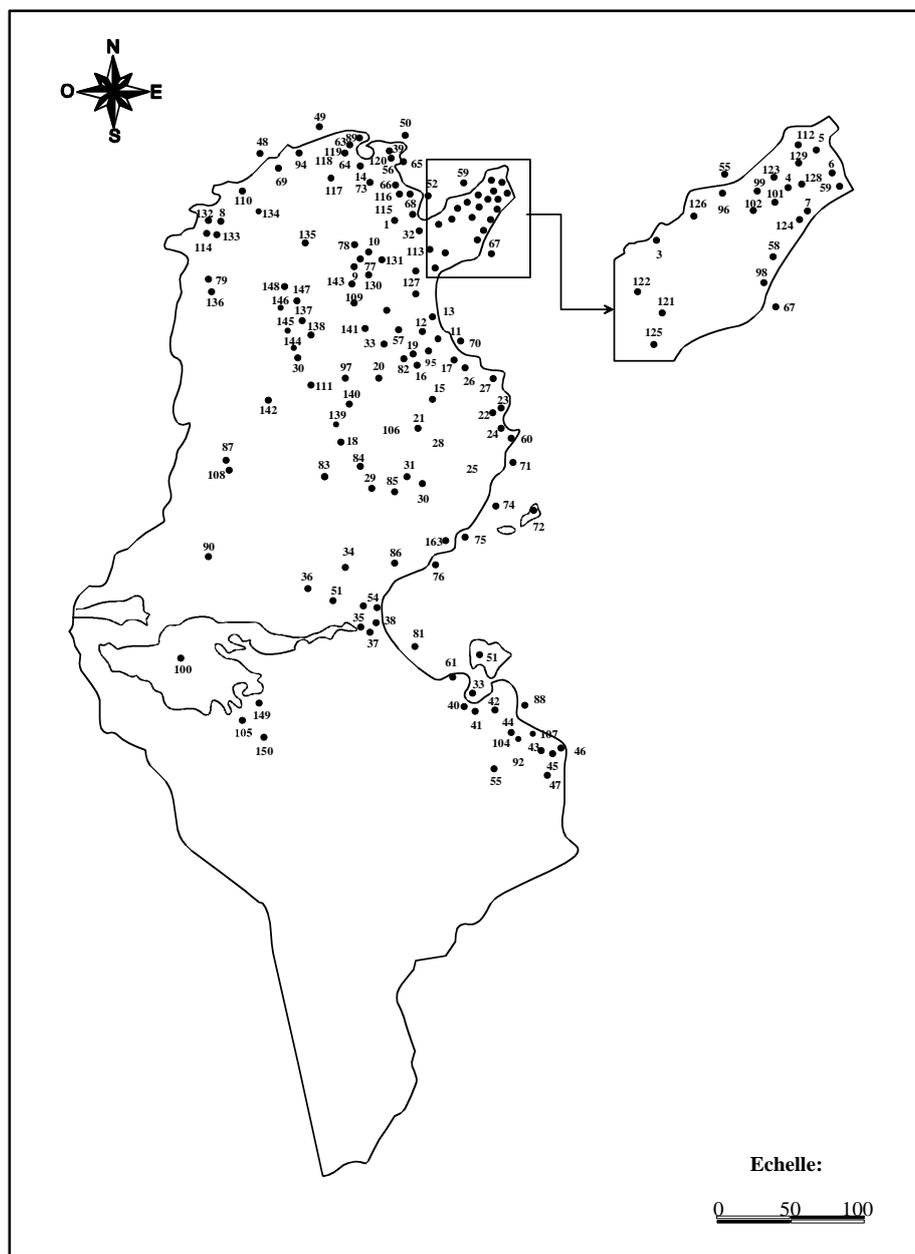


Figure 1.— Localisation des zones humides tunisiennes prospectées sur la période 2000-2013 (échelle en km).

Notre bonne connaissance des ZH tunisiennes, complétée par une compilation bibliographique, nous a permis de sélectionner, pour la majorité des sites, les plans d'eau couramment utilisés par les oiseaux d'eau (Hamdi, 2008 ; Isenmann *et al.*, 2005). Nous considérons donc que les localités choisies couvrent une proportion satisfaisante des populations hivernantes d'oiseaux d'eau.

Les sites d'observation correspondant aux différentes localités sont situés en périphérie des ZH sur des points culminants de manière à assurer une vue d'ensemble des plans d'eau. Certains individus peuvent échapper à cette

couverture, mais ils représentent probablement des effectifs très faibles qui n'influencent pas les variations des effectifs entre sites. Afin d'améliorer la couverture des plans d'eaux, nous avons parfois complété nos comptages par des observations à partir de points secondaires.

Pour éviter l'influence des contingents d'oiseaux postnuptiaux et prénuptiaux sur la taille réelle des populations hivernantes, les campagnes annuelles de recensement ont eu lieu pendant la période de stabilité hivernale (décembre-janvier). Les sites ayant fait l'objet d'une investigation intensive sont situés au Nord, au Centre, ainsi qu'au niveau du golfe de Gabès.

TABLEAU I

Richesse spécifique et abondance moyenne par famille sur la période 2000-2001/2012-2013

Ordres	Familles	Richesse spécifique	Abondance moyenne
GAVIIFORMES	<i>Gavidae</i>	1	22
Total absolu		1	22
Total relatif		0,94%	0,00%
PODICIPEDIFORMES	<i>Podicipedidae</i>	3	4574
Total absolu		3	4574
Total relatif		2,83%	0,82%
PROCELLARIFORMES	<i>Procellariidae</i> <i>Hydrobatidae</i>	2 1	58 1
Total absolu		3	59
Total relatif		2,83%	0,01%
PELECANIFORMES	<i>Sulidae</i> <i>Phalacrocoracidae</i> <i>Pelecanidae</i>	1 2 1	262 6199 6
Total absolu		4	6467
Total relatif		3,77%	1,16
PHOENICOPTERIFORMES	<i>Phoenicopteridae</i>	1	65954
Total absolu		1	65954
Total relatif		0,94%	11,85%
CICONIIFORMES	<i>Ardeidae</i> <i>Ciconiidae</i> <i>Threskiornithidae</i>	7 2 2	3124 213 1329
Total absolu		11	4666
Total relatif		10,37%	0,83%
ANSERIFORMES	<i>Anatidae</i>	19	135742
Total absolu		19	135742
Total relatif		17,24%	24,40%
GRUIFORMES	<i>Rallidae</i> <i>Gruidae</i>	3 1	66932 3174
Total absolu		4	70106
Total relatif		3,77%	12,60%
CHARADRIIFORMES	<i>Haematopodidae</i> <i>Recurvirostridae</i> <i>Burhinidae</i> <i>Glareolidae</i> <i>Charadriidae</i> <i>Scolopacidae</i> <i>Stercorariidae</i> <i>Laridae</i> <i>Sternidae</i>	1 2 1 2 7 24 3 10 10	1527 3161 209 57 29765 149649 2 82673 1539
Total absolu		60	268636
Total relatif		56,60%	48,29%
CORACIIFORMES	<i>Alcedinidae</i>	1	34
Total absolu		1	34
Total relatif		0,94%	0,00%

RÉSULTATS

ANALYSE DE LA STRUCTURE DES COMMUNAUTÉS D'OISEAUX D'EAU HIVERNANTES EN TUNISIE

Pendant la période 2000-2001/2012-2013, les observations ont permis d'identifier 10 ordres, 24 familles, 106 espèces et de recenser une moyenne annuelle approximative de 555 000 ± 42 000 oiseaux d'eau hivernants ; avec des valeurs maximales et minimales des effectifs annuels respectivement de l'ordre de 389 000 et 702 000 oiseaux. Les Charadriiformes, les Ansériformes et les Ciconiiformes sont les groupes les plus riches en espèces. En termes d'abondance, les Charadriiformes, les Ansériformes, les Gruiformes et les Phoéniçoptériformes dominent largement (Tab. I).

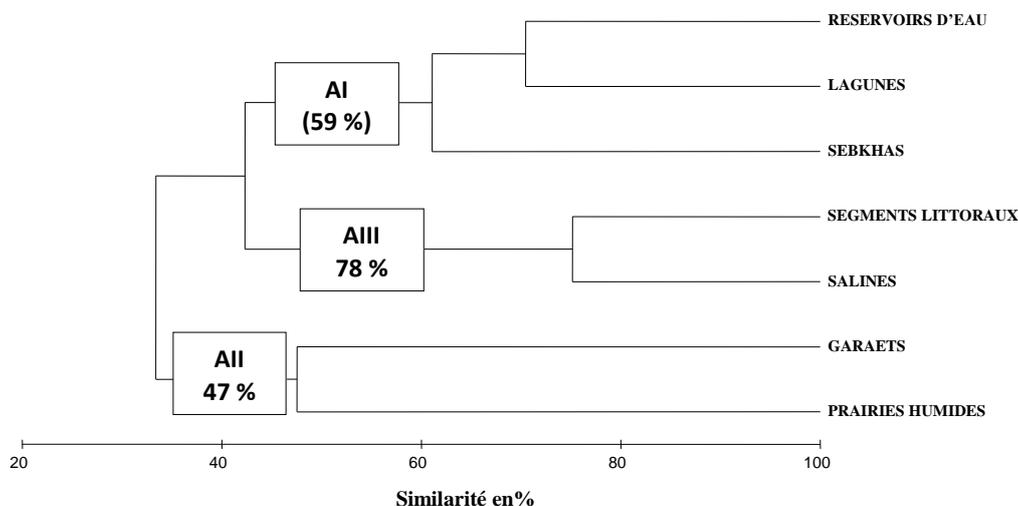


Figure 2.— Similarité moyenne des ZH Tunisiennes soumises à l'effet de deux facteurs catégoriels (salinité et degré de permanence de l'eau).

Les plus forts contingents d'oiseaux se limitent aux deux quartiers d'hivernage les plus importants en Tunisie : le Parc National Ichkeul (au Nord) et le golfe de Gabès (au Sud-Est). La capacité d'accueil totale de ces deux sites peut dépasser, selon les années, la moitié des effectifs totaux.

Les espèces globalement menacées comme *Marmaronetta angustirostris*, *Oxyura leucocephala*, *Aythya nyroca* et *Netta rufina* fréquentent préférentiellement les lacs de barrages et les lacs collinaires de faibles à moyennes superficies et qui sont situés au Nord et au Centre du pays. Ces taxons deviennent plus occasionnels dans les grands barrages et les vastes milieux naturels permanents. D'autres espèces ayant le statut « faible risque d'extinction » comme *Gallinago media*, *Limosa limosa* et *Larus audouinii* hivernent également en Tunisie mais avec des effectifs qui ne dépassent guère une moyenne nationale d'une cinquantaine d'individus pour chaque espèce. Ils fréquentent préférentiellement les vasières du golfe de Gabès, mais seule la dernière espèce hiverne plus communément sur les côtes rocheuses de l'extrême Nord.

La taille moyenne des populations d'oiseaux aquatiques a fluctué considérablement entre les deux périodes d'étude. Toutes espèces confondues, la comparaison des effectifs moyens totaux entre les deux périodes de suivi (1970/2000 et 2000/2013) révèle une diminution d'environ 30 %.

TABLEAU II

Espèces spécialistes des associations de zones humides tunisiennes avec des valeurs indicatrices VI (en %, cumulées sur les espèces = 100% pour chaque association) et le nombre de sites par association (n)

Espèces caractéristiques des associations	VI (%)	Cumulée (%)
AI (n = 101)		
Fuligule milouin (<i>Aythya ferina</i>)**	21,05	21,05
Foulque macroule (<i>Fulica atra</i>)**	12,33	33,38
Canard siffleur (<i>Anas penelope</i>)**	11,46	44,84
Canard souchet (<i>Anas clypeata</i>)**	8,39	53,23
Grèbe huppé (<i>Podiceps cristatus</i>)**	7,07	60,30
Grèbe castagneux (<i>Tachybaptus ruficollis</i>)**	5,08	65,38
Flamant rose (<i>Phoenicopterus roseus</i>)	4,56	69,94
Goéland leucophée (<i>Larus michahellis</i>)	4,45	74,39
Bécasseau variable (<i>Calidris alpina</i>)	4,22	78,61
Mouette rieuse (<i>Larus ridibundus</i>)	4,02	82,63
Canard colvert (<i>Anas platyrhynchos</i>)	3,62	86,25
Sarcelle d'hiver (<i>Anas crecca</i>)	3,36	89,61
Gravelot à col. interrompu (<i>Charadrius alexandrinus</i>)	3,33	92,94
Bécasseau minute (<i>Calidris minuta</i>)	3,10	96,04
Grand Cormoran (<i>Phalacrocorax carbo</i>)	2,12	98,16
Héron cendré (<i>Ardea cinerea</i>)	1,22	99,38
AII (n = 19)		
Héron garde-bœufs (<i>Bubulcus ibis</i>)**	51,04	51,04
Vanneau huppé (<i>Vanellus vanellus</i>)**	39,43	90,38
Grue cendrée (<i>Grus grus</i>)**	5,59	95,97
Edicnème criard (<i>Burhinus oedecnemus</i>)	4,02	99,99
AIII (n = 30)		
Goéland leucophée (<i>Larus michahellis</i>)**	23,06	23,06
Bécasseau variable (<i>Calidris alpina</i>)**	16,42	39,48
Goéland railleur (<i>Larus genei</i>)**	12,86	52,34
Flamant rose (<i>Phoenicopterus roseus</i>)**	8,57	60,91
Grand Cormoran (<i>Phalacrocorax carbo</i>)**	7,41	68,32
Goéland brun (<i>Larus fuscus</i>)**	5,35	73,67
Bécasseau sanderling (<i>Calidris alba</i>)**	5,13	78,80
Bécasseau minute (<i>Calidris minuta</i>)	4,98	83,78
Spatule blanche (<i>Platalea leucorodia</i>)	4,31	88,09
Gravelot à col. interrompu (<i>Charadrius alexandrinus</i>)	2,57	90,66
Chevalier gambette (<i>Tringa totanus</i>)	1,56	92,22
Courlis cendré (<i>Numenius arquata</i>)	1,53	93,75
Mouette rieuse (<i>Larus ridibundus</i>)	1,51	95,26
Aigrette garzette (<i>Egretta garzetta</i>)	1,27	96,53
Pluvier argenté (<i>Pluvialis squatarola</i>)	1,14	97,67
Héron cendré (<i>Ardea cinerea</i>)	1,05	98,72
Chevalier aboyeur (<i>Tringa nebularia</i>)	1,00	99,72

** : espèces indicatrices avec des valeurs de VI supérieures à 5 %.

L'augmentation des effectifs moyens de certaines espèces ayant probablement toléré les changements des conditions écologiques d'hivernage (*Tachybaptus ruficollis*, *Podiceps cristatus*, *Morus bassanus*, *Bubulcus ibis*, *Ciconia ciconia*, *Platalea leucorodia*, *Anas platyrhynchos*, *Anas crecca*, *Oxyura leucocephala*, *Aythya nyroca*, *Vanellus vanellus*, *Larus audouinii*, *Sterna albifrons* et *Larus genei*) n'a pas compensé la diminution des effectifs moyens d'autres espèces plus vulnérables (*Anas penelope*, *Anas acuta*, *Tadorna tadorna*, *Tadorna ferruginea*, *Anser anser*, *Calidris minuta*, *Charadrius alexandrinus*, *Pluvialis squatarola*, *Numenius arquata*, *Recurvirostra avosetta*, *Haematopus ostralegus*, *Porphyrio porphyrio*, *Gallinula chloropus*, *Grus grus*, *Fulica atra* et *Podiceps nigricollis*).

TABLEAU III

Méthode de calcul de l'indice de surveillance des trois associations de zones humides Tunisiennes

Associations		Espèce	Groupe	VI _{ik} (%)	TV _{ik} (%)	(VI x TV)	
AI	Espèces indicatrices	<i>A. ferina</i>	Herbivore	21,05	-19	-399,95	
		<i>F. atra</i>	Herbivore	12,33	-5	-61,65	
		<i>A. penelope</i>	Herbivore	11,46	-34	-389,64	
		<i>A. clypeata</i>	Omnivore	8,39	+13	+109,07	
		<i>P. cristatus</i>	Piscivore	7,07	+3	+21,21	
	<i>T. ruficollis</i>	Omnivore	5,08	+40	+203,20		
	Score	$\sum_{i=1}^6 (VI_{iAI} \times TV_{iAI}) = -517,76$					
		$\sum_{i=1}^6 VI_{iAI} = 65,38$					
		$\overline{IES}_{AI} = \frac{\sum_{i=1}^m (VI_{iAI} \times TV_{iAI})}{\sum_{i=1}^m VI_{iAI}} = -7,91$					
AII	indicateurs	<i>B. ibis</i>	Omnivore	51,04	+49	+2500,96	
		<i>V. vanellus</i>	Omnivore	39,43	+67	+2641,81	
		<i>G. grus</i>	Omnivore	5,59	-28	-156,52	
	Score	$\sum_{i=1}^3 (VI_{iAII} \times TV_{iAII}) = +4986,25$					
		$\sum_{i=1}^3 VI_{iAII} = 96,06$					
		$\overline{IES}_{AII} = \frac{\sum_{i=1}^m (VI_{iAII} \times TV_{iAII})}{\sum_{i=1}^m VI_{iAII}} = +51,90$					
AIII	indicateurs	<i>L. michahellis</i>	Omnivore	23,06	+7	+161,42	
		<i>C. alpina</i>	Zoophage	16,42	-14	-229,88	
		<i>L. ridibundus</i>	Omnivore	12,86	+19	+235,98	
		<i>P. roseus</i>	Filtreur	8,57	-11	-94,27	
		<i>P. carbo</i>	Piscivore	7,41	-23	-170,43	
		<i>L. fuscus</i>	Piscivore	5,35	+11	+58,85	
		<i>C. alba</i>	Zoophage	5,13	+2	+10,26	
	Score	$\sum_{i=1}^7 (VI_{iAIII} \times TV_{iAIII}) = -28,07$					
		$\sum_{i=1}^7 VI_{iAIII} = 78,80$					
		$\overline{IES}_{AIII} = \frac{\sum_{i=1}^m (VI_{iAIII} \times TV_{iAIII})}{\sum_{i=1}^m VI_{iAIII}} = -0,35$					

VI : Valeur indicatrice des espèces ; TV : Taux de Variation des effectifs moyens des espèces indicatrices entre les deux périodes 1970/2000 et 2001/2013 au niveau de chaque association; IES : Indice Ecologique de Surveillance des Zones Humides Tunisiennes.

APPLICATION DE L'INDICE ÉCOLOGIQUE DE SURVEILLANCE DES ZONES HUMIDES TUNISIENNES

La méthode de Classification Hiérarchique Ascendante révèle que les ZH prospectées se ségréguent en trois associations (Fig. 2).

La première association (AI) regroupe tous les sites, partiellement ou totalement submergés durant la période de stabilité hivernale (décembre-janvier) de chaque année : les réservoirs d'eau, les lagunes et les sebkhas. La deuxième association (AII) regroupe tous les sites continentaux, temporaires et à eaux douces comme les garaets et les plaines humides. Finalement, la troisième

association (AIII) rassemble les sites connectés avec le milieu marin, c'est-à-dire les salines et les segments littoraux. Les valeurs de la similitude moyenne entre les sites, chaque association prise à part, sont statistiquement significatives (Test ANOSIM ; R indice de l'échantillonnage statistique > 0 et $P > 0,1$). Elles s'échelonnent entre une valeur minimale voisine de 47 % relative à l'AII et une valeur maximale voisine de 78 % relative à l'AIII.

L'application de l'analyse SIMPER révèle que seules 29 des 106 espèces sont spécialistes des trois associations (16 espèces de l'AI, 4 de l'AII et 17 de l'AIII). Selon le critère choisi ($VI > 5\%$), parmi ces espèces spécialistes, seulement 16 espèces sont retenues comme indicatrices de leurs associations (Tab. II).

La première association de ZH est caractérisée par des espèces indicatrices qui appartiennent aux groupes trophiques des herbivores (*Aythya ferina*, *Fulica atra* et *Anas penelope*), des canards omnivores (*Anas platyrhynchos* et *Anas clypeata*) et des plongeurs piscivores (*Tachybaptus ruficollis*). La deuxième association rassemble des grands échassiers omnivores qui s'acclimatent parfaitement aux ZH temporaires, partiellement ou totalement anthropisées. Finalement les espèces de la troisième association sont principalement des laro-limicoles zoophages qui se nourrissent d'organismes aquatiques de petite taille (*Larus michahellis*, *Larus genei*, *Larus fuscus*, *Calidris alpina*, et *Calidris alba*), des échassiers filtreurs (*Phoenicopterus roseus*) et un plongeur piscivore (*Phalacrocorax carbo*).

La lecture des scores de l'IES révèle que seule la deuxième association présente des scores positifs, et donc probablement des conditions actuelles d'hivernage plus favorables par rapport à l'état de référence. En revanche, la première ainsi que la troisième association sont en diminution (Tab. III).

DISCUSSION

En Afrique du Nord, le nombre de ZH est réduit et la plupart sont soumises à des projets de drainage, partiels ou totaux (Hollis, 1992). Devant cette déficience en habitats naturels, les ZH tunisiennes sont considérées comme primordiales pour l'accueil des populations d'oiseaux aquatiques de l'Ouest Paléarctique (Isenmann *et al.*, 2005 ; Hamdi, 2008 ; Hamdi & Charfi 2011, 2012a). Il s'agit, entre autres, d'espèces globalement menacées, dont certaines ont été inventoriées au cours de ce travail. La Tunisie présente également plus d'une vingtaine de sites d'importance internationale qui répondent aux trois critères de la Convention Ramsar spécifiques à ce groupe taxinomique (Hamdi, 2008 ; Hamdi & Charfi, 2011), dont par exemple, la Réserve Naturelle des Îles Kneiss pour l'accueil des laro-limicoles (Bos *et al.*, 1999 ; Hamdi *et al.*, 2008b) et le Parc National Ichkeul pour l'accueil des canards et des foulques (Tamisier *et al.*, 1995 ; Tamisier, 2001 ; Hamdi *et al.*, 2008a, 2011 ; Hamdi & Charfi, 2012b).

Toutefois, nous avons constaté une diminution de l'effectif moyen d'une douzaine d'espèces. Ces déclinés sont probablement liés à des perturbations locales, d'origine naturelle ou anthropique, des conditions écologiques d'hivernage des oiseaux, notamment l'abondance et la disponibilité des ressources spatiales et trophiques (Dister *et al.*, 1990 ; Briggs *et al.*, 1998 ; Osiejuk *et al.*, 1999). Les perturbations des sites de nidification, situés pour certaines espèces loin des quartiers d'hiver tunisiens, pourraient également influencer la dynamique de ces espèces (Duncan *et al.*, 1999).

En Tunisie, l'expansion démographique, le progrès technologique et l'exploitation incessante des ressources naturelles ont conduit à de fortes modifications de l'intégrité naturelle des ZH (Hamdi, 2008). Il s'agit, en particulier, de la construction de barrages autour des plus grands bassins versants des lagunes du Nord et des sebkhas du centre de la Tunisie, qui appartiennent à la première association. On recense aussi diverses sources de pollution chimiques touchant en particulier les vasières du golfe de Gabès qui domine la troisième association. Les aménagements

touristiques menacent par ailleurs toute la côte du Sahel au Centre-Est et celle du Cap Bon au Nord-Est. En outre, la distribution spatiale des oiseaux d'eau les rend vulnérables, en particulier parce qu'un grand nombre d'espèces est représenté par de faibles effectifs concentrés en un nombre limité de quartiers d'hiver (Hamdi, 2008). Toute modification susceptible d'entraîner des perturbations de l'équilibre hydrologique des plus importants sites pourrait alors se répercuter directement sur ces oiseaux aussi bien à l'échelle nationale qu'à l'échelle de l'Ouest Paléarctique.

Les résultats de notre étude révèlent que les ZH tunisiennes, actuellement en situation critique, sont fréquentées par un large éventail d'espèces d'oiseaux aquatiques. Le maintien à long terme de cette diversité avifaunistique représente un défi de taille. Dans ce cadre, l'utilisation des indices écologiques de surveillance et particulièrement l'approche des indicateurs biologiques serait une politique très intelligente de conservation (Piersma & Jukema, 1990 ; Piersma *et al.*, 1993 ; Deceunick & Mahéo, 2000 ; Bryce *et al.*, 2002).

L'indice écologique proposé dans ce travail intègre 16 des 37 espèces identifiées comme spécialistes. Nous avons minimisé, par ce choix, les efforts qui seront déployés pour l'inventaire de tous les taxons et pour l'interprétation des données statistiques. Cette procédure est particulièrement intéressante dans le cadre des pays du Nord de l'Afrique, y compris la Tunisie, dont les moyens logistiques et financiers disponibles pour la surveillance des ZH sont très limités.

Si l'on admet que les espèces identifiées par la méthode SIMPER sont indicatrices de leur environnement et en se référant aux scores de l'IES, il semble que les conditions d'hivernage ont changé entre les deux périodes de suivi. La valeur négative de l'indice associé à la première association suggère une dégradation des ZH concernées qui s'est répercutée sur les effectifs de canards herbivores (Tab. III). En revanche, l'abondance et la disponibilité en ressources trophiques, ainsi que la dominance d'espèces omnivores à forte plasticité écologique, pourraient expliquer le score élevé de l'IES pour la seconde association (Tab. III). Enfin, le score IES relatif à la troisième association est, comme pour le premier, négatif. Cette valeur est probablement due, en grande partie, à la régression des effectifs des espèces consommatrices spécialistes (zoophages, filtreurs et piscivores) qui se nourrissent principalement des petits organismes aquatiques.

Le score négatif attribué à la première association de ZH pourrait s'expliquer par les aménagements hydro-agricoles (lacs collinaires et lacs de barrage) réalisés en amont des plus grands bassins versants des plus importantes lagunes du Nord et des sebkhas du Centre du pays. La mise en eau de ces réservoirs a contribué au bouleversement des valeurs moyennes habituelles des paramètres physico-chimiques des ZH naturelles et donc à la perturbation de leur fonctionnement hydrologique ainsi qu'à leur productivité primaire (Tamisier, 1995, 1997, 2001 ; Hamdi & Charfi, 2012b). A titre d'exemple, nous avons constaté une augmentation accrue de la salinité moyenne annuelle qui dépasse actuellement 30 g/l pour une grande majorité des écosystèmes perturbés. Cette valeur dépasse largement l'optimum de germination des plantes submergées (*Potamogeton pectinatus*, *Rupia* spp. et *Scirpus maritimus*), ressources trophiques principales des canards herbivores. Cela pourrait expliquer, du moins en partie, la régression des effectifs annuels moyens des espèces appartenant à ce groupe trophique fonctionnel à savoir *Aythya ferina*, *Fulica atra* et *Anas penelope*. Au sein de cette association, l'augmentation des effectifs moyens des espèces de canards omnivores (*Anas clypeata*) et de plongeurs piscivores (*Tachybaptus ruficollis* et *Podiceps cristatus*) peut être expliquée par l'augmentation de la superficie totale des milieux artificiels profonds, habitats favorables pour ces espèces (Hamdi, 2008).

A l'échelle de cette première association, face à l'augmentation des effectifs des omnivores et des piscivores, nous avons enregistré une diminution des effectifs des canards herbivores. En effet, ces derniers présentent un spectre trophique plus restreint et une faible plasticité écologique. Leur réponse démographique face à la perturbation de leur habitat est probablement à la fois plus rapide et plus intense.

Parmi les problèmes d'origine anthropique pouvant toucher particulièrement les milieux côtiers, éléments de la troisième association, figure la pollution chimique dont l'impact direct sur la dynamique des populations d'oiseaux d'eau a été mis en évidence à plusieurs reprises (De Luca-Abbott *et al.*, 2001). Dans ce contexte, d'autres études ont montré les effets indésirables de ce phénomène sur la zoocénose aquatique qui constitue les proies des oiseaux comme *Calidris alpina*, *Phoenicopterus roseus* et *Phalacrocorax carbo* (Darmoul, 1988 ; Guillaumont *et al.*, 1995). Dans le golfe de Gabès, au Sud-Est de la Tunisie, la pollution constitue probablement le facteur majeur affectant la dynamique des oiseaux aquatiques, entraînant le score négatif de l'ISE relative à l'AIII. La croissance des activités de chalutage peut aussi altérer indirectement la dynamique des oiseaux zoophages par une diminution de la production secondaire et un appauvrissement des ressources trophiques de ces taxons (Furness & Greenwood, 1993). Les cas de noyade par emprisonnement accidentel des oiseaux dans les filets maillants sont fréquents, notamment chez les cormorans piscivores (observation personnelle).

Seule la deuxième association, qui regroupe toutes les ZH temporaires partiellement ou totalement anthropisées (les garaets et les plaines inondées), présente un score IES positif. Cette valeur reflète des conditions d'hivernage qui semblent s'améliorer, notamment pour les oiseaux omnivores (*Bubulcus ibis*, *Vanellus vanellus* et *Burhinus oedicephalus*). En effet, le régime alimentaire mixte de ces espèces leur permet de persister dans des milieux largement anthropisés. L'accroissement de la superficie des agrosystèmes au détriment des milieux naturels a contribué à la création de nouveaux habitats pour ces espèces qui sont tolérantes aux activités agricoles.

CONCLUSION

Devant la rareté relative des études ornithologiques en Tunisie, nous avons essayé d'apporter, par le biais de ce travail un outil simple pour la mise en place d'un plan de surveillance à long terme des ZH. C'est un outil peu coûteux, facile à mettre en œuvre, notamment par un personnel peu qualifié. Les facilités techniques et logistiques de sa mise en œuvre sont les principaux avantages de l'indice proposé, notamment dans le cadre des pays du Maghreb qui présentent des ZH dont la typologie et la composition avifaunistique sont étroitement similaires à celles de la Tunisie. Cette méthode de surveillance des ZH constitue un nouvel outil de travail simple et efficace pour les professionnels de l'environnement. Elle permet de connaître rapidement la tendance de l'état des conditions écologiques des ZH d'un territoire.

Dans notre cas, l'intégration de deux métriques en rapport avec les oiseaux indicateurs semble *a priori* donner un aperçu, du moins partiel, sur l'évolution des ZH tunisiennes entre deux périodes de suivi. Toutefois, une amélioration de la formule de l'indice est nécessaire ; il s'agit particulièrement de tenir compte de l'inégalité de la capacité d'accueil des sites de la même association et de la différence entre les durées des périodes de suivi. Il conviendrait sans doute de mieux prendre en compte les déséquilibres de comptage entre des sites de différentes surfaces et d'effectuer des comptages sur des périodes courtes, mais séparés par un long laps de temps.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été financé par les projets suivants : PGRN (VOLET II ; 2012/2013 - FEM : TF097703), PGAP (2007/2008 - TF 051308- TUN), MEDCORE (2003/2005 - ICA3-2002-10003) et MECO (1998/2001 - ERB IC-18CT98-0270). Nous remercions vivement les divers relecteurs anonymes et surtout Jean-Yves Barnagaud qui s'est fortement investi dans l'amélioration de la qualité scientifique de ce manuscrit. Nous remercions également les responsables des Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement qui nous ont toujours facilité les prospections de terrain.

RÉFÉRENCES

- ANGERMEIER, P.L. & KARR, J.R. (1994).— Biological integrity versus biological diversity as policy directives. *BioScience*, 44: 690-697.
- BARTOLDUS, C.C. (1999).— *A comprehensive review of wetland assessment procedures: A guide for wetland practitioners*. Environmental Concern, Inc., St. Michaels, Maryland.
- BIBBY, C., BURGESS, J. & HILL, D.A. (1993).— *Bird census techniques*. Academic Press, London.
- BRYCE, S.A., HUGHES, R.M. & KAUFMANN, P.R. (2002).— Development of a bird integrity index: using bird assemblages as indicators of riparian condition. *Envir. Manage.*, 30: 294-310.
- BOS, J.F.P., VAN DER GEEST, G.M., GILISSEN, N.L.M., PAHLPLATZ, R., ESSETTI I., & AYACHE, F. (1999).— *Waterbirds in the Gulf of Gabès and other wetlands in Tunisia, autumn 1999*. WIWO-Report 74, WIWO, Zeist.
- BRIGGS, S.V., LAWLER W.G. & THORNTON, S.A. (1998).— Relationships between control of water regimes in River Red Gum wetlands and abundance of waterbirds. *Corella*, 22: 47-55.
- CLARKE, K.R. & WARWICK, R.M. (2001).— *Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation*. Primer-E Ltd. Plymouth Marine Laboratory, UK.
- DARMOUL, B. (1988).— Pollution dans le golfe de Gabès (Tunisie) : bilan de six années de surveillance (1976-1981). *Bull. Inst. Nat. Scient. Tech. Océanogr. Pêche, Salammbô*, 15 : 61-84.
- DECEUNICK, B. & MAHÉO, R. (2000).— *Synthèse des dénombrements et analyse des tendances des limicoles hivernants en France 1978-1999*. LPWO/ Wetlands International-WI/LPO/DNP.
- DE CACERES, M., LEGENDRE, P. & MORETTI, M. (2010).— Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos*, 119: 1674-1684.
- DE LUCA-ABBOTT, S.B., WONG, B.S.F., PEAKALL, D.B., LAM, P.K.S., YOUNG, L., LAM, M.H.W. & RICHARDSON B.J. (2001).— Review of effects of water pollution on the breeding success of waterbirds, with particular reference to Ardeids in Hong Kong. *Ecotoxicology*, 10, 327-349.
- DE LUCA, W.V., STUDDS, C.E., ROCKWOOD, L.L. & MARRA, P.P. (2004).— Influence of land use on the integrity of marsh bird communities of Chesapeake Bay, USA. *Wetlands*, 24: 837-847.
- DISTER, E., GOMER, D., OBRDLIK, P., PETERMANN, P. & SCHNEIDER, E. (1990).— Water management and ecological perspectives of the Upper Rhine's floodplain. *Regulated Rivers : Research and Management*, 5 : 1-15.
- DUFRENE, M. & LEGENDRE, P. (1997).— Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecol. Monogr.*, 67: 345-366.
- DUNCAN, P., HEWISON, A.J.M., HOUTE, S., ROSOUX, R., TOURNEBIZE, T., DUBS, F., BUREL, F. & BRETAGNOLLE, V. (1999).— Long-term changes in agricultural practices and wildfowling in an internationally important wetland, and their effects on the guild of wintering ducks. *J. Appl. Ecol.*, 36: 11-23.
- EVERARD, M. (2008).— Selection of taxa as indicators of river and freshwater wetland quality in the UK. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.*, 18: 1052-1061.
- FENNESSY, M.S., JACOBS, A.D. & KENTULA, M.E. (2007).— An evaluation of rapid methods for assessing the ecological condition of wetlands. *Wetlands*, 27: 543-560.
- FINLAYSON, C.M. (2003).— The challenge of integrating wetland inventory assessment and monitoring. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.*, 13: 281-286.
- FURNESS, R.W. & GREENWOOD, J.J.D. (1993).— *Birds as monitors of environmental change*. Chapman and Hall, London.
- GUILLAUMONT, B., BEN MUSTAPHA, S., BEN MOUSSA, H., ZAOUALI, J., SOUSSI, N., BEN MAMOU, A. & CAIROU, C. (1995).— Pollution impact study in Gabès gulf (Tunisia) using Remote Sensing Data. *MTS Journal*, 29: 46-58.
- G.I.E.C. (2007).— *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC, Genève, Suisse.
- GOLDSCHMIT, B.V. & HAFNER, H. (1973).— Dénombrement de la sauvagine en Tunisie et dans le nord-est de l'Algérie. *Internat. Wildfowl Res. Bur. Bull.*, 35: 38-46.
- HAMDI, N. (2008).— *Écologie du peuplement des oiseaux d'eau hivernant en Tunisie : biodiversité, monographie et dynamique spatio-temporelle*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Tunis.
- HAMDI, N. & CHARFI, F. (2011).— Estimation du nombre total des oiseaux hivernants en Tunisie : Période 2001/2002 à 2006/2007. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, 66: 231-253.
- HAMDI, N. & CHARFI, F. (2012a).— Characterization of the waterbird communities wintering in Tunisian coastal lagoons. *Hydrobiologia*, 699: 111-118.
- HAMDI, N. & CHARFI, F. (2012b).— Impact des aménagements hydro-agricoles sur la valeur ornithologique du Parc National Ichkeul (Tunisie). *Alauda*, 80 : 57-64.
- HAMDI, N., CHARFI, F. & MOALI, A. (2008a).— Variation of the waterbird community relying to the Ichkeul National Park, Tunisia. *Eur. J. Wildlife Res.*, 54: 417-424.

- HAMDI, N., CHARFI, F. & MOALI, A. (2008b).— Le peuplement des oiseaux aquatiques hivernant du golfe de Gabès. *Bull. Soc. Zool. Fr.*, 133: 263-271.
- HAMDI, N., MOEZ, T. & CHARFI, F. (2011).— Diagnostic écologique du Parc National Ichkeul (Tunisie) après la construction des barrages : cas des oiseaux d'eau. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, 67: 41-62.
- HILTY, J. & MERENLENDER, A. (2000).— Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biol. Conserv.*, 92: 185-197.
- HOLLIS, T. (1992).— The causes of wetland loss and degradation in the Mediterranean. In: M. Finlayson, T. Hollis & T. Davis (eds). *Managing Mediterranean wetlands and their birds*. IWRB, Slimbridge, GB.
- HUTTO, R.L. (1998).— Using landbirds as an indicator species group. In J.M. Marzluff & R. Sallabanks (eds). *Avian conservation: Research and management*. Island Press, Washington, (D.C.).
- ISENMANN, P., GAULTIER, T., EL HILI, A., AZAFZAF, H., DLENSI, H. & SMART, M. (2005).— *Oiseaux de Tunisie / Birds of Tunisia*. Société d'Études Ornithologiques, Paris, France.
- KREMEN, C. (1992).— Assessing the indicator properties of species assemblages for natural areas monitoring. *Ecol. Applic.*, 2: 203-217.
- KREMEN, C. (1994).— Biological inventory using target taxa: a case study of the butterflies of Madagascar. *Ecol. Applic.*, 4: 407-422.
- MA, Z., CAI, Y., LI, B. & CHEN, J. (2010).— Managing wetland habitats for waterbirds: An international perspective. *Wetlands*, 30:15-27.
- NIEMI, G.J. & MCDONALD, M.E. (2004).— Application of ecological indicators. *Ann Rev. Ecol., Evol., Syst.*, 35: 89-111.
- OBERDORFF, T., PONT, D., HUGUENY, B. & CHESSEL, D. (2001).— A probabilistic model characterizing fish assemblages of French rivers: a framework for environmental assessment. *Freshw. Biol.*, 46: 399-415.
- O'CONNELL, J.T., JACKSON, L.E. & BROOKS, R.P. (2000).— Bird guilds as indicators of ecological condition in the Central Appalachians. *Ecol. Applic.*, 10: 1706-1721.
- OSIEJUK, T.S., KUCZYNSKI, L. & JERMACZEK, A. (1999).— The effects of water conditions on breeding communities of pastures, meadows and shrub habitats in the Slonsk Reserve, N-W Poland. *Biologia*, 54: 207-214.
- OWINO, A.O., OYUGI, J.O., NASIRWA, O.O. & BENNUN, L.A. (2001).— Patterns of variation in waterbird numbers on four Rift Valley lakes in Kenya, 1991-1999. *Hydrobiologia*, 458: 45-53.
- PIERSMA, T., DE GOEIJ, P. & TULP, I. (1993).— An evaluation of intertidal feeding habitats from a shorebird perspective: towards relevant comparisons between temperate and tropical mudflats. *Netherl. J. Sea Res.*, 31: 503-512.
- PIERSMA, T. & JUKEMA, J. (1990).— Budgeting the flight of a long-distance migrant : changes in nutrient reserve levels of Bar-tailed Godwits at successive spring staging sites. *Ardea*, 78: 315-337.
- ROBERTS, T.H. & O'NEIL, L.J. (1985).— Specific selection for habitat assessments. *Trans. N. A. Wildl. Nat. Res. Conf.*, 50: 352-362.
- SMART, M. (1974).— Midwinter counts in Tunisia, 1973-1974. *IWRB Bull.*, 37: 82-85.
- SMART, M. (1976).— Recensement des oiseaux d'eau en Tunisie, Janvier 1975. *Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie*, 11: 3-20.
- SECRÉTARIAT DE LA CONVENTION DE RAMSAR. (2007).— *Gestion des zones humides: Cadres pour la gestion des zones humides d'importance internationale et autres zones humides*. 3e édition, Gland, Secrétariat de la Convention de Ramsar. (Manuels Ramsar pour l'utilisation rationnelle des zones humides, vol. 16.).
- TAMISIER, A. (1995).— Ichkeul (Tunisie) : Lac et marais. In C. Morilio & J.L. Gonzalez (eds.). *Management of Mediterranean wetlands*. *MedWet*, 2: 353-363.
- TAMISIER, A. (1997).— Les oiseaux d'eau, indicateurs de changements d'habitats. Le cas de l'Ichkeul. *Actes du séminaire, gestion et conservation des zones humides tunisiennes, Sousse, Tunisie* : 91-98.
- TAMISIER, A. (2001).— Ichkeul, Tunisie. Grandeur et décadence d'une zone humide hautement protégée. *Zones humides INFO*, 32: 16-18.
- TAMISIER, A., DEHORTER, O., DELPART, B. & MAAMOURI, F. (1995).— *Étude pour la sauvegarde du lac Ichkeul : le peuplement d'oiseaux d'eau*. Gis Posidonie et BCEOM.
- WRIGHT, J.F., SUTCLIFFE, D.W. & FURSE, M.T. (2000).— *Assessing the biological quality of fresh water: RIVP-ACS and other techniques*. Ambleside, UK: Freshwater Biological Association.