

APPORT DE LA GÉOSTATISTIQUE À LA PRÉDICTION DE LA DIVERSITÉ AVIENNE DANS LE PARC NATIONAL DE GOURAYA (ALGÉRIE)

Zoubir BOUBAKER^{1*}, Mohamed BELLATRECHE¹ & Abdenour MOUSSOUNI¹

SUMMARY. — *Contribution of geostatistics to predict bird diversity in Gouraya National Park (Algeria).* — The present study emphasizes the contribution of geostatistics techniques in ornithology. We used kriging interpolation to predict avian diversity in the Gouraya National Park. The punctual index abundance method was used to census birds based on a grid network (250 m x 250 m). An exploratory analysis with the variogram has characterized the spatial variability of studied variable. The ordinary kriging was used to realize diversity map prediction which shows the spatial behaviour trend of this variable. The standard deviation map has given an assessment of the quality of the estimate. The diversity map prediction is thus an important tool for decision support directly applicable to the management and conservation of birds in Gouraya National Park.

RÉSUMÉ. — La présente étude a fait ressortir l'apport des techniques géostatistiques en ornithologie. Pour ce faire, nous avons utilisé l'interpolation par krigeage pour prédire la diversité avienne sur l'ensemble du territoire du parc national de Gouraya (Algérie). La méthode des indices ponctuels d'abondance a été utilisée pour le dénombrement des oiseaux sur la base d'un réseau à maille carrée de 250 m x 250 m. Une analyse exploratoire par le biais du variogramme a permis la modélisation du comportement spatial de la variable étudiée. Le krigeage ordinaire a été retenu pour la réalisation de la carte de prédiction de la diversité avienne. Cette carte fait apparaître les zones à forte diversité avienne. La carte des écarts-types a donné une appréciation de la qualité de l'estimation. La carte de prédiction de la diversité avienne constitue ainsi un outil important d'aide à la décision directement applicable en matière de gestion et de conservation de l'avifaune du parc national de Gouraya.

La connaissance de la distribution spatiale des espèces est essentielle pour les gestionnaires des milieux naturels afin d'identifier les priorités de conservation (habitats et espèces vulnérables) et désigner d'éventuelles aires à protéger. Au cours des dernières années, la modélisation prédictive de la répartition spatiale des espèces est devenue un outil de plus en plus utilisé pour traiter diverses questions de l'écologie, de la biogéographie, de l'évolution et, plus récemment, de la biologie de la conservation.

Toutefois, les données recueillies se caractérisent souvent par une structure et une autocorrélation spatiale. En effet, cette propriété des variables écologiques peut être observée le long d'une série chronologique (autocorrélation temporelle) ou à travers l'espace géographique (autocorrélation spatiale) (Legendre, 1993). Malheureusement, la plupart des méthodes statistiques classiques ne tiennent pas compte de cette information spatiale dans les modèles prédictifs.

¹ École nationale supérieure agronomique, El Harrach, 16010 Algérie. E-mails respectifs : Z_boubaker1@yahoo.fr ; Belatmoha@yahoo.fr & Mous.abdenour@yahoo.fr

* Auteur correspondant.

Contrairement à ces dernières, la géostatistique offre des outils pour décrire les caractéristiques spatiales des phénomènes naturels (Isaaks & Srivastava, 1989). Elle est communément définie comme l'application de la théorie « des variables régionalisées » à l'étude de données réparties dans l'espace (Journel, 1986). Elle fournit un ensemble de méthodes probabilistes pour analyser et traiter spatialement et temporellement les phénomènes présentant une structuration dans l'espace et/ou le temps (Saito *et al.*, 2005).

Après avoir vu sa naissance et son développement dans le domaine des mines, la géostatistique a fait ses preuves dans différents domaines d'application (Chauvet, 2008), notamment en sciences du sol (Goovaerts, 1998, 1999 ; Liu *et al.*, 2004), en écologie (Liebhold & Gurevitch, 2002 ; Perry *et al.*, 2002 ; Hernandez-Stefanoni & Ponce-Hernandez, 2006), en sciences de l'environnement (Bobbia *et al.*, 2003 ; Bernard-Michel, 2006) et en bathymétrie (Bello-Pineda & Hernández-Stefanoni, 2007).

En ornithologie les méthodes géostatistiques ont été appliquées pour la prédiction et la cartographie de la distribution spatiale des espèces (Rempel & Kushneriuk, 2003 ; Bretagnolle *et al.*, 2004 ; Pebesma *et al.*, 2005 ; Lin *et al.* 2008a, b ; Newson & Noble, 2008 ; Sierdsema & Van Loon, 2008 ; Walker *et al.*, 2008 ; Lieske & Bender, 2009), pour la modélisation des habitats (Bellier *et al.*, 2010) ainsi que pour l'étude du déclin des espèces migratrices (Willard & Maurer, 1996).

Certains travaux ont concerné l'étude de la structure spatiale d'espèces particulières. Amorim *et al.* (2009) se sont intéressés à l'étude de la structure spatiale de trois espèces avien-marines (le Puffin cendré, la Sterne pierregarin et la Sterne de Dougall). Le travail de Begg & Reid (1997) a porté sur la distribution spatiale du Puffin des Anglais, du Guillemot de Troil, du Petit Pingouin, du Fulmar boréal et de la Mouette tridactyle. Hengl *et al.* (2009) ont utilisé la géostatistique pour la prédiction de la distribution du Pygargue à queue blanche.

Par ailleurs, le développement parallèle des technologies de positionnement et des Systèmes d'Information Géographique a favorisé le recours aux méthodes géostatistiques notamment pour la cartographie de la biodiversité et des zones prioritaires de conservation (Scott *et al.*, 1993).

L'interpolation en géostatistique s'articule autour du krigeage. Ce dernier est une technique d'estimation linéaire qui repose sur une interpolation généralisée des moindres carrés qui permet de prédire les valeurs aux points non échantillonnés en tenant compte de la corrélation spatiale entre les points échantillonnés au voisinage, tout en minimisant la variance des erreurs d'estimation (Saito *et al.*, 2005).

Le krigeage est devenu un outil précieux dans la cartographie des modes de distribution et de la diversité des espèces (Hernandez-Stefanoni & Ponce-Hernandez, 2006). Cette dernière fournit une mesure fondamentale des communautés pour l'évaluation quantitative de la biodiversité. Elle est utilisée dans le développement des théories écologiques et est souvent appliquée dans les problèmes de conservation de la biodiversité (Dorazio *et al.*, 2006).

Il n'existe cependant aucun travail antérieur d'application de la géostatistique à l'étude de l'avifaune en Algérie. Le présent travail illustre donc les premières applications dans ce pays de la géostatistique en ornithologie notamment par l'utilisation du krigeage ordinaire dans la prédiction de la diversité avienne dans une aire protégée dans l'est de l'Algérie.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

ZONE D'ÉTUDE

L'étude a été réalisée dans le Parc National de Gouraya situé dans l'est de l'Algérie (Fig. 1) ; il s'étend sur une superficie de 2080 ha, son relief accidenté présentant des pentes généralement supérieures à 25 %.

Le climat de type méditerranéen sub-humide est caractérisé par une période sèche et chaude relativement longue (quatre mois) et une période pluvieuse s'étendant de novembre à mars. Les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 18 °C, les précipitations annuelles moyennes atteignent 800 mm.

Suite à la forte dégradation du milieu par l'homme et les incendies répétés que connaît cette région, les formations végétales présentes dans ce parc sont des matorrals de Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) avec une strate arbustive souvent dense composée essentiellement de Chêne kermès (*Quercus coccifera*), de Filaire (*Phillyrea media*), d'Olivier (*Olea europaea*), de Bruyère arborescente (*Erica arborea*) et de Lentisque (*Pistacia lentiscus*).

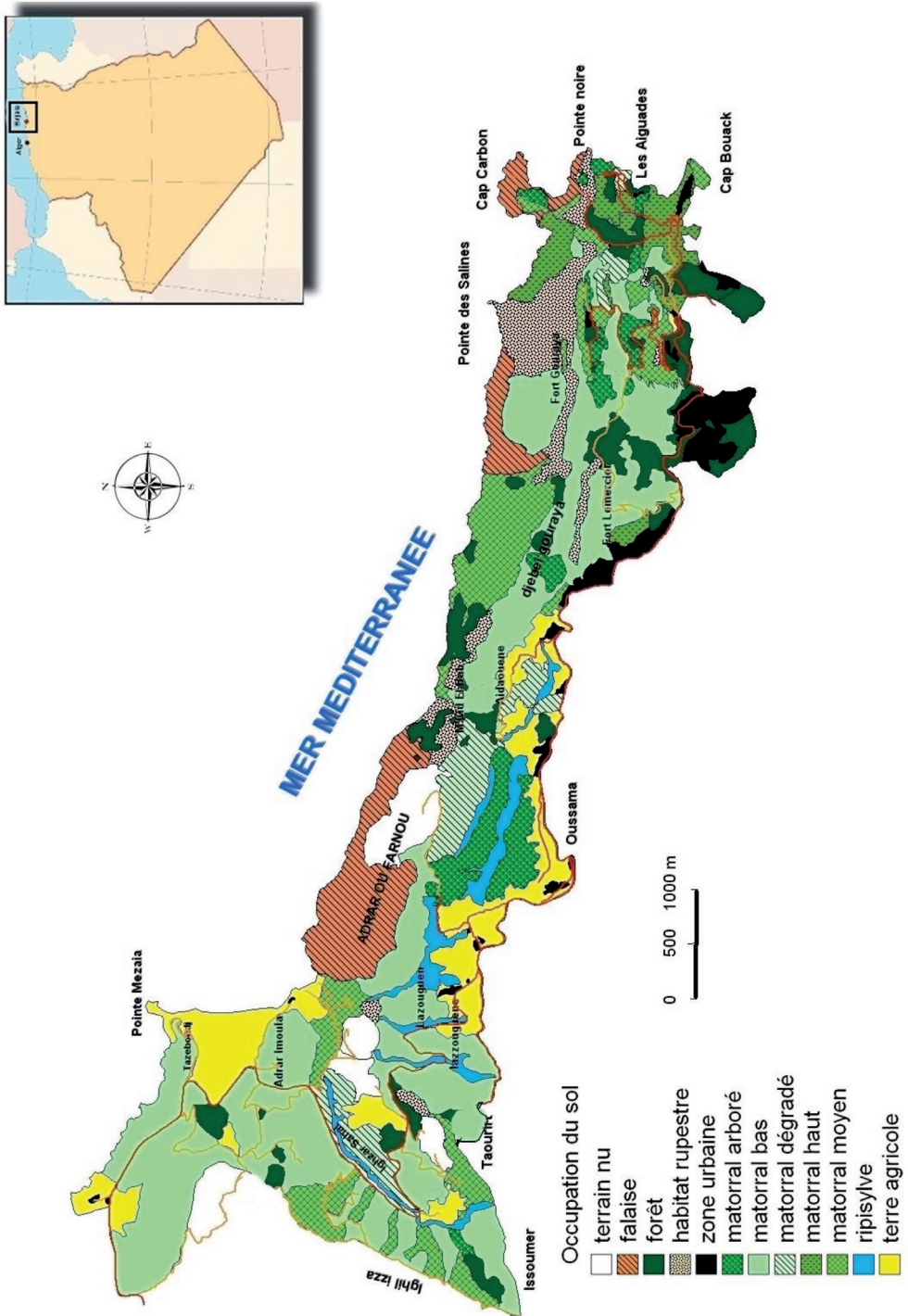


Figure 1. — Situation du Parc National de Gouraya (Algérie).

ÉCHANTILLONNAGE DE L'AVIFAUNE

La méthode utilisée pour le dénombrement avien est celle des indices ponctuels d'abondance (I.P.A.). Elle a été décrite par Blondel *et al.* (1970) puis standardisée par IBCC (1977). Cette méthode présente l'avantage d'être souple, étant donné qu'elle ne nécessite aucune préparation préalable du terrain pour faciliter l'accès, ceci lui confère le précieux avantage d'être utilisable dans les milieux morcelés et/ou accidentés (Blondel *et al.*, 1970). Elle est de ce fait la méthode la plus utilisée pour le dénombrement des oiseaux (Blondel *et al.*, 1981 ; Bibby *et al.*, 2000 ; Rosenstock *et al.*, 2002).

Deux points d'écoute d'une durée de 15 mn chacun ont été réalisés, le premier au début de la période de reproduction (mars – avril) pour détecter les nicheurs précoces, le second entre mai et juin (au même endroit) pour détecter les nicheurs tardifs. Les coordonnées géographiques des points d'écoute ont été obtenues avec un GPS « Garmin II plus ».

Nous avons effectué 233 points d'écoute répartis selon une grille à maille carrée de 250 x 250 m (Fig. 2) où le centre de chaque maille correspond au point d'écoute. Cela suppose que le rayon de détectabilité des espèces est de l'ordre de 125 m.

DIVERSITÉ AVIENNE

La diversité peut être calculée par différents indices se différenciant par la caractéristique structurale de la communauté prise en considération à savoir la richesse, la régularité ou les deux ensemble (Alatalo, 1981 ; Beisel *et al.*, 2003). Nous avons retenu pour le présent travail l'indice de Shannon–Weaver (Tramer, 1969 ; Tothmérész, 1995) :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

« pi » représente la proportion de l'espèce « i » dans un peuplement et « S » le nombre total d'espèces (la richesse totale de ce peuplement).

La diversité « H' » prend sa valeur maximale ($H'_{\max} = \log_2 S$), lorsque l'équirépartition des espèces dans le peuplement est atteinte, phénomène qui ne se réalise jamais du fait de la présence systématique d'espèces rares dans un peuplement. Il prend sa valeur minimale lorsque toutes les espèces sauf une, sont représentées par un seul individu.

Cet indice intègre trois paramètres de la structure d'un peuplement : le nombre d'espèces composant ce peuplement, la densité du peuplement, ainsi que la densité de chaque espèce (Blondel *et al.*, 1973).

NOTIONS DE GÉOSTATISTIQUE

Les techniques de la géostatistique sont adaptées à la modélisation de variables ou de phénomènes structurés dans l'espace. Ce type de variables présente en effet une continuité spatiale qui se traduit par le fait que deux mesures, effectuées en deux points distants, de la variable considérée, ont tendance à être d'autant plus semblables que les points de mesure sont proches. L'utilisation de ces techniques permet de prendre en compte la structure spatiale du phénomène étudié par l'intermédiaire du variogramme et de réaliser une carte de prédiction par le biais du krigeage.

L'utilisation du krigeage nécessite l'introduction de l'hypothèse de stationnarité qui se définit comme étant l'invariance par translation de la loi spatiale du processus. Cette hypothèse stipule que la moyenne et la variance de la variable régionalisée ne dépendent pas de la position des points mais seulement de la distance entre les points (Matheron, 1970 ; Arnaud *et al.*, 2001 ; Gratton, 2002 ; Chauvet, 2008).

Cependant, la stationnarité au sens strict est une propriété extrêmement forte, en ceci qu'elle concerne la distribution entière de la fonction aléatoire. Ainsi, la stationnarité postulée en krigeage est faible : elle ne concerne que les moments d'ordre 1 et 2 de la fonction aléatoire ou de ses accroissements. La théorie de krigeage peut être développée en postulant la stationnarité de second ordre ou la stationnarité intrinsèque (Baillargeon, 2005).

Le variogramme est l'outil de base de la géostatistique. Il est indispensable à la mise en œuvre et au choix du modèle d'interpolation par krigeage (Meylan, 1986).

À partir des données disponibles, l'estimateur $\gamma(h)$ du variogramme est alors égal à la moyenne mathématique des écarts quadratiques entre deux mesures expérimentales $[Z(x_1), Z(x_1 + h)]$, localisées en deux points distants de h :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

où $N(h)$ est le nombre de couples de points avec distance h .

Le variogramme (Fig. 3) décrit la continuité spatiale de la variable régionalisée et détermine l'importance des variations aléatoires. Il peut ou non atteindre un plateau. L'atteinte d'un plateau (variogramme borné) indique qu'à partir d'une certaine distance il n'y a plus de dépendance spatiale entre les données. Cette distance est nommée portée et la variance à laquelle le plateau se présente correspond au palier. Le variogramme peut présenter à l'origine une ordonnée non nulle, appelée effet de pépite. Cet effet de pépite est dû soit à de fortes variations locales des valeurs de la propriété, soit à des erreurs de mesures. Le comportement du variogramme peut être différent selon les directions ; on aura alors un modèle de variogramme anisotrope.

Au variogramme théorique défini par l'hypothèse intrinsèque correspond le variogramme expérimental construit à partir de données mesurées. On ajuste ensuite un modèle de variogramme à celui-ci. Il existe différents modèles d'ajustement parmi lesquels les modèles sphérique, gaussien, exponentiel, circulaire, etc. On choisira celui dont la courbe s'adapte le mieux à celle du variogramme expérimental. Cette modélisation est alors utilisée pour l'interpolation

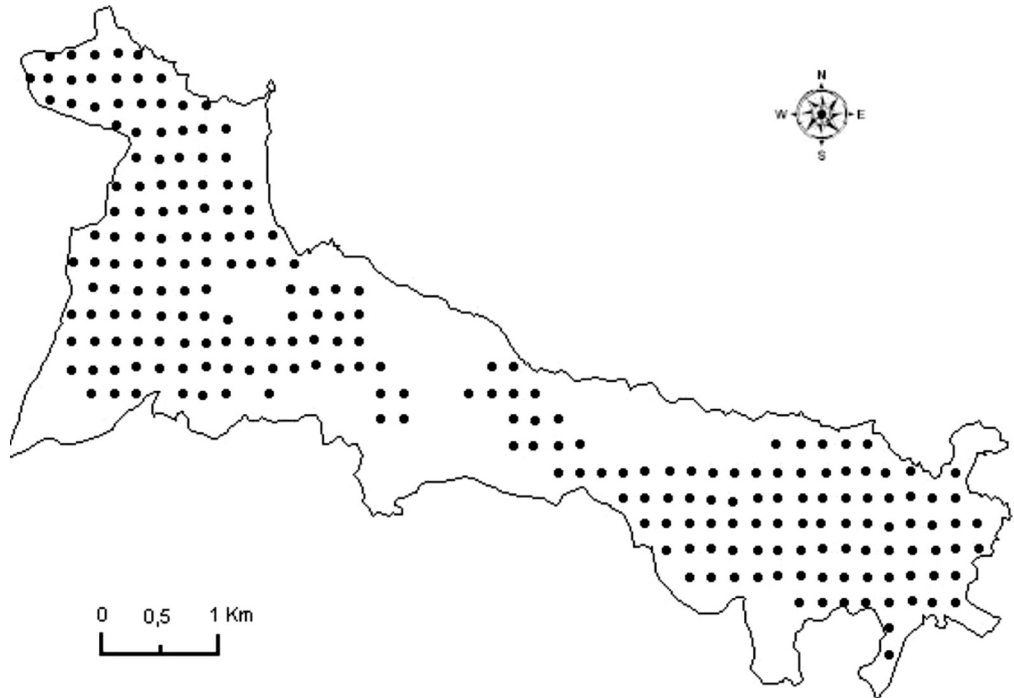


Figure 2. — Localisation des points d'écoute.

par krigeage. Le choix du modèle variographique est l'étape la plus cruciale et la plus difficile dans l'application du krigeage (Rivoirard, 1995 ; Joseph *et al.*, 2007).

Une fois les modèles de variogrammes choisis, la performance de l'interpolation est souvent testée par validation croisée ; son rôle principal est de fournir des critères statistiques de sélection entre plusieurs modèles possibles et de vérifier l'adéquation du modèle sélectionné avec les données expérimentales. La validation croisée utilisée est de type « leave-one-out ». Cette technique consiste à enlever temporairement une à une les observations des points pour ensuite les prévoir à partir des autres données. Cette opération est répétée pour tous les points. Des erreurs de validation croisée sont ensuite obtenues en soustrayant les valeurs prédites aux valeurs observées (Isaaks & Srivastava, 1989). À partir de ces erreurs sont calculées :

- La moyenne de l'erreur qui doit tendre vers « 0 », permet de vérifier si le krigeage est effectivement non biaisé.

- La variance de l'erreur qui doit être plus faible, ce qui traduit la robustesse de l'estimateur et renseigne sur la précision de l'estimation.

- La moyenne de l'erreur réduite qui doit être plus proche de « 0 », traduisant ainsi la bonne précision de l'estimateur.

- La variance de l'erreur réduite, qui doit se rapprocher de « 1 », correspond au rapport entre les variances expérimentales et théoriques du krigeage. Elle permet de vérifier que les erreurs de krigeage sont cohérentes avec la variance calculée.

Le krigeage repose sur une technique d'interpolation généralisée des moindres carrés qui permet d'estimer les valeurs à des endroits non échantillonnés en tenant compte de la corrélation spatiale entre les points estimés et échantillonnés, tout en assurant que la variance des erreurs d'estimation est minimisée (Saito *et al.*, 2005). La qualité de l'estimation dépend du nombre et de la disposition spatiale des points de mesure. Elle est d'autant meilleure qu'il y a plus de données expérimentales et lorsque les points sont disposés de manière uniforme (Delhomme & Delfiner, 1973 ; Bacher & Sauriau, 1995). Pour l'élaboration de la carte de prédiction de la diversité avienne, nous retiendrons le krigeage ordinaire. Ce dernier est moins contraignant en termes d'hypothèses de départ. En effet, il ne nécessite pas la connaissance de l'espérance de la variable régionalisée. Elle est considérée inconnue mais constante dans le voisinage du krigeage. D'autre part, le krigeage ordinaire ne requiert pas une hypothèse de stationnarité d'ordre 2, il se développe sous l'hypothèse de stationnarité intrinsèque.

Le krigeage ordinaire est une méthode qui est souvent associée à l'acronyme BLEU soit « le meilleur estimateur linéaire sans biais ». Il est « linéaire » parce que ses estimations sont des combinaisons linéaires pondérées des données disponibles ; il est « sans biais » car il essaie d'avoir la moyenne résiduelle ou l'erreur égales à 0 ; il est le meilleur « parce qu'il vise à minimiser la variance de l'erreur » (Isaaks & Srivastava, 1989).

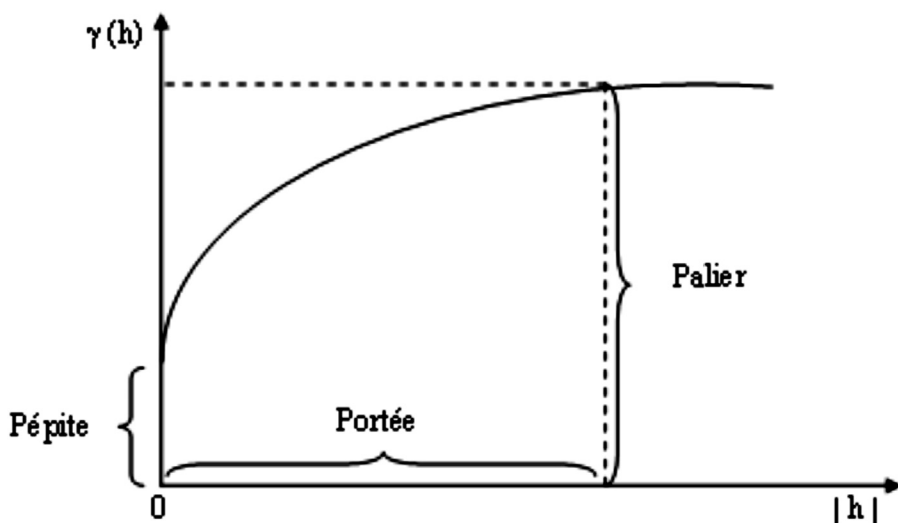


Figure 3. — Variogramme théorique borné.

Dans cette étude, toutes les étapes de krigeage ont été réalisées en utilisant le module « Geostatistical Analysis » ArcGIS 8.1.

La démarche globale en géostatistique consiste d'abord à modéliser l'autocorrélation spatiale de la variable étudiée sur la base des observations par le biais du variogramme ; ensuite après modélisation, le calcul des prédictions recherchées se fait par krigeage et aboutit à la carte de prédiction.

La normalité de la variable diversité avienne a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,0001$).

RÉSULTATS

Nous avons rencontré 47 espèces aviennes dont les abondances ont servi au calcul de la diversité.

ANALYSE VARIOGRAPHIQUE

La nuée variographique (Fig. 4) représente pour toute paire de points de données $z(x_i)$ et $z(x_i + h)$ de la variable (diversité avienne), le nuage de corrélation entre l'écart quadratique $[z(x_i + h) - z(x_i)]^2$ et la distance h entre les deux points. Ce graphe est un premier outil qui nous permet de mettre en évidence les valeurs anormales et les hétérogénéités d'échantillonnage et éventuellement les tendances spatiales de la variable. Pour chaque classe de distances on calcule la moyenne des écarts quadratiques correspondants. Pour chaque classe on obtient donc une valeur unique, l'écart quadratique moyen, et le nuage de corrélation initial sera résumé par une fonction définie pour un petit nombre de valeurs de distances. Ce qui aboutit au variogramme expérimental (Chauvet, 1992).

La diversité avienne ne semble pas présenter d'anomalie ni de valeurs extrêmes. Le variogramme expérimental a été calculé selon un pas de 250 m avec un voisinage glissant pour un nombre de voisin égal à 15.

Le calcul du variogramme expérimental pour différentes directions a décelé une anisotropie de direction Sud-Ouest – Nord-Est (Fig. 5). Elle sera prise en compte lors de l'ajustement du modèle.

Nous avons ajusté notre variogramme expérimental avec les modèles sphérique, gaussien, circulaire et exponentiel tous combinés avec un effet de pépite assez élevé (Fig. 6). Le choix du modèle à retenir pour le krigeage se fera par la validation croisée.

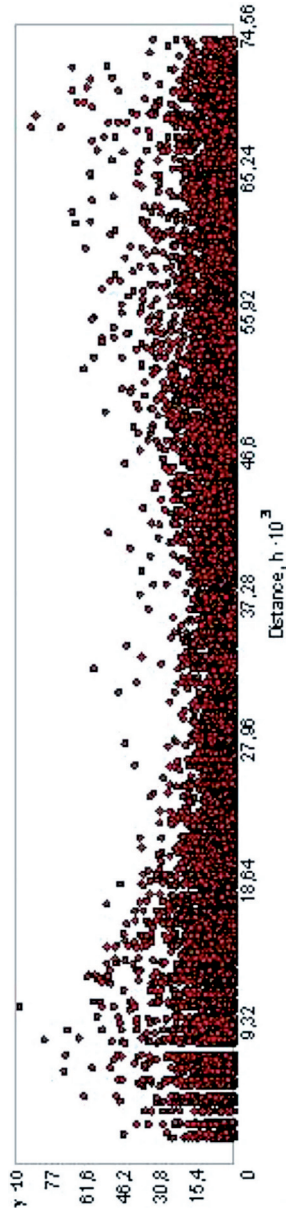


Figure 4. — Nuée variographique de la diversité avienne.

L'examen de ces modèles fait ressortir une discontinuité des variogrammes à l'origine ce qui correspond à un effet de pépité qui est dû à une microstructure spatiale non détectée par l'échantillonnage et/ou la présence d'une erreur de mesure.

Il s'agit de variogrammes bornés qui se stabilisent à partir d'une portée de 1125 m ce qui signifie qu'au-delà de cette distance la variable diversité avienne n'est plus autocorrélée spatialement.

Globalement la variance de l'erreur réduite se rapproche de 1, la précision de l'estimateur est assez bonne (Tab. I). Notre estimateur est peu biaisé car les moyennes de l'erreur tendent vers zéro.

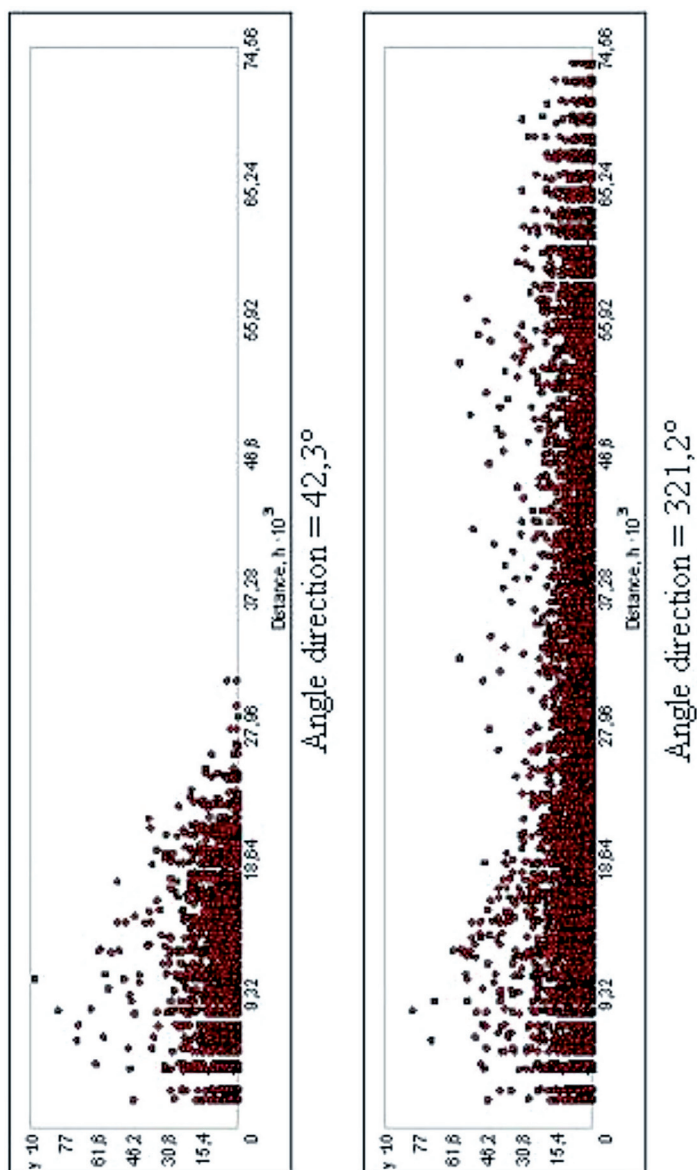


Figure 5. — Variogramme directionnel.

TABLEAU I

Comparaison des résultats statistiques de la validation croisée pour les quatre modèles de variogramme choisis

Validation croisée	Moyenne de l'erreur	Variance de l'erreur	Moyenne de l'erreur réduite	Variance de l'erreur réduite
Sphérique + pépité	0,003757	0,33907	0,005368	1
Circulaire + pépité	0,005326	0,34024	0,008116	0,98764
Exponentiel + pépité	0,005582	0,32581	0,008135	1,01003
Gaussien + pépité	0,003078	0,34621	0,004413	1,01003

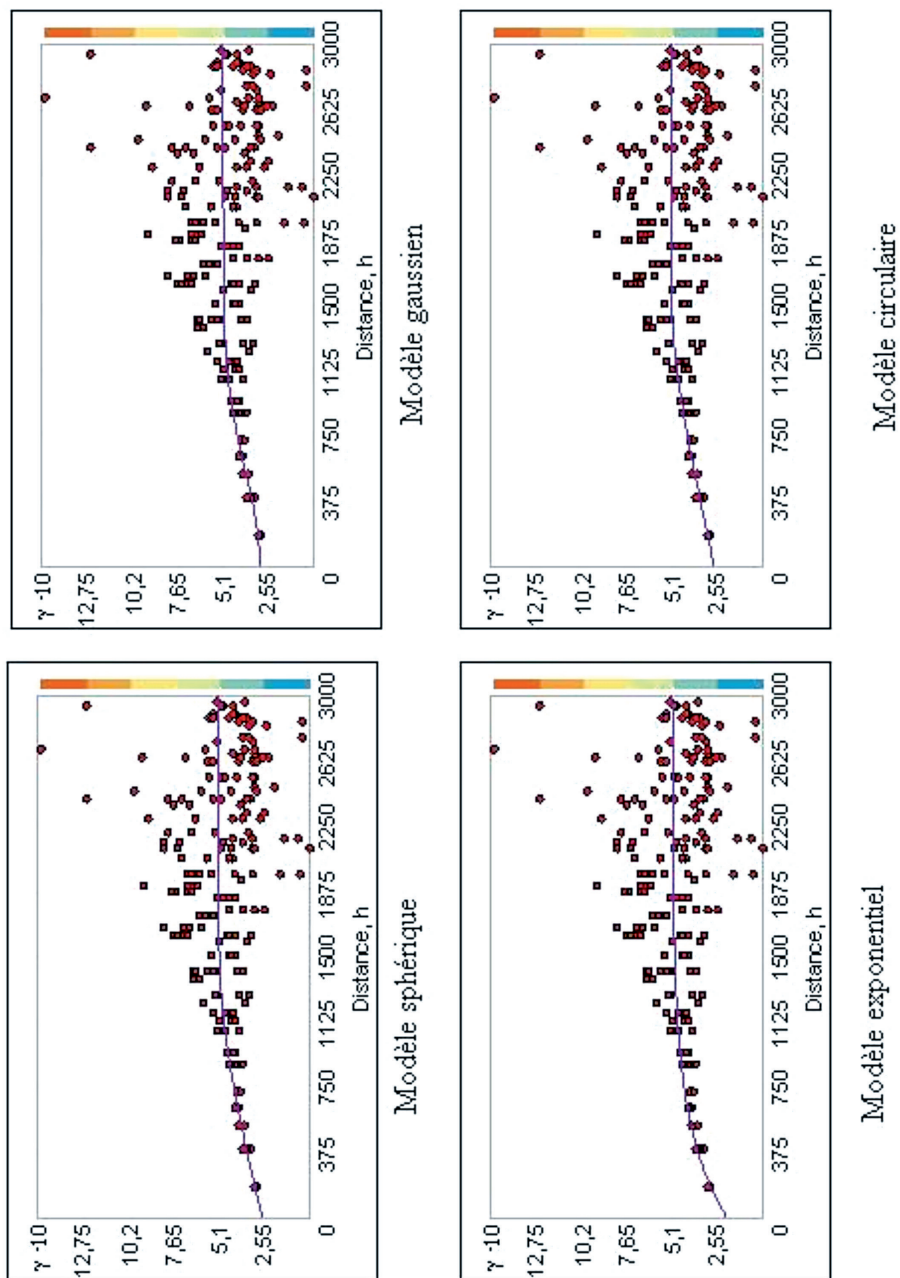


Figure 6. — Modèles d'ajustement du variogramme expérimental.

Le graphe de la validation croisée (Fig. 7) confronte les valeurs vraies de la variable (en ordonnée) et les valeurs estimées (en abscisse). On peut visualiser l'erreur en fonction de la répartition des valeurs mesurées autour de la droite de régression.

Un indicateur de la pertinence du modèle est la forme elliptique du nuage de points et sa forte densité près de cette droite (Cardenas, 2004).

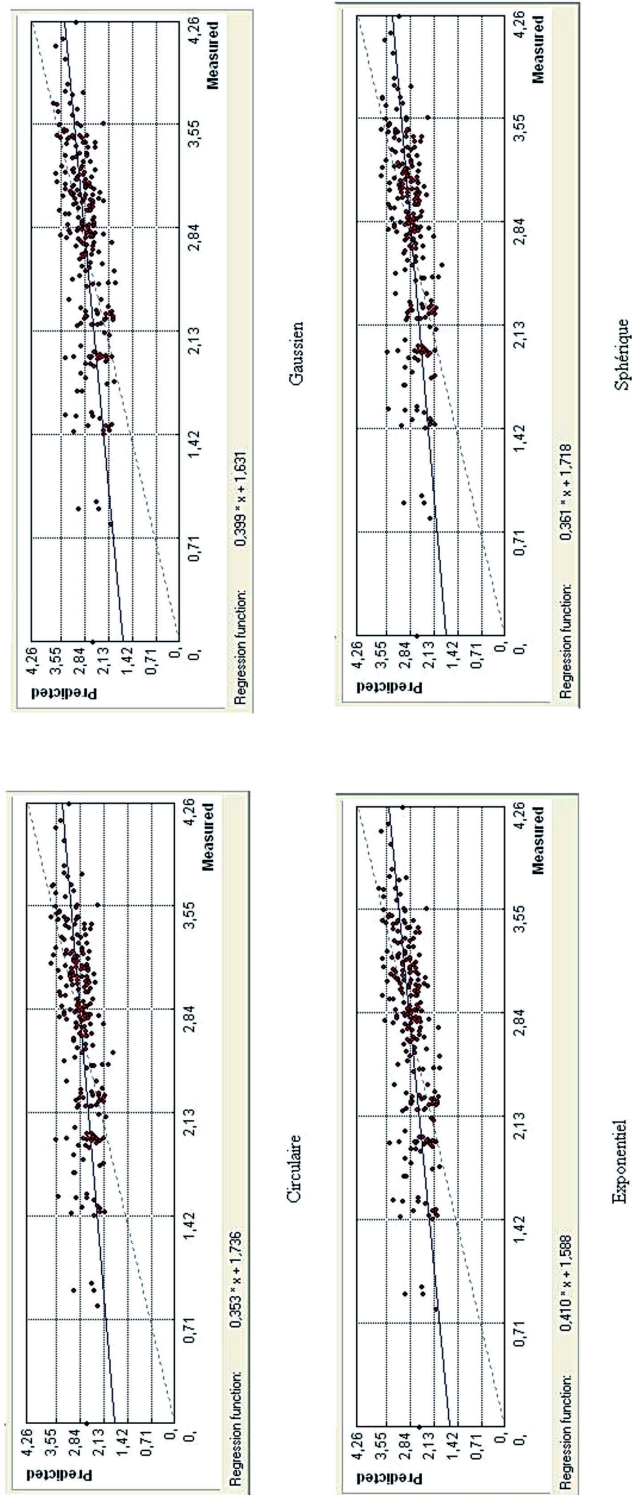


Figure 7. — Graphes de la validation croisée.

Bien que les différences entre les quatre modèles soient minimales, nous orienterons notre choix vers le modèle gaussien (composé d'un effet de pépite et d'un variogramme) qui présente la moyenne de l'erreur réduite la plus faible, attestant une bonne précision de l'estimateur. Il sera donc retenu pour l'élaboration de la carte de krigeage de la diversité avienne.

KRIGEAGE ET CARTOGRAPHIE

La carte de prédiction de la diversité avienne (Fig. 8) nous fournit un aperçu de la répartition de cette variable sur le territoire du parc. Dans l'opération du krigeage les valeurs de la diversité avienne ont été réparties en classes automatiquement. Nous pouvons remarquer sur cette carte que la diversité avienne est assez élevée dans les zones Est et Sud-Est du parc. La structure et la composition de la végétation sont sans doute le principal facteur conditionnant cette répartition.

La carte de variance de la variable interpolée permet de juger de la qualité de la fonction d'interpolation. Pour la diversité avienne, nous avons établi la carte de variance du krigeage (Fig. 9), elle représente la dispersion possible de la variable réelle et inconnue autour de la variable obtenue par krigeage. Plus la variance de krigeage est faible, plus la valeur interpolée est en moyenne près de la réalité et donc plus la carte est précise. Une forte variance d'erreur implique une incertitude plus grande et donc une estimation moins précise. La carte de la variance du krigeage de la diversité avienne montre que la prédiction de ses valeurs est peu fiable dans les zones non échantillonnées. Toutefois, la variance du krigeage dépend uniquement du modèle de variogramme et de la configuration des données dans le voisinage de krigeage. Elle ne dépend pas des valeurs numériques des données à l'intérieur du voisinage. De ce fait, la variance du krigeage ne reflète en aucun cas la variabilité locale de la diversité avienne et ne constitue pas une vraie mesure de l'incertitude locale.

DISCUSSION

Ce travail a pour objectif de présenter une analyse géostatistique, par krigeage ordinaire, de la structure spatiale de la diversité avienne dans le parc national de Gouraya (Est de l'Algérie). Une telle analyse mettra entre les mains des utilisateurs et gestionnaires un outil basé sur une méthodologie d'application des techniques géostatistiques en ornithologie.

Les outils géostatistiques utilisés dans cette étude (variogramme, krigeage ordinaire) ont contribué à une meilleure compréhension de la structure spatiale de la diversité avienne. En effet, l'analyse exploratoire, étape préliminaire en géostatistique, a permis par le biais du variogramme de décrire et de modéliser le comportement de la variable diversité avienne. Cette variable est structurée spatialement, les valeurs prises dans différents points échantillonnés sont spatialement corrélées. Toutefois, au-delà de 1125 m, valeur de la portée sur le variogramme, la diversité avienne n'est plus autocorrélée. Une anisotropie de direction Sud-Ouest – Nord-Est a été révélée. Cette dernière est probablement due à certains paramètres de l'habitat comme la structure et la composition de la végétation.

Les modèles d'ajustement du variogramme expérimental ont globalement enregistré une bonne précision de l'estimation. Cependant le modèle gaussien s'est montré le plus précis (du point de vue de la moyenne de l'erreur) et a été retenu pour l'interpolation.

La carte de prédiction de la diversité avienne qui découle de cette étude constitue un outil important pour définir les zones de forte diversité avienne et servir à la gestion et au suivi de la faune avienne dans le parc. Cette variable a montré des valeurs importantes au niveau des zones Est et Sud-Ouest du territoire du parc. Ce sont les zones où la végétation est très diversifiée et caractérisée par la présence d'une strate arborescente, alors que sur le reste du territoire, cette strate est quasiment inexistante, la végétation étant de type maquis. En effet, la présence de la strate arborescente a favorisé l'installation d'espèces aviennes inféodées à ce type de milieu telles que le Roitelet triple bandeau (*Regulus ignicapillus*), le Pouillot véloce (*Phylloscopus collybita*) et la Mésange noire (*Parus ater*) que nous n'avons rencontrés que dans cette partie du parc.

La superposition de la carte de prédiction de la diversité avienne et de la carte présentée dans la figure 1 montre que la diversité avienne est assez élevée dans les zones caractérisées

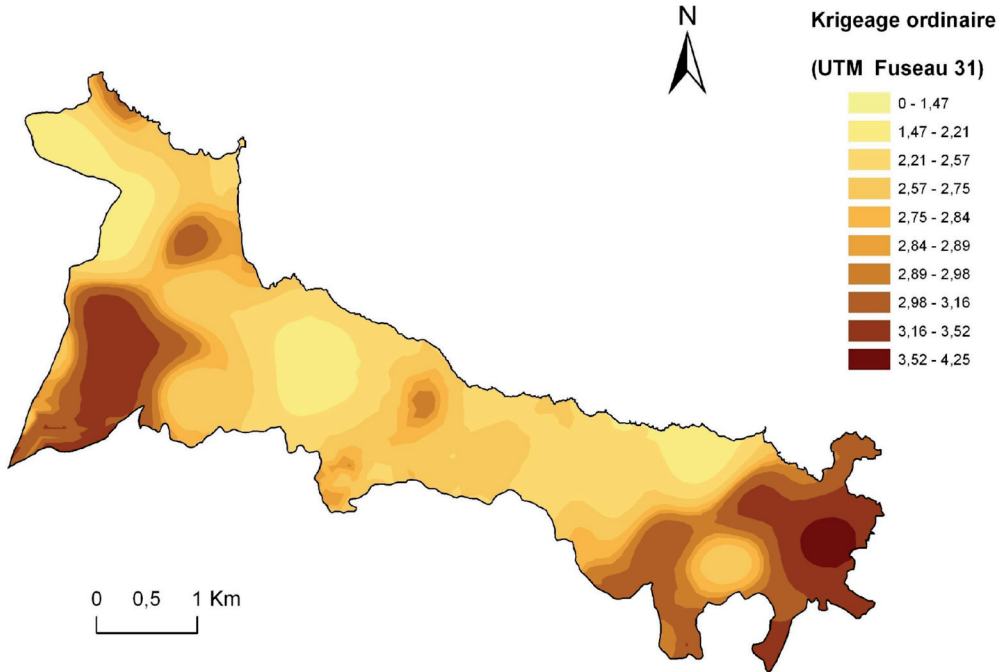


Figure 8. — Prédiction de la diversité avienne (H') dans le Parc National de Gouraya (Algérie).

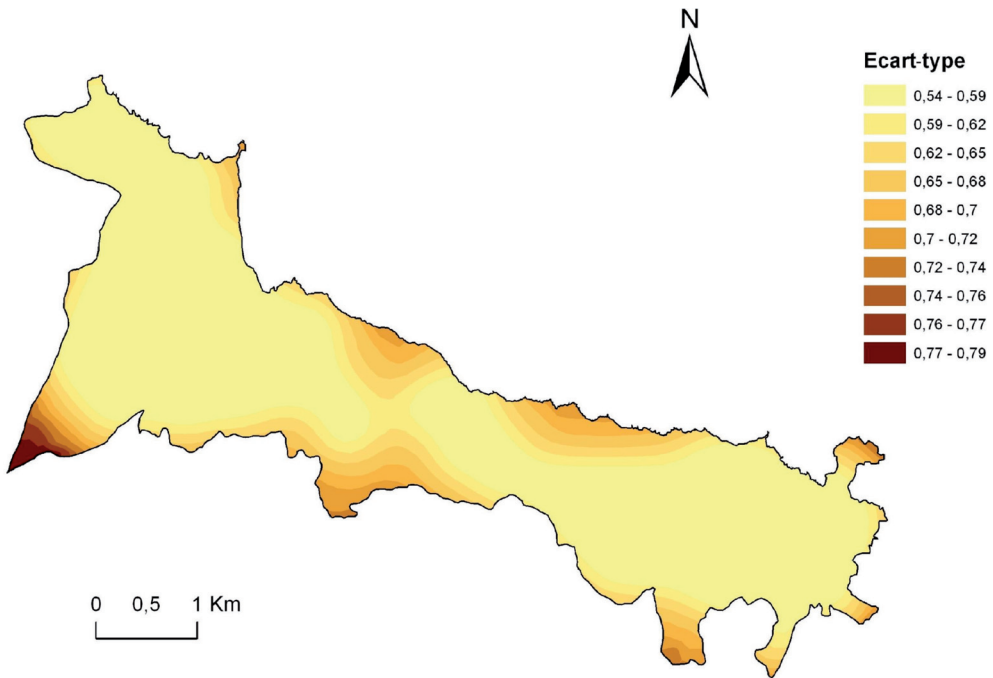


Figure 9. — Carte d'écart-type de l'erreur de krigeage de la diversité avienne (H') dans le Parc National de Gouraya (Algérie).

par une diversité d'habitats notamment avec la présence d'une végétation forestière. Ce type de milieu est caractérisé par une structure et une composition végétale importante et offre de ce fait des niches écologiques diversifiées pour l'avifaune.

L'étude des corrélations (r de Spearman) entre la diversité avienne et les paramètres de la structure de la végétation dans le même site d'étude (Boubaker & Moussouni *in prep.*) indique que la diversité avienne est significativement corrélée ($p < 0,05$) au recouvrement de la végétation et à la diversité végétale.

La structure du peuplement avien exprimée par l'indice de diversité qui intègre l'abondance et la richesse en espèces répond directement aux caractéristiques de la végétation. Elle est directement fonction de la complexité de la végétation qui peut être considérée comme la variable écologique fondamentale pour l'avifaune.

Traditionnellement, il est admis que la composition avienne (richesse et diversité) est fortement corrélée à la structure de la végétation (*e. g.* MacArthur & MacArthur, 1961 ; Blondel *et al.*, 1973). Des corrélations significatives ont été mises en évidence entre la diversité avienne et plusieurs paramètres relatifs à la végétation tels que la complexité structurale de la végétation (Rompré *et al.*, 2007 ; Thinh, 2006), la densité du feuillage (MacArthur *et al.*, 1962) et le volume végétal (Mills *et al.*, 1991).

L'hétérogénéité du milieu semble augmenter la diversité avienne en diversifiant les possibilités de nourriture et de sites de nidification. En effet, les espèces aviennes sont considérablement influencées par la structure de la végétation pour le choix de leur habitat. La végétation tient ainsi une place prépondérante dans la prédiction des habitats d'oiseaux. Plusieurs travaux ont utilisé cette composante pour prédire la distribution de l'avifaune (Mills *et al.*, 1991 ; Scott *et al.*, 1993).

Le krigeage ordinaire est une technique à développer pour prédire la répartition de l'avifaune dans les zones non échantillonnées notamment dans les terrains accidentés difficilement accessibles pour l'observateur. L'utilisation de cette méthode d'interpolation avec la méthode des indices ponctuels d'abondances qui est, elle aussi, préconisée pour les terrains morcelés, constitue un moyen efficace et approprié pour l'étude de la cartographie de l'avifaune.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude fournissent une base pour des applications intéressantes pour la prise de décision en matière de conservation de la faune avienne dans le parc national de Gouraya. En effet, une analyse exploratoire rigoureuse notamment par le biais du variogramme a permis la modélisation du comportement spatial de la variable étudiée qui a abouti à l'élaboration d'une carte de prédiction.

La carte de prédiction de la diversité avienne servira d'outil pratique pour les gestionnaires qui demandent des informations sur la répartition spatiale de la faune. Elle est aussi un document de base pour tout programme de suivi et de monitoring de l'avifaune de cette aire protégée. Néanmoins, pour qu'elle soit plus pertinente, des données supplémentaires concernant les paramètres d'habitat des espèces doivent être intégrées dans le processus de krigeage.

La démarche géostatistique décrite peut sans aucun doute être généralisée à d'autres données relatives à l'abondance et la distribution des espèces aviennes. Elle pourra servir de support à tout ornithologue ou écologue s'intéressant à l'application de la géostatistique pour la prédiction et la cartographie des espèces de faune et de flore ou toute variable écologique régionalisée.

La réalisation de telles cartes ne constitue pas un but en soi : l'interprétation écologique des distributions et des abondances des espèces doit faire l'objet d'investigations ultérieures. La superposition de ces cartes avec d'autres variables du milieu permettra d'avoir une vision plus détaillée de la distribution spatiale des espèces. Par ailleurs, la récolte de données régulièrement dans le temps permettra éventuellement de représenter spatialement les tendances des populations.

Les techniques géostatistiques sont ainsi d'un apport certain en ornithologie. Ceci se manifeste aussi bien par la modélisation de la structure spatiale de la variable étudiée (la diversité avienne) que par la réalisation d'une cartographie prédictive de cette dernière. Ces techniques mériteraient d'être davantage utilisées notamment pour la prédiction de la répartition des espèces aviennes aussi bien à l'échelle locale que nationale.

RÉFÉRENCES

- ALATALO, R.V. (1981). — Problems in the measurement of evenness in ecology. *Oikos*, 37 : 199-204.
- AMORIM, P., FIGUEIREDO, M., MACHETE, M., MORATO, T., MARTINS, A. & SERRÃO SANTOS, R. (2009). — Spatial variability of seabird distribution associated with environmental factors: a case study of marine Important Bird Areas in the Azores. *ICES J. Mar. Sci.*, 66 : 29-40.
- ARNAUD, M., EMERY, X., DE FOUQUET, C., BROUWERS, M. & FORTIER, M. (2001). — L'analyse krigéante pour le classement d'observations spatiales et multivariées. *Rev. Stat. Appl.*, 49 : 45-67.
- BACHER, C. & SAURIAU, P.G. (1995). — Structure spatiale et cartographie des peuplements benthiques du bassin de Marennes-Oléron : première approche par la méthode du krigeage. *ICES Mar. Sci. Sympos.*, 199 : 231-246.
- BAILLARGEON, S. (2005). — *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*. Mémoire de la Faculté des sciences et de génie, Université de Laval, Québec, Canada. (<http://www.theses.ulaval.ca/2005/22636/22636.pdf>).
- BEGG, G.S. & REID, J.B. (1997). — Spatial variation in seabird density at a shallow sea tidal mixing front in the Irish Sea. *ICES J. Mar. Sci.*, 54 : 552-565.
- BEISEL, J.N., USSEGLIO-POLATERA, P., BACHMANN, V. & MORETEAU, J.C. (2003). — A comparative analysis of evenness index sensitivity. *Int. Rev. Hydrobiol.*, 88 : 13-15.
- BELLIER, E., CERTAIN, G., PLANQUE, B., MONESTIEZ, P. & BRETAGNOLLE, V. (2010). — Modelling habitat selection at multiple scales with multivariate geostatistics: an application to seabirds in open sea. *Oikos*, 119 : 988-999.
- BELLO-PINEDA, J. & HERNÁNDEZ-STEFANONI, J.L. (2007). — Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Pan-Amer. J. Aquat. Sci.*, 2 : 247-254.
- BERNARD-MICHEL, C. (2006). — *Indicateurs géostatistiques de la pollution dans les cours d'eau*. Thèse de Doctorat en Géostatistique, École des Mines de Paris.
- BIBBY, C., JONES, M. & MARSDEN, S. (2000). — *Expedition field techniques: bird surveys*. BirdLife International London, U.K.
- BLONDEL, J., FERRY, C. & FROCHOT, B. (1970). — Avifaune et végétation : essai d'analyse de la diversité. *Alauda*, 31 : 63-84.
- BLONDEL, J., FERRY, C. & FROCHOT, B. (1973). — La méthode des indices ponctuels d'abondance (I.P.A.) ou des relevés d'avifaune par "stations d'écoute". *Alauda*, 38 : 55-71.
- BLONDEL, J., FERRY, C. & FROCHOT, B. (1981). — Point counts with unlimited distance. *Stud. Avian Biol.*, 6 : 414-420.
- BOBBIA, M., ROTH, C. & DERAISME, J. (2003). — Surveillance de la qualité de l'air par cartographie : l'approche géostatistique. *Géomatique Expert*, 25 : 12-16.
- BRETAGNOLLE, V., CERTAIN, G., HOUTE, S. & MÉTAIS, M. (2004). — Distribution maps and minimum abundance estimates for wintering auks in the Bay of Biscay, based on aerial surveys. *Aquat. Liv. Res.*, 17 : 353-360.
- CARDENAS, G. (2004). — *Utilisation du module « Geostatistical analyst » d'ARCVIEW dans le cadre de la qualité de l'air*. LCSQA.INERIS.
- CHAUVET, P. (1992). — *Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages*. École Nationale Supérieure des Mines, Fontainebleau.
- CHAUVET, P. (2008). — *Aide-mémoire de géostatistique linéaire*. École des Mines, Paris.
- DELHOMME, J.P. & DELFINER, P. (1973). — Application du krigeage à l'optimisation d'une campagne pluviométrique en zone aride. *Symposium on the Design of Water Resources Projects with Inadequate Data*. Vol. 1. 2 : 191-210, UNESCO. Paris.
- DORAZIO, R.M., ROYLE, J.A., SÖDERSTRÖM, B., & GLIMSKÄR, A. (2006). — Estimating species richness and accumulation by modelling species occurrence and detectability. *Ecology*, 87 : 842-854.
- GOOVAERTS, P. (1998). — Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol. Fert. Soils*, 27 : 315-334.
- GOOVAERTS, P. (1999). — Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89 : 1-45.
- GRATTON, Y. (2002). — *Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale*. Les Articles de l'Institut d'Analyse Géographique. (www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf).
- HENGL, T., SIERDSEMA, H., RADOVIC, A. & DILO, A. (2009). — Spatial prediction of species' distributions from occurrence-only records: combining point pattern analysis, ENFA and regression-kriging. *Ecol. Modell.*, 220 : 3499-3511.

- HERNANDEZ-STEFANONI, J. L. & PONCE-HERNANDEZ, R. (2006). — Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest : comparison of spatial interpolation methods. *Envir. Monit. Assess.*, 117 : 307-334.
- I.B.C.C. (1977). — Censuring breeding bird by the IPA method. *Pol. Ecol. Stud.*, 3 : 15-17.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. (1989). — *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- JOSEPH, G., CHOKMANI, K., OUARDA, T.B.M.J. & SAINT-HILAIRE, A. (2007). — Une évaluation de la robustesse de la méthode du krigeage canonique pour l'analyse régionale des débits. *Rev. Sci. de l'eau / J. Water Sci.*, 20 : 367-380.
- JOURNAL, A.G. (1986). — Geostatistics: models and tools for the earth sciences. *Math. Geol.*, 18 : 119-140.
- LEGENDRE, P. (1993). — Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm ? *Ecology*, 74 : 1659-1673.
- LIEBHOLD, A.M. & GUREVITCH, J. (2002). — Integrating the statistical analysis of spatial data in ecology. *Ecography*, 25 : 553-557.
- LIESKE, D.J. & BENDER, D.J. (2009). — Visualizing species distributions: the role of geostatistics and GIS in understanding large-scale spatial variation in breeding birds. Chapter 19 In : N. Mount, G. Harvey, P. Aplin & G. Priestnall (eds). *Representing, Modeling and Visualizing the Natural Environment*, CRC Press.
- LIN, Y.B., LIN Y.P. & FANG, W.T. (2008a). — Mapping and assessing spatial multiscale variations of birds associated with urban environments in metropolitan Taipei, Taiwan. *Envir. Monit. Assess.*, 145 : 209-226.
- LIN, Y.P., YEH, M.S., DENG, D.P. & WANG, Y.C. (2008 b). — Geostatistical approaches and optimal additional sampling schemes for spatial patterns and future sampling of bird diversity. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 17 : 175-188.
- LIU, X.M., XU, J.M., ZHANG, M.K., HUANG, J.H, SHI, J.C. & YU, X.F. (2004). — Application of geostatistics and GIS technique to characterize spatial variabilities of bioavailable micronutrients in paddy soils. *Envir. Geol.*, 46 : 189-194.
- MACARTHUR, R.H. & MACARTHUR, J. (1961). — On bird species diversity. *Ecology*, 42 : 594-598.
- MACARTHUR, R.H., MACARTHUR, J.W. & PREER, J. (1962). — On bird species diversity: II Prediction of bird census from habitat measurements. *Am. Nat.*, 96 : 167-174.
- MATHERON, G. (1970). — *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Les cahiers du centre de morphologie mathématique, Vol 5. École des Mines de Paris, Fontainebleau.
- MEYLAN, P. (1986). — Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage : application à la pluviométrie. *Hydrologie Continentale*, 1 : 25-34.
- MILLS, G.S., DUNNING, J.B. JR. & BATES, J.M. (1991). — The relationship between breeding bird density and vegetation volume. *Wilson Bull.*, 103 : 468-479.
- NEWSON, S.E. & NOBLE, D.G. (2008). — The breeding bird survey for mapping Britain's birds: A preliminary assessment of performance at two spatial scales. *Riv. Catal. Ornit.*, 24 : 107-117.
- PEBESMA, E.J., DUIN, R.N.M. & BURROUGH, P.A. (2005). — Mapping seabird densities over the North Sea: Spatially aggregated estimates and temporal changes. *Environmetrics*, 16 : 573-587.
- PERRY, J.N., LIEBHOLD, A.M., ROSENBERG, M.S., DUNGAN, J., MIRITI, M., JAKOMULSKA, A. & CITRON-POUSTY, S. (2002). — Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data. *Ecography*, 25 : 578-600.
- REMPEL, R.S. & KUSHNERIUK, R.S. (2003). — The influence of sampling scheme and interpolation method on the power to detect spatial effects of forest birds in Ontario (Canada). *Landscape Ecol.*, 18 : 741-757.
- RIVOIRARD, J. (1995). — *Concepts et méthodes de la géostatistique*. Centre de Géostatistiques, École des Mines de Paris.
- ROMPRÉ, G., ROBINSON, W.D., DESROCHERS, A. & ANGEHR, G. (2007). — Environmental correlates of avian diversity in lowland Panama rain forests. *J. Biogeogr.*, 34 : 802-815.
- ROSENSTOCK, S.S., ANDERSON, D.R., GIESEN, K.M., LEUKERING, T.A. & CARTER, M.F. (2002). — Landbird counting techniques: current practices and an alternative. *The Auk*, 119 : 46-53.
- SAITO, H., MCKENNA, S.A., ZIMMERMAN, D.A. & COBURN, T.C. (2005). — Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects: ordinary Kriging versus finite domain Kriging. *Stoch. Envir. Res. Risk Assess.*, 19 : 71-85.
- SCOTT, J.M., DAVIS, F., CSUTI, B., NOSS, R., BUTTERELD, B., GROVES, C., ANDERSON, H., CAICCO, S., D'ERCHIA, F., EDWARDS, T.C., ULLIMAN, J. & WRIHT, R.G. (1993). — Gap analysis : A geographic approach to protection of biological diversity. *Wildlife Monogr.*, N° 123.
- SIERDSEMA, H. & VAN LOON, E.E. (2008). — Filling the gaps: using count survey data to predict bird density distribution patterns and estimate population sizes. *Rev. Catal. Ornit.*, 24 : 88-99.
- THINH, V.T. (2006). — Bird species richness and diversity in relation to vegetation in Bavi National Park, Vietnam. *Ornithol. Sci.*, 5 : 121-125.
- TOTHMÉRÉSZ, B. (1995). — Comparison of different methods for diversity ordering. *J. Veget. Sci.*, 6 : 283-290.
- TRAMER, E.J. (1969). — Bird species diversity: components of Shannon's formula. *Ecology*, 50 : 627-629.
- VILLARD, M.A. & MAURER, B.A. (1996). — Geostatistics as a tool for examining hypothesized declines in migratory songbirds. *Ecology*, 77 : 59-68.
- WALKER, J.S., BALLING, R.C. JR., BRIGGS, J.M., KATTI, M., WARREN, P.S. & WENTZ, E.A. (2008). — Birds of a feather: Interpolating distribution patterns of urban birds. *Comput. Envir. Urban Syst.*, 32 : 19-28.

