Universités Paris VI - Paris VII
B3E
Faculté de Médecine Saint-Antoine
27 rue Chaligny, 75571 Paris cédex 12

DEA de Biomathématiques
Professeur Guy THOMAS
Année 1996-1997

Thierry VARRAILLON

Approche multi-agents des problèmes de dénombrement de la faune et d'estimation de la biodiversité.
Application sur la grande faune du parc national du Niokolo-Badiar, Sénégal

Phacochère

Cobe

Sous la direction de Mr. Gaston PICHON
Laboratoire d'Informatique Appliquée
ORSTOM Ile de France
32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy Cédex

H200082527
2 ex FDI
Non Num

Ø 82 FAUNE Ø2
VAR

ORSTOM
CENTRE DOCUMENTATION
Montpellier

27 FEV. 1998

F

ORSTOM Documentation
010053876

Abstract

The estimate of the size of a population is a key point as far as ecology is concerned. Working on population the size of which is unknown, it's often very difficult to prove the efficiency of the sampling methods used.

First, the simulator OBSERVER is built to recreate a discretised virtual landscape with visual obstacles representing real landscape of Niokolo-Badiar.

Second, virtual animals which are given a multi-agents behavior that enables them to interact with their environment and the observer are then placed in the simulator. The behavior of these animals tries to reproduce the real behavior of warthog and kob.

Third, an observer is moving around in this landscape, appying the line transect sampling method.

The simulating data are then processed with the DISTANCE software. A comparisons is then made between the introduced in the simulator and one estimated by the DISTANCE program.

Good results are obtained for moving or non-moving animals.The method seems to be biased neither by the fact of grouping animals together nor by an increase of the animal density in the environment. However when introducing in the system a fluing behavior that challenges the applying conditions of the method, resutls are pretty bad.

Using the multi-agents system, it may be interesting to conduct other simulations in order to correct the estimation bias and improve the numbering precision.

Key-words : Line-transect; sampling methods; multi-agents.

Sommaire

Introduction ..... (1)

Matériels et méthodes ..... (2)
1- Méthode du line-transect : (2)
1-1 Principe. (3)
1-2 Outil méthodologique (DISTANCE). (3)
1-3 Les modèles. (3)
1-4 Conditions d'application du line-transect. (4)

2- Site et populations étudiés : (4)

3- Procédure de traitement et de sélection des modèles de détection *g(x)* : (5)
3-1 Modèle simple (fonction clef). (5)
3-2 Modèle sélectionné (fonctions clefs + séries d'expansion. (5)

4- Le simulateur : (6)
4-1 Simulation du paysage. (6)
4-2 Fonctionnement de l'observateur virtuel. (6)
4-3 Visibilité et étalonnage du simulateur. (7)
4-4 Fonctionnement des animats (animaux-robots). (7)

Résultats ..... (9)
1- Vision de l'observateur virtuel : (9)
1-1 Effet de la densité en population d'animats sur la répartition des distances perpendiculaires à l'axe du transect. (10)
1-2 Influence de la proportion d'obstacles et de l'agrégation sur la répartition des distances perpendiculaires à l'axe du transect. (10)
1-3 Hétérogénéité du paysage. (12)

2- Activité animat et dénombrement : (12)
2-1 Déplacement des animats. (12)
2-2 Groupe d'animats. (13)
2-3 Fuite en multi-agents. (14)

Discussion ..... (15)

Conclusion ..... (18)

Introduction

L'estimation de la densité des populations animales et végétales est un point crucial en écologie. Elle est à la base des études de dynamique inter et intra-populations, et à l'origine de tous les grands plans de gestion de la ressource et de la conservation du patrimoine vivant.

La problématique méthodologique provient des contraintes liées aux types d'habitats des espèces et aux caractéristiques comportementales de celles-ci. Ceci est rendu d'autant plus complexe qu'il existe toujours des interactions entre le comportement des espèces et le type d'habitat. Les méthodes de dénombrement doivent par conséquent tenir compte de ces contraintes mais aussi des limites matérielles et humaines dont dispose le biologiste.

Parmi la multitude des méthodes existantes [Eberhardt, 1978], la méthode du line-transect s'impose actuellement. En effet, elle s'adapte à n'importe quel type de milieu (marin, terrestre, aérien), et est simple à mettre en œuvre (la mesure d'une distance et un angle suffisent pour recenser un animal). Sa validation apparaît donc essentielle.

Pour démontrer l'efficacité de la méthode, des expériences de validation sur le terrain ont été effectuées. Le principe est de placer au hasard dans différents types de milieu des balises en nombre connu : briques jetées aléatoirement dans le lac Huron [Bergstedt & Anderson, 1990], pancartes piquées dans des prés de hautes herbes en Utah [Laake, 1978].

Plus récemment, les estimations de densité de chevreuils en milieu forestier par la méthode du line-transect confrontées avec les estimations de la méthode capture-marquage-recapture (méthode éprouvée), semblent aussi confirmer son efficacité à condition d'avoir des effectifs suffisants [Gaillard, 1993].

Dans cette perspective, l'utilisation d'un simulateur apparaît comme un outil utile, car il permet de contrôler les paramètres d'un environnement et de les faire varier à volonté (paysage virtuel).

Celui-ci peut être vu comme un espace parsemé d'obstacles à la vision dont la distribution est maîtrisée. Un observateur virtuel se déplace dans ce paysage et applique la méthode du line-transect. Les animaux virtuels, entités informatiques, sont dotés d'un comportement multi-agents leur permettant d'interagir entre eux ainsi qu'avec le milieu.

En plaçant un nombre d'animaux virtuels connu, on pourra alors tester l'efficacité de la méthode du line-transect en fonction de la variation des différents paramètres. Dans un cadre expérimental, nous chercherons à nous rapprocher des paysages rencontrés dans le parc national du Niokolo-Badiar (Sénégal). Les animaux virtuels type chercheront à se rapprocher du comportement de deux grands mammifères africains : le phacochère et le cobe de Buffon.

Matériels et méthodes

1- Méthode du line-transect :

Plusieurs méthodes pour aborder le dénombrement de populations sont disponibles [Seber, 1973; Caughley, 1977]. Parmi elles, on peut en distinguer trois types [Eberhardt, 1978, 1981]:

- Les méthodes directes par observation unique : effort de capture, indice d'abondance ...,
- Les méthodes par observations répétées : capture-marquage-recapture ...,
- Les méthodes indirectes : aires de comptages, points d'écoutes, points-transects, line-transect ...

Aussi avant tout dénombrement, il convient de sélectionner une méthode afin de tenir compte des contraintes de faisabilité d'un point de vue biologique et matériel pour échantillonner de manière exhaustive et rapide l'environnement.

L'application du line-transect de par son ancienneté [Leopold, 1933], de par sa facilité de mise en oeuvre et de par son adaptation pour échantillonner directement la densité de populations mobiles ou immobiles, est certainement la méthode la plus utilisée pour estimer l'abondance de grands mammifères [Buckland, 1993; Gaillard, 1993; Belemsobgo, 1995, Galat & al,. 1997]. De plus une théorie statistique complète [Buckland, Anderson, Burnnham & Laake 1993] offre des outils solides d'analyse aux problèmes liés à la densité.

1-1 Principe :

Le principe du line-transect peut être résumé de la manière suivante (Fig. 1) :

Un observateur parcourt des lignes de longueur L définies au préalable pour être représentatives de la surface S à échantillonner. Il scrute de part et d'autre de la ligne de transect dans un angle de 90° afin de détecter d'éventuels animaux.

Dès qu'un animal est repéré, l'observateur note la distance r qui le sépare de l'animal et l'angle α que la ligne passant par la position de l'animal et celle de l'observateur fait avec la ligne de marche de l'observateur.

La relation trigonométrique simple $x = r \sin(\alpha)$ donne alors la distance perpendiculaire de l'animal à l'axe du transect. On peut alors estimer la largeur de bande efficace ($w.P_a$) à partir des distances perpendiculaires observées en les ajustant à des modèles de détection $g(x)$.

En effet, la densité dans l'aire parcourue ($2wL$) si l'observateur a rencontré n animaux est donnée par l'estimateur général (1)

$$\hat{D} = \frac{n}{2wL} \qquad (1)$$

Or, dans un échantillon seulement une proportion P_a des objets est détectée. Si P_a peut être estimée à partir des observations des distances perpendiculaires, alors l'estimation de la densité se ramène à la formule (2)

$$\hat{D} = \frac{n}{2wP_aL} \qquad (2)$$

A ce niveau, un formalisme sur P_a (la probabilité inconditionnelle moyenne d'observer un objet dans la zone d'étude) est introduit en (3) ou $g(x)$ représente la fonction de détection d'un objet à une distance perpendiculaire x.

$$P_a = \frac{\int_0^w g(x)dx}{w} \tag{3}$$

La densité s'exprime alors de la manière suivante (4) :

$$\hat{D} = \frac{n}{2L\int_0^w g(x)dx} \tag{4}$$

La fonction de densité de probabilité de $g(x)$ notée $f(x)$ est donnée par (5)

$$f(x) = \frac{g(x)}{\int_0^w g(x)dx} \tag{5}$$

Si on pose par hypothèse que $g(0) = 1$ la densité s'exprime alors de la manière suivante

$$\hat{D} = \frac{n \times \hat{f}(O)}{2L} \tag{6}$$

1-2 Outil méthodologique (DISTANCE) :

Les modèles de détection $g(x)$ sont analysés avec le logiciel DISTANCE [Laake &al, 1996] particulièrement adapté à l'analyse des données de la méthode du line-transect. Ce programme donne les estimations des valeurs moyennes de la densité et de largeur de bandes efficace ainsi que leur **intervalle de confiance à 95% notées entre crochets**. Il renseigne sur la valeur des paramètres d'ajustement et donne l'erreur standard de l'estimation. Il permet en plus d'avoir les valeurs d'indice de sélection : critère d'information d'Akaike (AIC) qui mesure l'entropie de la distribution des distances perpendiculaires au regard de la distribution supposée [Akaike, 1981], et $P(\chi^2)$ d'ajustement de la fonction de détection considérée aux données.

1-3 Les modèles :

Plus d'une trentaine de modèles ont étés publiés, certains n'ayant même jamais été utilisés. Dans DISTANCE, 4 modèles clefs sélectionnés pour leur critère de forme, de robustesse et d'efficacité sont utilisés (Cf. annexe 1) :

- Le modèle uniforme : $\frac{1}{w}$ (sans paramètre d'ajustement) (7)
- Le modèle demi-normal : $\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma^2}\right)$ (1 paramètre d'ajustement σ) (8)
- Le modèle hazard-rate : $1-\exp\left(-\left(\frac{y}{\sigma}\right)^{-b}\right)$ (2 paramètres d'ajustement σ,b) (9)
- Le modèle exponentielle négatif : $\exp\left(\frac{-y}{\lambda}\right)$ (1 paramètre d'ajustement λ) (10)

Des séries d'expansion peuvent y être rajoutées (séries cosinus, séries de polynômes simples ou séries de polynômes de Hermite) afin d'améliorer l'ajustement (Cf. annexe 1). Les paramètres d'ajustement supplémentaires sont notés $s(i)$ dans la suite.

La fonction de détection peut alors être définie d'une manière générale comme $g(x)$ = *modèle clef [1 + série d'expansion]*.

1-4 Conditions d'application de la méthode du line-transect :

Cinq conditions générales d'application du line-transect sont requises :

1- Tous les individus se trouvant sur l'axe de marche sont détectés.
2- L'observateur n'influe pas sur la position des animaux.
3- Les détections sont des événements indépendants.
4- Les mesures sont précises.
5- Aucun individus n'est compté plus d'une fois.

2- Site et populations étudiés :

Le complexe écologique Niokolo-Badiar, à cheval entre le Sénégal et la Guinée, forme une vaste étendue de plus de 1,5 millions d'hectares, une superficie presque égale à celle du bassin versant de la haute Gambie. Situé dans le domaine soudano-guinéen avec une pluviométrie variant entre 1000 et 1400 mm/an, le Niokolo-Badiar est traversé par environ 200 km de méandres du fleuve Gambie et par deux affluents principaux, le Niokolo-Badiar et la Koulountou.

L'essentiel de la végétation est caractérisé par des forêts sèches et par la présence de grandes graminées pérennes ou annuelles.

En 1990, trois types de paysage fondés sur le type de végétation et adaptés de Poilecot (1984) ont été définis [Galat, 1992]. On distingue principalement des savanes arborées (arbres de plus de 6 mètres de haut) puis des savanes arbustives (arbustes de moins de 6 mètres de haut) de type soudanien avec comme espèces principales *Pterocarpus erinaceus, Bombax costum, Erythrophleum africanus, Stercularia setgera et Combretum spp.* Le troisième type de paysage sont des zones de savane ouverte (vastes étendues herbacées) incluant les mares et les bowals (cuirasses latéritiques dénudées) (Cf. annexes 2).

Le Niokolo-Badiar est une région dont la flore et la faune sont extrêmement variées : 1 500 espèces de plantes, 330 espèces d'oiseaux, 36 espèces de reptiles, 20 espèces d'amphibiens, 60 espèces de poissons et 80 espèces de mammifères dont des phacochères (*Phacochoerus aethiopicus*), artiodactyles d'allure porcine, et des cobes de Buffon (*Kobus kob*) l'antilope la plus facile à voir dans le parc [Galat & al., 1996 ; Estes, 1992 ; Halthenorth,1985].

Afin de définir la taille du cheptel, des campagnes de dénombrement ont été organisées chaque année par la Direction des Parcs Nationaux du Sénégal et l'ORSTOM de 1990 à 1995 entre le 14 et 16 février. Ces dénombrements ont eu lieu de 7h15 à 11h puis de 16h à 18h45 heures auxquelles les animaux sont le plus faciles à détecter. La méthode du line-transect a été employée pour des parcours à pied et en voiture, et a permis sur un total de 21 959 km de transect (16 085 en voiture et 5 874 à pied) de rencontrer entre autres :

- 852 cobes de Buffon (677 en voiture et 175 à pied)
- 565 phacochères (392 en voiture et 173 à pied).

3- Procédure de traitement et de sélection des modèles de détection $g(x)$:

Une troncature de 10 % sur les distances x extrêmes est effectuée afin de minimiser l'effet des valeurs marginales [Buckland, 1992].

Le déroulement de l'analyse est ici explicité au travers des données pour les phacochères et les cobes de Buffon vus de voiture ou vus par les piétons sur l'ensemble des 6 années.

Cette méthode est celle qui sera employée lors de l'analyse des résultats de simulation.

3-1 Modèle simple (fonction clef) :

Une première analyse ad-hoc est effectuée. On sélectionne l'un des quatre modèles clefs sans série d'expansion suivant la ressemblance des distributions des distances perpendiculaires x observées. Ce modèle est nommé **modèle simple**.

Au vu des distributions pour les phacochères vus par les piétons, on retient un modèle simple de type exponentiel négatif (Fig. 2A). Pour les cobes de Buffon vus par les piétons un modèle simple de type Hazard-rate est sélectionné (Fig. 2B) (Les distributions pour les parcours en voiture sont les mêmes que celles à pied). Les densités estimées $\hat{D}$ alors obtenues sont :

- pour les phacochères vus de voitures : 1,05 [0,75;1,56] animaux / km²,
- pour les phacochères repères à pied : 2,52 [1,96;2,71] animaux / km²,
- pour les cobes de Buffon vus de voitures : 1,34 [1,04;1,73] animaux / km²,
- pour les cobes de Buffon vus par les piétons : 1,12 [0,84;1,50] animaux / km².

3-2 Modèle sélectionné (fonctions clefs + série d'expansion) :

Dans un deuxième temps l'analyse est lancée sans à priori sur la distribution des distances perpendiculaires x , pour tous les modèles possibles avec DISTANCE (fonctions clefs + séries d'expansion limitées à 4 paramètres).

Le meilleur modèle parmi tous ceux analysés est sélectionné comme celui qui a le plus faible indice d'Akaike (AIC). Dans le cas où les indices d'AIC sont égaux, on sélectionne le meilleur modèle sur la probabilité du χ^2 d'ajustement. Ce modèle est appelé **le modèle sélectionné**.

Les analyses complètes permettent ainsi de montrer que les modèles simples précédemment utilisés sont les mêmes que les modèles sélectionnés sauf pour les phacochères vus de voiture ou DISTANCE sélectionne comme meilleur modèle (modèle sélectionné) un modèle exponentiel négatif une série d'expansion polynomiale avec un total de 4 paramètres d'ajustement. Ceci augmente l'estimation de la densité des phacochères vus de voitures de 1,05 [0,75;1,56] animaux / km² à 1,34 [1,10;1,65] animaux / Km².

4- Le simulateur (OBSERVER) :

Le simulateur baptisé OBSERVER est écrit en C++.

4-1 Simulation du paysage :

L'espace virtuel d'observation est discrétisé suivant une grille hexagonale (ce qui permet des déplacements égaux dans les 6 directions) et dont la hauteur (h) représente 5 mètres sur un terrain réel. Cette échelle est choisie parce qu'elle constitue un bon compromis entre la surface occupée par les animaux, l'épaisseur des obstacles et la largeur de la route. Les obstacles (hexagones noirs) sont totalement opaques à la vision. Les autres hexagones (hexagones blancs) sont des surfaces perméables à la vision.

Des obstacles en proportion U sont alors répartis aléatoirement sur la surface virtuelle. Ils peuvent être plus ou moins agrégés (a) (11). Plus a est grand et plus l'agrégation des obstacles sera importante (Fig. 3).

La simulation des agrégats est réalisée par l'emploi d'un modèle binomial négatif donné sous sa forme récurrente (12), prototype des distributions contagieuses [Pichon, 1991].

$$a = -\log(\frac{1}{k}) \qquad \text{où } k \text{ est le coefficient de surdispersion.} \qquad (11)$$

$$P[taille = 0] = (1-R)^k \qquad \text{où } R = \frac{U}{U+k} \qquad (12)$$

$$P[taille = x] = P[taille = x-1] \times R \times \left(\frac{k+x-1}{x}\right)$$

4-2 Fonctionnement de l'observateur virtuel :

L'observateur se déplace suivant une ligne droite sur une longueur de 25 km (5 000 hexagones). La largeur du terrain prospecté est limitée à 250 mètres (50 hexagones) et il ne perçoit qu'un coté du transect. Tout se passe alors comme s'il se déplaçait sur des bandes indépendantes de largeur de 50 hexagones et d'une longueur de 5 000 hexagones (condition d'application du line-transect 3).

Son champ de vision est restreint par la présence d'obstacles totalement opaques derrière lesquels se forment des zones d'ombre, à l'image d'une source lumineuse dont le foyer serait l'oeil de l'observateur virtuel (Fig. 3). Un hexagone est visible par l'observateur s'il peut voir plus de la moitié de sa surface.

Lorsque l'observateur se trouve sur un obstacle on considère qu'il voit tous les hexagones en face de lui jusqu'à l'obstacle le plus proche (condition 1).

L'observateur virtuel se déplaçant dans cet environnement applique le protocole de comptage de la méthode du line-transect pour les animats (animaux-robots) qui se trouvent dans son champ de vision. Un animat est vu et compté si l'hexagone sur lequel il se trouve est visible. La distance perpendiculaire exacte est alors relevée (condition 4), si c'est la première fois que l'animat est vu (condition 5).

Enfin l'efficacité de vision de l'observateur qui représente la proportion d'animats que l'observateur virtuel a pu dénombrer par rapport au nombre présent dans un rayon de 250 mètres durant son trajet est évaluée à la fin de son parcours.

4-3 Visibilité et étalonnage du simulateur :

Pour que les simulations de visibilité soient suffisamment réalistes nous avons effectué des relevés de visibilité dans le parc national du Niokolo-Badiar pour 5 kilomètres de route dans chacun des 3 types de paysage que nous avons identifiés. Pour chaque paysage nous avons relevé tous les 100 mètres la distance maximum à laquelle on repère distinctement un objet à travers la végétation à 45 (d_{obs45}) et 90 (d_{obs90}) degrés de la ligne de marche à l'aide d'un télémètre.

La même opération peut alors être effectuée avec l'observateur simulé pour des paysages simulés en faisant varier les valeurs de U et a. La distance pour repérer un objet distinctement, correspond au premier obstacle qui obstrue sa vision à 45 (d_{sim45}) et 90 (d_{sim90}) degrés de sa ligne de marche.

Les distances moyennes de visibilités à 45 et 90 degrés ($\hat{d}$) sont calculées. On peut alors avoir l'image simulée du paysage en cherchant les valeurs de U et a pour lesquelles les distances moyennes de visibilité sont proches des distances observées en cherchant à minimiser l'*Erreur* comme la somme des valeurs absolues des écarts entre distances moyennes de visibilité observées et simulées (13) :

$$Erreur = \left|\hat{d}_{obs45} - \hat{d}_{sim45}\right| + \left|\hat{d}_{obs90} - \hat{d}_{sim90}\right| \qquad (13)$$

4-4 Fonctionnement des animats (animaux-robots):

Les animats sont considérés comme des agents (objets informatique) pouvant effectuer 3 types d'activités :

- Une activité de repos : l'animat reste sur sa position (au centre de l'hexagone).

- Une activité de déplacement brownien : l'animat se déplace aléatoirement sur l'un des hexagones adjacents (l'animat se déplace d'un hexagone lorsque l'observateur se déplace d'un hexagone).

- Une activité de fuite : l'animat s'éloigne perpendiculairement de l'axe du transect lorsqu'il perçoit l'observateur à une certaine distance (l'animat se déplace d'un hexagone lorsque l'observateur se déplace d'un hexagone). Cette distance est appelée distance de fuite (cette distance représente une distance de repérage visuelle, olfactive ou auditive et on considère qu'elle n'est pas gênée pas la présence d'obstacle).

On autorise alors chaque animat à accomplir un certain nombre de ces activités. Si un animat est autorisé à accomplir une activité de déplacement ou de repos il sélectionne alors aléatoirement l'une des deux activités. Lorsque une activité de fuite est autorisée pour un animat, celui ci l'effectue uniquement s'il perçoit l'observateur et toutes les autres activités autorisées sont alors effacées de sa mémoire.

Le fonctionnement multi-agents, permet de simuler d'une manière plus fine le comportement des animats dans le but de se rapprocher au mieux du comportement grégaire

des phacochères ou des cobes de Buffon. Nous nous limiterons au cas d'une fuite de groupe. La taille du groupe est fixée à 6 animats / groupes.

Les animats (des objets informatiques) sont rattachés à un groupe (classe d'objets) à l'intérieur duquel ils peuvent se communiquer des messages [Ferber, 1995]. Le centre du groupe est considéré comme le barycentre des positions des animats rattachés au groupe.

L'activité instantanée du groupe est définie par l'activité qui prédomine pour l'ensemble des animats qui y appartiennent.

Pour chaque animat du groupe on attribue un coefficient d'indépendance (qui varie de 1 à 0) qui définit la probabilité de copier son activité sur l'activité instantanée du groupe. L'activité générale d'un animat à l'intérieur d'un groupe est résumé sur le schéma. I..

Au groupe est associée une distance d'éloignement maximale à partir du centre du groupe. Si la distance entre la position du centre du groupe et celle d'un animat dépendant est supérieure à la distance d'éloignement, alors l'animat se met en déplacement vers le centre de son groupe en communiquant au groupe l'activité qu'il aurait voulu effectuer (Sch. I).

Par définition un animat solitaire a un coefficient d'indépendance de 1, un animat grégaire a un coefficient d'indépendance de 0 et un animat mixte a un coefficient d'indépendance de 0,5.

Résultats

1- Vision de l'observateur virtuel :

Sur le parc 3 types de paysages sont distingués (Cf. annexe 2) : savane arborée, savane arbustive, savane ouverte. Les distances moyennes de visibilité maximale ($\hat{d}$) à 45 et 90 degrés par rapport à la ligne de transect figurent sur le tableau I.

Tableau I : Distances de visibilité moyennes à 45 et 90 degrés de l'axe du transect pour les 3 types de paysage et leur correspondance dans le monde virtuel.

	Distances moyennes Observées		Distances moyennes simulées		
Angle de vue	45 °	90 °	45 °	90 °	Paramètres de simulation sélectionnés
(V1) Savane arborée *(1)	46 ± 10	47 ± 9	48 ± 9	48 ± 8	$U = 10, a = 0$
(V2) Savane arbustive *(1)	32 ± 10	30± 11	33 ± 5	34.8 ± 7	$U = 30, a = 2$
(V3) Savane ouverte *(1)	135 ± 9	88 ± 10	122 ± 21	78 ± 20	$U = 30, a = 4$

*(1) : Distances en mètres ± erreur standard

Le protocole d'évaluation de la distance de visibilité employé sur le terrain est reproduit sur le simulateur. Des parcours simulés de 100 kilomètres sont alors effectués en faisant varier la proportion en obstacles U de 10 à 40 % et l'agrégation de ceux ci de $a = 0$ à 4.

Le choix du terrain simulé est alors effectué en choisissant pour les différents paysages simulés l'erreur absolue minimale entre les distances observées ($\hat{d}_{obs}$) et les distances simulées ($\hat{d}_{sim}$) pour 45 et 90 degrés, puis par une visualisation à posteriori des terrains simulés (Cf. annexes 2). Pour la suite les paramètres de simulation seront codés V1 pour la savane arborée, V2 pour la savane arbustive, V3 pour la savane ouverte (Tab. I).

1-1- Effet de la densité en population d'animats sur la répartition des distances perpendiculaires à la ligne de transect :

Pour juger de l'importance de la densité de la population d'animats sur la distribution des distances perpendiculaires (x), des simulations sont effectuées en plaçant aléatoirement des animats solitaires non groupés au repos dans le milieu avec des densités connues croissantes (D = 0,5; 2 et 5 animats par hectare). Des séries de simulations de 4 parcours de longueur L = 25 km pour un paysage V1 sont réalisées.

- *Modèle simple* : Dans un premier temps, l'ajustement des fonctions de répartition $g(x,D)$ au modèle exponentiel négatif (modèle simple) est choisi suivant la forme des distributions des effectifs simulés (Fig. 4).

- **Sur les 4 parcours de 25 km** : les densités d'animats estimées pour les 4 séries de simulations de 25 km montrent une bonne homogénéité des estimations (pour D = 2 animats / hectare; $\hat{D}_1$ = 1,9 avec un intervalle de confiance à 95% de [1,75;2,21], $\hat{D}_2$ = 2,04 [1,85;2,24], $\hat{D}_3$ = 2,21 [1,89;2,56], $\hat{D}_4$ = 2,1 [1,86;2,28]). Les effectifs des 4 séries sont alors regroupés pour travailler sur une distance de parcours totale de 100 km.

- **Sur l'ensemble des 100 km :** les densités d'animats estimées à partir du modèle simple sont proches des densités simulées pour les 3 classes. L'intervalle de confiance recouvre dans tous les cas la densité simulée (Tab. II).

Quelque soit la densité d'animats simulée, l'estimation des largeurs de bandes efficaces sont proches de 97 mètres (Tab. II) et la proportion d'animats vue par l'observateur par rapport aux animats qui se trouvaient dans un rayon de 250 mètres (efficacité de vision) varie peu autour de la valeur moyenne 0,46 (Tab. II).

Tableau II : Estimation de la largeur de bande efficace et de la densité par ajustement au **modèle simple (exponentiel négatif)** et au **modèle sélectionné (exponentiel négatif + cosinus)** en fonction de la densité d'animats solitaires au repos simulés pour V1 pour un parcours de L = 4 x 25 km.

Densité simulée (D) *(1)		0.5	2	10
Largeur de bande efficace estimée *(2)	Modèle simple	97 [89;108]	95 [86;106]	98 [91;105]
	Modèle sélectionné	127 [124;138]	128 [119;135]	131 [120;143]
Densités estimées ($\hat{D}$) *(3)	Modèle simple	0,53 [0,42;0,66]	2,19 [1,87;2,34]	10,04 [8,93;11,24]
	Modèle sélectionné	0,48 [0,40;0,59]	2,04 [1,81;2,19]	9,87 [8,78;11,.14]
Efficacité de vision *(4)		0,46± 0,04	0,45± 0,03	0,48± 0,03

Les effectifs (n) des 3 simulations sont respectivement de 598, 2340, 12480.
*(1) : Nombre d'animats par hectare.
*(2) : En mètres, l'intervalle de confiance est donné pour 95%.
*(3) : Nombre d'animats par hectare, l'intervalle de confiance est donné pour 95%.
*(4) : Nombre d'animats comptés une fois par rapport au nombre d'animats qui se trouvaient dans un rayon de 250 mètres autour de l'observateur ± l'erreur standard.

- *Modèle sélectionné :* Le meilleur modèle qui est retenu (modèle sélectionné) par DISTANCE est dans tous les cas le modèle exponentiel négatif associé à une série d'expansion cosinus (Fig. 4). Celui ci donne des estimations de largeur de bande efficace légèrement plus grande que pour le modèle simple (Tab. II).

Bien que les densités estimées en animats soient plus faibles, elles restent proches de celles obtenues avec le modèle simple (Tab. II). La différence d'indice AIC entre le modèle simple et le modèle sélectionné est faible et se situe entre 1,2 points d'indice AIC (lorsque la densité en animats est de 0,5) et 2,8 (lorsque la densité est de 10).

1-2 Influence de la proportion d'obstacle U et de l'agrégation en obstacle a :

Pour évaluer l'influence de la densité en obstacles sur la distribution des distances perpendiculaires x, on fait varier U de 10 à 40 % en fixant l'agrégation a = 0 pour 100 km de transect (4 séries de simulations sur L = 25 km). La densité d'animats D est fixée à 2 par hectare. Les animats sont solitaires, non groupés, et leur comportement est au repos. Ils sont répartis aléatoirement sur l'ensemble du paysage.

Puis en fixant U = 30 % on fait varier l'agrégation a de 0 à 4 pour juger de influence de l'agrégation des obstacles.

- *Modèle simple :* A partir de la forme des distributions simulées, le choix du modèle simple se porte sur le modèle exponentiel négatif (Fig. 5A & 5B).

D'une manière générale, on constate que plus la densité en obstacles est importante (U = 40 %) ou plus l'agrégation est faible (a = 0), plus la probabilité d'observer un animat éloigné est faible et plus la probabilité de le voir proche est importante (Fig. 5A, 5B).

Tableau III : Estimation de la largeur de bande efficace et de la densité par ajustement au modèle simple (exponentiel négatif) en fonction de la proportion d'obstacle U pour a = 0. D = 2 animats solitaires au repos par hectare. L = 4 x 25 km.

Proportion d'obstacles	20 %	30 %	40 %
Largeur de bande efficace estimée *(2)	40 [32;28]	22 [18;28]	16 [12;23]
Densité estimée *(3)	1.89 [1,76;2,28]	2.11 [1,76;2,38]	2.05 [1,81;2,25]
Efficacité de vision *(4)	0,15 ± 0,03	0,08 ± 0,04	0,05± 0,03

Les effectifs (n) des 3 simulations sont respectivement de 780, 416, 260.
* : Cf. Tab. II

- **Lorsque la proportion d'obstacle** U dans un paysage sans agrégation (a =0) augmente, la largeur de bande efficace réduit dans le même temps (95 mètres pour U = 10 % (savane arborée) à 16 mètres pour U = 40 %) tout comme l'efficacité de vision de l'observateur (0,45 pour U = 10 % à 0,08 pour U = 40 %) (Tab. II et III).

Les densités estimées restent proches de la densité simulée.

Tableau IV : Estimation de la largeur de bande efficace et de la densité par ajustement au modèle simple (exponentiel négatif) en fonction de l'agrégation a pour U = 30 %. D = 2 animats solitaires au repos par hectare. L = 4 x 25 km.

Agrégation	1	2 (V2)	3	4 (V3)
Largeur de bande efficace estimée *(2)	31 [27;34]	46 [42;53]	78 [78;88]	115 [105;126]
Densité estimée *(3)	2,18 [1,84;2,39]	2,13 [1,66;2,37]	2,35 [2,15;2,57]	2,44 [2,18;2,62]
Efficacité de vision *(4)	0,12 ± 0,03	0,18 ± 0,04	0,34 ± 0,04	0,37± 0,05

Les effectifs (n) des 4 simulations sont respectivement de 624, 936, 1738, 1924.
* : Cf. Tab. II

- **Lorsque l'agrégation augmente** pour U fixée à 30 %, la largeur de bande efficace augmente (22 mètres pour a = 0 en passant à 46 mètres pour a =2 (savane arbustive) et 115 mètres pour a = 4 (savane ouverte)) (Tab. III & IV). Les estimations de la densité ont tendance à être surestimées lorsque l'agrégation augmente. L'efficacité de vision augmente lorsque le paysage est de plus en plus agrégé passant de 0,08 pour a = 0 à 0,37 pour a = 4 (Tab. III et IV).

- *Modèles sélectionnés :* L'analyse effectuée avec les modèles sélectionnés confirme le choix d'un modèle exponentiel négatif. Dans la majorité des cas DISTANCE sélectionne ce modèle en y associant une série d'expansion de cosinus qui donnent des estimations très proches de celles simulées (l'intervalle de confiance comprenant la densité simulée).

1-3 Hétérogénéité du paysage :

Dans le parc du Niokolo-Badiar, rares sont les cas où les transects parcourus sont homogènes en types de paysage. En effet, les zones de savane arborée, savane arbustives et savane ouverte alternent. Pour répondre à ce problème, 3 parcours de 25 km pour les trois types de paysage du Niokolo-Badiar ont été regroupés en considérant des animats fixes dont la densité est de 2 par hectare. La densité estimée par DISTANCE à été de 2,02 animats par hectare. L'hétérogénéité des paysages parcourus lors d'un transect ne biaise pas l'estimation de la densité.

2- Activité animat et dénombrement :

2-1 Déplacement des animats :

Afin d'étudier l'influence du déplacement des animats sur la répartition des distances perpendiculaires on fait varier la proportion d'obstacle U puis l'agrégation a en fixant la densité d'animats à 2 par hectare. Ils sont en déplacement, sont solitaires et sont répartis aléatoirement sur l'ensemble des paysages simulés.

2-1-1 Déplacement des animats fonction de la densité d'obstacle :

En fixant $a = 0$ et en faisant varier U de 10 à 30 %, la répartition des distances passe d'une forme épaulée (Fig. 6A) à une distribution sans épaulement pour $U = 30$ %(Fig. 6B).

- *Le choix du modèle simple* se porte sur un modèle demi-normal pour U =10 % vers un modèle exponentiel négatif pour $U = 30$ %. (Fig. 6A & 6B). L'effet de l'augmentation de la proportion d'obstacle dans ce cas réduit la largeur de bande efficace et donne une estimation correcte de la densité simulée (Tab. V).

Tableau V : Estimation de la largeur de bande efficace et de la densité par ajustement au modèle simple en fonction du type de paysage pour $D = 2$ animats en déplacement par hectare. $L = 4 \times 25$ km.

Paysage	U =10%, a = 0 Savane arborée	U =30%, a = 0	U =30%, a =2 Savane arbustive	U =30%, a =4 Savane ouverte
Modèle simple *(1)	Demi-normal	Exponentiel négatif	Demi-normal	Demi-normal
Largeur de bande efficace estimée *(2)	131 [123;141]	22 [18;26]	102 [93;111]	141 [126;159]
Densité estimée *(3)	1,89 [1,55;2,26]	1,87 [1,50;2,34]	1,78 [1,48;2,14]	2.24 [1,73;2,63]
Efficacité de vision *(4)	0,51 ± 0,13	0,08 ± 0,07	0,26 ± 0,09	0,44 ± 0,11

Les effectifs (n) des 4 simulations sont respectivement de 3016, 416, 1352, 2288.
* : Cf. Tab. II

- *Le modèle sélectionné* par DISTANCE pour la savane arborée (V1) est un modèle uniforme + cosinus et diffère du modèle simple supposé (modèle demi-normal). Cependant la densité estimée pour le modèle sélectionné (1,91 animats / hectare [1,66;2,24]) est peu différente de celle estimée par le modèle simple (Tab. V). La sélection entre le modèle sélectionné et le modèle simple se faisant sur la comparaison d'indice AIC très proches (respectivement de 31015,3 contre 31002,8).

L'efficacité de vision de l'observateur pour la savane arborée avec des animats solitaires en déplacement est plus grande qu'avec des animats solitaires au repos (efficacité de vision pour des animats solitaires au repos est de 0,45 contre 0,51 avec des animats en déplacement (Tab. II & V)).

Le modèle sélectionné par DISTANCE est le même pour U =30 % et a = 2 que le modèle simple (modèle exponentiel négatif). L'efficacité de vision de l'observateur, dans le cas de ce paysage est pratiquement la même avec des animats au repos ou en déplacement (Tab. III & V).

2-1-2 Effet du déplacement en fonction de l'agrégation :

En fixant U = 30 % et en augmentant l'agrégation a de 0 à 4, on constate que les distributions des distances perpendiculaires reprennent une forme présentant un épaulement pour des distances proches de l'axe du transect (Fig. 6B).

- *Les modèles simples* retenus pour cette évolution passent du modèle exponentiel négatif pour a = 0 à un modèle demi-normal pour a = 2 (savane arbustive) et a = 4 (savane ouverte). L'effet de l'augmentation de l'agrégation augmente la largeur de bande efficace. Les densités estimées sont proches de la densité simulée (Tab. V). L'efficacité de vision de l'observateur est plus grande que dans le cas ou les animats sont au repos (Tab. IV & V).

- *Modèles sélectionnés :* Le choix du modèle demi-normal comme modèle simple est confirmé pour a = 2 (savane arbustive) par le modèle sélectionné.

Par contre dans le cas ou a = 4 (savane ouverte) le modèle sélectionné (uniforme + cosinus, AIC = 5040) diffère du modèle simple (demi-normal, AIC = 5042), mais donne une estimation de la densité très proche de la densité simulée.

2-2 Groupe d'animats :

Les groupes sont initialement répartis aléatoirement sur un paysage simulé de savane arborée (V1). Les animats distribués aléatoirement sur la surface du groupe, ont tous un coefficient d'indépendance de 0 (il n'y a pas de leader). Les animats de ce groupe sont autorisés a se déplacer, s'éloigner d'un rayon de plus de 30 mètres du barycentre formé par les animats du groupe auquel ils appartiennent. La densité globale est maintenue à 2 animats en déplacement par hectare.

- *Modèle simple et sélectionné :* Au vu de la distribution des distances perpendiculaires x (Fig. 7), un modèle demi-normal est pris comme modèle simple (c'est aussi celui sélectionné par DISTANCE). Remarquons que la distribution des distances perpendiculaires est moins lisse que dans le cas où les animats ne sont pas en groupe (Fig. 6A).

L'estimation de la densité est alors de 1,88 animats / hectare [1,07;3,73]. L'estimation est donc proche de celle obtenue lorsque les animats ne sont pas en groupe (Cf. Tab. V). Cependant, l'intervalle de confiance est plus grand que dans le cas où les animats ne sont pas en groupe.

2-3 Fuite en multi-agents :

On considère des groupes de 6 animats, pour lesquels la distance de fuite est fixée à 30 mètres. Le rayon d'éloignement est de 30 mètres. Les groupes sont répartis initialement aléatoirement sur un paysage de savane arborée (V1). Trois séries de simulations pour une longueur totale de transect de 100 km (4 x 25 km) sont alors effectuées avec des groupes de G1 : (tous les animats sont solitaires), des groupes G2 : (un animat est solitaire (le leader), les 5 autres sont mixtes) et pour des groupes des G3 : (un animat solitaire et les 5 autres sont grégaires).

D'une manière générale la distribution des distances perpendiculaires x simulées montre un mode décentré par rapport à l'axe du transect (Fig. 8). Les effectifs simulés augmentent rapidement à partir de l'axe du transect, vers un optimal pour une distance perpendiculaire au transect d (d = 70 mètres pour le groupe d'animats mixtes G2), puis les effectifs diminuent plus lentement suivant une forme exponentielle jusqu'à 250 mètres.

Plus le taux d'indépendance du groupe est faible, et plus l'épaulement se rapproche alors de la ligne de transect.

- *Les modèles sélectionnés* par DISTANCE sont des modèles hazard-rate quel que soit le type de groupe. L'estimation des densités est sous-estimée dans tous les cas. La sous estimation est d'autant plus importante que le taux d'animats indépendants dans le groupe est fort (D = 1,09 animats / hectare [0,93;1,51] pour les G1; 1,22 [1,08;1,37] pour les G2; 1,56 [1,39;1,75] pour le G3). La largeur de bande efficace suit cette même évolution (170 mètres [157;183], 161 [152;171], 133 [124;143] pour les G1, G2 et G3).

Discussion

L'environnement de simulation :

La simulation d'un environnement réel doit répondre à un critère de représentativité maximum tout en simplifiant le nombre des paramètres. C'est dans cet esprit que nos choix sont discutés.

Des obstacles à la vision d'un rayon de 5 mètres (termitières, fourrés denses) ne sont qu'exceptionnellement rencontrés sur le parc du Niokolo-Badiar. L'encombrement à la vision est plutôt dû à une succession de troncs, de branchages, de taillis ou de hautes herbes dont l'échelle est beaucoup plus petite que celle simulée.

Des simulations complémentaires ont toutefois été réalisées en faisant varier l'échelle des hexagones pour 10 et 2,5 mètres afin de voir si cela avait une influence. Elles ne montrent pas de variations sur la forme des distributions des distances perpendiculaires ni de biais sur l'estimation de la densité des animats dénombrés. Aussi l'échelle de 5 mètres est un bon compromis entre la taille des obstacles, des animaux et de la route, cela pour un temps de simulation raisonnable.

Un moyen plus efficace peut consister à réduire seulement la taille des obstacles, ce que notre nouveau programme permettrait.

L'étalonnage du simulateur est un point essentiel, car il est à la base de la représentativité du paysage du parc du Nikolo-Badiar. Une méthode simple est d'évaluer des distances maximales de visibilité suivant différents angles sur un parcours traversant un type de paysage caractéristique. Le protocole reproduit sur le simulateur en faisant varier la proportion d'obstacles et leur agrégation. La comparaison des distances de visibilité simulées et observées permettent par la suite de discriminer les valeurs qui représentent au mieux le paysage considéré.

Nos hypothèses à la base de ce travail, sur la façon de représenter les paysages rencontrés dans le parc du Niokolo-Badiar, répondent par conséquent aux impératifs de simplicité et de représentativité maximum.

*Influence de la **densité d'animats** sur la méthode du line-transect :*

Notre intérêt s'est porté sur l'effet de la densité d'animats sur l'efficacité des estimations fournies par DISTANCE. Pour un paysage de savane arborée et pour 3 classes de densité, les estimations de la densité se sont révélées proches des densités simulées. Le programme a permis de dégager un modèle simple sur la distribution des distances perpendiculaires simulées : un modèle exponentiel négatif, indépendant de la densité. La largeur de bande efficace et la proportion d'animats sont restées constantes pour les différentes valeurs densités envisagées.

*Influence de la **proportion d'obstacles** :*

Nous avons constaté que la proportion des obstacles dans le paysage en considérant des animats au repos, n'influe pas sur l'efficacité de l'estimation de la densité, cela dans des limites de 0 à 40 % d'obstacles. Il n'est pas intéressant de travailler au-delà de 40 %, car

l'encombrement n'aura alors plus rien à voir avec une réalité rencontrée sur le parc. Un modèle simple a été ajusté aux distributions des distances perpendiculaires. Ce modèle de type exponentiel négatif traduit une diminution de l'efficacité de vision de l'observateur lorsque la distance augmente. Ce modèle de distribution apparaît d'autant plus cohérent que lorsque l'on augmente la proportion d'obstacles dans le milieu, la distribution se ramasse sur la ligne de transect. Ceci, confirme l'idée triviale qui consiste à penser que la distance moyenne à laquelle peut voir un observateur diminue en proportion constante lorsque l'encombrement en obstacles augmente. Le nombre d'animats que l'observateur doit dénombrer dans un rayon de 250 mètres diminue par conséquent.

L'analyse avec DISTANCE des distributions des distances perpendiculaires que l'on simule donne une estimation proche de la densité simulée. De plus, lorsque l'on augmente la proportion d'obstacles la largeur de bande efficace estimée par le programme diminue. La proportion d'animats dénombrés suit cette diminution.

*Influence de **l'agrégation des obstacles** :*

Nous avons pu montrer que l'agrégation croissante des obstacles (typiquement le cas de la savane arbustive et de la savane ouverte) a tendance à "épauler" la distribution. L'ajout d'une série d'expansion de type cosinus sur une fonction simple de type exponentielle négative permet de modéliser au mieux cette distribution. Les estimations des densités alors données par DISTANCE sont proches des densités simulées. Lorsque l'agrégation augmente, la largeur de bande efficace augmente ainsi que la proportion d'animats que voit l'observateur.

*Influence du **déplacement des animats** :*

La distribution des distances perpendiculaires, lorsque les animats sont en déplacements montre clairement que celles-ci prennent une forme "'épaulée" prés de l'axe du transect lorsque l'encombrement en obstacle est faible (savane arborée, savane ouverte). Le modèle simple retenu dans ce cas est un modèle demi-normal. Par contre, lorsque l'encombrement du paysage augmente (savane arbustive) les distributions s'ajustent à un modèle simple : exponentiel négatif.

Les animats en se déplacent diminuent leur probabilité d'être repérés, ceci d'autant plus que l'encombrement du paysage est important. Si bien que lorsque le paysage est totalement bouché l'effet du déplacement est masqué par les obstacles. Notons que dans la nature, il est cependant souvent plus facile de distinguer un animal en mouvement qu'un animal au repos (Guibe harnaché), du fait de leur camouflage naturel.

*Influence de **l'agrégation des animats** :*

Les résultats obtenus avec des groupes totalement grégaires de 6 animats sont comparables à ceux obtenus lorsque les animats ne sont pas groupés. Ces résultats ont permis de montrer que lorsque les animats sont agrégés l'estimation de la densité n'est pas biaisée mais sa variance augmente.

*Influence d'un **comportement de fuite en groupe** :*

Enfin des simulations multi-agents permettant de décrire des comportements, de fuite en groupe avec interactions entre les animats et l'observateur, créent une distribution des distances perpendiculaires de type gaussienne décalée de l'axe du transect. Le mode de la

distribution est d'autant plus décalée de l'axe du transect que les animats du groupe ont un coefficient d'indépendance élevé. En effet, un animat qui a un coefficient d'indépendance élevé se détache plus facilement de son groupe et a une probabilité plus faible d'être vu près de la ligne de transect. A l'inverse, un animat qui a un coefficient d'indépendance faible privilégie fortement l'attachement à son groupe sur sa propre fuite.

Pour ces cas, DISTANCE n'est pas applicable. Les estimations conduisent à une sous estimation de la densité en animat. Les faibles effectifs sur l'intervalle entre l'axe du transect et le mode des distributions simulées en est la cause.

Certes, la fuite constitue une entorse importante à l'une des conditions d'application du line-transect : l'indépendance de l'observateur sur la position des animats. De plus elle n'a pas apporté une explication supplémentaire à la distribution des cobes de Buffon et des phacochères. Cependant il semblerait délicat écarter ce type de distribution parce qu'elle est rencontrée dans le parc du Niokolo-Badiar pour les chacals [Galat, 1992].

Conclusion

Peu d'études ont été menées afin d'évaluer l'influence de la non visibilité liée à la couverture végétale et autres obstacles visuels sur l'efficacité de la méthode de dénombrement du line-transect. De plus, rares sont les expériences qui entrevoient montrer la relation entre le comportement des animaux et leur virilité. Pourtant, la détection des animaux repose par principe sur des observations visuelles.

L'utilisation du simulateur OBSERVER dont la non visibilité a été étalonnée sur le terrain au Nikolo-Badiar, à permis de mieux cerner l'impact de l'encombrement visuel et du comportement des animaux sur leur dénombrement.

Des modèles simples sur la distribution des fréquences de détection ont été mis en évidence. Ainsi, un modèle exponentiel négatif s'avère représentatif d'une distribution ou les animaux sont au repos et répartis au hasard, et un modèle demi-normal peut décrire une situation où les animaux se déplacent.

L'influence de l'encombrement en obstacles sur ces modèles a pu être défini. Lorsque la proportion d'obstacles augmente, la fréquence d'observer un animal près de la ligne de transect augmente et celle de le voir plus loin diminue. Lorsque l'agrégation des obstacles augmente, la fréquence d'observer un animal près de la ligne de transect diminue et celle de le voir plus loin augmente.

La densité estimée avec le logiciel DISTANCE sur les données de simulation est correcte. Elle est souvent rendue meilleure lorsque l'on ajoute une série d'expansion. Cet outil est donc validé, dans le cadre des simulations réalisées avec des animaux fixes ou mobiles pour des paysages représentatifs du Niokolo-Badiar. D'autres études devront confirmer son efficacité pour d'autres types de milieux.

Les simulations ont aussi permis de vérifier que la méthode du line-transect reste valable quelque soit la variation de densité en animaux simulés. Elles ont aussi montré que l'estimation de la densité n'est pas biaisée lorsque l'agrégativité des animaux augmente.

La simulation multi-agents semble être une voie intéressante pour décrire des comportements plus complexes. Ils doivent être étendus, et des relations inter groupes (prédation, compétition,...) pourrons être imaginées.

Pour le Nikolo-Badiar, les comportements ont été limités à des fuites en groupe qui sont des situations fréquemment rencontrées lors des dénombrements. Dans ce cas, les modèles implémentés dans DISTANCE donnent une sous-estimation de la densité et ne fournissent pas un ajustement correct. Le comportement de fuite mettant en cause une des conditions d'application du line-transect, supposant l'indépendance entre observateur et observations, peut en être la cause.

D'autres situations mettant en cause les conditions d'application du line-transect peuvent se révéler intéressantes afin d'expliquer les distributions observées dans la nature, d'en donner une explication, et de corriger le biais d'estimations en vue d'un meilleur dénombrement.

Bibliographie

AKAIKE H. (1981) -*Likehood of model and information criteria* - *J. Of Econometrics* 16(3) : 3-14.

BELEMSOBGO, U. (1995) - *Estimation de la densité dans une savane Soudanienne : approche spatiale des données issues du line transect. Rapport technique de D.E.A.*, 40 pp.

BOUSQUET, B. (1984) - *Méthodes et techniques de dénombrement des ongulés sauvages en savane. E.N.G.R.E.F.*, 124pp.

BUCKLAND, S.T., ANDERSON, D.R. & LAAKE, J.L. (1993) - *Distance sampling. Estimation abundance of biological populations. Chapman & Hall.* 446 pp.

BURNHAM, K.P, ANDERSON, D.R. & LAAKE, J.L. (1979) - *Robust estimation from line transect data. Journal of wild life management.* 43, 992-996

BURNHAM, K.P, ANDERSON, D.R. & LAAKE, J.L. (1980) - *Estimation of density from line transect sampling of biologie populations Journal of wild life management.* 43, 992-996

CAUGHLEY, G. (1977) - *Analysis of vertebrate populations. John Wiley & Sons.* 234 pp.

ERBERHARDT, L.L. (1978) - *Transect methods for population studies. J. Wildl. Manage.* 43, 768-774.

ERBERHARDT, L.L. (1981) -*Comments on transect methodology. In : Miller, F.L. & Gunn, A. (Eds), Symposium on census and inventory methods for populations and habitat :* 17-39.

ESTES, R.D. (1992) - *The behavior guide to african mammals. Chicago university press.* 611pp.

FERBERT, J. (1995) - *Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective. Inter édition.* 231pp.

GAILLARD, J.M., BOUTIN, J.M. & VAN LAERE, G. (1993) - *Dénombrer les populations de chevreuils par l'utilisation du line transect. Etude de faisabilité. Rev. Ecologie (Terre et vie).* 48, 1, 73-85.

GALAT, G., BENOIT, M., PICHON, G. (1992) - *Dénombrement de la grande faune du parc national du Niokolo Koba, Sénégal, 1990-1991. ORSTOM.* 58pp.

GALAT, G., PICHON, G., GALAT, A. (1997) - *Densité, effectifs, répartition géographique et évolution annuelle 1990-1995 des populations diurnes de quinze espèces de mammifères et oiseau du parc Niokolo Koba, Sénégal. ORSTOM.* 60pp.

HALTENORTH, T., DILLIER, H. (1985) - *Mammifères d'Afrique et de madagascar. Delachaux et Niestlé.* 397 pp.

LAAKE J.L., BUCKLAND S.T., ANDERSON D.R. & BURNHAM K.P. (1996) - *Distance user's guide V 2.2.* 84pp.

LAVIEREN, L.P., BOSCH, M.I. (1977) - *Evaluation des densités de grands mammifères dans le parc national de Bouba Ndjida, Cameroun. La terre et la vie.* 31, 3-32.

LEOPOLD, A. (1933) - *Game management. Chas. Scribner's Sons, New York.*

PICHON, G., PRODHON, J. (1991) - *Filarioses : surdispersion parasitaire et surinfection de l'hôte invertébré. Cahier O.R.S.T.O.M.* 17, 1, 27-47.

SEBER G.A.F. (1973) - *The estimation of animal abundance and related parameters.of the 2 international of simulation of adaptative behaviour.* 2, 502-510.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Gaston Pichon et toute l'équipe du LIA, pour l'accueil chaleureux et sympathique qui ont largement contribué au bon déroulement de mon stage.

Un grand merci à Anh et Gérard Galat pour l'ouverture et la connaissance qu'ils m'ont apporté du paysage africain, et sans qui la validation du simulateur n'aurait pas été rendue possible. Mes sincères remerciements vont également à la Direction des Parcs Nationaux du Sénégal pour m'avoir accueilli au Niokolo-Badiar, et pour m'avoir permis de contribuer à ma manière à la conservation de la richesse vivante.

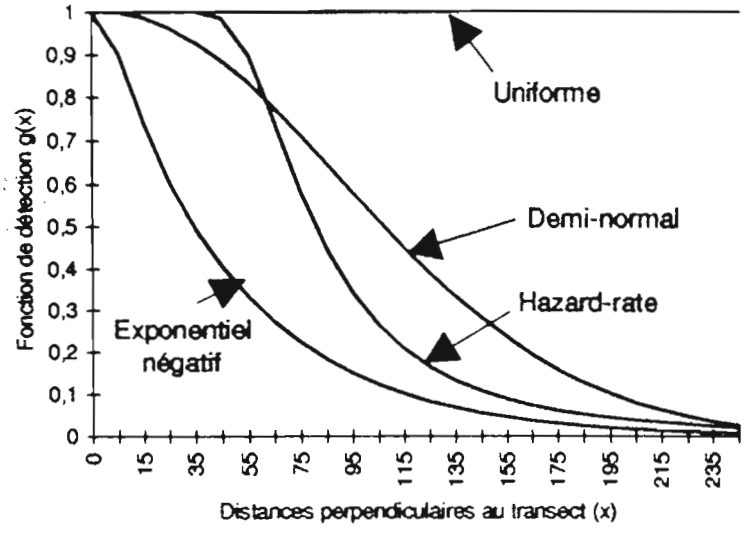
Annexe 1

(Modèles d'ajustements utilisés)

Plusieurs modèles de $g(x)$ sont recommandés dans l'analyse de données du line-transect. Les modèles implémentés dans DISTANCE répondent à trois propriétés essentielles : la forme, la robustesse et l'efficacité. Les modèles employés se conceptualise en deux étapes.

Après une troncature des données (qui souvent nécessite une étude à elle seule sur l'influence des estimations de la densité), la sélection doit se faire suivant la visualisation des données à un modèle clef (Key function) qui est soit un modèle uniforme, un modèle Demi-normal, un modèle hazard-rate ou un modèle exponentiel négatif (Fig. A)

Modèles clefs utilisés pour ajuster les données de distance.



Dans la majorité des cas une fonction simple suffit. La fonction uniforme n'a pas de paramètre, la fonction demi-normal et exponentiel négative ont un paramètre et la fonction Hazard rate a deux paramètres.

Cependant une seconde forme qui ajoute de la flexibilité aux modèles peut être combinée avec les 4 précédents modèles appelés séries d'expansion (séries expansion). Elles sont utiles pour ajuster la fonction clef au plus près des observations et utilisent au plus un ou deux paramètres supplémentaires. Les séries d'expansion utilisées dans distances sont, une série de cosinus (1), un polynôme simple (2), ou un polynôme de Hermite (3) [Stuart and Ord]. Ces trois expansions sont linéaires pour leurs paramètres.

L : Longueur du transect.

$$\sum_{j=1}^{m} a_j \cos\left(\frac{j\Pi x}{w}\right) \qquad (1)$$

k = le nombre de transect échantillonnés.

$$\sum_{j=1}^{m} a_j \left(\frac{x}{w}\right)^{2j} \qquad (2)$$

li = La longueur du transect i.

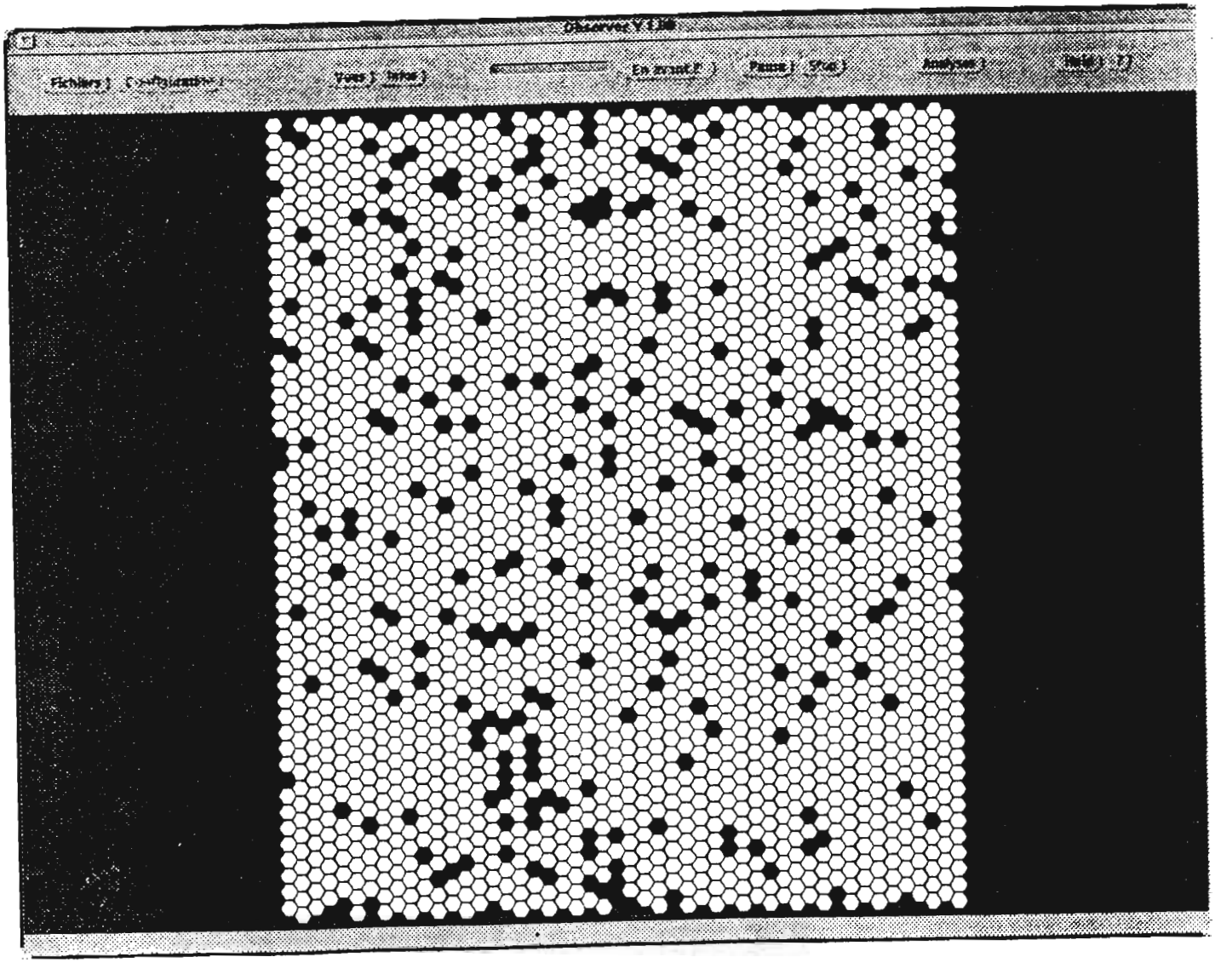
ni = le nombre d'observations du transect i

$$\sum_{j=1}^{m} a_j H_{2j}(y_s) \qquad (3)$$

N = Le nombre total d'observation.

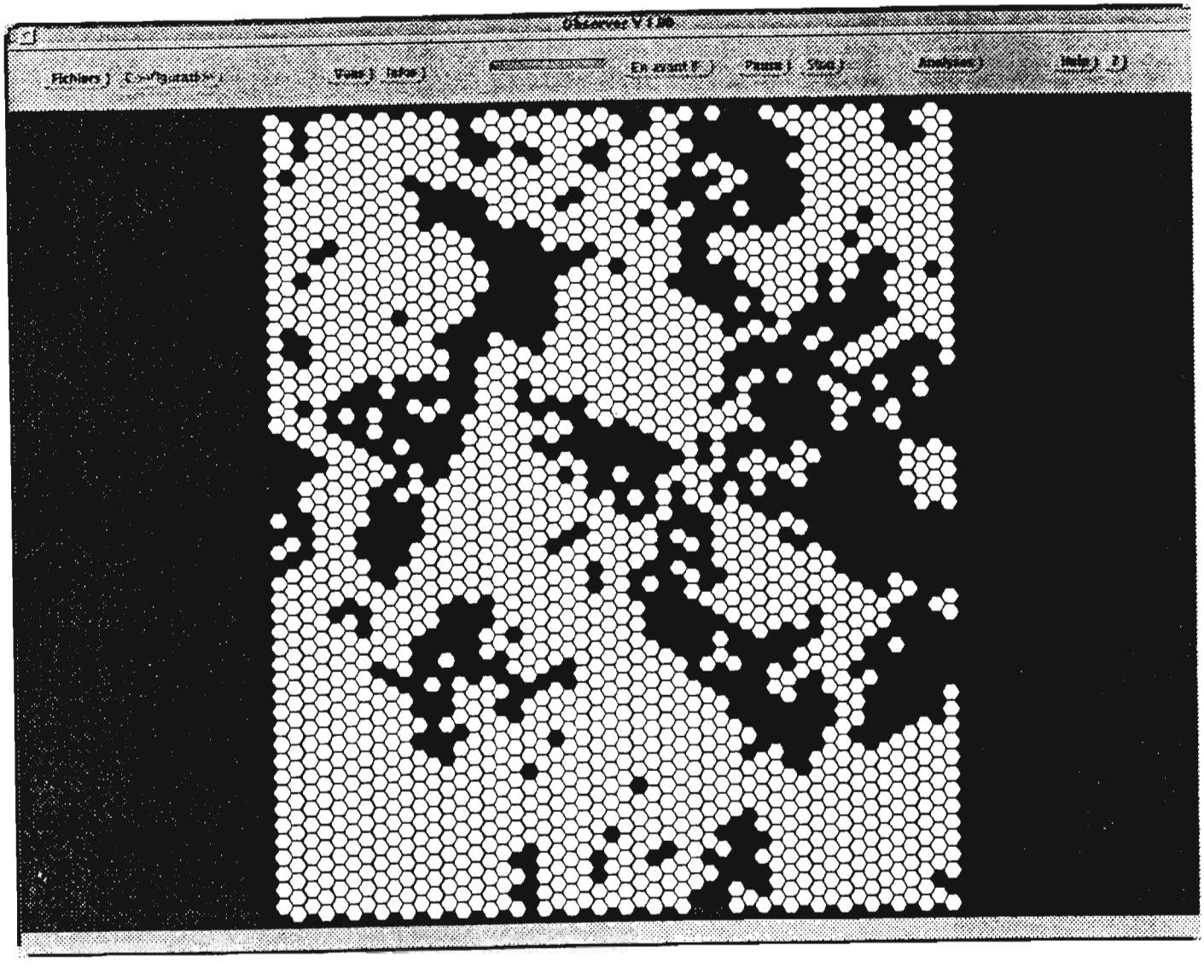
Annexe 2a

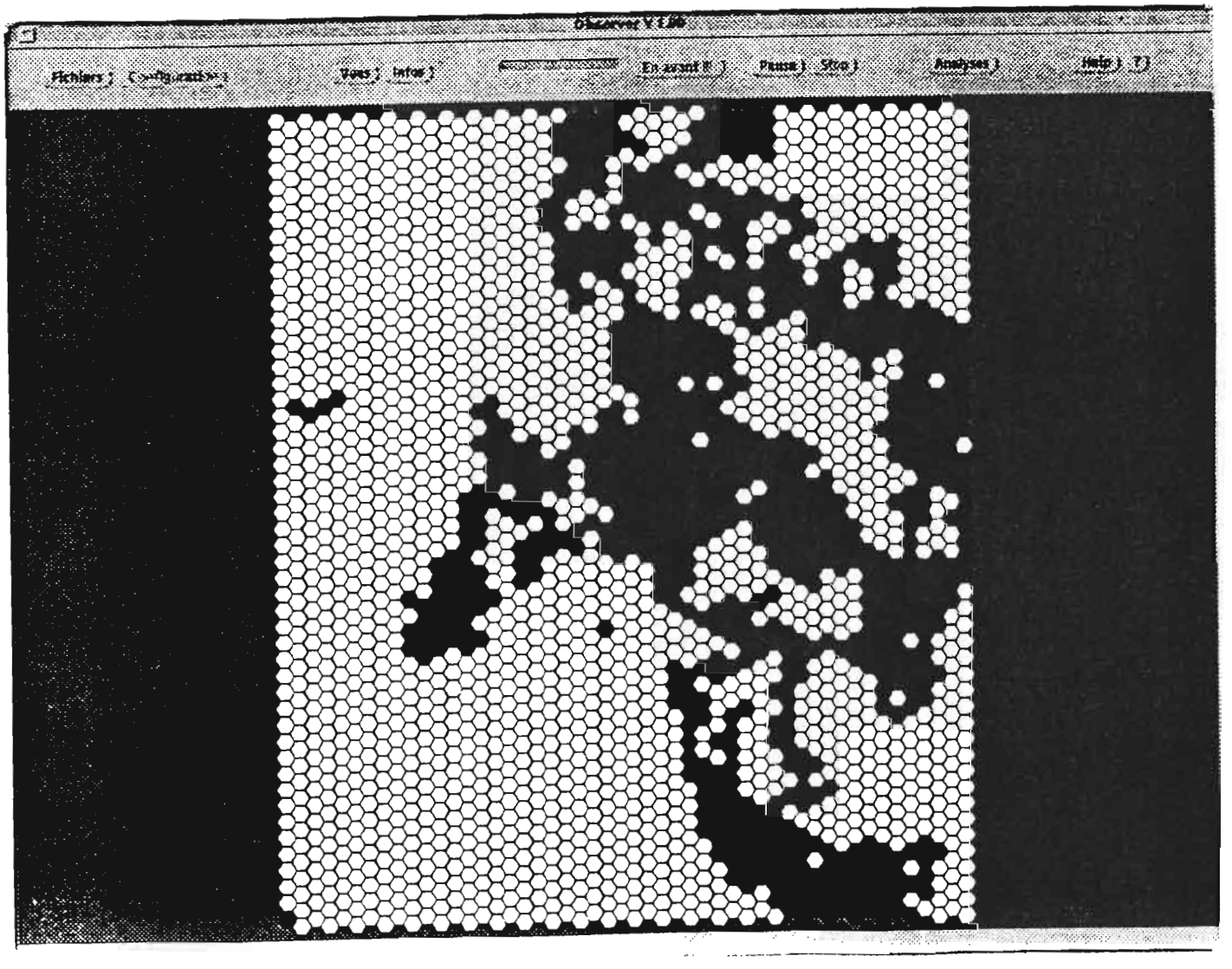
(Paysage de savane arborée du Niokolo-Badiar
et sa représentation simulée par OBSERVER (U = 10 %, et a = 0))



Annexe 2b

(Paysage de savane arbustive du Niokolo-Badiar
et sa représentation simulée par OBSERVER (U = 30 %, et a = 2))



Annexe 2c

(Paysage de savane ouverte du Niokolo-Badiar
et sa représentation simulée par OBSERVER (U = 30 %, et a = 4))