

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
I. ACQUISITION DES DONNÉES	2
I.1. Zone d'étude	2
I.2. Méthodes de dénombrement	2
I.2.1 Dénombrement terrestre	2
I.2.2. Dénombrement aérien	2
I.3. Données obtenues	2
II. INFORMATION GÉOGRAPHIQUE	2
II.1. Analyse des points	2
II.2. Analyse d'une information surfacique	2
III. STATISTIQUE SPATIALE	2
III.1. Techniques de lissage	2
III.1.1. Régression locale	2
III.1.2. Krigeage	2
III.2. Analyse de la structure spatiale des unités d'enquêtes	2
III.2.1. Représentation	2
III.2.2. Caractérisation	2
DISCUSSION - CONCLUSION	2
BIBLIOGRAPHIE	2

Introduction

En Afrique subsaharienne, les données sur les effectifs et la répartition des animaux domestiques sont en général imprécises et reposent sur des informations anciennes actualisées grossièrement ou des données annexes souvent peu fiables (Wint & Bourn 1994). Pourtant, leur connaissance précise est un préalable indispensable, de l'échelle locale à l'échelle continentale, à toute action de recherche ou de développement, pour l'amélioration des productions agricoles, la lutte contre les zoonoses et les pathologies du bétail ou la gestion du milieu et des écosystèmes (De Haan *et al.* 1997; Slingenbergh & Wint 1997).

Il existe de nombreuses techniques de dénombrement des animaux, généralement mises au point pour la faune sauvage (Norton-Griffiths 1978; Seber 1982, 1992; Skalski, 1990) mais également applicables aux animaux domestiques (RIM 1985). Il semble aussi naturel, en milieu rural, de s'adresser directement aux propriétaires de bétail pour connaître la taille de leur cheptel (Bahili & Bakary 1993). La revue bibliographique des opérations de dénombrement des animaux domestiques effectuées au cours des 30 dernières années fait apparaître deux grands types de méthodes : les comptages terrestres, fondés en général sur des enquêtes dans les habitations ou aux points d'abreuvement, et les comptages aériens.

Les enquêtes de dénombrement, quelle que soit la méthode employée, sont rarement exhaustives pour des raisons financières évidentes. Dès lors, la question de la précision de l'estimation des effectifs dénombrés sur un échantillon devient capitale pour juger de l'efficacité de l'opération et de la pertinence des résultats obtenus. Par ailleurs, avec le développement des outils informatiques d'analyse et d'aide à la décision comme les systèmes d'information géographique, ces résultats doivent être cartographiables de manière pertinente pour pouvoir être mis en relation avec d'autres données (milieu, aménagements, urbanisation, etc.).

Les méthodes de dénombrement, terrestres et aériennes, ont chacune des avantages et des inconvénients logistiques, mais qu'en est-il de la précision de leurs résultats ? Quelle est la réalité des phénomènes observés et cartographiés ?

Dans le cadre d'un projet de recherche sur les trypanosomoses bovines financé par le Cirad, deux dénombrements exhaustifs des bovins ont été effectués dans une zone agropastorale du sud du Burkina Faso. Après avoir présenté les méthodes de comptage et les résultats obtenus, leurs traitements dans un système d'information géographique ainsi que par divers outils de statistique spatiale seront développés pour tenter de répondre aux interrogations précédentes. Ce rapport est le témoignage d'un travail de terrain effectué entre 1997 et 1998 et d'un apprentissage biométrique dans le but de répondre à des questions biologiques.

I. Acquisition des données

I.1. Zone d'étude

La zone d'étude, dite de Sidéradougou, s'étend sur 1 200 km² au sud de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) au pied de la falaise de Banfora, au niveau de 11° de latitude Nord et 4° de longitude Ouest (Fig. 1). Elle appartient au domaine tropical soudanien (zone subhumide de l'Afrique) recevant 1 000 à 1 100 mm d'eau par an entre mai et octobre, avec une température moyenne de 27°C. De relief relativement uniforme, elle est traversée par deux réseaux hydrographiques connectés : le Koba et son affluent le Tolé. La formation végétale dominante est une savane arborée, mais la zone connaît depuis une dizaine d'année une forte dynamique d'implantation agricole (Augusseau *et al.* 1998). Socialement, les agriculteurs Bobo constituent l'ethnie la plus ancienne et majoritairement présente dans la zone. Les agriculteurs migrants Mossi se regroupent dans un front pionnier à forte dynamique situé à l'est du Tolé, alors que les grands éleveurs Peuls, minoritaires, se retrouvent dans toute la zone. En fonction de l'emprise agricole, des caractéristiques morphopédologiques, et du réseau hydrographique, il est possible de diviser la zone en trois sous-zones agro-écologiques (Toutain *et al.*, 1978) (Fig. 1) :

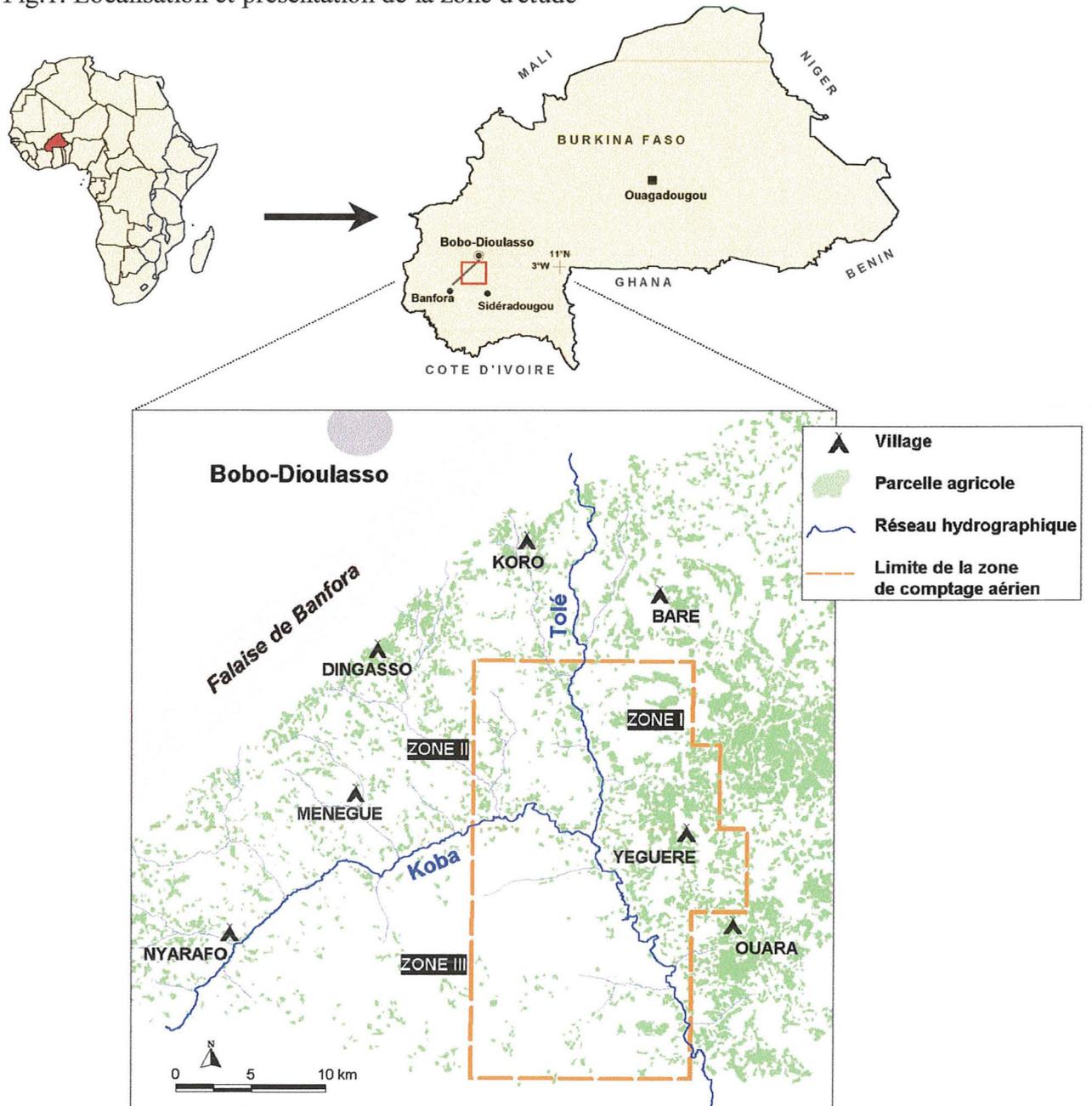
- la zone 1 située à l'est du Tolé et du Koba. C'est la zone du front pionnier à forte occupation humaine et agricole (culture du coton);
- la zone 2 située dans le triangle falaise-Tolé-Koba. Elle est surtout occupée par les anciennes ethnies locales (Bobo, Tiefo, Dioula) qui pratiquent une agriculture vivrière. Quelques éleveurs Peuls y sont également installés;
- la zone 3, au sud du Koba, peu peuplée et peu cultivée à cause de la qualité des sols (cuirasse latéritique). Elle correspond au territoire pastoral et accueille les grands troupeaux Peuls.

Dans ce contexte les bovins, des taurins *Bos taurus*, des zébus *Bos indicus* et des métis, occupent diverses fonctions et sont présents chez toutes les ethnies. Ils sont utilisés pour le trait et comme moyen de thésaurisation par les agriculteurs Bobo ou Mossi, ou comme animaux de rente par les éleveurs Peuls qui tirent leur profit du lait et de la vente des animaux pour la boucherie. Ces animaux sont conduits sur les parcours ou dans les champs pour le travail et sont abreuvés en général une fois par jour. Certains grands éleveurs pratiquent la transhumance en fin de saison sèche (de janvier à avril), vers le sud du pays alors qu'au cours de cette même période, la zone est traversée par des troupeaux transhumants extérieurs à la zone. Les effectifs bovins dans la zone sont donc variables au cours de l'année, mais relativement constants et représentatifs des animaux autochtones de la zone durant la saison des pluies.

Le dénombrement terrestre a porté sur toute la zone (1 200 km²) alors que pour des raisons de coût, le dénombrement aérien a été effectué sur une partie de la zone seulement (400 km²). Afin de

couvrir au mieux les différents types de systèmes d'élevage et donc de peuplements bovins, la partie explorée par avion se situe au croisement des trois sous-zones agro-écologiques (Fig. 1).

Fig.1. Localisation et présentation de la zone d'étude



1.2. Méthodes de dénombrement

1.2.1 Dénombrement terrestre

Le dénombrement terrestre a été effectué à l'origine pour l'étude du système épidémiologique de la trypanosomose bovine, maladie parasitaire transmise par des glossines (ou mouches tsé-tsé), ripicoles dans cette zone. Il était donc nécessaire de relever des informations fiables et exhaustives sur les effectifs mais aussi sur les pratiques de conduite des animaux, pour pouvoir identifier les zones de transmission du parasite (De La Rocque 1997; Cuisance et de La Rocque 1998).

Ce dénombrement a été basé sur la cour ou concession qui est une entité géographique composée d'habitations regroupant une ou plusieurs familles de même sang. Un village est un ensemble de cours regroupées alors qu'un campement est un ensemble de cours dispersées dans un terroir. A chaque cour est rattaché un troupeau de bovins qualifié de "troupeau de nuit" correspondant en fait à l'ensemble des animaux gardés par les habitants de la cour. Ce troupeau n'est pas une unité de conduite, ni une unité de propriété puisque les animaux peuvent avoir plusieurs propriétaires, c'est une unité de garde ou de détention.

Toutes les cours de la zone (1 200 km²) ont été visitées entre avril et août 1997 (Michel, 1997 ; Meallet, 1997). Leur position géographique a été relevée par récepteur GPS (Global Positionning System) en coordonnées métriques (coordonnées UTM, référentiel WGS 84 bande 30 Nord). Le nombre de bovins par cour a été déterminé par entretien avec le chef de cour, et validé par un comptage visuel lorsque les animaux étaient présents. Afin d'obtenir les informations les plus exactes possibles concernant l'effectif du cheptel, sujet délicat qui touche aux richesses personnelles, plusieurs stratégies ont été suivies :

- le responsable local (chef de village) contacté au préalable accompagnait les enquêteurs lors des entretiens pour informer et instaurer un climat de confiance nécessaire;
- les effectifs annoncés ont été simultanément validés par des comptages visuels à chaque fois que cela était possible;
- les informations obtenues par enquête ont été validées dans les mois suivants par un protocole de comptage visuel des animaux absents lors du premier passage;
- enfin, pour avoir accès au maximum d'animaux, les enquêtes se sont déroulées d'avril à août 97, c'est-à-dire après le retour de transhumance.

Outre les effectifs, des informations sur les pratiques d'élevage (point d'abreuvement, prophylaxie, transhumance), sur les caractères sociaux (ethnie, ancienneté d'installation) et sur l'utilisation des animaux (trait, d'élevage) ont également été relevées, et ont conduit à l'identification de systèmes d'élevage mis en relation avec le risque trypanosomien (Cuisance & de La Rocque 1998).

1.2.2. Dénombrement aérien

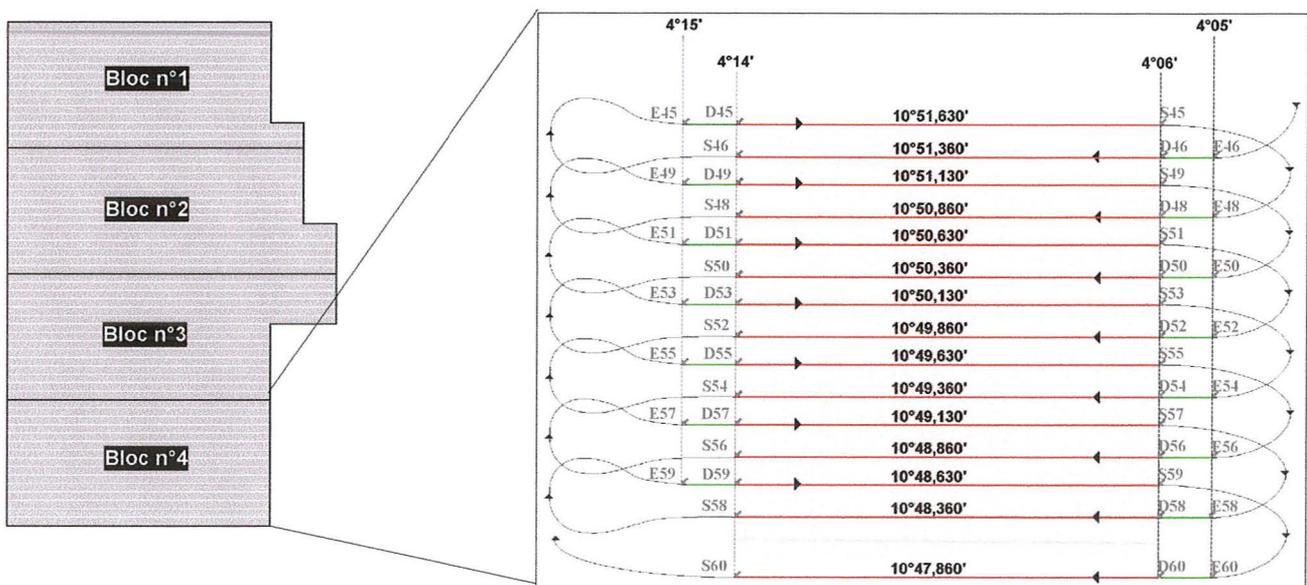
La méthode employée pour effectuer le dénombrement aérien repose sur le principe classique de la bande de comptage figurée par des rubans fixés sur le hauban de l'aile de l'avion (Norton-Griffiths 1978). L'avion balaie la surface à explorer par une série de transects rectilignes et tous les bovins aperçus dans la bande sont dénombrés (Fig. 2). La difficulté majeure de l'opération réside dans le fait que le comptage doit être exhaustif, donc que toute la surface soit effectivement explorée et que tous les bovins survolés soient dénombrés. Pour cela, différents choix techniques ont été faits :

- la largeur de la bande a été fixée à 460 mètres, d'après la littérature relative aux comptages de bovins dans des milieux similaires (RIM 1989). Cette taille est suffisamment importante pour

limiter l'impact des erreurs de pilotage ou de positionnement GPS sur l'exhaustivité du balayage et suffisamment petite pour permettre de compter tous les bovins dans un milieu arboré;

- l'altitude de vol a été fixée à 700 pieds (230 m) pour pouvoir voir correctement les animaux sans les effrayer, et la vitesse de l'avion réduite au minimum (120 km/h);
- après fixation des rubans sur les haubans de l'aile, la largeur de bande au sol a été validée par le comptage de repères posés tous les 20 mètres le long de la piste de l'aéroport;
- le plan de vol a été préparé avec divers points de repères notamment un point d'entrée avant le début réel du comptage pour aligner correctement l'avion sur l'axe du transect (Fig. 2),

Fig. 2. Plan de vol général et détail du plan de vol pour un bloc de comptage. La couleur rouge symbolise la partie comptage du transect, la verte la zone d'entrée du transect, la grise la zone couverte par les observateurs. E : point d'entrée, D : point de début et S : point de sortie du transect.



- tous les points ont été mémorisés dans un récepteur GPS et le pilotage a été effectué uniquement à l'aide de celui-ci;
- les bovins ont été comptés simultanément du même côté (à droite) par deux personnes pour valider les résultats et limiter les effets de compteur;
- les groupes de plus de 20 bovins ont été photographiés sous différents angles pour limiter les sous-estimations dues à l'agrégation des animaux et à la présence du couvert végétal;
- les groupes de bovins ont tous été positionnés par GPS (coordonnées en degrés, référentiel WGS 84), pour pouvoir les cartographier et valider la bonne position de la trajectoire de l'avion;
- quatre personnes ont pris place dans l'avion, un pilote, un compteur, un compteur photographe et une personne pour noter les informations et relever les positions géographiques;
- trois récepteurs GPS ont été installés pour pallier à tout problème de positionnement.

La zone de comptage prévue (440 km²) a été divisée en 4 blocs de 15 transects (Fig. 2), couverts chacun en 3 à 4 heures de vol au cours de la journée pour voir les animaux sur les parcours ou dans

les champs. Les vols ont été regroupés en 3 jours pour limiter les variations d'effectifs dus aux mouvements d'animaux. Ils ont été effectués début juillet 1998 après le retour de transhumance.

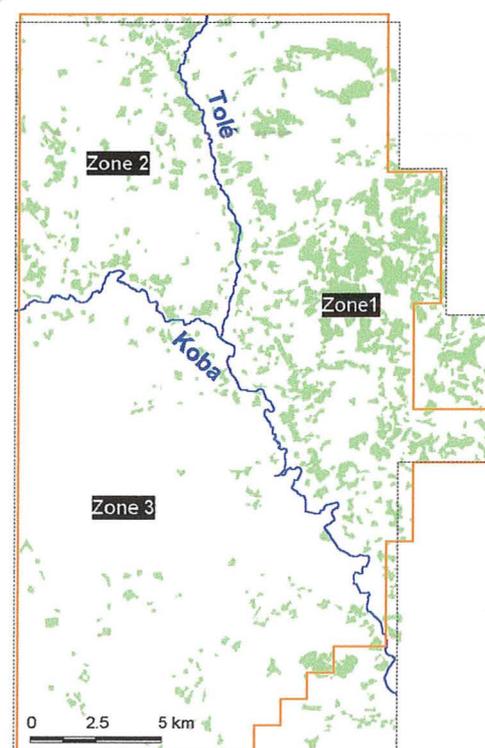
Tous les clichés ont été numérisés, retouchés et les bovins ont été dénombrés à l'écran. La position relative des bovins dans la bande de comptage a été notée (intérieur, milieu ou extérieur de la bande) et leur position réelle a été calculée en corrigeant la position relevée (GPS) par le décalage entre l'avion et la bande de comptage (230 m) et par leur position relative dans la bande.

1.3. Données obtenues

La zone commune aux deux dénombrements effectivement réalisés est de 403 km² (Fig. 3). Les résultats obtenus semblent fiables. Toutes les cours ont été visitées lors de l'enquête terrestre et le protocole de validation par comptages visuels des effectifs obtenus par enquête, effectué dans 128 troupeaux (sur 801 recensés) montre un écart de seulement 1,5 % (2 968 bovins comptés contre 2 924 bovins déclarés). Il est plus difficile de juger du caractère exhaustif du dénombrement aérien, mais les différentes précautions utilisées font que l'effectif obtenu est certainement assez proche de la réalité. Pour limiter encore les risques de sous-estimation, la zone commune choisie a été réduite lorsqu'un doute subsistait sur l'exhaustivité des dénombrements.

Ces dénombrements reposent sur deux unités fondamentalement différentes : les comptages terrestres sont fondés sur les habitations et le troupeau de nuit qui est une unité de garde, alors que les comptages aériens reposent sur le troupeau de jour (appelé troupeau par abus) qui est une unité de conduite des animaux sur les parcours. Ces deux unités sont liées, un troupeau de nuit peut constituer, se diviser en, ou représenter un troupeau de jour, mais elles ne représentent pas la même chose. Par ailleurs, le positionnement de ces unités ne produit pas la même information : la position du troupeau de nuit, via la cour, est stable dans le temps alors que la position du troupeau de jour est variable. Le comptage terrestre donne donc une image des bovins présents au moins le soir dans la zone explorée, alors que le comptage aérien donne une image des bovins présents dans la zone à un instant donné, sans préjuger de leur lieu de garde. La comparaison des deux méthodes doit donc se faire en connaissance de cause, elles ne produisent pas les mêmes résultats. Enfin, même si les deux opérations ont été effectuées à 1 an d'intervalle, la comparaison des effectifs reste possible puisque ce pas de temps reste faible pour des espèces à reproduction relativement lente dans ces conditions d'élevage et qu'il n'y a pas eu d'événement important au cours de l'année (sécheresse, grande migration, conflits importants).

Fig. 3. Zone de comptage commune (ligne orange) et zone initiale (ligne pointillée)



D'après les résultats obtenus (tableau 1), les effectifs totaux d'animaux, et les nombres d'unités de dénombrement (troupeaux de nuit et troupeaux de jour) sont du même ordre de grandeur. Cette similarité est troublante, car une hypothèse forte mais invérifiable du comptage aérien est que, au cours d'une journée, le flux entrant des animaux extérieurs

Tableau 1. Résultats bruts des deux dénombrements

Unité d'enquête	Comptage aérien	Comptage terrestre
	Troupeau de jour (unité de conduite)	Troupeau de nuit (unité de garde)
Nombre d'unités	304	358
Effectifs bovins	5065	4795

à la zone compense exactement le flux sortant des animaux de la zone. Pour vérifier cette hypothèse il aurait fallu répéter le comptage aérien ce qui était financièrement impossible. Ces résultats montrent que soit ces flux sont faibles, soit ils se compensent bien, soit la situation résulte de coïncidences (ce qui est très improbable). Si on admet l'hypothèse forte, l'écart relativement faible (5 %) entre les effectifs bovins dénombrés par les deux techniques peut s'expliquer par l'accroissement naturel de la population au cours de l'année d'écart, ou la fréquentation de la zone par des troupeaux voisins pris en compte par le comptage aérien mais pas par le dénombrement terrestre basé sur les habitations. Quant au plus faible nombre de troupeaux positionnés lors des vols par rapport au nombre d'habitations recensées, il pourrait s'expliquer par le regroupement des petits effectifs bovins rattachés à plusieurs habitations.

La comparaison des deux techniques de comptage ne saurait se limiter à la simple analyse des résultats bruts. Le positionnement géographique des unités d'enquête permet en effet de traiter les données dans un système d'information géographique (SIG) et d'affiner leur analyse.

II. Information géographique

Le Conseil national de l'information géographique définit les SIG comme un "ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision" (Denegre, 1996). Les données repérées dans l'espace constituent une information géographique qui peut se décomposer en deux niveaux : un niveau géométrique qui rend compte de la nature (point, ligne, surface), de la position dans l'espace et de la forme des objets ; et un niveau sémantique, qui correspond aux informations rattachées aux objets géométriques.

Toutes les unités dénombrées par les deux méthodes ont été positionnées, elles peuvent donc être analysés comme une information géographique. Deux logiciels ont été utilisés pour cela :

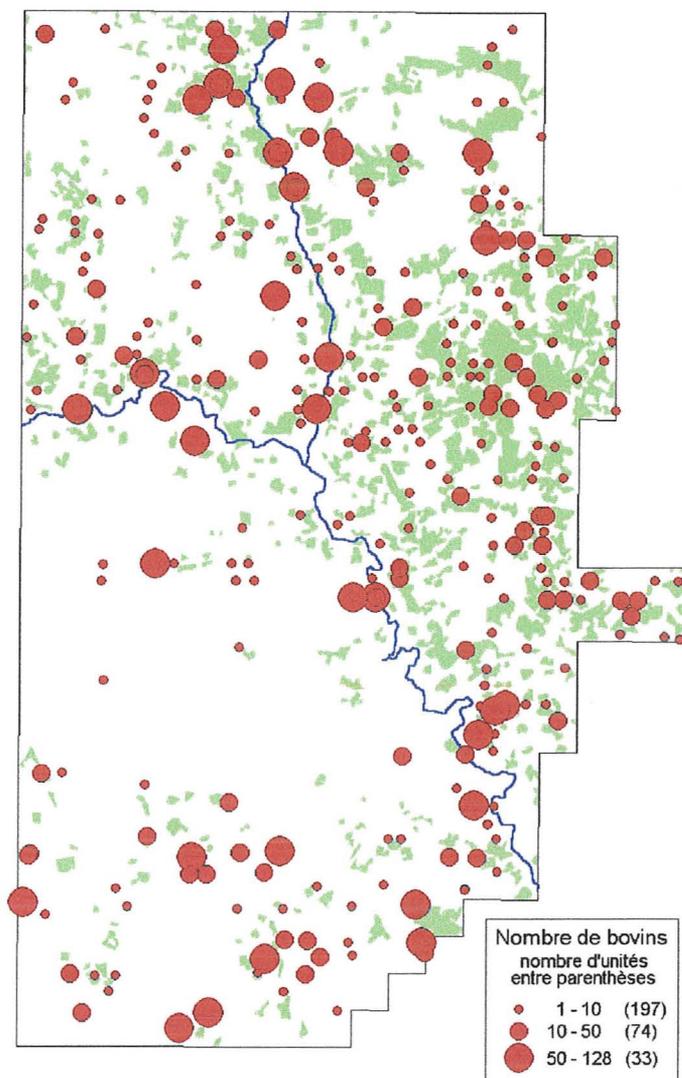
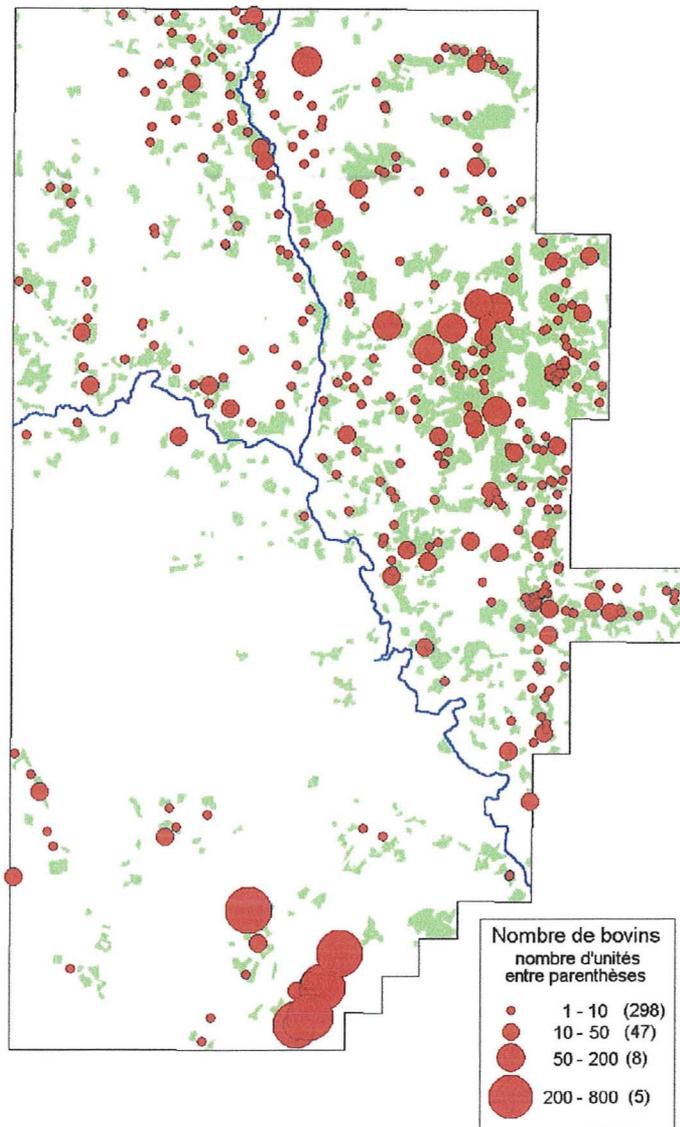
- MAPINFOND, logiciel de SIG qui utilise les données en mode vectoriel (les objets géométriques sont décrits par des points ou nœuds qui en composent le pourtour) et permet de rattacher aisément des bases de données sémantiques (facilement exportables) aux objets géographiques,
- S-PLUSND, logiciel de traitement statistique.

II.1. Analyse des points

MAPINFO permet de créer des cartes de points à partir de deux séries de coordonnées (longitude et latitude) quel que soit le référentiel utilisé, d'effectuer des analyses thématiques sur ces objets géographiques en fonction des données qui y sont rattachées (ici le nombre de bovins) et de superposer ces points avec d'autres couches d'information (culture et réseau hydrographique par exemple) (Figs 4 et 5).

Fig. 4. Comptage terrestre : répartition des troupeaux de nuit et du nombre de bovins

Fig. 5. Comptage aérien: répartition des troupeaux de jour et du nombre de bovins



Ces deux cartes permettent d'analyser la distribution des tailles de troupeaux, la répartition des points et des effectifs dans l'espace.

La taille des troupeaux de nuit ou d'habitations (comptage terrestre) est beaucoup plus variable que celle des troupeaux de jour (comptage aérien) (tableau 2). Les petits effectifs dans les habitations sont plus nombreux mais la moyenne est augmentée par quelques effectifs extrêmes.

Tableau 2. Caractéristiques des tailles de troupeaux de nuit (comptage terrestre) et de troupeaux de jour (comptage aérien)

	moyenne	variance	min.	max.	médiane
Comptage terrestre	13,4	3438	1	800	4
Comptage aérien	16,7	644	1	127	5

En effet, 13 cours, soit 3,6 %, représentent 2 785 bovins, soit 58,1 % de l'effectif total dénombré dans la zone. En revanche, les effectifs de troupeaux de jour sont beaucoup plus stables.

Les histogrammes des distributions des logarithmes de nombre de bovins illustrent ces remarques (Fig. 6). Pour pouvoir comparer les distributions, les histogrammes ont été représentés comme des densités de probabilité. Ces densités ont été vues comme le mélange de deux lois normales dont les paramètres ont été estimés par itération selon le critère du maximum de vraisemblance (Chessel, 1999) (le script de la fonction utilisée est en annexe 1).

La distribution de la taille des troupeaux de jour paraît bimodale et nettement plus resserrée que celle des troupeaux de nuit qui est franchement unimodale et plus asymétrique. Tout se passe comme si les petits troupeaux de nuit se regroupaient pour former le premier pic de la distribution des troupeaux de jour (loi normale de moyenne 1.29 et de variance 0.62 décrivant 74 % de la population) et les très gros troupeaux de nuit se morcelaient pour former le deuxième pic (loi normale de moyenne 3.69 et de variance 0.48).

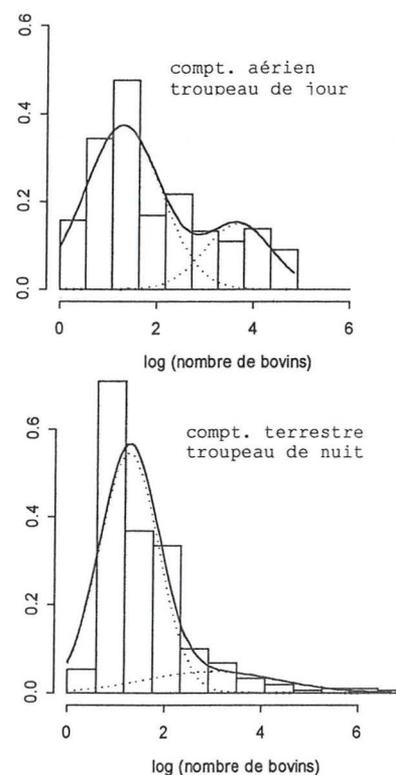
La répartition spatiale des unités d'enquêtes est également différente.

Les troupeaux de nuit semblent beaucoup plus agrégés et leur mode de répartition plus sensible à la vocation agro-écologique de la zone dans laquelle ils se trouvent que les troupeaux de jour qui occupent plus largement le milieu. Il en est de même pour la répartition spatiale des effectifs dans les troupeaux de nuit qui suit le même zonage agro-écologique :

- les très gros effectifs se retrouvent tous dans la zone 3 au sud (zone à vocation pastorale);
- les effectifs moyens sont surtout présents dans la zone 1 à l'est avec une forte densité de points, c'est la zone du front pionnier à forte dynamique d'implantation agricole;
- la zone 2 à l'ouest est peuplée de petits effectifs, avec moins de points que dans la zone 1.

Cette différence dans la répartition spatiale des effectifs semble donc très liée à l'intensité de l'emprise agricole : dans la zone pastorale faiblement cultivée, l'espace est suffisant pour que les grands éleveurs s'y installent ; dans la zone du front pionnier la culture du coton permet aux

Fig. 6. Distributions des tailles de troupeau



agriculteurs d'épargner leur revenus en achetant des animaux alors que dans la zone ouest les agriculteurs ne possèdent en général que des petits effectifs de bœufs de trait.

A l'inverse la répartition de la taille des troupeaux de jour dans le milieu (Fig. 5) est beaucoup plus régulière et semble beaucoup plus indépendante de l'emprise agricole, à deux exceptions près :

- l'absence de bovins dans la zone vide de toute culture (nord de la zone 3) reste une constante, qui peut s'expliquer par la médiocrité des sols, impropres à la culture et produisant également des pâturages pauvres;
- les gros troupeaux sont moins présents dans la zone à forte densité agricole (à l'est) que ce que ne le laissait présager le comptage terrestre, ce qui s'explique certainement par la saturation de l'espace en cultures et le manque de place laissé aux pâturages.

Les variances des effectifs dans chaque zone agro-écologique (tableau 3) confirment les différences de répartitions des tailles de troupeaux. Le peuplement bovin lié aux habitations est très zonal et la variabilité globale est uniquement générée par les très gros effectifs de la zone 3, alors que la répartition des troupeaux dans le milieu est beaucoup plus régulière (variance par zone plus stable).

Tableau 3. Taille des troupeaux de jour (comptage aérien) et des troupeaux de nuit (comptage terrestre) en fonction des zones agro-écologiques

	<i>Comptage aérien</i>			<i>Comptage terrestre</i>		
	<i>moyenne</i>	<i>n</i>	<i>variance</i>	<i>moyenne</i>	<i>n</i>	<i>variance</i>
Zone 1	12,1	163	437	7,7	251	174
Zone 2	14,4	66	425	5,0	74	27
Zone 3	28,5	75	1113	75,8	33	32504

Les différences présentées s'expliquent par la nature même des unités d'enquête. En effet, le troupeau de nuit qui est une unité de garde, appréhendée par le comptage terrestre, n'est pas limité en taille, alors que le troupeau de jour, visualisé et compté par avion, a une taille limitée par les contraintes pratiques de conduite des animaux. Au delà de 130 bovins il semble difficile de gérer un troupeau sur les parcours. La stabilité de la taille des troupeaux de jour et de leur répartition dans le milieu provient de ces contraintes : les grands éleveurs morcellent leur troupeau de nuit en troupeaux de jour qui sont des unités de conduites plus faciles à gérer et qui s'écartent les unes des autres dans le milieu, alors que les petits éleveurs possédant 1 ou 2 bovins ont tendance à les regrouper pour les conduire sur les parcours et diminuer la charge de travail. Il semble que les acteurs de l'élevage tendent, quel que soit leur effectif d'animaux, vers un troupeau moyen qui optimise la gestion des animaux dans le milieu. Cette harmonisation des pratiques se traduit par une variance plus faible des effectifs comptés par avion.

Par ailleurs, les comptages terrestres basés sur les habitations donnent une image faussée de la répartition réelle des animaux dans la zone. Cet effet est flagrant sur les figures 4 et 5 :

- les très gros troupeaux de nuit (plus de 200 bovins) rattachés au cours du sud de la zone 3 (Fig. 4) éclatent en plusieurs unités qui se répartissent dans l'espace (Fig. 5),
- les gros effectifs des agroéleveurs de la zone 1 (à l'est) ne restent pas en fait dans l'espace agricole saturé mais vont pâturer en périphérie,
- l'espace libre de la zone 2, peuplée de petits agriculteurs, est en fait occupé par des troupeaux plus importants.

Les données obtenues par les deux méthodes peuvent être cartographiées mais elles ne représentent pas la même chose : alors que le comptage aérien permet de donner une image de la répartition des bovins dans la zone au cours de la journée, le comptage terrestre donne plutôt une image de la répartition des éleveurs et de leur nombre de bovins gardés. La cartographie des points permet une bonne analyse des peuplements bovins, mais elle représente mal les densités d'animaux, notamment à cause de la superposition des objets géographiquement proches. Il est possible de l'améliorer, grâce au SIG, en transformant l'information ponctuelle en information surfacique.

II.2. Analyse d'une information surfacique

La transformation d'une information ponctuelle en une information surfacique se fait par une requête spatiale entre deux tables dans MAPINFO. Après création automatique d'une grille géographique rectangulaire de carrés de 1 km² (assemblage de polygones réguliers), une première requête spatiale avec les limites réelles de la zone permet d'exclure les carrés en excès. Le problème est qu'alors les carrés ont un identifiant qui ne suit pas forcément un ordre géographique logique. Une deuxième requête permet d'obtenir les coordonnées des centroïdes de chaque polygone et de les rajouter dans la table liée. Les polygones sont alors triés selon un ordre décroissant des latitudes et croissant des longitudes des centroïdes, et les identifiants renumérotés de 1 à n, donc selon un ordre nord-sud et est-ouest. Il est ensuite possible de superposer les points au quadrillage et de croiser ces deux couches avec un opérateur de liaison spatiale pour les objets géographiques (du type "objets points" within "objets carrés") et un opérateur mathématique de somme pour les données liées. Cette projection permet de connaître le nombre de bovins et le nombre de troupeaux présents (selon les deux méthodes de comptage) dans chaque carré de la grille. Une analyse thématique simple permet d'affecter des couleurs aux carrés selon la valeur du nombre de bovins et d'obtenir des cartes de densités de bovins selon les deux méthodes de dénombrement (Figs 7 et 8). Cette représentation élimine l'inconvénient de la superposition des points, mais elle dilue l'information dans l'espace. Il est toujours difficile de choisir une taille de carrés : s'ils sont trop petits l'information est délicate à lire et s'ils sont trop grands la perte d'information est importante (Figs 9 et 10). Les cartes de densités de bovins (Figs 7 et 8) confirment les conclusions faites sur les cartes de points. La répartition des bovins comptés à partir des habitations est beaucoup plus zonale et plus groupée que celle des bovins comptés par avion.

Fig. 7. Répartition des bovins dans une grille de carrés de 1 km², comptage terrestre

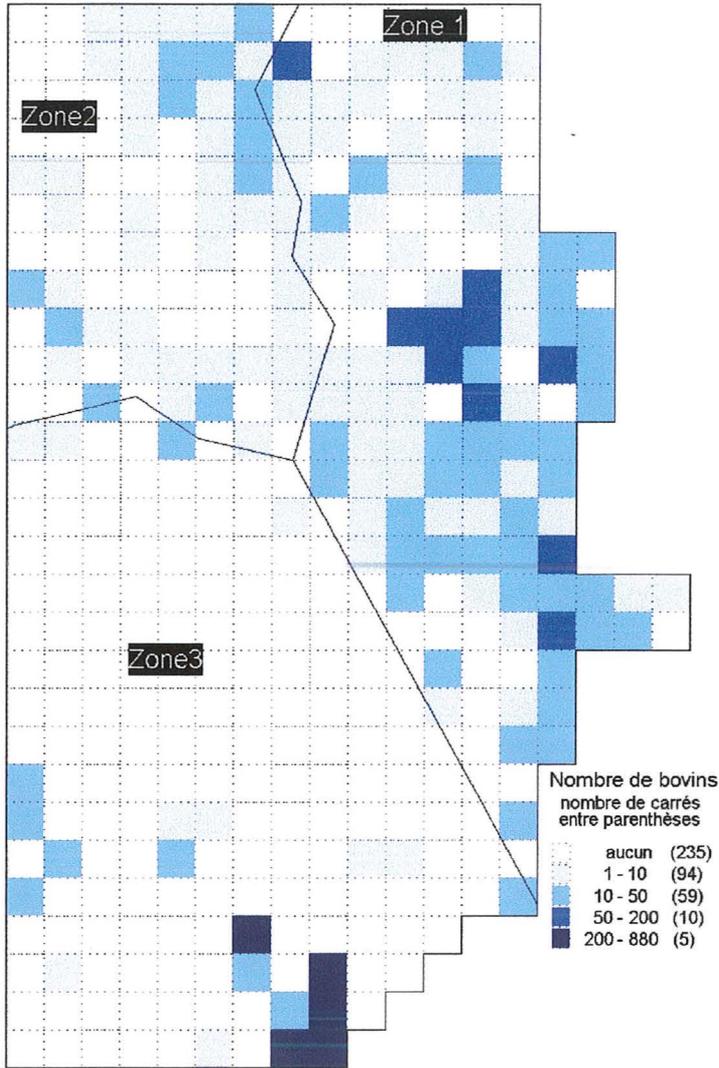


Fig. 8. Répartition des bovins dans une grille de carrés de 1 km², comptage aérien

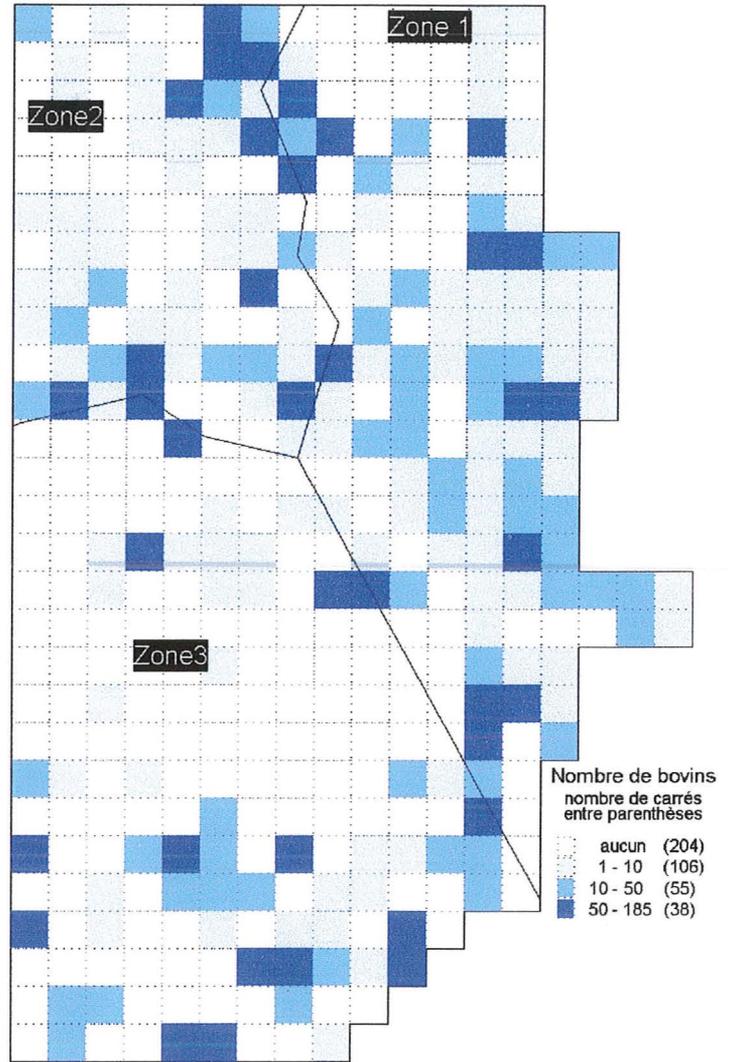


Fig. 9. Répartition des bovins dans une grille de carrés de 4 km², comptage terrestre

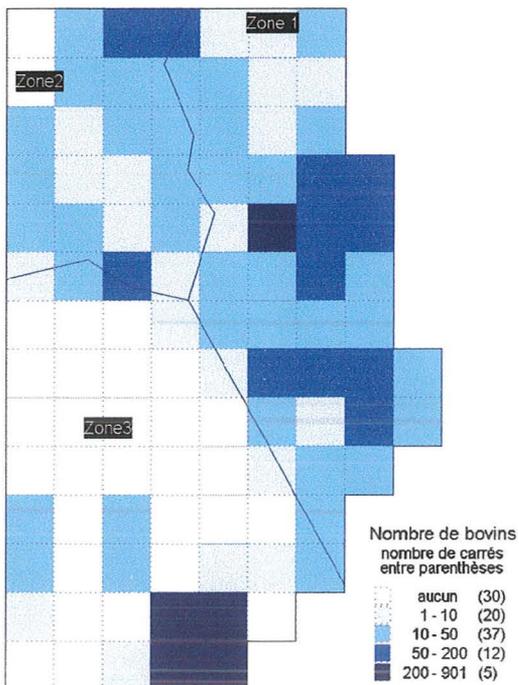
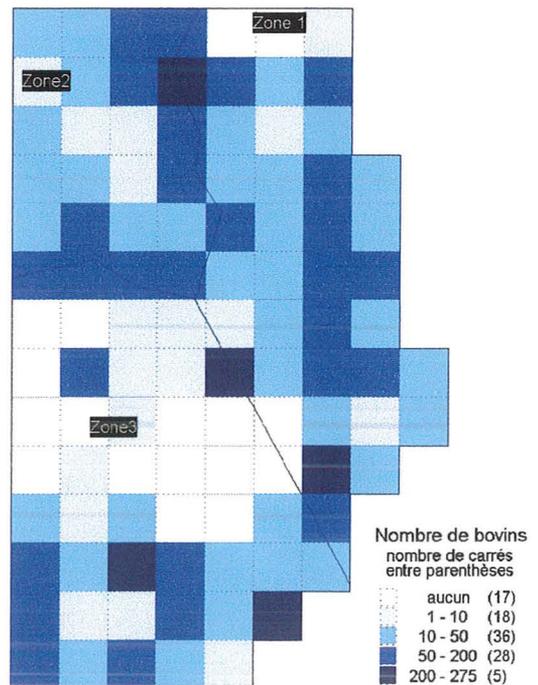


Fig. 10. Répartition des bovins dans une grille de carrés de 4 km², comptage aérien



De même, le nombre de bovins par carré est beaucoup plus variable pour les comptages terrestres que pour les comptages aériens. Les nouvelles unités provenant du regroupement des effectifs bovins en carrés sont cependant moins variables. Les moyennes globales et par zone sont plus homogènes et les variances extrêmes ont diminué (tableau 4). Néanmoins les variances suivent la même tendance que celles calculées sur les troupeaux.

Tableau 4. Caractéristiques du nombre de bovins par carrés de 1 km²

	<i>Comptage aérien</i>		<i>Comptage terrestre</i>		<i>n</i>
	<i>moyenne</i>	<i>variance</i>	<i>moyenne</i>	<i>variance</i>	
Zone totale	12,6	788	11,9	3490	403
Zone 1	13,2	561	13,7	468	140
Zone 2	13,1	922	4,5	54	81
Zone 3	11,8	911	13,8	7 337	182

Par ailleurs, la projection des points dans la grille a gommé l'agrégation des points. Le nombre de carrés vides dans la carte des comptages aériens (204 carrés vides sur 403) est à peine inférieur ($p < 0,05$) à celui de la carte des comptages terrestres (235 carrés vides sur 403), or les espaces vides dans les cartes de points semblaient plus dissemblables. Par ailleurs, cette agrégation semble plus forte pour les troupeaux d'habitations puisque le regroupement en carrés a eu un effet plus fort sur les moyennes et les variances des effectifs par rapport aux effectifs des troupeaux dans le milieu.

Outre son intérêt cartographique, la représentation des données sur une grille de carrés a aussi un intérêt thématique puisque les comptages se font souvent sur des échantillons de surface qui sont soit des carrés soit des transects (pouvant être vus comme une succession de carrés).

Le traitement géographique des données est riche d'enseignements sur un phénomène tel que le peuplement d'une zone par des animaux. Il permet d'en visualiser les grandes lignes, d'interpréter et d'orienter les analyses statistiques simples (variances, distributions). Il permet aussi de mettre en relation les bovins avec les autres données du milieu comme l'agriculture et d'en avoir une vision synthétique. Cependant, sa capacité de représentation est assez rapidement limitée par la nature ponctuelle des données. La transformation en information surfacique améliore la représentation mais elle est relativement rudimentaire et malgré tout la lecture des cartes reste difficile. Enfin, l'analyse visuelle des cartes et l'analyse statistique simple des données permettent d'identifier des différences de caractéristiques des répartitions spatiales mais elles ne permettent ni de les formaliser ni de les tester. Pour répondre à ces inconvénients il est nécessaire de faire appel à d'autres outils d'analyse et notamment les outils statistiques d'analyse spatiale.

III. Statistique spatiale

Une approche classique en statistique spatiale consiste à mesurer l'autocorrélation spatiale entre les unités d'un semis de points ou d'une grille de quadrats, par l'indice de Geary ou de Moran (Cliff & Ord 1973), en appréhendant l'espace à travers une matrice de voisinage. Néanmoins, ces indices permettent mal de séparer l'importance des échelles, globale et locale, dans une structure spatiale. Pour étudier cette structure à différentes échelles, diverses méthodes statistiques d'analyse spatiale ont été mises en œuvre en interfaçant des logiciels d'analyse statistique (S-Plus module Spatial-Stats et ADE-4) avec le système d'information géographique (MAPINFO).

III.1. Techniques de lissage

L'objectif de ces techniques est de résumer l'information sur les effectifs bovins pour améliorer la lecture et l'analyse de la structure spatiale globale des densités de bovins. Ce sont des méthodes d'estimation locale de la valeur des effectifs par interpolation. Il en existe de nombreuses (Ripley, 1981) dont deux seront présentées et appliquées aux données de la grille de carrés de 1 km², qui est une première forme d'amélioration de la représentation de la structure spatiale globale des données.

III.1.1. Régression locale

Cette méthode consiste à estimer la valeur d'une variable en un point en fonction de sa valeur dans les points voisins par une régression locale pondérée à deux dimensions (Cleveland & Devlin 1988). Cette régression locale a été effectuée dans ADE-4 avec un polynôme du premier degré mais il est aussi possible de la faire dans S-Plus avec un polynôme du deuxième degré (annexe 2).

Les données utilisées sont issues de la table de données MAPINFO. La grille est redessinée dans ADE, ainsi que les centroïdes des carrés de la grille dans des coordonnées géométriques (non terrestres). Les identifiants des carrés dans ADE suivent un ordre géométrique identique à l'ordre géographique, les données de MAPINFO sont donc affectées aux mêmes centroïdes dans ADE et dans MAPINFO grâce à leur identifiant (voir § II.2.). Les données obtenues par la régression locale sont des estimations du nombre de bovins aux nœuds (sommets des carrés) de la grille, en fonction de l'effectif des bovins aux centroïdes des carrés voisins. Le paramètre de lissage est donc le nombre de voisins pris en compte dans la régression qu'il est possible de déterminer en calculant l'erreur commise quand on estime les données elles-mêmes avec les points voisins et en traçant la courbe de l'erreur en fonction du nombre de voisins pris en compte (Fig. 11). Les paramètres optimaux de lissage pour chaque type de dénombrement sont des indicateurs de la dispersion des troupeaux dans le milieu (comptage aérien). Ces paramètres ont été appliqués à chaque jeu de données. Les courbes de niveau ont été calculées individuellement puis ont été superposées et colorisées dans un logiciel de dessin vectoriel. Les cartes obtenues (Figs 12 et 13) confirment les conclusions faites grâce au SIG. La répartition des troupeaux dans le milieu est plus régulière et les

effectifs moins variables que ceux des troupeaux d'habitations. Les représentations obtenues sont bien meilleures et les cartes sont rapidement et facilement interprétées. Elles permettent de mieux analyser la structure globale de la densité de bovins, et de mettre en évidence la zonation des effectifs dans les habitations et la structure en "tâches" des densités de bovins dans le milieu.

Fig. 11. Courbe d'erreur en fonction du nombre de voisins intégrés dans la régression locale et paramètre optimal de lissage pour (a) le comptage terrestre et (b) le comptage aérien.

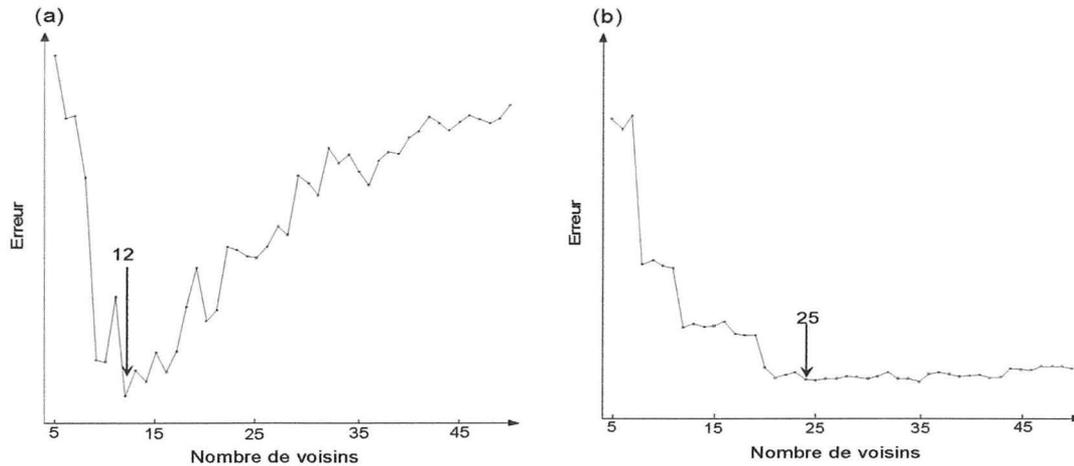


Fig. 12. Répartition des bovins par régression locale, comptage terrestre

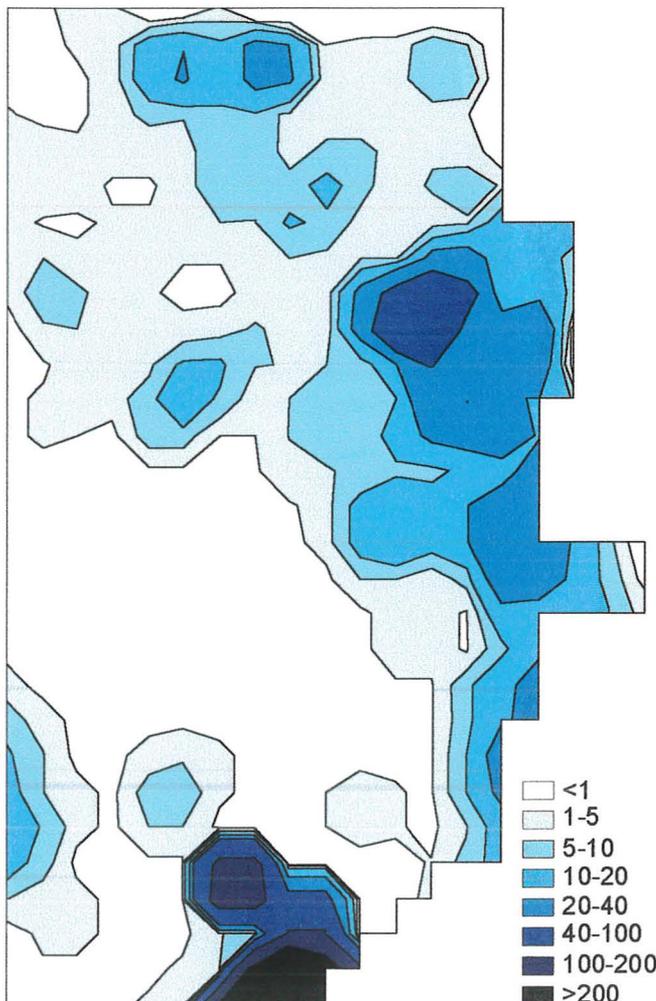
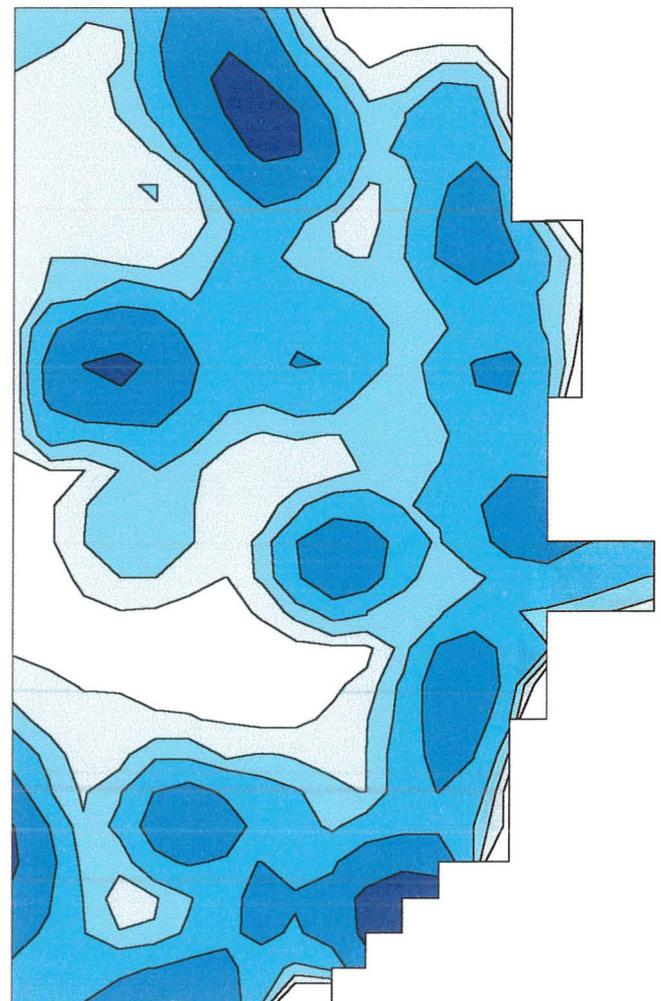


Fig. 13. Répartition des bovins par régression locale, comptage aérien



III.1.2. Krigeage

Le krigeage est une autre méthode d'estimation locale qui repose sur l'existence et l'utilisation d'un modèle probabiliste (Ripley 1981; Cressie 1993). Le nombre de bovins est une variable régionalisée dont la valeur en un point (notée $z(s_i)$) du domaine étudié D , est le résultat de la réalisation particulière d'une variable aléatoire (notée $Z(s_i)$) définie en ce point s_i . Les variables aléatoires $Z(s_i)$ et $Z(s_j)$ ne sont pas, en général, indépendantes mais liées par une corrélation exprimant la structure spatiale de la variable régionalisée initiale. Le krigeage utilise alors un modèle de covariance de la fonction aléatoire $Z(s)$ qui mesure la dépendance entre deux variables $Z(s_{i+h})$ et $Z(s_i)$ prises en deux points distants de h . Pour pouvoir modéliser cette fonction aléatoire à partir d'une seule réalisation en chaque point, il est nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses et notamment l'hypothèse de stationnarité intrinsèque qui est satisfaite quand : $E(Z(s_{i+h}) - Z(s_i)) = m(h) = 0$ pour tout $i \in D$ et $\text{cov}\{Z(s_i), Z(s_{i+h})\} = C(h)$ ne dépend que de h . C'est-à-dire que l'espérance mathématique ne dépend pas du point s et que la covariance dépend seulement de la séparation h . Plus intuitivement "tout se passe de la même manière dans toutes les régions de l'espace" (Arnaud 1999). Le variogramme ou semi-variogramme (Matheron 1963) donne une description de la manière dont les données sont corrélées avec la distance. Le variogramme empirique se calcule avec les données selon la formule : $\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z(s_{i+h}) - z(s_i))^2$ où $N(h)$ est le nombre de paires de points distincts distants de h . Sous l'hypothèse de stationnarité, le variogramme théorique existe ; il vaut $2\gamma(h) = \text{var}(Z(s_{i+h}) - Z(s_i))$ et est équivalent à la covariance ($\gamma(h) = C(0) - C(h)$). Ce variogramme théorique provient de la modélisation du variogramme empirique et sert alors pour faire l'estimation locale par krigeage.

L'existence d'une tendance à grande échelle viole l'hypothèse de stationnarité ($m(h)$ non nulle et non constante). Il existe plusieurs méthodes comme le median polishing ou la régression locale pour supprimer cette tendance et explorer seulement les variations locales. La technique préconisée par certains auteurs (Kaluzny *et al.*, 1998) consiste alors à effectuer un krigeage sur les résidus de la régression locale. Cette démarche a été utilisée sur les données de la grille de carrés, implantées dans S-Plus (annexe 2) à partir de la table MAPINFO. Les positions ont été conservées dans un système de coordonnées géographiques et les données ont été traitées après une transformation logarithmique pour améliorer la représentation du comptage terrestre. Les variogrammes des résidus de la régression locale sont modélisés par un modèle sphérique pour le comptage aérien et un modèle exponentiel pour le comptage terrestre (Fig. 14). Le modèle est choisi au préalable puis ajusté automatiquement aux données selon le critère des moindres carrés. Après vérification de l'isotropie (constance du variogramme selon la direction) sur les variogrammes directionnels, les

paramètres des variogrammes théoriques (pépite, portée et plateau) sont utilisés pour le krigeage. Les valeurs prédites sont alors ajoutées aux valeurs de la régression locale pour obtenir les représentations finales (Figs 15 et 16).

Fig. 14. Variogrammes empiriques et théoriques des résidus de la régression locale pour (a) le comptage aérien et (b) le comptage terrestre. *Les distances sont données en degrés (1 degré=111,48 km).*

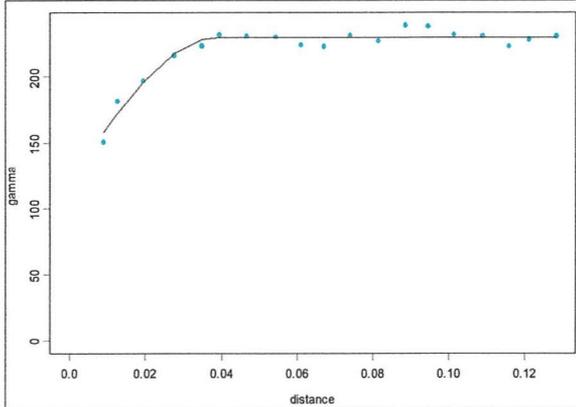


Fig. 15. Répartition des bovins par krigeage, comptage terrestre

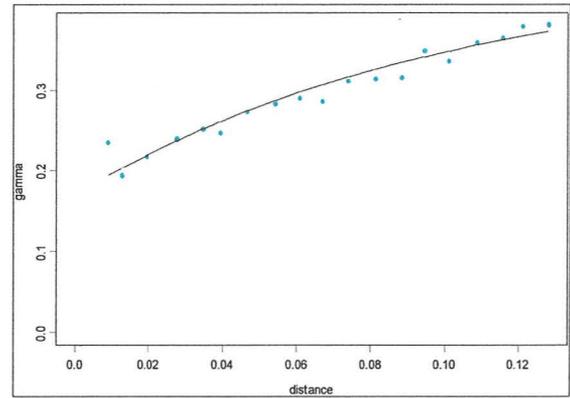
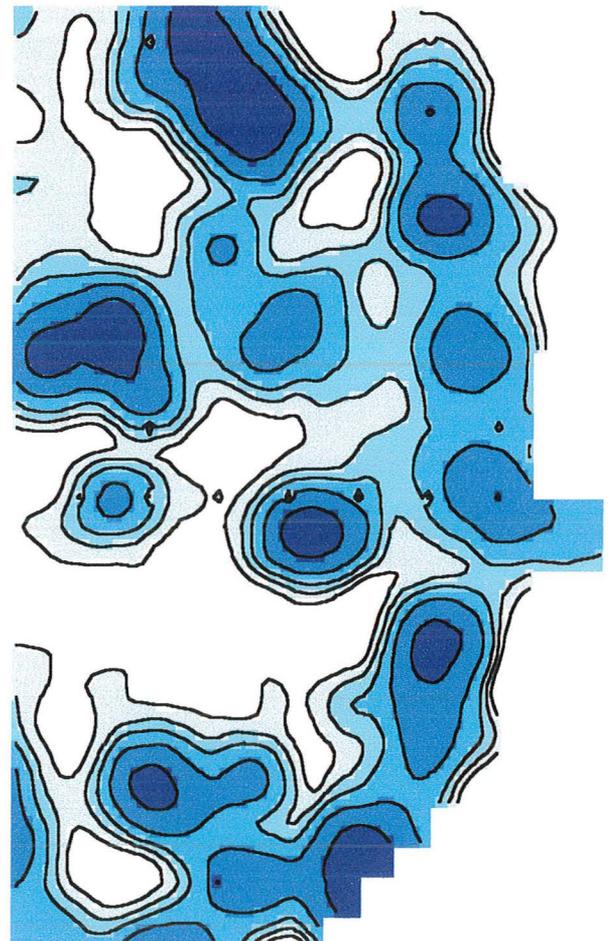
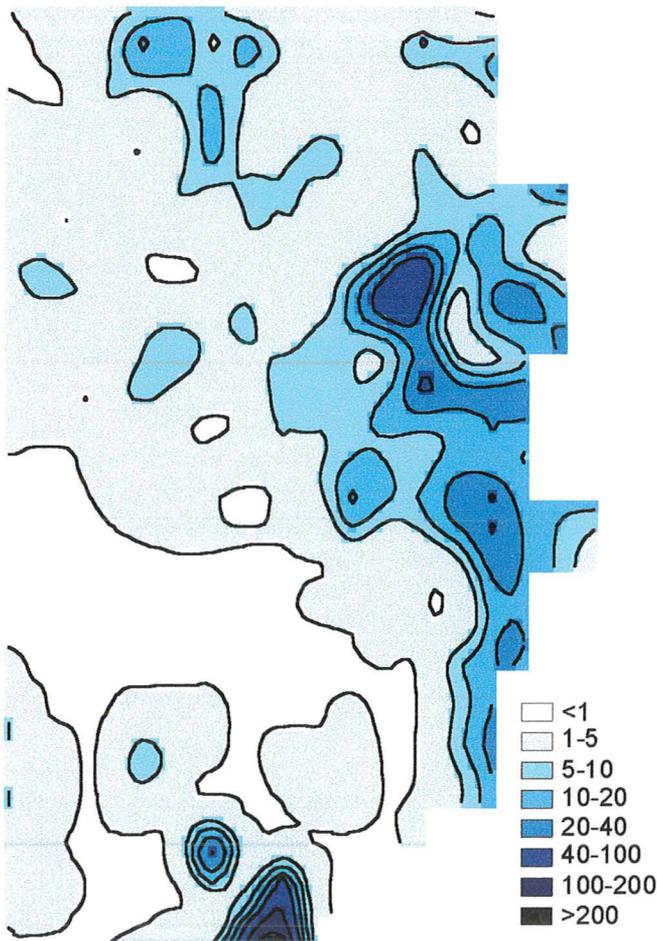


Fig. 16. Répartition des bovins par krigeage, comptage aérien



Malgré la transformation logarithmique, la répartition des bovins comptés dans les habitations semble toujours aussi zonale (deux zones de peuplement à l'est et au sud). Le krigeage a accentué l'effet de tâches de la répartition des bovins dans le milieu alors que la représentation des bovins

dans les habitations est assez peu modifiée par rapport au lissage par régression locale. Le krigeage est une autre technique de représentation des données qui permet de faciliter la lecture des cartes. Cependant, il est bien plus complexe à réaliser que la régression locale pour un apport d'information et une amélioration des représentations assez réduits.

Les techniques de lissage présentées dans ce paragraphe permettent de formaliser les structures spatiales et sont des outils précieux pour analyser les variations à l'échelle globale et locale des densités de bovins. Il existe d'autres statistiques pour caractériser la structure spatiale d'un semis de points, comme des troupeaux de jour ou des troupeaux de nuit, à différentes échelles.

III.2. Analyse de la structure spatiale des unités d'enquêtes

La position des unités d'enquête correspond aux habitations pour les troupeaux de nuit (comptage terrestre) et à une position dans le milieu pour les troupeaux de jour. Pour simplifier le discours, les troupeaux de nuit ou d'habitations seront parfois résumés dans le terme d'habitations alors que les troupeaux de jour, situés dans le milieu, seront nommés, par abus, troupeaux.

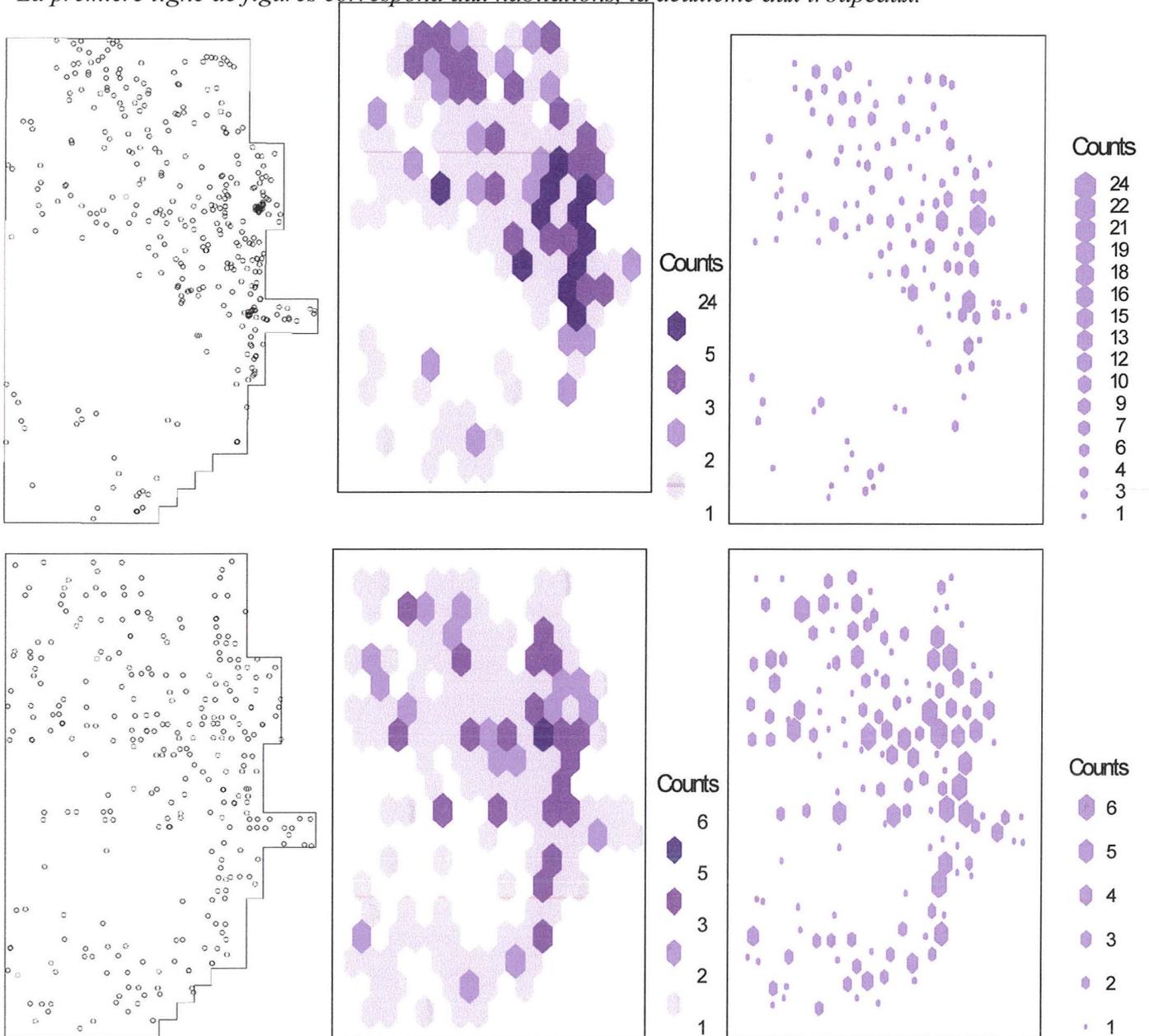
III.2.1. Représentation

A l'instar des effectifs bovins, il est possible de représenter la répartition spatiale des troupeaux et des habitations sur des cartes de points (Figs 4 et 5), ou de résumer l'information dans une grille de carrés et d'appliquer les diverses techniques de lissage présentées auparavant (annexe 3). Il existe cependant divers outils statistiques permettant de partir directement des processus ponctuels pour représenter la densité de points.

Le module spatial du logiciel S-Plus possède quelques fonctions, faisant appel aux principes des SIG, qui permettent de représenter la densité de points à partir d'un semis par des cellules hexagonales dont la couleur ou la taille sont paramétrables (Fig. 17) ce qui revient en fait à choisir un paramètre de lissage ou représenter les données dans une grille de carrés plus ou moins grands (annexe 4). L'outil est donc nettement plus souple qu'un SIG dans lequel il faut construire la grille de carrés, projeter les points puis les sommer pour chaque carré. Par ailleurs, la représentation des données en cellules hexagonales est plus facile à lire qu'une représentation en carrés (Carr, 1992).

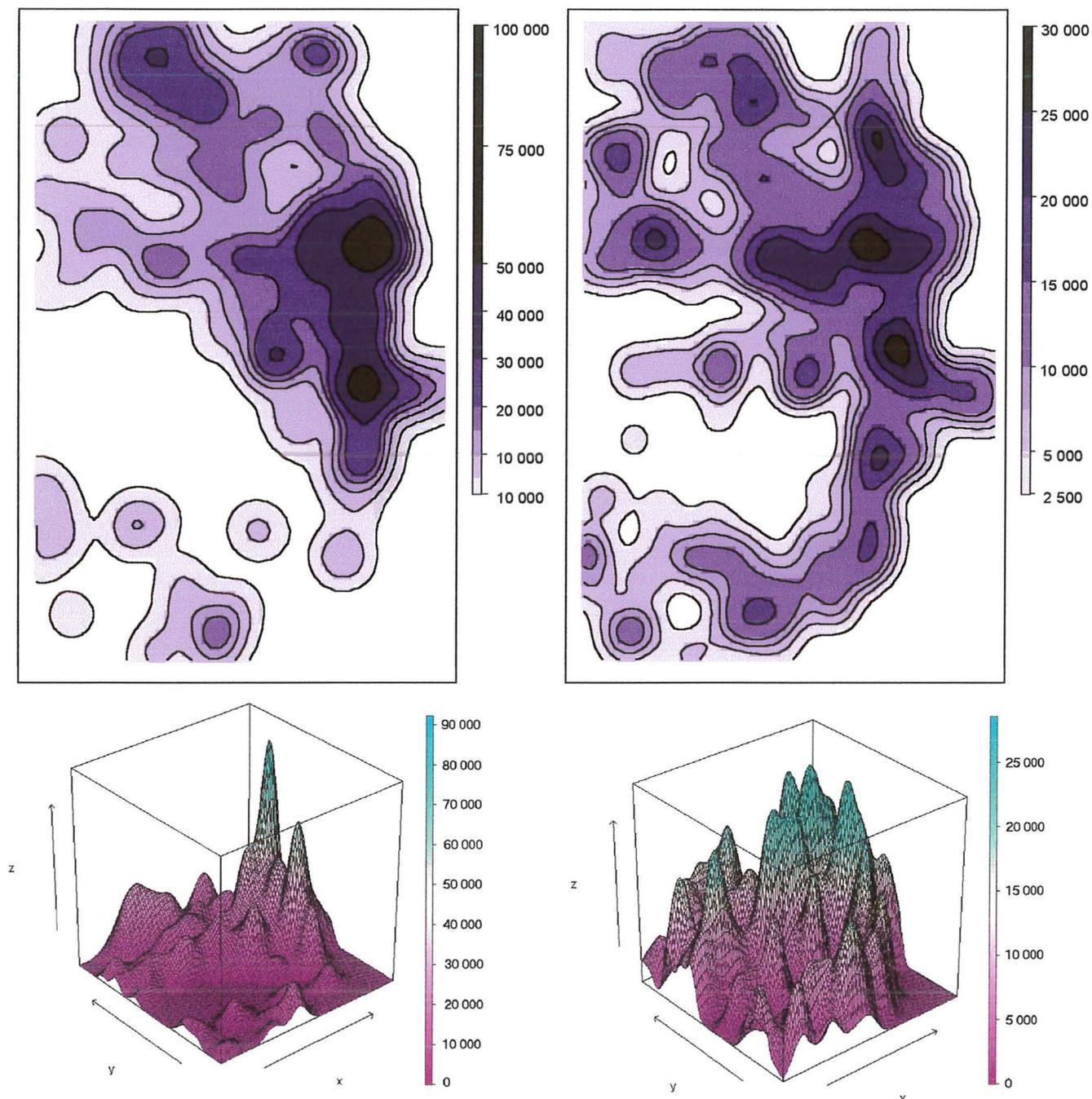
Contrairement à la représentation des densités de bovins pour laquelle les points sont affectés d'un nombre de bovins, la représentation d'une densité de points se heurte au problème de la dimension des unités. Il est donc impossible d'appliquer les techniques de lissage pour estimer localement la densité de points à partir du semis directement. Les méthodes de la grille de carrés ou celles des hexagones sont des moyens de contourner ce problème en créant des unités dimensionnées (à chaque carré de la grille ou chaque cellule hexagonale est affecté un nombre de points). La valeur de la densité des points est alors "estimée" localement d'une manière constante (la valeur est la même en tout point du carré ou de la cellule).

Fig. 17. Représentations des semis et des densités de points par des cellules hexagonales.
La première ligne de figures correspond aux habitations, la deuxième aux troupeaux.



Il existe d'autres méthodes pour donner une dimension aux points et parmi elles les méthodes non paramétriques d'estimation de la densité locale des points dites méthodes des noyaux (Silverman 1986). Une de ces méthodes consiste à affecter à chaque point du semis une loi normale bivariée comme si le troupeau ou l'habitation avaient une densité de probabilité de présence autour du point où ils ont été vus. Les densités de points sont ensuite estimées localement en sommant les probabilités de présence. Les paramètres de la loi normale bivariée affectée à chaque point correspondent à un paramètre de lissage qui peut varier selon la direction. Il existe des formules pour calculer ce paramètre (Venables et Ripley 1994), mais il est souvent préconisé de procéder par essais (Kaluzny *et al.* 1998). Le paramètre utilisé est identique et constant selon la direction pour les deux semis de points (troupeaux et habitations) (annexe 4). Outre les cartes de densités de points il est possible de représenter les profils de la somme des lois normales bivariées (Fig. 18).

Fig. 18. Cartes de densités et profils des sommes de lois normales bivariées des habitations (à gauche) et des troupeaux dans le milieu (à droite)



Les figures et les différences d'échelles montrent les différences de répartition des points. Les habitations sont nettement plus agrégées que les troupeaux dans le milieu. Comme pour les densités de bovins vues par les troupeaux de nuit, la répartition des habitations est très zonale (avec une forte accumulation dans la zone du front pionnier à l'est, et deux pics qui correspondent aux villages) alors que les troupeaux semblent bien mieux répartis dans toute la zone, toujours en "tâches". Par ailleurs, la densité des habitations ne correspond pas à la densité des bovins dans celles-ci contrairement à la densité de troupeaux qui correspond bien à la densité des bovins dans le milieu (cartes 9 et 10). Les pics de densités des troupeaux d'habitations (Fig. 18) ne correspondent pas aux pics de densités des bovins dans ces troupeaux (Fig. 12), alors que les pics de densités de troupeaux

de jour (Fig. 18) correspondent mieux aux pics de densités de bétail dans le milieu (Fig. 13). Ceci confirme la plus forte variabilité des effectifs bovins dans les habitations par rapport aux troupeaux, et l'influence des très gros effectifs dans quelques habitations situées au sud de la zone.

La méthode des noyaux est un bon moyen de visualiser la structure spatiale d'un semis de points. Il existe d'autres méthodes statistiques pour caractériser et tester cette structure spatiale.

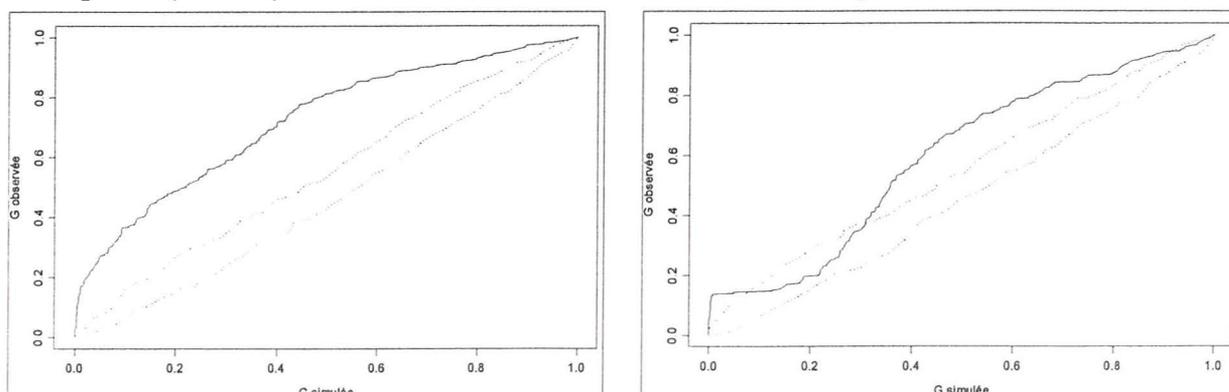
III.2.2. Caractérisation

De nombreuses méthodes statistiques sont disponibles pour tester la structure spatiale d'un semis de points (Diggle 1983). L'hypothèse nulle fondamentale est que le processus ponctuel est complètement aléatoire, c'est-à-dire que la densité de points est constante dans toute la zone et qu'il n'existe aucune interaction entre les points. Les techniques de Monte Carlo sont largement utilisées dans les tests : la statistique observée est confrontée à celle d'un processus aléatoire, suivant une loi de Poisson, généré par simulations. La moyenne des simulations donne une référence alors que les maxima et minima permettent de tracer l'intervalle de confiance du test. Les tests du caractère aléatoire d'un semis de points reposent presque tous sur des méthodes graphiques.

III.2.2.1. Distance au plus proche voisin

Cette statistique (notée G) consiste à compter pour une distance y le nombre de fois où la distance y_i d'un point à son plus proche voisin est inférieure à y : $G(y) = n^{-1} \sum_{y_i \leq y} 1$ où n est le nombre total de points. Elle permet d'explorer les interactions locales entre points. Il est possible de tracer la fonction de densité observée de G , mais il est plus intéressant de tracer cette densité en fonction de la densité observée sur une simulation d'un processus aléatoire (annexe 4). La ligne de référence et les lignes délimitant l'intervalle de confiance du test sont déterminées par simulations. Si la densité de G observée se trouve dans l'intervalle de confiance, le processus ponctuel est aléatoire, si elle est au dessus, cela signifie qu'il y a un excès de points voisins et donc agrégation alors que si elle est en dessous c'est l'inverse, il y a surdispersion. Les tests effectués pour les habitations et les troupeaux (Fig. 19) montrent que les deux processus sont agrégatifs mais que les habitations sont plus agrégées que les troupeaux dans le milieu dont la répartition est parfois aléatoire.

Fig. 19. Graphes des fonctions de densité de G observées pour les habitations (à gauche) et les troupeaux (à droite) et des limites d'une fonction de densité d'un processus aléatoire simulé.



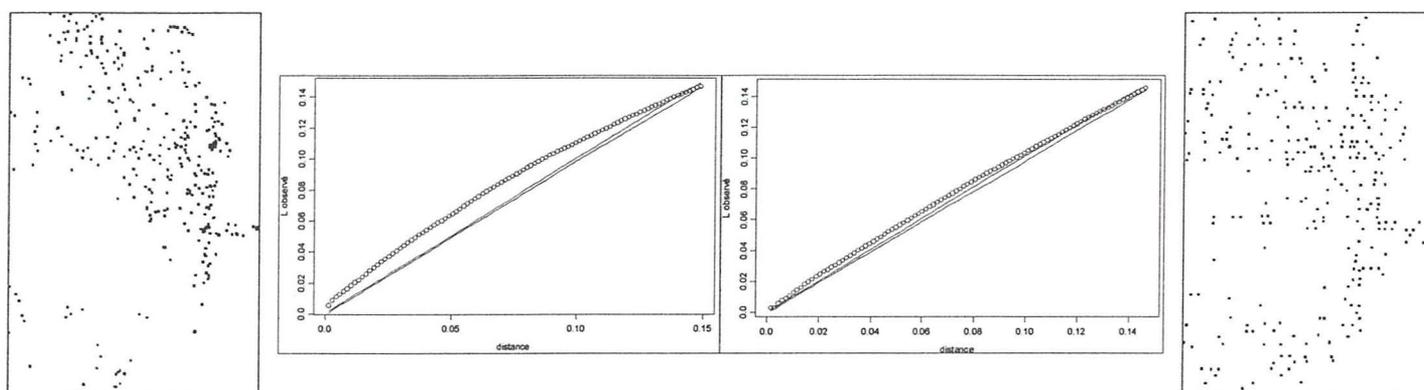
La statistique du plus proche voisin est intéressante mais elle se limite aux relations locales or l'agrégation des points peut se concevoir à plusieurs échelles.

III.2.2.2. Fonction $K(r)$ de Ripley

Cette statistique permet l'analyse de la répartition spatiale d'un semis de points à différentes échelles. Son principe consiste à compter pour chaque point i le nombre de points j présents dans un cercle de rayon r et de centre i et de le comparer au nombre de points attendus dans le cas d'un processus aléatoire (Ripley 1976). L'analyse multiéchelle provient de la variation du cercle d'un rayon $r + dr$ à chaque pas (Fig. 20).

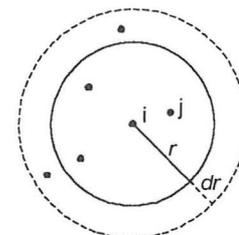
En outre, la fonction de Ripley permet de comparer des structures spatiales de processus d'intensités variables. Dans la pratique la fonction utilisée est une fonction transformée (notée $L(r)$) de la fonction de Ripley qui est plus facilement interprétable et dont l'estimateur a une variance plus stable (Besag 1977). La statistique $L(r)$ observée est tracée en fonction du rayon du cercle et les limites de la fonction pour un processus aléatoire sont déterminées par simulations. Le principe d'interprétation graphique du test repose sur la démarche exposée précédemment. Cette méthode statistique a été mise en œuvre dans S-Plus (annexe 4) sur les habitations et les troupeaux (Fig. 21).

Fig. 21. Semis de points des habitations (à gauche) et des troupeaux (à droite) et fonctions de Ripley modifiées associées



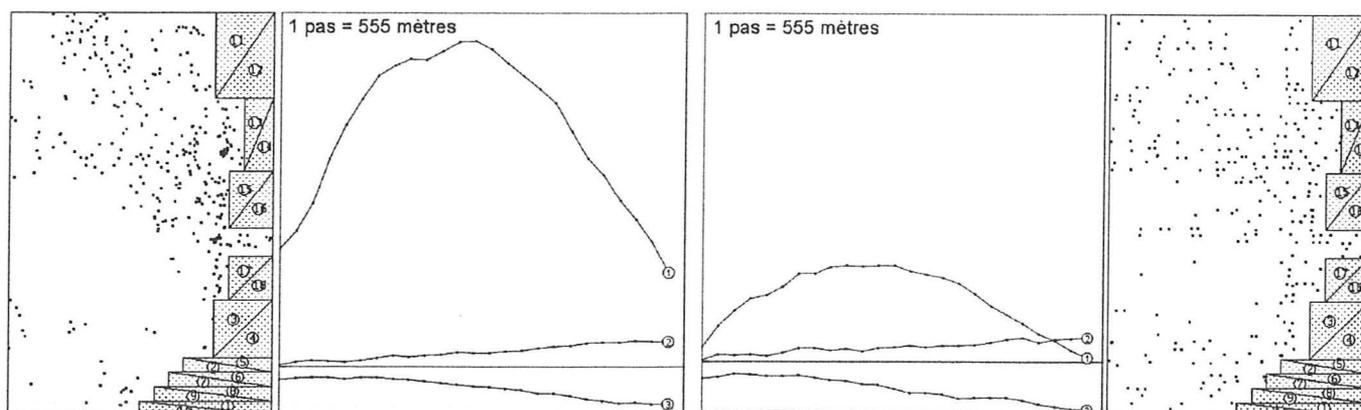
Quelle que soit l'échelle, les habitations sont plus agrégées que les troupeaux dont la répartition semble presque aléatoire. Il convient néanmoins de faire une remarque. La fonction de Ripley dans S-Plus intègre des corrections pour les effets de bordure, mais celles-ci sont limitées aux zones rectangulaires, or la zone d'étude ne l'est pas (Fig. 3). La fonction de Ripley est donc calculée sur une partie de la zone qui est vide de points parce qu'elle n'a pas été explorée et non parce qu'elle est réellement vide. Le module spatial d'ADE offre la possibilité de travailler sur des zones irrégulières en excluant des triangles d'une zone rectangulaire (Goreaud & Pélissier 1999). Cette méthode a été appliquée en créant les triangles d'exclusion dans MAPINFO et en exportant les coordonnées de leurs sommets dans ADE, avant de calculer les fonctions de Ripley (Fig. 22). La différence de

Fig. 20. Principe de la fonction de Ripley



présentation des graphiques provient d'une modification dans la formule de correction de la fonction de Ripley. La courbe observée est la courbe n°1.

Fig. 22. Semis de points des habitations (à gauche) et des troupeaux (à droite) et fonctions de Ripley modifiées associées



Le pas correspond à l'accroissement du rayon du cercle. Ces graphiques montrent tous les deux une tendance à l'agrégation des points avec des nuances :

- les troupeaux sont globalement moins agrégés que les habitations,
- à l'échelle de 1 km², qui correspond au premier pas de la fonction et qui est une échelle opérationnelle d'échantillonnage pour mettre en œuvre des dénombrements, les habitations sont très nettement agrégées par rapport aux troupeaux dont la répartition est presque aléatoire,
- les maximums d'agrégation des deux unités correspondent à la même échelle, soit environ 160 km², ce qui correspond grossièrement à la taille des zones agroécologiques et confirme les différentes vocations agricoles de ces zones,
- à l'échelle de toute la zone (extrémité des courbes), les troupeaux se répartissent de manière aléatoire alors que les habitations restent agrégées.

L'analyse sur toute la zone de la répartition des points est intéressante. Cependant, un certain nombre d'effets comme la présence des villages (amas de points à l'est de la zone) ou la présence d'une grande zone vide dans les deux semis tendent certainement à augmenter l'agrégation et risquent de masquer des caractéristiques locales de la répartition des points. Pour explorer ces caractéristiques, la même procédure a été appliquée à des parties relativement homogènes des deux semis de points en excluant les villages et la partie vide (Figs 23 et 24).

Les profils généraux des graphiques confirment la plus forte agrégation des habitations par rapport aux troupeaux qui se répartissent aléatoirement dans le milieu quelle que soit l'échelle considérée. Cette répartition aléatoire des troupeaux indique que tout le milieu est accessible aux animaux (à la période du comptage aérien les parcelles agricoles ne sont pas encore cultivées), qu'il n'y a manifestement pas de pâturage préférentiel (il y aurait agrégation) et que la capacité maximale de charge du milieu n'est vraisemblablement pas atteinte puisque les troupeaux peuvent aller n'importe

où et trouver du fourrage (dans le cas contraire il y aurait surdispersion, les troupeaux auraient tendance à s'éloigner les uns des autres).

Fig. 23. Fonctions de Ripley modifiées sur les habitations dans trois parties des zones agroécologiques. La flèche indique l'échelle correspondant à 1 km^2 .

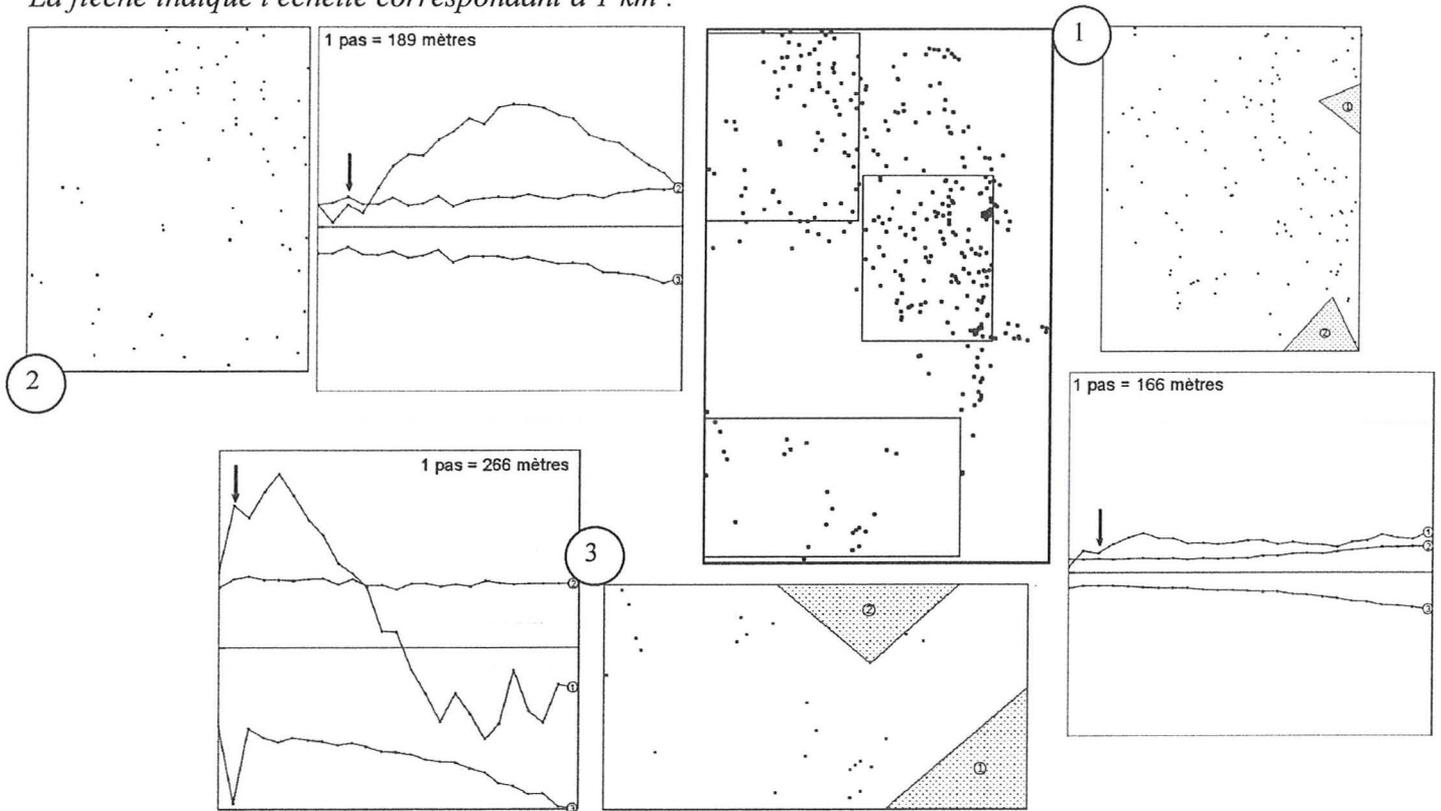
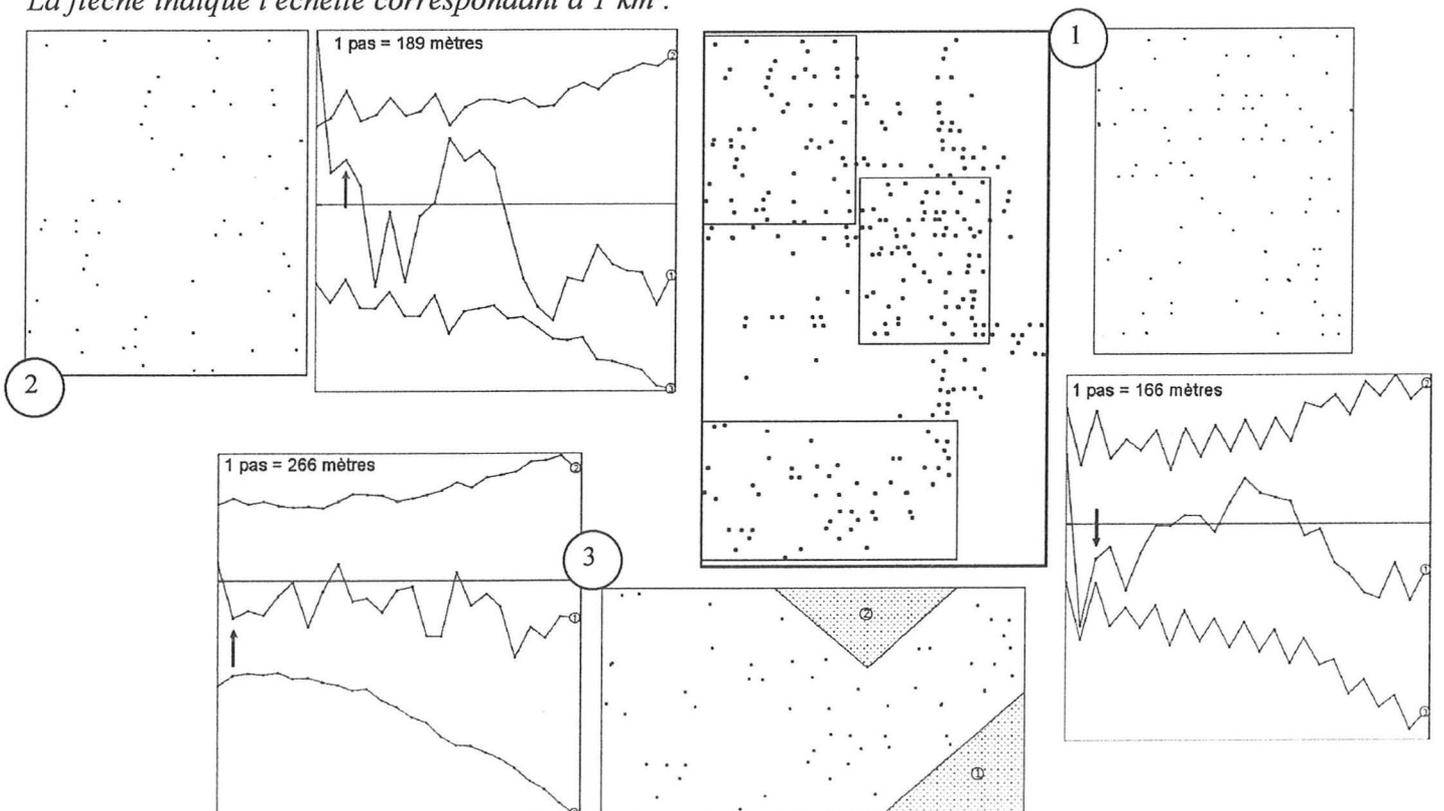


Fig. 24. Fonctions de Ripley modifiées sur les troupeaux dans trois parties des zones agroécologiques. La flèche indique l'échelle correspondant à 1 km^2 .



En ce qui concerne les habitations, les caractéristiques de leur répartition peuvent être interprétées :

- dans la zone 1 à forte dynamique agricole (front pionnier de migration), l'agrégation des habitations est constante à toutes les échelles. Le stade de saturation du milieu en cultures est certainement en train d'être dépassé. La dynamique d'occupation a dû passer par une phase aléatoire puis une phase de surdispersion (les espaces vides ont été occupés) lorsque le milieu a été saturé et enfin par une phase d'agrégation (les nouveaux arrivants n'ont d'autre choix que celui de venir s'installer près des cultivateurs déjà installés) ce qui est confirmé par la confluence des parcelles cultivées (Fig. 1);
- dans la zone 2, les habitations se répartissent de manière aléatoire à petite échelle, puis s'agrègent à une échelle supérieure. Cette agrégation correspond aux campements de culture (définition § 1.2.1) qui sont bien identifiés (Missidoukou, Soundougoudian) et correspondent à des entités ethniques traditionnelles. Mais dans cette zone à vocation essentiellement agricole, l'espace n'est pas saturé et au sein d'un campement les habitants peuvent choisir librement leur implantation et ont donc tendance à se répartir de manière aléatoire;
- dans la zone 3, le profil de répartition est l'inverse de celui de la zone 2. Il indique pourtant le même phénomène : l'espace n'est pas saturé, mais la différence provient de la vocation pastorale de cette zone. En effet, les éleveurs Peuls présents majoritairement cultivent très peu. Souvent de la même famille, ils ont tendance à se regrouper en quasi-villages pour faciliter la gestion des troupeaux (garde, parcs de nuit, traite, etc.) et faire pâturer leurs animaux dans toute la zone (cf la répartition aléatoire des troupeaux dans cette zone).

Les statistiques spatiales présentées permettent d'analyser, de formaliser et de tester la structure spatiale à l'échelle globale et locale des peuplements bovins appréhendés par deux les techniques de dénombrements et d'améliorer les représentations cartographiques. Elles confirment les différences entre les résultats des dénombrements pressenties lors de l'analyse géographique, notamment la plus forte variabilité du nombre de bovins par habitation et la plus forte agrégation de ces unités par rapport aux troupeaux et à leurs effectifs bovins.

L'analyse de la répartition des points est une méthode puissante. Ses avantages sont multiples et ne se limitent pas au simple test du mode de répartition. L'analyse multiéchelle permet d'analyser un phénomène à tous les niveaux et de mettre en relation sa structure spatiale avec d'autres indicateurs comme la dynamique agricole ou la sociologie. Les statistiques spatiales pourraient être alors vues comme une forme de SIG dans la mesure où elles offrent une capacité d'analyse synthétique d'un phénomène (plusieurs niveaux connectés à d'autres phénomènes).

Discussion - conclusion

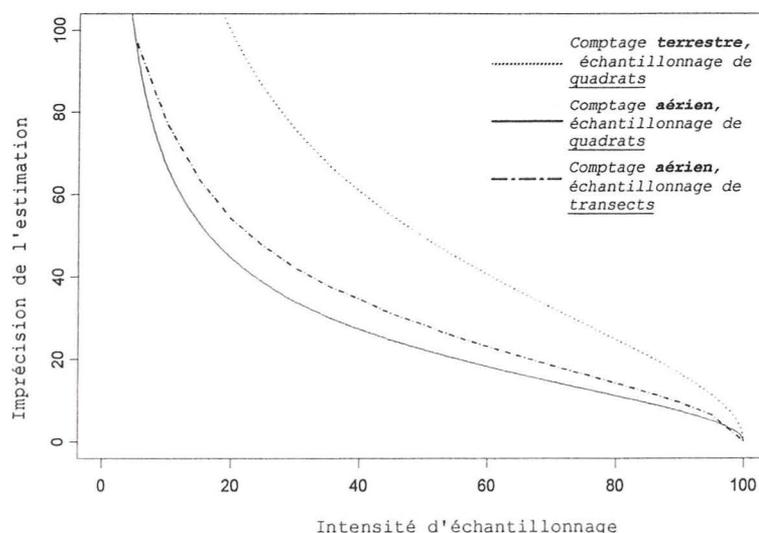
Les techniques de dénombrements utilisées sont basées sur des unités différentes pour atteindre un même objectif : évaluer le nombre de bovins dans une zone, mais elles ne représentent pas le même événement. Le comptage aérien donne une image instantanée de la répartition des animaux dans le milieu alors que le comptage terrestre donne une image de la répartition des propriétaires de bovins et de leurs effectifs détenus. La démarche analytique employée confirme à toutes les étapes l'antinomie entre les résultats obtenus par les deux techniques de dénombrement :

- le nombre de bovins dans les habitations est bien plus variable que dans les troupeaux,
- les habitations sont très agrégées dans le milieu alors que les troupeaux se répartissent de manière beaucoup plus aléatoire,
- la répartition des effectifs dans les habitations est très liée à la vocation agro-écologique de la zone, comme la répartition des habitations elles-mêmes, mais les deux modes de répartition ne coïncident pas. La zone de forte densité d'habitations ne correspond pas à la zone de plus forte densité de bovins dans les habitations,
- la répartition des troupeaux et des bovins dans le milieu est indépendante de la vocation agro-écologique de la zone et les deux cartes de densités correspondent. Aux fortes densités de troupeaux correspondent des fortes densités de bovins.

Toutes ces conclusions sont lourdes de conséquences sur les protocoles à envisager dans le cas d'un dénombrement par échantillonnage. Dans la mesure où les unités sont plus stables, et mieux réparties dans le milieu, les dénombrements aériens seront plus précis que les dénombrements terrestres pour une même intensité d'échantillonnage. Sur la base des données disponibles, une simulation des résultats obtenus par échantillonnage aléatoire de quadrats de 1 km² ou de transects (Fig. 25) confirme la plus grande efficacité du comptage aérien.

La médiocrité des résultats obtenus par comptage terrestre s'explique par la présence de très grosses unités. Il suffit de "rater" une des 13 habitations qui contient beaucoup de bovins pour sous-estimer fortement l'effectif total de la zone. Par ailleurs, il semble difficile de l'améliorer, même en faisant un échantillonnage stratifié. En effet les habitations à fort effectif correspondent à des cours d'éleveurs Peuls qui ne sont pas regroupés en villages bien identifiés. Il n'est donc

Figure 13 : Erreur (en % de la vraie valeur) de l'estimation de l'effectif total dans la zone commise pour les deux techniques de dénombrement et différents types d'échantillonnages



pas intéressant de s'appuyer sur les villages pour stratifier. En outre, bien qu'associées à une zone à vocation pastorale (avec peu de cultures), ces habitations sont trop peu nombreuses et trop agrégées pour qu'un indicateur comme le parcellaire agricole soit un bon critère de stratification. La variation est telle qu'elle ne peut pas être détectée par des indicateurs faciles à obtenir (image SPOT ou données administratives). Enfin, une évaluation financière des deux opérations montre que le prix de revient du kilomètre carré exploré est de 50 FF pour le comptage aérien alors qu'il est de 125 FF pour le comptage terrestre. Le comptage terrestre est donc plus long, plus cher et moins précis que le comptage aérien. Néanmoins, le comptage terrestre permet de relever beaucoup plus d'informations sur le milieu, les pratiques d'élevage et surtout, il est fondé sur des unités fixes qui pourront être retrouvées et constituer une base de sondage intéressante pour d'autres opérations en milieu éleveur, alors que le comptage aérien ne produit qu'une estimation de l'effectif bovin. Par ailleurs, la cartographie des résultats des deux techniques ne décrivent pas le même phénomène. Le choix d'une méthode de dénombrement doit donc se faire en fonction des objectifs. Ces méthodes peuvent aussi s'envisager ensemble, le comptage aérien pour évaluer les effectifs et la répartition des animaux et le comptage terrestre pour affiner l'étude des systèmes d'élevage et constituer une base de sondage.

La démarche méthodologique employée montre la complémentarité des outils d'analyse spatiale et les avantages du couplage entre SIG et outils statistiques. Le monde des géographes et celui des biométriciens ne communiquent pas beaucoup, or les deux systèmes permettent de représenter, d'analyser, de formaliser des phénomènes à composante spatiale et de générer des données pour en extraire commodément des synthèses utiles à la décision, ce qui est la définition d'un SIG. Les relations entre les outils sont bilatérales. Le SIG permet de cartographier, de transformer et de mettre en relation des informations spatiales et les statistiques permettent de caractériser les structures spatiales et d'en donner des représentations qui peuvent être réintégrées dans le SIG. Plus qu'un objet informatique, un SIG est donc avant tout un concept d'analyse spatiale dans lequel les statistiques ont toute leur place. Ce concept est particulièrement utile pour analyser et modéliser des phénomènes complexes multi-factoriels. Il a été appliqué aux dénombrements d'animaux domestiques mais ses champs d'application sont très étendus, notamment en écologie, en production et en santé animale (Hendrickx *et al.* 1997; Robinson 1997; Cuisance et de La Rocque 1998). L'étude d'autres phénomènes générera certainement de nouveaux problèmes méthodologiques d'analyse spatiale et des problèmes techniques d'interfaces entre logiciels de SIG et d'analyse statistique. Elle permettra d'affiner et d'améliorer ces interfaces et d'aborder d'autres statistiques spatiales.

Bibliographie

1. Arnaud, M. & Emery, X. (1999) *Estimation et interpolation de variables régionalisées. Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*. Montpellier, France. CIRAD-EMVT. 57 p.
2. Augusseau, X., Pare, S. & Fare, B. (1998) *Caractérisation régionale de l'emprise agricole et de sa dynamique dans une zone de migration*. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. INERA. 20 p.
3. Bahili, J. & Bakary, D. (1993) L'enquête nationale sur les effectifs du cheptel au Burkina Faso. *STATECO*, **73**, 49-62.
4. Besag, J.E. (1977) Comments on Ripley's paper. *Journal of Royal Statistical Society*, **B39**, 193-195.
5. Carr, D.B., Olsen, A.T. & White, D. (1992) Hexagon mosaic maps for display of univariate and bivariate geographical data. *Cartography and Geographical Information Systems*, **19**, 228-236.
6. Chessel, D. (1999) *Introduction au logiciel S-Plus : fiche n°5 "Quelques fonctions"*. Lyon, France. Université Lyon I. 36 p.
7. Cleveland, W.S. & Devlin, S.J. (1988) Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, **83**, 596-610.
8. Cressie, N.A.C. (1993) *Statistics for spatial data*. Revised edition, Wiley, New York.
9. Cuisance, D. & de La Rocque, S. (1998) *Tsé-tsé et trypanosomes : du système pathogène à l'évaluation du risque*. Montpellier, France. CIRAD-EMVT, CNRS. 91 p.
10. De Haan, C., Steinfeld, H. & Blackburn, H. (1997) *Livestock and the environment. Finding a balance*. Bruxelles, Belgium. EU.
11. De La Rocque, S. (1997) *Identification des facteurs discriminants majeurs de la présence des glossines dans une zone agro-pastorale du Burkina Faso. Intérêt pour la prévention du risque trypanosomien*. Thèse de Doct. Sc. Univ. Montpellier 2, France. 162 p.
12. Denegre, J. & Salge F. (1996) *Les systèmes d'information géographique. Que sais-je ?* Vol. 3122. PUF, Paris.
13. Diggle, P.J. (1983) *Statistical analysis of spatial point patterns* (eds R. Sibson & J.E. Cohen), Mathematics in biology. Academic Press, New York.
14. Goreaud, F. & Pélissier, R. (1999) On explicit formulas of edge effect correction for Ripley's K-function. *Journal of Vegetation Science*, **10**, sous-presse.
15. Hendrickx, G., Slingenbergh, J.H.W., Dao, B., Bastiansen, P. & Napala, A. (1997) Système d'information géographique (SIG), outil puissant de prise de décision. In : 24^e réunion du Conseil Scientifique International pour la Recherche et la Lutte Contre les Trypanosomiasés (CSIRLT), Maputo, Mozambique, 1997, OUA/CSTR.
16. Kaluzny, S.P., Vega, S.C., Cardoso, T.P. & Shelly, A.A. (1998) *S+ Spatial Stats. User's Manual for Windows and Unix*. Springer, New York.
17. Matheron, G. (1963) Principles of geostatistics. *Economic Geology*, **58**, 1246-1266.

18. Meallet, C. (1997) *Recensement et cartographie du cheptel bovin dans la zone de Sidéradougou, Burkina Faso*. Mémoire de DESS. CIRAD-EMVT, Montpellier, France. 51 p.
19. Michel, J.F. (1997) *Recensement du cheptel bovin dans la zone de Sidéradougou, Burkina Faso*. Montpellier, France. CIRAD-EMVT. 15 p.
20. Norton-Griffiths, M. (1978) *Counting animals* (ed. J. Grimsdell), 2nd edn. African Wildlife Leadership Foundation, Nairobi, Kenya.
21. RIM. (Resource Inventory and Management) (1985) *A Review of Aerial Survey Findings in West Africa*. Addis Ababa, Ethiopia. ILCA. 45 p.
22. RIM. (Resource Inventory and Management) (1989) *Livestock and land use in Niger and Anambra states, Nigeria*. Abuja, Nigeria. Federal Livestock Department. 56 p.
23. Ripley, B.D. (1976) The second order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*, **13**, 255-266.
24. Ripley, B.D. (1981) *Spatial statistics*. Wiley, New York.
25. Robinson, T. (1998) Geographic information systems and the selection of priority areas for control of tsetse-transmitted trypanosomiasis in Africa. *Parasitology Today*, **14**(11), 457-461.
26. Seber, G.A.F. (1982) *The estimation of animal abundance and related parameters*. 2nd edition. Griddin, London.
27. Seber, G.A.F. (1992) A Review of Estimating Animal Abundance II. *International Statistical Review*. **60**(2), 129-166.
28. Silverman, B.W. (1986) *Density estimation for statistics and data analysis* (eds D.R. Cox, D.V. Hinkley, D. Rubin & B.W. Silverman). Monographs on statistics and applied probability, Chapman and Hall, London.
29. Skalski, J.R. (1990) *Techniques for Wildlife Investigations. Design and Analysis of Capture Data*. Academic Press, New York.
30. Slingenbergh, J.H.W. & Wint, W. (1997) Livestock geography and land use. In : Conférence internationale élevage et environnement, Wageningen, Netherland.
31. Toutain, B., Dumas, R. & Tacher, G. (1978) *Zone pastorale d'accueil de Sidéradougou (Haute Volta). Etude préliminaire*. Maisons-Alfort, France. IEMVT.
32. Venables, W.N. & Ripley, B.D. (1994) *Modern applied statistics with S-PLUS*. Springer-Verlag, New York.
33. Wint, W. & Bourn, D. (1994) *Anthropogenic and Environmental Correlates of Livestock Distribution in Sub-Saharan Africa. A Comparative Analysis of Livestock Surveys in Mali, Niger, Nigeria, Sudan and Tchad*. London. The Overseas Development Administration. 58 p.

Annexe 1. Distributions des effectifs bovins et lois normales associées

```
> graphsheet(5, 10)
> par(mfrow = c(2, 1))

#comptages aeriens
> logvolbov <- log(pointvol$bov)
> length(logvolbov)
[1] 304
> z <- logvolbov
> x <- as.data.frame(z)
> names(x) <- "z"
> minz <- min(z)
> maxz <- max(z)
> n <- length(z)
> zz <- seq(from = minz, to = maxz, le = 100)
> p <- 0.5
> m1 <- mean(z[z <= quantile(z, p)])
> m2 <- mean(z[z >= quantile(z, p)])
> v1 <- var(z[z <= quantile(z, p)])
> v2 <- var(z[z >= quantile(z, p)])
> break0 <- seq(0, 6, le = 12)
> w0 <- vector(6, mode = "numeric")
> names(w0[1:6]) <- c("n", "p", "m1", "m2", "v1", "v2")
> parameters(x) <- list(p = p, m1 = m1, m2 = m2, v1 = v1, v2 = v2)
> hist(z, breaks = break0, proba = T, density = -1, ylim = c(0, 0.7), xlim = c(0, 7),
      xlab = "log (nombre de bovins)")

>vrai_function(z,p,m1,m2,v1,v2){
  -log((p*exp((-0.5*(z-m1)^2)/v1))/sqrt(v1)+((1-p)*exp((-0.5*(z-m2)^2)/v2))/sqrt(v2)) }
> ms.fit <- ms( ~ vrai(z, p, m1, m2, v1, v2), data = x, control = T, trace = T)
Iteration: 0 , 1 function calls, F= 210.47
Parameters:
[1] 0.50000 0.91014 2.82113 0.27568 0.98982
Iteration: 29 , 40 function calls, F= 205.39
Parameters:
[1] 0.73930 1.29405 3.68882 0.62141 0.48260
> w <- ms.fit$parameters
> lines(zz, dens(zz, w[1], w[2], w[3], w[4], w[5]), lty = 1)
> lines(zz, w[1] * dnorm(zz, mean = w[2], sd = sqrt(w[4])), lty = 2)
> lines(zz, (1 - w[1]) * dnorm(zz, mean = w[3], sd = sqrt(w[5])), lty = 2)
> w
      p      m1      m2      v1      v2
0.7393 1.2941 3.6888 0.62141 0.4826

#comptages terrestres
> logcourbov <- log(pointcour$bov)
> length(logcourbov)
[1] 358
> z <- logcourbov
> hist(z, breaks = break0, proba = T, density = -1, ylim = c(0, 0.7), xlim = c(0, 7),
      xlab = "log (nombre de bovins)")
> ms.fit <- ms( ~ vrai(z, p, m1, m2, v1, v2), data = x, control = T, trace = T)
Iteration: 0 , 1 function calls, F= 146.48
Parameters:
[1] 0.50000 0.90397 2.16817 0.12944 0.90884
Iteration: 26 , 37 function calls, F= 126.25
Parameters:
[1] 0.83455 1.25309 2.98318 0.37334 1.84467
> w <- ms.fit$parameters
> lines(zz, dens(zz, w[1], w[2], w[3], w[4], w[5]), lty = 1)
> lines(zz, w[1] * dnorm(zz, mean = w[2], sd = sqrt(w[4])), lty = 2)
> lines(zz, (1 - w[1]) * dnorm(zz, mean = w[3], sd = sqrt(w[5])), lty = 2)
> w
      p      m1      m2      v1      v2
0.83455 1.2531 2.9832 0.37334 1.8447
```

Annexe 2. Régression locale et krigeage

```
trellis.device(color=F) #graphique
par(pty="s") #graphique carre
```

```
lim_as.matrix(masquegrille) #limites de la grille
grid.grille_poly.grid(lim,nx=100,ny=100) #creation de la grille de carres
grid.grille_data.frame(grid.grille)
names(grid.grille)_c("centx","centy")
```

Comptage aérien

Régression locale

```
lobjbovol_loess(bovol~centx*centy,data=grille,span=0.05,degree=1,normalize=F) #regression locale
gril_grille # sauvegarde du fichier grille initial
gril$resid.lobovol_resid(lobjbovol) #ajout des residus de la regression a la table grille d'origine
pred.lobovol_predict(lobjbovol,grid.grille) #predictions des valeurs pour la grille de carres
gril.predict_data.frame(pred.lobovol=pred.lobovol,centx=grid.grille$centx,
centy=grid.grille$centy) #construction de la table de carres avec les predictions

levelplot(pred.lobovol~centx*centy,data=gril.predict,at=c(1,5,10,20,40,100),col.region=80:15,
contour=T) #tracage des predictions sur la grille
wireframe(pred.lobovol~centx*centy,data=gril.predict,zlab="fit",drape=T) #surface predite en 3d
```

Variogrammes

```
vbovolres_variogram(resid.lobovol~centx+centy,data=gril,method="robust") #variogramme des residus de la
regression locale
plot(vbovolres,pch=16)
vbovolresdir_variogram(resid.lobovol~centx+centy,data=gril,method="robust",
azimuth=c(0,45,90,135),tol.azimuth=22.5) #variogrammes directionnels des residus
plot(vbovolresdir,pch=16)

spher.fun_function(gamma,distance,range,sill,nugget){
gamma=spher.vgram(distance,range=range,sill=sill,nugget=nugget)
} #fonction du modèle sphérique

vbovolres.nl_nls(~spher.fun(gamma,distance,range,sill,nugget),data=vbovolres,
start=list(range=0.05,sill=110,nugget=120)) #ajustement du modèle sphérique
coef(vbovolres.nl) #paramètres du modèle sphérique
plot(vbovolres,pch=16) #variogramme empirique
lines(vbovolres$dist,spher.vgram(vbovolres$dist,range=0.038644,sill=109.94,
nugget=119.89)) #modèle correspondant (variogramme théorique)
```

Krigeage

```
bovol.krige_krige(resid.lobovol~loc(centx,centy),data=gril,covfun=spher.cov,range=0.038644,
sill=109.94,nugget=119.89) #krigeage ordinaire
pred.kbovol_predict(bovol.krige,grid.grille) #predictions des valeurs pour la grille de carres
bovol.kpred_pred.lobovol+pred.kbovol$fit #ajout des predictions de krigeage aux valeurs de la regression locale
gril.predict_data.frame(pred=bovol.kpred,centx=grid.grille$centx,
centy=grid.grille$centy) #construction de la table de carres avec les predictions

levelplot(pred~centx*centy,data=gril.predict,at=c(1,5,10,20,40,100),col.region=80:15,
contour=T) #tracage des predictions sur la grille
wireframe(pred~centx*centy,data=gril.predict,zlab="fit",drape=T) #surface predite en 3d
```

Comptage terrestre

Régression locale

```
lobjbovhab_loess (logbovhab~centx*centy, data=grille, span=0.02, degree=1, normalize=F) #regression
locale
  gril$resid.lobovhab_resid(lobjbovhab) #ajout des residus de la regression a la table grille d'origine
  pred.lobovhab_predict(lobjbovhab, grid.grille) #predictions des valeurs pour la grille de carres
  gril.predict_data.frame(pred.lobovhab=pred.lobovhab, centx=grid.grille$centx,
    centy=grid.grille$centy) #construction de la table de carres avec les predictions

levelplot(pred.lobovhab~centx*centy, data=gril.predict, at=c(0, 1.61, 2.3, 3, 3.69, 4.61, 5.3, 7),
  col.region=80:15, contour=T) #tracage des predictions sur la grille
wireframe(pred.lobovhab~centx*centy, data=gril.predict, zlab="fit", drape=T) #surface predite en 3d
```

Variogrammes

```
vbovhabres_variogram(resid.lobovhab~centx+centy, data=gril, method="robust") #variogramme des residus de
la regression locale
  plot(vbovhabres, pch=16)
vbovhabresdir_variogram(resid.lobovhab~centx+centy, data=gril, method="robust",
  azimuth=c(0, 45, 90, 135), tol.azimuth=22.5) #variogrammes directionnels des residus
  plot(vbovhabresdir, pch=16)

exp.fun_function(gamma, distance, range, sill, nugget){
  gamma=exp.vgram(distance, range=range, sill=sill, nugget=nugget)
} #fonction du modèle exponentiel

vbovhabres.nl_nls(~exp.fun(gamma, distance, range, sill, nugget), data=vbovhabres,
  start=list(range=0.2, sill=0.3, nugget=0.2)) #ajustement du modèle exponentiel
coef(vbovhabres.nl) #paramètres du modèle exponentiel
plot(vbovhabres, pch=16) #variogramme empirique
lines(vbovhabres$dist, exp.vgram(vbovhabres$dist, range=0.1, sill=0.28, nugget=0.17)) #modèle
correspondant (variogramme théorique)
```

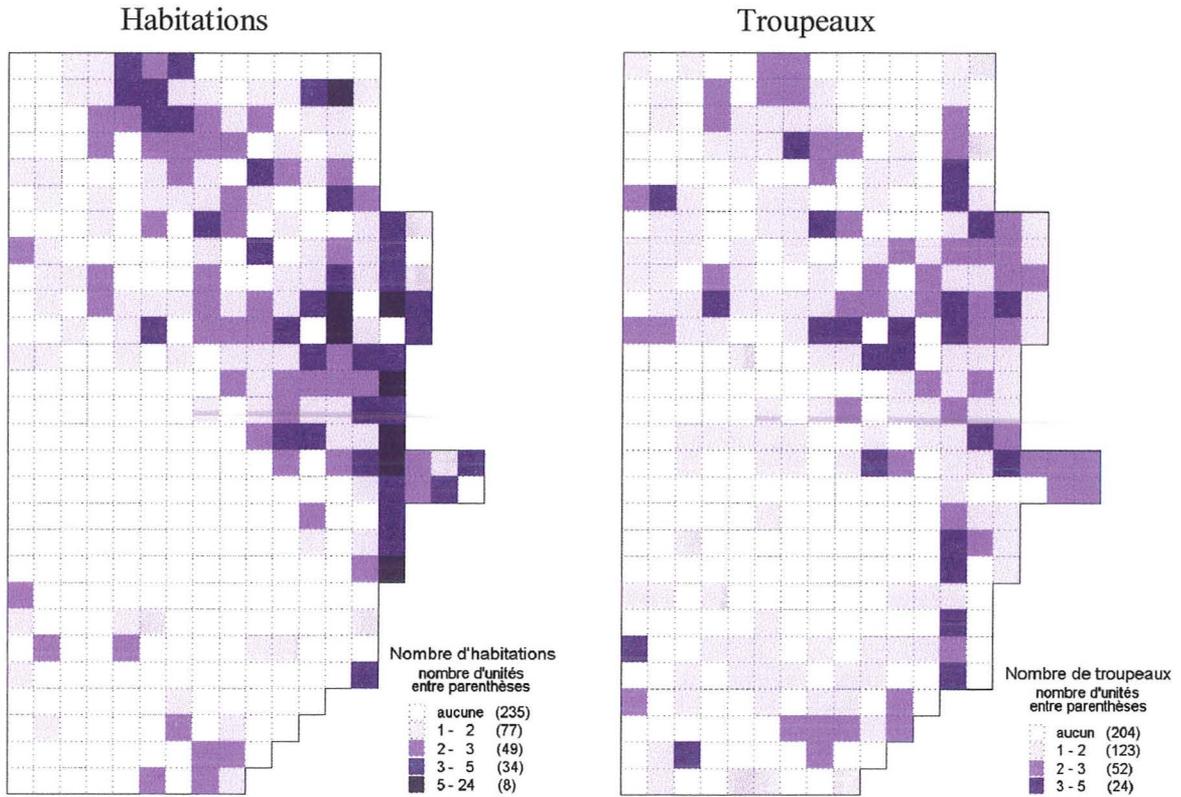
Krigeage

```
bovhab.krige_krige(resid.lobovhab~loc(centx, centy), data=gril, covfun=exp.cov, range=0.1,
  sill=0.28, nugget=0.17) #krigeage ordinaire
  pred.kbovhab_predict(bovhab.krige, grid.grille) #predictions des valeurs pour la grille de carres
  bovhab.kpred_pred.lobovhab+pred.kbovhab$fit #ajout des predictions de krigeage aux valeurs de la regression
locale
  gril.predict_data.frame(pred=bovhab.kpred, centx=grid.grille$centx,
    centy=grid.grille$centy) #construction de la table de carres avec les predictions

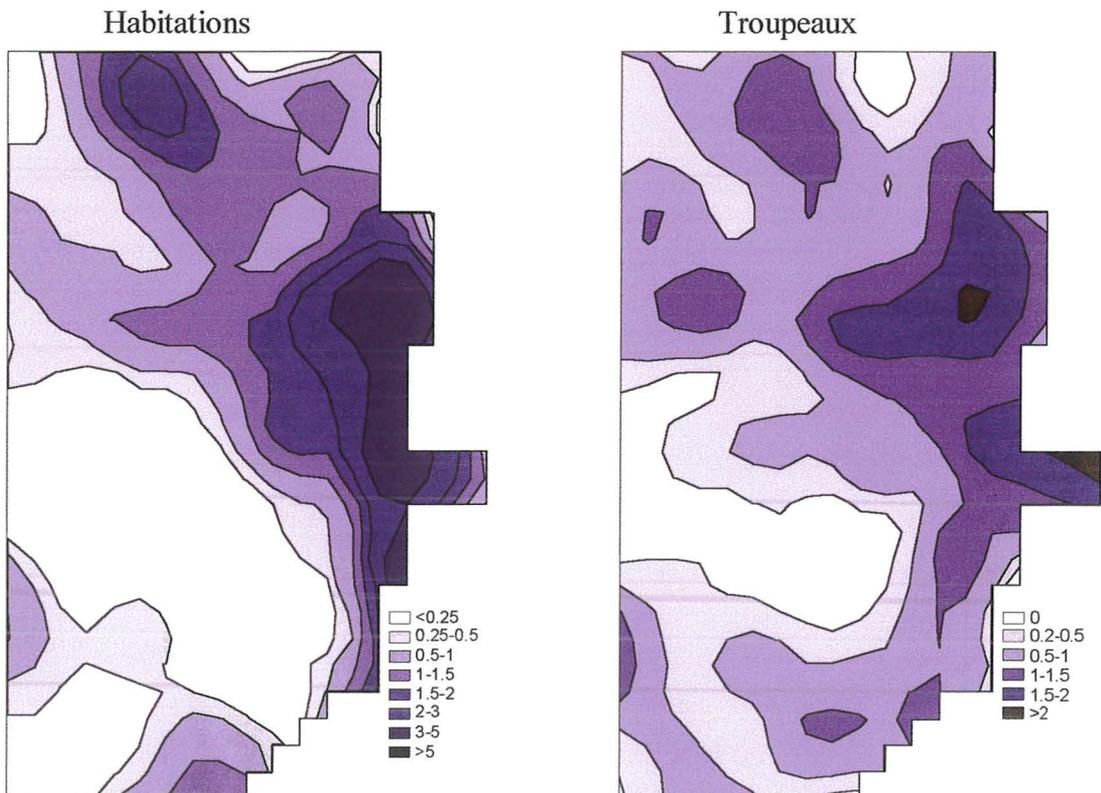
levelplot(pred~centx*centy, data=gril.predict, at=c(0, 1.61, 2.3, 3, 3.69, 4.61, 5.3, 7),
  col.region=80:15, contour=T) #tracage des predictions sur la grille
wireframe(pred~centx*centy, data=gril.predict, zlab="fit", drape=T) #surface predite en 3d
```

Annexe 3. Représentations de la densité des points

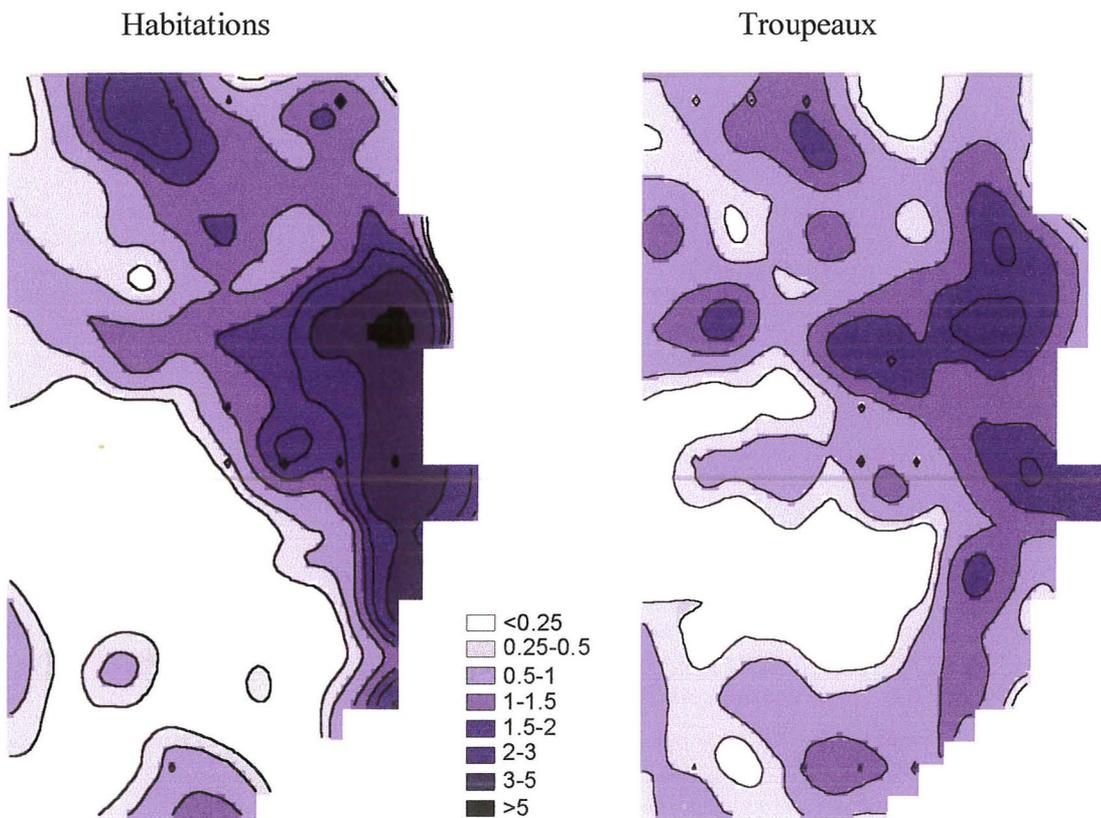
- Projection des points dans une grille de carrés de 1 km²



- Lissage par régression locale des valeurs de la grille de carrés



➤ Krigeage sur les résidus de la régression locale



Annexe 4. Analyse d'un semis de points

```
hab.spp_spp(hab) #transformation d'un data frame en processus de points
summary(hab.spp)
masquegrille #coordonnées des limites de la zone
masq.poly_list(x=masquegrille$V1,y=masquegrille$V2) #transformation en polygone
trellis.device(color=F) #graphique
plot(hab.spp,pch=16)
polygon(masq.poly,density=0)
```

Représentation de la densité de points en cellules hexagonales

```
hab.bin_hexbin(hab$x,hab$y,xbins=15) #cellules hexagonales
dim(hab.bin)
summary(hab.bin)
at.hab_c(0,1,2,3,5,25) #limites des classes du nombre d'habitations par cellule
plot(hab.bin,col.regions=80:15,at=at.hab) #cellules de niveau de gris
plot(hab.bin,style="centroids",col.regions=80:15,at=at.hab) #cellules proportionnelles
```

Estimation locale de la densité de points : méthode de kernel

```
kern.hab_kern2d(hab$x,hab$y,bw=0.007,nx=100,ny=100,kernfun=dnorm) #méthode de kernel
mgrid.kern.hab_expand.grid(x=kern.hab$x,y=kern.hab$y) #création d'une grille de carrés
mdf.kern.hab_data.frame(x=mgrid.kern.hab$x,y=mgrid.kern.hab$y,z=c(kern.hab$z)) #estimations
de la valeur des carrés
levelplot(z~x*y,data=mdf.kern.hab,col.region=80:15,at=c(1500,5000,10000,15000,20000,25000,
30000),contour=T) #tracage des predictions sur la grille avec les courbes de niveaux
wireframe(z~x*y,data=mdf.kern.hab,draper=T) #surface de réponse en 3 dimensions
```

Statistique de la distance au plus proche voisin

```
hab.ghat_ghat(hab.spp) #stat des plus proches voisins pour les habitations G observé

ghat.env_function(n,s,dist,boundary){
  hold_matrix(0,s,length(dist))
  for(i in 1:s){
    hold[i,]_ghat(make.pattern(n,boundary=boundary),dist.ghat=dist,plot=F)[,2]
  }
  mn_apply(hold,2,mean)
  Up_apply(hold,2,max)
  Down_apply(hold,2,min)
  return(data.frame(mn,Up,Down))
} # fonction de simulation d'un processus spatial aléatoire et calcul de la stat G correspondante

a_dim(hab)[1]
boundhab_bbox(hab) #limites du semis de points
hab.env_ghat.env(n=a,s=20,dist=unique(hab.ghat[,1]),boundary=boundhab) # détermination des limites de
confiance de L pour un processus aléatoire par simulations
ind_tapply(hab.ghat[,1],hab.ghat[,1]) #vecteur d'élongation de hab.env (dist repetees plusieurs fois dans
hab.ghat et pas dans hab.env)
plot(hab.env$mn[ind],hab.ghat[,2],type="line",xlab="G simulée",ylab="G observée") # courbe observée
lines(hab.env$mn[ind],hab.env$Up[ind],lty=2) # limites de G pour un processus spatial aleatoire
lines(hab.env$mn[ind],hab.env$Down[ind],lty=2)
```

Analyse multiéchelle de la répartition spatiale d'un semis de points : fonction de Ripley

```
hab.khat_Khat(hab.spp) #calcul de la fonction de Ripley pour les habitations
hab.lhat_Lhat(hab.spp) #idem Ripley mais avec les variances stabilisées (L=sqrt(K/pi))
abline(0,1) #comparaison de L avec la 1ere bissectrice (process aleatoire)
hab.lenv_Lenv(hab.spp,nsims=25,add=F) #calcul des limites de confiance de L pour un processus aléatoire par simulations
plot(hab.lenv$values,xlab="distance",ylab="L observé")
lines(hab.lenv$dist,hab.lenv$lower) #trace des courbes de tolerance
lines(hab.lenv$dist,hab.lenv$upper)
```