



Mémoire de Stage de M2

Projet TEMPO :

Télédétection et modélisation spatiale de la mobilité animale

Application à l'étude des contacts faune domestique/faune sauvage et du risque de transmission d'agents pathogènes

Modélisation des mouvements des buffles du cap (Synceruss caffer caffer) en fonction de la disponibilité en eau et de l'occupation du

sol

Encadrants : Annelise Tran, Florent Rumiano

Structure d'accueil : CIRAD ; UMR TETIS

Victor Dufleit (Master BEE EEF; mention BIFE)

Année : 2020-2021



Remerciements :

Premièrement, Annelise, Florent, merci infiniment pour ce stage ! Ces 5 mois sont passé à une vitesse folle et j'ai pu, grâce à vous, développer de nouvelles compétences qui me seront très utiles ! Et merci pour tout le travail réalisé en amont de ce stage. Merci Annelise de m'avoir introduit au monde de la modélisation qui ne m'était pas très familier mais qui m'attire de plus en plus. Merci Florent pour toutes nos discussions enrichissantes et merci de m'avoir confié ton modèle, j'espère que l'état dans lequel je te l'ai rendu te plait ! Je voudrais également remercier l'équipe du projet TEMPO, Eve, Alexandre, Michel et en particulier Pascal sans qui le modèle « eau + occ sol » n'aurait pas pu être validé dans ce mémoire ! Nos réunions bimensuelles étaient toujours très enrichissantes afin de comprendre les contextes de ces zones que je n'ai pas pu voir de mes yeux.

Merci à toutes mes colocataires des cases CIRAD, Anne-Rose, Méva, Margaux, Victoria, Carol et Soline sans qui les apéros auraient été un peu tristes ! Merci à mes voisines de bureau, Madéra, Olivia, Ophélie, Diane, Andréa, Noémie et Anne-So. Merci d'avoir supporté mes coups de sang contre R, Ocelet et autre QGIS, je n'espère pas vous avoir trop embêté. Marlène, merci de m'avoir fait faire un peu de terrain post apocalyptique aux semi-fields après les cyclones ! Hélène, merci de m'avoir fait découvrir l'ile, en espérant pouvoir taper du pied ensemble un de ces quatre !

Merci au Master BEE de m'avoir enseigné ce que je sais aujourd'hui. Merci de m'avoir permis de m'approcher du monde de la recherche et d'avoir accepté ma candidature en 2019 dans un moment où j'en avais besoin. Malgré ma condition de breton, je dois bien avouer être fier d'être Sorbonnard !

Une pensée à ceux qui sont resté loin dans l'Ouest. Maman, Margot, merci pour votre soutien indéfectible, merci pour l'appartement à Paris. On ne va pas beaucoup se voir dans les mois/années à venir alors je ne peux que vous souhaiter bon courage, ne lâchez rien ! Une grosse pensée à mes amis de Quimperlé, on avance ensemble malgré nos différents parcours. Hier nous étions éparpillés au quatre coins de la Bretagne, aujourd'hui, de la France, demain, j'espère nous voir éparpillés aux quatre coins du monde !

Présentation de la structure d'accueil :

Le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) est fondé en 1984 et regroupe les anciennes institutions de recherches agricoles tropicales françaises. Cet établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), dont le siège social se trouve à Paris, possède 13 directions régionales autour du monde et travaille en coopération avec des organismes issus d'une centaine de pays différents.

Le principal domaine d'activité du CIRAD est la recherche en agronomie, notamment la volonté de poursuivre la recherche en agroécologie pour préparer l'agriculture de demain et étudier son impact (ainsi que l'impact de l'agriculture actuelle) sur notre environnement. Le CIRAD met en place de nombreux dispositifs de recherche et d'enseignement (dP) avec l'appui d'une multitude de collaborations à travers le globe. Un des autres buts est de proposer la formation de compétences pour assister les pays du Sud dans le développement d'une agriculture saine et durable.

Ce stage a été réalisé au sein de l'UMR (Unité Mixte de Recherche) Tetis (Territoires, environnement, télédétection et information spatiale) dont la spécialité est l'acquisition, la production, la modélisation et l'organisation de données spatialisées. Différentes thématiques liées au développement durable sont explorées par l'UMR allant de l'agriculture et l'environnement à la santé et l'étude des risques naturels en passant par la gestion des ressources et du territoire. La ligne directrice de l'UMR est la création et la transmission d'une information spatiale « utile, utilisable, utilisée ». L'UMR Tetis est composée de plusieurs institutions de recherche, le CIRAD, AgroParisTech, l'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement), et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique).

Ce stage s'est déroulé dans les locaux du CIRAD de Saint-Denis à la Réunion sous la tutelle d'Annelise Tran (CIRAD UMR TETIS) et de Florent Rumiano (Université de Montpellier, CIRAD UMR TETIS), dont la thèse porte sur la création d'un modèle de mouvement de population de grands ongulés sauvages et domestiques à partir de données d'observation de la Terre, en prenant l'exemple des buffles et des vaches aux interfaces entre aires protégées et zones communales au Zimbabwe. Il s'agit d'étudier plus précisément les contacts entre espèces animales sauvages et domestiques afin d'améliorer l'appréhension des risques de transmissions d'agents pathogènes (e.g. fièvre aphteuse).

Sommaire

I.	Int	roduction2
II.	Ma	tériels & Méthodes6
1	. 2	Zones d'étude et données associées6
	a.	Zones d'étude6
	b.	Données environnementales7
	c.	Données de géolocalisation des buffles
2 C	. I Chatt	Le modèle de mouvement de population de buffles (basé sur le modèle de Grégoire- é)
	a.	Présentation du modèle de Grégoire & Chatté
	b.	Présentation du modèle de mobilité des buffles (modèle « eau ») 10
3	. /	Application du modèle « eau » aux réserves de Kruger et Gonarezhou 11
	a.	Préparations des données d'entrée11
	b.	Simulation12
4	. I	ntégration de l'occupation du sol dans le modèle de déplacement des buffles
	a.	Exploration des données pour repérer des préférences d'occupation du sol en
	for	ection de l'heure de la journée et de la saison 12
	b.	Mise en place du modèle prenant en compte l'occupation du sol (modèle « eau +
5	1000	Validation des modèles 14
ш	· Ré	sultats
111.	.]	Frajectoires simulées par les deux modèles16
2	. I	Résultats de l'exploration des préférences de couverture du sol
3	. \	Validations et mises en comparaison des deux modèles18
IV.	Dis	scussions
V.	Co	nclusions27
VI.	Bił	oliographie27

I. Introduction

Le Zimbabwe est un pays d'Afrique Australe connu comme l'un des anciens greniers de l'Afrique. La Rhodésie du Sud (puis Rhodésie) sous l'occupation Britannique devient officiellement indépendante et prend le nom Zimbabwe en 1980 avec l'arrivée au pouvoir du dictateur Robert Mugabe (1^{er} ministre puis président en 1987). Celui-ci est supplanté par Emmerson Mnangagwa en novembre 2017 suite à un coup d'Etat. Le pays fait face à de fortes crises depuis 1990, les plus marquantes étant l'hyperinflation de la devise Zimbabwéenne (jusqu'à 231 000 000% en 2007-2008) dans les années 2000 et la famine causée par la réforme agraire (« Zimbabwe's Famished Fields »). Aujourd'hui, la situation est toujours critique au Zimbabwe avec beaucoup de pénuries des produits de première nécessité, un très fort taux de chômage (environ 90 % de la population active), et 72% de la population vivant sous le seuil de pauvreté, et une très forte insécurité alimentaire faisant de ce pays le 150^e pays au produit intérieur brut (PIB), le plus faible sur 189 (« Human Development Data Center | Human Development Reports »).

Le Zimbabwe partage ses frontières avec de nombreux pays : l'Afrique du Sud au sud, la Zambie au nord-ouest, le Botswana au sud-ouest et le Mozambique à l'est. La température moyenne annuelle est de 25°C et la précipitation moyenne annuelle est de 670 mm, avec la majorité des pluies ayant lieu pendant la saison humide d'octobre à mars (« Climat Zimbabwe : Pluviométrie, Température moyenne Zimbabwe, diagramme ombrothermique pour Zimbabwe - Climate-Data.org »). L'altitude est comprise entre 1200 et 1600 mètres - le territoire du Zimbabwe se compose d'une série de plateaux successifs surélevés, rendant les températures moyennes observées au sol plus faibles comparativement à d'autres pays se trouvant dans la zone climatique intertropicale. Plusieurs climats composent le Zimbabwe selon la classification de Köppen-Geiger. Les trois principaux étant le climat chaud semiaride, le climat subtropical des hautes terres océaniques et le climat subtropical humide. Les principales ressources du pays sont ses ressources minières (or, diamant etc.) et son patrimoine touristique qui se redéveloppe depuis 2011. Le biome prédominant est la savane (prairies tropicales arborées). La faune et la flore du Zimbabwe attirent de nombreux touristes chaque année. En effet, les espèces animales (pour la plupart sauvages) y sont nombreuses : environ 350 espèces de mammifères dont la seconde plus grande population d'éléphants d'Afrique, 500 espèces d'oiseaux et 131 espèces de poissons. Ces espèces sont aujourd'hui protégées dans les dix parcs nationaux du pays. Cela constitue un patrimoine naturel riche en terme de biodiversité, ressource fondamentale pour un pays qui manque cruellement de débouchés économiques.

Les frontières de ces parcs constituent aujourd'hui des zones d'études privilégiées car représentant des espaces de transitions (écotones), interfaces entre zones fortement anthropisées et zones protégées (Morzillo et al. 2014). En effet, dans un contexte de croissance démographique humaine (Brashares et al. 2001), l'espace que représente ces zones augmente au même titre que les enjeux liés à ces espaces composés de nombreux acteurs (communautés villageoises, parcs naturels nationaux, réserves privées etc.) (Wittemyer et al. 2008). La pauvreté, la corruption généralisée et la faiblesse des institutions gouvernementales et étatiques au Zimbabwe ont mené à de fortes déforestations et beaucoup de braconnage, deux des facteurs ayant contribué en faveur de la mise en place des Parcs nationaux (Infield & Namara 2001). Les parcs assurent la protection et la gestion des populations animales en son sein. On observe cependant des changements de comportements chez certains animaux du fait de l'action humaine (Marchand et al. 2014, Loveridge et al. 2007). Certains points d'eau sont entretenus et rechargés par les services du parc, rendant la recherche de celle-ci plus facile (Smit et al. 2006). La mise en place de barrières le long des frontières des parcs a également contraint spatialement le domaine vital de certaines espèces et empêchent certains animaux de migrer (Mikle et al. 2019). Nous pouvons cependant noter que ces barrières, si présentes, n'ont que très peu été entretenues et sont aujourd'hui largement perméables à cause de dommages créés par la faune sauvage (principalement les grands mammifères) et les humains (Miguel et al., 2013). Les parcs nationaux se trouvent souvent en conflit d'intérêt avec certaines communautés villageoises périphériques. Par exemple, l'élevage au niveau de ces zones s'est compliqué. Certaines zones de pâturage et d'abreuvement habituelles se trouvent dans l'enceinte des parcs (Anderson et al. 2015) dont l'accès est interdit en dehors des circuits touristiques. Il apparait également que les contacts entre populations animales sauvages et domestiques deviennent plus fréquents (Caron et al, 2012). Ceci a pour conséquence d'augmenter les probabilités de transmissions de maladie (Nyhus Philip J. 2016 ; Caron et al, 2012 ; Miguel et al., 2013). Par exemple, la fièvre aphteuse se propage des populations de buffles (Syncerus cafer), dans lesquelles la maladie est asymptotique, vers les populations de bovins domestiques (Bos taurus et Bos Indicus), pour lesquelles la maladie, symptomatique mais peu mortelle, peut avoir des conséquences économiques et/ou nutritives importantes pour les éleveurs (de Garine-Witchatitsky et al. 2012). Les risques de zoonoses augmentent également (Gadaga et al. 2016, Caron et al. 2016) et les interfaces pourraient devenir des zones d'émergence ou de réémergence de maladie. Il semble important de noter que des maladies pourrait également être transmises des populations domestiques vers les populations sauvages, pouvant mener jusqu'à la mise en danger et/ou l'altération d'écosystèmes.

Le buffle est une espèce importante et structurante des écosystèmes de savane arborée d'Afrique Australe (Bennit et al. 2015). En effet, au même titre que le zèbre ou le gnou, le buffle africain est essentiellement brouteur, il n'est cependant pas inféodé aux zones en herbe et on le retrouve dans des environnements assez variés, allant de la prairie à la forêt tropicale (Cornelis et al. 2014). Les buffles sont considérés comme sédentaires, mais certains buffles du Cap (sous espèce présente au Zimbabwe) entreprennent de grandes migrations saisonnières. Il apparait que le territoire des buffles est fortement lié aux points d'eaux disponibles (dont la présence fluctue avec la saison) et ces derniers ont rarement été observés à plus de 5,3 km d'un point d'eau (Cornelis et al. 2014). Les buffles se déplacent en troupeaux de tailles variables en fonction des saisons et des conditions extérieures. Le troupeau principal est composé des femelles et de leurs petits et on retrouve des groupes satellites de mâles (et de femelles). Les jeunes naissent pendant la saison des pluies et restent environ deux ans avec leurs mères. Aujourd'hui, cette espèce est l'un des « Big Five », les espèces africaines les plus emblématiques. Le statut de conservation du buffle est « presque en danger » d'après l'IUCN (Union Internationale pour la conservation de la nature ; IUCN 2021). Ce n'est pas le cas des autres « Big Five », espèces africaines de grand mammifères parmi les plus dangereuses et difficiles à chasser (lion, léopard, éléphant, rhinocéros noir). Les buffles africains sont connus comme réservoirs de maladies comme la fièvre aphteuse ou la theilériose bovine (Cornelis et al. 2014).

Le projet TEMPO débute en 2018 et propose la création d'un modèle de mouvement de population animale se basant sur l'utilisation de données d'observation de la Terre en entrées de modèle. Ce modèle mécaniste et stochastique propose une approche originale de modélisation multi-échelles permettant de simuler à la fois des mouvements individuels et collectifs en interaction avec des variables environnementales (surface en eau, occupation du sol, ...). Avec l'augmentation des techniques et dispositifs d'études du mouvement animal, combiner la télédétection et la modélisation spatiale apparait comme une approche méthodologique prometteuse afin de simuler et reproduire, dans le temps et dans l'espace, les mouvements de population animale (He et al. 2015). Deux modèles de mouvement sont en création, un pour les buffles, un pour les vaches, ceci afin de pouvoir étudier les contacts entre

ces deux populations et de repérer de potentiels zones de transmissions de pathogènes. Seul le modèle buffle sera étudié dans le cadre de ce mémoire. Il s'agit donc ici de savoir si la modélisation des mouvements de population de buffles est possible en la combinant avec des données de télédétection utilisées pour caractériser, dans le temps et dans l'espace, les facteurs environnementaux impactant les déplacements des buffles dans deux interfaces aux configurations géographiques et écologiques différentes.

Un premier modèle de mouvement de population de buffles a été développé dans la zone forestière de Sikumi (proche de la réserve naturelle nationale de Hwange, fig, 1) et la zone communale de Dete au Zimbabwe. Ce modèle simule les déplacements des buffles par rapport à la localisation des surfaces en eau préalablement identifiées par télédétection (Rumiano et al., 2020). La répartition spatiale des points d'eau change chaque mois en fonction de leur fluctuation saisonnière respective. Le premier objectif du stage fut d'adapter le modèle aux interfaces des réserves naturelles nationales de Gonarezhou/zone communale de Malipati et de Kruger (Afrique du Sud) /zone communale de Pesvi (fig. 1). La généricité de ce modèle sera donc débattue ici. Le second objectif de ce stage a été la modélisation des mouvements de buffles par rapport à l'occupation du sol avec la création d'un système de « visée préférentielle ». Une validation a également été réalisée à partir de ce deuxième modèle afin d'estimer (ou de mesurer) si celui-ci était valide, s'il apporte une réelle plus-value par rapport au modèle précédent et enfin de caractériser l'influence des variables environnementales sur le déplacement des buffles dans le temps et dans l'espace.



Figure 1: Présentation des zones d'études du projet TEMPO au Zimbabwe

II. Matériels & Méthodes

1. Zones d'études et données associées

a. Zones d'études

L'étude se concentre sur deux sites Zimbabwéens, qui constituent des zones d'interfaces entre aires de conservation (parcs du Kruger et de Gonarezhou) et zones anthropisées (cadre rouge, fig. 2). Ces deux sites, comme celui de la réserve de Hwange proche du village de Dete (cadre bleu, fig. 1) pour lequel modèle de mobilité des buffles a été développé (Rumiano et al., 2021, en publication), sont inclus au sein de programmes de conservation transfrontaliers. conservation la zone de transfrontalière du Kavango-Zambèze pour Hwange et le parc transfrontalier du Grand Limpopo pour Kruger et Gonarezhou.



Figure 2 : Zones étudiées dans ce mémoire. La zone de Gonarezhou est traversée du nord au sud par la rivière Mwenezi et la zone de Kruger par la rivière Limpopo sur un axe ouest-est.

Les zones d'étude de Gonarezhou et Kruger se trouvent au sud-est du Zimbabwe dans la province de Masvingo, district de Chiredzi. La limite nord du parc de Kruger constitue la frontière avec l'Afrique du Sud. Le parc de Gonarezhou est lui traversé par la frontière avec le Mozambique. Les zones d'études sont traversées par des grandes rivières, Mwenezi à Gonarezhou et Limpopo à Kruger. Ces cours d'eau représentent une source d'eau permanente malgré de fortes fluctuations de leurs débits respectifs au cours de l'année. On retrouve également des mares d'eau temporaires dans ces zones. La superficie des zones d'études est d'environ 1800 km² pour Gonarezhou et 2220 km² à Kruger. Les deux zones sont caractérisées comme zones de savane arborée (Martini et al. 2016; Gertenbach W. P. D. 1983) au climat semi-aride, les précipitations annuelles moyennes sont de 466 mm à Gonarezhou (« Climat Zimbabwe : Pluviométrie, Température moyenne Zimbabwe, diagramme ombrothermique pour Zimbabwe - Climate-Data.org ») et de 440 mm au nord du parc de Kruger (Grentenbach W. P. D. 1983). La majorité des précipitations ont lieu pendant la saison humide de Novembre à Mars. La végétation dominant la zone d'étude de Gonarezhou est une végétation arbustive, avec davantage de forêts à l'ouest de la rivière

Mwenezi (Martini et al. 2016). Ces environnements sont dominés par les arbres *Colophospermum mopane*. Cette espèce est également dominante sur la zone d'étude de Kruger (Venter & Gertenbach 1986), avec cependant un environnement plus fermé, avec davantage de zones boisées autour de la rivière Limpopo, les zones arbustives et de prairie se trouvant au sud de la frontière du parc.

Ces zones d'études sont des zones d'interface, elles comprennent les villages de Malipati à l'ouest de la zone d'étude de Gonarezhou et le village de Sengwe au nord de celle de Kruger. Ce sont des zones à la densité de population faible (9 habitants par km² à Sengwe en 1992 ; « Zimbabwe : Human demographic situation »). Les activités dans ces villages sont essentiellement concentrées autour de deux activitées économiques principales que sont l'agriculture et l'élevage extensif de subsistance. On retrouve également du tourisme avec une réserve de gibier au nord de Malipati par exemple, mais aussi des activités illégales d'extractions de ressources naturelles (essence de bois rare, viande de brousses, …).

b. Données environnementales

Pour chaque zone d'étude nous disposons de plusieurs jeux de données qui ont été utilisés pour la création du modèle. Les données issues de la télédétection ont été obtenues par des classifications supervisées et non-supervisées appliquées sur une série temporelle d'images satellite Sentinel-2, collectées à raison d'une image par mois entre janvier et décembre 2018. Les images Sentinel-2 sont des images optiques multi-spectrales dont la résolution spatiale est comprise entre 60m et 10m et dont la fréquence de revisite s'établie entre 10 et 5 jours. (Rumiano et al., 2020) :

- Localisation des zones en eau pour chaque mois de l'année. Ces données se présentent sous forme vectorielle, avec un identifiant unique pour une même localisation et un attribut « mois » pour indiquer le mois où le point d'eau est disponible.
- L'occupation du sol (figure 2 ; Rumiano et al., 2021). Un raster mono-bande incluant huit types de couvertures du sol : forêt, environnement mixte forêt/arbuste, arbuste, environnement ouvert arbuste/prairie, sol nu, réseaux routier et routes primaires, eau de surface et surfaces agricoles.

D'autre part, des données sur **les routes** ont été obtenues par la photo-interprétation à partir d'images satellitaires très haute résolution Pleïades (Centre national des études spatiales - CNES) et digitalisation manuelle à l'échelle 1/5000^e.résolution 1/5000^e).

c. Données de géolocalisation des buffles

Des données de positions de buffles obtenues par collier GPS. Ces données ont été collectées dans le cadre de la thèse d'Eve Miguel et de Hugo Valls-Fox (Miguel, 2012 ; Valls-Fox, 2015). Des groupes de buffles ont été identifiés dans les différentes réserves par hélicoptère ou avion. Quatre groupes ont été sélectionnés à Gonarezhou, sept à Kruger. Pour chaque groupe deux à quatre femelles adultes ont été équipées d'un collier GPS. Les étendues de temps de capture sont résumées pour chaque groupe dans la table 1. Les colliers GPS ont capturé une coordonnée par heure (avec parfois des erreurs d'enregistrement qui ont été corrigées lors de la phase de prétraitement des données de télémétrie).

Groupes	Réserve	Début	Fin	Simulé
K1	Kruger	2013/10/31	2015/01/29	Oui
K2	Kruger	2011/07/25	2011/09/15	Oui
К3	Kruger	2013/12/20	2014/02/12	Oui
K4	Kruger	2013/10/31	2015/02/05	Oui
K5	Kruger	2010/06/04	2011/12/24	Oui
K6	Kruger	2011/07/25	2012/04/14	Oui
K7	Kruger	2010/06/02	2010/12/24	Non
G1	Gonarezhou	2008/10/13	2011/11/03	Oui
G2	Gonarezhou	2008/10/15	2011/02/15	Non
G3	Gonarezhou	2008/10/14	2009/11/19	Oui
G4	Gonarezhou	2008/10/14	2009/11/19	Non

Table 1 : Etendues des temps des captures GPS pour les groupes des différentes réserves.

2. <u>Le modèle de mouvement de population de buffles (basé sur le modèle de Grégoire-Chatté)</u>

a. Présentation du modèle de Grégoire & Chatté

Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude pour simuler les déplacements des buffles dans le temps et dans l'espace est un modèle mécaniste stochastique. Basé sur le modèle de Vicsek (Vicsek et al 1995), le modèle de Grégoire et Chatté (Chaté et al. 2008) ajoute une notion de cohésion entre les entités simulées. Ceci permet la simulation de trajectoires d'individus restant en interaction dans un rayon limité où la position de chacun des individus influence celle des autres, permettant ainsi un déplacement collectif sur un pas de temps discret avec une vitesse v_0 . Un vecteur vitesse $\vec{v_i}$ est déterminé à chaque pas de temps *t* pour chaque individu *i*:

$$\vec{v_i}(t + \Delta t) = v_0 \vartheta[\alpha \sum_{j \sim i} \vec{v_j}(t) + \beta \sum_{j \sim i} f_{ij} \vec{e_{ij}} + \mu n_i \vec{z}] \quad (\text{Eq. 1})$$

 μ ajoute du bruit à l'angle déterminé. α et β contrôlent l'importance relative de deux forces, respectivement « l'alignement » et la « cohésion ». On peut noter que plus l' α est élevé, plus les individus vont s'aligner dans la même direction, ce qui a pour conséquence d'augmenter la vitesse de déplacement du groupe.

 f_{ij} représente une force de type Lennard-Jones (Chaté et al. 2008) agissant entre deux individus (i et j) dont la distance r_{ij} est inférieure à r_0 (Eq. 2). $\overrightarrow{e_{ij}}$ est le vecteur unitaire le long du segment allant de i à j.

$$f_{ij} = \begin{cases} -\infty \sin r_{ij} < r_c \\ \frac{1}{4} \times \frac{r_{ij} - r_e}{r_a - r_e} \sin r_c < r_{ij} < r_a \\ 1 \sin r_a < r_{ij} < r_0 \end{cases}$$
(Eq. 2)

 r_i , la position de l'individu i est mise à jour à chaque pas de temps t (ici t = 10mn, temps estimé pour chaque individu de prendre conscience de la position et direction de ses voisins (déterminées selon f_{ii}) afin de recalculer son propre angle :

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) \pm \Delta t \vec{v_i}(t + \Delta t)$$
(Eq.3)

<u>Variables</u>	Définitions	Valeurs
v_0	Vitesse des buffles	Kruger = 0,245km/h
		Gonarezhou = 0,413km/h*
r_0	Distance limite d'interaction	500m**
r_c	Distance de répulsion	0.5m**
r_e	Distance d'équilibre	10m**
r_a	Distance de non-impact sur les	150m**
	individus proches	
α	« Alignement »	{1,2 divagation *** {1,6 abreuvement
β	« Cohésion »	1 ***
η	« Bruit »	0.4 ***

 Table 2 : Paramètres du modèle, estimés par * données télémétriques, **

 connaissances empiriques et études bibliographiques ou *** calibrations.

b. Présentation du modèle de mobilité des buffles (modèle « eau »)

Le modèle de Grégoire et Chatté a été appliqué pour modéliser les dynamiques individuelles et collectives des buffles (troupeaux de buffles de 200 individus ; Miguel et al. 2017) et testé sur la zone de Hwange (fig. 1), en considérant comme uniques déterminants des mouvements des buffles, la localisation des zones en eau et leurs variations saisonnières (Rumiano et al. 2021, Soumis, en cours de révision).



Figure 3 : Découpage de la journée d'un buffle dans le modèle "eau", en bleu la phase d'abreuvement de 13h à 21h, le reste (en vert) est un comportement de divagation libre.

Pour ce faire, les valeurs des variables r ont été fixées grâce aux observations de terrain et aux connaissances empiriques (dires d'experts; table 2) et aux études bibliographiques. Les données de télémétrie ont permis de calibrer les valeurs de α , β et η , en distinguant,

dans un premier temps, deux phases distinctes dans la journée, une phase de « divagation libre » et une phase « vers l'eau/abreuvement » (fig. 3). Nous nous réfèrerons à ce modèle comme le modèle « eau ».

Le modèle a été implémenté dans le langage Ocelet (Degenne & Lo Seen 2016) développé par l'UMR TETIS. Il s'agit d'un langage métier permettant la modélisation de dynamiques spatiales. Basé sur le concept de graphes d'interactions, il permet de faire interagir différentes entités (spatiales ou non) entre elles afin de les faire évoluer dans l'espace et le temps. Le logiciel permet d'intégrer des données spatiales de type vecteur et raster et nous permet, dans le cas présent, de faire se mouvoir des entités « buffles » mises en relation avec une deuxième entité « troupeau » en fonction d'une troisième entité constituée de polygones représentant les surfaces en eau (fig. 4).



Au début de chaque phase d'abreuvement, le troupeau sélectionne le point d'eau disponible le plus proche de la position du troupeau et les buffles se déplacent vers le centroïde (centre de gravité) de ce point d'eau jusqu'à l'atteindre. Une fois le point d'eau atteint, le troupeau y reste jusqu'à la fin de la phase d'abreuvement. Commence alors le début de la phase de divagation libre, les buffles se déplacent selon l'équation 1.

Initialisation : Le fichier shapefile comprenant les polygones d'eau est intégré au modèle en entrée. Le point de la première position correspondant au premier point enregistré par les collier GPS de chaque groupe est également ajouté. La date de début et la durée de simulation, la vitesse des buffles, le nombre d'individus simulés, d'itérations et le fichier de sortie doivent être configurés avant de lancer une simulation.

3. Application du modèle « eau » aux réserves de Kruger et Gonarezhou

a. <u>Préparations des données d'entrées</u>

Le modèle « eau » a été développé avec les données de la réserve de Hwange. Le premier travail de ce stage a donc été d'adapter le modèle aux zones d'études à l'interface des parcs de Kruger et Gonarezhou. Premièrement, en modifiant le code Ocelet préexistant, pour lire comme données d'entrées les points de départ (correspondant à la localisation des groupes de buffles) et les zones en eau de la zone d'étude considérée. Deuxièmement, en modifiant le fichier shapefile en eau d'entrée, car les premières simulations n'étaient pas réalistes du fait de l'hydro-morphologie de nos deux zones d'études, très différentes de celle de Hwange pour laquelle le modèle avait initialement été développé.

En effet, les points d'eau de la zone de Hwange sont principalement des petites surfaces d'eau (mares), et le déplacement des buffles simulés vers un point d'eau sélectionné en prenant comme « cible » le centroïde du polygone d'eau correspondant est adapté, car le centroïde du polygone correspond à la localisation du point d'eau. Ce n'est pas le cas pour les zones d'études de Kruger et Gonarezhou qui sont traversées par des rivières (Figure 2), représentées dans les données environnementales initiales par un unique polygone, dont le centroïde ne correspond pas nécessairement à une zone en eau particulière. De plus, l'observation des données de collier GPS montre que les buffles s'abreuvent à différents endroits des rivières. Il a donc été choisi de diviser les polygones caractérisant ces cours d'eau en de multiples polygones plus petits ayant chacun un identifiant propre. Les zones d'abreuvement de ces rivières ont donc été identifiées grâce aux enregistrements GPS proches des cours d'eau, la taille médiane de ces zones a été calculée pour les deux réserves et utilisée

pour découper les polygones des rivières (Gonarezhou : 1300m ; Kruger, rivière Limpopo : 750m, rivière Luvuvhu : 350m).

On observe également que les buffles de Kruger se déplacent moins que ceux de Gonarezhou. Le quartile 75% des vitesses calculées pour chaque réserve a été utilisé comme vitesse de base pour le modèle (Kruger = 0,245km/h; Gonarezhou = 0,413km/h.). Afin d'éviter une trop grande dispersion des troupeaux simulés, il a été choisi de n'utiliser que les polygones d'eau compris dans le MCP 100% (polygone convexe minimum) de chaque groupe. Grâce à l'observation des vitesses en fonction des heures nous avons pu ajuster les heures de début et de fin de phase d'abreuvement, qui allait de 9h à 18h à Hwange, pour commencer à 13h et finir à 21h à Gonarezhou et Kruger (fig. 3).

b. Simulation

Pour chaque groupe de buffles, 30 itérations du modèle ont été réalisées sur les mêmes périodes de temps des enregistrements GPS, ceci afin d'avoir un échantillon de simulations représentatif du fait de la stochastique du modèle. Les simulations prenant un temps important en terme de vitesse de traitement, la validation n'a été réalisée que sur les groupes pouvant potentiellement rentrer en contact avec les troupeaux de vaches après observation des données de collier GPS de vaches collectées (Miguel E. 2012) (table 1 en vert).

4. <u>Intégration de l'occupation du sol dans le modèle de déplacement des</u> <u>buffles</u>

 a. Exploration des données pour repérer des préférences d'occupation du sol en fonction de l'heure de la journée et de la saison.

Pour chaque enregistrement de collier GPS, la couverture du sol a été obtenue grâce à la position sur le raster de couverture du sol décrit dans la partie II.1.a. La proportion d'enregistrements dans chaque type de couverture du sol a ensuite été étudiée pour chaque heure de la journée, également en regardant si ces proportions variaient en fonction des différents mois. Ceci afin d'avoir une idée des couvertures de sol les plus utilisées par les buffles. La variabilité saisonnière n'a cependant pas été prise en compte dans le modèle et des valeurs de préférence moyenne par année ont été utilisées.

b. <u>Mise en place du modèle prenant en compte l'occupation du sol (modèle « eau + occsol »)</u>

Afin de mesurer l'impact de l'occupation du sol sur le déplacement des buffles dans le temps et l'espace, il a été décidé d'ajouter celle-ci comme facteur influençant les déplacements des buffles. En effet, certaines classes de couverture peuvent représenter des zones de nourrissage pour un troupeau, notamment les zones en herbe, les buffles étant des brouteurs (Cornélis et al. 2014). Il a également été montré que les buffles peuvent se nourrir des feuilles et fruits de certains arbres (Cornélis et al. 2014), les zones arbustives et de forêts ont donc également été considérées comme attirantes pour les troupeaux simulés.

La journée des buffles a ainsi été redécoupée en quatre phases différentes afin de prendre en compte deux nouvelles phases, le déplacement actif en recherche d'une zone de pâturage et repos/rumination, correspondantes aux mesures de vitesses observées (fig. 5). La phase d'abreuvement a été conservée telle qu'elle était, la phase de divagation a été raccourcie pour s'arrêter avant l'augmentation de la vitesse observée aux alentours de trois heures du matin. Commence alors une nouvelle phase qui a été nommée déplacements actifs où les buffles se déplacent par rapport à la couverture du sol à proximité.



Figure 5 : Découpage de la journée du buffles pour le modèle "eau +occ sol" ; de 3h à 9h (en rouge) : déplacement actif en recherche de pâturage ; de 9h à 13h (jaune) : phase de pause/rumination ; de 13h à 21h (bleu) : Abreuvement ; de 21h à 3h (en vert) : Divagation libre

Landaavan	Autres	Shrubland	Woodland	Open	Mixed
Landcover				Shrubland/Grassland	Woodland/Shrubland
Préférence	0.11	0.46	0.08	0.03	0.32
(Kruger)	0,11	0,40	0,08	0,05	0,32
Préférence	0.01	0.82	0.02	0.06	0.09
(Gonarezhou)	0,01	0,82	0,02	0,00	0,09

Table 3 : Préférences des occupations de sol observés à Gonarezhou et Kruger ; Ces préférences ont été estimées en calculant la proportion d'enregistrement de ces occupations du sol pour les heures de la phase de mouvements actifs.

Un système de visée préférentiel a été créé en s'inspirant de la méthodologie utilisée dans les études par *Step Selection Function (SSF)* (Thurfjell et al. 2014). A chaque heure, une nouvelle « cible » est déterminée. Pour se faire, une zone tampon, dont le rayon correspond à la distance maximum d parcourue par les buffles en une heure, est créé autour de la position du troupeau (d= 750m à Kruger et 1035m à Gonarezhou), valeurs déterminées après avoir enlevé les valeurs aberrantes, (valeur supérieure à 1,5 x quartile 0,75). Tous les pixels du raster de couverture du sol se trouvant dans ce buffer deviennent alors des cibles potentielles. A chaque pixel est attribué une probabilité p selon l'équation :

$$p = P_i \times n_i$$

Où P_i est la préférence associée à la couverture de sol *i* (table 3) et n_i la proportion de pixels de la couverture de sol *i* présent dans le buffer. Une cible est ensuite sélectionnée en prenant en compte la probabilité associée à chaque pixel. Les buffles se déplacent ensuite en direction de cette cible. Une nouvelle cible est déterminée toutes les heures, intervalle sur lequel nous avons étudié le comportement des buffles par rapport à la couverture du sol (correspondant à la fréquence d'enregistrement de la localisation des buffles équipés des colliers GPS).

La dernière phase, où les vitesses observées décroissent (fig. 5) a été nommée « pause/rumination » et peut être considérée comme une phase où les buffles s'arrêtent pour se reposer et ruminer. Dans cette phase, la couverture du sol sur laquelle se trouve le troupeau est vérifiée chaque heure. Si le troupeau se trouve sur une couverture du sol considérée comme favorable (grassland, shrubland, woodland) l' α du modèle est fixé à 0 et les déplacements des buffles ne sont plus régis que par le bruit η et la cohésion β . Par conséquent, les déplacements du troupeau se limitent à une zone relativement restreinte. Si, au moment de la vérification de couverture du sol, le troupeau se trouve sur une couverture de sol non favorable, les buffles adoptent un comportement semblable à la phase de divagation libre. Ils continuent dans leurs directions jusqu'à atteindre une couverture de sol favorable.

5. Validation des modèles

Des métriques ont été identifiées afin de réaliser la validation de ces modèles :

 Une représentation par carte de chaleur de densité de noyau (la densité est calculée sur la base du nombre de points dans un emplacement déterminé, avec un plus grand nombre de points groupés résultant en de plus grandes valeurs ; Pryke et al. 2007) a été réalisée pour chaque itération de chaque groupe. Des cartes de chaleurs des données observées ont également été réalisées. Tous ces rasters ont une résolution spatiale de 10x10m (résolution choisie pour correspondre à la résolution du raster d'occupation du sol) et ont été produits en choisissant des kernels de forme quadratique, correspondant au format raster (Campbell 2001), et de rayon de 500 m. Pour chaque troupeau, deux rasters médians sont ainsi obtenus, un issu des données observées et un issu des données simulées. La différence de ces deux rasters permet d'obtenir un raster final rendant compte des zones où le modèle sous-estime ou surestime la densité des buffles. Pour faciliter la lecture et les comparaisons des cartes des différents groupes, une normalisation a été réalisée. Ceci en divisant les différentes valeurs de différences de densités par la valeur absolue la plus importante obtenue sur les rasters de comparaison pour les deux modèles

- Des tests de corrélation de Spearman ont également été réalisés en utilisant les valeurs de densité des cartes de chaleurs médianes observées et simulées par correspondance géographique (distribution non normales des valeurs de densités). Les emprises des rasters étant plus grandes que la zone d'intérêt où les buffles se sont déplacés, les lignes contenant des zéros en valeurs observées et simulées ont été supprimées pour qu'elles ne prennent pas trop de poids dans le test. Pour éviter l'autocorrélation spatiale (corrélation, positive ou négative, d'une variable avec elle-même du fait de la localisation spatiale des observations), les tests ont été réalisés sur des souséchantillons ré-échantillonnés avec remises (bootstrap ; Hersterberg 2011). Mille souséchantillons de 10 000 points ont été testés pour chaque groupe.
- La distribution des distances parcourues par le troupeau en une heure a été testée entre données observées et données simulées en séparant les différentes phases du modèle et en attribuant ces phases aux données observées (par correspondance d'heure). Des tests de Mann Whitney Wilcoxon (Mann & Whitney 1947) ont été réalisés pour rendre compte des différences entre données simulées et observées. Les données aberrantes ont d'abord été retirées. Les valeurs aberrantes correspondent à toutes mesures de distance dont la valeur n'est pas comprise dans l'intervalle [1,5 x quartile 25% ; 1,5 x quartile 75%].
- Les divergences de Kullback-Leibler (Kullback & Leibler 1951) de la distribution des distances observée et simulée a été calculées pour les deux modèles dans les deux réserves. Ceci afin d'avoir une idée plus précise du modèle ayant les distributions de distance qui divergent le moins de celles observées.

III. <u>Résultats</u>

1. Trajectoires simulées par les deux modèles



En observant une sortie de simulation du modèle « eau » (fig. 6-A) on remarque que le modèle suit bien le sens que nous lui avons donné. Les trajectoires partent dans une direction aléatoire puis prennent la direction d'un point d'eau au début de la phase d'abreuvement. Quand le point d'eau est atteint, les buffles ralentissent et s'arrêtent jusqu'au début de la prochaine phase de divagation libre. A ce moment, une nouvelle direction aléatoire leur est donné et les buffles la suivent jusqu'au début de la prochaine phase d'abreuvement. On remarque des trajectoires très rectilignes pour ce modèle, donnant une forte impression d'aller-retour.

Dans le modèle « eau + occsol » » (fig. 6-B), on observe i) les phases de divagation libre et d'abreuvement qui tracent des trajectoires rectilignes comme pour le modèle « eau » ; ii) la phase de mouvement actif repérable par des groupements de points relativement dispersés avec parfois des retours en arrière en fonction de la couverture du sol et du tirage stochastique ; et iii) la phase de pause caractérisée par un amas de point dans une zone restreinte quand les buffles sont sur une couverture de sol qui leur est favorable. Les légers mouvements malgré un α =0 sont produits par le bruit des mouvements individuels. On remarque que les buffles sont attachés à une aire géographique bien plus restreinte qu'avec le modèle « eau » et que les trajectoires produites par ce modèle correspondent davantage aux trajectoires observées (fig. 6-C).



2. <u>Résultats de l'exploration des préférences de couverture du sol</u>

Table 4 : Proportions d'enregistrement pour chaque couverture du sol en fonction de l'heure et en fonction des mois. Légendes :
Forêt ;
Surface en eau ;
Arbuste ;
Environnement mixte forêt/arbuste ;
Routes ;
Environnement arbustif ouvert/prairie ;
Sol nu ;
Terrain agricole

La table 5 nous montre la proportion d'enregistrements de localisation GPS pour chaque couverture de sol occupée par les buffles en fonction de l'heure de la journée ou des mois. On remarque une grande prépondérance des enregistrements pour la végétation arbustive à Gonarezhou, partagé avec les zones mixtes de forêt/arbuste à Kruger. On remarque une augmentation dans la proportion de ces couvertures de sol préférées entre 3 heure du matin et 18 heures. On remarque également une augmentation de la présence au niveau des points d'eau entre 15 heure et 21 heure à Gonarezhou et entre 14 heures et 21h à Kruger. En observant les proportions d'enregistrement par mois on remarque les mêmes préférences dans les deux réserves que précédemment. Cependant, on observe une augmentation de la proportion des enregistrements pour les couvertures de sols les plus densément boisées (ex. forêt et environnement mixte forêt/arbuste) pendant les mois de saison sèche. Plutôt en saison sèche chaude (d'aout à octobre) à Gonarezhou et en saison sèche froide (de mars à juillet) à Kruger.

3. Validations et mises en comparaison des deux modèles

Ici sont présenté les cartes de chaleurs de différences (simulées-observées) les groupes 1 des deux réserves, les cartes des autres groupes sont disponibles en annexe (annexe 1) :





Figure 7 : Cartes de chaleurs de différences de densité (simulée-observée) pour le groupe 1 de Gonarezhou (G1), à gauche (A) la carte et le MCP 100% simulé obtenues avec le modèle « eau », à droite (B) les résultats du modèle « eau + occ sol ».



Figure 8 : Cartes de chaleurs de différences de densité (simulée-observée) pour le groupe 1 de Kruger (K1) sur la totalité du temps de simulation, à gauche (A) la carte et le MCP 100% simulé obtenues avec le modèle « eau », à droite (B) les résultats du modèle « eau + occ sol ».

Les figures 7 et 8 montres des résultats qui semble similaire pour les deux sites d'études. Les MCP simulés par les deux modèles sont proches de ceux observés, on remarque cependant à Gonarezhou (fig. 7), une zone inexplorée par les buffles simulés au sud-est. On observe également que les fortes valeurs de sur-estimations sont peu étendue dans l'espace. Les modèles surestiment la densité des troupeaux de buffles au niveau des centroïdes des polygones d'eau utilisées, c'est particulièrement vrai à Gonarezhou (fig. 7). La densité des troupeaux est sous estimée dans certaines zones en herbe et en forêt au sud de la rivière à Kruger. Sous estimation qui persiste avec le modèle « eau+occsol ». On observe que le MCP (aire vitale) simulé à une aire plus proche de l'observé pour le modèle « eau + occ sol », ceci est lié aux trajectoires de ce modèle (fig. 6). Ceci a pour conséquence d'augmenter les valeurs de densités simulées pour ce modèle, on a donc des zones de sur-estimations fortes un peu plus étendue.

		Modèle « eau »		Modèle « eau + occ sol »	
	Durée de simulations	ρ	p value	ρ	p value
K1	455 jours	0,66	<0,05	0,53	<0,05
K2	52 jours	0,15	<0,05	-0,14	<0,05
K3	54 jours	0,38	<0,05	-0,03	0,06
K4	462 jours	0,66	<0,05	0,53	<0,05
K5	568 jours	0,78	<0,05	0,62	<0,05
K6	264 jours	0,80	<0,05	0,72	<0,05
G1	871 jours	-0,05	<0,05	-0,26	<0,05
G3	401 jours	0,02	0,11	-0,19	<0,05

Table 5 : Résultats des tests de corrélation de Spearman pour les modèles « eau » et « eau + occ sol », ces tests ont été réalisés avec les rasters médians observés et simulés obtenus avec l'ensemble des temps de simulation.

Le ρ moyen varie de 0,80 à -0,05 pour le modèle « eau » avec le maximum pour les groupes 1 de Kruger et le minimum pour les groupes 1 et 3 de Gonarezhou (table5). Pour le modèle « eau + occ sol », les valeurs de ρ moyens varient de 0,72 à -0,26 (table 5) en conservant sensiblement la même hiérarchie dans les valeurs que pour le modèle « eau ». On notera qu'as Kruger plus le temps de simulation est élevé plus le ρ moyen l'est aussi.

	Modèle « eau »	Modèle « eau+occ sol »	
Kruger	2,36	1,30	
Gonarezhou	3,39	1,75	

Table 6 : Score de divergence de Kullback-Leibler (KLD) obtenu en comparant données de distance parcoure par heure observée et simulée pour les deux modèles.

Les résultats de KLD sont bien inférieurs dans les deux réserves pour le modèle « eau+occ sol » que pour le modèle « eau » (table 6), le modèle « eau + occ sol » diverge moins des données de distance observées. Il semble que le modèle « eau + occ sol » apporte une amélioration par rapport au distance comparé au modèle « eau ».

En séparant les données de distance en fonction des différentes phases (fig. 9) on observe des différences significatives entre distances observées et simulées. On observe également des différences entre les phases aussi bien pour les données simulées que pour les données observées à l'exception des phases de mouvement et d'abreuvement observées de Gonarezhou qui sont similaires pour le modèle en « eau + occ sol ».



Figure 9 : Distance parcourue en une heure en fonction de la phase comportementale des modèles, comparaisons des données observées et simulées, chaque lettre correspond à une famille statistique

IV. <u>Discussions</u>

1. Les données d'entrée du modèles

Les groupes de buffles étudiés ici ne réalisent pas de grandes migrations et sont toujours dans les zones d'études. Ceci est probablement dû à la présence des rivières, de sources alimentaires fiables (Cornélis et al. 2014), également du fait de la protection apportée par les parcs nationaux bien que les barrières soient traversées par les buffles. L'asynchronicité temporelle des données abiotiques de 2018 (eau et couvertures de sol) avec les enregistrements des colliers GPS (2008-2015) doit être soulignée.

L'eau, qui est un facteur limitant pour le buffle, est modélisée en polygones utilisés comme zones d'abreuvements. On observe une augmentation des enregistrements dans des zones en eau en fin d'après-midi/début de soirée dans les deux réserves, ce qui correspond bien à ce qui avait été observé (Rumiano et al. 2021, en publication) à Hwange. La distribution géographique de ceux-ci varie tous les mois. Le découpage des rivières que nous avons utilisées est questionnable. En effet, en plus d'avoir subdivisé les polygones selon une distance de longueur de point d'abreuvement mesurée par observation des données GPS. Nous avons de plus utilisé le domaine vital des observations de données GPS afin de limiter la dispersion des buffles sur la rivière. Cependant l'observation des données collectées proches des points d'eau nous montre une répartition plus homogène de ces groupements de points GPS à Kruger qu'à Gonarezhou. Il en résulte de forts points de surestimation sur les centroïdes de la rivière Mwenezi (fig. 6), liés à une faible présence de buffles dans ces zones. Il s'agit alors de comprendre pourquoi les buffles privilégient telle zone de la rivière plutôt qu'une autre (compétition avec un autre troupeau? /d'autres espèces, prédation? / accessibilité ?) (Leuthold 1977), la variabilité à l'intérieur du polygone de découpe (aires vitales) n'étant pas prise en compte. En revanche, la variabilité saisonnière est prise en compte. Il semble cependant que certaines zones d'abreuvement n'ont pas été détectées via la classification des images satellites Sentinel-2 (Sud-est de Gonarezhou). La couverture végétale (majoritairement arbustive, et plus dense à Kruger) peut avoir empêché le capteur optique du satellite de détecter la présence de points d'eau sous la canopée. De plus, l'observation de point d'eau plus éphémères dont la dynamique est liée aux précipitations n'ont également pas été potentiellement détectés car n'ayant pas été en eau durant la période des images utilisées pour la classification (cf. II-1-b.).

L'études des données de positions de buffles et de l'occupation du sol ont permis d'identifier les préférences d'occupation du sol des buffles en fonction des heures pour les deux réserves. Il était attendu une plus grande proportion d'enregistrements dans les zones de prairies du fait du comportement de brouteur du buffle (Cornélis et al 2014). Cependant, la majorité des enregistrements sont en environnements arbustifs, avec, à Kruger, une proportion quasi équivalente dans les environnements mixtes forêt/arbustes (table 5). Il faut souligner que la classification de sol est subjective. En aucun cas n'est traduit une réalité fonctionnelle par rapport aux buffles. Toutefois, dans des environnements semi-arides il est possible que les espèces herbacées bénéficient d'un effet d'ascenseur hydrique (Moreira et al. 2003) du fait de la présence d'arbres et d'arbustes dont les racines sont plus profondes. Ces herbes pourraient donc présenter une source nutritive plus intéressante. Ces environnements apportent une source d'ombre importante et semble également être plus utilisés en saison sèche (table 5). Il apparait également que les buffles soient capables de se nourrir de fruits et de feuilles d'arbres dans certaines conditions (trade off) (Shanko et al. 2018), ce qui ferait des arbres et des arbustes de potentielles sources alimentaires.

Finalement, les enregistrements de colliers GPS utilisés, du fait qu'ils capturent la position toutes les heures, ne permettent pas de décrire tout le spectre comportemental des buffles. Seules des femelles ont été capturées, les mâles ont un comportement satellite et se déplacent probablement plus (Cornélis et al. 2014). Ces données ne permettent donc pas réellement de connaitre l'utilisation de chaque couverture du sol au temps de la capture. Elle peut seulement être suggérée par la courbe de vitesse médiane utilisée (fig 3 et 5). On pourrait également ajouter que la fréquence d'enregistrement d'une heure n'est pas suffisante pour décrire la complexité du comportement écologique du buffle à l'échelle paysagère. Une fréquence d'enregistrement à la minute serait plus appropriée. Le fait de n'avoir que trois ou quatre individus enregistrés simultanément n'est certainement pas suffisant pour observer les dynamiques collectives intra-troupeaux. Il faudrait beaucoup plus de colliers GPS ou tester l'apport du survol récurrent de drone (Tang & Shao 2015) afin de capturer les évolutions de la morphologie des troupeaux à des moments clés de leur phases comportementales journalières.

2. Le choix d'un modèle mécaniste

Le modèle présenté dans ce mémoire est un modèle mécaniste qui comporte de la stochasticité. Ce type de modèle est moins dépendant des corrélations entre processus écologiques et variables environnementales (Gaucherel 2018) que les modèles statistiques. Moins de données sont nécessaires pour calibrer les différentes variables du modèle, ce qui est

avantageux dans le cas de données chères et/ou laborieuses à obtenir. Moins de paramètres sont également nécessaires pour reproduire des processus écologiques complexes. Cela renforce la généricité et la modularité de ce type de modèle. Les modèles mécanistes se reposent sur les lois fondamentales des sciences naturelles (Kearney and Porter 2009), les paramètres du modèle ont donc une signification, ce qui facilite l'interprétation des résultats et leurs extrapolations.

Les modèles mécanistes demandent cependant un plus grand effort de développement que les modèles statistiques dans la mesure où une phase de description et d'appréhension des comportements des mécaniques de ce que l'on souhaite modéliser est nécessaire. Un modèle basé agent aurait pu être choisi, cependant ceux-ci demandent une plus grande complexité de design et ont une moins bonne reproductibilité (Rumiano et al. 2021, en publications) mais paraissent plus apte à reproduire des réalités spécifiques, par exemple des comportements de surveillance lors de l'abreuvement (Leuthold 1977). Ces modèles demandent cependant beaucoup plus de paramètres pour fonctionner de manière optimale et sont donc plus enclin à reproduire une réalité spécifique qu'une réalité générique. Leur utilisation pourrait être plus intéressante pour d'autres problématiques (ex. animaux solitaires). Le modèle de Grégoire et Chaté fait que la cohésion est fonction du comportement intrinsèque de l'espèce simulé. Il apparait que le modèle présenté ici est original et permet la visualisation du déplacement individuel de collectif de populations animale. Ceci à l'aide de peu de facteurs (eau et couverture du sol), représentés par des données de télédétection. De plus, le modèle a pu être appliqué à de nouvelles réserves suite à modification des données d'entrées. La généricité du modèle doit encore être testée davantage, il semble qu'un nombre d'informations géographiques sur les groupes d'animaux simulés (ex. aires vitales) soient nécessaires au bon fonctionnement du modèle en particulier pour l'eau. Il semble également nécessaire d'identifier un bon indicateur paysager marquant la préférence des buffles pour certaines zones à utiliser en remplacement des rasters de couverture du sol.

3. <u>Application du modèle à de nouvelles zones d'études, effet de l'ajout de la</u> couverture du sol

Les résultats des simulations nous permettent d'observer plusieurs différences entre les deux réserves. De fortes surestimations sur les points d'eau à Gonarezhou (fig. 6), alors que l'on retrouve des sous-estimations et des surestimations à Kruger (fig. 7). Cela se remarque également par les tests de corrélations de Spearman bien inférieurs à Gonarezhou (table 7 et 8). Ceci s'explique par les points d'eau qui n'ont probablement pas été détectés à l'est dont les

buffles peuvent se servir après des événements de pluie (Cornélis et al. 2014 ; plus forte présence à l'est en saison humide : annexes 2 à 4) et qui ne sont pas pris en compte par les troupeaux simulés. Il a été montré dans d'autres réserves que les buffles pendant et après des précipitations s'éloignaient des rivières plus facilement fréquentées par d'autres espèces (Cornélis et al. 2014). Les phénomènes de fission/fusion de troupeau (non reproduis dans le modèle) où les buffles se répartissent en groupes plus restreints sur une zones plus large, ce qui a pour conséquence de réduire la compétition intra spécifique (Wielgus et al., 2020). A Kruger on retrouve des surestimations au nord de la rivière pour le groupe 1 et des sous-estimations au sud (fig. 7). On observe que les buffles passent moins de temps sur la berge nord, probablement du fait de la présence de terrains agricoles sur celles-ci, les buffles ayant tendance à éviter les activités humaines (Miguel Eve 2012). On remarque la même tendance à Gonarezhou où on retrouve moins d'enregistrements de buffles sur la berge ouest à proximité de Malipati. On peut également noter que plus le temps de simulation est long, plus le taux de corrélation est élevé ce qui montre que l'on s'affranchit de la stochasticité sur des temps long.

L'ajout de la couverture du sol permet de faire de nouvelles observations. Les trajectoires passent de rectilignes (fig. 6), pour le modèle eau, à plus aléatoire pour le modèle « eau + occ sol » du fait de l'ajout du système visée et de la phase de repos/rumination. C'est d'ailleurs cette trajectoire qui ressemblent le plus à l'observée (fig. 6-C), ce qui est une grosse amélioration par rapport au modèle « eau » dont les trajectoires ne sont pas réalistes. On observe cependant que les différences entre distances parcourues par heures observées et simulées restent importantes (fig. 9). Le principal impact de la réduction de dispersion des troupeaux est induit par l'ajout de nouvelles phases et de mouvements plus aléatoires et limités dans l'espace (zone tampon). Par conséquent, les zones vitales simulées ont une aire moins grande et s'approchent plus des données observées pour le modèle « eau + occ sol ». Une conséquence de ceci est que les densités simulées sont plus importantes pour ce modèle et plus faibles (mais plus étendue) pour le modèle « eau ». Créant de plus grands écarts entre les données simulées et observées, expliquant de moins bon résultats des tests de corrélation pour le modèle « eau + occ sol ». Il semblerait alors que la couverture du sol ne soit pas un indicateur paysager suffisamment fin pour caractériser les déplacements précis d'un troupeau de buffles dans le cas spécifique de cette étude. L'ajout de cette variable constitue toutefois une amélioration importante par rapport au modèle « eau » précédent (meilleures trajectoires et aires vitales simulées).

L'étude de la distribution des distances parcourues par heure permet également de montrer une amélioration apportée par le modèle « eau + occ sol ». L'indice de KLD (table 6) a fortement diminué par rapport au modèle « eau », indiquant des distributions de distance moins différentes de par leur divergence pour le modèle « eau + occ sol ». L'étude la distribution de ces distances en fonction des différentes phases déterminées nous montre également que le découpage des phases comportementales choisi est pertinent. Pour les deux modèles, des différences significatives entre les données observées des différentes phases sont calculées (fig. 6). Il en va de même pour les données simulées qui sont significativement différentes entre elles pour les différentes phases. On remarque que les distributions simulées du modèles « eau + occ sol » se rapprochent bien plus des observées que celles du modèle « eau ». L'étude des vitesses (fig. 3 et 4) nous a fait paramétrer un α similaire pour les phases d'abreuvement et de mouvement actif. Il semblerait cependant qu'une nouvelle calibration soit nécessaire pour le nouveau modèle. Par exemple, les résultats des phases de pause simulées sont élevés par rapport aux distances observées. Ceci est probablement causé par un η (bruit) faisant se mouvoir les buffles de manière individuelle, et faisant se déplacer le troupeau de manière trop importante. Il semble également important de noter que les valeurs aberrantes de distance ont été déterminées de manière totalement arbitraire et retirée par souci de représentation graphique. Parmi ces valeurs (qui ne sont pas reproduites par les modèles), le maximum de distance parcourue en une heure est d'environ douze kilomètre. Or, il est tout à fait probable qu'un buffle et son troupeau puissent parcourir cette distance en une heure suite à un événement de fuite ou lors de phénomènes de fission/fusion du troupeau par exemple (Cornélis et al. 2014).

4. <u>Ouverture : quelles améliorations envisageables, quels avenirs pour ce type</u> <u>d'approche ?</u>

En parallèle de ce modèle est développé un modèle de mouvement de population de vaches. Les deux seront ensuite combinés afin de pouvoir identifier les zones de contact entre ces deux populations dans le cadre de la thèse de Florent Rumiano (Rumiano et al. 2021, en publication). Il semble également que le modèle de mouvement de population des buffles puisse être affiné afin de simuler au mieux ceux-ci. L'évitements des activités humaines par les buffles, qui semble plus important à Kruger, pourrait également être modélisé en les empêchant de s'approcher des zones agricoles ou encore des troupeaux de vaches simulées. La réaction des buffles par rapport aux feux de brousses ou encore aux précipitations (et leurs incidences sur les déplacements de buffles à Gonarezhou en particulier ; Rumiano et al. 2020)

pourrait également être étudiées et modélisés. D'autant plus que leurs dynamiques se voient impactées par le réchauffement climatique. La topographie est un autre facteur qui pourrait avoir une incidence importante sur le déplacement des buffles. En effet, cela permettrait d'identifier des terrains impraticables (pente trop élevée) ou des corridors. La topographie de surface pourrait également nous apporter des précisions quant à la structure des espaces végétalisés et caractériser plus fidèlement les espaces ouverts des espaces fermés et donc, par extrapolation, les lieux que les buffles privilégient pour leurs déplacements.

Nous avons vu que la couverture du sol ne permet pas d'identifier précisément les zones privilégiées par les buffles. La bibliographie (Ryan 1998) nous montre que le NDVI n'est pas un indice permettant de caractériser le déplacement des buffles. En effet ceux-ci pourraient privilégier une espèce pour se nourrir qui pourrait se retrouver dans plusieurs types de couverture de sol ou dans des zones géographiques particulières au sein d'un type couverture du sol. Il semble que le facteur de distance à l'eau soit assez structurant du territoire des buffles (Cornélis et al. 2014). L'utilisation d'un raster avec des classes de valeurs catégorisées par l'espèce végétale dominante de la zone ou par la présence et/ou l'absence de certaines espèces dont les buffles se nourrissent, augmenter la biodiversité végétale prise en compte dans le modèle, pourrait être une perspective intéressante. Cependant difficile à mettre en place car demandant des moyens de télédétection important (ex. drones ; Tang & Shao 2015, images satellites couteuses et obligation d'une puissance de calcul élevée) ou une étude floristique relativement précise dans une zone très étendue.

La plateforme de modélisation Ocelet (Degenne et Lo Seen 2016) rendrait possible l'implantation de ces facteurs. Elle permettrait également à deux espèces différentes d'être modélisées dans un même espace en interagissant entre elles. Il apparait alors possible de modéliser les dynamiques spatiales et temporelles de différentes espèces d'un système trophique à conditions de bien identifier les facteurs ayant un impact important sur leur déplacement (eau, proie etc). Des modèles mécanistes de différents types (autres que Grégoire et Chatté) pourraient être utilisées et créer pour correspondre à l'écologie de chaque espèce et les dynamiques de populations pourraient également être modélisées. L'implémentation de modèle de dynamique de population et/ou de modèle épidémiologique semble également envisageable. Une approche pour simuler les déplacements important observés (considérées comme « valeurs aberrantes » plus haut) serait de mesurer la proportion de chaque comportement (Ryan & Jordan 2005 ; Owen-Smith & Goodal 2014) dans la journée d'un buffle. Ceci afin d'identifier des probabilités (fréquence) pour chaque comportement d'avoir lieux en fonction de l'heure de la journée et du dernier comportements réalisé. Ceci imposerait cependant un suivi de populations de buffles 24h sur 24h avec des échantillons importants.

V. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, les mouvements de populations de buffles du Cap ont été modélisés en fonction de deux variables environnementales, l'eau et l'occupation du sol. Bien que semblant légèrement surestimer le domaine vital des buffles, il apparait que le modèle « eau + occ sol » puisse être utile pour identifier les zones de contact avec les vaches dans le cas où ceux-ci se font au niveau de points d'eau. Cependant, il semble important de noter qu'il s'agit ici d'une première approche de l'utilisation de ce type de modèle. La généricité du modèle a été testée et validée. L'utilisation de données de télémétrie en nombre supérieur et avec une résolution temporelle plus fine, ainsi que l'implémentation de davantage de données environnementales, pourraient potentiellement améliorer la capacité du modèle à reproduire les mouvements des buffles dans le temps et dans l'espace. L'objectif est de permettre, à terme, l'utilisation de cette approche méthodologique comme outils de prédiction et de gestion répondant aux enjeux écologiques actuels et à venir en matière de cohabitation aux interfaces entre sociétés humaines et populations animales sauvages.

VI. <u>Bibliographie</u>

- Anderson, Jens A, Michel De Garine-Wichatitsky, David H.M. Cumming, Vupenyu Dzingirai, et Ken E. Giller. « Transfrontier Conservation Areas : People Living on the Edge ». The European Journal of Development Research 27, no 2 (avril 2015) : 330-31. https://doi.org/10.1057/ejdr.2014.40.
- Bennitt, Emily, Mpaphi Casper Bonyongo, et Stephen Harris. « Behaviour-Related Scalar Habitat Use by Cape Buffalo (Syncerus Caffer Caffer) ». Édité par Sadie Jane Ryan. PLOS ONE 10, no 12 (16 décembre 2015) : e0145145. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145145.
- Brashares, Justin S., Peter Arcese, et Moses K. Sam. « Human Demography and Reserve Size Predict Wildlife Extinction in West Africa ». Proceedings of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences 268, no 1484 (7 décembre 2001): 2473-78. https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1815.
- Campbell, C. « Chapter 7 An Introduction to Kernel Methods », Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2001.
- Caron, Alexandre, Daniel Cornelis, Chris Foggin, Markus Hofmeyr, et Michel de Garine-Wichatitsky. « African Buffalo Movement and Zoonotic Disease Risk across Transfrontier Conservation Areas, Southern Africa ». Emerging Infectious Diseases 22, no 2 (février 2016) : 277-80. https://doi.org/10.3201/eid2202.140864.
- Caron, A., E. Miguel, C. Gomo, P. Makaya, D. M. Pfukenyi, C. Foggin, T. Hove, et M. de Garine-Wichatitsky. « Relationship between Burden of Infection in Ungulate Populations and

Wildlife/Livestock Interfaces ». Epidemiology and Infection 141, no 7 (juillet 2013) : 1522-35. https://doi.org/10.1017/S0950268813000204.

- Chaté, H., F. Ginelli, G. Grégoire, F. Peruani, et F. Raynaud. « Modeling Collective Motion : Variations on the Vicsek Model ». The European Physical Journal B 64, no 3-4 (août 2008) : 451-56. https://doi.org/10.1140/epjb/e2008-00275-9.
- « Climat Zimbabwe : Pluviométrie, Température moyenne Zimbabwe, diagramme ombrothermique pour Zimbabwe - Climate-Data.org ». Consulté le 7 juin 2021. https://fr.climate-data.org/afrique/zimbabwe-228/.
- Cornélis, D., Melletti, M., Korte, L., Ryan, S., Mirabile, M., Prin, T., & Prins, H. (2014). African buffalo Syncerus caffer (Sparrman, 1779). In M. Melletti & J. Burton (Eds.), Ecology, Evolution and Behaviour of Wild Cattle: Implications for Conservation (pp. 326-372).
 Cambridge : Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139568098.022
- De Garine-Wichatitsky, M., E. Miguel, B. Mukamuri, E. Garine-Wichatitsky, J. Wencelius, D.M. Pfukenyi, et A. Caron. « Coexisting with Wildlife in Transfrontier Conservation Areas in Zimbabwe : Cattle Owners' Awareness of Disease Risks and Perceptions of the Role Played by Wildlife ». Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases 36, no 3 (mai 2013) : 321-32. https://doi.org/10.1016/j.cimid.2012.10.007.
- Degenne, P., et D. Lo Seen. « Ocelet : Simulating Processes of Landscape Changes Using Interaction Graphs ». SoftwareX 5 (2016): 89-95. https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.05.002.
- Gadaga, B. M., E.M.C. Etter, B. Mukamuri, K. J. Makwangudze, D. M. Pfukenyi, et G. Matope. « Living at the Edge of an Interface Area in Zimbabwe: Cattle Owners, Commodity Chain and Health Workers' Awareness, Perceptions and Practices on Zoonoses ». BMC Public Health 16, no 1 (décembre 2015): 84. https://doi.org/10.1186/s12889-016-2744-3.
- Gaucherel Cédric. « Physical concepts and ecosystem ecology: a revival? ». Journal of Ecosystem and Ecography, OMNICS International, 2018, 8 (2), pp.257. (hal-02166073)
- Gretenbach WPD, « Landscapes of the Kruger National park ». Koedoe 26, n°1 (1983)
- He, Kate S., Bethany A. Bradley, Anna F. Cord, Duccio Rocchini, Mao-Ning Tuanmu, Sebastian Schmidtlein, Woody Turner, Martin Wegmann, et Nathalie Pettorelli. « Will Remote Sensing Shape the next Generation of Species Distribution Models ? » Édité par Harini Nagendra et Ned Horning. Remote Sensing in Ecology and Conservation 1, no 1 (octobre 2015) : 4-18. https://doi.org/10.1002/rse2.7.
- Hesterberg, Tim. « Bootstrap: Bootstrap ». Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 3, no 6 (novembre 2011): 497-526. https://doi.org/10.1002/wics.182.
- « Human Development Data Center | Human Development Reports ». Consulté le 9 juin 2021. http://hdr.undp.org./en/data.
- Infield M., Namara A., « Community attitudes and behaviour toward conservation : an assessment of a community conservation programme around Lake Mburo National Park, Uganda ». Otyx vol 35 n°1, 2001, 48-60. https://doi.org/10.1046/j.1365-3008.2001.00151.x
- IUCN 2021. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-1. https://www.iucnredlist.org
- Kearney, M., Porter, W., 2009. « Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges ». Ecology Letters 12, 334–350. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01277.x
- Kullback S. et R. Leibler, « On information and sufficiency », Annals of Mathematical Statistics, vol. 22, 1951, p. 79-86.

- Leuthold Walter. « African Ungulate, acomparative review of their ethology and behavioral ecology ». Zoophysiology and Ecology volume 8, 1977, doi: 10.1007/978-3-642-81073-2
- Loveridge, A.J., A.W. Searle, F. Murindagomo, et D.W. Macdonald. « The Impact of Sport-Hunting on the Population Dynamics of an African Lion Population in a Protected Area ». Biological Conservation 134, no 4 (février 2007): 548-58. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.09.010.
- Mann Henry B. et Whitney Donald R., « On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other », Ann. Math. Stat., vol. 18, no 1, 1947, p. 50–60 (DOI 10.1214/aoms/1177730491).
- Marchand, Pascal, Mathieu Garel, Gilles Bourgoin, Dominique Dubray, Daniel Maillard, et Anne Loison. « Impacts of Tourism and Hunting on a Large Herbivore's Spatio-Temporal Behavior in and around a French Protected Area ». Biological Conservation 177 (septembre 2014): 1-11. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.022.
- Martini, Francesco, Robert Cunliffe, Alessio Farcomeni, Michele De Sanctis, Giacomo D'Ammando, et Fabio Attorre. « Classification and Mapping of the Woody Vegetation of Gonarezhou National Park, Zimbabwe ». Koedoe 58, no 1 (31 mars 2016): 10 pages. https://doi.org/10.4102/koedoe.v58i1.1388.
- Miguel Eve. « Contacts et diffusion de pathogènes des ongulées sauvages aux ongulés domestiques africains » Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2012.
- Miguel, Eve, Vladimir Grosbois, Alexandre Caron, Thierry Boulinier, Hervé Fritz, Daniel Cornélis, Chris Foggin, Pious V. Makaya, Priscillia T. Tshabalala, et Michel de Garine-Wichatitsky. « Contacts and Foot and Mouth Disease Transmission from Wild to Domestic Bovines in Africa ». Ecosphere 4, no 4 (avril 2013): art51. https://doi.org/10.1890/ES12-00239.1.
- Miguel, Eve, Vladimir Grosbois, Hervé Fritz, Alexandre Caron, Michel de Garine-Wichatitsky, Florian Nicod, Andrew J Loveridge, Brent Stapelkamp, David W. Macdonald, et Marion Valeix. « Drivers of Foot-and-Mouth Disease in Cattle at Wild/Domestic Interface: Insights from Farmers, Buffalo and Lions ». Édité par Helen Regan. Diversity and Distributions 23, no 9 (septembre 2017): 1018-30. https://doi.org/10.1111/ddi.12585.
- Mikle, Nate L., Tabitha A. Graves, et Edward M. Olexa. « To Forage or Flee: Lessons from an Elk Migration near a Protected Area ». Ecosphere 10, no 4 (avril 2019): e02693. https://doi.org/10.1002/ecs2.2693.
- Moreira, M. Z., F. G. Scholz, S. J. Bucci, L. S. Sternberg, G. Goldstein, F. C. Meinzer, et A. C. Franco. « Hydraulic Lift in a Neotropical Savanna: Water Relations in the Brazilian Cerrado ». Functional Ecology 17, no 5 (octobre 2003): 573-81. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2003.00770.x.
- Morzillo, Anita T., Kirsten M. de Beurs, et Chelsea J. Martin-Mikle. « A Conceptual Framework to Evaluate Human-Wildlife Interactions within Coupled Human and Natural Systems ». Ecology and Society 19, no 3 (2014): art44. https://doi.org/10.5751/ES-06883-190344.
- Nyhus, Philip J. « Human–Wildlife Conflict and Coexistence ». Annual Review of Environment and Resources 41, no 1 (novembre 2016): 143-71. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085634.
- Owen-Smith, N., et V. Goodall. « Coping with Savanna Seasonality: Comparative Daily Activity Patterns of African Ungulates as Revealed by GPS Telemetry». Journal of Zoology 293, no 3 (juillet 2014): 181-91. https://doi.org/10.1111/jzo.12132

- Pryke A., Mostaghim S., Nazemi A. (2007) « Heatmap Visualization of Population Based Multi Objective Algorithms ». In: Obayashi S., Deb K., Poloni C., Hiroyasu T., Murata T. (eds) Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4403. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70928-2_29
- Rumiano, Florent, Elodie Wielgus, Eve Miguel, Simon Chamaillé-Jammes, Hugo Valls-Fox, Daniel Cornélis, Michel De Garine-Wichatitsky, Hervé Fritz, Alexandre Caron, et Annelise Tran. « Remote Sensing of Environmental Drivers Influencing the Movement Ecology of Sympatric Wild and Domestic Ungulates in Semi-Arid Savannas, a Review ». Remote Sensing 12, no 19 (2 octobre 2020): 3218. https://doi.org/10.3390/rs12193218.
- Rumiano, Florent ; Miguel, Eve ; Caron, Alexandre ; Dupuy, Stéphane, Tran, Annelise, 2021, "Land cover map, Malipati site, Gonarezhou National Park, Zimbabwe", https://doi.org/10.18167/DVN1/2SFOA5, CIRAD Dataverse.
- Rumiano, Florent ; Miguel, Eve ; Caron, Alexandre ; Dupuy, Stéphane ; Tran, Annelise, 2021, "Land cover map, Sengwe site, Kruger National Park, Zimbabwe", CIRAD Dataverse.
- Ryan,S.J. "Spatial Ecology of African Buffalo and their Resources in a Savanna Ecosystem". Thèse de doctorat. Université de Californie, Berkeley.
- Ryan, S.J., et W. Jordaan. « Activity Patterns of African Buffalo Syncerus Caffer in the Lower Sabie Region, Kruger National Park, South Africa ». Koedoe 48, no 2 (19 décembre 2005): 117-24. https://doi.org/10.4102/koedoe.v48i2.98
- Shanko, Lidetu, Diriba Diba, et Gemeda Duguma. « Botanical Composition, Biomass Yield and Nutrient Content of Major Browse Resources and Feeding Behavior of Buffaloes (Syncerus Caffer) in Dhati Walal National Park, Western Ethiopia », 2018, 8.
- Smit, Izak P.J., Cornelia C. Grant, et Bernard J. Devereux. « Do Artificial Waterholes Influence the Way Herbivores Use the Landscape? Herbivore Distribution Patterns around Rivers and Artificial Surface Water Sources in a Large African Savanna Park ». Biological Conservation 136, no 1 (avril 2007): 85-99. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.11.009.
- Tang, L., Shao, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. J. For. Res. 26, 791–797 (2015). https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y
- Thurfjell, Henrik, Simone Ciuti, et Mark S Boyce. « Applications of Step-Selection Functions in Ecology and Conservation ». Movement Ecology 2, no 1 (décembre 2014): 4. https://doi.org/10.1186/2051-3933-2-4.
- Valls Fox Hugo. « Boire ou ne pas boire ? De l'influence de la disponibilité en ressources sur l'approvisionnement et la sélection de l'habitat des éléphants dans un savane semi-aride », thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2015.
- Venter, F.J., & W.P.D. Gertenbach. "A Cursory Review of the Climate and Vegetation of the Kruger National Park." Koedoe [Online], 29.1 (1986): 139-148. Web. 7 Jun. 2021. https://doi.org/10.4102/koedoe.v29i1.526
- Vicsek, T., Czirók, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., Shochet, O., 1995. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. Phys. Rev. Lett. 75, 1226–1229. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.1226
- Wittemyer, G., P. Elsen, W. T. Bean, A. C. O. Burton, et J. S. Brashares. « Accelerated Human Population Growth at Protected Area Edges ». Science 321, no 5885 (4 juillet 2008): 123-26. https://doi.org/10.1126/science.1158900.
- « Zimbabwe: Human demographic situation ». Consulté le 17 mai 2021. https://www.ess.co.at/GAIA/CASES/ZIM/demographics.html.

Résumé / Summary:

Dans un contexte d'explosion démographique humaine, les zones d'interface, transition entre espaces protégés/anthropisés sont des aires privilégiées pour l'études des contacts entre population animale sauvage et domestique. Un modèle mécaniste de mouvement de population de buffle du Cap (Syncerus cafer cafer) a été créé à l'interface de la réserve de Hwange au Zimbabwe. Ce modèle « eau » essaye de reproduire les comportements de déplacement des buffles en fonction à l'eau. Le premier but de ce stage a été d'adapter ce modèle à deux nouvelles zones d'études d'interfaces zones naturelles/anthropisées au niveau des réserves de Kruger (Afrique du Sud) et de Gonarezhou (Zimbabwe). Il fallut prendre en compte les différences hydro-morphologiques entre Hwange et Kruger/Gonarezhou en modifiant les fichiers de polygones d'eau d'entrée du modèle. Un second modèle « eau + occ sol » a été créé en essayant de modéliser l'influence de l'occupation du sol sur le déplacement d'un troupeau de buffles en conservant les comportement d'abreuvement. Après validation des deux modèles, il semblera que le nouveau modèle représente une amélioration du précédent modèle, simulant de manière plus précise l'aire vitale et les distances parcourues par heures. Dans le cas des réserves avec rivière les buffles simulés tendent à utiliser une portion plus importantes des rivières étudiées que les buffles observés.

In a context of human population growth and associated ecosystem alterations, interface area between protected and anthropic environments are the forefront to study contact between wild and domestic animal population. A mechanistic model of Cape buffalo's populations movements has been created at the interface of Hwange National Park (NP), Zimbabwe. This « water » model tries to reproduce buffalo's movement behavior. The first goal of this internship was to adapt this model to two news interfaces studies zones at Kruger NP (South Africa, at Zimbabwe frontier) and Gonarezhou NP (Zimbabwe). Hydromorphologic differences between Hwange and Kruger/Gonarezhou has been taking in count by modifying water polygons used by the model. A second model « water + land-cover » has been created while trying to modelise land-cover influence on buffalo's movement while maintaining drinking behavior inside. After the two models validation, the new model seems to be an upgrade of the previous, simulating with more precisions buffalos home range and distances traveled per hour. For studies zones with rivers, simulated buffalos tend to use a wider proportions of rivers than the observation suggested.

Annexes :





Annexe 1 : Cartes de chaleurs de différences de densité (simulée-observée) pour les groupes non présentés en résultats.



Annexe 2 : Cartes de chaleurs de différence de densité (simulée-observée) du groupe 1 de Gonarezhou pour la saison humide. Cartes obtenues avec les simulations du modèle « eau + occ sol ».



Annexe 3 : Cartes de chaleurs de différence de densité (simulée-observée) du groupe 1 de Gonarezhou pour la saison sèche froide. Cartes obtenues avec les simulations du modèle « eau + occ sol ».



Annexe 4 : Cartes de chaleurs de différence de densité (simulée-observée) du groupe 1 de Gonarezhou pour la saison sèche chaude. Cartes obtenues avec les simulations du modèle « eau + occ sol ».