

RAPPORT FINAL
Programme « Modélisation et scénarios de la biodiversité »
Appel à projets 2013

Acronyme: **CERISE**

Projet n°: AAP-SCEN-20B III

TITRE DU PROJET: SCEnarios of Rodent Invasion in the SahEl: Global change impact on the expansion of the Nigerian Gerbil and the House Mouse in Senegal

Rédacteurs du rapport: Laurent GRANJON / JEAN LE FUR
E-mail : laurent.granjon@ird.fr

Date de rédaction: Février/mars 2018

Durée du projet: 3 ans et demi
Date de début: 16/06/2014

Date de fin: 16/12/2017

La restitution d'informations sur l'état d'avancement des projets financés par la FRB s'organise en quatre volets :

- une description très courte à destination d'un public large
- un résumé à destination d'un public plus averti (utilisateurs, porteurs d'enjeux, etc.)
- un rapport scientifique détaillant les résultats et productions du projet
- un rapport sur les actions de diffusion et d'exploitation des résultats

1. Description courte à publier

La souris domestique et la gerbille nigériane sont deux espèces de rongeurs en expansion au Sénégal du fait des changements globaux, d'origines anthropique et climatique. En prenant en compte les données de présence / absence connues de ces deux espèces ainsi que les principaux facteurs environnementaux qui leur sont favorables, nous avons étudié leur capacité d'expansion dans le pays à partir de deux types de modèles (modèles statistiques et mécanistes). Les capacités d'implantation de la souris dans une localité qu'elle a pu coloniser via les transports routiers suggèrent que son expansion dans le pays n'est pas terminée. En revanche, la répartition actuelle de la gerbille au Sénégal semble déjà correspondre à sa distribution potentielle compte tenu des conditions environnementales rencontrées. Des opérations de communication et retour d'information dans les régions du nord Sénégal concernées par ces invasions ont été menées, visant à alerter sur l'expansion de ces espèces et sur les risques associés en matière d'impact sur la biodiversité, l'agriculture et la santé.



Gerbillus nigeriae, la Gerbille nigériane (à gauche) et *Mus musculus*, la souris domestique (à droite) et leurs habitats de prédilection au Sahel

2. Résumé

La souris domestique (*Mus musculus*) et la gerbille nigériane (*Gerbillus nigeriae*) sont deux espèces de rongeurs en expansion au Sénégal. La souris, espèce commensale transportée par l'homme, y profite de l'augmentation du trafic et des aménagements routiers ainsi que de l'urbanisation progressive dans l'ensemble du pays. La gerbille, espèce d'extérieur adaptée aux zones arides, est entrée au Sénégal il y a une trentaine d'années et y a progressé de façon rapide, occupant aujourd'hui une grande partie de la moitié nord du pays. Ces deux espèces invasives sont potentiellement responsables de plusieurs problèmes: dégâts aux cultures sèches et aux stocks pour la gerbille, déprédations sur les denrées et les biens pour la souris, rôle de réservoir de maladies transmissibles à l'homme et au bétail, et impact sur la biodiversité locale pour les deux espèces. Afin d'anticiper les risques variés associés à ces espèces, nous avons dans ce projet tenté i) d'explicitier les causes du succès de ces deux espèces de rongeurs au Sénégal et ii) d'évaluer l'expansion spatiale de leur distribution dans le pays à court terme.

Il s'est agi dans un premier temps de compiler après en avoir vérifié la qualité l'ensemble des données de présence / absence connues de ces deux espèces à l'échelle du Sénégal, ainsi qu'à l'échelle de la bande sahéenne pour *G. nigeriae*. Pour ces espèces de mœurs nocturnes et donc difficiles à observer, les sources de données principales ont été d'une part les résultats des campagnes de piégeage menées au cours des dernières décennies dans la région d'intérêt, ainsi que ceux issus du tri de pelotes de régurgitation de rapaces nocturnes (chouette effraie en particulier) en tant que prédateurs majeurs de ces rongeurs. En parallèle, nous avons répertorié les principaux facteurs environnementaux susceptibles d'influencer la distribution de ces espèces : paramètres concernant la nature et l'utilisation du sol, la végétation et le climat pour la gerbille, paramètres liés à la géographie humaine pour la souris (réseaux et intensité de transport, taille et infrastructures urbaines, présence de marchés permanents / hebdomadaires...).

Un important travail de modélisation a été réalisé : modèles de types statistiques et mécanistes à différentes échelles géographiques selon la question posée. Les résultats ont été exprimés sous forme de cartes de distribution (illustrant des probabilités de présence, ou issues de simulation) mais également sous forme de différents indicateurs de sortie de modèle (relation présence de rongeurs / valeur des paramètres, tailles des populations, nombre de « patches » occupés...). Ainsi, la comparaison de modèles de niche écologique à l'échelle de l'ensemble de la distribution de la gerbille (Sahel, zone d'occupation historique) ainsi qu'à l'échelle de sa zone d'invasion récente au Sénégal ont permis de montrer que l'aire occupée par l'espèce au Sénégal était plutôt plus importante qu'attendu au regard de sa niche écologique « historique », suggérant une distribution non à l'équilibre au Sénégal, ou la présence de caractéristiques environnementales favorables particulières à ce pays. Pour cette espèce, un modèle informatique individu-centré à moyenne emprise (échelle du Sénégal et des régions limitrophes) aboutit à l'hypothèse que la dispersion moyenne dans les populations devait être assez importante (plusieurs kilomètres par mois pendant la période de dispersion des jeunes adultes) pour qu'une progression de près de 200km vers le sud ait pu se faire depuis l'entrée de l'espèce dans le nord du pays. A plus petite emprise, la modélisation multi-agents s'emploie à valider le fonctionnement des populations de gerbilles en simulant les activités et interactions des individus dans leur environnement sahéen reconstitué pour expliquer ces distances de dispersion importantes.

En ce qui concerne la souris, un modèle multi-agents mis en place pour le rat noir (*Rattus rattus*) a été adapté. Ce modèle est basé sur une simulation du transport routier associé au réseau des routes et pistes du Sénégal et sur la probabilité que des véhicules « embarquent » des rongeurs. Pour la souris, outre l'adaptation nécessaire des paramètres biologiques et comportementaux spécifiques, la présence de marchés hebdomadaires, garantissant à la fois un « approvisionnement » potentiel en colonisateurs via le trafic routier induit et des facilités d'installation des individus immigrant, a été retenu comme un déterminant important de colonisation par l'espèce de nouvelles localités. Ceci a donc impliqué un recensement desdits marchés, avec leurs caractéristiques principales (date de création, fréquence...). A l'échelle d'un marché hebdomadaire type, la modélisation de l'installation progressive d'une population de souris dans l'environnement reconstitué a été envisagée. Sur la base d'une cartographie préalable du village et la caractérisation de tous les espaces en termes d'habitats plus ou moins favorables aux souris, les capacités d'implantation d'une population à partir des apports commerciaux ont été simulées et étudiées.

Dans le prolongement de cette phase de modélisation, un retour-terrain a été effectué dans le but de valider certaines projections des modèles. Ainsi, quatre missions d'échantillonnages des rongeurs ont été menées dans le but de: i) préciser la position du front de colonisation de la gerbille au centre du Sénégal ; ii) préciser la distribution de la gerbille le long de la zone côtière entre Dakar et Saint-Louis ; iii) évaluer l'avancement de la colonisation par la souris de certaines régions particulièrement mal desservies, peu densément peuplées et aux infrastructures peu développées jusqu'à récemment. Les résultats de ces prospections ont permis de valider certains modèles au détriment d'autres, et d'actualiser les distributions de ces deux espèces invasives au Sénégal.

Enfin, et en particulier à l'occasion des missions de validation-terrain mentionnées ci-dessus, des opérations de communication et retour d'information dans les régions du nord Sénégal concernées par ces invasions ont été menées, visant à alerter sur l'expansion de ces espèces et sur les risques associés en matière d'impact sur la biodiversité, l'agriculture et la santé. Ces opérations ont été menées en utilisant un ensemble de supports de communication mis au point pendant le projet, et incluant : des affiches et banderoles, un court film d'animation à vertu pédagogique, la participation de l'équipe du projet à des émissions radio, des représentations théâtrales ... Ces actions ont touché un grand nombre de bénéficiaires parmi les autorités administratives et traditionnelles locales, les réseaux de santé, les associations villageoises et, de façon générale une partie représentative des populations des villages visités.

3. Vos principaux résultats valorisés dans les publications scientifiques

Les premiers articles sont en cours de finalisation, leurs résultats sont décrits dans ce qui suit.

4. Rapport d'activités et productions scientifiques¹

Illustrations présentées dans le rapport

Figure 1 Les différentes emprises spatiales considérées pour la modélisation de <i>G. nigeriae</i>	6
Figure 2 Evolution de la distribution des petits mammifères au Sénégal entre 1983 et 2014	7
Figure 3 Démarche de sélection des variables environnementales d'extérieur significatives pour <i>G. nigeriae</i>	7
Figure 4 Données satellites de la pluviométrie mensuelle sur la zone Ouest Africaine (ex : année 1999).....	9
Figure 5 Classification pédologique – Réinterprétée	9
Figure 6 Numérisation du réseau routier sénégalais pour la simulation du transport des rongeurs commensaux	10
Figure 7 Caractérisation de l'environnement urbain de la commune rurale de Dodel	10
Figure 8 Recoupement de niches entre aire historique et aire en cours de colonisation de <i>G. nigeriae</i>	13
Figure 9 Gradients favorables à <i>Gerbillus nigeriae</i> selon deux modes de calibration du modèle de distribution	14
Figure 10 Environnement de développement du simulateur des populations de gerbilles à petite emprise	16
Figure 11 Scénarios d'expansion de populations de gerbilles à moyenne emprise	17
Figure 12 Interrelations spatiales produites par l'offre de transports non spécifiquement dédiés aux marchandises	18
Figure 13 Influence de la fréquence d'introduction sur l'installation de populations de souris simulées dans une commune rurale	19
Figure 14 Situation des localités échantillonnées pour valider la limite sud de <i>G. nigeriae</i>	20
Figure 15 Situation des localités échantillonnées pour valider la limite ouest de <i>G. nigeriae</i>	20
Figure 16 Evolution du ratio nombre de <i>Mus musculus</i> / Nombre total de petits mammifères commensaux (x100) depuis 2011.....	21
Figure 17 Banderole d'information sur la gerbille en langues locales.....	28

Description générale des activités et résultats

Contexte et enjeu

La région sahélienne, entre désert saharien au nord et savane arborée soudanienne au sud est, comme d'autres zones de contact, est caractérisée par une forte instabilité écologique (Popov 1996). Depuis quelques décennies, cette région est soumise à d'importantes perturbations climatiques et anthropiques (Lebel et Ali 2009, Brandt et al. 2014), avec des répercussions notables sur la structure des peuplements locaux végétaux (Gonzalez et al. 2012) et animaux (Walther 2016). Dans le Sahel sénégalais, ces perturbations peuvent être appréhendées sous différents points de vue. D'un point de vue pluviométrique, après la série d'années déficitaires des années 1970 aux années 1980, une tendance au retour à des conditions plus pluvieuses s'est manifestée depuis la fin des années 1990, avec toutefois une forte variabilité inter-annuelle (Bodian 2014). La courbe des moyennes de températures a, quant à elle, montré une croissance régulière depuis les années 1960 (voir Brandt et al. 2014 pour l'ouest du

¹ Les références soulignées correspondent à des productions du projet

Sahel). Du point de vue de la diversité botanique, un appauvrissement ressort de l'analyse scientifique du fait de la disparition progressive de plusieurs espèces sahéliennes ; ce changement est dans le même temps ressenti par les populations locales (Gonzalez et al. 2012, Brandt et al. 2014). Une forte intensité de broutage dans cette zone d'intérêt majeur pour l'élevage bovin, ovin et caprin (Cesaro et al. 2010) y a par ailleurs occasionné une dégradation générale des zones de pâturage et l'évolution vers un profil botanique plus aride (Miehe et al. 2010).

Dans le même temps, l'urbanisation au Sénégal s'est accélérée, la proportion de citoyens ayant quasiment doublé ces dernières décennies (de 23 % dans les années 1960 à 43 % en 2013 ; Banque Mondiale 2015). Cette tendance s'est accompagnée d'un développement des infrastructures routières, avec réhabilitation et construction de plusieurs milliers de kilomètres de routes et de pistes rurales depuis 2012 dans le cadre du PNDL (Programme National de Développement Local) visant notamment à relier chaque chef-lieu de commune à une piste latéritique, ainsi que de la modernisation des services de transport urbains et interurbains (Lombard, 2015 ; Lombard et Ninot, 2010). Un des exemples les plus spectaculaires en est probablement le bitumage de la Route Nationale 3 à travers la région du Ferlo, complété au cours des dernières années, qui permet aujourd'hui d'envisager le désenclavement de cette zone jusque-là difficile d'accès.

Ce contexte de changements globaux et de développement économique fort est doublement favorable à l'arrivée d'espèces invasives (Dukes & Mooney 1999, Lin et al. 2007, Nuñez & Pauchard 2010). Or, les recherches sur ces espèces invasives sont souvent peu nombreuses dans les pays en développement, alors même qu'ils sont susceptibles d'être plus impactés par les conséquences de ces bioinvasions (Nuñez & Pauchard 2010). Ces impacts sont divers et peuvent concerner i) les processus évolutifs affectant la biodiversité (Mooney & Cleland 2001) en même temps qu'ils représentent une menace directe sur cette diversité biologique (Clavero & Garcia-Berthou 2005), ii) les aspects relatifs à l'hygiène et la santé publique (Pyšek & Richardson, 2010) avec, in fine, un coût économique très important (Pimentel et al. 2005, Olson 2006, Bradshaw et al. 2016). Plusieurs espèces de rongeurs figurent dans la liste des 100 « pires » espèces invasives de la planète (Lowe et al. 2000), et parmi elles, la souris domestique (*Mus musculus*) par ailleurs identifiée comme une des trois espèces de rongeurs à l'impact négatif le plus important à l'échelle du monde (Capizzi et al. 2016). A l'échelle régionale une autre espèce, la gerbille nigériane (*Gerbillus nigeriae*), est également reconnue comme un prédateur majeur des cultures au Sahel (Nomao 2002, Hima 2010). Ces deux espèces (*M. musculus* et *G. nigeriae*) se sont révélées au cours des dernières années comme particulièrement invasives au nord du Sénégal : *Mus musculus*, espèce exclusivement commensale de l'homme cantonnée à l'ouest du pays jusqu'au début des années 90, a ensuite progressé rapidement vers l'est jusqu'à occuper une majorité des localités échantillonnées dans les 2/3 nord du pays au début des années 2010 (Dalecky et al. 2014). *Gerbillus nigeriae*, espèce d'extérieur inconnue au Sénégal dans les années 70 et 80, y a été répertoriée dans les années 90 pour la première fois dans l'extrême nord du pays (Bâ et al. 2006) avant de voir sa distribution s'étendre vers le sud (Thiam et al. 2008 et données non publiées).

A partir de là, la compréhension des facteurs à l'origine de ces expansions, et des projections sur l'extension à venir de ces espèces au Sénégal apparaissaient donc comme primordiales pour anticiper les conséquences de ces invasions. Dans le même but, la dissémination d'informations sur ces espèces invasives et les problèmes d'ordres divers qu'elles sont susceptibles de causer représentait un enjeu majeur du projet.

Objectifs

Afin de tenter d'apporter des réponses aux enjeux précités, l'objectif principal du projet CERISE était, à travers une recherche pluridisciplinaire, d'explicitier les causes et modalités de l'expansion de ces deux espèces invasives de rongeurs au Sénégal, en relation avec les composantes anthropiques (pour *M. musculus*) et environnementales (pour *G. nigeriae*) des changements globaux affectant le Sahel. Plus spécifiquement, il s'agissait :

- de mettre en œuvre plusieurs modèles pour analyser sous différents angles les modalités d'invasion de ces espèces au Sénégal,
- d'élaborer des scénarios d'évolution de l'invasion du Sénégal par ces espèces, en relation avec les facteurs humains et environnementaux,

1-a. Données « rongeurs »

- Gerbilles

Les données de présence/absence de l'espèce sur l'ensemble de son aire de distribution actuellement connue ont été compilées à partir i) des résultats de campagnes de piégeage de rongeurs au Sahel répertoriés depuis les années 1970 dans la base de données sur les petits mammifères hébergée et entretenue au CBGP (BPM, cf <http://bpm-cbgb.science>) et ii) des données de détermination des proies retrouvées dans des pelotes de réjection de rapaces nocturnes (chouette effraie en particulier) récoltées au Sénégal depuis les années 80 (voir Thiam et al. 2008 et [Fall 2015](#) pour des détails). Au final, 380 données de présence et 4253 données d'absence de *G. nigeriae* ont été localisées dans la zone sahélienne ouest-africaine jusqu'en 2016 (les absences correspondant aux données de piégage ou de pelotes pour lesquelles aucune gerbille nigérienne n'a été détectée).

Pour la modélisation de niche écologique, nous avons distingué l'aire de distribution « historique » correspondant à une niche supposée « à l'équilibre », de l'aire de distribution en cours de colonisation correspondant à la zone récemment envahie au Sénégal, l'ensemble représentant la « grande emprise » (Figure 1 gauche). Pour la modélisation multi-agents (MMA), deux emprises ont été initialement considérées : une « moyenne emprise » pour étudier les modalités d'expansion au Sénégal de l'espèce depuis son arrivée au nord du pays et une « petite emprise », pour simuler de façon détaillée le fonctionnement de populations dans l'environnement typique de la région du Ferlo Nord (Figure 1 droite). Les développements réalisés lors du projet ont conduit à réviser l'approche petite emprise : une application a été développée (dans [Sall 2016](#)) permettant d'extraire à partir des données communes de couverture du sol et de pluviométrie des zooms de tailles et de résolutions configurables pour appliquer le MMA petite emprise sur toute zone d'intérêt identifiée au sein de la moyenne emprise (franchissement de barrières, zones désertiques et/ou cultivée, ...).

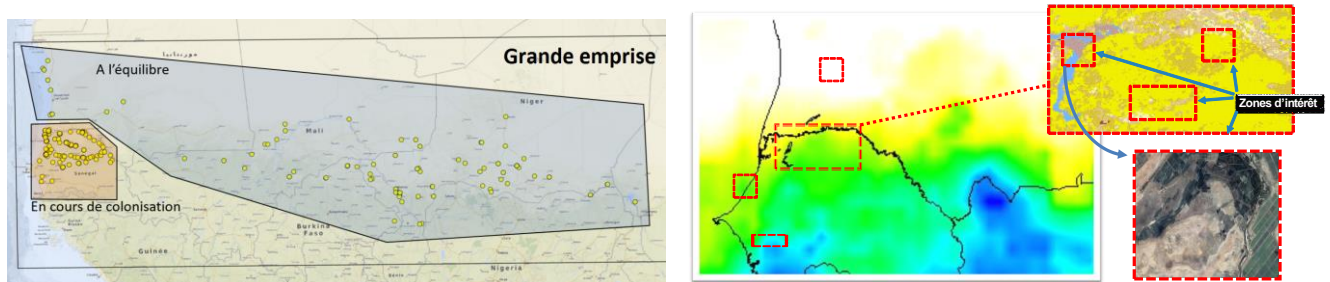


Figure 1 Les différentes emprises spatiales considérées pour la modélisation de *G. nigeriae*

Gauche - localisation des présences dans son aire de distribution historique et dans la zone récemment envahie au Sénégal; Droite - moyenne emprise et illustrations de zooms de petite emprise (MMA)

Enfin, pour la modélisation d'occupation de sites, nous avons utilisé toutes les données de captures de gerbilles sur des sites ayant été échantillonnés à deux ou plusieurs reprises afin de satisfaire à la nécessité de répliqués temporels. Nous avons sur cette base élaboré une matrice de présence-absence de l'espèce sur les sites aux différentes périodes d'échantillonnage (histoires de « recapture » de l'espèce).

- Souris

Les données d'occurrence de la souris au Sénégal ont été compilées dans le cadre d'une étude diachronique basée sur les données de piégage recueillies dans les communautés de rongeurs commensaux au Sénégal entre 1983 et 2014 (Dalecky et al. 2015), informations en partie disponibles dans la base de données sur les petits mammifères du CBGP (BPM, cf. <http://bpm-cbgb.science>). Le traitement cartographique de ces données distribuées par tranches de temps montrait bien l'évolution de la distribution de l'espèce au Sénégal, en même temps que celle des principales autres espèces commensales de petits mammifères associés à la souris domestique dans les villes et villages du pays (Figure 2).

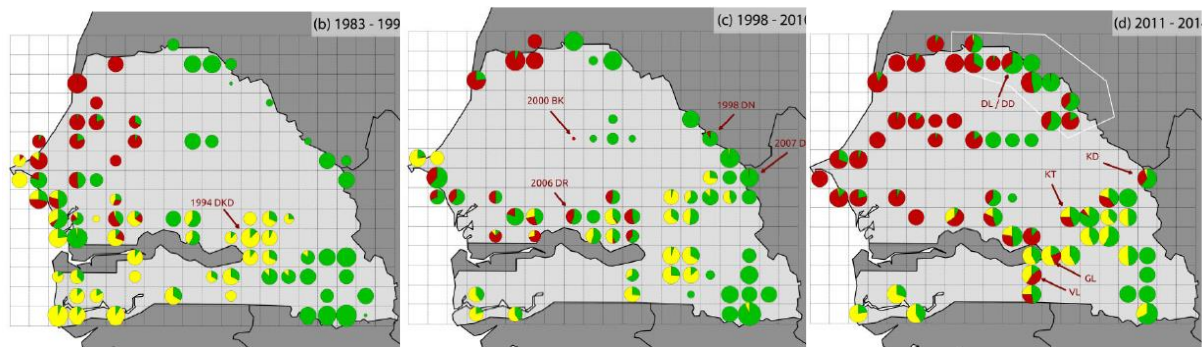


Figure 2 Evolution de la distribution des petits mammifères au Sénégal entre 1983 et 2014

Rouge : souris domestique, Jaune : rat noir, Vert : petits mammifères « natifs » (cercles de taille proportionnelle au nombre de captures, parts exprimant les pourcentages des différents taxons de petits mammifères, dans des carrés de 33km de côté ; Dalecky et al. 2015).

1-b. Données environnementales au sens large

- Variables d'extérieur (modèle Gerbille)

Plutôt que de compiler un nombre élevé de variables environnementales sans évaluation critique *a priori* de leur intérêt pour expliquer la distribution de *G. nigeriae*, ou de ne prendre en considération que des données climatiques (là encore sans tri préalable), nous avons choisi de n'utiliser que des paramètres environnementaux dont nous suspicions qu'ils aient une influence réelle sur la présence de l'espèce en un lieu donné. Cette procédure a été rendue possible grâce à la connaissance de la biologie de l'espèce qu'avait les équipes CBGP et IFAN impliquées dans cette phase du travail, combinée à une analyse bibliographique aussi complète que possible des travaux sur l'écologie de l'espèce.

Ainsi, à partir d'une analyse des caractéristiques de l'espèce, de ses préférences d'habitats et de ses besoins en ressources (schématisée sur la

3), nous avons finalement sélectionné des variables indicatrices appartenant quatre grandes catégories : couverture végétale, densité de végétation, climat et nature du sol.

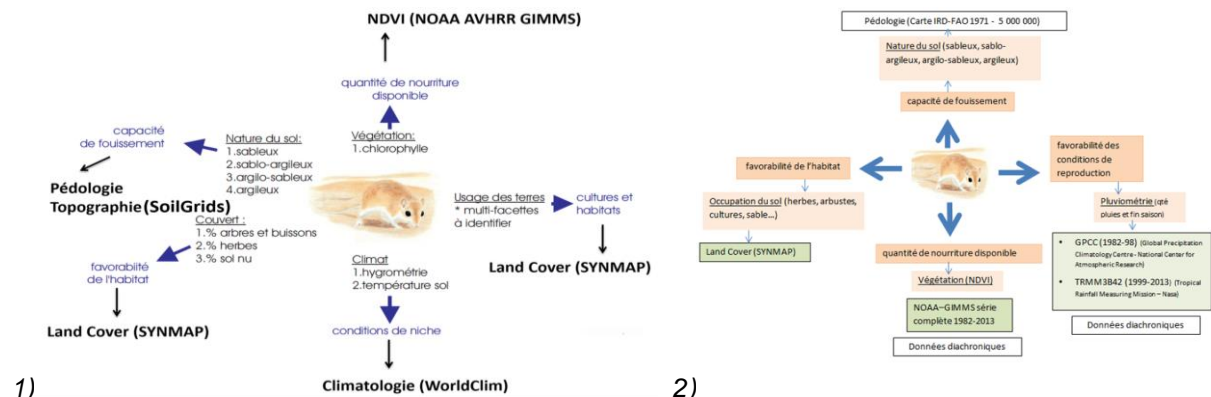


Figure 3 Démarche de sélection des variables environnementales d'extérieur significatives pour *G. nigeriae*.

1) approche descriptive (étude de la niche écologique) ; 2) approche MMA. Des sources de données similaires mais pas tout à fait identiques.

1. Couverture du sol : Cette variable recouvre à la fois des exigences en termes d'habitat et de ressources alimentaires pour la gerbille, espèce majoritairement granivore occupant des terriers souvent situés au pied d'arbustes ou sous couvert de végétation (herbes, buissons) assez dense, et donc favorisée dans les habitats herbacés et les zones de cultures vivrières. Le choix de représentation de cette variable a fait l'objet d'une partie d'un stage de Master II rattaché à CERISE (Volto 2015). Trois bases de données sur l'occupation du sol dans la région d'intérêt (« grande emprise ») ont été comparées : Synergetic Land Cover Product (SYNMAP), Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE) et Global 1km consensus Land Cover map (CONSENSUS). SYNMAP a été retenu comme apparemment plus fiable dans la description de la couverture végétale de zones où une validation-terrain a pu être menée (via comparaison avec photos). SYNMAP est un produit d'occupation du sol

global en 48 classes à 1 km de résolution spatiale, reflétant la couverture terrestre autour de l'an 2000. Pour les besoins de l'étude, il a été reclassifié en 16 classes, à résolution de 4km (Tableau 1).

Tableau 1 conversion retenue pour la couverture du sol dans le projet

Classes SYNMAP	Contenu	Classes ME
0	eau	1
1 à 9	arbres	2
10 à 18	arbres / arbustes	3
19 à 24	arbres / herbe (broad)	4
25 à 27	arbres / herbe (broad et needle)	5
28 à 36	arbres / cultures	6
37	arbustes	7
38	arbustes / herbe	8
39	arbustes / cultures	9
40	arbustes / sable	10
41	herbe	11
42	herbe / cultures	12
43	herbe / sable	13
44	culture	14
45	sable	15
46	bâti	16

Les classes 8,11 et 14 (à dominante « herbe ») ont été sélectionnées à partir des relevés de terrain comme celles représentant un habitat favorable aux gerbilles du point de vue de la couverture végétale dans les deux types de modélisation (grande et moyenne emprise, où cette grille d'occupation des sols a été appliquée pour l'ensemble de la période considérée (1983-2013). A petite emprise, la végétation favorable (herbes et cultures) est soumise à croissance-décroissance au rythme des saisons (voir §2-b.1). A cette échelle, les observations de Ziadi (2016) dans le cadre de ce projet prennent sens, à savoir: i) régression forte des formations végétales déjà dégradées en 1988 (savanes claires et pseudo-steppes arbustives ainsi que steppes herbacées et arbustives) ; ii) progression des formations soit les plus dégradées (steppes herbacées et sols nus ou steppes sèches) soit les plus denses (savanes arborées). Ces tendances apparemment contradictoires pourraient confirmer que i) après les sécheresses des décennies 1970-80, le retour de régimes de précipitations plus favorables (quantités et régularité) a pu favoriser les formations denses mais qu'en revanche, ii) l'accroissement de la taille des troupeaux a contribué à la dégradation des zones de savanes.

2. Densité de végétation : Ce paramètre également rattachable aux exigences d'habitat et alimentaires de la gerbille, dont le régime végétarien est intimement lié aux ressources végétales disponible, est généralement quantifié par le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) qui définit la quantité de végétation verte présente à la surface de la terre. Pour couvrir la période d'intérêt, nous avons choisi la série de données provenant des radiomètres *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) des satellites météorologiques NOAA pour la série GiMMS 3g (Global Inventory Modeling and Mapping Studies). La série utilisée comprend deux images mensuelles sur 32 ans de 1982 à 2013, soient 768 images, issues de la transformation de données originales de 1,1 km x 1,1 km de résolution en des valeurs composites (maximum de NDVI tous les 15 jours) à résolution de 8 x 8 km (*in Volto 2015*). Ce jeu de données a été utilisé à la fois pour la modélisation de niche et pour la modélisation multi-agents à moyenne emprise.

3. Climat : un ensemble de données climatiques est disponible à l'échelle planétaire pour les dernières décennies (voir liste sur <http://www.worldclim.org/bioclim>). Pour la modélisation de niche, les précipitations s'étant révélés très corrélées avec le NDVI, c'est un paramètre de température qui a été sélectionné. Le coefficient de variation des t° annuelles, représentant la variation saisonnière de la t° (Bio4 = coefficient de variation annuel sur un jeu de données de Bioclim de 1970-2000) a été retenu à la suite d'un processus de sélection ayant impliqué quatre paramètres (deux de t°, deux de précipitations). Pour la modélisation multi-agents, la précipitation moyenne mensuelle sur la moyenne emprise à une maille d'environ 4 km a été utilisée (soit 384 fichiers de janvier 1982 à décembre 2013). Les données-source sont issues du serveur <http://richardis.univ-paris1.fr/precip/index.html> à partir duquel deux produits pluviométriques ont été utilisés : GPCC-PLU de janvier 1982 à décembre 1997 et TRMM-3B42 de janvier 1998 à décembre 2013 (Figure 4 ; la comparaison de ces deux sources pour les années 97 et 98 montre qu'il n'y a pas de biais induit par le changement d'outils).

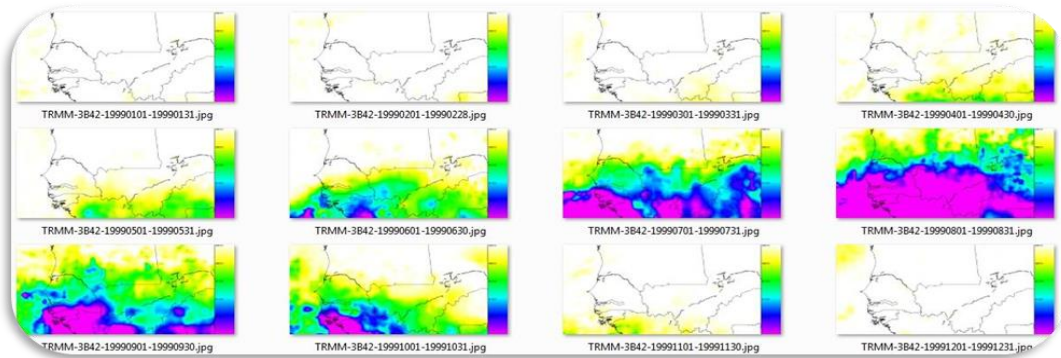


Figure 4 Données satellites de la pluviométrie mensuelle sur la zone Ouest Africaine (ex : année 1999).

4. Nature du sol : Les gerbilles sont des animaux actifs la nuit et passant la journée dans un terrier creusé dans un substrat à dominante sableuse. Pour cette raison, nous avons recherché pour la modélisation de niche des données disponibles à l'échelle spatiale adéquate (« grande emprise ») sur la présence de sable dans le sol. Notre choix s'est porté sur le pourcentage de sable dans les couches supérieures du sol de la base de données SoilGrids à résolution 250m (Hengl et al. 2017). Pour la modélisation multi-agents à moyenne emprise, nous sommes partis de la carte IRD éditée par Boluet et al. (1971). Celle-ci a fait l'objet d'une numérisation et d'une interprétation à dire d'experts permettant de passer d'une légende pédologique détaillée à une légende condensée en 4 modalités principales (Figure 5).

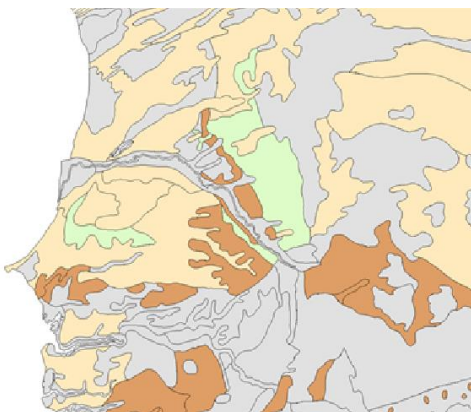


Figure 5 Classification pédologique – Réinterprétée (par Yvette Dewolf, géomorphologue et professeur émérite de l'Université P7-Diderot) à partir de carte IRD - 1971 (Numéro Sphaera : 16576) : sable (brun clair), sablo-argileux (vert pâle), argile (marron), autre (dont lithosols, sols salés et sols hydromorphes, gris).

- *Variables d'intérieur (modèle Souris)*

Un ensemble de variables d'intérêt a été listé pour la souris en vue de leur prise en compte lors de la modélisation statistique/corrélative, dans l'optique de décrire l'importance des localités concernées en termes de démographie (nombre d'habitants), d'infrastructures et services (nombre de boutiques, présence de marchés, d'entrepôts / hangar de stockage de denrées...) et de qualité des communications terrestres les desservant (nature des routes – principale / secondaire, bitumée ou non)... L'idée était de suivre l'évolution de ces variables au cours du temps, en les répertoriant à différentes dates au cours des 30-40 dernières années. Malgré un important travail de recherche de ces données dans les archives des institutions sénégalaises concernées et en particulier l'Agence Nationale pour la Statistique et la Démographie (ANSD) il s'est révélé qu'un relevé diachronique rigoureux de ces données n'était pas praticable pour des raisons d'hétérogénéité et de lacunes des données de base à travers le temps et l'espace. Seules les données de recensement ont pu être récupérées, par communautés rurales, issues des recensements de 1976, 1988, 1998, 2006 et 2013. Là encore, les changements de découpages administratifs au cours de cette période au Sénégal ont nécessité de faire de nombreuses corrections sur le fichier de données final. Comme précisé plus haut, cette modélisation n'a donc pas pu être menée à son terme du fait de la difficulté à réunir les données nécessaires, toutefois elle reste envisagée en utilisant un jeu restreint de variables (nombre d'habitants, présence de marchés en particulier) qui pourraient servir de proxy à la notion générale d'urbanisation.

Pour la modélisation multi-agents, il s'agissait d'adapter un modèle d'expansion du rat noir (*Rattus rattus*) au Sénégal, basé sur la circulation des rongeurs le long d'un réseau de routes et pistes au Sénégal dans divers types de véhicules (Mboup et al. 2017), et faisant intervenir la probabilité qu'un ou des rongeur(s) « embarque(nt) » dans un véhicule.

Le réseau routier initial ayant une résolution insuffisante, les routes et villes du Sénégal ont été discrétisées sur une maille de 2kms à partir de shapefiles de l'UMR SESSTIM. En cours de projet il est apparu que la zone délimitée générait des biais importants aux limites du domaine. L'ensemble du Sénégal a été alors retenu comme emprise du modèle, supposant un travail important pour redigitaliser et le réadapter à ses nouvelles limites (Figure 6).

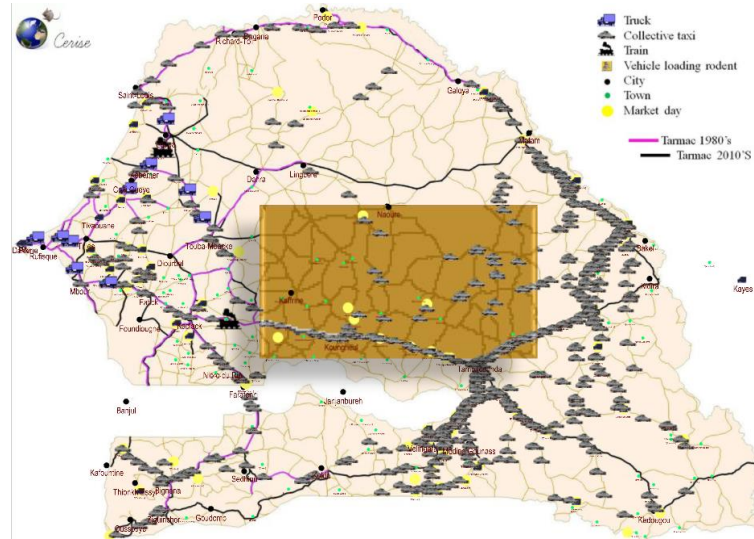


Figure 6 Numérisation du réseau routier sénégalais pour la simulation du transport des rongeurs commensaux.

L'encart brun indique la résolution du modèle sous-jacent : chaque cellule (carré discrétisé) peut-être renseignée (route, ville, marché, etc.)

La littérature et l'expérience de terrain ont montré que les marchés provinciaux hebdomadaires (appelés loumos ou louma) constituaient des points névralgiques à la diffusion de la souris par les transports. Nous avons identifié et positionné un par un 215 loumos (points jaunes et verts sur la Figure 6) recensés au Sénégal à partir de données PRODIG et d'une validation systématique à partir de recherches internet.

Pour l'étude de la diffusion de la souris à l'échelle urbaine, le centre de ville de Dodel (78 x 114m) a été numérisé à une échelle de 3m. Un travail à dire d'experts a été réalisé pour identifier les affinités des types d'environnement et leur niveau de dangerosité pour les rongeurs en fonction des heures de la journée (Figure 7).

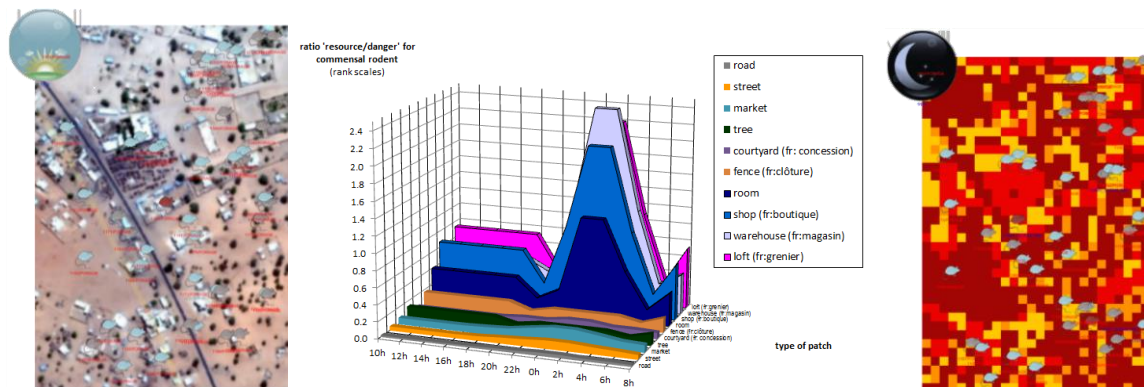


Figure 7 Caractérisation de l'environnement urbain de la commune rurale de Dodel

Gauche situation du quartier de Dodel, centre ratio intérêt/danger des types d'habitat en fonction de la journée, droite : transcription dans le simulateur (les carrés fournissent la résolution).

✓ *Modèles de distribution d'espèces*

Les probabilités de présence ont été calculées en utilisant un modèle généralisé additif avec une distribution binômiale sous R (R Core Team 2016) et le logiciel biomod2 (Thuiller et al., 2016). Nous avons appliqué un facteur de lissage de $k = 4$ pour chaque variable et effectué 1000 validations croisées de chaque réplicat en utilisant 80% des données et en réservant 20% pour les tests. L'effet additif des quatre variables prédictives a été modélisé, et les sorties de modèles évaluées par le test ROC (Cumming, 2000).

Pour explorer l'hypothèse d'expansion d'aire de distribution, nous avons construit i) un modèle basé sur les données de l'aire en cours de colonisation, avec 86 présences, 200 absences (i.e. des points où un échantillonnage de rongeurs a été effectué d'où la gerbille était absente) et 4.354 points sans données (N/A) et ii) un modèle basé sur les données de l'aire historique avec 73 présences, 264 absences et 57.960 N/A. Nous avons utilisé ENMtools pour quantifier le recouvrement de niches entre les modèles (Warren et al. 2010). A partir de là, nous avons utilisé le modèle calibré sur l'aire historique que nous avons projeté sur l'aire en cours d'invasion (i.e. le Sénégal), et comparé les probabilités de présence de l'espèce sur l'aire en cours de colonisation pour les 2 modèles

✓ *Analyse d'occupation de sites*

Nous avons utilisé un modèle d'occupation de sites multi-saisons sous R (package « Unmarked » ; Fiske and Chandler 2011). Le jeu de données constitué inclut 386 sites échantillonnés au cours de 13 années, entre 2004 et 2016 (sessions primaires). Pour une année donnée, un maximum de 21 sessions de captures (sessions secondaires) ont été enregistrées. Nous avons estimé quatre groupes de variables : l'occupation (ψ), i.e. la probabilité qu'un site soit occupé par l'espèce ; la probabilité de détection de l'espèce à un site donné (p) ; la probabilité de colonisation (γ), i.e. la probabilité qu'un site inoccupé au temps t soit occupé au temps $t+1$; la probabilité d'extinction (ϵ), i.e. la probabilité qu'un site occupé au temps t soit inoccupé au temps $t+1$

• *Résultats*

✓ *Méthode d'ordination*

Les deux niches sont équivalentes, c'est-à-dire que la valeur de recouvrement (indice de Schoener) observé de la niche historique et de la niche en cours de colonisation est comprise dans l'intervalle à 95% des valeurs de recouvrement simulées (p value equivalency test = 0.73627, Figure 8E, indice de Schoener observé $D = 0.5215198$). Le test de similarité montre lui que l'espèce occupe des environnements dans ses deux distributions plus similaires qu'attendu par hasard (p value similarity test = 0.0099; Figure 8D). Le déplacement du centroïde de la niche de *G.nigeriae* de la niche historique vers la niche en cours de la colonisation (Figure 8C, flèche pleine) se fait dans la même direction que le déplacement du centroïde des conditions environnementales disponibles dans l'aire historique et l'aire en cours de colonisation (Figure 8C, flèche pointillée). L'expansion de niche est de 12.3% (en vert), la stabilité de la niche est de 87.7% (en bleu) et le découvrément est de 40.8% (en rouge) (Figure 8C).

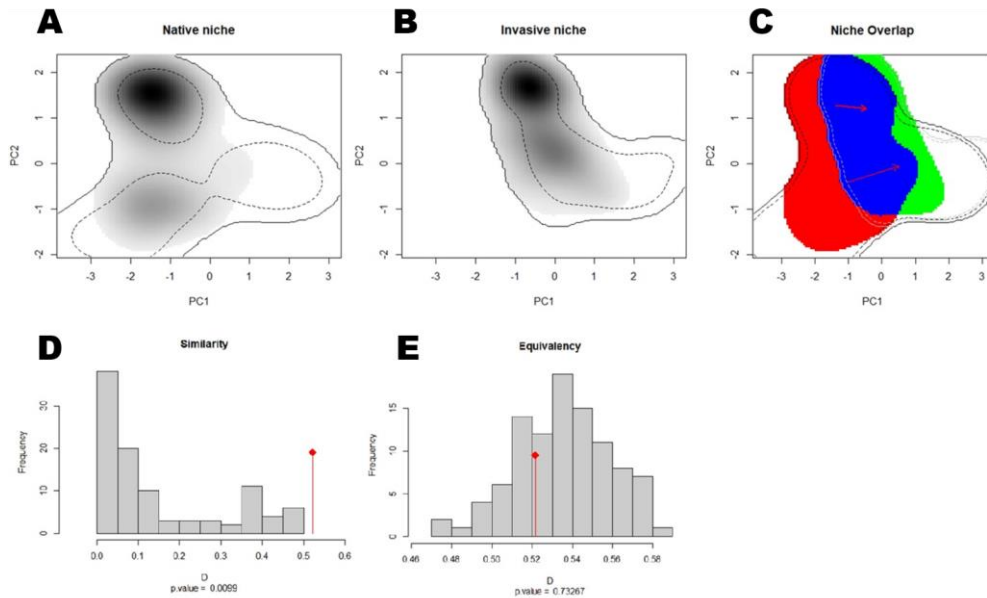


Figure 8 Recouvrement de niches entre aire historique et aire en cours de colonisation de *G. nigeriae*

Résultats obtenus par l'approche de Broennimann et al. (2012). (A) Niche occupée par *G. nigeriae* sur l'aire historique. (B) Niche occupée par *G. nigeriae* sur l'aire en cours de colonisation. (C) Recouvrement des niches sur les deux aires (historique vs. en cours de colonisation). (D) Similarité de la niche en cours de colonisation par rapport à la niche historique. (E) Equivalence entre la niche historique et la niche en cours de colonisation. Les lignes pleines et pointillées dans (A), (B) et (C) correspondent à 100% et 50% respectivement de l'environnement disponible pour chaque aire de *G. nigeriae* considérée dans l'analyse. Le code couleur utilisé pour (C) est le rouge pour le découvrment de niche, le bleu pour la stabilité de niche et le vert pour l'expansion de niche. La flèche pleine représente le déplacement de centroïde entre la niche historique et la niche en cours de colonisation et la flèche pointillée correspond au déplacement de centroïde entre l'environnement disponible sur l'aire historique et l'aire en cours de colonisation.

✓ *Modèles de distribution d'espèces*

Après validation croisée, les modèles de distribution mis en œuvre sur l'aire historique et l'aire en cours de colonisation se sont montrés performants en termes de scores AUC (> 0,9) estimés sur les données « cross-validées ». Le modèle calibré à partir des données de l'aire en cours de colonisation donne une bonne représentation de la distribution actuellement connue de la gerbille nigérienne au Sénégal (Figure 9a), avec toutefois une extension vers le sud de 50-100km par rapport aux données les plus méridionales recensées jusque-là. En revanche, la distribution dans l'aire en cours de colonisation modélisée à partir des données de l'aire historique est plus restreinte (Figure 9b), avec une zone dans le centre-ouest du Sénégal à probabilité de présence faible à nulle.

Le modèle calibré sur l'aire historique montre une plus grande amplitude du gradient environnemental utilisé par l'espèce que dans le modèle calibré sur l'aire en cours de colonisation (Figure 9c). La principale différence concerne *le NDVI* où la probabilité d'occurrence suit une courbe en cloche avec un pic à 0,3 dans le modèle « en cours de colonisation » alors qu'elle suit une courbe en cloche inversée avec un pic à 0,4 dans le modèle « historique ». Pour ce qui est de *la saisonnalité de la température*, la probabilité d'occurrence est toujours supérieure à 0,5 et est la plus forte pour une valeur de 2000 de la variable, dans le modèle « en cours de colonisation », alors qu'elle varie entre 0 et 1 et culmine pour une valeur de 3000 dans le modèle « historique ». Pour la variable *herbe*, la probabilité d'occurrence est toujours supérieure à 0,5 dans les deux modèles et augmente quasi-linéairement avec la couverture herbeuse, jusqu'à un maximum de 0,8 dans le modèle « en cours de colonisation ». La probabilité d'occurrence en fonction *du pourcentage de sable* est toujours supérieure à 0,5 et suit une courbe en cloche dans le modèle « historique » alors qu'elle culmine pour 70% de sable et décroît quasi-linéairement dans le modèle « en cours de colonisation ».

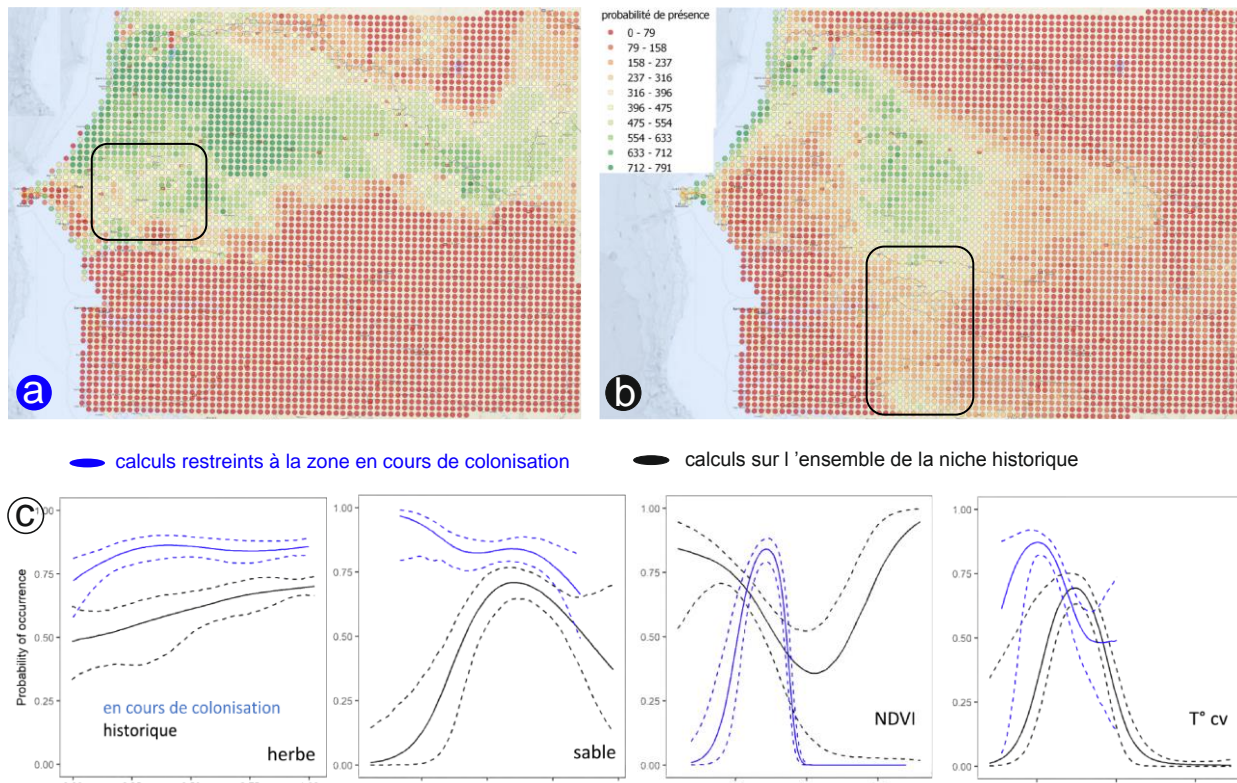


Figure 9 Gradients favorables à *Gerbillus nigeriae* selon deux modes de calibration du modèle de distribution

a) et b) : distribution projetée au Sénégal des probabilités de présence de l'espèce ; les rectangles pointent sur les différences majeures entre modèles, voir texte, c) probabilités d'occurrence en fonction des variables environnementales retenues.

✓ Analyse d'occupation de sites

Le schéma d'échantillonnage (qui n'avait pas été pensé pour ce type d'analyse) s'est révélé très hétérogène, avec moins de 1,5% des cellules de la matrice de données sites x saison remplies. Le nombre moyen d'observations par site est de 3,76, avec seulement 54 sites ayant fait l'objet d'au moins une détection de *G. nigeriae* parmi ceux échantillonnés deux ou plusieurs fois. En manque de puissance statistique, nous avons été forcé de faire tourner des modèles simples, i.e. avec probabilités de détection, d'occupation, d'extinction et de colonisation constantes.

Dans ces conditions, la probabilité initiale d'occupation de site est proche de 0 ($\psi = 2,93 \cdot 10^{-5}$ [Intervalle de confiance à 95%: $1,60 \cdot 10^{-37} - 1$]). La probabilité de détection est en revanche assez forte: 0,67 (IC 95%: 0.46-0.83). En rapport avec le processus de colonisation / extinction, les probabilités associées (gam et eps) s'établissent à 0,02 (IC 95%: 0.01 – 0.03) et proche de 0 ($8,15 \cdot 10^{-5}$ [IC 95%: $1,24 \cdot 10^{-31} - 1$]), respectivement.

• Eléments d'interprétation

La probabilité de détection relativement élevée fournie par l'analyse d'occupation de sites est une bonne garantie de représentativité des données de présence / absence de *Gerbillus nigeriae* utilisées tout au long de cette étude : lorsque l'espèce est présente sur un site d'échantillonnage, la probabilité qu'elle y soit détectée est forte, ce qui limite le risque de considérer un site de présence de l'espèce comme un site d'absence par défaut de capture. La même analyse semble indiquer un processus assez lent de colonisation, cependant lorsqu'un site nouveau est colonisé, la probabilité d'extinction ultérieure de l'espèce y est faible, ce qui apparaît logique dans la période d'invasion initiale qui est celle des quelques dizaines de premières années de progression de *G. nigeriae* au Sénégal considérées ici.

Le manque de puissance statistique lié au jeu de données utilisé dans ces analyses d'occupation de sites ne nous a pas non plus permis de tester l'effet de co-variables comme la distance des sites par

rapport au(x) point(s) d'entrée supposé(s) de l'espèce au Sénégal. De telles analyses pourraient être envisagées dans le futur, après avoir adapté le plan d'échantillonnage des sites à ces traitements.

L'analyse factorielle réalisée en suivant l'approche de Broennimann et al. (2012) révèle d'importantes différences de surface des conditions environnementales utilisées par l'espèce sur l'aire historique et non utilisée sur l'aire en cours de colonisation (40.8%) ainsi que des conditions environnementales utilisées par l'espèce sur l'aire en cours de colonisation et non utilisées sur l'aire historique (12.3%). On constate également un déplacement du centroïde de niche entre la niche historique et la niche en cours de colonisation. Cependant le test de similarité montre que les deux niches sont plus similaires qu'attendu par hasard, c'est-à-dire que l'ensemble des conditions environnementales utilisées par l'espèce sur l'aire en cours de colonisation est plus proche que ce qui pourrait être attendu si l'espèce avait utilisé les conditions environnementales trouvées au Sénégal de manière aléatoire. Le test d'équivalence révèle lui que le recouvrement reste constant à travers les simulations, c'est-à-dire que les étendues ainsi que les gradients environnementaux communs aux deux niches sont très proches (Figure 9d,e). Autrement dit, l'hypothèse de conservatisme de niche ne peut-être rejetée, cependant la niche en cours de colonisation est plus restreinte que la niche historique (Figure 8 A et B), ce qui est illustré par les gammes de variations des paramètres environnementaux, plus larges dans la zone historique (Figure 8C). ce qui peut soit être du au fait que la niche n'est pas encore à l'équilibre sur cette aire et que l'espèce n'utilise pas encore l'ensemble des conditions environnementales qui lui sont favorables, soit que l'on observe un déplacement de cette niche (shift).

Concernant les analyses de modélisation de distribution, il convient d'abord de souligner les biais apportés par l'hétérogénéité spatiale de l'échantillonnage ainsi que la relative faiblesse du jeu de données dans l'aire de distribution « historique », bien moins échantillonnée que l'aire de colonisation récente au Sénégal (Figure 1a p.5). Les patrons de variation de la probabilité de présence de l'espèce en fonction des variables environnementales sélectionnées sont plus hétérogènes pour le modèle calibré sur la zone historique (courbes noires ; Figure 10c) que pour celui calibré sur la zone en cours de colonisation (courbes bleues, Figure 9c) en particulier pour le NDVI.

Ceci étant, les différences observées entre les 2 distributions modélisées de *G. nigeriae* au Sénégal (Figure 9a et b) peuvent être liées à plusieurs causes non entièrement mutuellement exclusives :

- Un processus de colonisation non stabilisé, où l'aire actuellement occupée pourrait se rétracter dans l'avenir (cf. rectangle Figure 9A). Cependant cette extension de l'aire de *G. nigeriae* au Sénégal pourrait aussi être liée à l'existence de conditions environnementales non présentes dans l'aire historique mais favorables à l'espèce.

- Une expansion vers le sud de la distribution de *G. nigeriae* au Sénégal encore à venir, quand les zones à conditions environnementales considérées comme favorables pour l'espèce seront colonisées (cf rectangle Figure 9B).

La phase de validation-terrain des prédictions de ces modèles pourra apporter quelque éléments complémentaires d'interprétation, mais d'ores et déjà il apparaît qu'un suivi à plus long terme des fronts de distribution actuellement connus s'impose pour trancher définitivement entre ces différentes hypothèses dans l'avenir.

2-b. Modèles mécanistes

2-b.1 sur *Gerbillus nigeriae*

- *Méthodologie*

L'approche « multi-agents » permet de formaliser de multiples interactions. Cette approche permet en effet de simuler des forçages environnementaux (p.ex. pluviométrie et NDVI), des dynamiques populationnelles (démographie, déplacements) et leur interdépendance.

- A l'échelle de la « moyenne emprise », les agents sont des « populations de gerbilles » ; ils ont été mis en relation avec leur environnement en introduisant la notion de « lieu préférentiel (LP) », et mis en interaction lors de processus de rencontres d'adultes ou de départs de « propagules » dispersantes (= groupes subadultes). Le modèle a été implémenté avec le logiciel libre Netlogo, version 5.0. (Wilensky 1999, Tissue & Wilensky 2004)

La période étudiée et la disponibilité des données environnementales sur la zone conduit à choisir le mois comme échelle temporelle. L'emprise spatiale a été transformée en une zone rectangulaire de 800 x 600 km avec une maille de 4 km. A ces échelles, les données pédologiques et de couverture végétale (SYNMAP) ont été considérées comme statiques, alors que pour les données NDVI et

pluviométriques, chaque patch s'est vu affecter une valeur par mois sur 32 ans (janvier 1982 → décembre 2013). Le modèle intègre ainsi 384 images NDVI et 384 images de pluviométrie.

A partir de là, le principe de fonctionnement du modèle est le suivant : Chaque mois, des populations de jeunes, les « dispersants », se déplacent jusqu'à trouver un lieu favorable à leur installation (LP). Ce lieu est supposé satisfaire aux besoins de nourriture et d'habitat. Une fois arrivés, ils s'y installent, se reproduisent s'ils sont en période de reproduction, y restent (sans se déplacer) s'ils sont en dehors de cette période avec une évolution numérique fonction du taux de survie.

Les principaux indicateurs de sortie exploités sont les expansions Sud et Est en fin de période, au bout de trente-deux ans. L'expansion Sud est le nombre de km entre la position initiale des populations et la position de la population la plus au Sud en fin de période (décembre 2013). Il en est de même pour l'expansion Est. Le modèle comptabilise également des données démographiques comme le nombre d'individus mâles et femelles en fin de période. De façon exhaustive, les « outputs » potentiels du modèle sont : A - expansion-sud ; B - expansion-est ; C - expansion-nord ; D - expansion-ouest ; E - taille-moyenne des populations ; F – nombre de populations ; G – nombre total d'adultes ; H – nombre de propagules dispersantes ; I – nombre total de dispersants ; J – nombre de fusions (i.e. se rejoignant sur une cellule) ; K – nombre d'extinctions ; L - nombre de cellules occupées ; M – nombre de cellules non occupées.

- Le comportement, la vitesse et la durée de dispersion des propagules de jeunes subadultes mâles et femelles sont des paramètres clés et inconnus du processus d'invasion est. Pour tenter de recalculer les hypothèses de déplacements effectuées à moyenne emprise avec les dynamiques écologiques quotidiennes des populations, nous nous sommes intéressés aux dynamiques populationnelles à grande échelle (=petite emprise » ; résolution de la grille 100m, pas de temps 30mn). Comme précédemment indiqué, nous avons pu travailler sur différents zooms effectués sur la moyenne emprise. Pour chaque zoom les données de couverture du sol extraites de la moyenne emprise sont réifiées en autant d'objets signifiants (ex : objets de type herbe, arbustes, culture, sol nu ou arbre) permettant de décrire de façon détaillée le type d'environnement. Un modèle de croissance de végétation (type logistique) a été développé et connecté aux données diachroniques de pluviométrie extraites elles-aussi. Cette approche nous permet de simuler la disponibilité de nourriture dans l'environnement en fonction des saisons et d'introduire une densité-dépendance entre populations de gerbille et biomasse végétale disponible / consommée. La reproduction dans ce système est déclenchée par l'arrivée des jeunes pousses en début de saison des pluies (Butterstein et al. 1985, Schadler et al., 1988). L'influence de la qualité de la saison des pluies peut être retranscrite dans la végétation puis par voie de conséquence dans la population de gerbille. A cette échelle les agents considérés sont les individus. Le comportement des agents est généré par un processus de délibération (perception-délibération-exécution) associé à l'identification de désirs (forage, reproduction, camouflage, repos...) liés à la condition physiologique (cycle de vie) des agents et à l'environnement qu'ils perçoivent localement. Les traits de vie ont été renseignés à partir de la littérature.

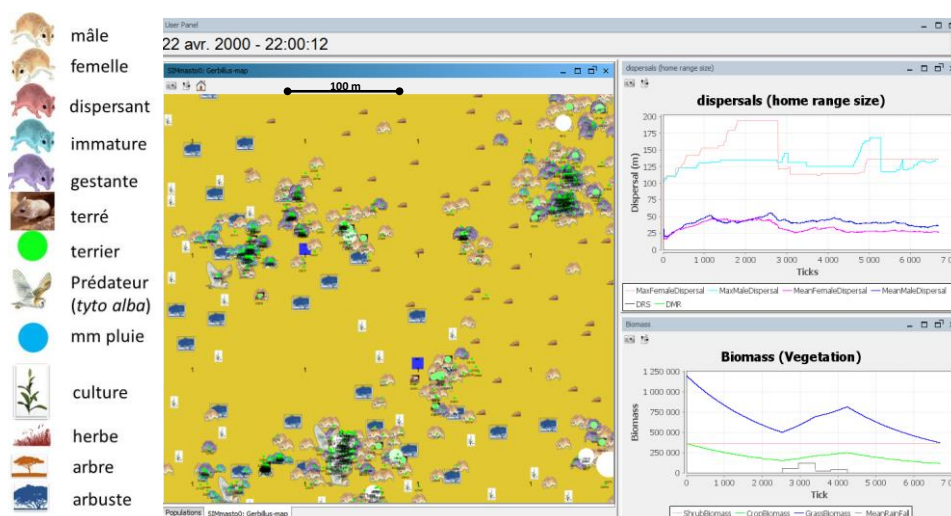


Figure 10 Environnement de développement du simulateur des populations de gerbilles à petite emprise. Gauche: divers types d'objets formalisés interagissant, centre : suivi de l'évolution spatiale du système, droite: indicateurs sélectionnés générés par le modèle (pas de temps : 30mn).

- **Résultats**

- A l'échelle de la « moyenne emprise » (Duraffour et al. *in prep.*), l'influence des paramètres biologiques formalisés a été explorée : On a fait varier le taux de survie mensuel entre 0,70 et 0,85 (pas de 0,2), le taux de reproduction (nombre de petits par portée) entre 3 et 5 (de 0,2), i.e. dans une gamme de valeurs *a priori* compatible avec les données de la littérature, et le pourcentage de femelles gestantes a été conditionné à la pluviométrie (Nomao 2002, Granjon & Duplantier 2009). Le pourcentage de propagules (i.e. la fraction dispersante parmi les jeunes adultes dans chaque population) a été fixé à 0,50. La variation de distance parcourue par les propagules dispersantes a quant à elle été explorée pour des valeurs comprises entre 2.800m et 4.200m par mois (pas de 200m), les valeurs en dessous de 2.800m ne conduisant jamais à une expansion suffisante (i.e. compatibles avec les données d'observation) quelles que soient les valeurs des autres variables. La localisation géographique des populations de départ (i.e. celles à partir desquelles l'invasion du Sénégal a été initiée) a fait l'objet également de plusieurs essais, pour retenir finalement 10 populations de 10 individus chacune réparties le long d'une ligne longeant le fleuve Sénégal (en rive gauche) en août 82.

Les lieux d'habitats favorables/préférentiels de l'espèce (i.e. ceux sur lesquels une population pouvait se développer à partir de dispersants) ont été définis de 2 manières : i) sur la base de la distribution réelle des points d'occurrence des gerbilles au Sénégal, ont été considérés comme favorables les patches d'habitat dont le NDVI était compris entre 0,19 et 0,24 en saison sèche, avec des caractéristiques pédologiques sableuses et une couverture végétale avec présence d'herbe ; ii) sur la base des probabilités de présence obtenus par la modélisation de niche à la grande emprise (i.e. sur la niche historique de l'espèce, voir plus haut)

A titre d'exemple, la situation des populations de gerbilles 32 ans après leur arrivée au nord du Sénégal est représentée ci-dessous, avec le paramétrage « standard » (i.e. 50% des propagules dispersantes, taux de survie mensuel = 0,75, taille de portée = 3,7...), les lieux préférentiels étant définis d'après les points d'occurrence réels de l'espèce au Sénégal (option « i ») ci-dessus), avec une distance de dispersion mensuelle des propagules de 3800m, et selon 4 scénarios d'« entrée » différents (Figure 11).

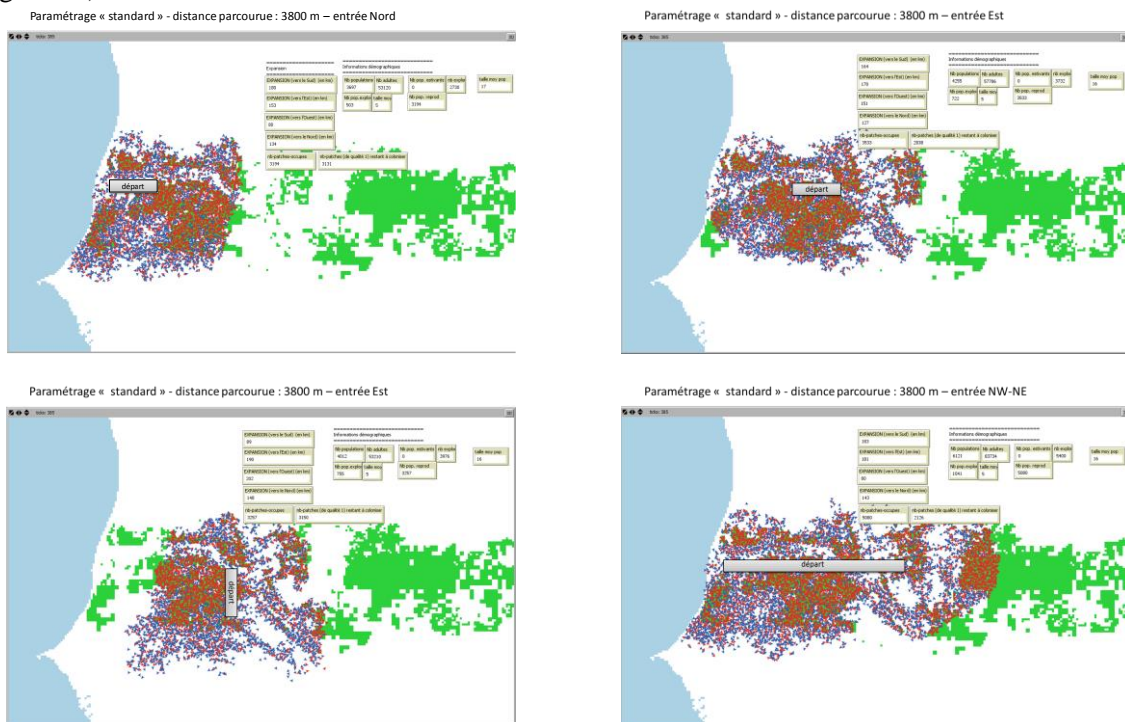


Figure 11 Scénarios d'expansion de populations de gerbilles à moyenne emprise.

Les simulations (de type multi-agents) sont lancées à partir de 10 populations initiales situées a) au nord-ouest, b) au nord-est, c) à l'est et d) au nord du Sénégal. Les points rouges sont les populations « stabilisées », les bleus les propagules en dispersion. En vert les habitats préférentiels en fin de simulation (décembre 2013).

- A l'échelle de la « petite emprise » il s'est avéré délicat de stabiliser les dynamiques exprimées du fait de l'interaction des nombreux composants et mécanismes représentés. La mise en place du système de zoom et la modélisation de la croissance de la végétation ont d'autre part généré du retard dans le chronogramme initial. Actuellement, les dynamiques de population obtenues deviennent cohérentes avec l'appui des connaissances expertes. En régime courant, les distances moyennes et maximum de dispersion obtenues (Figure 10 droite) sont logiquement inférieures aux distances de dispersion identifiées dans le modèle de moyenne emprise ; nous disposons à présent d'un environnement de simulation à partir duquel il va être possible de tester plusieurs hypothèses justifiant la dispersion conséquente des subadultes mâles et/ou femelles révélées avec le modèle de moyenne emprise et confirmer ou critiquer les valeurs obtenues.

2-b-2 sur *Mus musculus*

- *Méthodologie*

Pour simuler les transports routiers et ferroviaires responsables de l'invasion de la souris au Sénégal, on a représenté les transporteurs et leurs véhicules comme autant d'agents informatiques ainsi que les populations citadines de rongeurs. Pour orienter leurs déplacements on se base sur un modèle dit 'gravitaire' de type 'loi de Reilly' (e.g., Josselin et Nicot, 2003) au sein duquel les transporteurs sont plus ou moins attirés par une ville selon que sa population est plus grande (intensité du commerce) et qu'il faut moins de temps pour l'atteindre². Dans le modèle les transporteurs légers convergent de plus vers les lieux où se déroule un marché hebdomadaire (pour un autre exemple voir Lammoglia 2011). Ce modèle a été co-développé et validé avec l'aide des géographes de l'UMR PRODIG. Les flux simulés (ex. Figure 6) sont conformes aux attendus avec des ajustements nécessaires toujours en cours. Le modèle n'est cependant pas parvenu à resimuler l'indicateur sélectionné (distribution des rongeurs issus de Dalecky et al., 2015). Plusieurs facteurs non pris en compte sont actuellement considérés pour être intégrés dans le modèle. Il s'agit particulièrement (i) de la variété et de la taille des flottilles et leur évolution pour chaque type de transport ; données qui s'avèrent délicates à reconstituer ainsi que (ii) les probabilités d'embarquement des rongeurs, donnée non disponible à notre connaissance et qui ne pourra être identifiée qu'après la correction du problème des flottilles. Une donnée pourra, dans cet objectif, être exploitée : la liste (spatialisée) des lignes de services de transports de voyageurs (assurant fréquemment du transport mixte) qui parcourent l'ensemble de la zone étudiée (Figure 12).

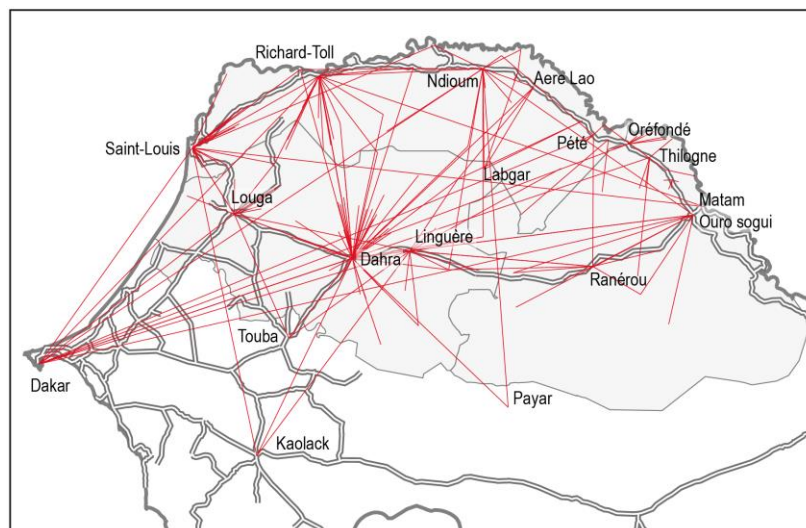


Figure 12 Interrelations spatiales produites par l'offre de transports non spécifiquement dédiés aux marchandises

La carte présente l'identification des principaux flux liés aux transports en commun sur la zone nord du Sénégal (pick-ups, taxis ruraux ; Ninot 2016)

² L'état des routes est modélisé (*dust track, fast dust track, tarmac*) et pris en compte par les transporteurs.

Cette cartographie des lignes de services de transport et des connexions spatiales qu'elles génèrent pourra ici être utilisée pour apprécier l'implication possible / vraisemblable ou non des petits véhicules de transports conventionnels dans l'introduction de souris à l'intérieur de la zone étudiée, à partir de centres urbains externes de proximité comme Dahra, Lingère, Matam, Ouro Sogui, Richard-Toll ou Dagana ou plus lointains comme Dakar, Saint-Louis ou Touba (voir [vidéo d'illustration](#) de la comparaison données/simulation).

Selon la même logique que celle utilisée pour l'étude des gerbilles (*i.e.*, modèle à moyenne emprise et modèle local de validation/calibration), le modèle de transport à l'échelle du Sénégal a été associé à un modèle à grande échelle pour étudier les conditions d'implantation des populations de souris à partir des individus transportés. La commune de Dodel a été numérisée (Figure 7) puis des agents souris ont été introduits sur la zone où se tient le marché hebdomadaire et où les transporteurs débarquent leurs marchandises ou leurs passagers. Les agents souris ont les mêmes capacités de développement, action, interaction que pour les gerbilles de la petite emprise, avec des traits de vie et des comportements paramétrés différemment tenant ici aussi compte des rythmes circadiens d'activité de la ville.

Les analyses de sensibilité réalisées montrent que pour un nombre faible de souris introduites simultanément (*i.e.*, un seul couple ou femelle gestante), des rencontres et des reproductions finissent par se produire localement conduisant la plupart du temps à l'installation de la population puis à sa diffusion lente depuis la zone du marché. Lorsque les introductions sont espacées comme dans le contexte d'un apport de souris par les transporteurs lors des marchés hebdomadaires, on observe (Figure 13) une transition de phase pour laquelle, en dessous d'une fréquence seuil (ici, à peu près un apport par mois) la population ne peut s'installer et en dessus de laquelle la population de souris se développe inéluctablement dans le village.

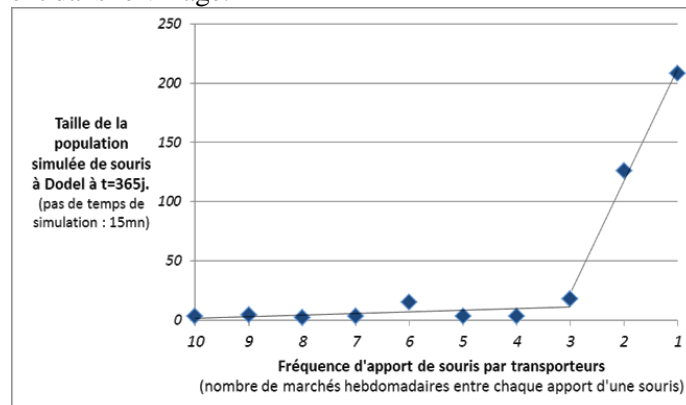


Figure 13 Influence de la fréquence d'introduction sur l'installation de populations de souris simulées dans une commune rurale.

Analyse de sensibilité de l'effet des marchés hebdomadaires sur les population simulées par le modèle multi-agent à grande échelle. Les lignes droites indiquent les tendances des 2 phases.

Les travaux réalisés à cette échelle se sont cependant révélés insuffisants pour appréhender et rendre compte de la complexité du milieu urbain. Sur la base du travail effectué et des discussions issues du projet, un financement pour une recherche complémentaire à l'échelle spécifique de ce site a été proposé et accepté³.

Sur un plan global, les modèles 'gerbille petite emprise', 'transport souris Sénégal' et 'installation de la souris à Dodel' ont tous été réalisés à partir de la plate-forme SimMasto (dédiée à la modélisation de populations de rongeurs à différentes échelles d'espace et de temps). Les contributions apportées par le projet CERISE sur chacun de ces trois modèles ont bénéficié à l'ensemble, travail qui a été restitué dans le cadre du projet (Le Fur et al., 2017). Les développements sont pérennes et réutilisables, ils permettront la poursuite des analyses sur les trois axes.

³ CEA-MITIC : Modélisation mathématique et informatique en Epidémiologie : Etudes de cas de transmissions vectorielle et non vectorielle. Appel d'offre Centre d'Excellence Africain en Mathématiques, Informatique et TIC, 2017-2019. Le projet évoqué constitue la composante 2 : Modélisation informatique des conditions de propagation et de transmission de zoonoses induites par les rongeurs nouvellement invasifs en milieu rural au Sénégal

3-b *Mus musculus*

Dans l'attente des résultats de simulations issues du modèle multi-agents basé sur les transports à l'échelle du Sénégal, nous avons ciblé lors de deux missions (fin 2016 et début 2017) des zones où la souris n'était pas installée de façon significative en 2013, année de référence marquant la fin de la période de prise en compte des données d'occurrence de l'espèce au Sénégal (cf Dalecky et al. 2015), et début du projet CERISE. Dans les deux cas, la tendance très nette est celle d'une progression de l'invasion de l'espèce, qui soit est arrivée dans des localités où elle était absente, soit a augmenté nettement en fréquence par rapport aux espèces commensales natives :

- dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, échantillonnée en novembre 2016 (Figure 16a) apparition à Diomandou-walo où elle n'avait pas été capturée jusque-là, co-dominance avec *Mastomys erythroleucus* à Diomandou-diéry où elle était absente en 2012 et très minoritaire en 2013, et dominance nette à Dodel où elle représentait moins de 50% des captures en 2012 et 2013.

- Dans le Ferlo centre-est, échantillonné en février-mars 2017 (Figure 16b), progression fulgurante à Lambago et Yonoféré alors qu'elle semble être seulement dans la phase initiale de colonisation à Fourdou et Ranérou, et hyper-dominance à Dendoudy où l'espèce atteint une proportion jamais observée lors des piégeages antérieurs.

Il est à noter par ailleurs que *M. musculus* s'est révélée, comme attendu, l'espèce dominante dans toutes les localités échantillonnées dans le cadre de la validation-terrain des prévisions de distribution de *G. nigeriae*, que ce soit au nord de la RN1 ou dans la région des Niayes (voir ci-dessus §3-a).

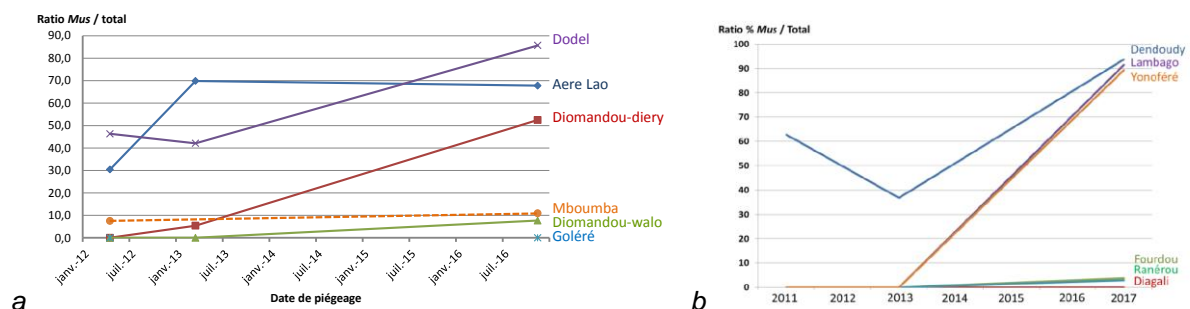


Figure 16 Evolution du ratio nombre de *Mus musculus* / Nombre total de petits mammifères commensaux (x100) depuis 2011

Situation dans différentes localités a) de la moyenne vallée du fleuve Sénégal et (b) du Ferlo (données de 2011 à 2013 compilées par A. Dalecky).

Les détails de ces résultats peuvent être consultés dans la page des rapports de missions réunis dans le centre d'information SimMasto ([lien](#))

Références citées

- Bâ K., Thiam M., Dobigny G. Granjon L., Mané Y., Volobouev V. & Duplantier J.M., 2006. Hypotheses on the origin of the invasion of Senegal by *Gerbillus nigeriae* based on chromosomal data. *Mammalia* 72: 303-305.
- Banque mondiale, Rapport sur le développement dans le monde, 2015. Perspectives urbaines : Villes émergentes pour un Sénégal émergent. Pensée, société et comportement, Washington, Banque mondiale, Licence : Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.
- Bodian A., 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo* 8: 297-312
- Boluet R., Fauck R., Kogaal B., Leprun J.-C., Vieilleron J. & Riquier J., 1971. Carte « Pédologie – Carte 9 », Fond IRD (Numéro Sphaera : 16576).
- Bradshaw, C. J. A. Leroy B., Bellard C., Roiz D., Albert C., Fournier A., Barbet-Massin M., Salles J.M., Simard F., & Courchamp F., 2016. Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects. *Nat. Commun.* 7, 12986 doi: 10.1038/ncomms12986.
- Brandt M., Romankiewicz C., Spiekermann R. & Samimi C., 2014. Environmental change in time series - An interdisciplinary study in the Sahel of Mali and Senegal. *Journal of Arid Environments* 105: 52-63.
- Capizzi D., Bertolino S. & Mortelliti A., 2014. Rating the rat: global patterns and research priorities in impacts and management of rodent pests. *Mammal Review* 44 : 148-162

- Cesaro J.D., Magrin G. & Ninot O., 2010. Atlas de l'élevage au Sénégal. Commerce et territoires, Paris, Prodig, 32 p.
- Clavero M. & Garcia-Berthou E., 2005 Invasive species are a leading cause of animal extinctions. *Trends in Ecology and Evolution*, 20: 110.
- Cumming G.S., 2000. Using between-model comparisons to fine-tune linear models of species ranges. *Journal of Biogeography* 27: 441-455.
- Dalecky A., Bâ K., Piry S., Lippens C., Diagne C.A., Kane M., Sow A., Diallo M., Niang Y., Konečný A., Sarr N., Artige E., Charbonnel N., Granjon L., Duplantier J.M. & Brouat C., 2015. Range expansion of the invasive house mouse *Mus musculus domesticus* in Senegal, West Africa: a synthesis of trapping data over three decades, 1983-2014. *Mammal Review* 45: 176-190.
- Dray S. & Dufour A.B., 2007. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*. 22(4): 1-20.
- Dukes J.S. & Mooney H.A., 1999. Does global changes increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14: 135-139.
- Ferber J., 1995. Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.
- Fiske I. & Chandler R., 2011. Unmarked: An R Package for Fitting hierarchical Models of Wildlife Occurrence and Abundance. *Journal of Statistical Software*, 43(10). URL <http://www.jstatsoft.org/v43/i10/>.
- Gonzalez P., Tucker C.J. & Sy H., 2012. Tree density and species decline in the African Sahel attributable to climate. *Journal of Arid Environments* 78: 55-64.
- Grimm V., Revilla E., Berger U., Jeltsch F., Mooij W.M., Railsback S.F., Thulke H.H., Weiner J., Wiegand T., De Angelis D.L., 2005 Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science*, 310:987-991
- Guisan A., Petitpierre B., Broennimann O., Daehler C. & Kueffer C., 2014. Unifying Niche Shift Studies: Insights from Biological Invasions. *Trends in Ecology and Evolution* 29: 260–69. doi:10.1016/j.tree.2014.02.009.
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S. & Kempen B., 2017. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. *Plos One* 12: 1–40. doi:10.1371/journal.pone.0169748.
- Hima K., 2010. Biologie évolutive de *Gerbillus nigeriae* (Rodentia, Gerbillinae), principal ravageur des cultures cérésières au Niger: aspects chromosomique, morphologique et populationnel. Thèse de Doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 155p + annexes.
- Josselin D & Nicot B., 2003. Un modèle gravitaire géoéconomique des échanges commerciaux entre les pays de l'U.E., les PECO et les PTM. *CyberGeo*, 237, 13/03/2003 DOI : 10.4000/cybergeo.4219
- Lammoglia A., 2011. Évolution spatio-temporelle d'une desserte de transport flexible simulée en sma. *Cybergeo: European Journal of Geography - Systèmes, Modélisation, Géostatistiques* - document 555, mis en ligne le 23 octobre 2011. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/24720> ; DOI : 10.4000/cybergeo.24720.
- Lebel T. & Ali A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990 - 2007). *Journal of Hydrology*, 375: 52-64.
- Lin W., Zhou G., Cheng X. & Xu R., 2007. Fast economic development accelerates biological invasions in China. *PLoS ONE* 2:e1208.
- Lombard J., 2015. Le monde des transports sénégalais. Ancre local et développement international. *IRD*. 276 p.
- Lombard J. & Ninot O., 2010. Connecter et intégrer : les territoires et les mutations des transports en Afrique. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, pp.69-86.
- Lowe S., Browne M., Boudjelas S. & De Poorter M., 2000. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species - A selection from the Global Invasive Species Database. Published by The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN), 12pp.
- Mboup P.A., Konaté K. & Le Fur J., 2017. A multi-world agent-based model working at several spatial and temporal scales for simulating complex geographic systems. *Procedia Computer Science* 108C: 968–977.
- Miehe S., Kluge J., von Wehrden H. & Retzer V., 2010. Long-term degradation of Sahelian rangeland detected by 27 years of field study in Senegal. *Journal of Applied Ecology* 47: 692–700.
- Mooney H.A. & Cleland E.E., 2001. The evolutionary impact of invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.* 98: 5446–5451
- Nomao A., 2002. Contribution à la connaissance des rongeurs du Niger. Caractéristiques biologiques et écologiques d'une population de *Gerbillus nigeriae* (Rodentia Gerbillinae), dans la ferme de Kollo (Niger). Doctorat de 3ème cycle, Université Abdou Moumouni de Niamey. 215pp.

- Núñez M. A. & Pauchard A., 2010. Biological invasions in developing and developed countries: does one model fit all? *Biological Invasions* 12 (4):707-714.
- Olson L.J., 2006. The Economics of Terrestrial Invasive Species: A Review of the Literature. *Agricultural and Resource Economics Review*, 35: 178–194.
- Pimentel D., Zuniga R. & Morrison D. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 52: 273–288.
- Popov G.B., 1996. Quelques effets de la sécheresse sahélienne sur la dynamique des populations acridiennes. *Sécheresse* 7: 91-97.
- Pyšek P. & Richardson D.M., 2010. Invasive Species, Environmental Change and Management, and Health. *The Annual Review of Environment and Resources*, 35: 25–55
- Quantum GIS Development Team, 2017. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>”.
- R Core Team, 2016. R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Thiam M., Bâ K. & Duplantier J.M. 2008. Consequences of climatic changes on rodent communities in the Sahel (West Africa) as evidenced by owl pellet analysis. *African Zoology* 43: 135-143.
- Thuiller W., Georges D., Engler R. & Briner F., 2016. Biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 3.3-7. <https://CRAN.R-project.org/package=biomod2>.
- Tisue S. & Wilensky U., 2004. NetLogo: Design and Implementation of a Multi-Agent Modeling Environment, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University (<https://ccl.northwestern.edu/papers/agent2004.pdf>).
- Walther B.A., 2016. A review of recent ecological changes in the Sahel, with particular reference to land-use change, plants, birds and mammals. *African Journal of Ecology* 54: 268–280.
- Warren D.L. Glor R.E. & Turelli M., 2010. ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography* 33, 607-611.
- Wilensky U., 1999. NetLogo (UserManual), Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

Liste des publications et communications scientifiques

I.1 - Articles ou communications primaires (résultats originaux) scientifiques

I.1.1. Dans périodique à comité de lecture.

Borner L, Besnard A., Piry S., Le Fur J. & Granjon L. (in prep.). Recent range expansion in an arid adapted African rodent: Niche shift or change in local conditions? *Ecography*

Duraffour et al. (in prep). Example of an Expansion Model of an Invasive Species: Case of the Nigerian Gerbil. *Ecological Modelling*

I.1.2. Dans périodique sans comité de lecture.

Thiam M., Bâ C., Diagne C., Sow A., Niang Y., Diallo M., Kane M., Gauthier P., Fall K & Granjon L. (en prép.). *Jaculus hirtipes* (Lichtenstein, 1823) : une nouvelle espèce de rongeur pour le Sénégal. *Bulletin de l'Institut Fondamental d'Afrique Noire*.

I.1.3. Rapports diplômants (D.E.A., thèse...)

Fall K., 2015. *Identification et chronologie de la progression de Gerbillus nigeriae (Thomas et Hinton, 1920) au nord du Sénégal à partir de l'analyse des pelotes de rejection de la Chouette Effraie (Tyto alba) (Scopoli, 1769)*. Mémoire de Master II, Département de Biologie Animale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 41pp.

Sall M., 2016. *Conception, implémentation et simulation de la dynamique de l'environnement sahélien lié à l'invasion de la gerbille au Sénégal*. Mémoire de Master II Pro, UFR de Sciences Appliquées et de Technologie, section d'Informatique, Université Gaston Berger, Saint-Louis, 50pp.

Sall M. 2017. *Un modèle informatique multi-thématique des conditions d'invasion d'une espèce de rongeur; le cas de la gerbille nigériane (Gerbillus nigeriae) au nord du Sénégal*. Mémoire de Master

II Recherche, UFR de Sciences Appliquées et de Technologie, section d'Informatique, Université Gaston Berger, Saint-Louis, 69pp.

Volto N., 2015. *Approche multi-échelle de la cartographie et du suivi de la production végétale en région sahélienne*. Mémoire de Master II, mention « Géographie et Sciences des Territoires (GST) », spécialité « Télédétection et Géomatique Appliquées à l'environnement (TGAE) » Université Paris Diderot. 40pp + 23pp d'annexes.

Wone N., 2017. *Communication et prévention des risques liés à l'invasion des rongeurs et leurs impacts environnementaux au Sahel*. Mémoire de Master 2, UFR Civilisations, Religions, Arts et Communication, Section Communication, Université Gaston Berger de Saint-Louis, 99pp

Ziadi S., 2016. *Impact des changements environnementaux sur l'occupation du sol au Centre-Nord du Sénégal*. Mémoire de Master I, Mention « Géographie et Sciences des Territoires (GST) », Spécialité « Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement (TGAE) », Université Paris 7 Paris-Diderot, 101pp.

I.1.4. Communications courtes dans congrès / symposiums scientifiques (préciser le support écrit : poster, résumé ou texte intégral).

Borner L., 2016. Modélisation de l'expansion de la gerbille nigériane au Sahel. Présentation orale aux Journées annuelles 2016 du groupe Rongeurs du CBGP, 26-27 septembre 2016 ([diaporama](#))

Borner L., 2017. Atouts et limites des statistiques appliquées à l'écologie. Présentation orale au Printemps du Baillarguet, 23-24 mai 2017, CBGP, Montpellier ([programme de la réunion](#))

Borner L. 2018. Modélisation de la distribution de la gerbille nigériane au Sahel. Comparing the native and invasive niches of the Nigerian gerbil – are we witnessing a range expansion? Présentation orale aux Journées annuelles 2017 du groupe Rongeurs du CBGP, 12-13 octobre 2017 ([diaporama](#))

Duraffour F., 2017. Exemple d'un modèle d'expansion : cas de la gerbille nigériane. Présentation orale aux Journées annuelles 2017 du groupe Rongeurs du CBGP, 12-13 octobre 2017 ([diaporama](#))

Granjon L. 2015. Présentation du programme CERISE ("Scénarios d'invasion de rongeurs au Sahel...") et résultats préliminaires. Présentation orale aux Journées annuelles 2015 du groupe Rongeurs du CBGP, 24-25 septembre 2015 ([diaporama](#))

Sall M., 2017. Un modèle informatique multi-thématique des conditions d'invasion d'une espèce de rongeur : le cas de la gerbille nigériane (*Gerbillus nigeriae*) au nord du Sénégal. Présentation orale au Printemps du Baillarguet, 23-24 mai 2017, CBGP, Montpellier ([diaporama](#))

I.1.5. Autres supports.

Film d'animation : « Des gerbilles et des hommes » ([voir vidéo](#))

I.2 - Synthèses scientifiques

I.2.1. Dans périodique à comité de lecture

I.2.2. Dans périodique sans comité de lecture

Ninot O., 2016. Relations villes – campagnes dans le Ferlo : Mobilités et inclusion spatiale. Rapport final de projet de l'Observatoire Homme-Milieu International de Tèssékéré, Dakar, 36pp.

I.2.3. Chapitre d'ouvrage.

Granjon L., Bâ K., Diagne C., Ndiaye A., Piry S. & Thiam M., 2018. La communauté des petits rongeurs du Ferlo : tendances historiques et caractéristiques du peuplement actuel. In Boetsch G. (dir.) *La Grande Muraille Verte, une réponse africaine au changement climatique*. Editions du Cnrs.

Ninot P., Dia Ndiaye N., Mugelé R., 2018. L'élevage pastoral à l'épreuve de la Grande muraille verte. In Boetsch G. (dir.) *La Grande Muraille Verte, une réponse africaine au changement climatique*. Editions du Cnrs.

Ninot P., Dia Ndiaye N., Diallo A., 2018. « Les mobilités au cœur du Ferlo : enclavement, mobilités, dynamiques de développement local » in Boetsch G. (dir.) *La Grande Muraille Verte, une réponse africaine au changement climatique*. Editions du Cnrs.

[I.2.4. Ouvrage entier.](#)





[I.2.5. Rapports diplômants à caractère bibliographique \(thèse vétérinaire...\).](#)

[I.2.6. Conférences dans congrès ou symposium scientifique](#)

Le Fur J., Mboup P. & Sall M., 2017. A Simulation Model for Integrating Multidisciplinary Knowledge in Natural Sciences - Heuristic and Application to Wild Rodent Studies. In *Proceedings of the 7th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2017)*: 340-347 (DOI: 10.5220/0006441803400347; ISBN: 978-989-758-265-3)

[I.2.7. Autres supports.](#)

Tableau des livrables (tels qu'identifiés dans le projet soumis; avec livrables supplémentaires le cas échéant)

Nom	Equipe responsable	Autres équipes impliquées	Date	Commentaires	Lien
Variables environnementales x données de présence / absence de <i>G. nigeriae</i> sur la grande emprise	CBGP	PRODIG	Février 2018	Maille de 8km de côté (63071 lignes x 27 colonnes)	
Description de l'environnement « <i>Mus musculus</i> »	CBGP	PRODIG	Février 2018	Chronogramme (routes, marchés, villes, populations humaine...)	
Tableaux de données d'occurrence « <i>Gerbillus nigeriae</i> »	CBGP	IFAN	Février 2018	Données de piégeage	
Tableaux de données d'occurrence « <i>Gerbillus nigeriae</i> »	CBGP	IFAN	Février 2018	Analyses de pelotes de chouette	
Tableau de données d'occurrence « <i>Mus musculus</i> »	CBGP		Février 2018	Données de piégeage	
Production de scénarios cartographiques	CBGP	PRODIG		Voir Figures et liens du rapport	
Production de rapport sur les missions de validation-terrain	CBGP	IFAN ADEMBA DEFCCS	2016-2017		
Masters II étudiants Nord et Sud	PRODIG IFAN	UGB (collaborateur 2 nd aire)	2015-2017	4 Master « Sud » (Sénégal / 2 Master « Nord (France)	
Publications	CBGP PRODIG IFAN	ADEMBA DEFCCS MATHINFO	A partir de 2017	En cours	
Médias pour retour d'information vers publics variés (affiches, banderoles, film d'animation, pièce de théâtre, film...)	ADEMBA	CBGP IFAN DEFCCS	2016-2017	En cours de finalisation pour ce qui est d'un film de 26mn à l'attention des chaînes TV sénégalaises	

Personnes ayant participé à ce projet : chercheurs et enseignants chercheurs, post-docs, doctorants, ingénieurs

Equipe	Nombre	Nom, prénom (éventuellement titre de document)
Equipe n°1 : CBGP		
Titulaires	9	Brouat Carine, chercheuse IRD Dalecky Ambroise, chercheur IRD (entretemps passé à l'UMR LPED (Marseille)) Diallo Mamoudou, technicien IRD Dakar Granjon Laurent, chercheur IRD Kane Mamadou, technicien IRD Dakar Le Fur Jean, chercheur IRD Niang Youssoupha, technicien IRD Dakar Sarr Nathalie, technicienne IRD Dakar Sow Aliou, technicien IRD Dakar
Post docs	1	Diagne Christophe (post-doc IRD, Dép ^t ECOBIO)
Autre	2	Stragier Claire (VIA IRD-CBGP) Sall Moussa (Master II UGB, voir liste rapports diplômants ci-dessus)
Equipe n°2 : IFAN		
Titulaires	2	Thiam Massamba, enseignant-chercheur Fall Kodé, ingénieur (recruté en cours de projet, après son Master II UCAD, voir liste rapports diplômants ci-dessus)
Autre	1	Ndiaye Abdoulaye, chauffeur
Equipe n°3 : PRODIG		
Titulaires	5	Berges Jean-Claude, ingénieur Univ. Paris 1 Duraffour Françoise, ingénieure CNRS Lacaze Bernard, ingénieur CNRS Lombard Jérôme, chercheur IRD Ninot Olivier, ingénieur CNRS
Autre	2	Natacha Volto, Master II Univ. Paris Diderot, voir liste rapports diplômants ci-dessus) Samar Sall, Master I, Univ. Paris Diderot, voir liste rapports diplômants ci-dessus)
Equipe n°4 : MATHINFO (UCAD)		
Titulaires	1	Konaté Karim, enseignant-chercheur
Doctorant	1	Mboup Pape Adama
Master	1	Diakhate Malick
Equipe n°5 : ADEMBA		
Titulaires	4	Bâ Boubacar Bâ Khalilou, président Diakhaté Mbarkha, journaliste Touré Arona
Autre	1	Wone Nafissatou (Master II UGB, voir liste rapports diplômants ci-dessus)
Equipe n°5 : DEFCCS		
Titulaires	6	Cissé Mokhtar, vidéaste Dieng Médoune, chauffeur Fall Ndamé, chauffeur Sall Mokhtar Bocar, chef de secteur Ranérou Sonko Abba, chef de division Faune Sauvage Sow Doudou, adjoint au chef de division Faune Sauvage
Autre	1	Faye Cheikh, monteur vidéo



Figure 17 Banderole d'information sur la gerbille en langues locales

Exemples de support de communication réalisé dans le cadre du projet, les banderoles et affiches ont été réalisées en plusieurs langues

- sessions d'information sur le mode « causerie », dans des contextes très variés (mairies, centres de santé, maisons particulières, lieux de réunion extérieurs...)
- diffusion du film d'animation *Des gerbilles et des hommes* dans les écoles ([vidéo en ligne](#)). La version en pulaar était diffusée aux plus petites classes (CP et CE) et la version en français aux plus grandes (CM). Les projections étaient suivies de discussions impliquant les enseignants, afin d'évaluer la compréhension par les élèves des messages du film,
- émissions en direct (environ 1 heure chaque fois, avec interactions avec auditeurs) et flashes d'information en direct et différé dans quatre radio-communautaires de la région : Radio Bambaare à Dodel (en novembre 2016 et mai 2017), Fouta FM et Pete FM toutes deux à Pete (novembre 2016), et Ranérou FM à Ranérou (2 passages en février 2017),
- représentations théâtrales : 13 représentations ont été assurées, rassemblant chaque fois entre 150 et 300 spectateurs dont beaucoup d'enfant et de jeunes, mais également souvent des représentants des autorités locales, à Yonoféré, Diagali, Ranérou (deux fois), Fourdou et Dendoudy en février-mars 2017) ainsi qu'à Thialaga, Diomandou-Diéry, Toulde Galé, Dodel, Diamy Galo, Mboumba et Aere Lao en mai 2017).

Enfin, suite à l'enregistrement de plusieurs nouvelles heures d'images pendant deux des missions de terrain par M. Cissé (vidéaste DEFCCS), la réalisation d'un film (26') sur les thématiques du programme CERISE est en cours. Il sera proposé en priorité pour diffusion sur les chaînes TV sénégalaises.

Les détails de ces activités peuvent être consultés dans la page des rapports de missions réunis dans le centre d'information SimMasto ([lien](#))

[Publications, sites internet, présentations, articles de presse, interviews, projets éducatifs, etc. liés à ces recherches](#)

L'IRD Sénégal, via sa chargée de communication Fatou Diouf, s'est fait l'écho de nos activités dans le cadre du programme CERISE, d'une part sur son site internet ([lien](#)), information relayée via la « Newsletter de l'IRD au Sénégal » envoyée à tous les membres de la liste de diffusion de l'IRD au Sénégal, mais aussi sur les réseaux sociaux de l'IRD à l'international ([exemple](#)) et en Afrique de l'Ouest.

Un court film d'animation (*Des gerbilles et des hommes*) a été réalisé par 3 étudiantes du module de formation aux techniques du films d'animation scientifique dans le cadre de l'UE Communication et Education à l'Environnement du Master Biologie-Ecologie de l'Université de Montpellier, avec un soutien du Labex CeMEB ([voir vidéo](#)). Une version en pulaar en a été montée au Sénégal sur l'initiative de l'ADEMBA. Les deux versions du film ont été projetées dans les écoles d'une douzaine de villages visités en novembre 2016 (moyenne vallée du fleuve Sénégal) et février-mars 2017 (Ferlo central).

Enfin, en marge des émissions en direct assurées dans les radio locales de Dodel, Pete et Ranérou en 2016 et 2017 (voir plus haut), diverses interviews des membres de l'équipe (Khalilou Bâ et Laurent Granjon en particulier) ont été réalisées et diffusées au moment de flashes d'informations de ces mêmes ondes.

Outils de gestion ou d'aide à la décision développés grâce à ce projet

Le groupe des cinq modèles qui a été développé et dont chacun a été éprouvé constitue une base logicielle concrète pour la réalisation d'outils d'aide à la décision. Les différents angles ou points de vue qui ont été considérés permettent d'envisager des développements méthodologiques propices à la production d'outils opérationnels.

Activités de suivi et projets de valorisation des résultats

Activités prévues (ou à prévoir) pour amplifier l'utilisation ou la mise en application des résultats ?

La mise en forme définitive du film (titre provisoire : *Des envahisseurs au Sahel*) dont une version préliminaire a été quasiment finalisée en novembre 2017 au service vidéo de la DEFCCS à Dakar (CBGP / ADEMBA / DEFCCS / IFAN) et sa diffusion sur les chaînes TV sénégalaises devrait donner plus d'impact encore au projet dans le pays.

En 2018, et grâce à une allocation de 2250€ obtenue en réponse à un AAP pour le financement d'opérations de culture scientifique et/ou de communication portées par la représentation de l'IRD-Sénégal, la pièce de théâtre pourra être à nouveau jouée, cette fois dans la région du delta du fleuve Sénégal par la troupe Meleb-Meleb encadrée par l'ADEMBA, et avec un soutien complémentaire de l'IRD-CBGP.

6. Accès aux données

Merci d'indiquer les bases de données créées ou alimentées par le projet, ainsi que les conditions d'accès à ces données

La base de données « Petits Mammifères » hébergée et entretenue par le CBGP a été alimentée en données « rongeurs » et données « environnementales » à la suite de chacune des missions de terrain du projet. Les données « rongeurs » de base en sont accessibles publiquement via <http://bpm-cbgs.science>, et les informations plus complètes associées sont éventuellement disponibles après prise de contact préalable avec les gestionnaires et dépositaires des données. Pour ce qui est des données associées au projet CERISE, le contact est [Laurent Granjon](#).