

Des Connaissances à la Simulation Multi-agents: Modélisation orientée événements de la Colonisation du Rat noir au Sénégal par les Transports Humains sur un Siècle.

Pape Adama Mboup^{1,2,*}, Pascal Handschumacher³, Karim Konaté¹ et Jean Le Fur⁴

¹Département de mathématiques et d'informatique, UCAD/18522 Dakar Sénégal,

²IRD, UMR 022 BIOPASS, Campus de Bel-Air, BP 1386, Dakar, CP 18524, Sénégal

³IRD, UMR 912 SESSTIM INSERM - IRD - U2, Faculté de géographie UdS, 3, rue de l'Argonne F-67000 Strasbourg, France

⁴IRD, UMR 022 CBGP, Campus international de Baillarguet, CS 30016, 34988 Montferrier-sur-Lez cedex, France

pamboup@hotmail.fr, p.handschumacher@unistra.fr, kkonate911@yahoo.fr, jean.lefur@ird.fr

Résumé—Ce travail porte sur la construction d'un simulateur qui permet de passer des connaissances de divers thématiciens à une simulation multi-agents par une approche orientée événement. Le simulateur permet de représenter la diffusion dans le temps et dans un environnement évolutif de populations de rats par les transports humains circulant sur divers types de voies (routes, rails, fleuves) reliant les villes du Sénégal. Les transporteurs choisissant aléatoirement leurs destinations à partir d'alternatives pondérées par la taille de la population des villes.

Mots-clés—approche orientée événement, Dijkstra, environnement évolutif, modélisation, rats, Sénégal, système multi-agents.

I. INTRODUCTION

Le développement de la société sénégalaise depuis un siècle a conduit à des changements spectaculaires et multiples concernant tant l'usage des terres que la répartition des populations humaines, la dynamique des villes ou l'accélération des flux de population et de biens [2]. Ces changements s'accompagnent le plus souvent de conséquences pour la santé publique avec un développement concomitant des vecteurs de risques épidémiologiques. Parmi ceux-ci, le rat noir (*Rattus rattus*) représente un enjeu fort en termes de santé publique car il est hôte de nombreuses maladies transmissibles à l'homme telles que la leptospirose, le typhus murin, les borrélioses ou divers hantavirus [7]. Plus généralement, sa proximité à l'homme en fait un élément majeur de la diffusion et de la propagation de risques sanitaires.

Dans le cas de la colonisation du rat noir au Sénégal, l'un des obstacles majeurs à surmonter tient au fait que les problèmes à résoudre résultent de processus multiples qui opèrent et doivent être saisis à des échelles de temps, d'espace et d'analyse différents [1] [12]. Dans l'effort pour décrypter ces mécanismes complexes, notre objectif est de construire et utiliser un modèle permettant la simulation de l'histoire des transports humains au Sénégal sur un siècle et de leur influence sur la colonisation du rat noir.

Dans cet article, nous présentons la construction d'un modèle multi-agents [6] sur la base d'une plate-forme déjà existante de modélisation de populations de rongeurs [8]. Le simu-

lateur permet la représentation et l'évolution dans le temps des rats qui peuvent monter et descendre de divers types de moyen de transports (camions, trains, bateaux) circulant sur divers types de voies (fleuves, rail, routes) reliant les villes du Sénégal. Pour que ce simulateur puisse prendre en compte l'évolution sur un siècle (des villes, des voies de transport, des zones de commerce,...), nous avons utilisé et adapté une approche orientée événement [17] [8]. Cette approche permet au simulateur de recevoir comme entrées les données de diverses thématiques (biologie, géographie, histoire...) organisées sous forme de chronogramme.

Dans cet article, nous décrivons le modèle et la mise en œuvre de la simulation puis présentons les résultats et les principales validations qui ont été effectuées. Nous discutons ensuite ces résultats et concluons sur les perspectives qu'il offre.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le simulateur est développé à partir de la plate-forme multi-agents SimMasto [8]. Développée en java sous Repast Simphony [11] et fondée sur une architecture trois tiers (data-business-presentation) [18], SimMasto est conçue robuste et flexible ce qui a permis, avec des travaux précédents d'englober plusieurs simulateurs portant par exemple sur les phénomènes d'hybridation [3], le ravage des cultures [9], la simulation d'expérimentation en cages et en enclos [3], la pose de pièges in situ [4] et, ici, la diffusion des rongeurs par les transports humains dans un environnement évolutif. SimMasto est dotée d'une interface de sortie des résultats sous forme de courbes, de diagrammes, de graphes et de tableaux de données [13]. Nous avons utilisé SimMasto car le développement informatique de ce modèle s'inscrit dans le cadre du développement de cette plate-forme dont l'objet est la simulation de la dynamique des populations de rongeurs à plusieurs échelles. Ce simulateur bénéficie de l'ensemble des développements qui y ont déjà été réalisés.

A. Architecture du modèle

Le modèle est constitué principalement des classes présentées sur la fig. 1. Animal est une classe abstraite ayant cer-

taines propriétés d'un animal lui permettant de mettre en œuvre un schéma comportemental de type perception-délibération-décision-action adapté de [6]. Rodent et HumanCarrier sont des classes qui héritent de Animal et permettent de créer respectivement des agents rongeurs et transporteurs. HumanCarrier possède un véhicule (de type camion, train ou bateau) de la classe Vehicle. Chaque type de véhicule a sa propre vitesse et son propre type de voie (route, rail ou rivière). Les véhicules se déplacent sur une topologie de type graphe (voir II.B. et II.D.).

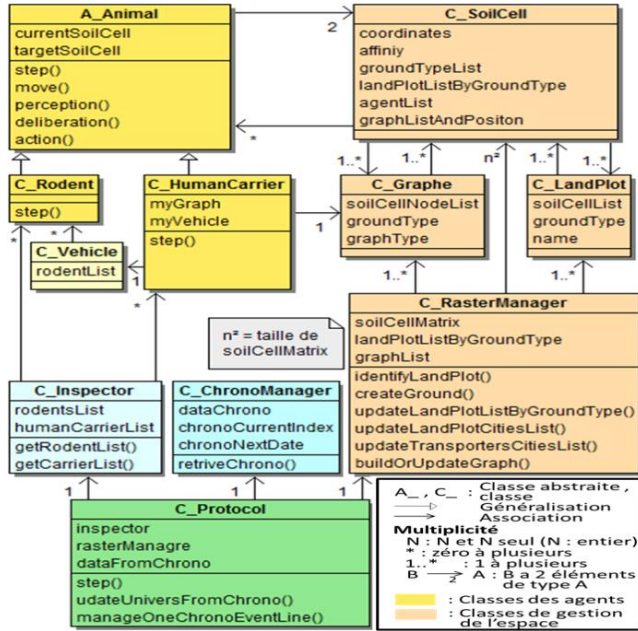


Fig. 1. Schéma UML du simulateur (nomenclature des classes: A_ : classe abstraite, C_ : Classe).

Le simulateur dispose d'un protocole, d'un gestionnaire d'événement et d'un ensemble d'inspecteurs appartenant à un système épiphyte (ou conseiller) [15]. Les objets de la classe Inspector se chargent de stocker et de restituer au besoin les données de la simulation. Ils contiennent par exemple la liste des rongeurs, des transporteurs etc. ChronoManager est la classe qui se charge de contenir les événements (par ordre chronologique) permettant la création et les mises à jour de l'environnement (voir II.C.). La classe Protocol distribue les tâches. Sur requête du ChronoManager, le protocole construit ou met à jour l'environnement, crée les agents rongeurs et transporteurs, les référence dans l'inspecteur, demande au gestionnaire d'espace (RasterManager) de les positionner sur le sol. Le protocole gère à chaque pas de temps (tick) son environnement et donne la main à chaque agent pour qu'il réalise son propre step (ses actions pour ce tick).

SoilCell, LandPlot, Graph et RasterManager représentent différentes facettes de l'espace (voir II.B.).

B. Représentation et gestion de l'espace

L'espace est discrétisé en cellules élémentaires de même taille (objets de la classe SoilCell, fig. 2) pouvant contenir plusieurs informations et permettant de connaître au besoin position, nombre d'agents, affinité pour les rongeurs, types de terrain (route, rail, rivière, ville, bioclimat etc.). Un ensemble

de cellules élémentaires contiguës de même type est un LandPlot. Cette classe permet la délimitation et l'identification des différentes zones de l'environnement (champs, villes, routes, chemins de fer, rivières, bassins arachidiers etc.) ; ce qui est utile pour les agents qui ne doivent pas sortir d'une zone donnée. Une cellule peut appartenir à plusieurs LandPlots de types différents (par exemple une zone de commerce arachidier sur laquelle traverse une route passant par une ville). A partir des LandPlots de type voies de transports, les graphes sont construits (ce qui garantit la connexité voir II.D.2). Les graphes constituent donc les voies de transports reliant les LandPlots de type ville (voir II.D.).

La classe RasterManager (Fig. 1) se charge de la construction et de la gestion globale de l'espace ainsi que de mettre en relation les agents et l'espace au cours de la simulation (ex. agents transporteurs et routes). Il contient : (i) l'espace continu qui représente une topologie où les rats se déplacent, (ii) une matrice (grille) de soilCells représentant la discrétisation de l'environnement. Elle représente une topologie qui permet aux agents de percevoir leur voisinage [6], (iii) des listes et des procédures permettant détection, construction et stockage des landPlots représentant les différentes zones de l'espace et des graphes représentant les voies de communication où se déplacent les véhicules.

La taille des cellules dépend du niveau de détail que l'on a choisi. Pour une simulation dont seule nous intéresse la diffusion des rats d'une ville à une autre par le transport humain, la taille des cellules est de 7,5km de côté (Fig. 2).

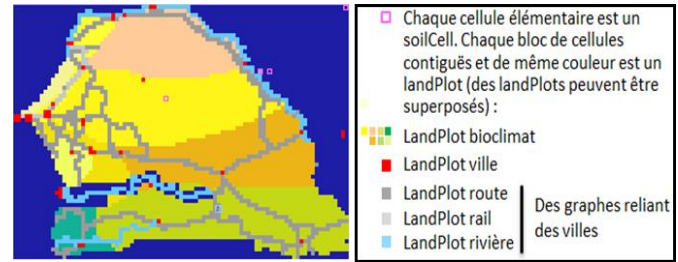


Fig. 2. Discretisation de l'espace sénégalais au sein du simulateur. Un carré unitaire correspond à la classe SoilCell, une surface homogène correspond à un LandPlot ; les routes, voies ferrées et fleuves sont aussi formalisés sous forme de graphes.

C. Des connaissances aux événements

Pour que les différents chercheurs biologistes, écologues, géographes puissent intégrer en temps utile dans la simulation tout type de données (connaissances) lié à leur domaine d'expertise, un modèle orienté événement est choisi [17]. Un chronogramme est mis à disposition pour y introduire tout type de données, en respectant un format unique. Le chronogramme est un fichier au format csv composé de lignes et de colonnes (Tableau I) dans lequel chaque ligne ou bloc de ligne représente un événement complet. Le chronogramme est nécessairement chronologique et répond et par ordre, aux trois questions suivantes : Quand, Où et Quoi. Un complément d'information (comment, combien) peut être optionnellement fourni. Cette approche facilite la construction et la mise à jour de l'environnement à partir des différents types de données (Tableau III) des différents thématiciens.

TABLEAU I
FORMAT DU CHRONOGRAMME

Quand	Où		Quoi	Complément d'information	
DATE	X	Y	EVENT	VALUE1	VALUE2
...

1) Stockage et parcours des données

Chaque chercheur communique ses données qui sont mises en forme et intégrées au chronogramme. La classe ChronoManager (fig. 1) est la classe de base permettant le stockage, le parcours et le traitement des événements du chronogramme. Il copie les lignes du chronogramme dans la collection (tableau) dataChrono.

Durant la simulation, cette collection n'est parcourue qu'à l'arrivée d'une date pour un ou un ensemble d'événements. Chaque type d'événement dispose de son traitement spécifique réalisé par le protocole. Les instructions (événements) de ce chronogramme permettent de construire et de mettre à jour l'environnement.

2) Mise à jour de l'environnement à partir des événements

A chaque pas de temps, le protocole compare la date de la simulation à la date courante du chronogramme. Si les dates concordent l'environnement est mis à jour en deux étapes : (1) le dataChrono est parcouru ligne par ligne jusqu'à ce que les événements pour cette date soient épuisés. Pour chaque ligne lue, l'environnement est mis à jour soit par modification des types d'un SoilCell (ex: construction d'une route), soit par augmentation ou diminution (à un endroit donné) de la population de rats, de camions, de trains ou de bateaux. (2) la date du prochain événement est sauvegardée puis l'environnement est mis à jour pour tous les événements reçus à cette date. Ces mises à jour consistent à modifier les objets que connaissent les transporteurs (ex. : prolongation d'une route) et non pas à en créer de nouveaux.

Le stockage du chronogramme dans le simulateur et la lecture de ses données dans le temps sont génériques et peuvent être utilisés dans d'autres simulateurs de la plate-forme, moyennant une adaptation du traitement des événements particuliers à chaque protocole.

D. Le déplacement des agents transporteurs

Chaque type de transporteur connaît sa vitesse moyenne (déterminée par les chercheurs) et le type de graphe sur lequel il doit se déplacer : les camions sur les routes, les trains sur les rails et les bateaux sur les rivières (ces informations n'ont donc pas besoin d'être dans le chronogramme). Lors de la création d'un transporteur, on lui transmet le graphe correspondant à sa spécialité comprenant sa cellule courante. Il élabore à partir de ce graphe une liste de destinations possibles (villes) ou il utilise la liste de villes qu'on lui a éventuellement spécifiée dans le chronogramme.

1) Choix de la destination

Un agent transporteur connaît le graphe dans lequel il évolue et la liste de villes (reliées au graphe) où il peut aller. A sa phase de délibération [6], le transporteur choisi aléatoirement une ville de sa liste de destinations, ce choix est pondéré par la

taille de la population de la ville. C'est-à-dire comme dans la réalité, plus une ville est peuplée, plus les transporteurs s'y rendent (modèle gravitaire).

Pour mieux expliquer comment nous avons procédé prenons l'exemple du tableau II contenant des villes avec leur taille de population et leurs effectifs cumulé croissants et la probabilité pour qu'un véhicule s'y rende. Les transporteurs doivent aller à toutes les villes, mais plus fréquemment à la ville 3 puis à la ville 4 etc. Pour cela, un algorithme faisant ce qui suit a été élaboré :

Soit popTotal la somme des tailles des populations (95 ici). A leur phase de délibération, les transporteurs choisissent un nombre aléatoire NA (entier) compris entre 1 et popTotal. Si NA est compris entre 1 et 5, i.e. 5 possibilités sur 95 soit 5,26%, alors la ville 1 est choisie ; si NA est supérieur à 5 et est inférieur ou égal à 12, i.e. 7 possibilités sur 95 soit 7,37%, alors la ville 2 est choisie etc. Pour une optimisation spatiale, seul le tableau contenant les effectifs cumulés croissants des tailles de population est stocké dans le simulateur. Ce tableau est construit à partir des données du chronogramme.

TABLEAU II
EXEMPLE DE LISTE DE VILLES AVEC LEUR TAILLE DE POPULATION

Numéro ville	1	2	3	4	5
Taille population	5	7	50	30	3
Effectifs cumulés croissants	5	12	62	92	95
Probabilité d'être choisie	5,26%	7,37%	52,63%	31,58%	3,16%

2) Construction du plus court chemin

La Fig. 3 illustre l'approche retenue pour la construction et le parcours d'un type de chemin reliant deux villes. Chaque case (cellule) représente un SoilCell, la partie grisée constitue un LandPlot appréhendé ici comme un graphe. En effet construire les graphes à partir des landPlots nous assure que les graphes sont connexes (existence d'un chemin entre chaque paire de nœuds). Dans l'algorithme développé, chaque cellule constitue un nœud du graphe et entre deux nœuds successifs il y a une arête. De cette façon, une route constitue un ensemble de nœuds et d'arêtes de longueurs égales (taille d'une SoilCell) au lieu d'une seule arête reliant deux nœuds villes.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
■ Ville	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
■ Route	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Chemin B →	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Chemin A →	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Fig. 3. Un exemple de grille avec un graphe de deux routes reliant deux villes.

Cette approche rend possible et suffisante l'utilisation de graphes non étiquetés. L'algorithme de Dijkstra [5] pour les graphes non étiquetés détecte alors le plus court chemin et renvoie le chemin A (description et test de l'algorithme : [10]).

3) Déplacement sur le chemin construit

Par défaut un objet de type Animal se déplace de façon rectiligne du soilCell où il se trouve au soilCell où il veut aller.

Après qu'un agent transporteur se soit construit un chemin, il lui suffit alors de se donner successivement comme destination les cellules de son chemin, jusqu'à terme. Et entre deux cellules successives, il utilise le processus de déplacement de base de Animal [16].

4) La diffusion des rats via les véhicules

En tant qu'Animal, un agent rat (Rodent) peut choisir une destination et s'y rendre [16]. Pour cela il peut percevoir son environnement sur un rayon paramétrable, et recenser les objets qui s'y trouvent. Si dans les objets recensés il y a un véhicule parqué alors le rat, suivant une probabilité paramétrable (voir perspectives), a le choix de monter ou pas dans le véhicule. Si le transporteur arrive à destination tous les rats descendent du véhicule. Ainsi les rats diffusent dans le pays à travers les véhicules. On note que les rats sont transportés sans conséquence pour les véhicules ou les transporteurs.

E. Mise en œuvre de la simulation

A chaque pas de temps le protocole gère les nouveaux événements s'il y en a et met à jour l'environnement. Il met ensuite en œuvre en séquence les différents types d'agent puis déclenche le système épiphyte [15] pour récolter les données. Un inspecteur du système épiphyte parcourt toutes les villes, compte le nombre de rats dans chacune et l'inscrit dans un tableau de données de sorties et dans les variables permettant de tracer les courbes dans le display.

III. RESULTATS ET VALIDATION

Après que les thématiciens aient communiqué leurs données, le chronogramme est rempli. Il y a au total 8 types d'instructions prises en compte dans la construction du simulateur. Le tableau III est un extrait du chronogramme: Le 05/01/1910, démarrage de la simulation, prise en compte de la ville de Dakar couvrant 4 cellules ; Le 06/01/1910, affectation à la ville de Dakar d'une taille de population de 284.830 ; Le 02/01/1913, création d'un chemin de fer ; le 01/01/1914, création de 3 trains (sur une cellule de type rail) qui ne vont que sur les villes de Saint-Louis et Dakar (city:Saint-Louis,Dakar) ; le 02/01/1923, création d'une route ; le 11/01/1923, ajout de 30 rats (dans Dakar) ;

TABLEAU III
EXTRAIT DE CHRONOGRAMME

DATE	X	Y	EVENT	VALUE1	VALUE2
05/01/1910	0	34	city	Dakar	
05/01/1910	0	35	city		
05/01/1910	1	34	city		
05/01/1910	1	35	city		
06/01/1910	0	34	population	Dakar	284.830
02/01/1913	0	34	rail		
02/01/1913	rail		
01/01/1914	0	34	train	3	city:Saint-Louis,Dakar
02/01/1923	0	34	road		
02/01/1923	road		
11/01/1923	0	34	rats	30	
01/01/1925	1	35	train	-1	city:Saint-Louis,Dakar
01/01/1925	0	34	truck	1.000	
01/01/1950	7	31	GNT-HEAVY		
...	GNT-HEAVY		
01/01/1950	0	34	truck	30	area-type:GNT-HEAVY

le 01/01/1925, suppression d'un train (-1) parmi ceux qui font le trajet Saint-Louis-Dakar (city:Saint-Louis,Dakar); le 01/01/1950, création d'une zone du bassin arachidier (GNT-HEAVY, avec GNT: GroundNutTrade) ; le 01/01/1950, création de 30 camions qui réalisent leurs transports en restant dans le bassin arachidier (area-type:GNT-HEAVY).

Pour valider l'implémentation du simulateur, nous avons testé un à un et étape par étape les 8 types d'instructions et les avons ensuite englobés dans un chronogramme complet (faisant 10.597 lignes) qui construit progressivement l'environnement de simulation. Nous avons lancé une simulation à partir de l'année 1910 jusqu'en 2000 avec un pas de temps (tick) correspondant à un jour simulé (Fig. 4). Tout type de véhicule parvient à passer par son type de route et par le plus court chemin tout en prenant en compte l'évolution de l'environnement. Par exemple si une nouvelle ville ou une nouvelle route est construite alors les agents transporteurs concernés l'apprennent et le prennent en compte, pour s'y rendre (ville), ou pour y passer (plus court chemin) et parviennent à transporter les rats (Fig. 5) d'une ville à une autre. Le modèle prend bien en compte les transporteurs ne devant faire un trajet qu'entre deux ou un certain nombre de ville, se cantonnant à une zone (ex. un bassin arachidier) ou choisissant parmi toutes les villes reliées à leur graphe.

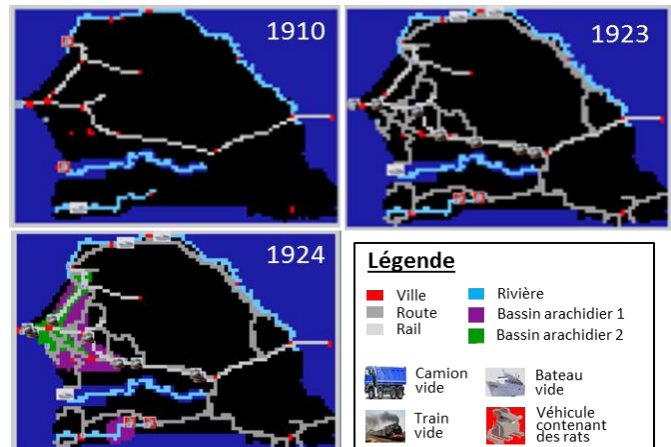


Fig. 4. Évolution de l'environnement et des voies de transports

Pour tester la sensibilité de la diffusion des rats au nombre de transporteurs et de rats dans les villes, un chronogramme de test est aussi construit arbitrairement de sorte à varier le nombre de véhicules et de rats dans le temps (fig. 5) : Les pics de population correspondent à l'ajout de 500 rats chaque année dans la simulation. En effet la population de rats décroît du fait que les rats dans cette simulation de test ne se reproduisent pas et meurent après un certain temps (c'est la sensibilité à la diffusion qui est testée et pas la reproduction des rats). Avant 1926, les seuls transports par fleuve et rail ne permettent qu'une diffusion limitée des rongeurs dans le pays. L'augmentation du nombre de transporteurs par route en 1926 conduit à une augmentation sensible du nombre de rats transportés et leur diffusion des villes où leur population est forte vers celles où il n'y en avait pas.

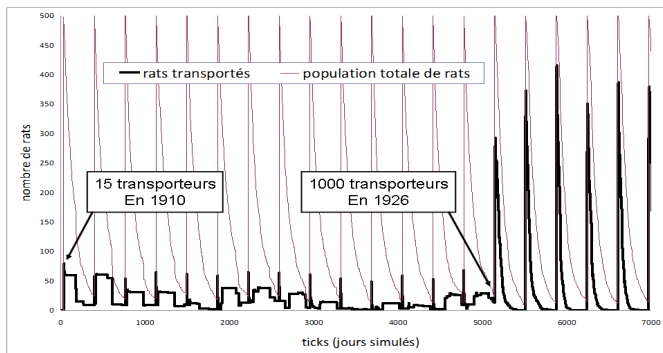


Fig. 5. Evolution du nombre de rats transportés simulée sur un siècle et montrant l'effet du nombre de transporteurs sur la diffusion des rats. Pour le test, la probabilité (paramétrable) des rats de monter dans un véhicule s'il le perçoit se situe entre 90 et 100%.

IV. DISCUSSION

Le but de ce travail n'est pas de présenter les résultats d'une simulation, mais de présenter la modélisation, la construction et l'évaluation d'un simulateur multi-agents orienté connaissance et événement permettant de simuler la colonisation du rat noir au Sénégal par les transports humains sur un siècle. Des approches alternatives pouvaient être développées pour atteindre cet objectif.

On pouvait s'intéresser aux projections de type réseau implémentées en natif dans Repast Symphony pour construire les graphes des voies de transport. Nous avons préféré utiliser la projection de type grille qui était déjà opérationnelle dans la plate-forme SimMasto. Cette approche nous a permis de calculer les plus courts chemins en calculant les distances entre les villes sans utiliser de graphe étiqueté.

L'algorithme de recherche de chemin dans un graphe A* [14] qui est plus rapide que Dijkstra [4] et qui donne souvent de bon chemins pouvait être utilisé. Nous avons préféré, en plus d'une utilisation optimisée [19], utiliser Dijkstra qui est suffisamment rapide et qui donne exactement le plus court chemin dans toutes les situations.

Pour le choix de destination des transporteurs, d'autres paramètres sont envisageables pour bien caler la dynamique des véhicules à celle de la réalité. Par exemple le choix de destination suivant la distance entre villes en plus de leur taille.

V. CONCLUSION

Nous avons montré comment nous avons construit et évalué un simulateur multi-agent orienté connaissance et événement qui permet de simuler le trafic routier, fluvial et ferroviaire sur l'ensemble du Sénégal et sur un siècle. Avec un ensemble souple d'objets transporteurs humains de divers types, circulant d'une ville à une autre sur différents types de voies en empruntant les plus courts chemins. Ainsi que des rats qui peuvent monter, descendre et se faire transporter d'une ville à l'autre par les véhicules tout en prenant en compte l'évolution de l'environnement et des flux de véhicules.

On peut à présent envisager la conduite d'analyse de sensibilité de paramètres clés tels que la probabilité de montée des rats dans les véhicules. Il sera ensuite envisageable d'emboîter dans ce modèle des sous-modèles plus localisés de la diffusion

et la propagation des rats pour rendre compte de leurs possibilités locales d'implantation et des modalités de contact entre rats et hommes dans une perspective épidémiologique.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Auger, J. Baudry, et F. Fournier, (1992). Hiérarchies et échelles en écologie. Naturalia Publications. Paris.
- [2] CEDEAO et CSAO, *Atlas régional des transports et des télécommunications dans la Cedeao*, Abuja et Issy-les-Moulineaux, 2005.
- [3] A. Comte, "Évaluation des capacités d'introgession par hybridation entre deux espèces de rongeurs africains du genre *Mastomys* – étude par simulation informatique multi - agents," Rapp. Master 2, Recherche Ecologie-Biodiversité, spécialité Biodiversité Evolution, parcours Génétique et Biodiversité Univ. Montpellier 2, 2012.
- [4] E. M. Diakhaté, N. Diouf, L. Granjon, P. A. Mboup, K. Konaté, et Le J. Fur (2014). Modélisation et simulation multi-agents d'un protocole de capture-marquage-recapture pour l'étude de la dynamique d'une population de rongeurs dans la réserve de Bandia (Sénégal). Présenté au Colloque Africain sur la Recherche en Informatique, Saint-Louis, Sénégal.
- [5] Dijkstra E. W., (1959). A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik*, vol. 1, no 1, p. 269–271.
- [6] J. Ferber, *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris, 1995.
- [7] L. Granjon et J.-M. Duplantier, "Les rongeurs de l'Afrique sahélo-soudanienne," in *Collection Faune et Flore Tropicale*, IRD Éditions / MNHN. Marseille, 2009.
- [8] J. Le Fur, sept. 2013. A formal framework for linking multidisciplinary multiscale knowledge. A case study on rodent population dynamics and management. Presented at European Conference on Complex Systems, Barcelona, p. 5, sept-2013.
- [9] J.-E. Longueville, "Modélisation spatialisée de la variabilité génétique de populations de rongeurs sauvages dans un paysage explicite," Rapport de stage Master 2, parcours EEB, Univ. Lyon I, 2011.
- [10] P. A. Mboup, "Construction d'un environnement de simulation multi-agents pour l'étude de la diffusion du rat noir au Sénégal au cours du siècle écoulé," Mémoire de Master, Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, FST, Département Maths et Informatique, Dakar, 2012.
- [11] M. J. North, N. T. Collier, J. Ozik, E. R. Tatara, C. M. Macal, M. Bragen, et P. Sydelko, (2013). Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony, *Complex Adaptive Systems Modeling*, vol. 1, no 1, pp. 1–26.
- [12] D. Pumain, (2006). Hierarchy in Natural and Social Sciences. *Springer*, Methodos Series 3.
- [13] A. Realini, "Conception et mise en œuvre d'une interface de visualisation des résultats de simulation d'une plate-forme de simulation individu-centrée," Rapport DUT, IUT informatique Montpellier, 2011.
- [14] Hart, E. Peter, J. N. Nils, and R. Bertram (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on* 4.2: pp. 100-107.
- [15] F. Pachet, S. Giroux, and G. Paquette (1994). Pluggable advisors as epiphyte systems. *Calisce 194 (Computer Aided Learning in Science and Engineering)*, Paris pp. 167-174.
- [16] B. Quentin, J. Le Fur et S. Piry "Chaînes de traitement et procédures pour l'exploitation de données spatialisées par un simulateur multi-agents," Montpellier, Rap. multigr. CBGP, 2009.
- [17] M. Worboys (2005). Event-oriented approaches to geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science* 19.1: pp. 1-28.
- [18] A. P. Tafti, S. Janosepah, N. Modiri, A. M. Noudeh & H. Alizadeh (2011). Development of a Framework for Applying ASYCUDA System with N-Tier Application Architecture. In *Software Engineering and Computer Systems* (pp. 533-541). Springer Berlin Heidelberg.
- [19] P. A. Mboup, M. L. Mboup, K. Konaté, P. Handschumacher, et Le J. Fur (2015, Juin). Optimisation de l'utilisation de l'algorithme de Dijkstra pour un simulateur multi-agents spatialisé. Presented at The World Congress on Information Technology and Computer Applications 2015, Hammamet, Tunisia.