

Conception d'un Système Multi-Agents d'Aide à la Décision pour une Gestion Efficace des Services d'Urgence : Cas de l'Hôpital de Kherrata

Boukredera D., Adel-Aissanou K., Abdoune K. et Bouriahi L.

ak_adel@yahoo.fr , djamila.boukredera@univ-bejaia.dz

Résumé Le surpeuplement des services d'urgence est un problème permanent et récurrent pour le personnel hospitalier, les administrateurs de santé, les décideurs politiques et les patients. Face à la demande croissante des patients pour ces services, aux restrictions budgétaires et au manque du personnel de santé, les administrateurs sont à la recherche de solutions pratiques et applicables afin de réduire le temps d'attente des patients et fournir une qualité de service acceptable. Dans cette optique, nous proposons un modèle décisionnel basé sur les systèmes multi-agents (SMA) dont le but est d'apporter une aide précieuse aux administrateurs en exploitant les avantages qu'offrent le paradigme agents qui est très préconisé pour modéliser des systèmes dynamiques et complexes où les entités qui le composent sont souvent appelés à coopérer, collaborer voire négocier pour atteindre un objectif tracé au préalable. Le modèle SMA proposé est un modèle de simulation automatique dont le but est de modéliser l'activité des urgences et d'analyser par la suite les effets de la réorganisation des ressources dans ces services sans apporter de changements potentiellement coûteux. Afin d'assurer une représentation fidèle du système réel, un réseau de files d'attente a été utilisé pour modéliser le parcours des patients dans le service d'urgence. Comme cas pratique, nous nous sommes intéressés au service des urgences de l'hôpital de Kherrata qui dispose d'une structure et d'une organisation qui ne peuvent plus fournir des prestations de soins adaptées aux besoins des patients et à leur satisfaction. Notre modèle est implémenté et testé dans la plateforme de simulation en libre accès NetLogo.

Mots clés : Services d'Urgence, Système Multi-Agents, Systemes d'Aide à la Décision, Systèmes de Files d'Attente, NetLogo.

5.1 Introduction

Les patients se rendent toujours dans un service d'urgence (SU) pour y recevoir des soins médicaux immédiats. Cependant, ils sont généralement confrontés à une très longue attente causée par différents paramètres notamment le manque de lits, de personnel de santé et la procédure de gestion non adéquate de ce type de services.

Améliorer la qualité et l'efficacité des soins de santé a été depuis longtemps l'enjeu majeur des structures hospitalières, et plus particulièrement les services des urgences. L'objectif est d'assurer une bonne prise en charge du patient tout en minimisant le temps d'attente et de séjour dans le service d'urgence. Ce temps et la qualité des soins sont les principales mesures de la satisfaction du patient. Ce problème est très complexe vu que les services d'urgence sont caractérisés par des activités non linéaires et en continuelle variation. C'est une organisation complexe avec des processus dynamiques et flexibles et de nombreux acteurs autonomes impliqués. De plus, les patients qui arrivent aléatoirement aux urgences présentent différents problèmes de santé avec différents niveaux de gravité. Les gestionnaires sont alors appelés à prendre des décisions souvent vitales nécessitant précision et rapidité afin d'éviter d'éventuels mauvais diagnostics ou traitements qui pourraient mener au décès du patient.

Les services d'urgence passent souvent par des phases critiques où le surpeuplement et la

manque de moyens matériel et humain entraîne inévitablement la dégradation des conditions de travail, l'allongement des temps d'attente et de séjour des patients ainsi que le risque de détérioration de leurs états de santé. Ceci provoque alors une baisse de la qualité des soins, l'insatisfaction des patients et l'inquiétude des gestionnaires face à de telles situations. Néanmoins, un service d'urgence aussi critique doit être satisfait avec la meilleure qualité possible le plus rapidement possible. Une solution simple et évidente à ce problème serait d'augmenter la capacité des urgences définie par la taille de l'établissement de santé et le personnel disponible, qui comprend des médecins, des infirmières, du personnel d'admission et de service. Toutefois, cette solution aussi simple n'est pas la meilleure approche et pourrait être irréalisable. Les responsables des systèmes de santé devraient alors trouver une meilleure réorganisation du service qui vise à maximiser l'utilisation des ressources de santé, afin de minimiser le temps d'attente des patients et d'augmenter leur satisfaction.

Cependant, les administrateurs des services d'urgence ne disposent généralement pas d'un outil d'aide à la décision pratique pour évaluer l'impact d'une modification du flux de travail menant à ces situations critiques. Dans cet article, nous proposons de venir en aide à ces gestionnaires en leur proposant un système d'aide à la décision basé sur un modèle multi-agents. C'est un modèle de simulation qui modélise les différentes phases du flux de travail des urgences, telles que le triage, l'examen du patient, son placement sous observation, la réanimation, etc.

Ce système d'aide à la décision a pour but d'aider les gestionnaires des urgences à répondre à la fois à des questions du type "Que se passerait-il si..." leur permettant de prendre les décisions les plus éclairées possibles, et à des questions plus complexes impliquant l'optimisation du système. Les gestionnaires des urgences seraient donc capables de mettre en place des stratégies et des directives de gestion pour réduire les délais de prise en charge du patient, améliorer le rendement de l'équipe soignante et améliorer, par conséquent, le service rendu au patient et sa satisfaction. Par ailleurs, nous proposons de modéliser le parcours du patient dans le service des urgences depuis son arrivée jusqu'à sa sortie par un réseau de files d'attente où les aspects aléatoires seront pris en considération.

Notre contribution dans ce travail de recherche est double :

- Développer un modèle de simulation basée sur des agents afin de permettre une exploration libre de la performance des urgences sous différents paramètres dans les situations de pré-saturation et de saturation du service d'urgence ;
- Etudier et analyser les performances du système en variant les paramètres notamment le nombre de lits disponibles et/ou l'ajout de médecins supplémentaires au moment opportun.

L'analyse de ces cas simulés est présentée pour illustrer comment les changements de ces paramètres ont un impact sur le temps de séjour du patient ainsi que les autres mesures de performance critiques.

Notre modèle a été implémenté dans la plateforme Netlogo qui est un environnement de modélisation programmable à base d'agents. Afin de procéder à des simulations avec des données

réelles, nous nous sommes intéressés au service des urgences de l'hôpital de Kherrata d'où nous avons collecté toutes les données nécessaires à l'évaluation des performances de notre modèle. Les indicateurs clés de performance considérés dans cette étude sont le délai moyen de séjour d'un patient au SU et le nombre moyen des patients évacués vers d'autres établissements. Les résultats de simulation obtenus sont très prometteurs et dénotent de l'efficacité du modèle proposé. Ils indiquent que la simulation basée sur des agents peut être utilisée par les administrateurs des urgences pour planifier les changements, localiser les points de blocage et étudier les relations non linéaires entre les différentes phases du flux de travail des urgences.

Le reste de cet article est organisé comme suit :

5.2 Travaux Antérieurs

La modélisation et la simulation axées sur les agents (Agent Based Modeling and Simulation, ABM&S) est une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes qui est efficace et bien utilisée grâce aux nombreux avantages qu'elles présentent notamment un niveau de détail accru dans les expériences basées sur la simulation, un processus d'apprentissage transparent, et la possibilité de contrôler et de modifier facilement le comportement individuel [10, 3].

Le principe de base de ABM&S n'est pas de concevoir des agents pour résoudre un problème donné mais plutôt d'agréger des règles simples de comportements individuels dans un environnement partagé pour expliquer un comportement collectif complexe émergent au niveau du groupe et qui n'est pas spécifiquement codé par le modélisateur et qui ne peut être prédit ou expliqué par les règles au niveau de l'agent. En fait, ABM&S a le potentiel de révéler un tout plus grand que la somme de ses parties [9]. C'est une sorte de modèle à micro-échelle [4] qui simule les opérations et les interactions simultanées de plusieurs agents dans une tentative de recréer et de prédire l'apparition de phénomènes émergents complexes. Un autre avantage important est que cette méthodologie permet de construire des modèles en l'absence de connaissances sur les interdépendances globales.

ABM&S est très utilisée dans divers domaines scientifiques et plus particulièrement en économie, biologie, les sciences sociales et le secteur de la santé. Bien que la simulation et la modélisation dans les établissements de santé ne soient pas nouvelles, la modélisation basée sur les agents dans ces environnements est relativement nouvelle et d'actualité. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui se focalise principalement sur la gestion des services d'urgence dans un établissement hospitalier. Dans qui suit, nous allons présenter une revue de littérature qui se limitera aux travaux scientifiques qui ont trait à ABM&S dans le secteur de la santé.

Dans [13], l'auteur a proposé une simulation à base d'agents qui modélise diverses phases du flux de travail du service d'urgence, tels que le triage, l'examen par l'infirmier, l'examen

par le résident, l'examen du médecin traitant, etc. L'objectif de ce papier est de développer et de tester un modèle de simulation basé sur des agents pour étudier les performances sous différents contextes du processus de triage et de la procédure de radiologie. Les auteurs ont montré l'impact des changements du processus de triage et du processus de radiologie sur le temps de traitement des patients et les autres mesures de performance critiques de tout le système.

Les auteurs de [16], ont présenté une modélisation et simulation à base d'agents dans un service d'urgences. Ils ont proposé une nouvelle approche, où tous les agents du personnel vont participer au processus décisionnel pour réaffecter les ressources au service des urgences, en fonction de leurs observations dans leurs sections respectives. Grâce à leur approche auto-organisationnelle, les auteurs ont pu améliorer les indicateurs clés de performance de leur système.

Dans [8], les auteurs ont proposé une approche alternative où les médecins et leurs assistants aux urgences sont modélisés comme des pseudo-agents en interaction dans une simulation à événements discrets (DES). Cette approche est alors comparée avec l'approche traditionnelle en ignorant ces interactions. Les résultats obtenus ont montré qu'avec la modélisation des interactions, il y a une meilleure exploitation des médecins et leurs assistants. Cependant, Le temps d'interaction entre le médecin et l'assistant entraîne une augmentation de la durée du séjour aux urgences et des attentes plus longues pour les lits.

Dans [7], l'auteur a montré comment les procédures et les rôles des urgences peuvent être représentés à l'aide d'organisations d'agents, et comment les différentes valeurs et habitudes des membres du personnel peuvent être représentées par des pratiques sociales. L'auteur a développé un modèle simple d'une salle d'urgence dans la plateforme de simulation, où il a généré des contraintes organisationnelles en se basant les journaux d'événements collectés dans un hôpital réel.

les auteurs de [1], ont proposé d'utiliser la méthode algorithmique de recherche exhaustive (recherche par force brute) afin d'aider les chefs des services des urgences à améliorer le fonctionnement de ses services et de trouver la configuration optimale du service et du personnel.

Dans [12], les auteurs ont développé un modèle de simulation multi-méthodes qui émule le flux réel de patients dans le service des urgences dans des conditions de pandémie COVID-19. Deux types d'agents ont été principalement modélisés : les patients et les chambres. l'étude recommande plusieurs phénomènes à étudier et à inclure dans les futurs modèles de simulation, tels qu'un plus grand nombre d'agents (médecins, infirmières, lits), des retards dus aux interac-

tions avec d'autres services de l'hôpital et des changements dans le temps de traitement en cas d'occupation plus importante.

5.3 Modèle Conceptuel du Service des Urgences

Un service d'urgence typique peut être vu comme l'interaction de plusieurs éléments tels que des médecins, des infirmiers, des techniciens, des réceptionnistes, des lits, des dispositifs médicaux qui sont tous interconnectés par des flux d'informations et des processus à savoir l'enregistrement, le triage, le diagnostic, la sortie, etc. L'objectif de toute cette organisation est de fournir des diagnostics, des traitements et des informations.

Le service d'urgence étudié dans ce travail est celui de l'établissement hospitalier de Kherrata où nous avons réalisé une étude prospective afin de collecter toutes les informations nécessaires concernant les différents processus et les données historiques du service. Grâce à l'analyse de ces données, nous avons pu déterminer la nature des distributions statistiques suivies par chaque processus et leurs paramètres correspondants.

5.3.1 Description des Processus du Service des Urgences

Le service des urgences de l'hôpital de Kherrata est composé de six zones principales : la zone d'attente, la zone de consultation, la zone de triage, la zone de réanimation, la zone d'observation et la zone de soins. Un patient arrive au service d'urgence de deux manières : par ses propres moyens ou par une ambulance. Dans le premier cas, les patients entrent dans la zone de triage où ils sont classés par l'agent réceptionniste selon la gravité de leurs états. Nous distinguons trois niveaux de gravité : gravement urgent, urgent et non urgent. Les patients gravement urgents sont plus prioritaires que les autres patients et sont directement admis dans la salle de consultation si l'un des médecins est disponible, sinon ils rejoignent la salle d'attente. De même pour les patients urgents qui sont plus prioritaires que les patients non urgents.

Quant aux patients qui arrivent aux urgences par ambulance, leur triage se fait dans l'ambulance où nous distinguons deux types de patients : patients de type 1 qui regroupent toutes les personnes ayant été victimes d'un accident et les patients de type 2 qui sont tous les autres patients évacués pour une autre cause que l'accident. Les patients de type 1 ou 2 sont directement admis dans l'une des trois zones de traitement, à savoir la zone d'observation, la zone de soins ou la zone de réanimation. Dans le cas où il n'y a plus de lits disponibles dans les deux premières zones, les patients rejoignent la salle d'attente correspondante. Cependant, pour les patients nécessitant une réanimation, s'il n'y a plus de lits disponibles ils seront évacués vers d'autres établissements hospitaliers. Les patients dans les salles d'attente sont traités selon la politique premier venu premier servi dépendant du niveau d'acuité de ces patients.

Comme le montre la Figure 5.1, les patients qui arrivent par leurs propres moyens et après consultation peuvent quitter l'hôpital si leurs états de santé ne nécessitent pas de soins

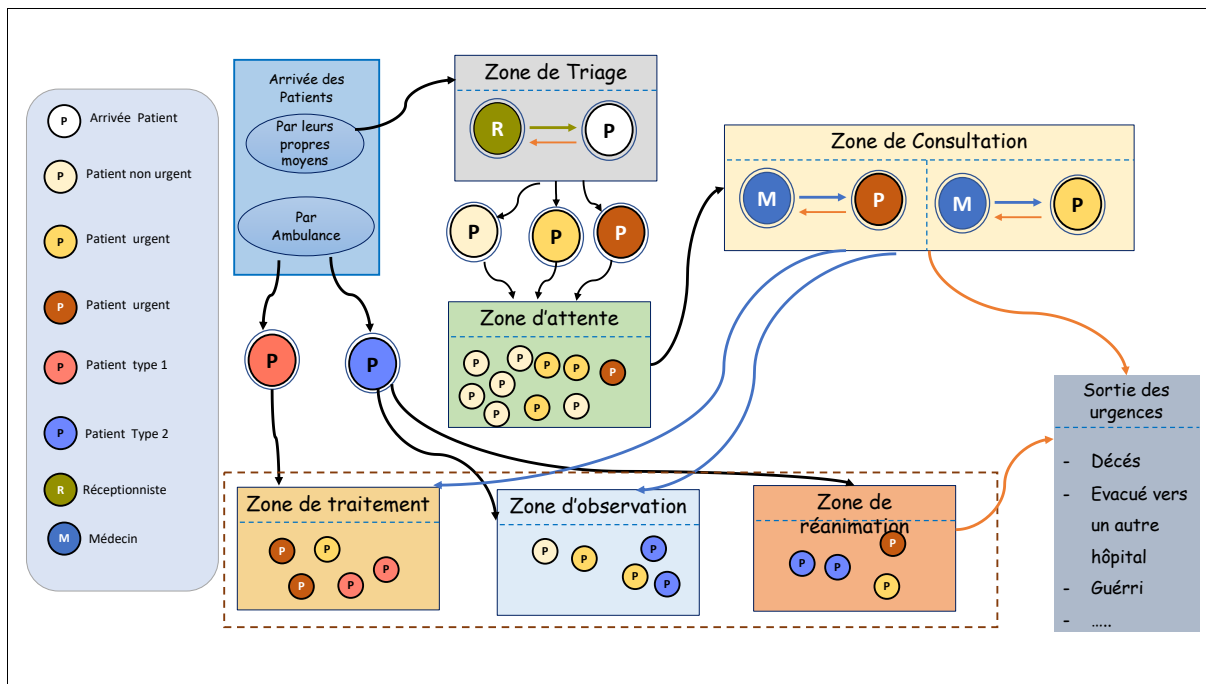


FIGURE 5.1: Flux des patients dans le service d'urgence de Kherrata

supplémentaires ou rejoindre l'une des trois zones de traitement selon la gravité de leurs cas diagnostiqués par le médecin. Il existe différentes issues possibles pour tout patient qui entre dans le SU : admission à l'hôpital, retour à la maison, transfert vers un autre hôpital ou décès.

Il est intéressant de noter que le processus décrit par la Figure 5.1 peut être vu naturellement comme un réseau de files d'attente avec un routage probabiliste.

5.3.2 Modèle de Files d'Attente

Le Service d'urgence peut être considéré comme un système où chaque patient qui franchit la porte est un inconnu qui pourrait suivre un chemin différent dicté de manière fonctionnellement non déterministe. En théorie, deux patients qui rentrent dans ce système n'auront pas deux chemins identiques. Par conséquent, du point de vue d'un patient, il reçoit un service ou attend que des ressources (personnel de santé ou ressources physiques tels que des lits ou des équipements de test) soient disponibles. Ce système tel qu'il est décrit n'est rien d'autre qu'un système d'attente qui se définit par l'arrivée séquentielle d'un flux d'événements appelés "clients" réclamant un service. Une file est naturellement créée dans le cas où l'offre est inférieure à la demande. La théorie considère généralement le temps séparant l'arrivée des clients et la durée de service comme deux variables aléatoires [11]. Après être servi, le client rejoint une autre file d'attente ou quitte le système. Notons que les systèmes d'attente sont largement utilisés dans le domaine de l'industrie et de la santé notamment les services des urgences. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à la synthèse bibliographique présentée dans [2, 5].

Dans le contexte des services d'urgence, la même méthodologie est appliquée pour modéliser les files d'attente de nombreuses ressources différentes qu'elles soient physiques ou humaines. Le SU est donc vu comme un réseau de files d'attente où le client correspond au patient et le serveur au réceptionniste, au médecin ou aux lits d'hospitalisation. Dans ce qui suit, nous décrivons les caractéristiques de notre modèle de files d'attente :

- **Processus d'arrivée des patients** : Les arrivées sont aléatoires, individuelles et indépendantes qui suivent un processus de poisson de taux λ représentant le nombre moyen de patients qui arrivent pendant une unité de temps. Nous avons pris l'heure comme unité de temps.
- **Processus de service** : Il s'agit du temps de service, représentant la période entre deux services consécutifs, et la discipline adoptée de la file d'attente.
- **Temps de service** : La durée de service de taux μ représente le nombre moyen de clients servis pendant une unité de temps, donc $1/\mu$ est le temps moyen de service d'un patient. Il s'agit donc d'une file d'attente avec un processus de Markov en entrée et en sortie.
- **Discipline de la file** : Il s'agit d'une file avec une capacité infinie de patients. La discipline de service qui se base sur la priorité des patients est imposée sachant que les patients sont répartis en plusieurs classes (gravement-urgents, urgents, non-urgents) qui définissent ainsi des ordres de priorité différents (plus prioritaire, prioritaire, non prioritaire). Cependant, l'arrivée d'un patient prioritaire pendant le service d'un patient non prioritaire ne permet pas l'interruption de ce dernier ; c'est une politique non préemptive.

A chaque étape du processus, les patients peuvent décider de poursuivre le traitement ou de quitter les urgences sans être traités. Par ailleurs, pour les patients les plus prioritaires, le modèle suppose que ces patients ne quitteraient pas le service d'urgence sans recevoir de soins vu la gravité de leur état.

La Figure 5.2 montre le réseau de files d'attente qui décrit le service d'urgence de l'hôpital de Kherrata. Les différentes moyennes λ ont été calculées sur la base des données collectées mais n'ont pas fait l'objet d'ajustements. Nous distinguons les moyennes suivantes (voir Figure 5.2) :

- λ_1 : représente le nombre moyen des patients qui arrivent avec leurs propres moyens / heure.
- λ_2 : représente le nombre moyen des patients qui arrivent par ambulance et seront transférer vers la zone des soins / heure.
- λ_3 : représente le nombre moyen des patients qui arrivent par ambulance et seront transférer vers la zone d'observation / heure.
- λ_4 : représente le nombre moyen des patients qui arrivent par ambulance et seront transférer vers la zone de réanimation / heure.

Les temps moyens de service ont été aussi calculés et peuvent être résumés comme suit :

- S_1 : représente le temps moyen du service de triage ;

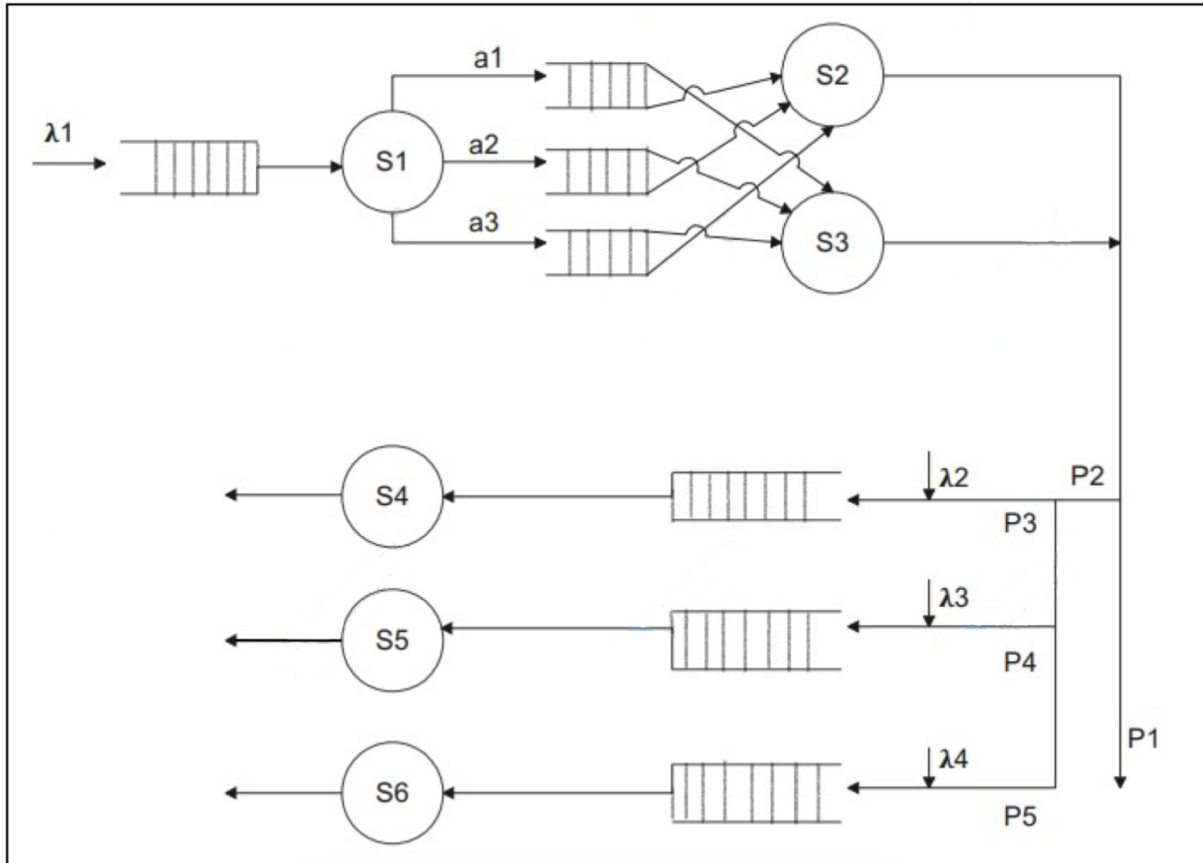


FIGURE 5.2: modèle de files d'attente des urgences de l'hôpital de Kherrata.

- $S2$: représente le temps moyen du service de consultation par le médecin 1 ;
- $S3$: représente le temps moyen du service de consultation par le médecin 2 ;
- $S4$: représente le temps moyen du service dans la zone de soins ;
- $S5$: représente le temps moyen du service dans la zone d'observation ;
- $S6$: représente le temps moyen du service dans la zone de réanimation.

Dans la Figure 5.2, $a1, a2$ et $a3$ représentent respectivement les probabilités qu'un patient soit classé dans la catégorie gravement-urgent, urgent ou non-urgent après l'étape de triage. Cependant, après la consultation, les patients sont soit libérés (avec une probabilité P) ou admis pour des traitements supplémentaires (avec une probabilité $P2$). Ces derniers peuvent être transférés vers la zone des soins (avec une probabilité $P3$), ou vers la zone d'observation (avec une probabilité $P4$) ou vers la zone de réanimation (avec une probabilité $P5$).

5.3.3 Description du Modèle Agents

Le modèle du service d'urgence défini dans ce travail est un modèle basé purement sur des agents. Ce sont des entités régies par des règles définissant le comportement des agents individuels qui peuplent le système. Grâce aux informations obtenues lors des entretiens menés avec le personnel médical et paramédical des urgences de l'hôpital de Kherrata, et après avoir défini le modèle conceptuel du service (voir Section 3), nous avons distingué trois types d'agents :

l'agent *Patient*, l'agent *Médecin*, l'agent *Réceptionniste* et l'agent *Chef de service*. Dans ce qui suit, nous détaillerons le rôle et le comportement de chacun ainsi que les interactions entre eux.

- **Agent Patient** : C'est un agent passif car sa progression dans le service d'urgence dépend largement de la disponibilité et de l'efficacité des prestataires de soins. Durant tout le processus dans les urgences, le patient alterne entre deux états : recevoir un traitement ou attendre. Le changement d'état se fait suite à son interaction avec un agent prestataire de soins. A cet effet, un agent patient qui arrive avec ses propres moyens interagit avec l'agent réceptionniste qui assure le processus de triage et classe ce patient dans l'une des trois catégories précédemment citées (non-urgent, urgent et gravement-urgents). Par contre, un agent patient qui arrive par ambulance est directement admis dans l'une des trois zones (traitement, observation, réanimation). Selon la disponibilité d'un médecin traitant et/ou d'un lit d'hospitalisation, l'agent patient peut se retrouver soit dans l'état en cours de traitement ou en attente de traitement.
- **Agent Réceptionniste** : L'agent réceptionniste est chargé d'accueillir les patients, d'interagir avec eux et de procéder à leur triage en les classant selon leurs états d'acuité dans l'une des trois catégories de priorité suscitées. Cet agent communique avec l'agent chef de service afin de lui fournir, en temps réel, toutes les informations nécessaires lui permettant de prendre des décisions bien éclairées notamment dans des situations critiques.
- **Agent Médecin** : Il est chargé de fournir un traitement aux patients, d'interagir avec eux et avec le personnel médical. Il est appelé à se déplacer aux différentes zones afin de prendre en charge tous les types de patients.
- **Agent Chef de service** : Il est responsable de la gestion du service d'urgence. Il interagit avec les autres agents du système afin de collecter les informations nécessaires lui permettant de gérer au mieux le service et de prendre les meilleures décisions en cas de problèmes. Son objectif est d'améliorer le fonctionnement du service en considérant les bons aménagements et en déterminant la configuration optimale du personnel.

Comme nous pouvons le remarquer, les modèles d'agents ne sont qu'un aspect d'un système de modélisation et de simulation basé sur les agents. Par ailleurs, le modèle d'interaction qui relie tous les agents pour former un système dynamique est un autre aspect. En effet, grâce à la communication entre les différents agents, l'information est véhiculée en temps réel aux agents décideurs leur permettant de prédire des situations critiques de pré-saturation voire de saturation du service. Ces informations sont très importantes lors du processus de prise de décisions.

5.4 Modèle d'Implémentation et Collecte de Données

Le modèle que nous avons proposé a été implémenté dans l'environnement de simulation NetLogo [14] qui est un langage de programmation et un environnement de modélisation intégrée pour le développement des systèmes multi-agents. Il est utilisé dans l'enseignement et dans le domaine professionnel sans nécessiter des connaissances en programmation pour modéliser des phénomènes liés [15, 6]. C'est un un modèle de simulation flexible qui peut être

facilement modifié et complété.

Notre objectif est d'implémenter le modèle proposé en reproduisant aussi fidèlement que possible la structure et le comportement du système réel. Pour ce faire, nous avons effectué un stage de deux mois au service d'urgence de l'hôpital de Kherrata afin de collecter minutieusement toutes les données nécessaires qui nous permettront, d'une part, de déterminer les données en entrée de notre système de simulation et d'autre part d'identifier les paramètres clés du modèle qui représentent les caractéristiques à ajuster lors des scénarios de simulation.

La Figure 5.3 montre une capture d'écran de notre modèle de simulation implémenté dans Netlogo.

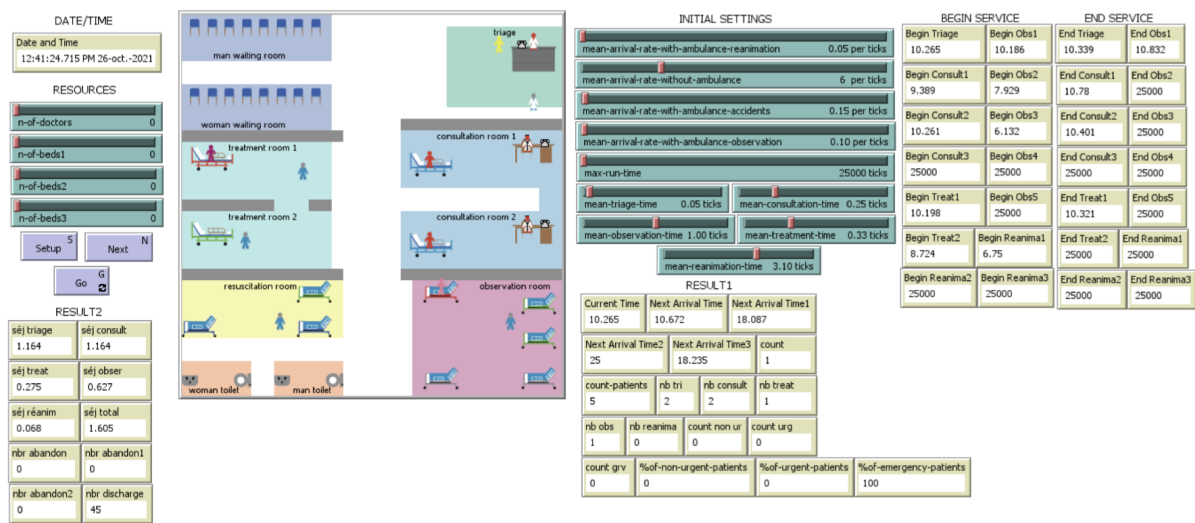


FIGURE 5.3: Implémentation de notre modèle de simulation dans Netlogo.

Collecte des données : La collecte de données représente la source de connaissances pour une meilleure compréhension du système complexe. Nous avons essayé de collecter autant de données que possible pour couvrir le comportement du système réel. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux données concernant le nombre de patients arrivés au service des urgences, le taux d'arrivée des patients, les horaires de travail des médecins et des infirmiers, la durée de chaque traitement , etc.

Nous avons obtenu les données qui couvre des informations sur notre système entre le 1er Mars 2021 et le 31 Juin 2021, en observant directement le système, en faisant des discussions et des entretiens avec le personnel du service d'urgence ainsi qu'à partir des registres des patients (registres de consultation, les registres d'accidents, etc.). La Figure 5.4 montre la base de données obtenue et enregistrée dans un classeur Excel à quatre feuilles représentant les 4 mois étudiés. Dans une autre feuille "TOTAL" on a calculé les différents λ de notre système.

Par ailleurs, nous avons aussi collecté les données concernant les taux de services et la durée de traitement de chaque zone, comme le montre la Figure 5.5.

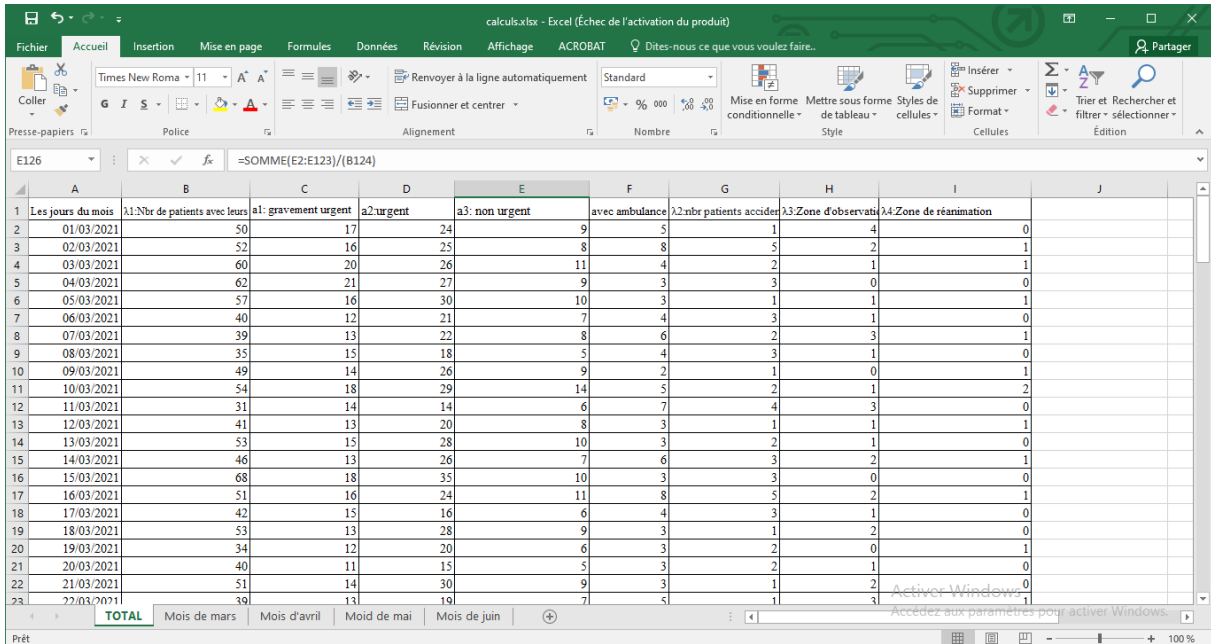


FIGURE 5.4: Données collectées sur les taux d'arrivées des patients.

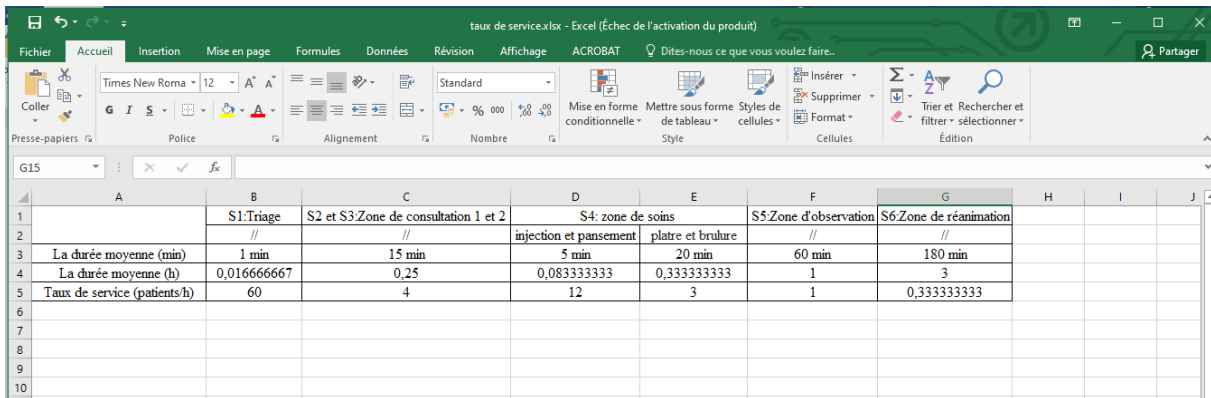


FIGURE 5.5: Données collectées sur les taux données de services des différentes zones.

A partir des données recueillies ainsi que les informations données par le personnel de l'hôpital, nous avons constaté que : 95,5% des patients arrivant au service des urgences avec leurs propres moyens, les 4.5% restant pour les patients qui arrivent soit par ambulances ou pompiers. Parmi les patients qui arrivent au S.U, 27% sont les patients gravement urgents, 54% sont les patients urgents, et 19% sont les patients non urgents.

5.5 Evaluation et Résultats

La vérification et la validation du modèle de simulation sont des étapes qui permettent d'évaluer sa robustesse et de vérifier sa capacité à reproduire les données observées dans le monde réel avant son utilisation pour le processus d'amélioration et d'optimisation. À cette fin, nous avons vérifié auprès des administrateurs que le modèle de simulation reflète la réalité avec un haut niveau de précision. Ensuite, nous nous sommes référés à trois indicateurs de perfor-

mances simulées pour nous permettre de comparer la solution actuelle avec les sorties obtenues après ajustement des paramètres du système.

5.5.1 Indicateurs Clés de Performance

Les résultats de simulation seront comparés avec les données du système réel afin d'évaluer la performance de notre système, en se basant sur les indicateurs clés de performance. Notre principal objectif est d'augmenter le nombre de patients traités ce qui revient à diminuer le temps moyen de séjour d'un patient ainsi que le nombre moyen des évacuations vers d'autres établissements de santé. Les indicateurs clés de performance de notre modèle sont alors :

- Délai moyen de séjour d'un patient au service.
- Nombre moyen des patients évacués vers d'autres établissements de santé.

5.5.2 Paramètres du Modèle

Dans notre modèle de simulation, les paramètres de notre système sont les différentes variables représentées par des curseurs Netlogo dans l'interface utilisateur graphique. Nous distinguons deux types de paramètres :

- Les paramètres concernant les temps moyens d'arrivée des différents types de patients ainsi que les temps moyens de service et le temps maximal pour la simulation. Les valeurs de ces paramètres seront variées de sorte à simuler les différents scénarios notamment lorsque le service d'urgence travaille dans des conditions normales (flux modéré des patients) ou des scénarios de crise ou de saturation, c'est-à-dire lorsque le service ne peut plus répondre à la demande (flux trop élevé des patients et/ou un manque de ressources). Ce type de paramètres est illustré par la Figure 5.6.
- Les paramètres concernant les ressources dont la variation des valeurs peut influencer positivement ou négativement la performance du système sous certaines contraintes opérationnelles. Dans notre cas, il s'agit du nombre de médecins en service et le nombre de lits d'hospitalisation disponibles pour les différentes zones du système. La Figure 5.7 montre ces paramètres comme des curseurs Netlogo dans l'interface graphique de l'utilisateur.

5.5.3 Amélioration de la Performance du Système

Afin d'apporter une aide précieuse aux décideurs notamment en situation de crise, nous allons procéder à la simulation de plusieurs scénarios où les résultats obtenus seront discutés par rapport aux différentes valeurs des paramètres et aux indicateurs de performance préalablement définis.

Méthodologie de Prise de Décision

Les outils d'aide à la décision sont utilisés dans différentes études liées à la simulation dans les services des urgences. La proposition de prise de décision par le chef de service a été utilisée pour réorganiser les urgences en fonction de différents critères. Dans ce processus, le nombre de médecins change selon le besoin mais leurs fonctions restent inchangées.

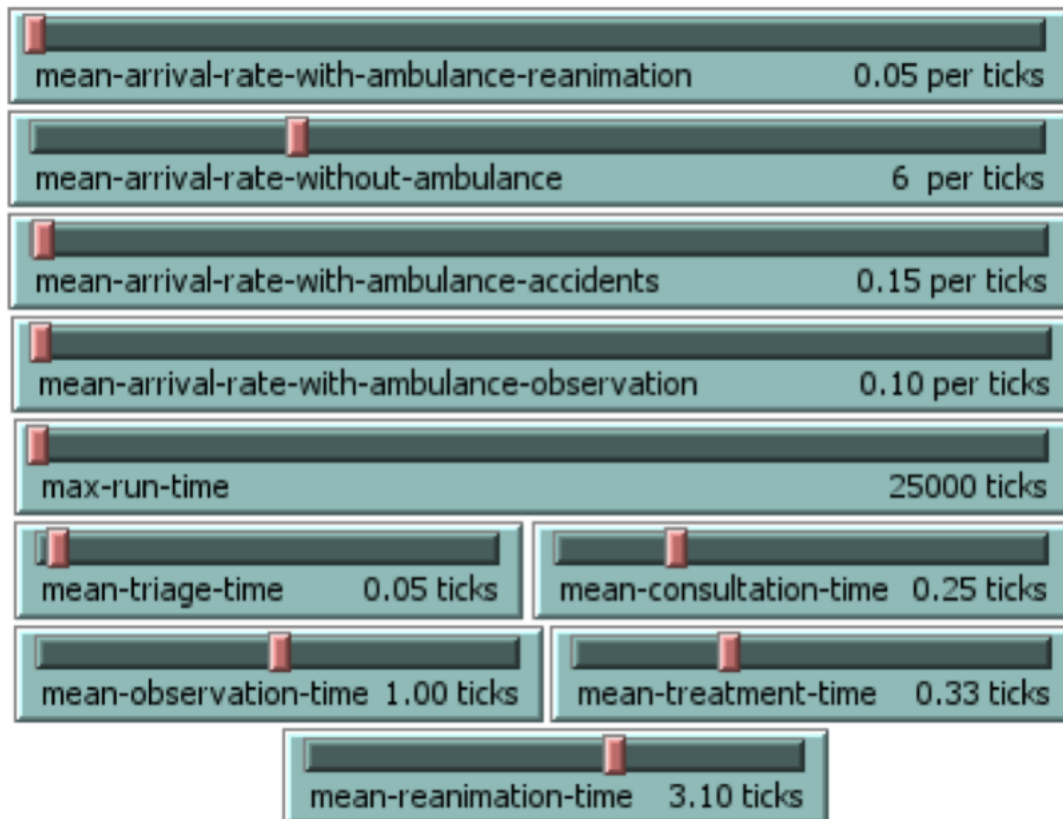


FIGURE 5.6: Paramètres concernant les différents temps moyens du système modélisé.

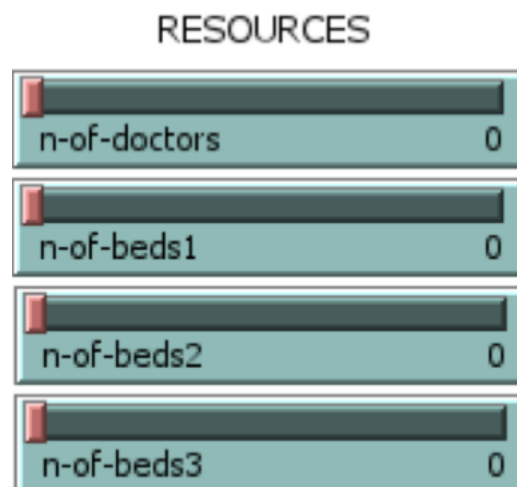


FIGURE 5.7: Paramètres concernant le nombre de ressources disponibles.

Communication entre les Agents du système

L'une des caractéristiques de la simulation à base d'agents (ABS) est la possibilité de faire communiquer les agents. Dans notre modèle, nous avons utilisé la communication 1-à-1, entre le chef de service et la réceptionniste pendant le processus de prise de décision. En cas de pré-saturation des urgences, la réceptionniste informe le chef de service en lui envoyant un message "attention pré-saturation", afin qu'il puisse prendre une décision pour améliorer la performance du système. Le chef de service peut décider soit de faire appel à un médecin disponible d'un

autre service, ou bien de faire évacuer les patients non urgents. En cas de saturation des urgences, la réceptionniste informe le chef de service en lui envoyant un message "attention saturation", afin qu'il puisse prendre une décision pour améliorer la performance du système. Le chef de service peut décider soit de faire appel à un médecin disponible d'un autre service ou de faire une évacuation totale des patients.

Les Scénarios Proposés

Afin d'évaluer les performances de notre système, en se basant sur les indicateurs cités précédemment, de nombreuses exécutions de simulation selon différents scénarios ont été conduites.

- **Scénario 1** : en cas de pré-saturation des urgences, l'agent réceptionniste envoie un message pour informer l'agent chef de service, qui devrait alors prendre une décision. Il va décider soit :
 - De faire appel à un troisième médecin disponible d'un autre service, ou
 - D'envoyer un message à la réceptionniste et lui demander d'évacuer les patients non urgents et de n'accepter dans le service que les patients gravement urgents et urgents.
- **Scénario 2** : en cas de saturation des urgences, le chef de service va décider de faire une évacuation totale des patients, en envoyant un message à la réceptionniste et lui demander de n'accepter aucun patient. Il peut faire aussi appel à un troisième médecin disponible d'un autre service pour la consultation.
- **Scénario 3** : Dans ce scénario, nous proposons de rajouter un quatrième lit dans la zone de réanimation, dans le but de réduire le nombre moyen des patients évacuées.
- **Scénario 4** : Dans ce scénario, nous proposons de combiner les trois scénarios précédents afin de réduire la durée de séjour moyenne ainsi que le nombre de patients évacuer.

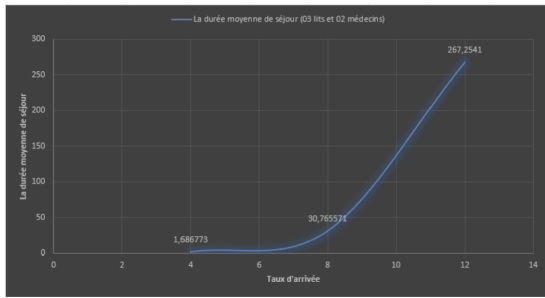
5.5.4 Résultats de la Simulation

Pour recueillir les résultats statistiques à partir de notre modèle, nous avons utilisé un outil de Netlogo appelé *BehaviorSpace*, cet outil exécutera automatiquement le modèle plusieurs fois avec plusieurs paramètres différents et collectera les résultats dans un fichier *csv*. Nous avons fait plusieurs expériences différentes, pour chaque valeur de λ (4, 8 et 12), dans chaque expérience nous avons recueilli les résultats de 50 répétitions.

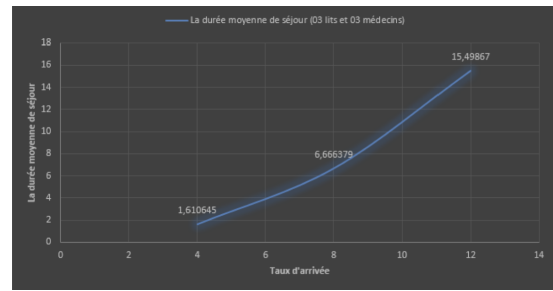
Durée Moyenne de Séjour

Les statistiques obtenues nous permettent de vérifier que la durée moyenne de séjour des patients augmente avec l'augmentation des taux d'arrivées des patients avec leurs propres moyens (λ). La Figure 5.8 illustre les résultats de la simulation de la durée moyenne de séjour d'un patient dans le service d'urgence de Kherrata avec différentes configurations. Les Figures 5.8a, 5.8b et 5.8c illustrent respectivement les résultats avec les configurations : (03 lits, 02 médecins), (03 lits, 03 médecins) et (04 lits, 03 médecins).

D'après les graphes de la Figure 5.8, nous remarquons que la durée moyenne de séjour des patients dépend amplement du taux d'arrivée λ . En effet, quand $\lambda = 12$ la durée moyenne de



03 lits et 02 médecins



03 lits et 03 médecins



04 lits et 03 médecins

FIGURE 5.8: Durée moyenne de séjour d'un patient dans le SU de Kherrata.

séjour est plus élevé que lorsque $\lambda = 8$. De même, cette durée est d'autant plus élevée avec $\lambda = 8$ que quand $\lambda = 4$.

Nous déduisons ainsi, que la durée moyenne de séjour des patients augmente avec l'augmentation des taux d'arrivées.

Nombre Moyen des Patients Évacués vers d'Autres Établissements Hospitaliers

Dans cette section, Nous allons présenter les résultats de la simulation obtenus pour le nombre moyen des patients évacués vers d'autres établissements hospitaliers. Cette situation survient dans le cas de pré-saturation et de saturation du service d'urgence.

durant les différentes simulations, nous avons fait varier les taux d'arrivée en affectant à λ trois valeurs distinctes, à savoir 4, 8 et 12. Le but est de reproduire les différentes situations que pourrait vivre le service d'urgence. De plus, nous avons fait varier les paramètres ressources du système, à savoir le nombre de lits et de médecins en service afin de simuler les différents scénarios proposés.

La Figure 5.9 illustre les résultats obtenus du nombre moyen des évacuations selon différentes configurations. Dans les Figures 5.9a, 5.9b et 5.9c tracent respectivement ces résultats selon les configurations (03 lits, 02 médecins), (04 lits, 02 médecins) et (04 lits, 03 médecins). Comme nous pouvons le remarquer, le nombre moyen des évacuations augmente avec l'augmentation du taux d'arrivée des patients. En effet, quand $\lambda = 12$ le nombre moyen des évacuations est plus élevé que lorsque $\lambda = 8$. De même, ce nombre est d'autant plus élevé avec $\lambda = 8$ que quand $\lambda = 4$.

Par ailleurs, nous remarquons que le nombre de lits d'hospitalisation disponibles ainsi que le nombre de médecins en service ont une grande influence sur les résultats obtenus. En

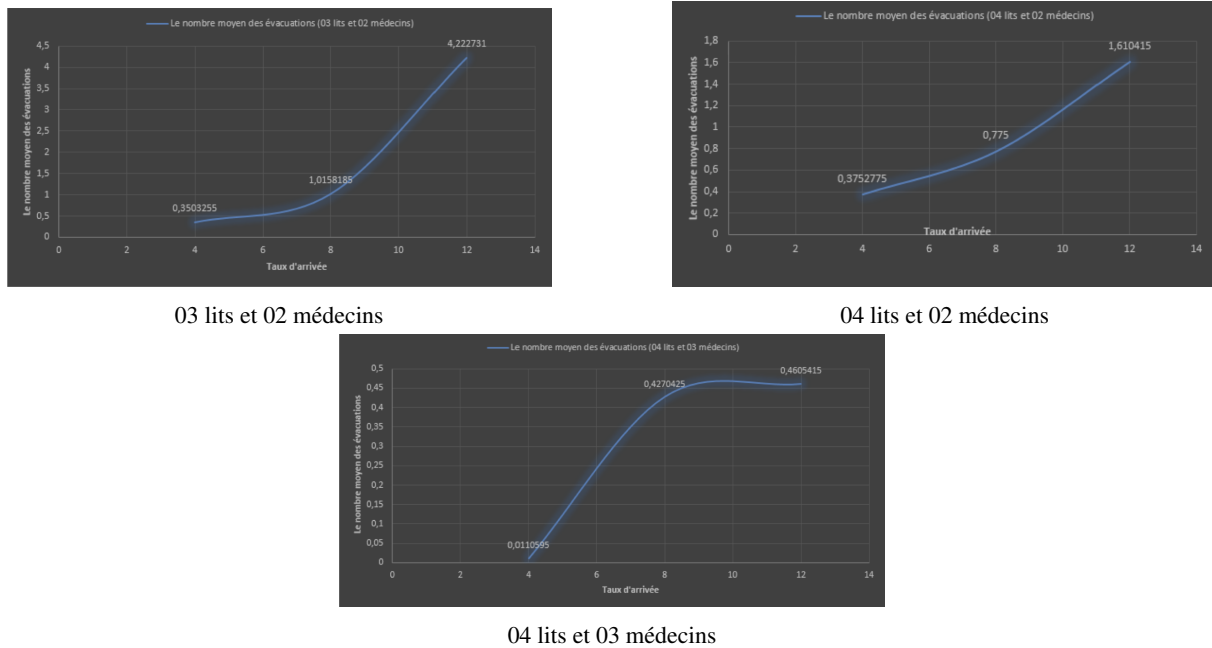


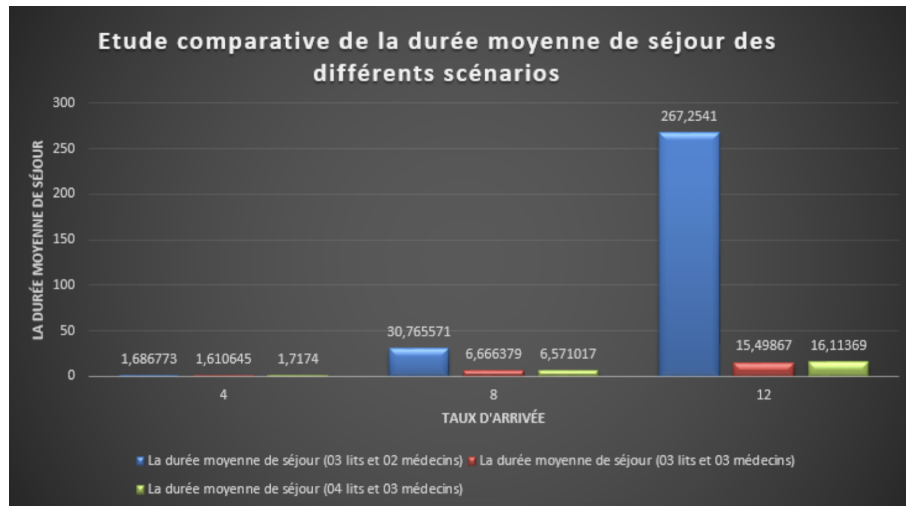
FIGURE 5.9: Nombre moyen des patients évacués vers d'autres établissements hospitaliers.

effet, en ajoutant un lit de réanimation, le nombre moyen des patients évacués diminue. Par contre, l'ajout d'un troisième médecin de manière temporaire n'affecte pas significativement le nombre moyen des évacuations.

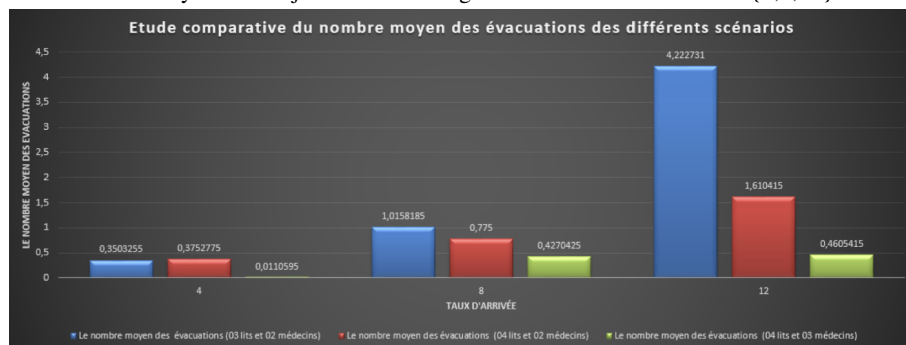
- **Etude Comparative :** Nous avons effectué une étude comparative afin de tester la performance des scénarios proposés. Pour ce faire, nous avons effectué des comparaisons des résultats de simulation concernant la durée moyenne de séjour et le nombre moyen des évacuations en fonction du taux d'arrivée. La Figure 5.10 illustre les résultats obtenus de la simulation des différents scénarios en faisant varier la valeur du taux d'arrivée λ concernant le temps de séjour (voir Figure 5.10a) et le nombre moyen des évacuations des patients (voir Figure 5.10b). Nous avons noté que les scénarios 1 et 2 ont contribué d'une manière significative à la diminution du temps moyen de séjour des patients, surtout lorsque λ dépasse 8 patients par heures. Cependant, nous avons remarqué qu'après l'exécution du scénario 3, le nombre moyen des évacuations a diminué par l'ajout d'un lit de réanimation. La combinaison des trois scénarios dans le scénario 4 a donné de meilleurs résultats à propos de la durée moyenne de séjour et le nombre moyen des évacuations.

5.6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un système d'aide à la décision pour les gestionnaires des urgences de l'hôpital de Kherrata. L'objectif est d'améliorer le fonctionnement de leur service ainsi que la qualité et l'efficacité des soins fournis. Pour ce faire, nous avons proposé une approche basée sur la combinaison de la modélisation et la simulation à base d'agents (ABMS). Notre modèle de simulation à base d'agents a été implémenté et vérifié dans un environnement



Durée moyenne de séjour selon 3 configurations différentes avec $\lambda = \{4,8,12\}$.



Nombre moyen des évacuations selon 3 configurations différentes avec $\lambda = \{4,8,12\}$.

FIGURE 5.10: Résultats des scénarios proposés.

de modélisation programmable multi-agent, NetLogo. Les expériences ont été réalisées à l'aide des simulations parallèles avec différents paramètres et deux indices de performance différents à savoir le temps moyen de séjour et le nombre moyen des évacuations.

Les résultats des simulation des différents scénarios que nous avons proposés, ont montré que le temps de séjour moyen et le nombre moyen des évacuations ont été considérablement améliorées. Notons que la simulation à base d'agents proposée et la méthode de prise de décision peuvent être facilement mises en œuvre dans n'importe quel service d'urgence après quelques adaptations.

Comme perspective, nous proposons d'améliorer notre outil d'aide à la décision en exploitant les avantages qu'offrent les SMA, pour modéliser des entités pouvant interagir et communiquer dans un environnement bien défini, offrant la possibilité d'étudier la dynamique des systèmes complexes.

Références

1. Eduardo Cabrera, Manel Taboada, Ma Luisa Iglesias, Francisco Epelde, and Emilio Luque. Optimization of healthcare emergency departments by agent-based simulation. *Procedia computer science*, 4 :1880–1889, 2011.
2. Amir Elalouf and Guy Wachtel. Queuing problems in emergency departments : a review of practical approaches and research methodologies. In *Operations Research Forum*, volume 3, pages 1–46. Springer, 2022.

3. Marcia R Friesen and Robert D McLeod. A survey of agent-based modeling of hospital environments. IEEE Access, 2 :227–233, 2014.
4. Leif Gustafsson and Mikael Sternad. Consistent micro, macro and state-based population modelling. Mathematical biosciences, 225(2) :94–107, 2010.
5. Joshua W Joseph. Queuing theory and modeling emergency department resource utilization. Emergency Medicine Clinics, 38(3) :563–572, 2020.
6. Daniel Kornhauser, William Rand, and Uri Wilensky. Visualization tools for agent-based modeling in netlogo. Proceedings of Agent2007, pages 15–17, 2007.
7. John Bruntse Larsen, J Villadsen, N Carstens, CK Holst, N Gierasimczuk, M Rosendahl, and J Dix. Hospital Staff Planning with Multi-Agent Goals. PhD thesis, PhD thesis, Department of Applied Mathematics and Computer Science..., 2019.
8. Morgan E Lim, Andrew Worster, Ron Goeree, and Jean-Éric Tarride. Simulating an emergency department : the importance of modeling the interactions between physicians and delegates in a discrete event simulation. BMC medical informatics and decision making, 13(1) :1–11, 2013.
9. Charles M Macal. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. Journal of Simulation, 10(2) :144–156, 2016.
10. Muaz Niazi and Amir Hussain. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models : a visual survey. Scientometrics, 89(2) :479–499, 2011.
11. Philippe Robert. Réseaux et files d’attente : méthodes probabilistes, volume 35. Springer Science & Business Media, 2000.
12. Gaute Tarning, Eric Christian Brun, and Idriss El-Thalji. Modeling patient flow in an emergency department under covid-19 pandemic conditions : A hybrid modeling approach. In Healthcare, volume 10, page 840. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022.
13. Lu Wang. An agent-based simulation for workflow in emergency department. In 2009 Systems and Information Engineering Design Symposium, pages 19–23. IEEE, 2009.
14. U Wilensky. Netlogo< http ://ccl. northwestern. edu/netlogo/>, center for connected learning and computer-based modeling, northwestern university. Evanston, IL, 1999.
15. Uri Wilensky and William Rand. An introduction to agent-based modeling : modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo. Mit Press, 2015.
16. M Yousefi and RPM Ferreira. An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department. Brazilian journal of medical and biological research, 50, 2017.