

# Modélisation et simulation multi-agent de la propagation d'une épidémie de choléra: cas de la ville de Ngaoundéré

Gabriel Guilsou Kolaye, Clive Mbugue, J-C Kamgang, S. Bowong

## ► To cite this version:

Gabriel Guilsou Kolaye, Clive Mbugue, J-C Kamgang, S. Bowong. Modélisation et simulation multi-agent de la propagation d'une épidémie de choléra: cas de la ville de Ngaoundéré. 2020. hal-02460288

**HAL Id: hal-02460288**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02460288>**

Preprint submitted on 30 Jan 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation et simulation multi-agent de la propagation d'une épidémie de choléra: cas de la ville de Ngaoundéré

Gabriel G. Kolaye<sup>1</sup>, Clive E. Mbuge<sup>2</sup> J-C Kamgang<sup>3</sup>, S. Bowong<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Département de Mathématiques et Informatique, Faculté des Sciences  
Université de Maroua, BP 46 Maroua, Cameroun  
kolayegg@gmail.com

<sup>2</sup> Département de Mathématiques et Informatique, Faculté des Sciences  
Université de Yaoundé, BP 337 Yaoundé, Cameroun  
clive.epah@gmail.com

<sup>3</sup> Département de Mathématiques et Informatique, ENSAI  
Université de Ngaoundéré, BP 455 Ngaoundéré, Cameroun  
jckamgang@gmail.com

<sup>4</sup> Département de Mathématiques et Informatique, Faculté des Sciences  
Université de Douala, BP 24157 Douala, Cameroun  
sbowong@gmail.com

<sup>5</sup> UMI 209 IRD/UPMC UMMISCO, Bondy-France and Project GRIMCAPE, The African Center of Excellence in Information and Communication, Technologies (CETIC), University of Yaounde 1, Cameroon

**RÉSUMÉ.** Dans ce travail nous avons utilisé le concept de la modélisation et de la simulation multi-agent pour développer un simulateur qui décrit la dynamique d'une épidémie de choléra. Nous l'avons développé dans la plate-forme multi-agent GAMA <sup>1</sup> en y intégrant le système d'information géographique de la ville de Ngaoundéré comme environnement des agents. Ensuite quelques simulations y ont été exécutées sur un ensemble de jeux de données relatif à la sensibilisation et l'assainissement. Les résultats obtenus à l'issue de ces simulations nous donne de suggérer une stratégie de contrôle optimal axées sur trois points essentiels portant sur l'identification rapide des infectés, la sensibilisation immédiate des populations et surtout de la basse classe et l'assainissement rapide des zones à risque.

**ABSTRACT.** In this work we used the concept of multi-agent modelisation and simulation to conceive one multi-agent model who describe dynamic of cholera epidemic. we implement this model in the multi-agent plate-form GAMA by making use geographical information system of Ngaoundere town as environment. The results obtained suggest an optimal control strategy focused on three essential points relating to the rapid identification of the infected, the immediate awareness of the populations and especially poor people and the rapid sanitation of risk areas.

**MOTS-CLÉS :** Choléra, Multi-agent, Système d'Information Géographique

**KEYWORDS :** Cholera, Multi-agent, Geographic Information System

<sup>1</sup>. is a modeling and simulation development environment for building spatially explicit agent-based simulations

---

## 1. Introduction

Le choléra est une infection intestinale aiguë due à une bactérie appelée le *Vibrio cholerae*. Il se transmet par voie directe fécale-orale ou par l'ingestion d'eau et d'aliments contaminés [1]. La forme la plus grave de la maladie se caractérise par l'apparition soudaine d'une diarrhée aqueuse aiguë qui peut entraîner une déshydratation sévère et une insuffisance rénale. En l'absence de traitement [2], elle peut entraîner la mort entre 12 et 48 heures. La période d'incubation est très courte, elle varie de deux heures à cinq jours et cela accroît le risque de flambées explosives car le nombre de cas peut augmenter très rapidement [2]. Environ 80 % des sujets contaminés présentent la forme bénigne, mais le vibron reste présent dans les selles pendant sept à quatorze jours et ensuite il est évacué dans l'environnement, où il peut contaminer d'autres personnes [1]. C'est une maladie très virulente qui touche aussi bien les enfants que les adultes. Contrairement à d'autres maladies diarrhéiques [1], elle peut tuer un adulte en quelques heures. Les sujets ayant une faible immunité, les enfants souffrant de malnutrition et les personnes vivant avec le VIH sont davantage exposés au risque de mort en cas d'infection [2].

Selon la figure ci-dessous, le choléra est endémique dans de nombreux pays à faible revenu. De nouvelles poussées épidémiques du choléra peuvent avoir lieu dans les régions où les approvisionnements en eau potable, les conditions sanitaires et la salubrité des aliments sont inadéquats [3].

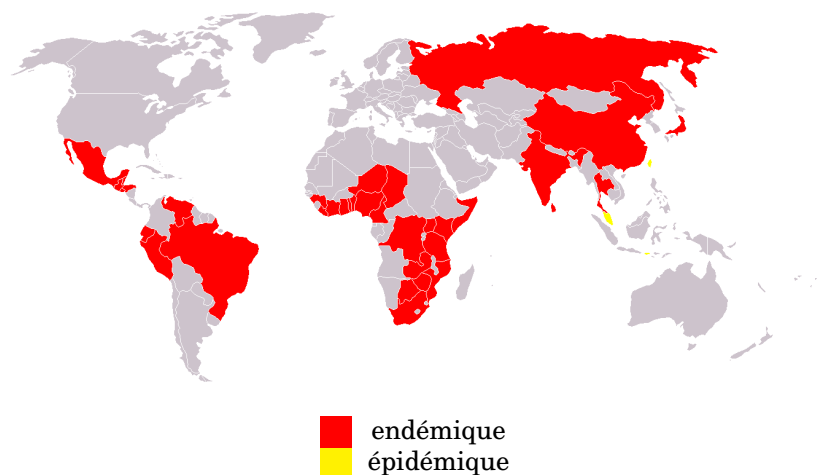


Figure 1: Répartition géographique mondiale du choléra [3].

C'est en Afrique où la situation est la plus préoccupante aujourd'hui. Au Cameroun [6] dans un rapport rendu public le 15 septembre 2010 par le ministère de la santé publique, il ressortait que l'épidémie de 2010 dont le foyer se trouve au Nord Cameroun avait tué 421 personnes, dont 420 dans le septentrion, plus un décès enregistré dans la ville de Douala. Depuis lors le choléra resurgit chaque année dans le Cameroun avec des flambées épidémiques qui sont plus ou moins maîtrisées.

En ce début d'année 2020, la région du Littoral (Cameroun) a de nouveau été victime du choléra malgré les efforts du gouvernement pour éradiquer totalement cette épidémie. Cette fois 4 localités sont concernées Manoka, Nylon et Boko. Le 4 janvier 2020, 2 cas positifs de la maladie caractérisée par une diarrhée aqueuse ont été signalés à l'hôpital du district de Nylon à Douala. Le 13 Janvier, 2 cas ont été signalés à l'hôpital du district de Manoka et un décès a été enregistré. Le 14 janvier 2020, deux autres cas de choléra ont été signalés dans le même hôpital par la délégation régionale du Littoral du ministère de la Santé publique [4].

Dans la panoplie des outils développés pour prévenir ou décrire cette maladie, la mathématique et l'informatique ne sont pas en reste. Plusieurs modèles mathématiques ont été développés afin de mieux élucider la maladie [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Néanmoins plusieurs facteurs socio-culturelle déterminants (age, culture, religion, niveau de vie...) dans la propagation du choléra ne sont pas généralement intégrés dans ces modèles mathématiques. En effet, la nature qualitative de ces facteurs les rend difficilement intégrables dans les modèles compartimentaux basés essentiellement sur les équations différentielles ordinaires ou les équations aux dérivés partielles.

Pourtant la modélisation et la simulation multi-agent apporte une solution radicalement nouvelle au concept de la modélisation en offrant la possibilité de représenter directement les individus avec leurs attributs qualitatifs et quantitatifs, leurs comportements et leurs interactions (qui sont les résultats des infections), d'intégrer facilement la dynamique spatiale (déplacement lié à l'activité) qui influence sur le risque d'infection et les SIG (Système d'Information Géographique) comme environnement de simulation pour plus de réalisme. C'est la raison pour laquelle nous avons opté d'aborder cette approche pour simuler la propagation d'une épidémie de choléra dans un environnement basé sur un système d'information géographique[5].

Afin de décrire notre simulateur, nous présenterons principalement notre environnement de simulation et les divers agents et objets qui y sont manipulés tout en décrivant aussi leurs propriétés et la dynamique auquel ils sont soumis. Nous finirons par présenter les résultats de quelques exemples de simulation.

---

## 2. Présentation de la conception du simulateur

### 2.1. L'environnement de simulation

L'environnement de simulation désigne le milieu explicite dans lequel évolue la simulation. Il peut être abstrait ou basé sur un SIG. Dans notre modèle, l'environnement est basé sur un SIG de la ville de Ngaoundéré. Nous avons choisi cette région comme notre zone d'étude. A partir d'une image satellitaire de cette zone, nous avons utilisé le logiciel MapInfo pour cartographier notre zone d'étude. Il faut noter que c'est à niveau que le travail le plus harassant de la cartographie est fait; celui de la vectorisation de toutes les couches nécessaires (les couches maisons, les couches d'eaux, les couches de végétation etc).

A cause de la taille de notre écran qui ne nous permet pas de présenter la carte obtenue dans toute sa grandeur tout en gardant sa perceptibilité, nous ne présenterons qu'une partie de cette carte.

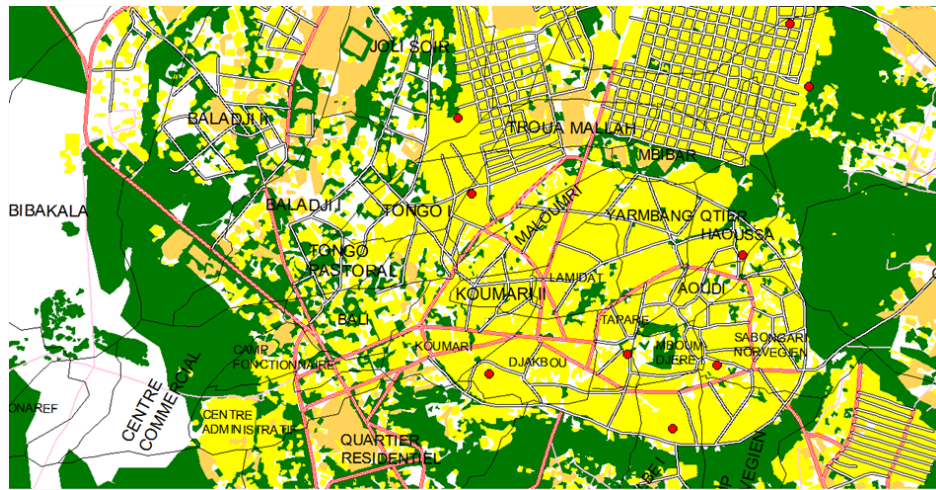


Figure 2: Image partielle du SIG

Après ce travail, nous transférons la carte obtenue dans le logiciel OpenJUMP (logiciel libre) pour y attribuer à chaque objet de la carte des attributs et les valeurs correspondantes et améliorer l'affichage des ces objets : à l'issue de travail on obtient une base de données permettant de stocker, consulter et manipuler les objets représentés sur la carte. De là nous obtenons donc notre SIG.

Le SIG ainsi obtenu, il ne nous reste qu'à le déclarer dans GAMA comme notre environnement de simulation. Vu la grandeur graphique du SIG et les manipulations qui y seront faites pendant la programmation, nous avons opté de réduire l'environnement à un ensemble quarte zones:

- les bidonvilles de la ville de Ngaoundéré: cette zone regroupe les quartiers Yourbang, Haoussa, Djakbou etc,
- les bas-fonds hydromorphes: ce sont les habitations villageoises, elles environnent la ville,
- les habitations récentes et modestes: les quartiers Sabongari et Madagascar.
- les camps bourgeois : le quartier résidentiel, le centre administratif et le camp fonctionnaire.

Après cette délimitation, on obtient l'environnement suivant dans la plateforme GAMA:

## 2.2. Les agents du modèle

L'environnement et les agents sont les principaux éléments d'un modèle. A partir de ces derniers, on peut concevoir des comportements et des interactions éventuelles entre eux pour modéliser un phénomène précis. Les

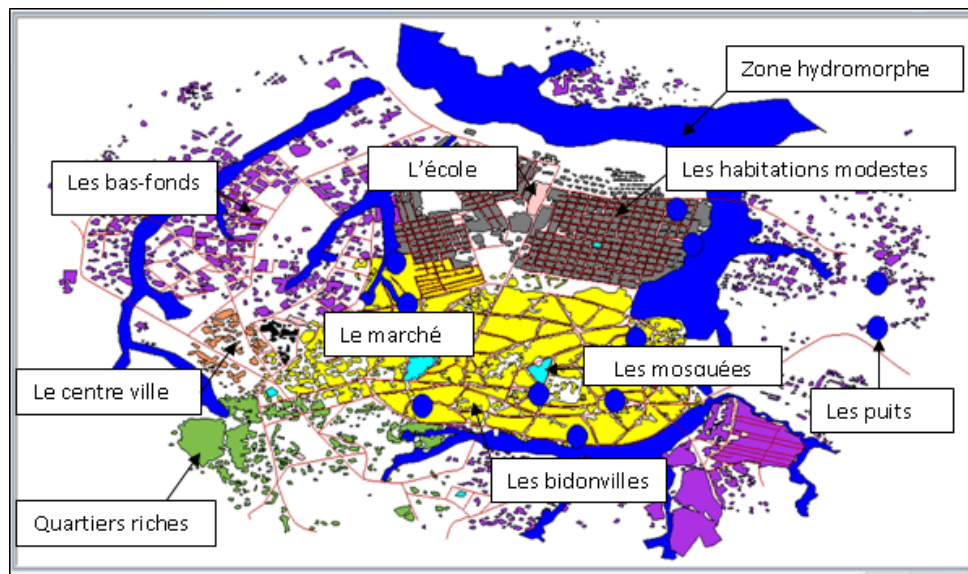


Figure 3: Environnement de simulation

agents sont regroupés en espèces (ou entités) qui diffèrent entre eux par leurs attributs et leurs comportements. Le choix des divers types d'espèces utilisées dans un modèle dépend du phénomène à modéliser. Rappelons que chaque région, en fonction de son climat, des cultures et des conditions de vie des individus qui y vivent peut afficher un ou plusieurs modes pratiques et prépondérants de transmission du choléra qui lui est propre. En Europe par exemple, Le mode de contamination est essentiellement basé sur la consommation des aliments crus et contaminés provenant de la mer [15]. Le fait de considérer toutes les couches sociales de la population de Ngaoundéré avec sa diversité culturelle nous oblige à modéliser la plupart des voies de transmission. Pour le faire nous avons considéré ces diverses espèces objets et agents: les individus, les maisons, les quartiers, les puits, zones hydromorphes, les mosquées, les écoles, les marchés, les entreprises, le centre de contrôles du choléra et les bouillards. Nous donnerons dans la suite une brève description des agents individus et puits.

### 2.2.1. Les individus

Ils représentent le centre d'intérêt de notre modélisation et sont des agents visibles et mobiles dans l'environnement. Les interactions entre ces agents et l'environnement constituent le mécanisme par lequel les infections se produisent. Ils disposent d'un ensemble d'attributs dont nous présenterons les plus importants:

- 1) **le genre**: il permet de savoir si l'individu en question est un homme adulte, une femme adulte, un garçon ou une fille.
- 2) **la religion** : par elle, nous désignons les musulmans, les chrétiens et les païens.
- 3) **la classe sociale**: elle désigne l'appartenance à une des couches sociales suivantes : les prolétaires, les Hommes de la classe moyenne, les bour-



geois et les villageois.

4) **la fonction**: elle désigne l'activité principale d'un agent individu et a sept valeurs possibles: cadre, subalterne, commerçant, cultivateur, ménagère, domestique et écolier.

5) **la guérison**: il permet d'enregistrer les guérisons, ces guéris acquièrent une immunité médicamenteuse et redeviennent susceptible 8 mois après.

6) **la couleur** : Elle permet de reconnaître visiblement si un individu est susceptible, incubant, s'il manifeste la forme grave, s'il manifeste la forme bénigne ou s'il est immunisé. Le tableau ci-dessous présente les différentes couleurs de ces agents individus et leur connotation respective.

7) **la susceptibilité**: elle permet de savoir si un personne est susceptible.

8) **l'incubation**: elle permet de savoir si un individu est incubant.

9) **le type d'infection** : elle permet de connaître le type d'infection qu'un individu développe.

10) **le traitement** : il permet de savoir si un individu est hospitalisé.

11) **le décès** : il permet de savoir si un individu est décédé. En effet quand un individu décède de la maladie, bien qu'il sera supprimé de l'environnement, nous enregistrons néanmoins son décès par cet attribut.

## 2.2.2. Les puits

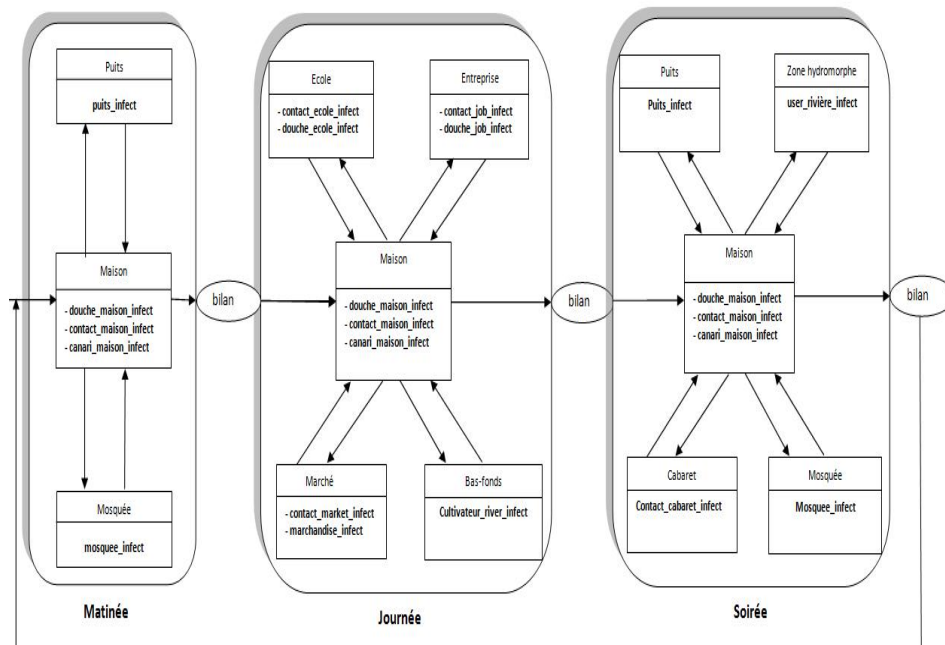
Ils sont majoritairement localisés dans des zones d'habitations précaires. Ce sont des sites d'infection et par conséquent ils devront disposer d'un attribut qui fait état du risque d'infection dans leur entourage. Pour appréhender visiblement ce risque pendant une simulation, nous avons utilisé la saturation de la couleur rouge pour signifier le niveau du risque d'infection à un puit.

## 2.3. Dynamique globale du système

Le schéma ci-dessous est une description globale de la dynamique du système. Cette présentation nous permet d'avoir une vue globale sur le fonctionnement et la structure du système. Le système évolue de manière cyclique. Chaque cycle correspond à un jour, et chaque jour est divisé en trois parties : la matinée, la journée et la soirée. Avant de passer à chaque partie du jour, tous les individus exécutent d'abord l'action<sup>1</sup> "bilan" ceci pour passer d'un statut à un autre si la condition de passage est vérifiée. Les flèches représentent le sens de déplacement des Hommes vers les différents sites (qui sont en occurrence représentés par des tableaux) pour y exécuter les actions d'infections relatifs à ces milieux. Ces actions peuvent conduire à l'infection de l'individu qui l'exécute ou à l'infection d'un individu quelconque qui s'y trouve avec lui ou à l'infection d'une eau quelconque (cette eau pourrait être d'un puits, d'une rivière, d'un bouillard, d'une douche, d'un canari ou d'une marchandise) ou à aucune infection. L'idée étant de simuler les activités quotidiennes de la population tout en s'intéressant uniquement sur des actions qui con-

---

1. est une suite d'instructions exécutées par chaque agent à chaque un cycle d'exécution



tribuent à la propagation de l'épidémie. A titre d'illustration nous décrivons *contact\_ecole\_infect* exécutée par les apprenants à l'école.

#### Algorithme de l'action *contact\_ecole\_infect*

Si tu es infecté :

- génère une liste de tes camarades dans le voisinage
- génère des probabilités de contact  $Q_i$  avec les élèves  $C_i$  de cette liste.
- pour chaque contact avec un camarade  $C_i$ :
  - simule la loi de Bernoulli de paramètre  $P_i * Q_i$
  - si le résultat de l'expérience est 1 :
    - ton camarade s'est infecté par contact avec toi
  - finsi
- finpour

finsi

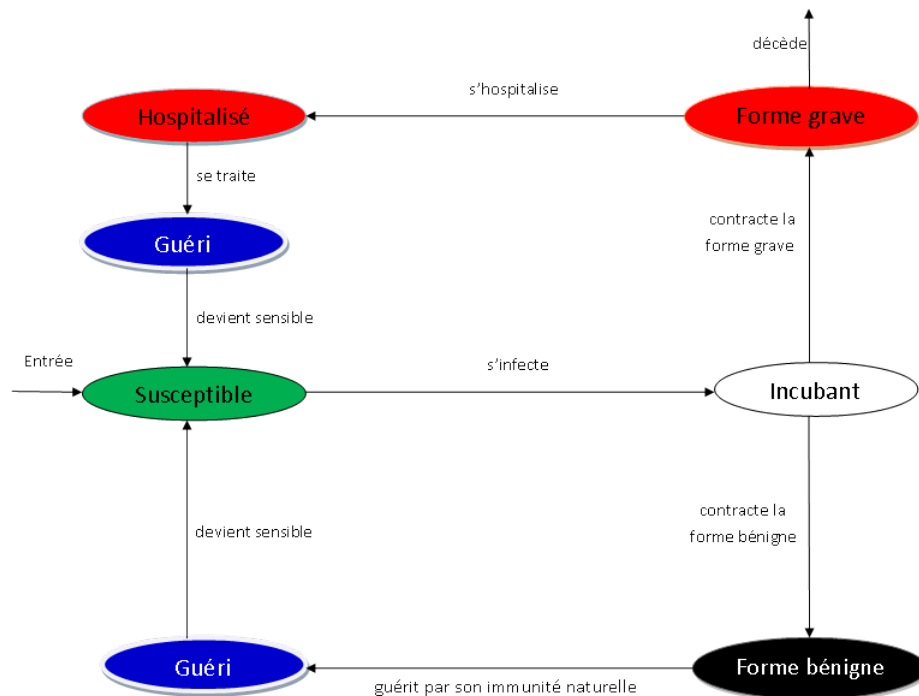
La probabilité  $P_i$  représente le risque d'exposition de chaque camarade  $C_i$

## 2.4. L'automate à états finis des statuts d'infection des individus

En programmation, un automate à états finis peut être simplement défini comme un système qui décrit l'évolution des états d'un objet. Le schéma ci-dessous est un automate à états finis qui décrit l'évolution des statuts (relatifs à l'infection) des individus qui sont initialement susceptibles.

Tout commence lorsqu'on est **susceptible**. Si on exécute une action qui mène à l'infection, on devient **incubant**, et ceci pendant une durée variant entre 1 et 5 jours. Au terme de l'incubation on commence à développer soit **la forme bénigne** (forme asymptomatique) soit **la forme grave** (forme symptomatique).





1) Si on développe la forme bénigne, alors on va en **guérir** après une durée variant entre 7 et 14 jours pour redevenir encore **susceptible** 8 mois après en moyenne.

2) Si on développe la forme grave par contre, soit on choisit de ne pas traiter soit on choisit d'aller au centre de contrôle du choléra où on sera automatiquement **hospitalisé**.

- Si on choisit de ne pas se traiter, on **décède** après une durée variant entre 1 et 3 jours, après quoi on disparaît de l'environnement.

- Si on choisit d'aller par contre à l'hôpital, on y sera hospitalisé pendant une durée variant entre 3 et 7 jours, après quoi on en guérit pour redevenir aussi **susceptible** 8 mois après en moyenne.

### 3. Quelques scénarios de simulation et discussions

Afin de pouvoir déterminer la combinaison optimale (par rapport au coût, temps et mortalité) des paramètres de contrôle nécessaires pour rapidement venir à bout d'une épidémie de choléra, nous allons présenter les résultats de quatre scénarios de simulation dont chacun porte sur un jeu de paramètres de contrôle précis. Toutefois, pendant ces séries de simulation, les entrées relatives aux effectifs de la population et les divers taux d'infections seront invariantes. Les entrées relatives aux couches sociales et à la religion ont été choisies de telle sorte qu'elles soient assez représentatives de la population réelle de Ngaoundéré :

- Nombre de familles villageoises=15

- Nombre de familles prolétaires=30
- Nombre de familles de condition moyenne=20
- Nombre de familles bourgeoises=5
- Proportion de musulmans=0.5
- Nombre initiale d'infectés=5

### 3.1. Scénario 1: La situation classique

Le premier scénario porte sur un ensemble de données de paramètres contrôlés classiques aux réalités du terrain au Cameroun, c'est donc la situation que l'on pourrait prévoir si jamais une épidémie de choléra déclencherait au Cameroun à partir de la région de l'Adamaoua. Les données de ces paramètres sont inspirées des données de la récente épidémie qui a eu lieu à l'Extrême-Nord et au Nord [7].

- Le nombre de jours avant le début des sensibilisations=20
- Le nombre de jours avant le début des assainissements=30
- Seuil de sensibilisation des villageois=0.75
- Seuil de sensibilisation des prolétaires=0.5
- Seuil de sensibilisation des hommes de condition moyenne =0.85
- Seuil de sensibilisation des bourgeois =1
- Durée d'assainissement des puits=7
- Durée d'assainissement des rivières=3
- Durée d'assainissement des douches=10
- Durée d'assainissement des mosquées=5

Les entrées supposées et relatives aux taux d'infection sont les suivants:

- le taux d'infection (par personne) des bouillards= 0.2
- le taux d'infection (par personne) des puits =0.1
- le taux d'infection (par personne) des rivières= 0.05

Après avoir lancé la simulation, c'est au 55<sup>e</sup> jour que le simulateur marque la fin de l'épidémie, malheureusement 7.02% de la population ne vit plus à cause de cette épidémie. Dans le schéma ci-dessous, la courbe en vert représente le pourcentage de la population indemne du choléra et celle en rouge le pourcentage des infectés. Puisque c'est une simulation probabiliste, on ne doit pas immédiatement se contenter de ce résultat pour faire des prévisions. A cette effet nous nous sommes donné un écart type  $\sigma=0.33\%$ , une précision  $\epsilon=0.2\%$  et un risque 5% pour estimer le nombre  $n$  de simulations nécessaires pour avoir la moyenne du taux de mortalité. En admettant également que la distribution du taux de mortalité sur ces paramètres de contrôle est normale. Après calcul, on a  $n \approx 10$ . Après simulations 10 fois, on obtient en moyenne un taux de mortalité de 6.84% et une durée de l'épidémie de 67 jours.

### 3.2. Scénario 2: Sensibilisation immédiate

Ici on aimerait bien savoir comment se comporterait une épidémie de choléra lorsque la population victime est très vite sensibilisée dès l'apparition sur la maladie.

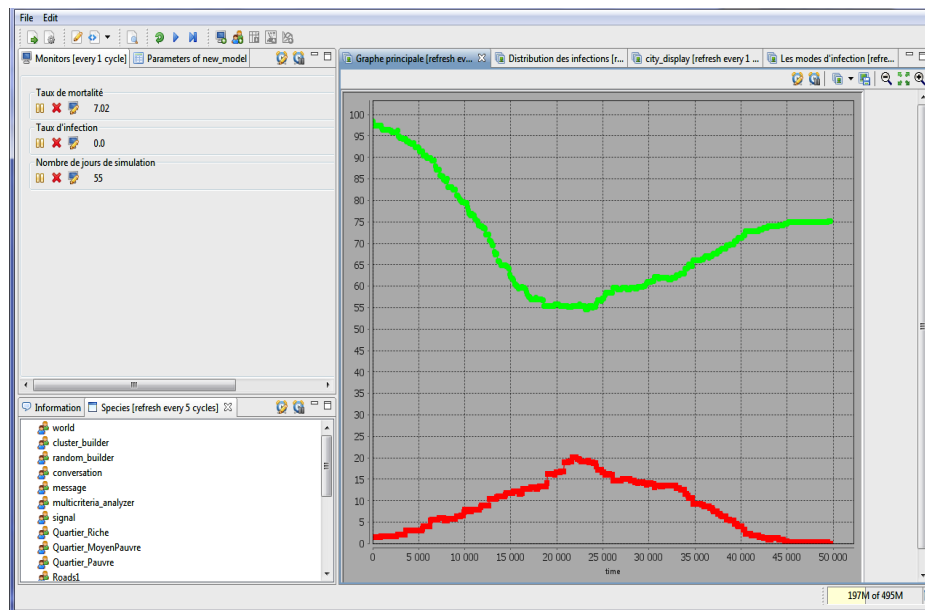


Figure 4: Simulation du cas classique

Ainsi nous avons conservé intacts tous les autres paramètres sauf le paramètre "*Nombre de jours avant les sensibilisations*" en le ramenant à 5 jours au lieu de 20 jours. Après 10 exécutions du programme nous avons obtenu une moyenne de 2.46% pour la mortalité et de 56 jours pour la durée de l'épidémie.

### 3.3. Scénario 3: Assainissement immédiat

Nous avons ici conservé intacts tous les autres paramètres sauf le paramètre "*Nombre de jours avant les assainissements*" en le ramenant à 7 jours au lieu de 30 jours. Après avoir exécuté 10 fois le programme on obtient une moyenne de 5.14% pour la mortalité et une moyenne de 37 jours pour la durée de l'épidémie.

### 3.4. Scénario 4: Combinaison de l'assainissement et de la sensibilisation

Le quatrième scénario est le fruit d'une combinaison des deux précédents stratégies de contrôle. À l'issue de 10 simulations, le simulateur marque une mortalité moyenne de 1.3% et une durée d'épidémie de 20 jours.

Le tableau ci-dessous résume les résultats des différents scénarios.

	scénarios 1	scénarios 2	scénarios 3	scénarios 4
<b>Taux de mortalité</b>	6.84%	2.46%	5.14%	1.3%
<b>Durée de l'épidémie</b>	67 jours	56 jours	37 jours	20 jours

## 4. Discussion et conclusion

Le scénario 2 décrit une situation où les sensibilisations sont lancées le plus tôt possible et les assainissements tardivement. Comme les assainissements en eux même prennent un temps assez considérable pour être entièrement faits et que les habitants sont néanmoins bien sensibilisés sur ces entre-faites sur les risques d'infection, alors il est tout à fait normal que nous ayons dans ce scénario un faible taux d'infection mais une longue durée d'épidémie.

Toutefois, ce scénario correspond aux réalités que nous vivons aujourd'hui dans notre pays avec le choléra à la seule différence qu'au lieu de dire que les assainissements sont tardivement lancés nous dirons simplement qu'ils ne sont pas entièrement faits dans les lieux à risque. Étant donné que le seuil de sensibilisation de tous les habitants n'est pas égale à 1 et que le vibron existent toujours dans l'environnement, par conséquent la maladie persiste. C'est la raison pour laquelle nous avons actuellement dans notre pays des faibles taux d'infection un peu disséminés partout avec une persistance de l'épidémie.

Le scénario 3 par contre décrit une situation où les assainissements sont lancés le plus tôt possible et les sensibilisations tardivement, comme les habitants eux même ignorent les risques d'infections pendant que leur environnement est en cour d'assainissement, alors ces derniers vont beaucoup s'infecter par ignorance. Mais lorsque les assainissements viendront à bout, alors les infections s'estomperont rapidement et l'épidémie disparaîtra rapidement. C'est la raison pour laquelle nous avons dans ce scénario un taux d'infection assez élevé mais une faible durée de l'épidémie.

Certes le scénario 3 est une situation moins réaliste, en effet on s'imagine moins un gouvernement qui ne se focalise qu'aux actions d'assainissement sans commencer à sensibiliser la population cible, mais elle démontre à quel point les assainissements sont impératifs pour accélérer la décroissance du taux d'infection.

Nos diverses simulations nous ont montré que les prolétaires et les villageois représentent la grande proportion de la population des infectés . Alors on pourrait penser que la technique de contrôle la plus optimale serait d'envisager d'une part des campagnes de sensibilisation plus rapide, plus accentuées vers les zones de basses classes et d'autre part d'envisager par la suite des actions d'assainissements pour accélérer la décroissance de l'épidémie. Ainsi pour venir rapidement à bout d'une épidémie de choléra dans la ville de Ngaoundéré et diminuer conséquemment le taux de létalité il faut d'abord être à mesure d'identifier rapidement l'épidémie, ensuite engager rapidement les actions de sensibilisation et les accentuer beaucoup vers les populations de la basse classe et enfin entreprendre ensuite les actions d'assainissements et les exécuter aussi vite que possible.

---

## 5. Bibliographie

WIKIPEDIA, « Choléra », <http://fr.wikipedia.org/wiki/choléra>, consulté le 29 Janvier 2020, date de la dernière modification: 23 Janvier 2020.

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, « Choléra », <http://www.kwalai.com/espace-sante>, consulté le 29 Janvier 2020, date de la dernière modification: 17 janvier 2019.

ACADÉMIE FRANÇAISE, « Choléra », <https://fr.academic.com/dic.nsf/frwiki/356223>, consulté le 29 Janvier 2020.

CAMEROON RADIO TELEVISION, « Région du Littoral: alerte à une épidémie de choléra », <http://www.crtv.cm>, consulté le 28 Janvier 2020, date de la dernière modification 23 Janvier 2020.

JACQUES FERBER, « Les systèmes multi-agents: un aperçu général », *Techniques et sciences informatiques*, vol. 16, n° 2, 1997.

JOURNAL DU CAMEROUN, « Choléra: déjà 421 morts sur 6 361 cas enregistrés au Cameroun », <http://www.journalducameroun.com>, consulté le 18 Octobre 2010, date de la dernière modification: 16 Septembre 2010

CENTRE DE CONTRÔLE DU CHOLÉRA DE MAROUA., « Situation de l'épidémie de choléra dans la région de l'extrême-nord », *Ministère de la santé publique*, 2011.

BAYLEYEGN, YIBELTAL NEGUSSIE, « Mathematical analysis of a model of cholera transmission dynamics », *African Institute for Mathematical Sciences (AIMS), South Africa*, 2009.

MUSHAYABASA, STEADY, BHUNU, CLAVER PEDZISAI, « Is HIV infection associated with an increased risk for cholera? Insights from a mathematical model? », *Biosystems*, vol. 109, n° 2, 2012

J.M. TCHUENCHE, A. MWASA, « Mathematical analysis of a cholera model with public health interventions », *BioSystems*, vol. 105, n° 3, 2011.

D.H. MUSEKWA AND AL., « Modelling and analysis of the effects of malnutrition in the spread of cholera », *Math. Computer Modelling*, vol. 53, n° 9-10, 2011.

F. NYABADZA, J.B.H. NJAGARAH, « A metapopulation model for cholera transmission dynamics between communities linked by migration », *Applied Mathematics and Computation*, vol. 241, n° 9-10, 2014.

KOLAYE AND AL., « Theoretical assessment of the impact of climatic factors in a vibrio cholerae model linked by migration », *Acta biotheoretica*, vol. 66, n° 4, 2014.

KOLAYE AND AL., « Mathematical assessment of the role of environmental factors on the dynamical transmission of cholera », *Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation*, vol. 67, n° 4, 2019.

ACTU ENVIRONNEMENT, « Où l'on apprend que le choléra vient de la mer... », <https://www.actu-environnement.com>, consulté le 29 Janvier 2020, date de la dernière modification: 09 Avril 2010.