

Modélisation et Simulation des interactions entre agents d'un système et leurs conséquences sur le comportement du système

Simulateur GAMA

Cas d'étude :

- **Epidémie**
- **« Waze »**

LATTS

Laboratoire Techniques,
Territoires et Sociétés

ESIEE
PARIS

une école de la



CCI PARIS ILE-DE-FRANCE

Vassia BONANDRINI
Du 19/04/2021 au 16/07/2021

Tuteur de stage : Messieurs René Natowicz et Konstantinos Chatzis

Etablissement / Formation : ESIEE Paris - 2ème année du cycle ingénieur

Entreprise d'accueil : Université Gustave Eiffel – 5 bd Descartes 77454 Champs-sur-Marne
LATTIS – ESIEE Paris – Projet UrbaRiskLab

Remerciement

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce rapport de stage par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de ce stage, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable.

Aussi, je remercie MM. Natowicz et Chatzis qui m'ont formé avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Sommaire

Partie I : Cadre et contexte	4
Chapitre 1 : Le LATTS et le projet UrbaRiskLab	4
A. Le LATTS	4
B. Le projet UrbaRiskLab	4
Chapitre 2 : le cadre	5
Chapitre 3 : le contexte	5
Partie II : Travail réalisé	5
Chapitre 1 : le sujet	6
Chapitre 2 : les objectifs à atteindre	6
Chapitre 3 : outils découverts	6
A. GAMA	6
B. Les cartes	8
Chapitre 4 : le travail effectué	9
A. Simulation d'une épidémie	9
B. WAZE	15
Chapitre 5 : les difficultés techniques rencontrées	22
A. Les cartes	22
B. L'optimisation des modèles	23
Chapitre 6 : futurs travaux	23
A. Modélisation d'épidémie	23
B. Waze	23
Partie III : Conclusion	24
Partie IV : Bilan Personnel	24
Partie V : Références	24

Partie I : Cadre et contexte

Nous parlerons dans un premier temps du Laboratoire Techniques Territoires et Sociétés (LATTS) et du projet UrbaRiskLab, puis nous verrons le cadre dans lequel j'ai effectué mon stage et nous finirons par décrire le contexte de mon sujet.

Chapitre 1 : Le LATTS et le projet UrbaRiskLab

A. Le LATTS

Le LATTS est un laboratoire pluridisciplinaire en sciences sociales spécialiste des enjeux de la ville, des territoires, de l'espace, de la production, aujourd'hui et dans l'histoire. Il s'attache à comprendre comment la fabrication technique modèle chacun de ces univers et comment les réalisations techniques comptent dans leur transformation.

Fondé en 1985 autour des thématiques de la ville et de ses réseaux ainsi que des entreprises et de leurs modèles d'organisation de la production, le LATTS pratique le dialogue entre les sciences sociales et les mondes techniques. Au croisement de plusieurs disciplines (aménagement, géographie, histoire, sciences politiques, sociologie...), il entend contribuer au débat public en considérant les grandes évolutions économiques et de société — transition énergétique, virage numérique — comme méritant d'être éclairées par un effort de compréhension des infrastructures techniques qui les sous-tendent.

Des thèmes de recherche aussi variés que la consommation énergétique des ménages, les pratiques de rénovation, les évolutions des organisations et des métiers dans le public et le privé sont abordés en suivant de près les objets techniques ou en s'intéressant aux modélisations qui les inspirent. La soixantaine de chercheurs et enseignants-chercheurs, de doctorants et de post-doctorant y contribuent en participant par des recherches-actions à la connaissance scientifique et à la construction d'outils ou en s'investissant dans programmes comme ceux de l'Agence nationale de la recherche.[1]

B. Le projet UrbaRiskLab

UrbaRiskLab (URL) est un projet qui vise à fédérer la recherche d'excellence au niveau francilien, national et international sur la thématique risque / crise en milieu urbain. Il a été lancé le 27 septembre 2018 pour une durée minimale de 4 ans. Le projet est financé par l'I-SITE FUTURE de l'Université Paris-Est et s'inscrit plus largement dans le cadre du programme d'investissements d'avenir de l'Etat (dont la troisième tranche a été lancée en 2017).

A l'issue d'un processus long et sélectif, l'Université Paris-Est a été labellisée en 2017 « I-SITE » grâce à son projet « FUTURE ». La mission des Initiatives Science / Innovation / Territoires / Economie (I-SITE) est de regrouper des établissements d'enseignement supérieur et de recherche sur un grand thème de société, en lien avec des entreprises et des collectivités publiques à l'échelle d'un territoire. L'I-SITE FUTURE de Paris-Est s'est construit sur le thème « la ville de demain » et a abouti (entre autres) à la création le 1er janvier 2020 de l'Université Gustave Eiffel. Un des axes stratégiques de ce projet – et donc de la nouvelle

URL est un projet de recherche-action : etc.

A disparu suite à ma question « pourquoi en rupture technologique ? »

Université – est la question de la résilience urbaine. C'est dans ce cadre qu'UrbaRiskLab a été pensé et sélectionné. [2]

Chapitre 2 : le cadre

Le sujet de mon stage était la modélisation et la simulation des interactions entre agents d'un système et leurs conséquences sur le comportement du système.

Mes tuteurs étaient Monsieur René Natowicz et Monsieur Konstantinos Chatzis.

Avec la pandémie de covid-19, j'ai travaillé chez moi principalement mais j'avais à disposition un bureau à l'ESIEE Paris. Nous nous retrouvions régulièrement par réunion à distance avec mes tuteurs pour faire un point sur l'avancement de mon travail.

Chapitre 3 : le contexte

Avec la diffusion à grande échelle de l'application WAZE, une série de risques urbains nouveaux et de nuisances directement liées à cette application sont apparus, parmi lesquels on pourrait citer :

- L'utilisateur de l'application est conduit vers des endroits dangereux (quartiers difficiles, zones inondées, zones frappées d'incendies etc.). La société Waze tente elle-même d'apporter des solutions à ces problèmes
- Nuisances pour les riverains, qui voient leurs quartiers traversés par des flux importants de véhicules qui provoquent des accidents (cas d'un quartier de Los Angeles au relief accidenté)
- Mise en danger la vie de policiers dont les positions sont révélées par les usagers de l'application
- Création et diffusion de « fake news »

Le stage comporte une part de définition de situations de crise et d'études de stratégies permettant d'en limiter les effets, avec simulation des événements.

Partie II : Travail réalisé

Il serait bien d'inclure dans votre rapport, par exemple en annexe, le sujet du stage.

Nous commencerons par définir le sujet, ensuite nous verrons quels étaient les objectifs et quelles techniques pour les atteindre. Et nous nous concentrerons sur le travail effectué avec les difficultés rencontrées et les initiatives que j'ai prises pour les résoudre. Je finirai par une ouverture pour de futurs travaux sur ce sujet.

Chapitre 1 : le sujet

Ce projet s'attache à modéliser les interactions entre les agents constituant d'un système d'interactions. Un exemple est la navigation automobile par Global Positioning System (GPS) pour un système collaboratif tel que Waze.

Dans une première partie, afin de me familiariser avec le logiciel de modélisation Gama, j'ai effectué la simulation de la propagation d'une épidémie dans un arrondissement de Paris.

Dans une seconde partie, j'ai modélisé le trafic routier sur une ville pour observer la congestion du trafic lors de certains événements.

Chapitre 2 : les objectifs à atteindre

Mon premier objectif était de me familiariser avec un nouveau logiciel et d'apprendre un code de plus haut niveau ressemblant au Java sur la plateforme GAMA.

Dans le contexte actuel, nous avons décidé que, pour me familiariser avec GAMA, je proposerais un modèle d'épidémie proche de celui du covid-19 permettant par la suite de chercher une réponse à la question sans réponse à l'époque : « Les personnes vaccinées sont-elles contaminantes ? »

Ensuite, j'ai cherché à comprendre plus en détails le fonctionnement de l'application Waze et comment celui-ci gère certaines contraintes telles que la restriction de circulation sur certaines routes et les accidents automobiles.

Pour finir, j'ai créé un modèle de trafic qui réagit à l'ajout de contraintes de circulation sur des routes ou bien la fermeture de certaines voies et mesure la perturbation du trafic global.

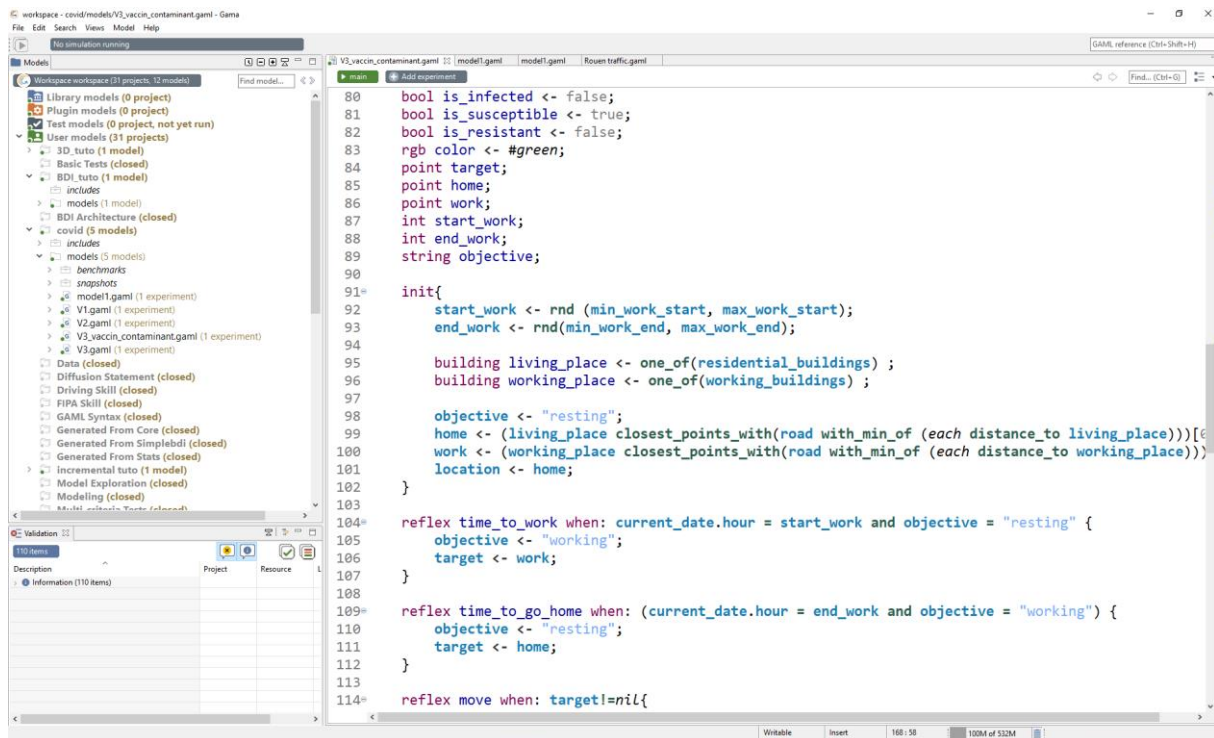
Chapitre 3 : outils découverts

A. GAMA

La plateforme de simulation GAMA est un environnement de développement pour simuler des agents dans un espace donné et voir leur évolution au cours du temps en fonction des règles que l'on applique. Il a été créé entre 2007 et 2010 par l'équipe de recherche franco-vietnamienne de MSI (localisé à l'Institut de la Francophonie pour l'Informatique, Hanoi, et faisant partie de l'Institut de Recherche pour le Développement – Sorbonne Université). GAMA est maintenu par un consortium académique composé de l'université de Rouen, l'université d'Orsay, l'université de Toulouse 1 et l'université nationale d'Hanoi. L'interface ressemble à un IDE (integrated development environment) classique avec la particularité d'avoir un bouton pour pouvoir exécuter notre simulation dès qu'il n'y a plus d'erreurs dans le code. [12]

Vous avez tenu compte de ma remarque – Références – mais vous donnez la référence <https://gama-platform.github.io/> qui, à cet endroit, est trop générale. Il faut la donner ici : « la plateforme de simulation Gama [12] »
À l'endroit où vous la donnez, on voudrait être dirigé sur la page du site web qui parle de cette particularité « avoir un bouton pour exécuter... » Par ailleurs, ça n'est pas le cas dans tous les environnements de programmation ? ?

Figure 1 : écran de l'environnement GAMA



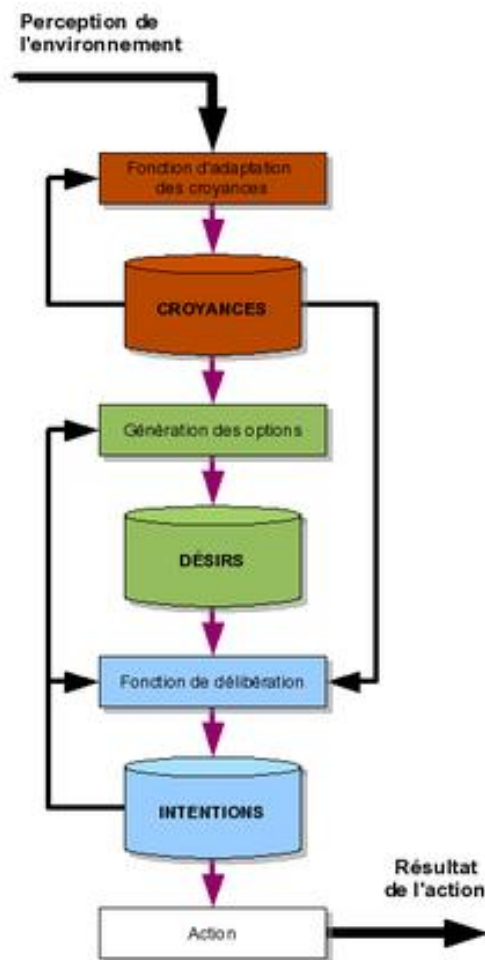
Le langage utilisé par GAMA est un langage java modifié pour qu'un non-développeur puisse prendre en main le logiciel simplement sans qu'il possède de réelle compétence en développement. Le code s'articule autour **d'espèces** (les classes en java) que l'on peut créer mais il y a l'espèce « global » et l'espèce « experiment » qui doivent toujours être présentes. L'espèce **global** représente l'agent « monde » dans lequel d'autres agents d'autres espèces vont pouvoir évoluer et l'espèce experiment sert à visualiser ce qu'il se passe dans notre simulation via des cartes ou des courbes.

Le langage de GAMA est fait pour être codé de manière assez intuitive c'est pourquoi, les développeurs ont déjà implémenté plusieurs operators (méthodes) qui facilitent grandement la modélisation. Par exemple, si on veut prendre un agent aléatoire de l'espèce personne qui est infecté alors on écrira *one_of (people where (each.is_infected))*. Ainsi le langage ressemble à un langage parlé qui ne requiert pas de grandes compétences en programmation.

Dans GAMA, il est aussi possible d'implémenter des modèles cognitifs simplifiés visant à modéliser des processus psychologiques et intellectuels tels que des sentiments entre les agents. Un des modèles les plus répandues est le modèle Belief, Desires, Intentions (BDI) et repose sur 3 principes :

- Les **croyances** qui reflètent la connaissance de l'agent
- Les **désirs** qui représentent les opportunités laissées par l'environnement
- Les **engagements** qui sont retenus par l'agent

Figure 2 : schéma du modèle BDI [13]



Ce modèle BDI peut être très utile lors de la simulation d'épidémie pour simuler ou non-respect des mesures sanitaires par exemple. Ou bien pour un modèle de trafic routier, le respect de la signalisation et de la limitation de vitesse.

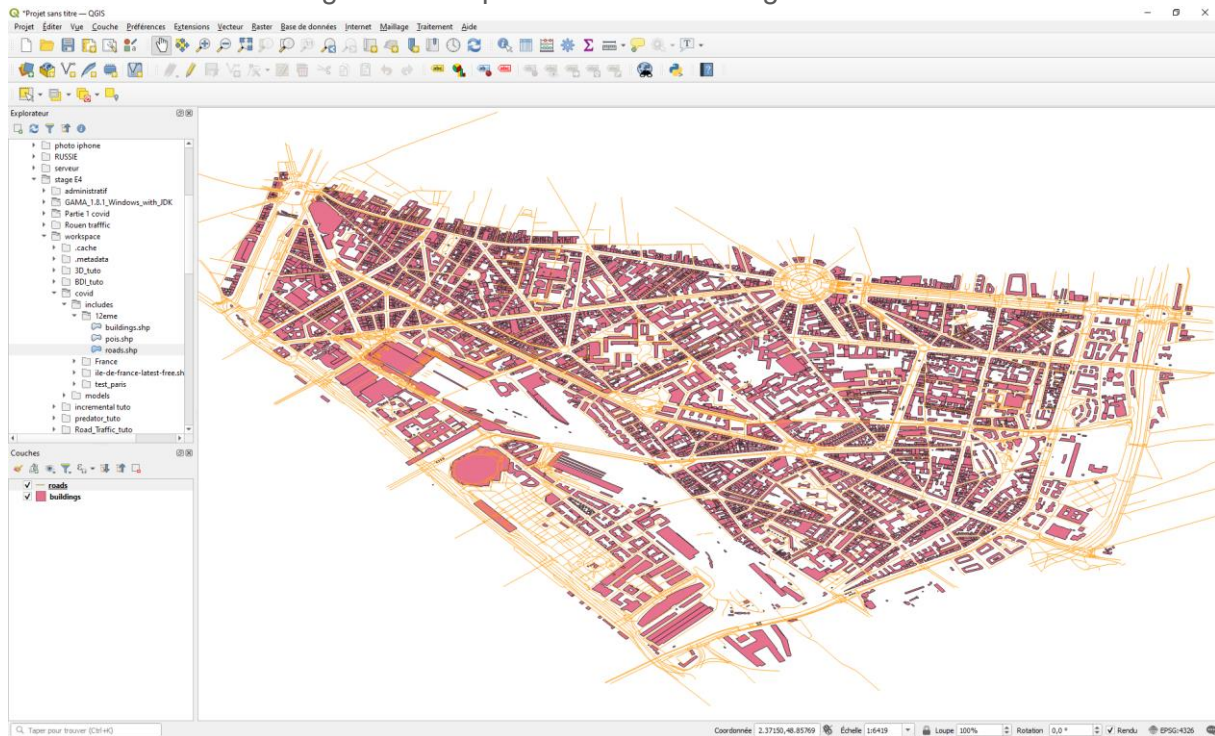
GAMA permet de simuler des interactions entre individus dans un environnement géographique. Dans la plupart des simulations, nous devons donc importer des cartes pour définir cette géographie.

B. Les cartes

Le format des cartes que l'on peut importer dans GAMA est le format standard Geographic Information System (GIS) qui permet de garder beaucoup d'informations sur les bâtiments (nom, type, etc) ou sur les routes (nom, vitesse maximale, type, etc). Les cartes que j'ai trouvées sur internet sont trop grandes pour pouvoir simuler dans des temps raisonnables donc j'ai édité ces cartes à l'aide du logiciel gratuit Quantum GIS (QGIS) [3] pour réduire leurs tailles.

Je maintiens ma remarque : « Votre description de Gama est trop succincte. Cette section sur les cartes arrive sans que l'on comprenne pourquoi. Il faut dès le départ indiquer que Gama est un environnement de simulation d'interactions dans un environnement géographique. Reformulez-le à votre façon. » Vous n'indiquez nulle part (sauf si ça m'a échappé), que Gama est un environnement de simulation dans un environnement géographique représenté par des cartes géographiques, en particulier au format XXX, etc. En conséquence, les cartes arrivent ici sans que l'on comprenne pourquoi.

Figure 3 : capture d'écran du logiciel QGIS



Chapitre 4 : le travail effectué

A. Simulation d'une épidémie

Les modèles mathématiques de maladies infectieuses, **d'abord outils purement théoriques**, ont commencé à être mis en pratique dans les années 1980. Lors de la pandémie de Covid 19, les modélisations mathématiques ont connu un essor dans la prise de décision relatives aux politiques de santé publique et les modélisations ont également contribué à l'épidémiosurveillance de la maladie. Ces modèles divisent la population en classes épidémiologiques. [4]

Ces classes sont représentées par une lettre représentant l'état actuel d'un individu. Ainsi on trouve les classes : S, I et R correspondant respectivement à un individu sain, infecté et résistant.

La construction d'un modèle se fait alors en choisissant les transitions entre états possible d'un individu. Par exemple, Si l'on veut qu'un individu infecté revienne à un état sain après un certain temps, le modèle se nommera SIS pour Sain -> Infecté -> Sain.

Dans notre cas, nous voulons simuler une épidémie qui ressemble à celle de covid-19 qui a lieu en ce moment. Nous avons donc opté pour un modèle SIR (Sain -> Infecté -> Résistant).

A l'époque où le stage a été effectué, nous avions peu d'informations sur la protection à long terme du vaccin il était donc plus logique de prendre un modèle SIR qui rend les personnes résistantes pour une longue période de temps après avoir été infecté ou après s'être fait vacciner. Cependant, avec les nouvelles informations que nous avons, un modèle SIRS (Sain -> infecté -> Résistant -> Sain) aurait été plus rigoureux.

Je maintiens ma question « Pourquoi dites-vous ça ? »

De plus, les premières modélisations sont bien plus précoces que les années 1980. et le SIDA. Voir par exemple :
 « The application of simulation models and systems analysis in epidemiology: a review », in Preventive Veterinary Medicine Volume 15, Issues 2-3, February 1993, Pages 81-99
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167587793901053>

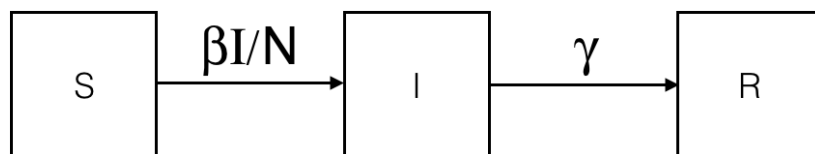
L'évolution du nombre de personnes saines, infectées et résistantes au cours du temps s'exprime à l'aide d'équation différentielle. Pour le modèle SIR on obtient ces équations :

Figure 4 : équation du modèle SIR [14]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta IS}{N} \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\beta IS}{N} - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I \end{array} \right.$$

Avec β le taux d'infection de l'épidémie (probabilité d'infection), S le nombre de personnes saines, I le nombre de personnes infectés, N le nombre total de personnes et γ le taux de résistance correspondant à la probabilité de guérir de la maladie.

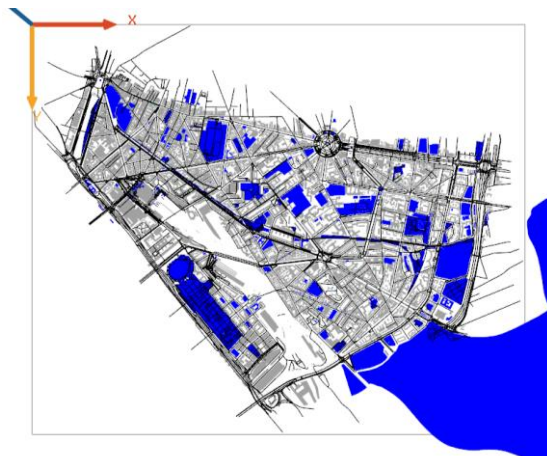
Figure 5 : schéma du modèle SIR [14]



Avec β le taux d'infection de l'épidémie, S le nombre de personnes saines, I le nombre de personnes infectés, N le nombre total de personnes et γ le taux de résistance.

Dans notre simulation, nous utilisons la carte du 12^{ème} arrondissement de Paris pour la propagation du covid-19. Elle se présente comme ceci :

Figure 6 : carte du 12^{ème} arrondissement de Paris



En bleu les lieux de travail et en gris les lieux d'habitation.

Dans notre modèle, les gens dorment chez eux le soir et se lèvent le matin pour aller travailler. Lors du déplacement des agents, s'il se retrouve proche d'un autre agent et que l'un d'eux est infecté, on applique les équations différentielles pour déterminer si les agents sains deviennent infectés.

Avec ce modèle de propagation d'épidémie, nous obtenons des courbes de l'évolution du nombre de personnes saines, infectés et résistantes au cours du temps.

A l'aide de notre modèle, nous pouvons proposer une réponse à la question de la contamination dans un état résistant. C'est-à-dire, si on transpose avec l'épidémie de covid-19, la question est : **Une personne vaccinée (résistante) peut-elle contaminé à nouveau une personne saine ?**

Pour répondre à cette question, nous avons effectué 2 simulations. La première avec un modèle SIR classique où les personnes résistantes ne peuvent pas contaminer les personnes saines et la seconde où les personnes résistantes (vaccinés) ont 20% de chance de rester dans un état où elles transmettent la maladie (elles restent dans l'état I correspondant aux personnes infectieuses)

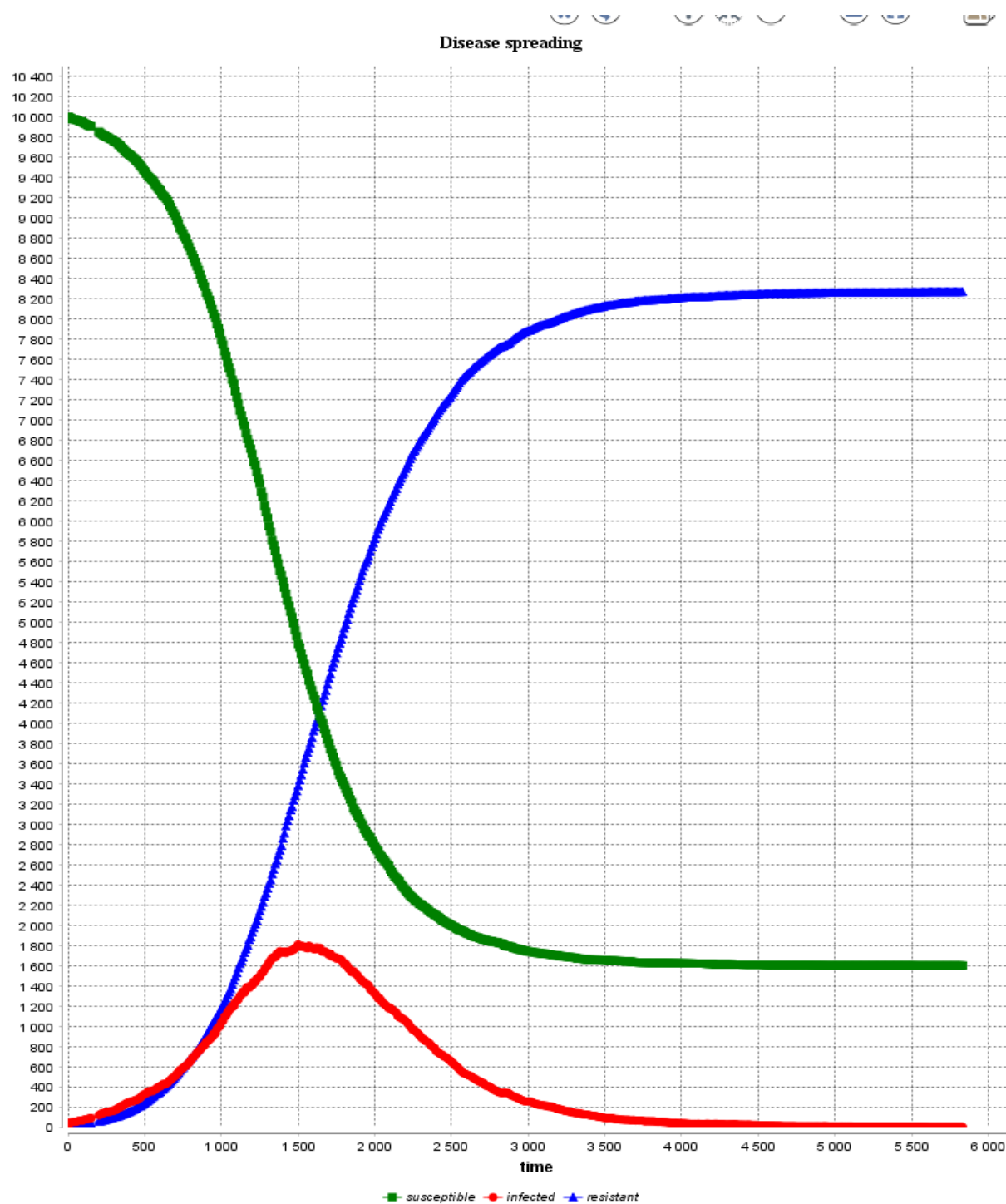
Nous allons ensuite comparer ces courbes avec les données réelles concernant le covid-19 et voir laquelle se rapproche le plus des données réelles.

La variable R_0 se calcule de la manière suivante :

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma}$$

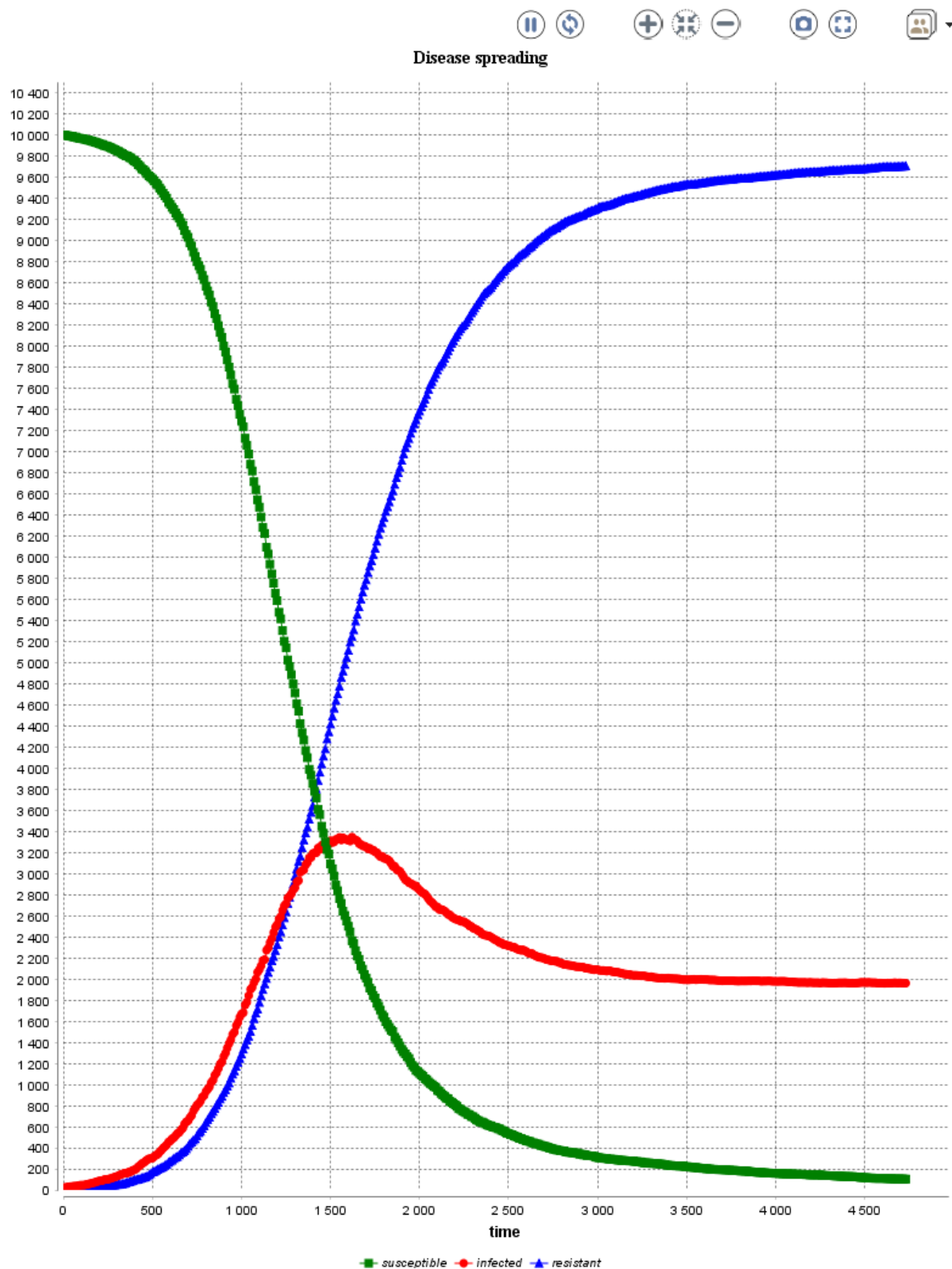
Avec β le taux d'infection de l'épidémie et γ le taux de résistance.

Figure 7 : personnes résistantes (vaccinées) non contaminantes



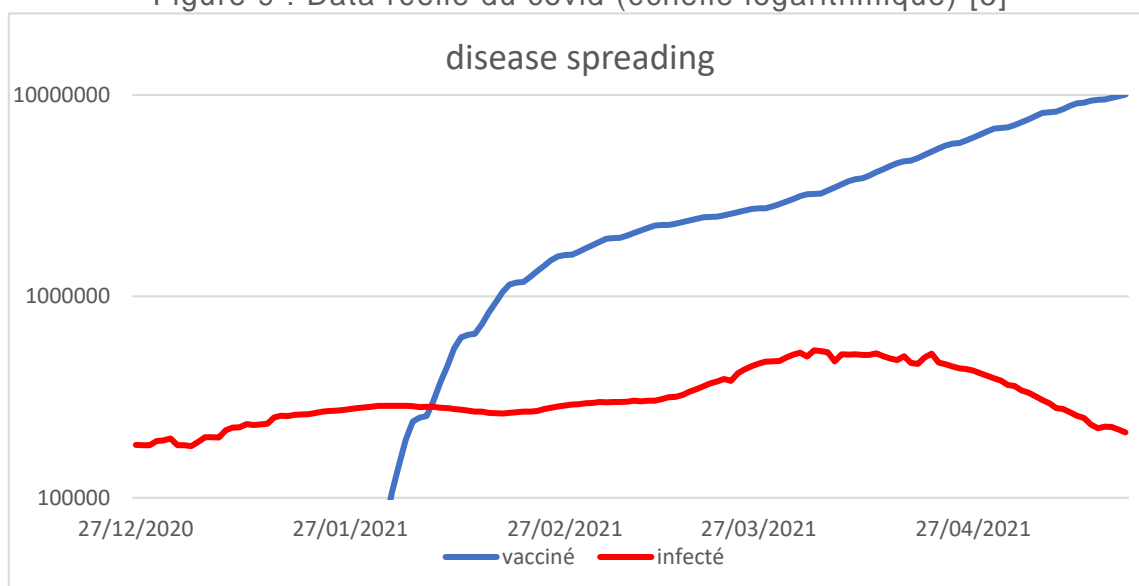
$R_0 = 2$. Instant $T=0$: 10000 personnes saines, 20 personnes contaminées. Courbe rouge : nombre de personnes infectées
Courbe bleue : personnes résistantes Courbe verte : personnes saines

Figure 8 : 20% des personnes résistantes (vaccinées) sont contaminantes



$R_0 = 2$. Instant $T=0$: 10000 personnes saines, 20 personnes contaminées. Courbe rouge : nombre de personnes infectées
Courbe bleue : personnes résistantes Courbe verte : personnes saines

Figure 9 : Data réelle du covid (échelle logarithmique) [5]



Courbe bleue : personnes vaccinées Courbe rouge : personnes infectées

Toutes les conclusions faites ci-dessous sont faites à partir d'un modèle très simplifié de propagation d'épidémie. Il ne prend pas en compte les mesures gouvernementales ni la responsabilité individuelle. On compare les données réelles avec nos données obtenues en simulation cependant, pour avoir une réponse définitive, il faudrait se référer à des études beaucoup plus poussées comme [6] qui suggère que la charge virale est radicalement réduite chez les personnes vaccinées réduisant donc le taux de transmission.

En comparant cette courbe (figure 9) avec un modèle où les personnes vaccinées ne sont pas contaminantes (figure 7), on observe que le nombre de personnes vaccinées (résistantes) augmente de manière forte (de 100 000 à 1 350 000 sur la figure 9 et de 1 000 à 7 400 sur la figure 7) tandis que le nombre d'infectés se stabilise rapidement (340 000 le 16 mars sur la figure 9 et 1 700 à $t=1500$ sur la figure 7) après la forte hausse du nombre de vaccinés pour redescendre par la suite.

Sur la figure 8, on observe une hausse du nombre de personnes infectées de 700% entre $t=750$ et $t=1500$. Sur la figure 7, la hausse est de 325%. Il faudrait donc mesurer une hausse supérieure à 325% sur la figure 9 pour que l'on soit dans le modèle de la figure 8.

Or, sur les valeurs réelles mesurées, la hausse entre le 3 Février et le 4 Avril est de 89%.

Si on avait un modèle où une partie des personnes vaccinées étaient contaminantes comme dans la figure 8, alors il aurait fallu beaucoup plus de personnes vaccinées pour pouvoir stabiliser la courbe des personnes infectés. De plus, le nombre de personnes infectés aurait été beaucoup plus importants lors du début de la vaccination et aurait théoriquement augmenté or, ce n'est pas le cas dans la figure 9.

La réalité suggère que l'on est dans un modèle où une faible partie des personnes vaccinées sont contaminantes.

Il faudrait dire un mot sur le choix de 20% de R contaminantes. Même si ce n'est que « nous n'avons pas eu le temps de faire varier ce pourcentage. »

B. WAZE

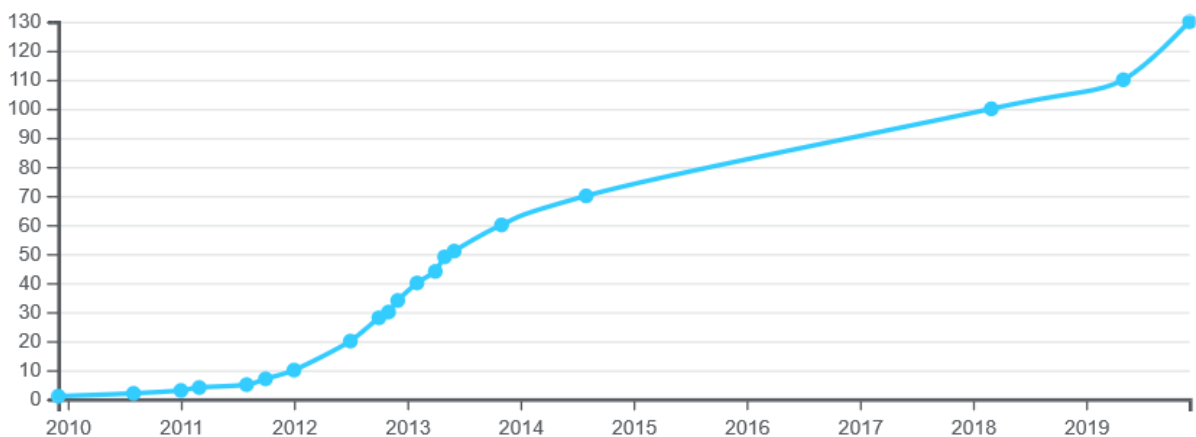
Après m'être familiarisé avec le logiciel GAMA en travaillant sur le cas d'une épidémie, je cherche maintenant à comprendre comment Waze fonctionne pour pouvoir modéliser les interactions entre les agents constituant d'un système d'interactions. [Vu, OK.](#)

Waze est une application mobile d'aide à la conduite et d'assistance de navigation basée sur un système de positionnement par satellites couplée à une cartographie modifiable par ses utilisateurs, sur le principe de la production participative. L'itinéraire calculé peut se mettre à jour en temps réel grâce à certaines informations liées à l'état du trafic (la vitesse moyenne sur une route).

Les utilisateurs de l'application peuvent à tout moment signaler un accident, des travaux, un danger, un embouteillage, un radar ou le prix du carburant de chaque station-service ; le système avertit alors les usagers de l'application censés devant emprunter la même route. Indépendamment de cette possibilité qui demande une action volontaire du conducteur, le système ayant connaissance de la vitesse instantanée de tous les utilisateurs connectés, détecte en temps réel, les ralentissements et vitesses moyennes par tronçon du parcours. Il propose un itinéraire plus rapide lorsque c'est possible.

Chaque utilisateur peut mettre à jour les tracés et caractéristiques des routes, noms de lieux et adresses ainsi que signaler des routes fermées (événements, travaux...) via une application web distincte de l'application mobile. [7]

Figure 10 : Evolution du nombre d'utilisateurs sur Waze dans le monde (en millions) [7]



Avec la diffusion à grande échelle de l'application WAZE, une série de risques urbains nouveaux et de nuisances directement liées à cette application sont apparus :

- L'utilisateur de l'application peut être dirigé vers des endroits dangereux (quartiers difficiles, zones inondées, zones frappées d'incendies etc.).
- Nuisances pour les riverains, qui voient leurs quartiers traversés par des flux importants de véhicules qui provoquent des accidents (cas d'un quartier de Los Angeles au relief accidenté)
- Mise en danger de la vie de policiers dont les positions sont révélées par les usagers de l'application

- Création et diffusion de « fake news » (création de fausses congestions)

De plus, Waze peut créer de la congestion automobile en redirigeant les utilisateurs dans des zones qui ne sont pas aménagées pour accueillir un grand nombre d'automobilistes.

Nous nous demandons donc **comment peut-on réduire la congestion du trafic engendré par l'usage massif de l'application ?**

Pour résoudre ce problème, nous avons eu l'idée d'ajouter des contraintes sur les routes. Ce qui correspond à baisser la vitesse maximale des routes pour que l'algorithme de Waze ne redirige pas un trafic important sur ces routes.

La simulation se fait dans la ville de Rouen où un nombre fini d'automobiliste apparaît aléatoirement sur une route. Nous avons choisi Rouen car il y a des cartes déjà disponibles. Les automobilistes calculent ensuite leur itinéraire jusqu'à un point aléatoire de la carte et, quand ils sont arrivés à destination, ils recalculent un nouvel itinéraire à un nouveau point aléatoire et ainsi de suite. GAMA a déjà un modèle implémenté qui gère les routes et la conduite des automobilistes. [8,9]

Pour visualiser les routes congestionnées, nous avons choisi d'utiliser un coefficient pour chaque tronçon de route qui se calcule comme suit :

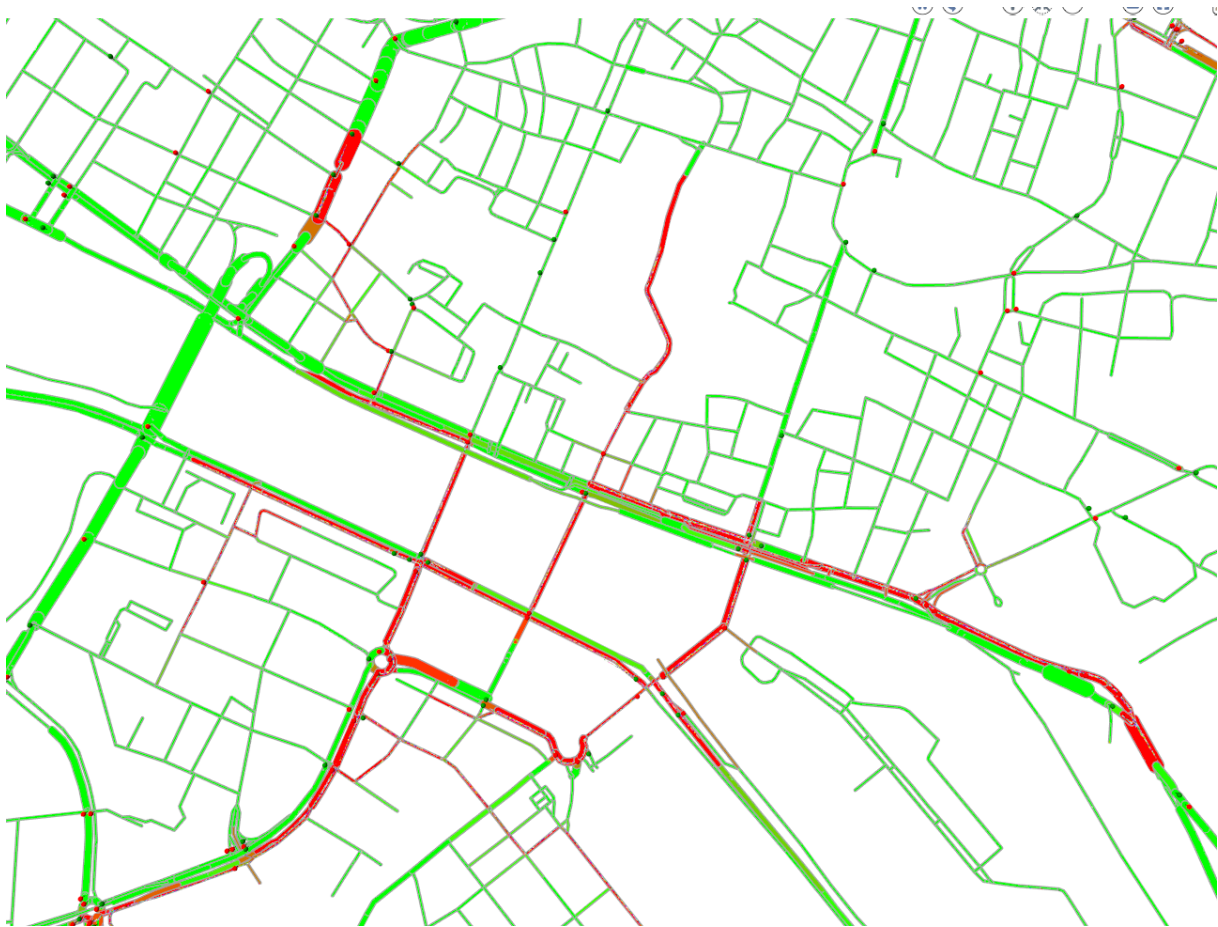
$$car_{coeff} = \frac{\sum k}{threshold}$$

Avec k le nombre de voitures présentes sur la route qui ont une vitesse strictement inférieure à la moitié de la vitesse maximale de la route. Et le threshold qui est arbitrairement égale à 20. Ce coefficient a été créé par nos soins.

Le calcul du meilleur itinéraire par les voitures se fait via l'algorithme de recherche du plus court chemin de Dijkstra. Le graphe sur lequel l'algorithme est appliqué est le réseau routier. Les sommets du graphe sont les intersections des routes, les poids correspondent à la longueur de la route divisée par la vitesse maximale autorisée sur la route.

Pour observer les congestions sur le trafic, j'ai simulé la circulation de 10 000 voitures.

Figure 11 : Simulation du trafic routier à Rouen (10 000 voitures)



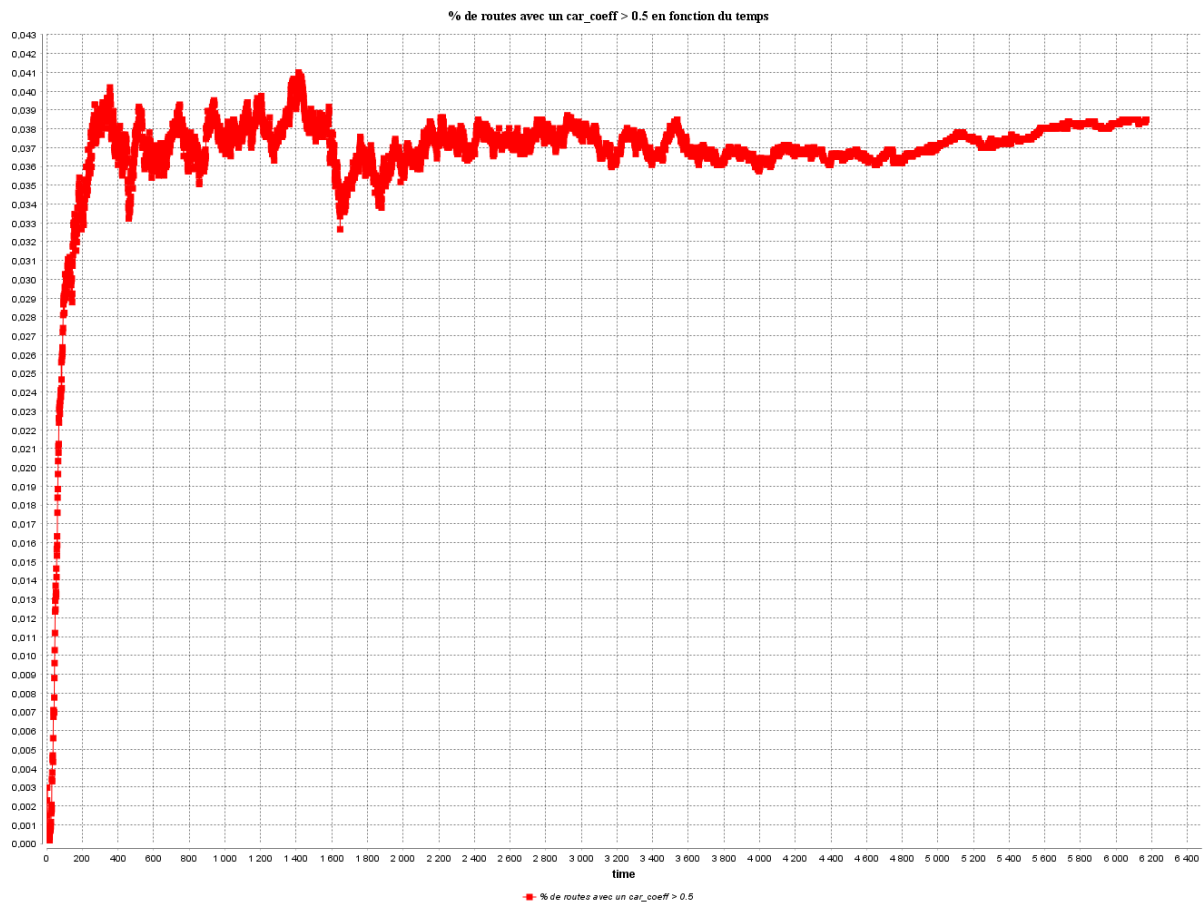
En rouge : les routes avec un $\text{car_coeff} \geq 0.5$ En vert : les routes avec un $\text{car_coeff} < 0.5$

On observe que lorsqu'on laisse le système se stabiliser, de grosses congestions automobiles apparaissent dans le centre-ville de Rouen représenté par les routes en rouge sur la figure 11.

Pour créer des contraintes sur une route, on augmente le poids de cette route dans le **graph** graphe du réseau routier. Les utilisateurs passeront donc moins par cette route car elle ne sera plus autant privilégiée lors du calcul de l'itinéraire. Lorsque l'on rajoute des contraintes sur les routes, nous recalculons les itinéraires de tous les agents de la simulation pour que les changements d'itinéraire soient instantanément pris en compte.

Nous avons essayé de mesurer la congestion globale du trafic routier à l'aide du car_coeff mais les variations sont trop faibles pour conclure.

Figure 12 : pourcentage de routes avec un $car_{coeff} > 0.5$ en fonction du temps



Courbe en rouge : routes avec un $car_{coeff} > 0.5$ (en %)

Sur la figure 12, nous avons introduit les contraintes sur les routes à $t=1400$. A partir de ce moment, nous observons une légère baisse du nombre de routes avec un $car_{coeff} > 0.5$ correspondant à une réduction de la congestion cependant la baisse n'est pas assez significative pour pouvoir en être bien certains. Finalement, nous avons utilisé l'entropie et l'indice de Gini car les résultats étaient plus significatifs et plus simple à interpréter.

Pour mesurer notre congestion globale du réseau, nous utilisons comme mesure l'entropie et l'indice de Gini.

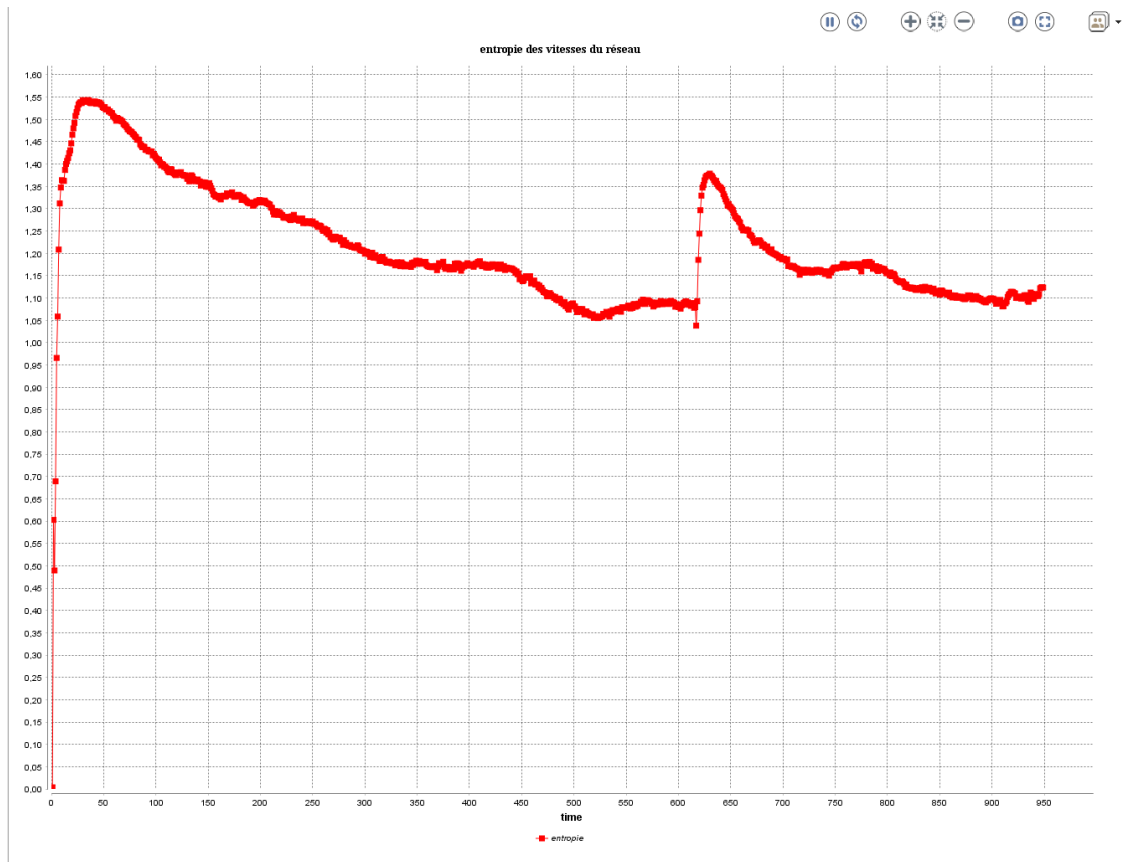
L'entropie mesure le désordre d'un système. Dans notre cas elle mesure le désordre dans la répartition des vitesses et elle est égale à :

$$entropie = - \sum_{i=1}^n P(xi) \log P(xi)$$

Avec $P(xi)$ la probabilité qu'une voiture x roule à la vitesse i telle que $P(xi)=n_i/i$ ou n_i est le nombre de voitures roulant à la vitesse i .

L'entropie maximale correspond à une représentation équilibrée de toutes les vitesses alors que l'entropie minimale correspond à une représentation majoritaire de seulement quelques vitesses.

Figure 13 : Entropie des vitesses en fonction du temps



Courbe en rouge : entropie

Après avoir lancé la simulation, on attend que l'entropie du système se stabilise pour ajouter les contraintes. A $t=0$, les voitures sont créées sur une intersection aléatoire du graph. Les voitures qui sont assez équitablement réparties géographiquement utilisent beaucoup de routes différentes au début, ce qui explique le pic à $t=30$.

A $t=620$, on ajoute une valeur arbitraire de 50 au poids de la moitié des routes choisies aléatoirement du graph (ajout de contraintes sur les routes), puis on recalcule les itinéraires des personnes. On observe alors une augmentation conséquente de l'entropie de la répartition des vitesses du réseau, qui va se re-stabiliser après un certain temps.

Ainsi, on observe sur la figure 13 que lorsque l'on fait apparaître des contraintes sur les routes ($t=620$), la répartition du nombre de voitures roulant à une vitesse i est plus équilibrée. Les vitesses très faibles disparaissent au profit de vitesses plus élevées, équilibrant la répartition des vitesses pendant un moment.

Je pense que cela est dû au fait que d'autres routes auparavant désertes sont dorénavant utilisées, réduisant pendant un petit moment les congestions, même si le système retrouve des congestions automobiles après quelques temps (surtout au niveau des ponts du centre-ville de Rouen).

On peut observer le même phénomène avec l'indice de Gini.

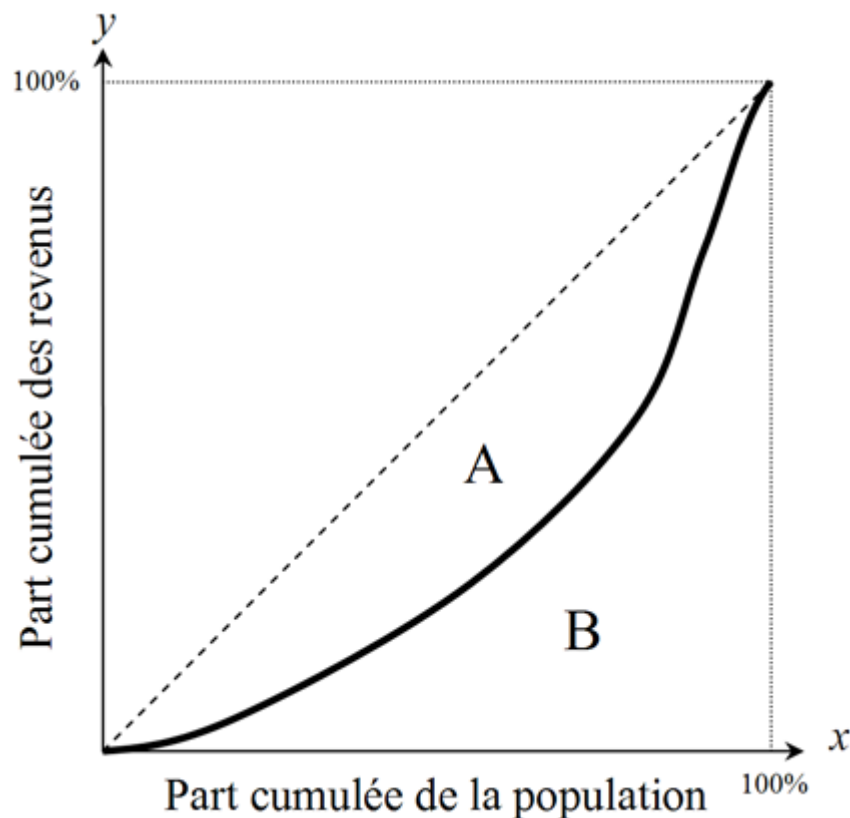
Le coefficient de Gini, ou indice de Gini, est une mesure statistique permettant de rendre compte de la répartition d'une variable au sein d'une population. Il mesure le niveau

d'inégalité de la répartition d'une variable dans la population. Le coefficient de Gini est un nombre variant de 0 à 1, où 0 signifie l'égalité parfaite et 1 signifie une inégalité parfaite. [10]

Par exemple, on peut mesurer les inégalités de revenus au sein des pays avec le coefficient de Gini. 0 correspond à une égalité parfaite (toutes les personnes ont les mêmes richesses), et 100 à une inégalité totale (où une personne posséderait tout)

Une première approche consiste à définir le coefficient de Gini comme le double de l'aire comprise entre la courbe de Lorenz de la distribution des revenus et la courbe de Lorenz associée à une situation théorique totalement égalitaire (dans laquelle tous les individus auraient exactement les mêmes gains). Cette aire est notée A sur la figure 14, la courbe de Lorenz observée figurant en gras. L'aire notée B est celle comprise entre la courbe de Lorenz observée et la courbe de Lorenz associée à une situation totalement inégalitaire (dans laquelle une partie infime de la population détiendrait la totalité des richesses).

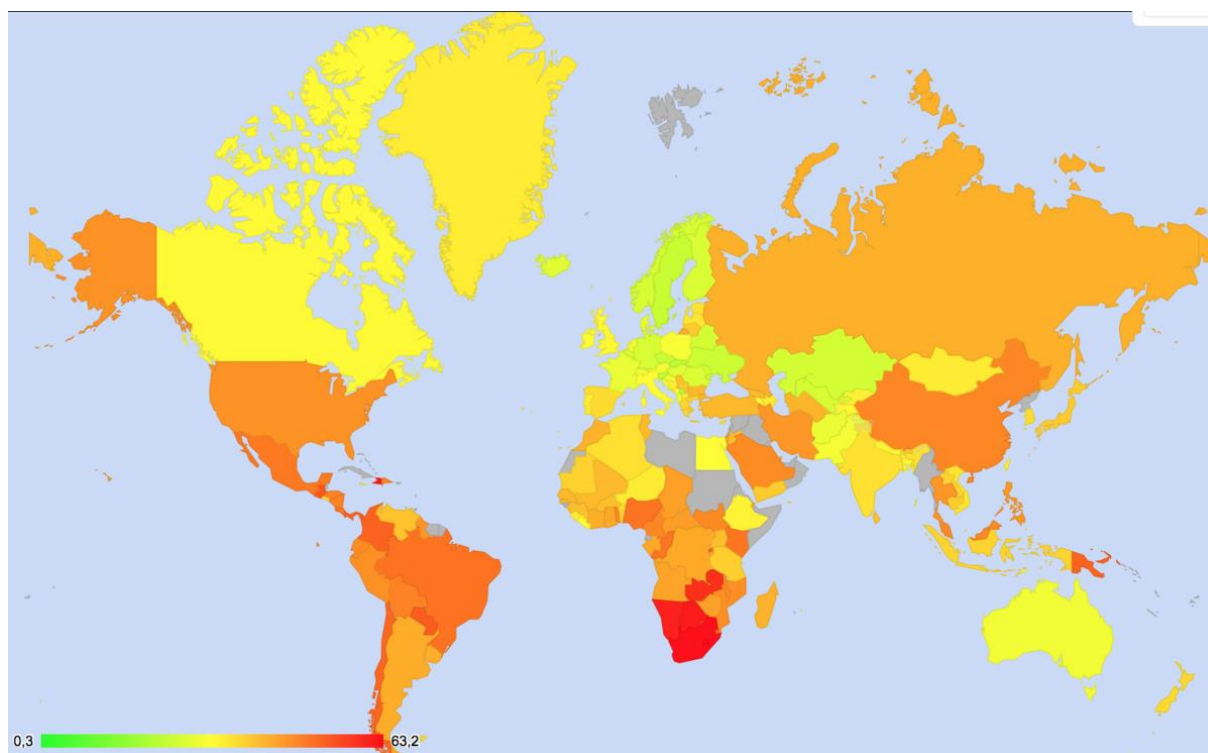
Figure 14 : Part cumulée des revenus en fonction de la part cumulée de la population [10]



Courbe de Lorenz (en gras) comparée à la courbe théorique pour une situation égalitaire (en pointillés). Le coefficient de Gini vaut alors $G = 2A = 1 - 2B$.

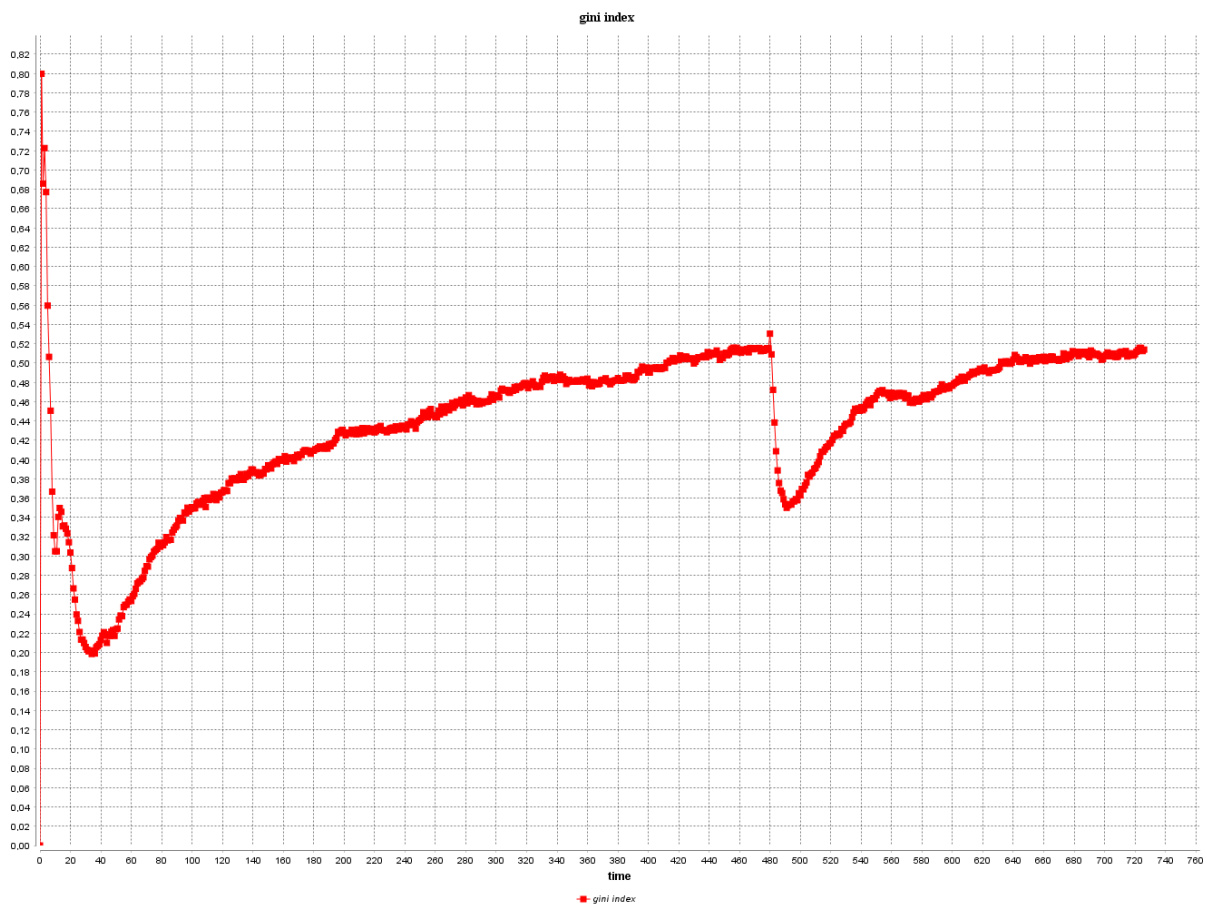
Les pays les plus égalitaires ont un coefficient de l'ordre de 0,2 (Danemark, Suède, Islande, République tchèque, etc.) et les pays les plus inégalitaires au monde ont un coefficient de 0,6 (Brésil, Guatemala, Honduras, etc.) comme vu sur la figure 15 ci-dessous. En France, le coefficient de Gini est de 0,292 en 2015.

Figure 15 : Carte de l'indice de Gini dans le monde [10]



0 est en vert (égalitaire), 100 en rouge (inégalitaire) et les valeurs intermédiaires sont en jaune. Les valeurs vont de 0,3 (Jersey) à 63,2 (Lesotho).

Figure 16 : indice de Gini des vitesses en fonction du temps



Courbe en rouge : indice de Gini

Sur la figure 16, nous appliquons les mêmes contraintes que pour la figure 12 à $t=477$.

On observe alors une baisse significative de l'indice de Gini montrant qu'il y a plus de vitesses différentes présentes dans notre système pendant un temps. Ces vitesses sont mieux réparties ce qui nous permet de conclure la même chose qu'avec l'entropie : un nombre conséquent de vitesses faibles disparaissent au profit de vitesses plus élevées.

Chapitre 5 : les difficultés techniques rencontrées

A. Les cartes

Il m'a fallu du temps pour trouver des bonnes cartes et comprendre comment lire les données que contenaient ces dernières. Par exemple, pour la carte du 12^{ème} arrondissement de Paris, les routes ne sont pas toutes connectées entre elles et il y avait un bug où certaines personnes restaient bloquées sans pouvoir bouger pendant toute la simulation. De plus, la carte du 12^{ème} provient d'une carte plus grande de la région Ile de France que j'ai dû découper grâce au logiciel QGIS dont je parle plus haut dans le chapitre 3.

B. L'optimisation des modèles

Créer plusieurs milliers d'agents et les faire interagir entre eux est assez coûteux en mémoire et les simulations peuvent très vite devenir lente. J'ai donc appris à optimiser les modèles pour que les simulations soient plus rapides. Une des optimisations les plus simples a réalisé est de ne tout simplement pas mettre à jour les agents qui ne font rien dans la simulation. Par exemple, pour la simulation de l'épidémie, les bâtiments font partie d'une espèce mais ils n'exécutent aucune tâche donc ils n'ont pas besoin d'être mis à jour à chaque $t+1$. Le site Gama propose lui aussi des optimisations pour certaines fonctions. [11]

Une autre optimisation que nous avons trouvée est de supprimer les personnes résistantes dans notre modèle d'épidémie car, dans la simulation où elles ne sont pas contaminantes, elles ne servent à rien et nous gagnons un temps de calcul considérable lorsqu'il y a beaucoup de personnes résistantes.

Chapitre 6 : futurs travaux

A. Modélisation d'épidémie

Pour la modélisation d'épidémie, nous avons réalisé un modèle très simple qui pourrait être perfectionné en ajoutant, par exemple :

- Une routine différente des agents le week-end où ils peuvent se retrouver dans des endroits avec plus de monde favorisant donc la contagion.
- Un nouveau modèle d'épidémie SIRS où, après un certain temps, les personnes résistantes redeviennent saines et donc peuvent être contaminées à nouveau.
- Des hôpitaux avec des jauges qu'il ne faut pas dépasser sinon les gens ne peuvent plus se faire soigner et donc cela augmente le nombre de mort. Pour le modéliser, il faut qu'une partie des personnes infectées doivent se rendre à l'hôpital lorsqu'il contracte la maladie. Si l'hôpital est plein, ces dernières meurent sinon, elles obtiennent un lit pour survivre le temps qu'elles guérissent et passent à un état résistant.
- Des variants de la maladie pouvant contaminer les personnes à priori résistantes.
- Des mesures sanitaires que les gens décident, ou non, de respecter. Ceci est possible grâce au modèle comportementale BDI que j'ai décrit dans le chapitre 3.

B. Waze

De même pour notre modèle de trafic routier très simple, il est possible d'améliorer ce dernier pour avoir une simulation plus proche de la réalité en ajoutant :

- 2 graphs pour les automobilistes, un avec les informations en temps réel sur les congestions pour pouvoir les éviter et l'autre qui n'a pas ces dernières. Un pourcentage p des conducteurs utiliseraient le premier graph qui suit les recommandations de Waze, et $1-p$ qui ne les suivent pas et utiliseraient le second graph.

- Des contraintes sur les routes pour réduire ou interdire le trafic qui ne seraient actives qu'un certain temps et/ou à intervalle de temps régulier comme par exemple devant les écoles à l'heure de la sortie des élèves.
- Echelonner les restrictions (ajout de poids sur les routes dans le graph) de 15 minutes en 15 minutes puis voir l'impact sur le trafic global.
- Restreindre des routes qui sont reliées à un sommet qui a un fort degré dans le graph graphe du réseau routier (routes plus importantes).
- Retirer les contraintes au bout d'un certain temps.

Partie III : Conclusion

A l'aide de nouveaux outils, j'ai réussi à simuler des environnements contenant des agents interagissant.

Dans la première simulation, nous avons utilisé une méthode pouvant donner une réponse à une question ancrée dans l'actualité : les personnes vaccinées sont-elles contaminantes ?

Tandis que la deuxième simulation sur le trafic routier nous montre qu'à l'aide de contraintes sur les routes, on peut réduire les congestions dans le trafic automobile dans notre simulation. Cependant, une véritable démonstration serait beaucoup plus difficile à obtenir. En effet, nous avons trouvé nos résultats à l'aide d'un modèle très simplifié.

Partie IV : Bilan Personnel

Ce stage fut très enrichissant. J'ai découvert beaucoup de choses et acquis les compétences suivantes :

- Maîtrise de nouveaux outils
- Persévérance
- Des connaissances en épidémiologie et en trafic routier
- Application de la méthode scientifique pour répondre à une question

Partie V : Références

1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/LATTS>
2. <https://urbarisklab.org/fr/>
3. <https://www.qgis.org/en/site/>
4. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8les_compartimentaux_en_%C3%A9pid%C3%A9miologie
5. <https://www.data.gouv.fr/en/pages/donnees-coronavirus/>
6. <https://www.nature.com/articles/s41591-021-01316-7>
7. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Waze>
8. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01055567/document>
9. <https://gama-platform.github.io/wiki/UsingDrivingSkill>
10. https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_Gini

11. <https://gama-platform.github.io/wiki/OptimizingModels>
12. <https://gama-platform.github.io/>
13. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_cognitif
14. <https://gama-platform.github.io/wiki/Equations>