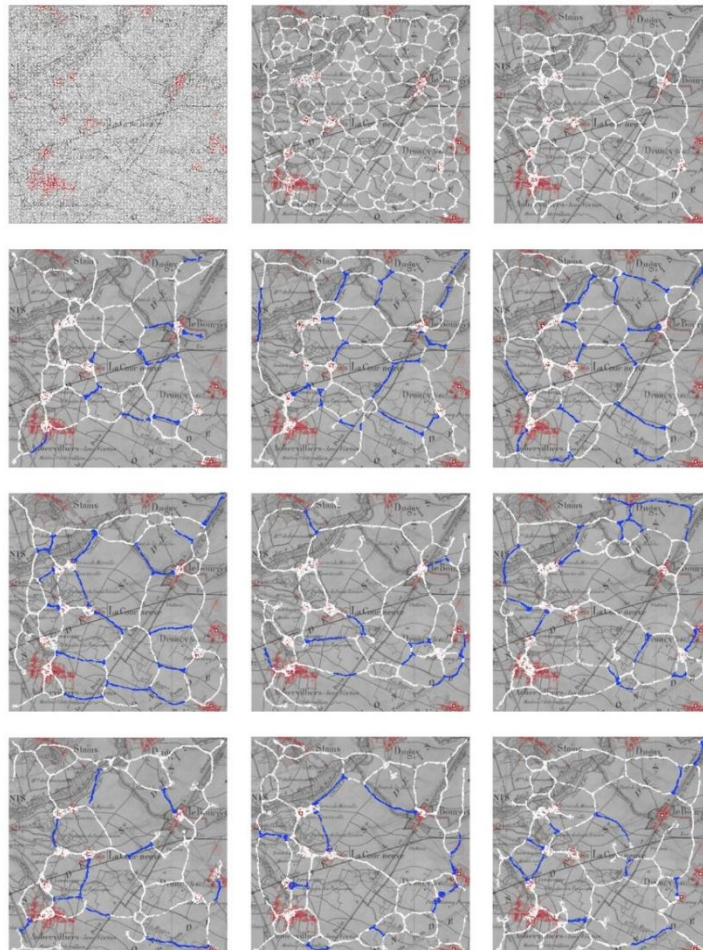


Le physarum au service de l'analyse urbaine

Les réseaux de circulation d'une ville, ressemblent-ils aux réseaux créés par un système multi-agents naturel ?



Séminaire Activités et Instrumentation de la Conception

Mémoire préparé sous la direction de:

François GUENA
Joaquim SILVESTRE
Anne TUSHER

Présenté et soutenu par :

Zahra ASADOLLAHI

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Au début de ce mémoire, je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui m'ont encouragé et aidé au cours de mes études d'architecture en France.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mes directeurs de mémoire : Monsieur François GUENA, Madame Anne TÜSCHER ainsi que Monsieur Joaquim SILVESTRE. Je les remercie pour leur encadrement, leurs conseils et leurs encouragements qui m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Je remercie mes très chers parents, Maryam et Reza, qui ont toujours été là pour moi. Suivre mes rêves de poursuivre mes études en France et vivre les nouvelles aventures était impossible sans leurs encouragements.

Je voudrais exprimer particulièrement ma gratitude envers Christopher, Milad, Julie et Sara, pour leur confiance et leur soutien inestimable.

Enfin, j'aimerais profiter de cette occasion pour remercier mes colocataires, Ahmadreza et Mahtab, qui ont su créer une ambiance agréable par leur présence chaleureuse.

Sommaire

1	AVANT-PROPOS	7
2	INTRODUCTION	8
2.1	PRESENTATION DU CONTEXTE	8
2.2	INTERET DE RECHERCHE	8
2.3	HYPOTHESE	9
2.4	APERÇU DE LA METHODE DE RECHERCHE	9
3	ETAT DE L'ART	10
3.1	INTRODUCTION DE L'ETAT DE L'ART	10
3.1.1	PHYSARUM POLYCEPHALUM : LE FONCTIONNEMENT DE L'ORGANISME NATUREL	10
3.1.2	PHYSARUM COMME UN SYSTEME MULTIAGENT	11
3.2	APPLICATION DE PHYSARUM DANS LE DOMAINE DE L'URBANISME ET DE L'ARCHITECTURE	11
3.2.1	EXPERIENCE DE RECHERCHE DE CHEMIN	11
3.2.1.1	Expérience à l'échelle urbaine	11
3.2.1.1.1	Expérience avec organisme naturel	11
3.2.1.1.2	Expérience avec l'algorithme	14
3.2.1.1.3	Expérience avec le plug-in Physarealm	16
3.2.1.1.3.1	Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla	16
3.2.1.1.3.2	The visible and invisible network of a self-organizing town	18
3.2.1.2	Expérience à l'échelle architecturale : On slime molds and corridors	21
3.3	CONCLUSION DE L'ETAT DE L'ART	24
4	VILLE ET PHYSARUM :	26
5	METHODE DE LA RECHERCHE	27
5.1	LOGICIELS	27
5.1.1	RHINO	27
5.1.2	GRASSHOPPER	27
5.1.3	ADD-ON	27
5.1.3.1	Physarealm	27
5.1.3.2	Nuclei : le fonctionnement du plug-in et le paramétrage	28
5.1.3.2.1	Mécanisme de l'algorithme	29
5.2	CHOIX DE LA VILLE (TERRAIN DE RECHERCHE ET DE L'EXPERIMENTATION)	32
5.3	ETAPES DE LA RECHERCHE	36
5.3.1	PARAMETRES	37
5.3.1.1	Nourriture (food)	37
5.3.1.2	Densité minimale (minimum density)	37
5.3.1.3	Distance de détection (sensor distance)	37
5.3.1.4	Wrap	37

<u>6</u>	<u>RESULTAT DE LA RECHERCHE</u>	<u>38</u>
6.1	PRESENTATION DE SIMULATIONS AVEC LE PLUG-IN- SUPERPOSITIONS AVEC LES CARTES ANCIENNES	38
6.1.1	EXPERIENCE « VALEURS SIMILAIRES POUR DIX POINTS »	38
6.1.2	EXPERIENCE « VALEURS DIFFERENTES POUR DIX POINTS »	45
6.2	ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS	52
6.2.1	PRECISION	52
6.3	RETOURS SUR L'HYPOTHESE	53
<u>7</u>	<u>CONCLUSION</u>	<u>54</u>
<u>8</u>	<u>LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES</u>	<u>56</u>
<u>9</u>	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>57</u>
<u>10</u>	<u>GLOSSAIRE</u>	<u>60</u>
<u>11</u>	<u>ARCHIVE</u>	<u>62</u>

1 Avant-propos

Mon parcours d'études en architecture est long et multiculturel. J'ai commencé mes études en Iran et je les ai poursuivies en France.

Pendant mes études en France, j'ai été intéressée par la participation à des projets dans lesquels on utilise la conception numérique et la conception réalisées par de nouveaux outils, logiciels et méthodes, une conception qui s'éloigne des méthodes traditionnelles et recherche des idées futuristes. Je n'ai jamais eu l'occasion de participer aux tels projets, cette opportunité était très rare et parfois impossible dans les écoles d'architecture en France.

Le groupe de séminaire SAPI a donné une nouvelle direction à mes études d'architecture en France en abordant des sujets que j'ai toujours cherché à apprendre et à appliquer dans la conception.

Après avoir choisi ce séminaire, j'ai rencontré un océan de sujets que j'avais envie d'apprendre, mais le temps était limité et le choix devait se faire autour d'un petit sujet pour qu'il puisse aboutir à un résultat.

En suivant les cours "TR707 : Initiation à la modélisation paramétrique" ainsi que le cours "CTID 825 : systèmes de la conception digitale" dispensés à l'ENSAPLV par François GUENA, je me suis familiarisée avec la conception paramétrique et les outils de recherche de forme, mais je n'avais toujours pas d'autonomie, car, cela ne pouvait être obtenu en peu de temps.

En regardant les sujets de la conception paramétrique et en feuilletant différents numéros des magazines AD (« Architectural Design », s. d.), le sujet de l'intelligence distribuée a attiré mon attention ; un sujet qui parle de l'intelligence collective, parmi les espèces végétales et animales. La plupart des recherches menées autour de ce thème, étaient concernent la forme et la recherche de forme.

En étudiant et en faisant des recherches supplémentaires, j'ai été intéressée par un organisme naturel appelé Physarum. Cet organisme unicellulaire abondant dans la nature et doté d'une intelligence collective. La fonction de cet organisme était très intéressante pour moi. Les algorithmes issus de cet organisme étaient largement utilisés pour la recherche de formes. Mais à ce stade, j'ai été attirée par la capacité de cet organisme dans le domaine de recherche de chemin ou path-finding, des recherches qui s'éloignaient de l'aspect créatif et futuriste de la recherche de formes et traitaient de questions pratiques.

Au cours de mes lectures, j'ai pris connaissance du livre Emergence (Johnson, 2004), qui m'a beaucoup aidé dans ma compréhension du sujet, ainsi que de l'utilisation des espèces végétales et animales dans ce domaine, et j'en ai tiré un grand profit pour la rédaction de ce mémoire.

Finalement, j'ai choisi Physarum comme le sujet de recherche, un organisme qui peut fournir des solutions créatives et parfois travailler au-delà de l'intelligence humaine dans une courte période.

Ce mémoire est une recherche sur l'utilisation de cet organisme et son point fort, qui est le path-finding.

2 Introduction

2.1 Présentation du contexte

Les centres urbains sont l'un des premiers réseaux complexes construits par les sociétés humaines. Ils comportent plusieurs niveaux de "complexité" et forment la matrice de l'évolution économique et sociale (Buhl *et al.*, 2006). L'un des niveaux de complexité les plus évidents concerne leur architecture statique, telle que représentée par leurs plans de rues, et les réseaux de circulation. Dans certains cas, ces plans sont très ordonnés (comme de Manhattan ou Barcelone), mais beaucoup d'autres s'écartent clairement de l'image quadrillée (Buhl *et al.*, 2006).

Dans les centres urbains, en particulier à certaines petites échelles, ces réseaux résultent d'une "croissance décentralisée" et se ressemblent aux modèles observés dans la nature, comme les réseaux de tunnels des fourmis ou les motifs spatiaux créés par *Physarum*. Cette croissance décentralisée appelée "approche ascendante" (dite Bottom-up) peut aboutir à "un système auto-organisé".

L'auto-organisation explique que ce ne sont pas des forces externes qui déterminent le comportement du système, mais ce sont des individus internes qui le déterminent de manière spontanée (Buhl *et al.*, 2006). Autrement dit, auto-organisation dans une ville, est le résultat des décisions et interactions locales, qui se développent progressivement vers les niveaux supérieurs.

Ce passage de règles de bas niveau à une sophistication de haut niveau est ce que nous appelons "l'émergence" (Johnson, 2004, p. 18).

2.2 Intérêt de recherche

Ville, en tant que système complexe, peut être formée partiellement ou entièrement avec l'approche ascendante, qui aboutit à un système auto-organisé et se complète simultanément ou ultérieurement, par des organisations d'un niveau supérieur. Ces quatre termes : **la complexité, l'approche ascendante (Bottom-up), auto-organisation et émergence**, sont les ressemblances d'une ville et certains organismes naturels comme *Physarum polycephalum*.

Cet organisme, est un système multi-agent naturel qui est capable de produire des réseaux efficaces entre les particules alimentaires pour résoudre les problèmes d'aménagement spatial (Johnson, 2004) et ses ressemblances à une ville, dévoilé un potentiel pour l'analyse urbaine depuis quelques années.

L'intérêt ultime de cette recherche est de savoir si certains organismes naturels comme *Physarum* peuvent proposer des solutions pour des problèmes à l'échelle urbaine (dans le cas de *Physarum*, des problèmes de circulation sont ciblés), ou ils peuvent proposer un outil pour d'autres domaines comme l'histoire pour analyser une ville et sa création. Par conséquent, trouver un lien adaptatif entre l'approche ascendante (Bottom-up) et l'approche descendante (top down) applicable sur une ville sera envisageable dans les recherches ultérieures de ce sujet.

2.3 Hypothèse

La ville possède une auto-organisation dans certains niveaux. Considérant un centre-ville dans une période historique déterminée, où les interactions locales l'ont formé. Autrement dit, ce centre a été créé (partiellement ou entièrement) d'une approche ascendante et décentralisée qui peut être interprétée comme auto-organisation dans l'échelle urbaine.

Dans ce cas, les hypothèses suivantes peuvent se constituer :

Les réseaux de circulation d'une telle ville dans sa période historique ressemblent aux motifs spatiaux du Physarum. (Hypothèse principale)

2.4 Aperçu de la méthode de recherche

En première étape, il faut choisir une ville et une période historique dans laquelle les interactions locales forment partiellement la ville. Dans ce cas, la ville a été formée d'une approche ascendante qui peut être interprétée comme auto-organisation dans l'échelle urbaine.

En deuxième étape, la carte historique de cette ville peut être recherchée dans la bibliothèque numérique de BnF sur le site gallica.bnf.fr (*La France en cartes*, s. d.) ou sur le site Geoportail (*Géoportail*, s. d.). Les **constantes urbaines** seront identifiées d'après la carte historique.

En dernière étape, l'expérimentation se fera en utilisant un complément de Grasshopper appelé **Nuclei**.

Les deux hypothèses suivantes seront évaluées après la simulation :

1. Les réseaux de circulation d'une ville créés par les interactions locales se ressemblent **aux motifs spatiaux créés par le Physarum**
2. En superposant cette simulation et la carte historique, et la comparer avec la carte actuelle du centre-ville, ce sera possible à savoir à quel point ces réseaux sont maintenus et sont toujours utiles pour la ville et ses citoyens dans la ville d'aujourd'hui.

3 Etat de l'art

3.1 Introduction de l'état de l'art

Le Physarum Polycephalum, également appelé blob, a commencé à attirer l'attention des architectes, des urbanistes et des académiciens qui travaillent dans des disciplines expérimentales et flexibles entre l'architecture, l'informatique, la biologie, l'art, les sciences cognitives ; des disciplines qui reposent sur des principes cybernétiques. Le Physarum est considéré comme un bio-ordinateur doté d'une intelligence intégrée dans ses mécanismes physiques (Werner, 2018).

Au stade du plasmodium, l'organisme unicellulaire présente des principes géométriques, morphologiques et cognitifs potentiellement pertinents pour la complexité future des réseaux homme-machine (HMN) en architecture et en conception urbaine. Le bioblob paramétrique se présente comme une structure graphique géométriquement régulée, morphologiquement adaptable et logistiquement intelligente. Il indique une navigation cognitive axée sur les objectifs et la capacité de mémoriser de manière externe (comme les fourmis). Physarum communique avec son environnement (Werner, 2018).

Un groupe de chercheurs japonais a montré que *P. polycephalum* peut trouver le chemin le plus court qui relie deux sources de nourriture lorsqu'il est placé dans un labyrinthe avec deux flocons d'avoine (Nakagaki *et al.*, 2000, p. 2). Il est également efficace pour faire face à un plus grand nombre de sources. Dans un article de 2010, *P. polycephalum* a créé un réseau similaire au système ferroviaire existant de Tokyo lorsque des flocons d'avoine ont été dispersés pour représenter des villes sur une carte de la région de Tokyo (Tero *et al.*, 2010).

3.1.1 Physarum Polycephalum : le fonctionnement de l'organisme naturel

Physarum Polycephalum est un organisme unicellulaire à noyaux multiples qui s'appuie sur la navigation réactive pour explorer son environnement. L'état végétatif de *P. Polycephalum* (connu sous le nom de plasmodium) est composé de nombreuses unités oscillantes plus petites. Chaque unité oscille à une fréquence qui dépend à la fois de l'environnement local et de ses interactions avec les oscillateurs voisins. Lorsque la moisissure visqueuse détecte des attractifs, tel que de la nourriture, par le biais d'une liaison spécifique à des molécules réceptrices présentes à la surface de la membrane externe, la fréquence d'oscillation dans la zone la plus proche de la nourriture augmente, entraînant le cytoplasme (matière gélatineuse qui constitue la majeure partie d'une cellule à l'intérieur de la membrane cellulaire) vers l'attractif. De plus, la liaison des molécules d'attractif à des sections de la membrane de surface réduit la tension à cette section, entraînant une différence de pression hydrostatique interne, de sorte que le cytoplasme s'écoule vers la source d'attractif. Le comportement collectif des oscillateurs, chacun transmettant des informations pour entraîner ses voisins, permet la locomotion de l'organisme. (Diniz et Melendez, 2018)

3.1.2 Physarum comme un système multiagent

Un modèle multiagent a été proposé par Jones (Jones, 2009). Dans son modèle, Physarum est censé être constitué d'une population d'agents de type particule. Chaque agent détecte et dépose des traces lorsqu'il se déplace vers le stimulus le plus proche dans un réseau diffusif 2D. Dans ce modèle, la structure du réseau Physarum est indiquée par le modèle collectif des positions des agents, et le flux protoplasmique est représenté par le mouvement collectif des agents (Awad *et al.*, 2021).

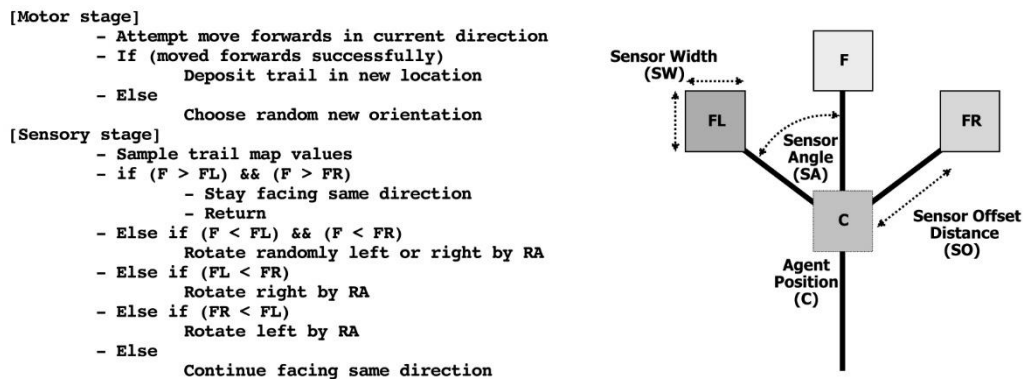


Figure 1. Algorithme comportemental de l'agent de base et morphologie de l'agent (Jones, 2010)

En haut à gauche : L'algorithme moteur sensoriel de l'agent oriente l'agent vers la source la plus forte du gradient chimioattractif et tente d'avancer dans la direction actuelle. En haut à droite : Structure de l'agent individuel montrant la position centrale et les capteurs décalés vers l'avant.

3.2 Application de Physarum dans le domaine de l'urbanisme et de l'architecture

Cette partie fait référence aux recherches qui utilisent le Physarum de différentes manières, en utilisant l'organisme naturel ou son algorithme. Il peut être à l'échelle urbaine ou architecturale, mais ils sont principalement utilisés à l'échelle urbaine. Ce modèle naturel peut être utilisé pour la recherche de chemin (path-finding) ou la recherche de forme (form-finding). Vous trouverez ci-dessous les recherches les plus importantes effectuées dans le domaine de recherche de chemin.

3.2.1 Expérience de recherche de chemin¹

L'inspiration de ce phénomène naturel a soulevé des questions sur la façon dont on peut l'imiter pour trouver des solutions à la planification des chemins. Les architectes et les urbanistes sont souvent confrontés à des problèmes d'aménagement de l'espace, comme la recherche de chemins efficaces entre des points d'intérêt. Le biomimétisme du comportement de cet organisme sera utile pour résoudre ces problèmes (Ma et Xu, 2017).

3.2.1.1 Expérience à l'échelle urbaine

3.2.1.1.1 Expérience avec organisme naturel

Rules for biologically inspired adaptive network design (Sanders, 2010; « Slime design mimics Tokyo's rail system: Efficient methods of a slime mold could inform human engineers », s. d. ; Tero *et al.*, 2010 ; YONG, 2010)

¹ Les textes dans les guillemets dans tout l'état de l'art, sont pris directement des articles concernés et Traduits avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite). Ils ont été vérifiés par l'auteure.

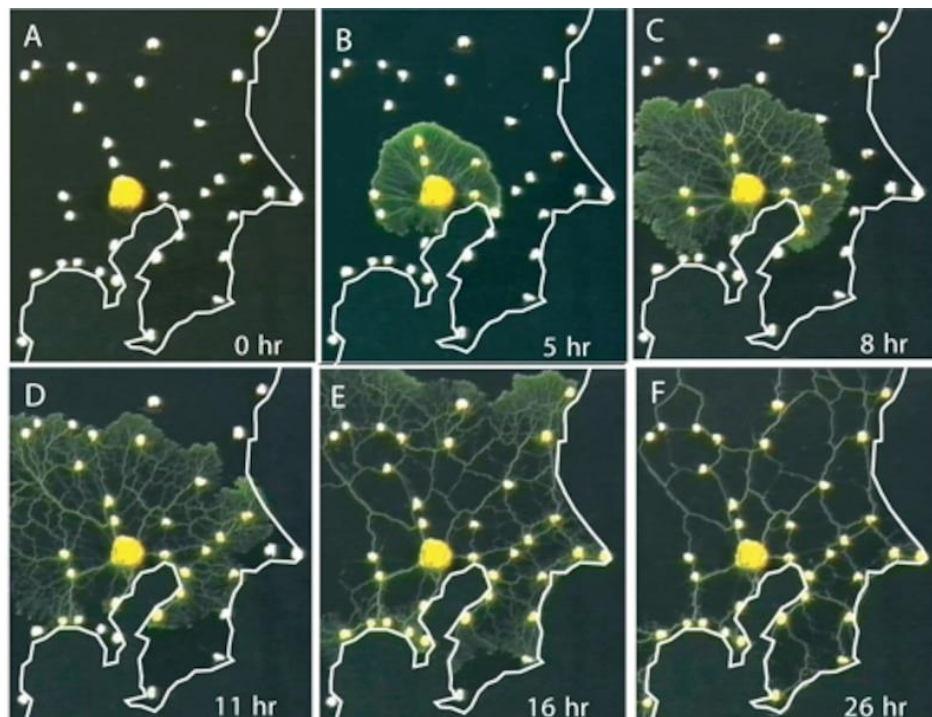


Figure 2. Formation de réseaux chez *Physarum polycephalum*. (YONG, 2010)

Dans les rapports des chercheurs japonais de l'université d'Hokkaido dirigée par Toshiyuki Nakagaki en collaboration avec des scientifiques britanniques (Tero *et al.*, 2010), les flocons d'avoine ont été posés comme le positionnement des villes satellites de Tokyo. Ensuite autour de ces flocons, le physarum, l'organisme unicellulaire sans cerveau, crée des réseaux de tubes conducteurs d'aliments qui ressemblent à la conception du système ferroviaire de Tokyo. Selon l'équipe, le nouveau modèle, basé sur des règles simples de comportement de l'organisme physarum, en tant qu'une approche de planification urbaine biologique, peut aider à concevoir des réseaux plus efficaces et adaptatifs.

La problématique en question concerne plusieurs enjeux. Aujourd'hui les réseaux de transport doivent être efficaces, rentables et résistants aux perturbations ou aux pannes. Le dernier critère est particulièrement important, comme en témoigne le système de transport public britannique, la pluie, la neige et en général la météo peuvent impacter le transport et les réseaux ferroviaires de manière considérable.

Au début, le blob était uniformément réparti autour des flocons d'avoine, s'emparant de son nouveau territoire. Mais en quelques heures, l'organisme a commencé à améliorer sa conception, renforçant les tunnels entre les flocons d'avoine tandis que d'autres liens disparaissaient. Après environ une journée, le Physarum a construit un réseau de tubes interconnectés qui transportent les nutriments. Sa conception est presque identique au système ferroviaire de Tokyo, avec un grand nombre de tunnels solides et stables reliant les points importants. « Il y a un degré remarquable de chevauchement entre les deux systèmes », a déclaré Fricker. « La ressemblance est quasi remarquable. Si les réseaux de transport tombent en panne, les pénalités sont des coupures de courant ou des embouteillages ; si le maillage du moule tombe en panne, la pénalité est la mort. »

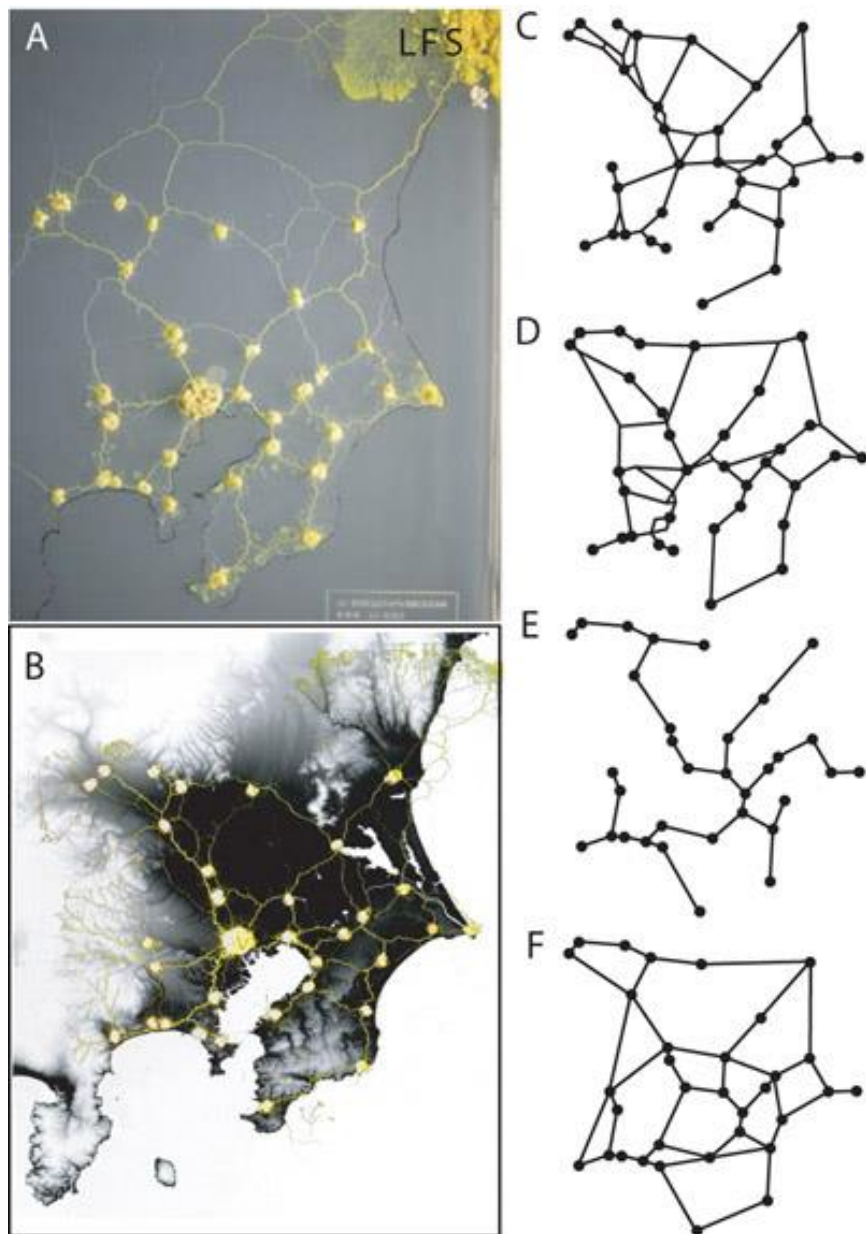


Figure 3. Comparaison des réseaux *Physarum* avec le réseau ferroviaire de Tokyo. (Jones, 2010)

Atsushi Tero a modélisé les contraintes des réseaux ferroviaires de Tokyo comme les lacs ou les montagnes, il a éclairé certaines zones de l'environnement de test (*Physarum* évite la lumière vive). L'organisme a tout de suite développé un maillage dense, ensuite il a affiné ses réseaux afin de se concentrer sur les branches qui se connectent aux sources de nourriture. Le réseau final ressemble au système ferroviaire actuel de Tokyo.

Les capacités de la moisissure, porte sur l'auto-optimisations. Elle crée un réseau efficace en amplifiant ce qui fonctionne et en réduisant ce qui ne fonctionne pas. Néanmoins, les méthodes du *Physarum* produisent un réseau comparable à la tentative humaine prévue en termes de coût, d'efficacité et de tolérance aux pannes.

Ensuite, basé sur cette recherche, Tero a stimulé un modèle informatique constituée d'un réseau de tubes aux mailles aléatoires. Chaque tube est traversé par un protoplasme virtuel. Plus le débit est rapide, plus le tube s'élargit. Lorsque le débit ralentit, le tube se rétrécit et finit par disparaître. Le modèle a démontré des réseaux très similaires aux réseaux ferroviaires de Tokyo. En raffinant le modèle, il serait possible d'optimiser l'efficacité ou la résilience du système et maintenir ses coûts au plus bas.

Un tel système évolutif pourrait être utilisé pour créer des réseaux qui doivent évoluer au fil du temps, tel que des systèmes de capteurs sans fil à courte portée qui fournissent des avertissements rapides en cas d'incendie ou d'inondation, » a noté Fricker. « Comme ces capteurs peuvent être détruits en cas de sinistre, le réseau doit être en mesure de fournir des informations de manière efficace et rapide. (Sanders, 2010)

3.2.1.1.2 Expérience avec l'algorithme

Stepwise slime mould growth as a template for urban design (Kay *et al.*, 2022)

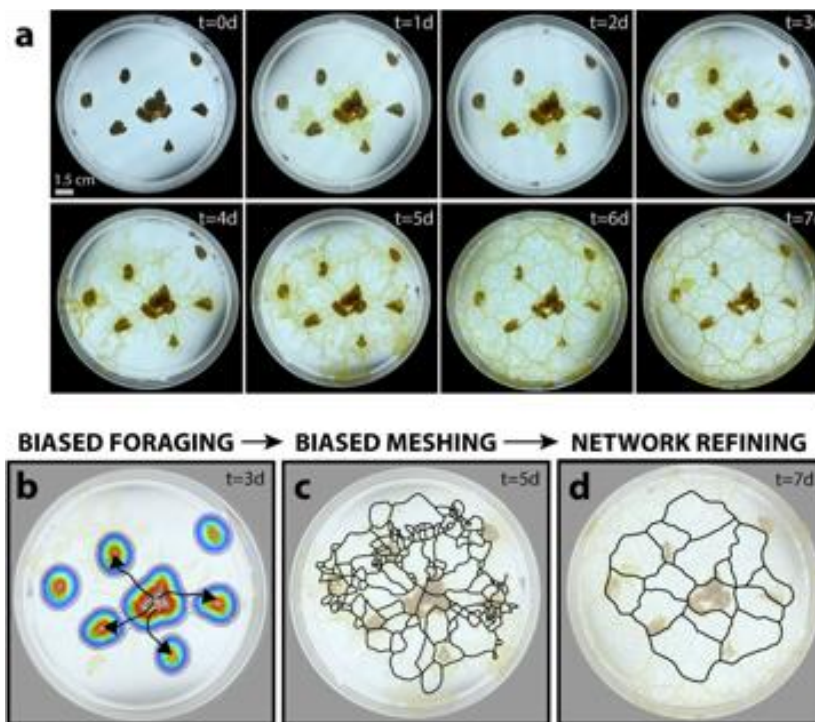


Figure 4. Principes simplifiés de la croissance plasmodiale de *Physarum polycephalum*. (Kay *et al.*, 2022)

(a) Croissance du plasmodium sur une période d'observation de sept jours. (b) Représentation illustrée de la croissance plasmodiale en fonction de la proximité de la source de nourriture. Ce comportement conduit à un regroupement des mailles (phase 1). (c) Représentation illustrée du regroupement de mailles, avec les régions de mailles illustrées. (d) Représentation illustrée du raffinement du réseau et de l'optimisation du plus court chemin (phase 2), où seul un réseau raffiné subsiste et est illustré. Illustrations superposées à des photographies réelles. (Kay *et al.*, 2022)

Cet article est la recherche d'une méthode afin de concevoir et d'optimiser les réseaux urbains à travers d'analyse des comportements des organismes microscopiques et leur façon de développement. L'objet de recherche et le Physarum qui est également utile comme modèles biologiques pour l'identification des réseaux informatiques adaptatifs.

Les éléments biologiques de ces réseaux fournissent des principes de base afin de résoudre les problèmes de conception des réseaux urbains.

Physarum polycephalum est une amibe unicellulaire d'une fertilité exceptionnelle qui a une forte tendance à la conception. Au fil du temps Physarum trouve des sources discrètes à sa proximité, il évolue d'un réseau préliminaire à un réseau complexe, composé de voies directes et indirectes entre les sources de nourriture. Cet organisme est basé sur une forme décentralisée et adaptative d'informatique physique. Physarum est un ordinateur biologique. (Kay *et al.*, 2022)

« Physarum est capable de naviguer dans des labyrinthes dont la longueur du chemin est minimale. »

Les organismes construisent initialement des réseaux denses et contigus qui améliorent les voies optimales au fur et à mesure grâce à une rétroaction constructive des courants plasmatiques. La morphologie vasculaire sert de modèle biologique polyvalent pour la conception de réseaux à l'échelle de la ville. Étant donné que les mécanismes de rétroaction constructive du corps sont contournés, un outil de conception de réseau plus polyvalent et accessible peut être établi.

Bien que cet organisme soit capable de reconstruire de manière impressionnante des réseaux urbains préexistants conçus par l'homme, les écarts entre l'infrastructure urbaine et les analogues de Physarum cultivés biologiquement sont essentiels à l'urbanisme de Physarum, aux réseaux urbains, et il s'est avéré tout aussi important pour comprendre les fonctions de son intelligence.

Les chercheurs ont identifié deux principes simples dans la croissance du Physarum.

1. Physarum se forge sous l'influence des attractifs dans sa recherche de nourriture et établit un maillage très détaillé qui est biaisé par ce champ attractif.
2. Physarum a affiné ce réseau détaillé, en établissant un réseau plus simple pour résoudre le problème de transport multiobjectif. Ce réseau biologique solide ajuste le coût, le temps de trajet et la vulnérabilité.

Dans la simulation du modèle élaboré et à travers des procédures conçues afin d'identifier son comportement, les chercheurs ont démontré les performances du réseau (coût, temps de trajet, vulnérabilité à la perte de puissance) qui étaient presque identiques entre les réseaux du Physarum modélisés et cultivés. Ensuite, en utilisant des techniques qui tirent parti de la transmission d'agents basés sur les attracteurs, ils ont établi des réseaux urbains en utilisant des attracteurs uniques, en particulier des nœuds représentant la densité de population urbaine.

« Nous avons établi trois principes généraux de croissance pour décrire la cellule mobile de Physarum : la recherche biaisée de nourriture, le maillage biaisé et le raffinement du réseau. »

En conclusion, les chercheurs démontrent que les performances du réseau, définies par le coût, le temps de trajet et la fragilité, sont remarquablement similaires entre les systèmes Physarum développés et modélisés. Ainsi que les performances du réseau diffèrent entre leur système et les systèmes d'infrastructures urbaines existants. Les différences de performances peuvent être informatives, car elles aident à mettre en lumière les principales forces, sensibilités et différences de conception entre les systèmes en réseau biologiques et anthropiques.

Physarum comme un ordinateur biologique est utile pour résoudre les problèmes de conception des réseaux de transport. Il est possible de justifier la croissance du Physarum comme un processus en deux étapes (maillage biaisé et raffinement du réseau) ainsi que justifier ce comportement avec un modèle numérique. Le fonctionnement des réseaux générés par le modèle étudié est quasiment identique à celui des organismes biologiques, mais différent de celui des infrastructures urbaines existantes. Le modèle permet une conception de réseau multiobjectif et réglable indépendamment des régimes environnementaux. Il peut donc être utilisé comme un outil de conception des réseaux urbains basés sur des données biologiques.

3.2.1.1.3 Expérience avec le plug-in Physarealm

3.2.1.1.3.1 Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla A Perspective from Grasshopper

Sumaiya Binte Azad

Department of Architecture, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh (Azad, 2021)

Dans cet article, l'auteur parle du projet de pont polyvalent de Padma, une étude qui provoque l'émergence de plusieurs projets ultérieurs au Bangladesh, parmi lesquels le développement du port de Mongla est l'un des plus importants. « Mongla faisant partie intégrante du sud du Bangladesh, le gouvernement a pris des initiatives pour intégrer les usages portuaires des pays voisins. »

Cette étude a l'objectif de développer une infrastructure de transport intelligente régionale grâce aux avancées informatiques au profit des habitants, offrant des itinéraires de marche pratiques et confortables pour les navetteurs et créant des zones tampons accessibles entre tous les terminaux, réduire les distances de marche entre les terminaux, résoudre les conflits entre les passagers et les véhicules, désigner des zones spécifiques pour le service, et finalement augmenter le nombre d'installations existantes.

Cette recherche propose une nouvelle méthode qui peut aboutir à une proposition systématique bidimensionnelle ; cela est pour remplacer ou améliorer l'ancienne approche de pensée analogique pour analyser le tissu urbain de Mongla. Cette nouvelle méthode sera mise en place à l'aide du processus de conception paramétrique.

« Un plugin "Grasshopper" basé sur Rhinoceros est utilisé pour créer un prototype de modèle de circulation. "Physarealm" est un algorithme de modélisation de stigmergie basé sur des agents, programmé sur Physarum Polycephalum et similaire à l'algorithme des colonies de fourmis. »

Le modèle présenté reproduit le comportement biologique de Physarum. C'est un réseau de transport qui se forme, grandit et se minimise. « Nous pouvons délimiter le modèle de base à partir de ces résultats de simulation en les simplifiant. Ainsi, nous pouvons trouver différentes formes de routes choisies par le Physarum en connectant plusieurs nœuds. »

Les simulations ont été exécutées plusieurs fois en fonction de différents paramètres tels que la population, la densité, la vitesse et la flexibilité. Chaque échantillon a pris 4-5 heures par exécution, on peut observer certains résultats dans la Figure 5. Par la suite, un modèle simplifié a été généré (Figure 6) et les nœuds alimentaires sont identifiables et les chemins proposés par l'algorithme ont été simplifiés.

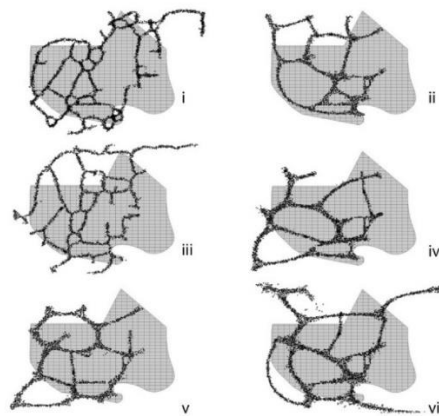


Figure 5.Exemples de modèles de simulation de Physarealm.

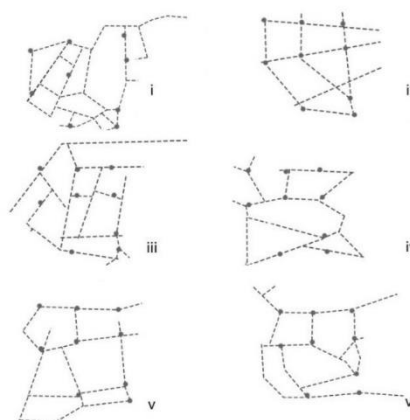


Figure 6.Des modèles simplifiés à partir de simulations.

Ces propositions, simplifiées, offrent certains changements majeurs pour les nouvelles connexions. La grille proposée se traduit par de multiples zonages fragmentés qui agissent comme des espaces tampons pour la ville (Figure 7).

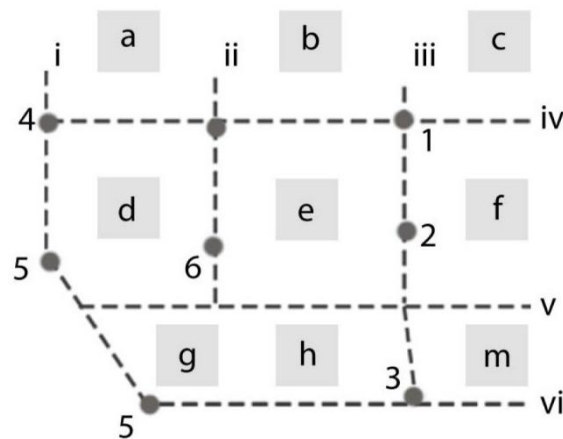


Figure 7. Accès non-véhiculaire proposé. (Azad, 2021)

Le Port Plaza est un vaste paysage naturel pour les installations récréatives et publiques telles que les expositions, les rassemblements publics, les amphithéâtres, les pistes cyclables, les terrains de sports extérieurs, le développement précoce, les divertissements pour les jeunes, la famille et les amis, les coins pour animaux de compagnie et les offres de gym. Loin du terminal, les visiteurs et touristes peuvent toujours se déconnecter un peu de l'agitation. (Azad, 2021)

En résumé, le cadre présenté montre que l'utilisation d'outils numériques et de méthodes de programmation peut être utilisée pour des recherches approfondies et que les résultats peuvent être calculés sous peu de temps. Une fois les bases de données seront mises en place dans les outils informatiques, l'interprétation des données et le plan schématique peuvent être terminés rapidement, de même que la fabrication numérique de l'ensemble du processus de conception.

3.2.1.1.3.2 The visible and invisible network of a self-organizing town

(Lee et Lee, 2018)

Cette étude porte sur le cas d'une ville auto-organisée à Séoul. Elle applique les principes biologiques aux problèmes de conception urbaine. Les simulations basées sur des agents ont été menées pour étudier les réseaux visibles et invisibles de cette ville comprenant les aspects auto-organisés des processus de développement de la ville en explorant les formations de réseaux routiers des mouvements des agents.

L'histoire de la ville commence avec la guerre de Corée, lorsque la ville n'était pas surveillée par le gouvernement. Les rues et les maisons ont été construites spontanément par des réfugiés du nord. Depuis cette époque, le village de Haebangchon a été sous-développé pour des raisons différentes. Cette ville capture les caractéristiques d'une ville auto-organisée, ouverte, complexe, instable

et non linéaire, intimement liée à l'urbanisme chaotique du début du 20^e siècle. (Lee et Lee, 2018)

La ville est à la recherche d'une amélioration pour cette zone afin que cette partie de la ville ne soit plus isolée, la connectivité et l'accessibilité sont l'essentielle pour sa planification urbaine créative. Le nouveau réseau de circulation doit minimiser les embouteillages et garantir une sécurité. Ce quartier doit pouvoir réconcilier sa connexion avec d'autres centres régionaux afin de ne pas perdre la population plus que son état actuel.

La modélisation basée sur les agents (agent-based modeling) est utilisée pour simuler les flux de comportements individuels en relation avec leur environnement. Dans les modèles d'agents, les agents individuels forment les réseaux urbains comme le résultat de leurs comportements et leurs actions ; leurs comportements dynamiques interconnectés dans la ville deviennent la causalité circulaire de la formation de la ville.

« Cette étude applique l'auto-organisation comme méthodologie pour voir le processus complexe des réseaux urbains causé par les interactions entre les structures spatiales et les comportements individuels. » Pour ce but un modèle synthétique dynamique des réseaux de Physarum Polycephalum est étudié pour comprendre les aspects d'auto-organisation des processus de développement urbain et pour prédire les chemins optimisés pour l'avenir.

La simulation est réalisée sur un modèle numérique de terrain 3D pour explorer ses implications sur le système réel et le modèle de terrain 3D est développé par Rhino et Grasshopper.

Dans la Figure 8, les émetteurs sont les lieux centraux les plus peuplés, les aliments sont fixés avec les points de repère et les bâtiments historiques de 1945 à aujourd'hui, y compris les églises, les écoles, les centres communautaires et les zones de marché de Haebangchon.

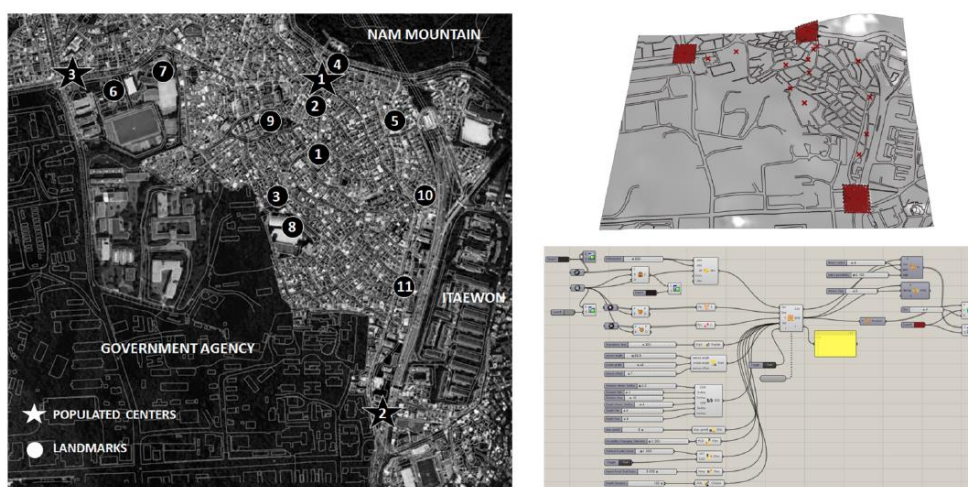


Figure 8. Configuration de l'environnement de simulation. (Lee et Lee, 2018)

Les simulations ont trouvé que la configuration spatiale des traces d'agent correspond aux limites actuelles de la zone, et la transformation de la configuration spatiale illustre le processus de développement. En modélisant la migration des agents des centres en expansion, nous pouvons montrer comment les centres urbains engendrent, évoluent et façonnent des systèmes régionaux entiers.

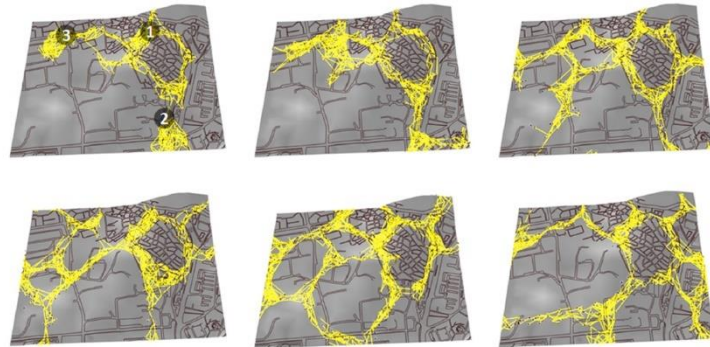


Figure 9. L'émergence de particules d'agents sur un modèle de terrain 3D. (Lee et Lee, 2018)

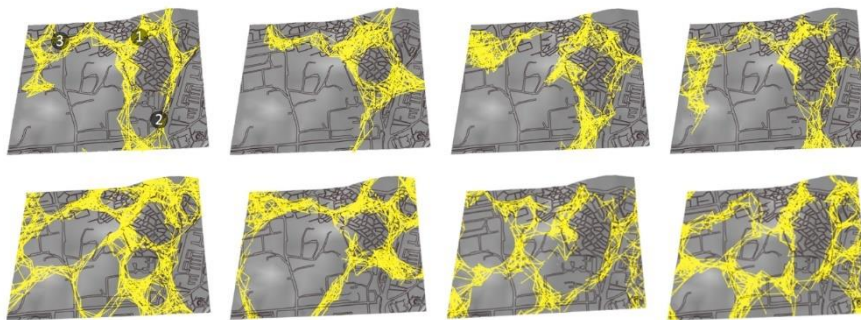


Figure 10. L'émergence de réseaux de particules d'agents sur le modèle de terrain 3D. (Lee et Lee, 2018)

Ensuite, les chemins du réseau sont étudiés à travers des simulations avec différentes valeurs de contrôle des paramètres de comportement des agents, dans le but de trouver le réseau urbain optimal pour les applications futures en agençant les couches optimales de la structure du réseau. « Comme les vaisseaux sanguins », la largeur des routes doit être grande ou petite en fonction de la quantité de mobilisation nécessaire. Cependant, dans le système de voies actuel de Haebangchon, les routes sont étroites et de largeur similaire et la hiérarchie des voies est invisible ». Dans les résultats de la simulation, les valeurs de contrôle de certains réseaux routiers changent constamment, ce qui indique qu'ils devraient être planifiés comme des routes principales pour une circulation urbaine fluide et efficace dans des conditions changeantes. Dans le cadre du récent plan de déménagement des agences gouvernementales à Haebangchon, ces connaissances et ces résultats peuvent contribuer à la recherche d'un plan de loisirs constructif permettant d'éviter que la région ne soit isolée ou sous-développée, avec une forte perte de population.

En conclusion, cette étude contribue à la compréhension des systèmes urbains complexes en étudiant les couches visibles et invisibles de la structure du réseau, qui est un facteur important dans la replanification des systèmes routiers. Les conditions changeantes de la ville nécessitent la replanification du réseau routier dans une variété de situations qui pourraient affecter de fortes augmentations ou diminutions de la population. L'application de simulations basées sur des agents peut être un outil pour trouver des solutions.

3.2.1.2 Expérience à l'échelle architecturale : On slime molds and corridors

(Veloso et Krishnamurti, 2016)

Cet article répond à deux questions spécifiques :

1. « Comment représenter un réseau de circulation pour une intégration spécifique des graphes d'accès/adjacence. »
2. « Comment concevoir de bonnes solutions circulatoires pour l'aménagement qui optimise ce réseau. »

Un schéma représente le réseau de circulation, un squelette droit adapté, basé sur les limites des unités spatiales. Le modèle {(Tero *et al.*, 2006, 2007) dans (Veloso et Krishnamurti, 2016)} avait été mis en service afin de concevoir des alternatives de circulation possibles, ensuite une méthode originale, appelée Sélection du graphe d'adjacence (AGS) s'est développée pour générer des solutions de circulation pour les arrangements. Comme cas de test initial pour AGS, le plan du rez-de-chaussée du Louvre Abu Dhabi est choisi.

Le point de départ dans cette recherche est la théorie de Graphe, y compris des nœuds et des connexions. Cela a été superposé sur le plan du bâtiment. Les murs sont les réseaux qui relient les unités spatiales (nœuds) c'est-à-dire les coins. Enfin les graphes d'accès représentent la connexion entre les espaces. Il s'agit d'un sous-graphe du graphe d'adjacence, car les nœuds représentent les espaces et les arêtes ne représentent que les espaces adjacents reliés par des portes ou des ouvertures.

La distinction entre les salles spécialisées et les systèmes de circulation spécialisés est problématique pour la mise en place des espaces basée sur des représentations de contiguïté/accès. La configuration spatiale des niches ne peut indiquer qu'un passage direct entre des pièces adjacentes, et non des couloirs. Les unités spatiales qui doivent être connectées ne sont pas toujours continues en raison de conflits avec d'autres unités spatiales ou même de contraintes externes telles que la visibilité, l'orientation, l'éclairage, etc.

La méthode choisie répond à deux questions :

1. Comment représenter tous les éléments de circulations probables de ces unités spatiales
2. Comment générer de bonnes solutions de circulation à partir de sous-ensembles de ce réseau complet selon le graphe d'adjacence.

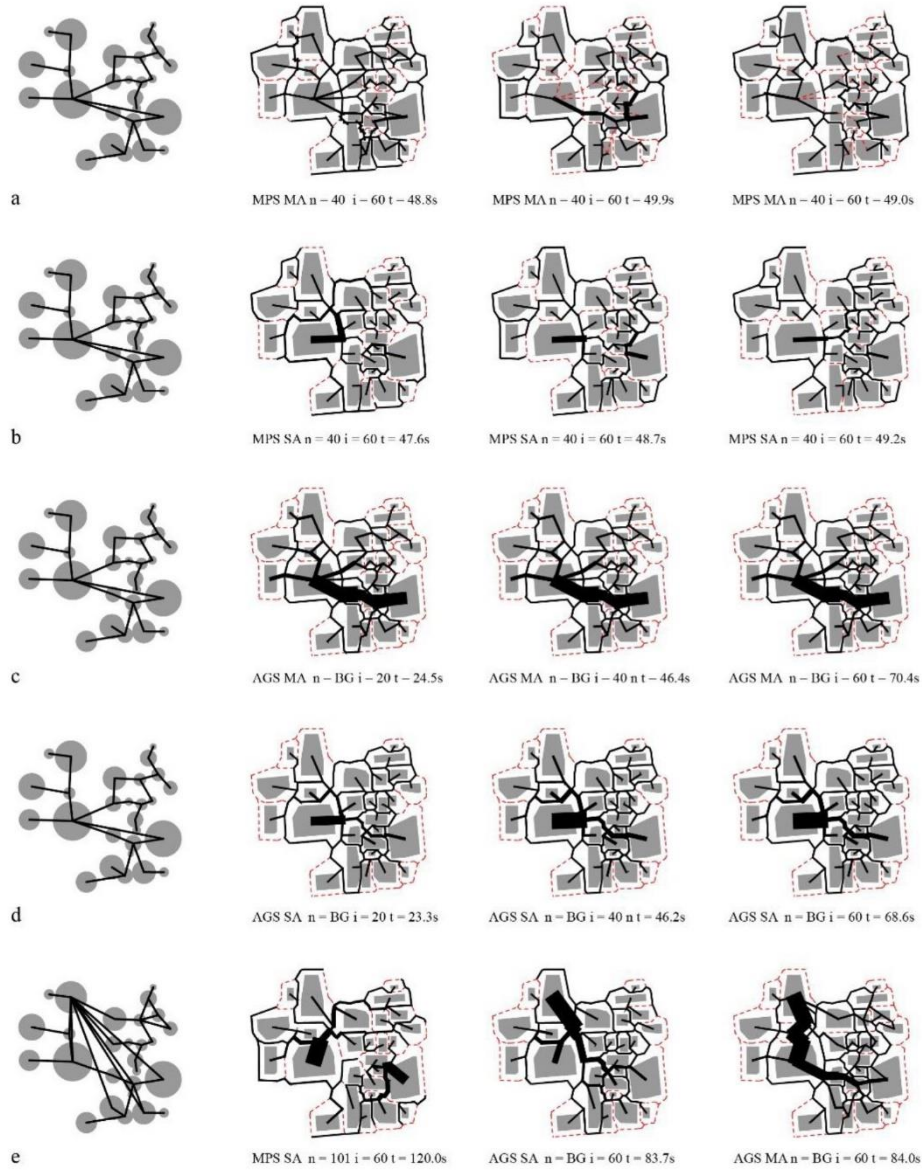
Une approche de conception informatique est développée pour répondre aux limites de la représentation de graphe adjacent, que nous appliquons ensuite aux cas de test pour déterminer sa faisabilité initiale. Afin de répondre aux questions précédentes, les chercheurs ont initialisé les démarches suivantes :

1. Rajouter des réseaux complémentaires considérant les propriétés géométriques du système circulatoire. Le réseau peut contenir non seulement des connexions en enfilade, mais également des couloirs entre les limites d'unités spatiales.
2. Trouver un algorithme qui sélectionne et redimensionne un sous-ensemble de toutes les différentes connexions possibles dans l'ensemble du réseau en tant qu'optimisation combinatoire guidée par un graph adjacent et des paramètres d'algorithme.

Les espaces du musée ont été générés et vectorisés sur Rhino Grasshopper et GH Python et ensuite, à travers la triangulation de Delaunay un graph avec l'adjacence actuels des unités a modélisé. Les points centraux des triangles se sont reliés, mais ces connexions ne sont pas sensibles aux limites géométriques des unités spatiales.

La deuxième approche est le squelette droit qui porte sur l'élaboration des réseaux à partir des segments de lignes décalés entre la géométrie préexistante, formant un squelette interne ou externe relié aux nœuds d'origine par des diagonales. Il crée un réseau adaptatif cellulaire polygonal adapté aux limites spatiales des unités.

La troisième approche est le modèle de {(Tero *et al.*, 2006) dans (Veloso et Krishnamurti, 2016)} Cette méthode pourrait être adaptée à la conception de réseaux récurrents car les paramètres, le type de fonction et l'alimentation peuvent contrôler la sortie. Cependant, il y a des limites. TPS(Two Points Selection) et MPS(Multipoint Selection Method) reposent sur une sélection probable, ce qui signifie que la sortie peut varier. (Figure 11)



(a) Three variations of MPS and multiple access (MA), 40 samples per step and 60 steps; (b) Three variations of MPS and single access (SA), 40 samples per step and 60 steps; (c) A sequence of AGS and multiple access, samples defined by graph, 20, 40 and 60 steps; (d) A sequence of AGS and single access, samples defined by graph, 20, 40 and 60 steps; (e) A different graph with corresponding MPS + SA, AGS + SA, and AGS + MA

Figure 11. Le développement du Physarum. (Veloso et Krishnamurti, 2016)

3.3 Conclusion de l'état de l'art

Dans le tableau ci-dessous (Figure 12), les recherches menées sur le thème de la recherche du chemin par le Physarum et son algorithme ont été abordées brièvement. Dans ce tableau, la différence entre le sujet de recherche et l'expérience de ce mémoire avec les autres recherches menées dans ce domaine est précisée.

Autrement dit, dans cette expérience et ces simulations, je cherche des similitudes entre la carte historique et les moyens proposés par Physarum. La raison pour laquelle j'ai essayé de trouver ces similitudes est de parvenir à des propositions prospectives qui permettent d'utiliser simultanément les quatre propos mentionnés dans la section ville et Physarum (Complexité, Approche ascendante, Auto-organisations, Émergence) et d'améliorer les réseaux de transport dans la question de la recherche de chemins.

Une autre raison intéressante pour chercher des similitudes possibles, est la manière dont elles influencent la création et la survie des routes historiques dans la carte d'aujourd'hui. Dans le livre Émergence (Johnson, 2004, p. 102), Johnson affirme que les villes apprennent et les endroits où la ville fonctionne bien, c'est le résultat de ce qu'elle a appris au cours de temps.

En tant que système complexe, la ville possède une intelligence décentralisée et le but de l'utilisation d'algorithmes comme Physarum est d'améliorer ou d'utiliser cette intelligence de manière optimale. En d'autres termes, en s'inspirant de structures naturelles comme celle-ci, il est possible de combiner des méthodes ascendantes et descendantes.

Echelle	Types d'expérience	Articles	Référence	Année	Le but	Site d'expérience	2D ou 3D	Méthode et outils	Résultat
Etat de l' Art	Urbaine	Expérience avec organisme naturel	[5]	2010	Apporter plus d'efficacité, rentabilité et résistance aux perturbations ou pannes des réseaux de transport.	Tokyo Japon	2D	Organisme naturel	Auto-optimisations Les méthodes du Physarum produisent un réseau comparable à la tentative humaine prévue en termes de coût, d'efficacité et de tolérance aux pannes.
		Expérience avec l'algorithme							
		Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla: A Perspective from Grasshopper							
	Architecturale	Expérience avec le plug-in Physarealm	[13]	2018	La ville est à la recherche d'une amélioration pour cette zone afin que cette partie auto-organisée de la ville ne soit plus isolée.	Séoul Corée du Sud	3D	Rhino Grasshopper Physarealm	Les conditions changeantes de la ville nécessitent la re planification du réseau routier dans une variété de situations qui pourraient affecter de fortes augmentations ou diminutions de la population. L'application de simulations basées sur des agents peut être un outil pour trouver des solutions.
		On slime molds and corridors							
Mémoire	Urbaine	Le Physarum au service de l'analyse urbaine	[11]	2023	Les réseaux de circulation d'une ville créés par les interactions locales, se ressemblent aux motifs spatiaux créés par le physarum	Louvre Abou Dabi Émirats arabes unis	2D	Grasshopper Python	Les premiers résultats montrent que la méthode proposée est capable de générer un réseau complet et de concevoir de nouvelles connexions sous le contrôle du graphe d'adjacence.
		Expérience avec le plug-in Nuclei							

Figure 12. Conclusion de l'état de l'art. © Zahra ASADOLLAHI

4 Ville et Physarum :

Certaines villes ont une structure régulière, comme Barcelone et Manhattan, et d'autres ont une structure irrégulière. Des structures régulières indiquent l'existence d'une direction centrale pour la formation de ces villes. Les villes à structure irrégulière sont divisées en deux catégories. Les villes dont l'irrégularité est prévue et Villes qui n'ont pas été formées à la suite d'une direction centrale. Dans la plupart des cas, le réseau de circulation des villes peut être le résultat de l'interaction de ces deux méthodes.

Lorsque la ville et ses voiries sont façonnées par des décisions et des interactions à l'échelle locale, cela peut conduire à l'auto organisation. Autrement dit, les décisions locales émergent des nouvelles conditions qui répondent aux besoins de cette région sans la présence de la direction ou d'ordres de l'extérieur.

Ce sujet est très similaire au mécanisme de l'organisme naturel Physarum. Comme la ville, il forme des réseaux de circulation pour répondre à ses besoins.

Cet organisme n'a pas d'intelligence centralisée, et les moyens qu'il propose pour sa survie sont formés par l'interaction entre ses petites entités, qui manquent d'intelligence et ne peuvent assumer que de simples responsabilités. A la fin, cela émerge des conditions qui conduisent à la survie de l'organisme.

Plus précisément, la ville et Physarum ont quatre similitudes principales² :

Complexité : Les deux sont composés de nombreux composants, difficiles à contrôler par une intelligence centrale ou une gestion externe.

Approche ascendante (Bottom-Up) : La ville s'agrandit également en Bottom-Up, tout comme Physarum. En raison de la complexité, la ville et Physarum partent d'une petite échelle et agissent avec des décisions régionales sans savoir le résultat à plus grande échelle.

Auto organisation : La ville, comme Physarum, peut être auto organisée. Cela signifie qu'il n'y a pas besoin de gestion externe pour gérer les parties de la ville qui se sont ainsi développées.

Emergence : Ces trois facteurs provoquent une situation appelée Emergence. Cette situation signifie que la ville elle-même crée des conditions qui la font survivre et mieux fonctionner.

Le but de cette expérience est de trouver la similitude entre les chemins proposés par l'algorithme Physarum et les chemins d'une carte historique. Pour trouver cette similitude, il faut trouver les paramètres et réglages qui donnent le résultat le plus proche des chemins historiques.

² Source : ensemble des lectures faites pour la rédaction du mémoire et plus précisément le livre de l'Emergence(Johnson, 2004)

5 Méthode de la recherche

Les logiciels sont l'une des parties les plus importantes de cette recherche et un sous-ensemble de la méthode de recherche, car il est impossible d'utiliser l'algorithme physarum sans ces outils

5.1 Logiciels

Dans cette section, on présente brièvement les logiciels et plugins utilisés dans ce mémoire.

5.1.1 Rhino

« Le logiciel est développé par Robert McNeel & Associates aux Etats Unis en 1980.

Le logiciel Rhino travaille avec des B-splines rationnelles non uniformes, en anglais Non-Uniform Rational Basic Splines, plus communément appelé NURBS. Cette technologie complexe permet plus de souplesse, de précision, de points de contrôle dans la 3D, pour permettre une modélisation optimale. » (*Présentation du logiciel Rhinocéros 3D*, s. d.)

5.1.2 GrassHopper

Quand on évoque Rhino3D, on pense aussi à Grasshopper qui est une extension de **Rhinoceros 3D**. Ce plug-in permet de **créer des modèles paramétriques grâce à de la programmation visuelle** sur Rhinoceros 3D. La force de **Grasshopper** est son très haut niveau de programmation, c'est à dire très accessible au plus grand nombre, sans avoir besoin de compétences spécifiques en matière de développement.

Grasshopper est donc un outil de programmation visuelle, dédié à des utilisateurs de Rhinoceros 3D qui ne sont pas programmeurs. Il propose d'assembler visuellement des éléments, qui correspondent à des fonctions ou des sous-programmes, dans le but de faciliter considérablement la génération de code, sans aucun risque d'erreur de syntaxe.

Ces trois outils, Rhino, Grass Hopper, et les add-on (comme Physarealm ou Nuclei) nous permettent d'utiliser les algorithmes compliqués comme celui de physarum sans savoir la programmation.

5.1.3 Add-on

5.1.3.1 Physarealm

Physarealm est un add-on développé en 2016 par Ma Yidong. Ce plugin fait partie de son studio de design à l'école d'architecture de l'université de Tsinghua à Pékin en Chine.

« Il s'agit d'un algorithme de stigmergie similaire à l'algorithme des colonies de fourmis.

L'informaticien anglais Jeff Jones a mené des recherches sur la formation physarum. Il a publié « From Pattern Formation to Material Computation »(Jones, 2015). Dans ce livre, il a adopté une

approche de synthèse et un système multi-agent mobile avec des comportements individuels très simples. Le modèle présenté reproduit le comportement biologique de Physarum ; la formation, la croissance et la minimisation des réseaux de transport.

Basé sur le programme Processing du Prof. Jones, Ma Yidong l'a mis en 3D et il a écrit ce plugin pour Rhino/Grasshopper. Il a ajouté quelques nouvelles fonctionnalités pour obtenir une expression plus artistique. De plus, il travaille dessus pour que le physarum puisse fonctionner sur un maillage. »(Ma, 7 novembre 2015/2022)³

Ce complément est utilisé majoritairement pour la recherche de forme (Form Finding) comme on peut observer dans les vidéos sur internet. Source

Il existe juste un article qui utilise le Physarealm pour « comprendre le processus complexe des réseaux urbains causé par les interactions entre les structures spatiales et les comportements individuels ».(Lee et Lee, 2018)

L'utilisation de ce complément n'est pas facile étant donné qu'il n'y a pas des tutoriels ou l'application multiple dans le domaine urbain ou les sujets liés à la ville. De plus, il n'a pas été mis à jour depuis 2016.

5.1.3.2 Nuclei : le fonctionnement du plug-in et le paramétrage

Nuclei est un autre complément pour GrassHopper et comme Physarealm, est basée sur l'article de Jeff Jones intitulé **Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks**.(« Nuclei », 2022)

Ce complément est créé par **Madalin Gheorghe** et il est accessible sur le site <https://www.food4rhino.com> .

Comme Physarealm, Nuclei nous permet de l'utiliser dans l'espace 3D, tandis que l'algorithme de **Jeff Jones** est développé pour expliquer le mécanisme de Physarum dans l'espace 2D.

La description qui suit est le résultat de ma participation à un webinaire organisé par Design Morphine le 28 mars 2021. (« Biomorphic Networks V2.0 », s. d.)

Les illustrations sont reprises du contenu de webinaire(« Biomorphic Networks V2.0 », s. d.) et elles sont été modifiées par l'auteur.⁴

Jeff Jones, informaticien anglais, dans l'article **Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks**.(Jones, 2010) Il a traduit la logique naturelle de Physarum en algorithme afin qu'elle puisse être utilisée dans des simulations numériques.

³ Traduit avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite) et vérifié par l'auteur.

⁴ Les droits de ces contenus appartiennent à Designmorphine et Madalin Gheorghe.

5.1.3.2.1 Mécanisme de l'algorithme

Physarum fonctionne avec la logique de l'intelligence en essaim. L'intelligence en essaim est une intelligence collective qui émerge de l'interaction de petites pièces (dans notre cas, les particules avec d'autres particules) avec l'environnement. Les particules elles-mêmes ne sont pas très intelligentes, mais l'interaction entre elles et l'environnement, toutes ensemble dans une grande population, tend à créer une intelligence qui est plus que la somme de ses parties.

L'algorithme lui-même est assez simple, il fonctionne avec des règles très simples mais, dans ce système génératif, il crée un ensemble émergent qui est plus complexe que ce que nous faisons normalement avec la conception procédurale. (« Biomorphing Networks V2.0 », s. d.)

L'algorithme comporte deux ingrédients : les particules et les voxels.

Les particules sont les membres qui se déplacent et les voxels sont les données structurées derrière les particules qui maintiennent tout en place et permettent à l'algorithme de fonctionner.

Chaque particule a une orientation : elle regarde dans un certain sens et une certaine direction.

Les voxels, sont distribués dans une grille. Ils divisent l'environnement en morceaux d'espace comme on peut le voir sur Figure 13.

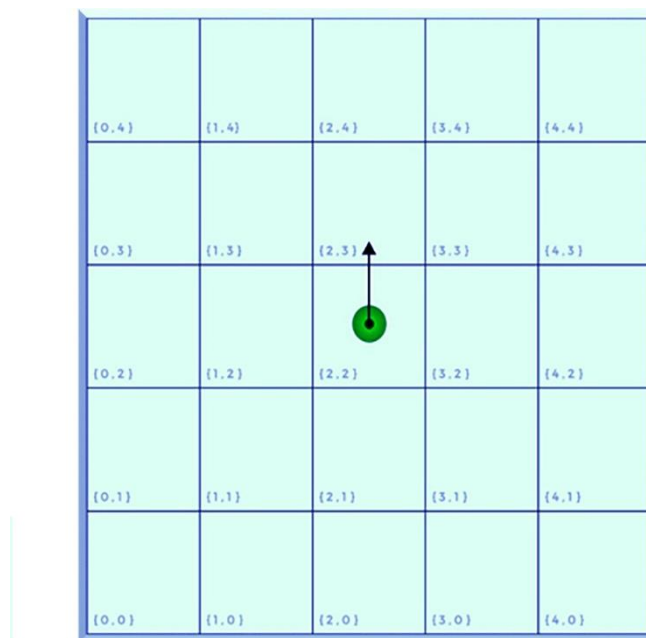


Figure 13. Explication de l'algorithme : voxels et particules. (« Biomorphing Networks V2.0 », s. d.)

Ils peuvent stocker différents types de données, comme leurs adresses, le nombre de particules qui se trouvent à l'intérieur de chaque voxel, le nombre de particules qui l'entourent, ce qui s'est passé quelques images ou itérations auparavant. Ils peuvent stocker une tonne de données dans ces voxels, plus le champ de voxels est dense, plus les données sont précises. (Figure 13)

L'algorithme fonctionne en six étapes :

Détecter les valeurs des voxels (Figure 14 : illustrations 2,3,4)

Tourner la particule vers la valeur la plus élevée (Figure 14 : illustration 5)

Déplacer la particule vers la valeur la plus élevée (Figure 14: illustrations 6)

Déposer les chimio-attracteurs (Figure 14: illustrations 7)

Diffuser les chimio-attracteurs (Figure 14: illustrations 8)

Se faner les chimio-attracteurs (Figure 14 : illustrations 9)

1. Une particule a une distance de détection qui correspond à la longueur de la flèche bleue. La distance de détection signifie qu'elle peut sentir ou voir autour d'elle à une certaine distance.
2. Elle recherche des données dont le nom est densité. Dans cette illustration, nous avons les différentes colorations des voxels, du plus clair au plus foncé. Plus la couleur du voxel est claire, plus sa valeur est élevée et inversement.

La particule regarde autour d'elle à la distance de son capteur. Elle échantillonne le champ de voxels, examine chaque voxel, et lorsqu'elle trouve le voxel ayant la valeur la plus élevée, elle se tourne vers lui.

3. Elle a alors tendance à se déplacer vers lui. Dans le cas illustré, la particule ne quittera pas le voxel initial mais elle le peut.

L'amplitude du mouvement est toujours plus petite que l'amplitude du capteur, c'est normal, tout comme les humains, nous pouvons voir à 20 mètres de distance mais nous ne pourrions pas atteindre en une fraction de seconde cet espace.

4. La particule dépose ces valeurs de densité que l'on appelle des chimio-attracteurs, après s'être déplacée, elle dépose une certaine quantité de chimio-attracteurs qu'elles possèdent.
5. Les particules diffusent ces attracteurs chimiques, de la même manière que les odeurs, ils se diffusent dans l'air et deviennent de plus en plus faibles au fur et à mesure qu'on s'éloigne du voxel initial.
6. Avec la désintégration, nous soustrayons la petite valeur des attracteurs chimiques. Si nous ne faisons pas cette étape, après une centaine d'itérations, tout le champ vectoriel serait rempli de voxels de valeurs élevées.

Ce sont les points les importants et principaux de Nuclei qui permettent à mieux le comprendre et l'utiliser.

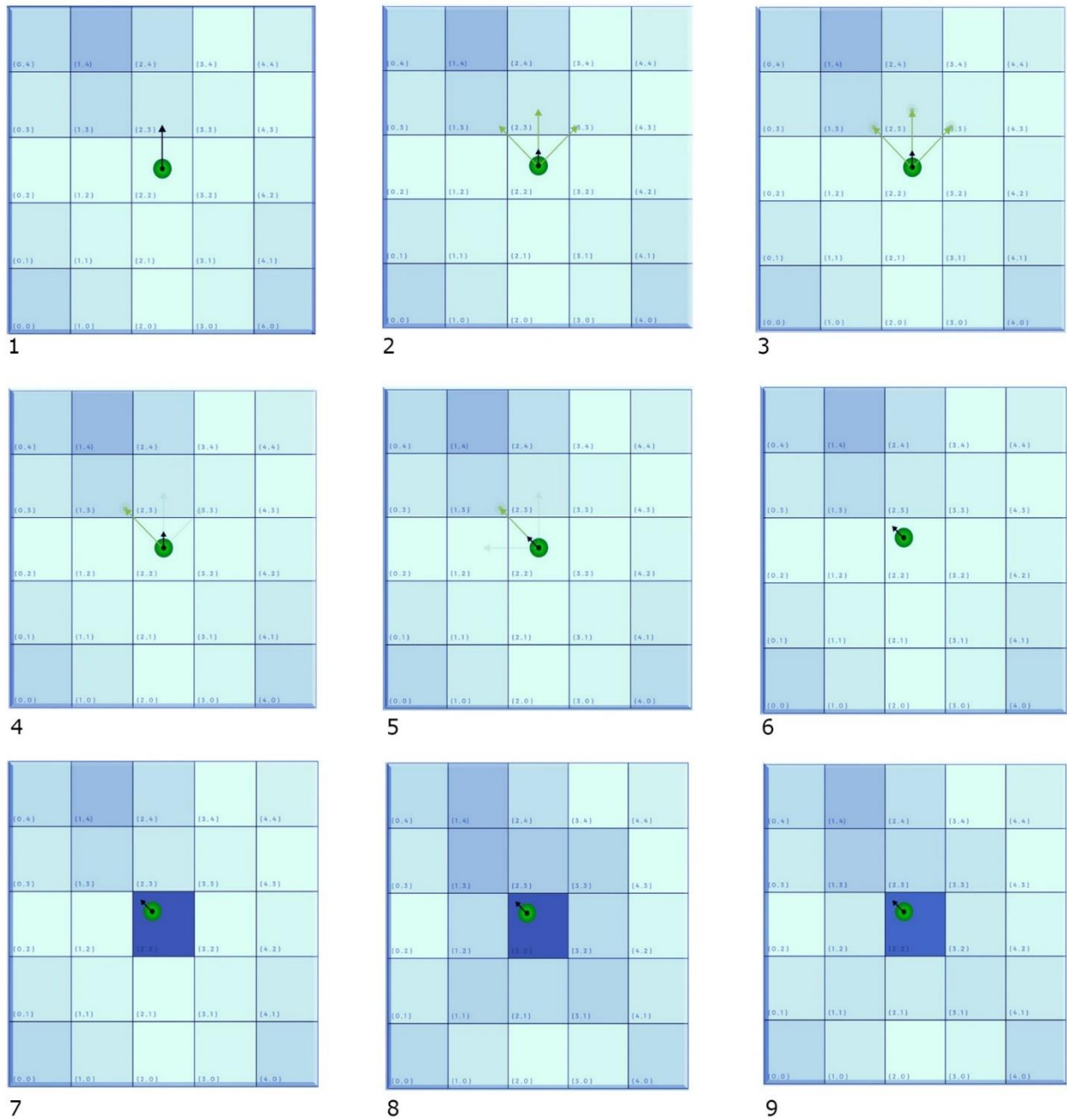


Figure 14. Fonctionnement de l'algorithme. (« Biomorphing Networks V2.0 », s. d.)

5

⁵ Les illustrations explicatives de Nuclei ont l'issue du webinaire (« Biomorphing Networks V2.0 », s. d.), qui s'est tenu le 28 mars 2021, par le site Morphine Design et Madalin Gheorghe, et tous les droits sur ces images leur appartiennent.

5.2 Choix de la ville (terrain de recherche et de l'expérimentation)⁶

Pour faire une simulation dans un contexte urbain, une partie de la ville de « la Courneuve » a été choisi. La raison derrière ce choix était d'en observer une partie sur des cartes historiques, ce qui m'a fourni les caractéristiques nécessaires à la simulation comme :

1. le nombre limité des premiers foyers ou des premières agglomérations,
2. L'existence d'un nombre dénombrable de réseaux de communication dans une grande échelle.

Ces deux facteurs permettent d'avoir un site simplifié pour faire la simulation. Par conséquent paramètres utilisés auront besoin de moins de complexité.

A cet effet, une partie de la ville aux dimensions de 5500 m x 5500 m a été sélectionnée. Les cartes suivantes ont été reçues de site <https://www.geoportail.gouv.fr/> (Géoportail, s. d.):

1. Carte de Cassini (1790) (Figure 15)
2. Carte de l'état majeur (1820_1866) (Figure 16)
3. Carte de 1950 (Figure 17)
4. Photographie aérienne (récente)(Figure 18)
5. Esri world topographic map (récent)(Figure 19)

La carte de Cassini ne peut pas être utilisé comme la carte de base parce qu'il a une faible précision. Mais elle peut être utiles pour les analyses dans les étapes suivantes. Par conséquent, j'utilise la carte de l'état majeur comme la carte de base. Sur cette carte, 10 points, représentant les agglomérations de l'époque (1820_1866), sont souligné en rouge.

On suppose que les voies de communication sont formées entre les agglomérations par conséquent, les 10 agglomérations sont les points qui attirent les particules.

⁶ Toutes les villes peuvent être le sujet d'une telle simulation, ce site est choisi intentionnellement mais il est seulement un site pour faire l'expérience et son choix n'est pas pour une raison particulière, Cependant, l'article (Buhl *et al.*, 2006) peut ouvrir de nouvelles visions pour de telles recherches.



Figure 15. Carte de Cassini (1790). (Géoportail, s. d.)



Figure 16. Carte de l'état majeur (1820_1866). (Géoportail, s. d.)

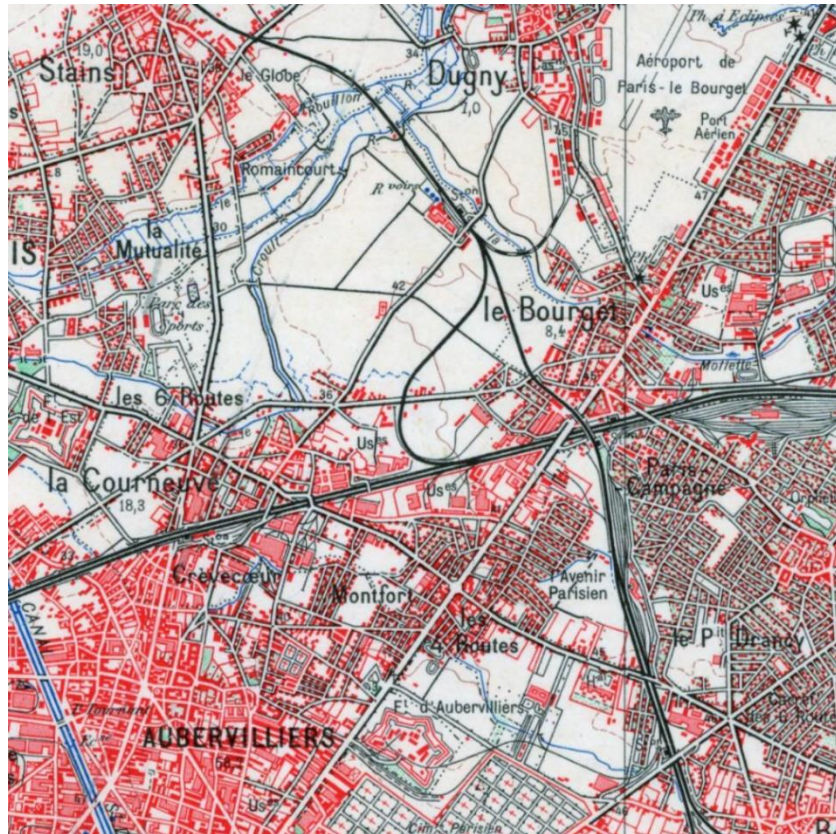


Figure 17. Carte de l'état majeur (1820_1866). (Géoportail, s. d.)



Figure 18. Photographie aérienne (récente) . (Géoportail, s. d.)

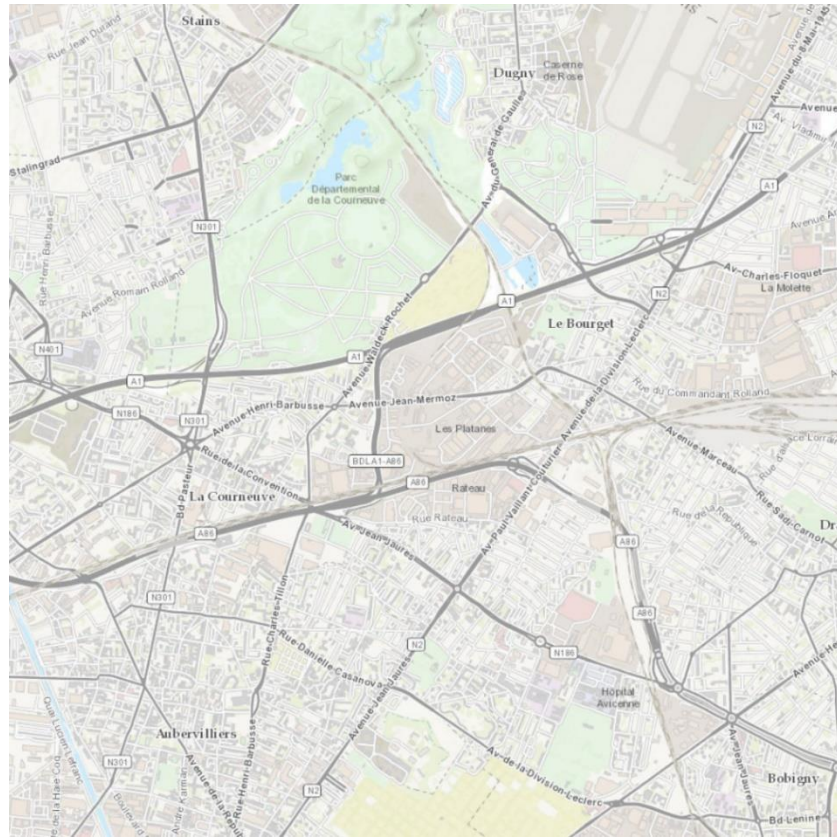


Figure 19. Ph Esri world topographic map (récent). (Géoportail, s. d.). (Géoportail, s. d.).

5.3 Etapes de la recherche

La simulation se fait en deux groupes et chaque groupe est divisé en 3 sous-groupes selon les paramètres.

Dans l'expérience valeurs similaires, tous les 10 points attirent des particules de la même manière. Autrement dit, la densité de l'agglomération n'impacte pas les particules attirées.

Dans l'expérience valeurs différentes, on suppose que plus le quartier est dense, plus il attire des particules.

De ce fait, les points sont notés dans l'ordre suivant : (Figure 20)

Points 3-5-6-9 : densité base

Point 2 : densité moyenne

Points 4-7-8-10 : densité élevée

Point 1 : densité très élevée

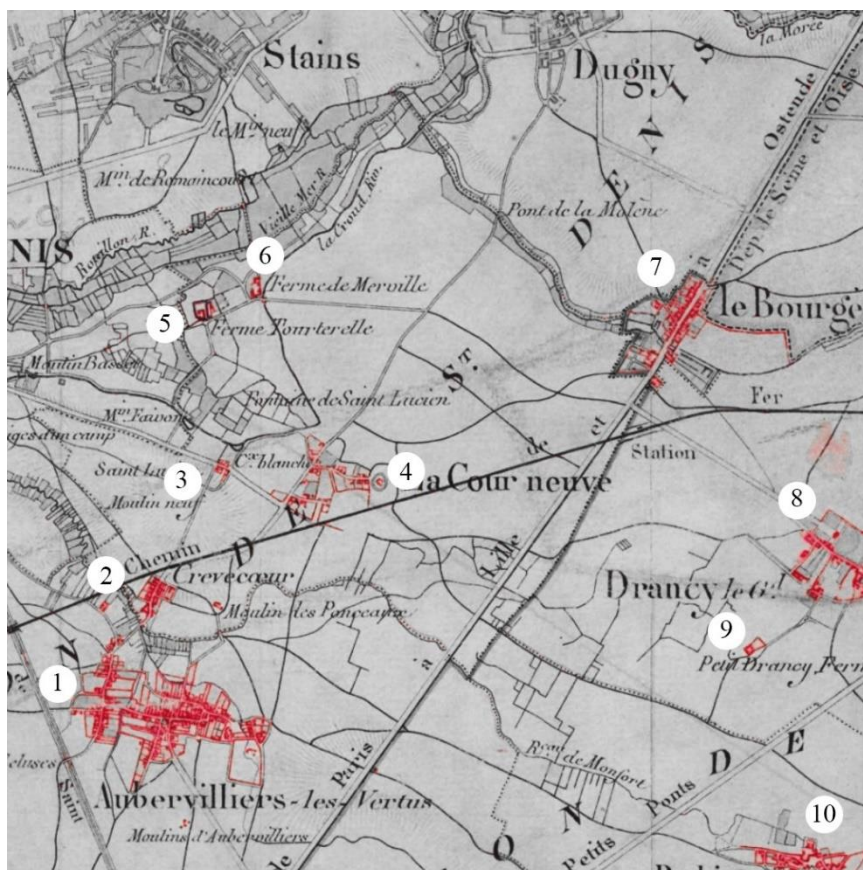


Figure 20. Carte de l'état majeur et ses agglomérations. (Géoportail, s. d.) et © Zahra ASADOLLAHI

5.3.1 Paramètres

Pour attirer ou repousser les particules, il est possible d'utiliser les 3 paramètres suivants :

Nourriture (food)

Densité minimale (minimum density)

Distance de détection (sensor distance)

5.3.1.1 Nourriture (food)

Plus il y a de nourriture dans une zone, plus les particules ont tendance à se déplacer vers ce point afin qu'elles puissent se nourrir de la nourriture. Dans les expériences faites dans un contexte urbain, les points de nutriment sont les endroits qui attirent plus de population.

5.3.1.2 Densité minimale (minimum density)

Plus la densité dans une zone est élevée, plus les particules se déplacent vers elle. Autrement dit, les voxels qui ont une densité plus élevée absorbent plus de particules par défaut selon l'algorithme. La densité la plus faible est zéro. Dans ce cas, si la densité minimale dans certaines zones est supérieure à 0, les voxels de cette zone absorberont plus de particules.

5.3.1.3 Distance de détection (sensor distance)

Cette distance est la distance à laquelle la particule peut observer son environnement, évaluer les voxels et se déplacer vers le voxel qui a la densité la plus élevée, si cette distance augmente, cela signifie que la particule peut voir une distance supplémentaire et savoir où il y a plus de nourriture et plus de densité et déterminer son mouvement en conséquence.

5.3.1.4 Wrap

Dans tous les sous-groupes, les expériences seront faites en deux phases. Avec l'option de **Wrap** (voxel settings) allumée ou éteinte. Cette option détermine le comportement des particules en arrivant au bord de la grille de simulation. Ils peuvent avoir deux comportements :

Wrap False : Les particules meurent.

Wrap True : les particules reviennent à la simulation.

6 Résultat de la recherche

Dans cette section, les résultats obtenus à partir de l'expérience avec le plugin sont affichés.

De chaque simulation, 12 images ont été sélectionnées qui montrent les étapes importantes de 10 000 itérations.

6.1 Présentation de simulations avec le plug-in- Superpositions avec les cartes anciennes

La carte de l'état majeur (1820_1866) a été choisie comme image de fond des simulations afin qu'il soit plus facile d'enregistrer les étapes importantes.

De cette façon, l'auteure a observé la simulation et quand les routes avaient une forme raisonnable ou une similitude avec la carte a été formée, elle a enregistré cette étape.

6.1.1 Expérience « valeurs similaires pour dix points »

Dans cette expérience, tous les 10 points attirent des particules de la même manière. Autrement dit, la densité de l'agglomération n'impacte pas les particules attirées.

Simulation A : distance de détection comme méthode d'attraction - Wrap : True (Figure 21)

Simulation B : distance de détection comme méthode d'attraction - Wrap : False (Figure 22)

Simulation C : densité minimale comme méthode d'attraction - Wrap : True (Figure 23)

Simulation D : densité minimale comme méthode d'attraction - Wrap : False (Figure 24)

Simulation E : nourriture comme méthode d'attraction - Wrap : True (Figure 25)

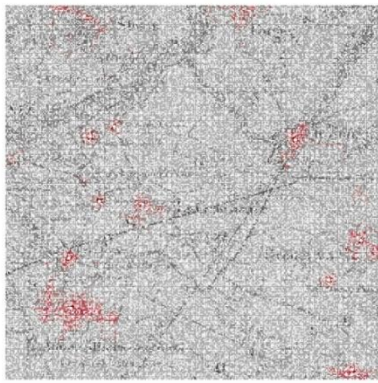
Simulation F : nourriture comme méthode d'attraction - Wrap : False (Figure 26)

Paramètre utilisé pour attirer les particules sont suivants : Distance de détection (sensor distance), densité minimale (minimum density), nourriture(food) (5.3.1)Le paramètre Wrap (True ou False) permet d'avoir des résultats différents. (5.3.1.4)

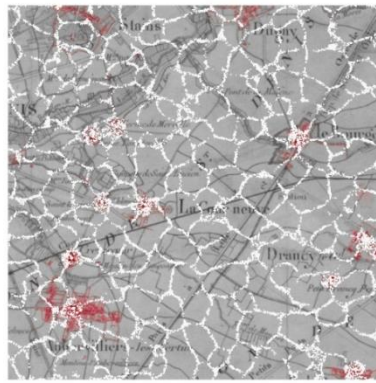
En changeant l'état **boolean** de **True à False**, nous voyons les conditions suivantes. Les voxels choisis de manière aléatoire, possèdent chacun une particule. (Illustration 1 de chaque simulation)

Lorsque nous redémarrons le **timer/trigger**, les particules commencent à bouger. Le résultat suivant n'est obtenu qu'après 60 itérations. Les particules essaient de trouver la manière optimale de relier les dix points. (Illustration 2 de chaque simulation)

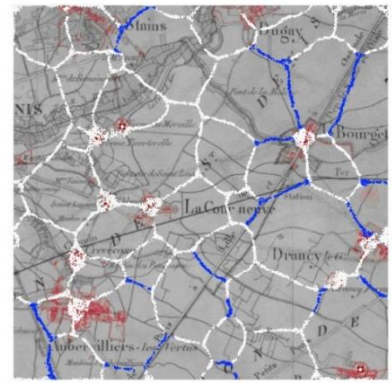
De l'illustration 3 à 12, les résultats de la simulation (en blanc) et les similitudes (en bleu foncé) avec la carte historique sont présentés.



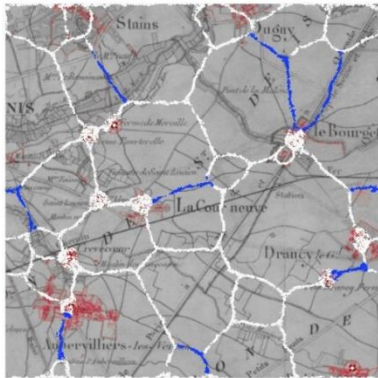
1



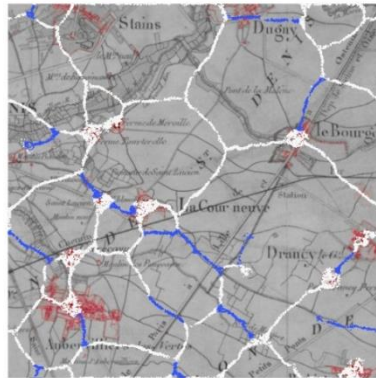
2



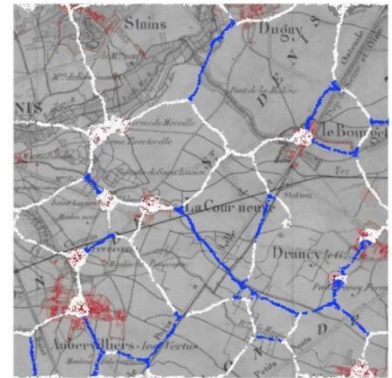
3



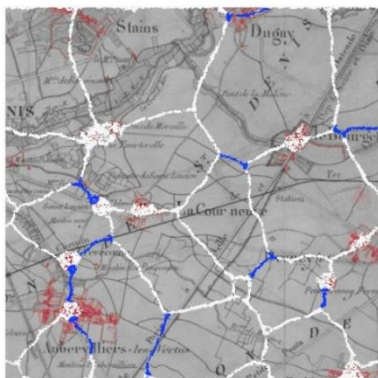
4



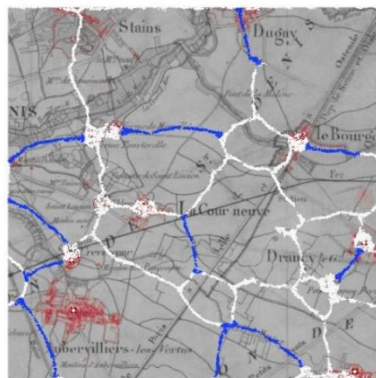
5



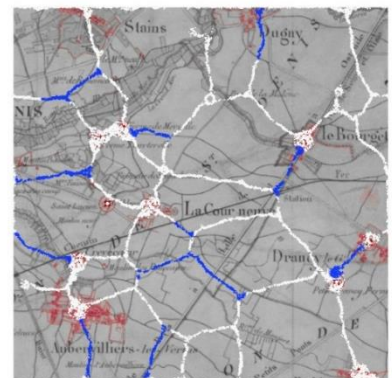
6



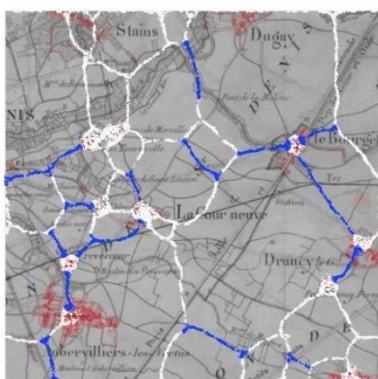
7



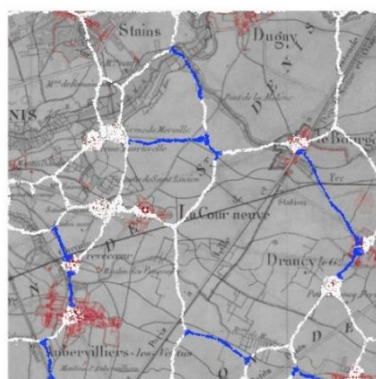
8



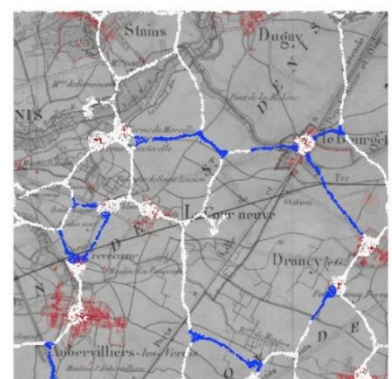
9



10



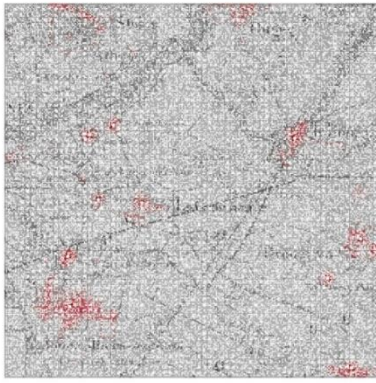
11



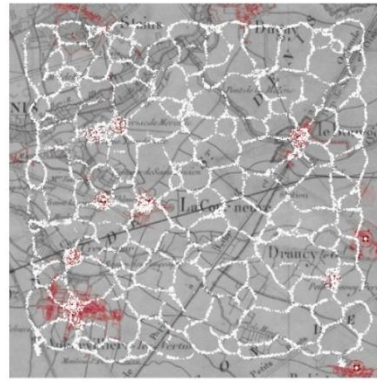
12

Figure 21. Simulation A, distance de détection comme méthode d'attraction.

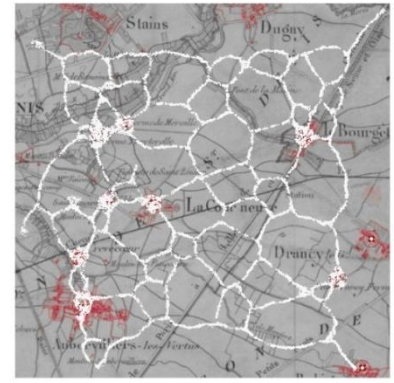
Valeurs similaires pour dix points - Wrap True - Figure A1 à A12. © Zahra ASADOLLAHI



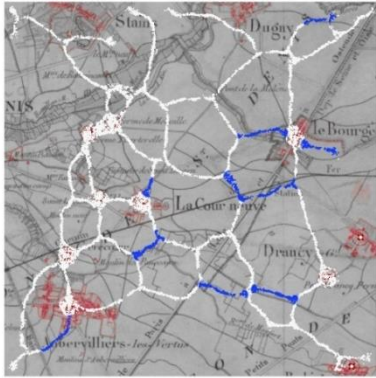
1



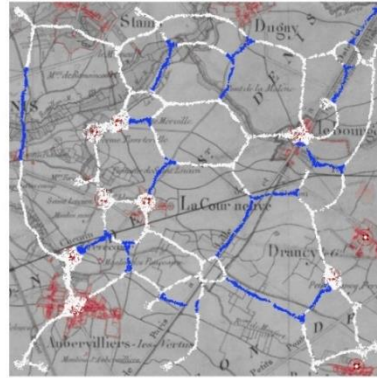
2



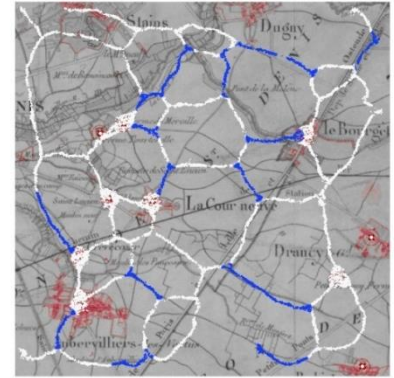
3



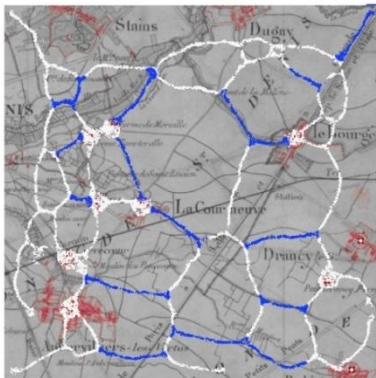
4



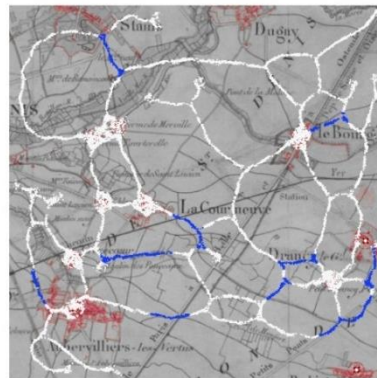
5



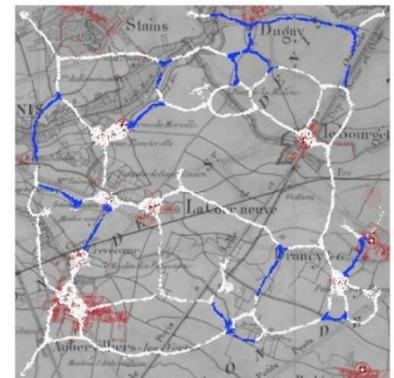
6



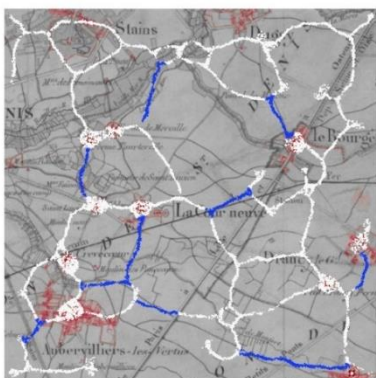
7



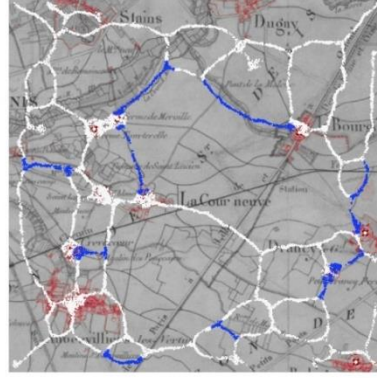
8



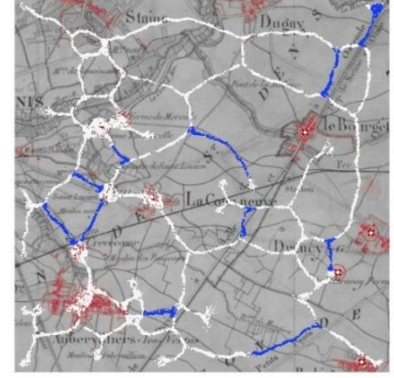
9



10



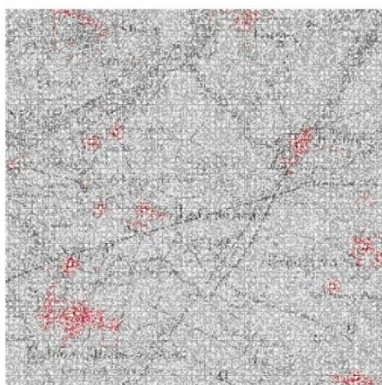
11



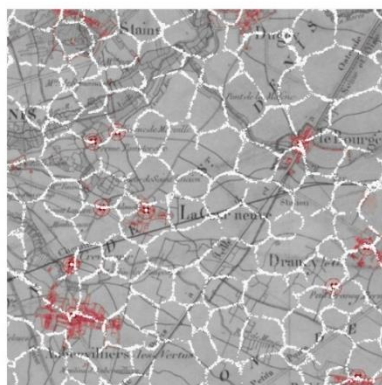
12

Figure 22. Simulation B, distance de détection comme méthode d'attraction.

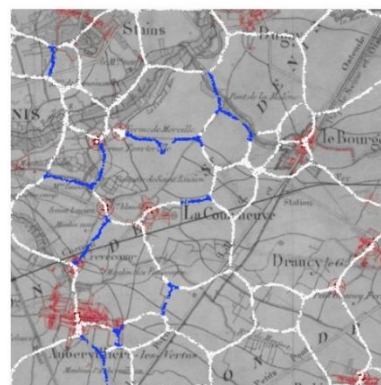
Valeurs similaires pour dix points - Wrap False - Figure B1 à B12. © Zahra ASADOLLAHI



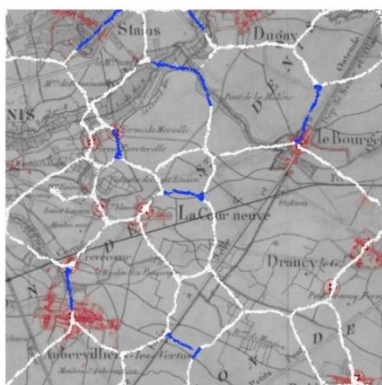
1



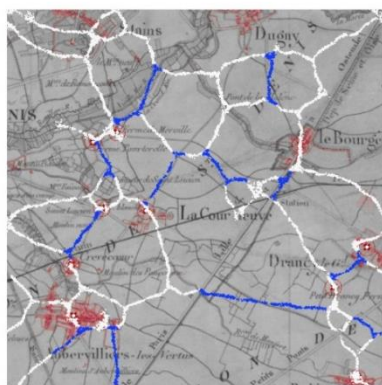
2



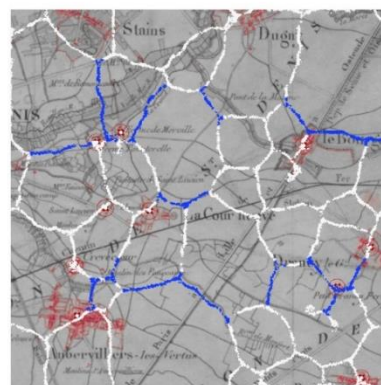
3



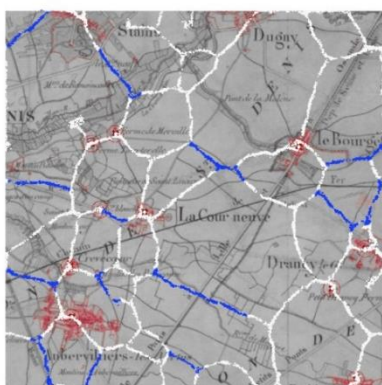
4



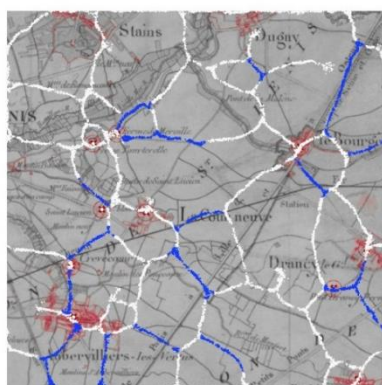
5



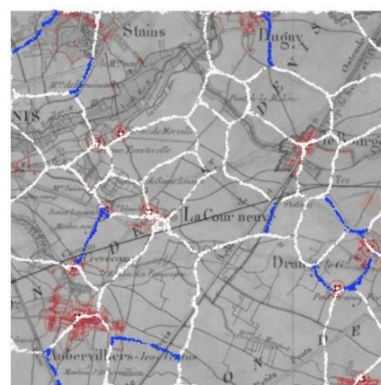
6



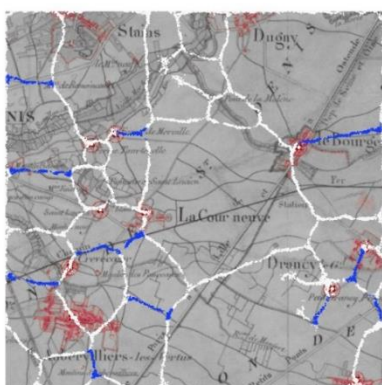
7



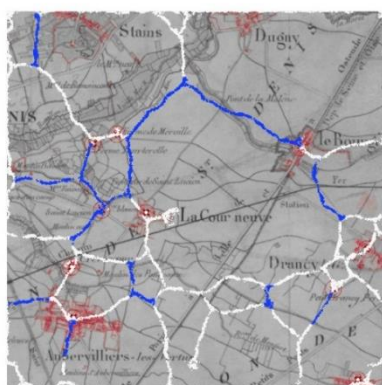
8



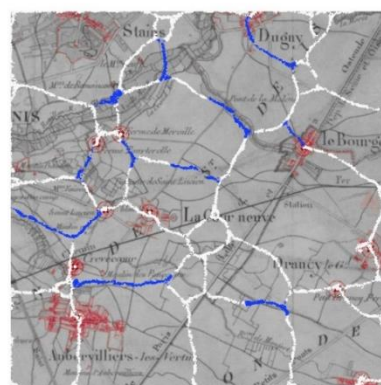
9



10



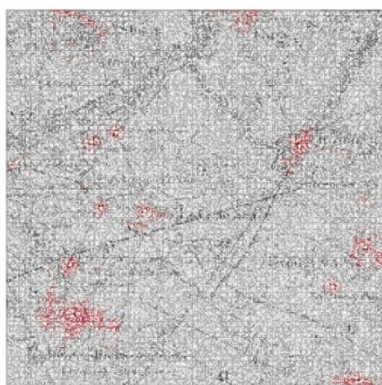
11



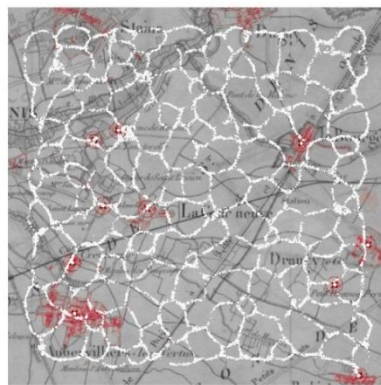
12

Figure 23. Simulation C, densité minimale comme méthode d'attraction.

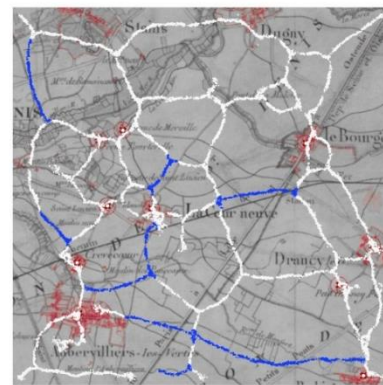
Valeurs similaires pour dix points - Wrap : True - Figure C1 à C12. © Zahra ASADOLLAHI



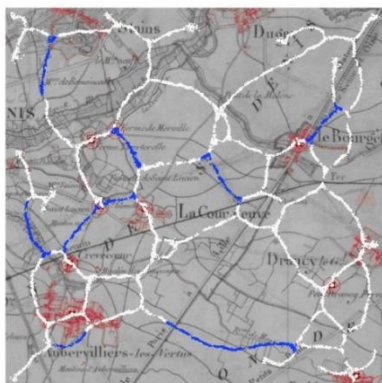
1



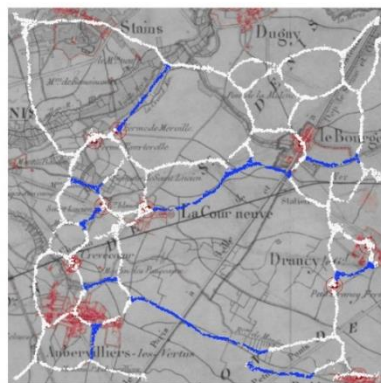
2



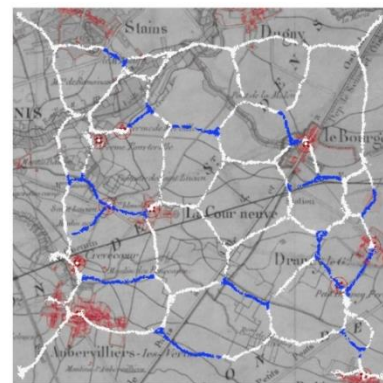
3



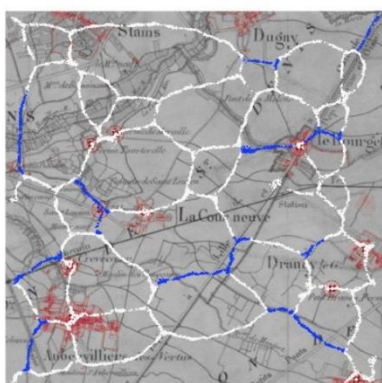
4



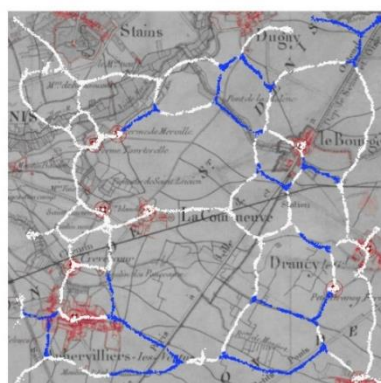
5



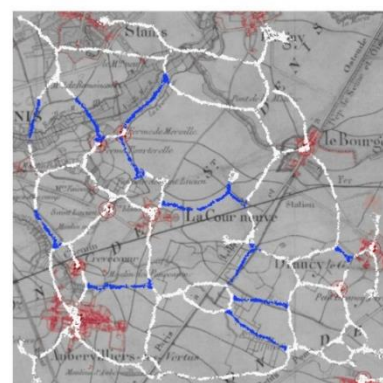
6



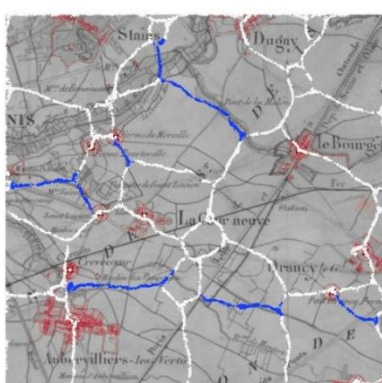
7



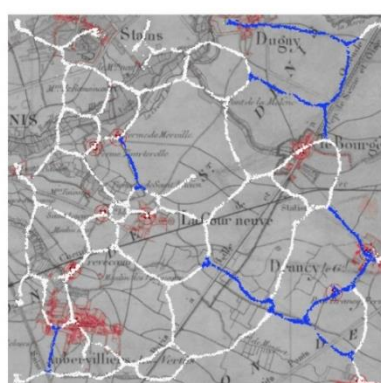
8



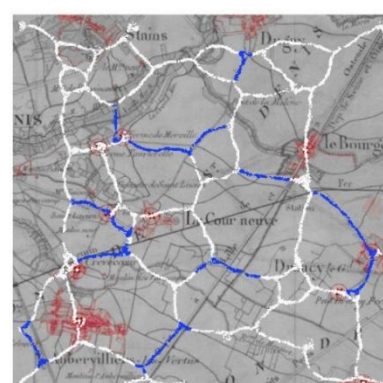
9



10



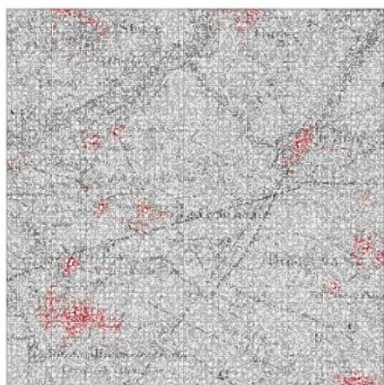
11



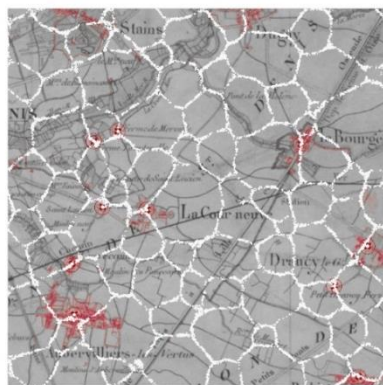
12

Figure 24. Simulation D, densité minimale comme méthode d'attraction.

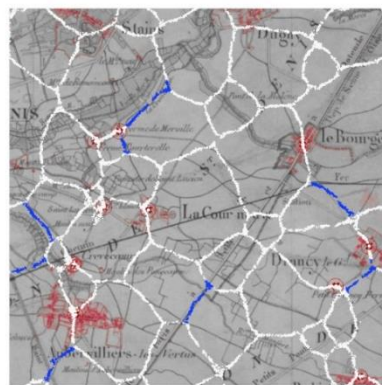
Valeurs similaires pour dix points - Wrap : False - Figure D1 à D12. © Zahra ASADOLLAHI



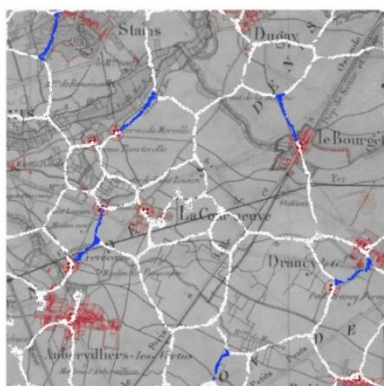
1



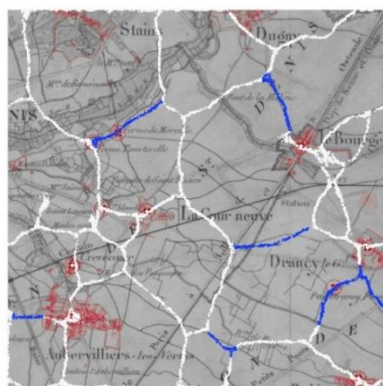
2



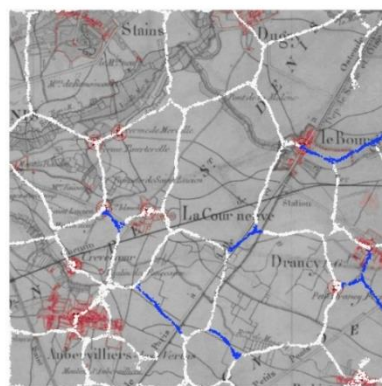
3



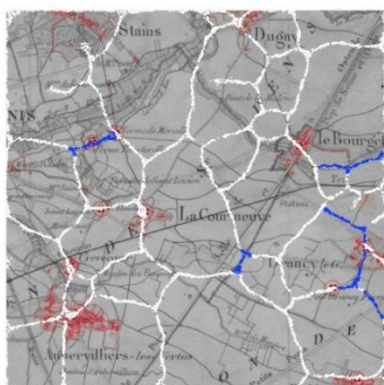
4



5



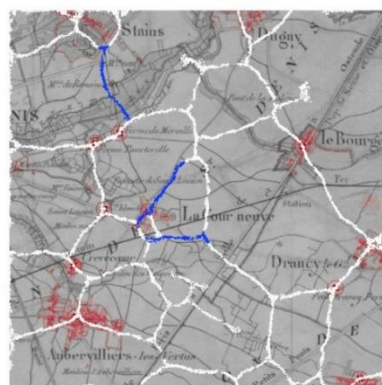
6



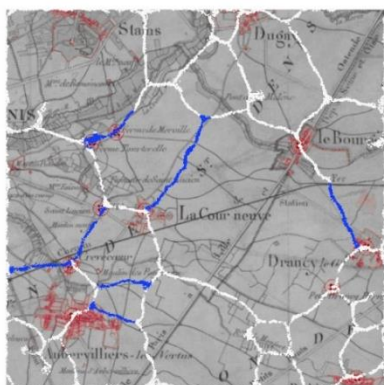
7



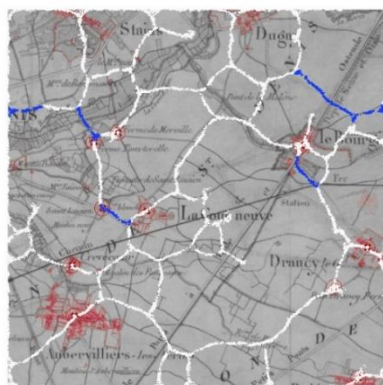
8



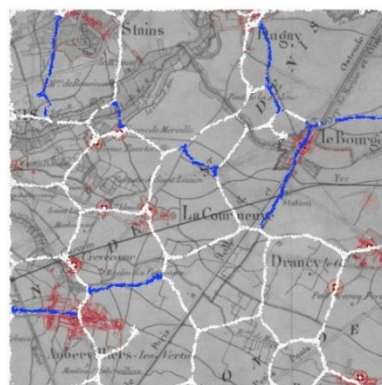
9



10



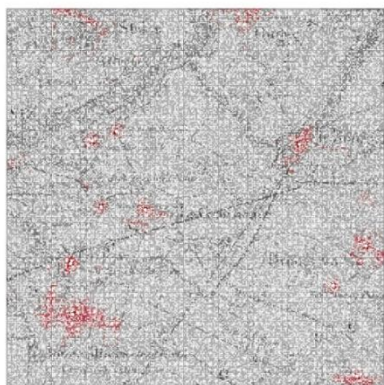
11



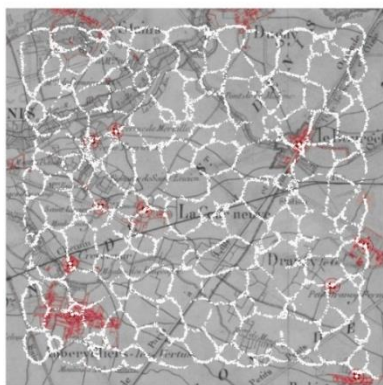
12

Figure 25. Simulation E, nourriture comme méthode d'attraction.

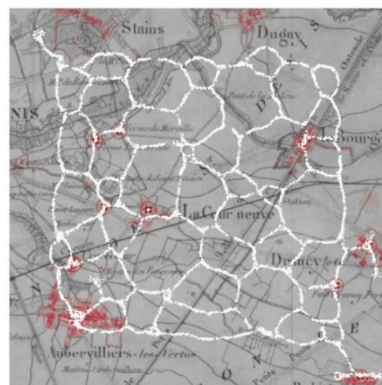
Valeurs similaires pour dix points - Wrap : True - Figure E1 à E12. © Zahra ASADOLLAHI



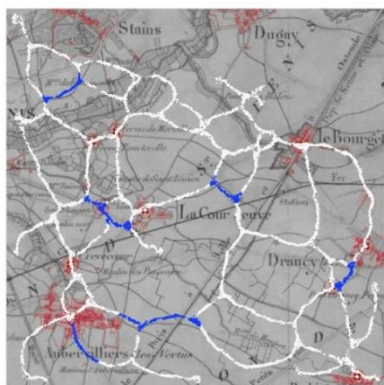
1



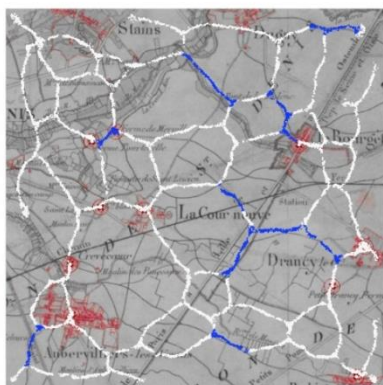
2



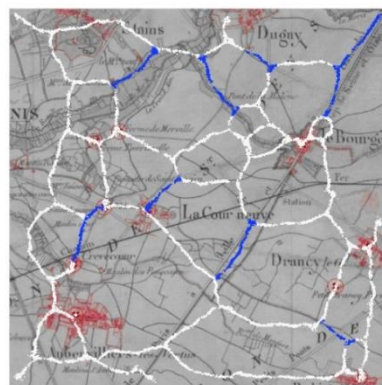
3



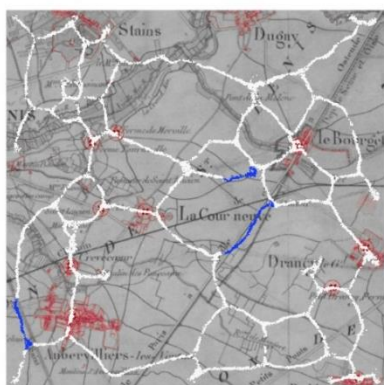
4



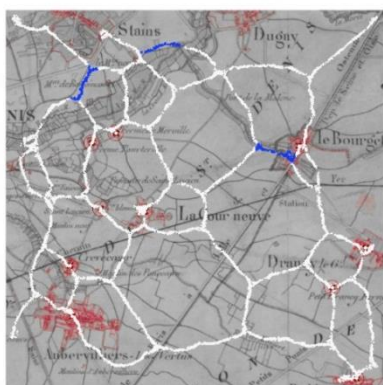
5



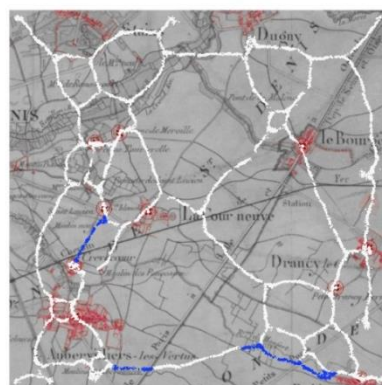
6



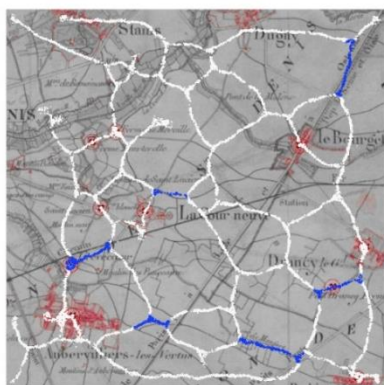
7



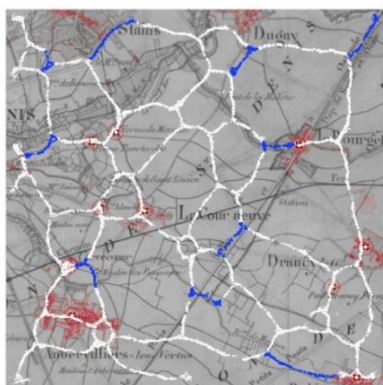
8



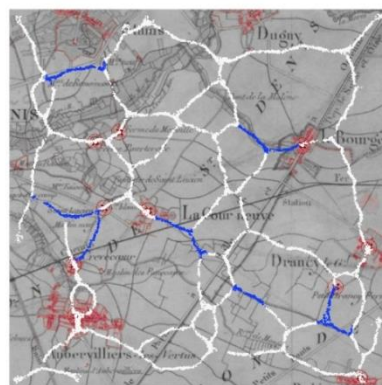
9



10



11



12

Figure 26. Simulation F, nourriture comme méthode d'attraction.

Valeurs similaires pour dix points - Wrap : False - Figure F1 à F12. © Zahra ASADOLLAHI

6.1.2 Expérience « valeurs différentes pour dix points »

Dans cette expérience on suppose que plus le quartier est dense, plus il attire des particules.

Simulation G : distance de détection comme méthode d'attraction - Wrap : True (Figure 27)

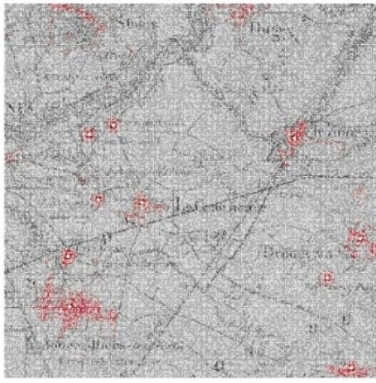
Simulation H : distance de détection comme méthode d'attraction - Wrap : False (Figure 28)

Simulation I : densité minimale comme méthode d'attraction - Wrap : True (Figure 29)

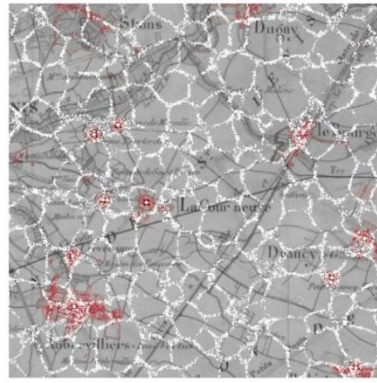
Simulation J : densité minimale comme méthode d'attraction - Wrap : False (Figure 30)

Simulation K : nourriture comme méthode d'attraction - Wrap : True (Figure 31)

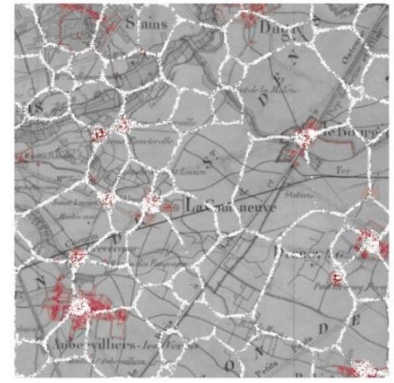
Simulation L : nourriture comme méthode d'attraction - Wrap : False (Figure 32)



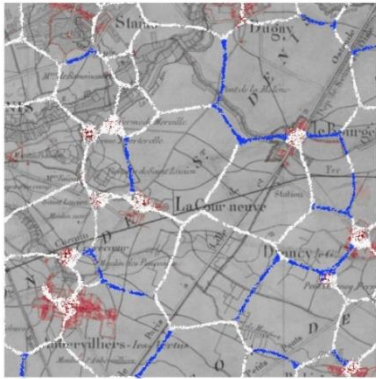
1



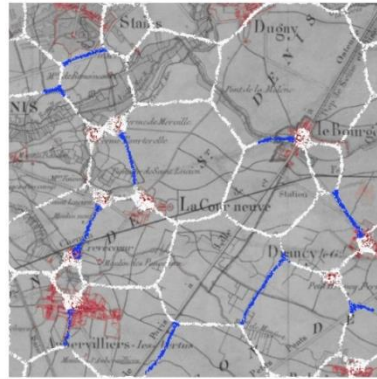
2



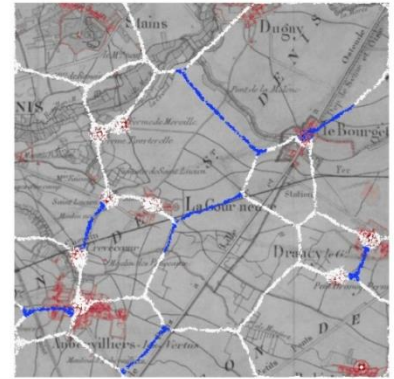
3



4



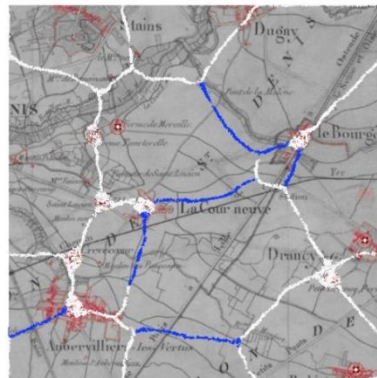
5



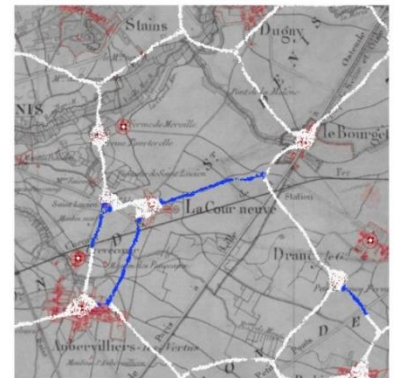
6



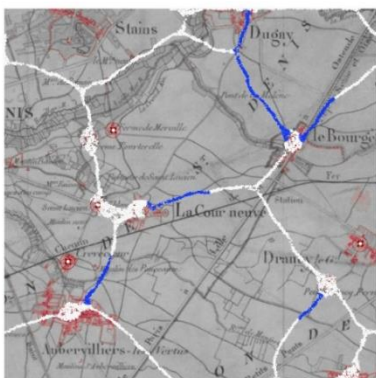
7



8



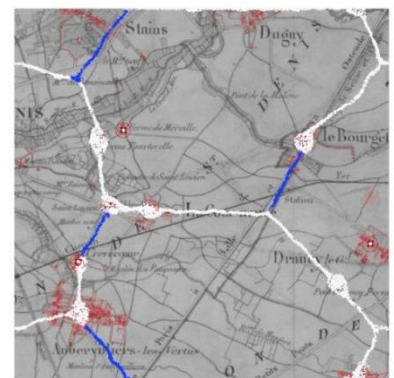
9



10



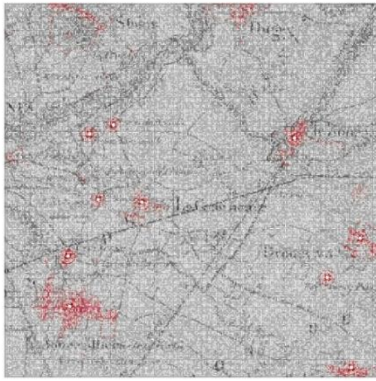
11



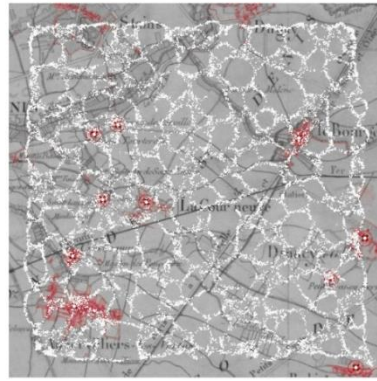
12

Figure 27. Simulation G, distance de détection comme méthode d'attraction.

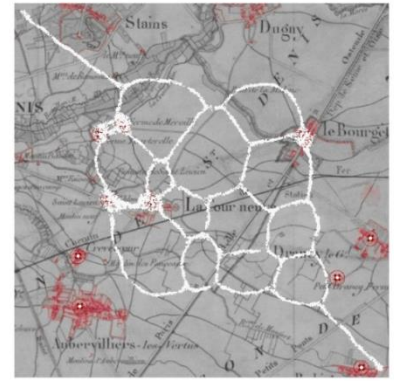
Valeurs différentes pour dix points - Wrap : True - Figure G1 à G12. © Zahra ASADOLLAHI



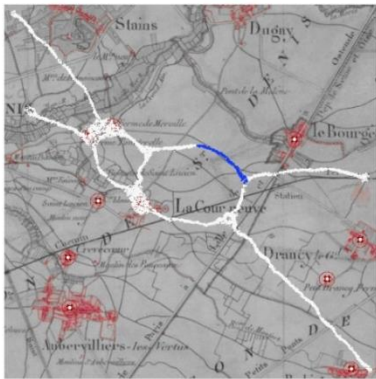
1



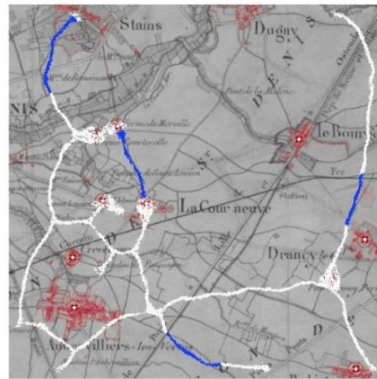
2



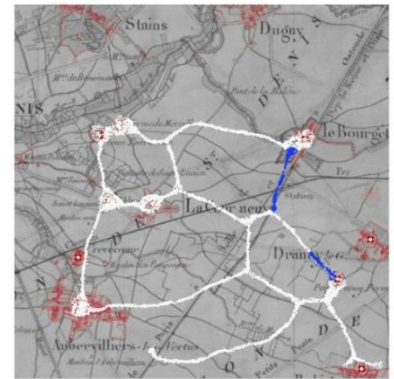
3



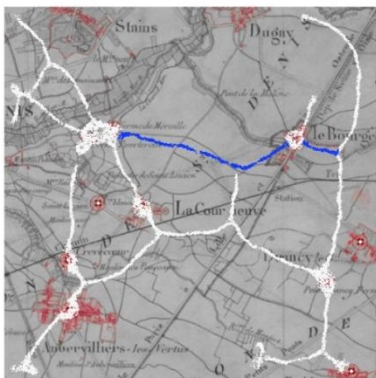
4



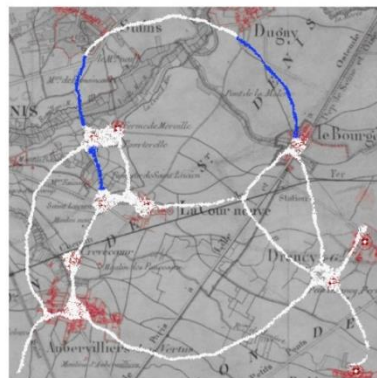
5



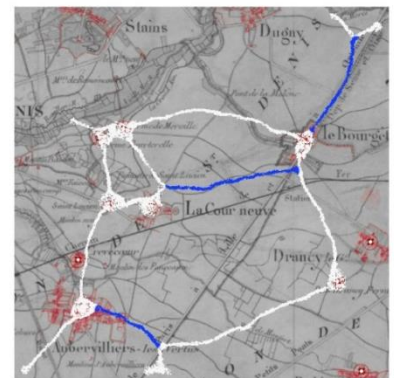
6



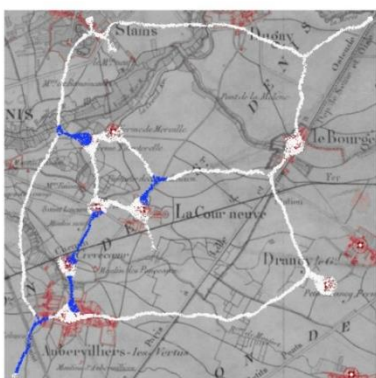
7



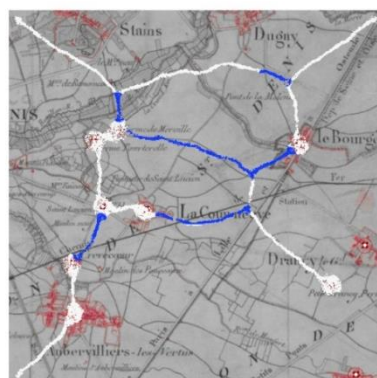
8



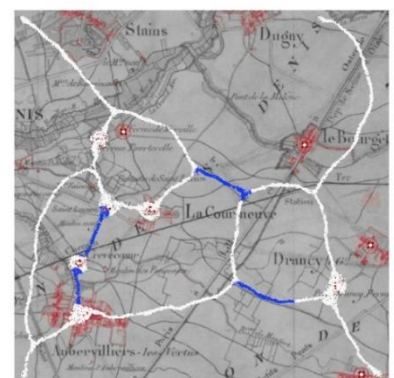
9



10



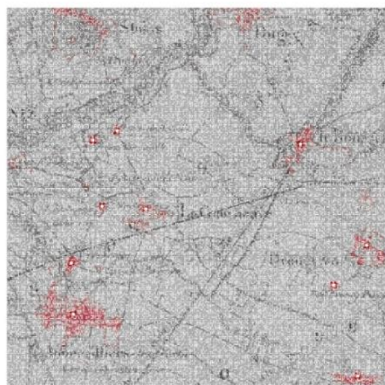
11



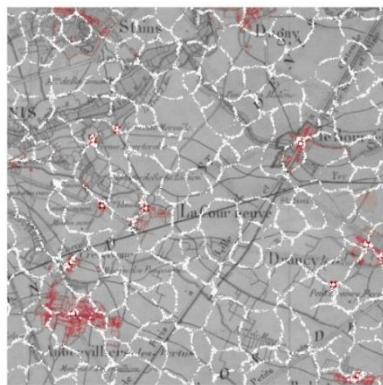
12

Figure 28. Simulation H , distance de détection comme méthode d'attraction.

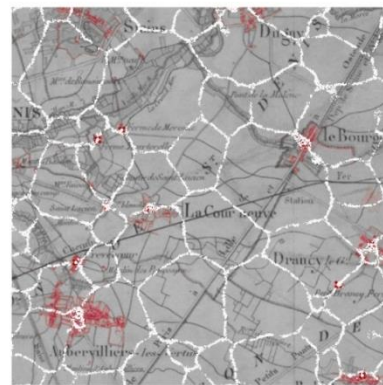
Valeurs différentes pour dix points - Wrap : False - Figure H1 à H12. © Zahra ASADOLLAHI



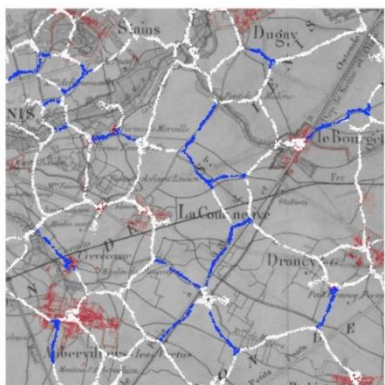
1



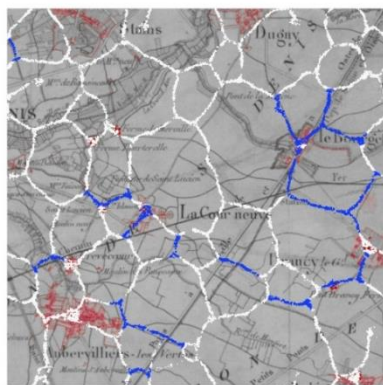
2



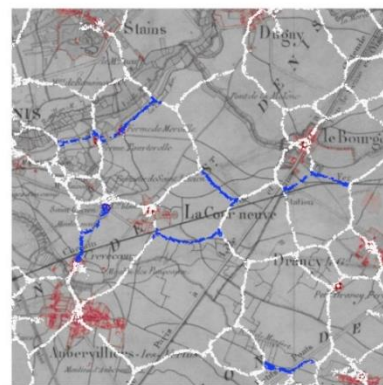
3



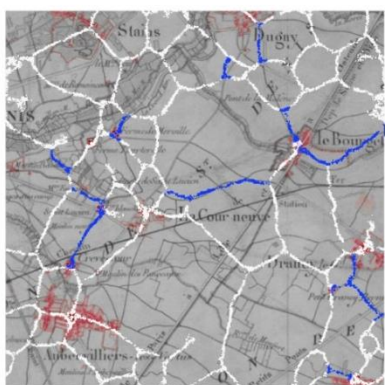
4



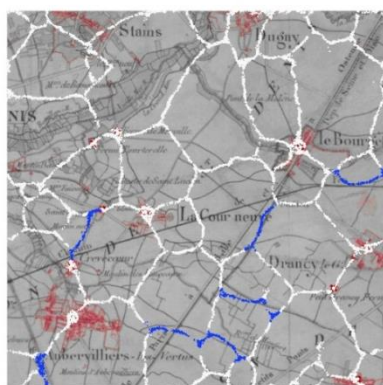
5



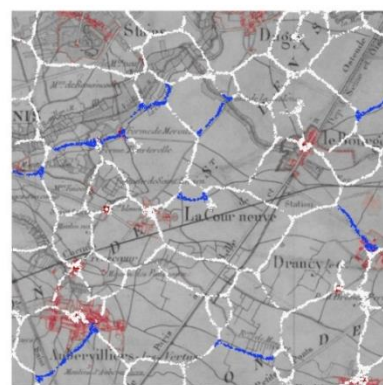
6



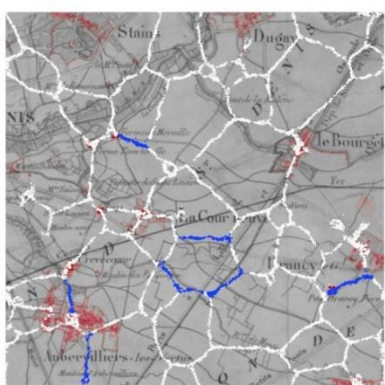
7



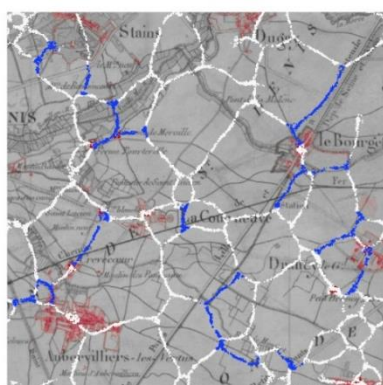
8



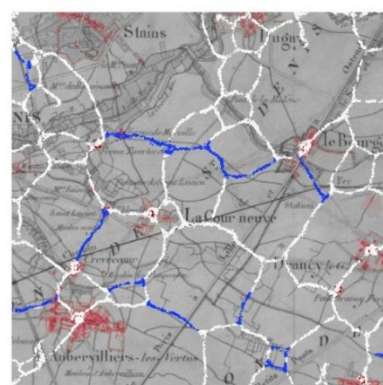
9



10



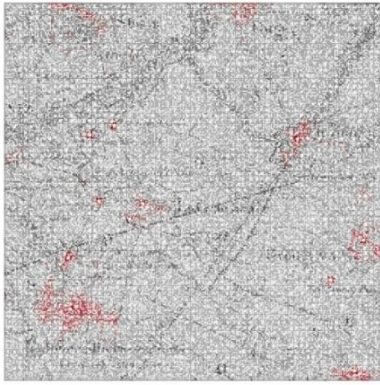
11



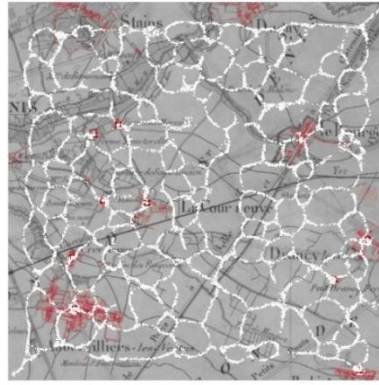
12

Figure 29. Simulation I, densité minimale comme méthode d'attraction.

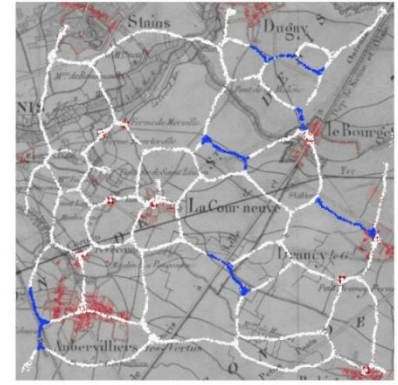
Valeurs différentes pour dix points - Wrap : True - Figure I1 à I12. © Zahra ASADOLLAHI



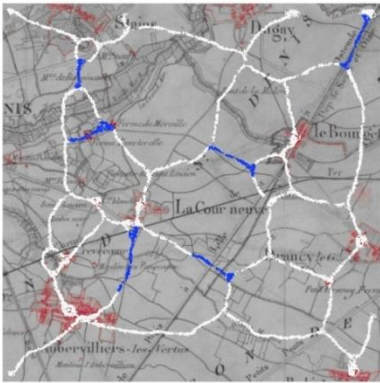
1



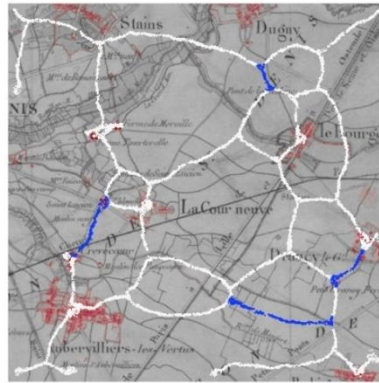
2



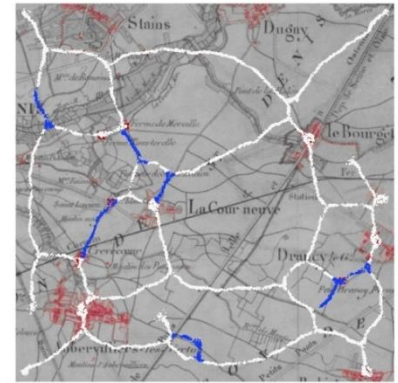
3



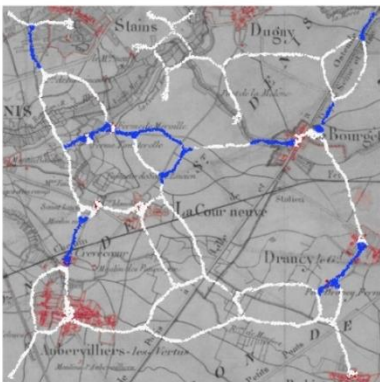
4



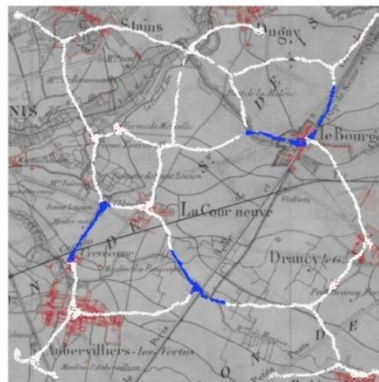
5



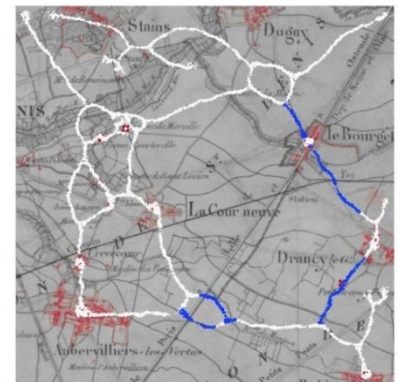
6



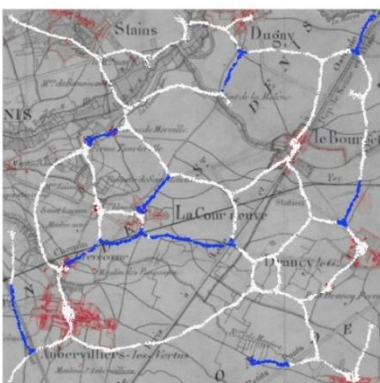
7



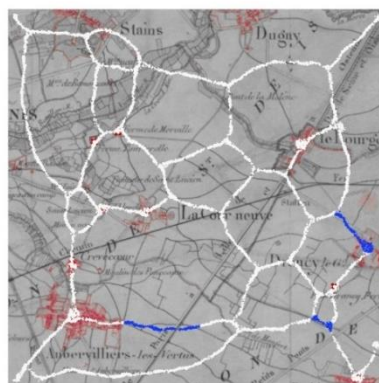
8



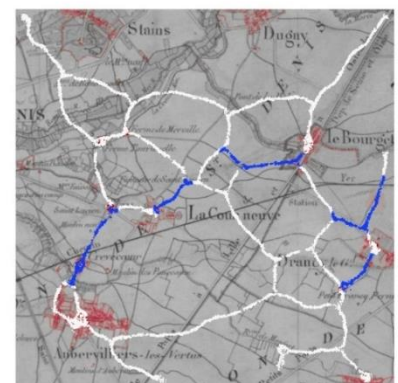
9



10



11



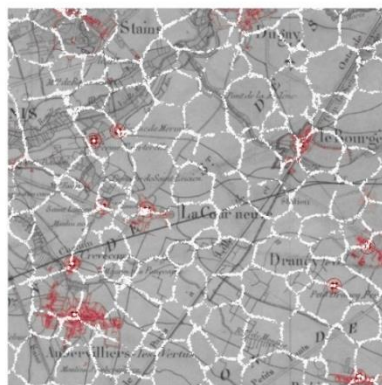
12

Figure 30. Simulation J, densité minimale comme méthode d'attraction.

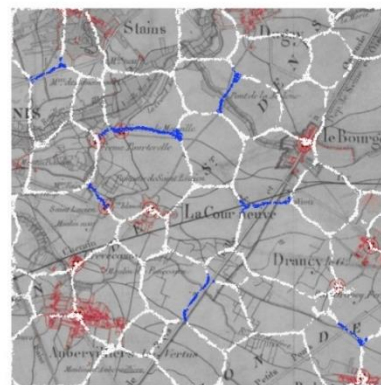
Valeurs différentes pour dix points - Wrap : False - Figure J1 à J12. © Zahra ASADOLLAHI



1



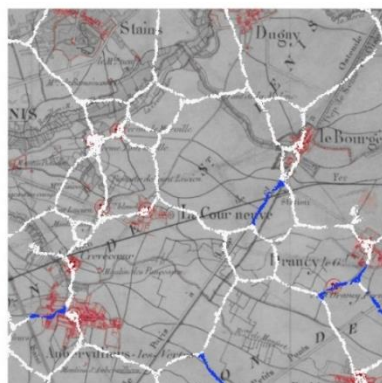
2



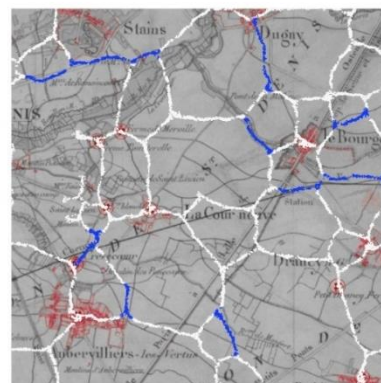
3



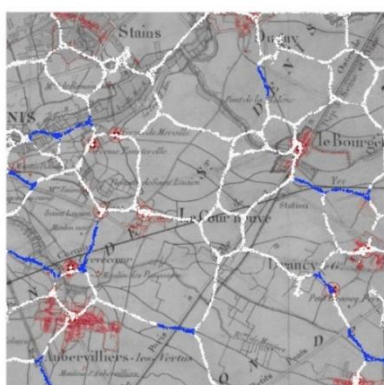
4



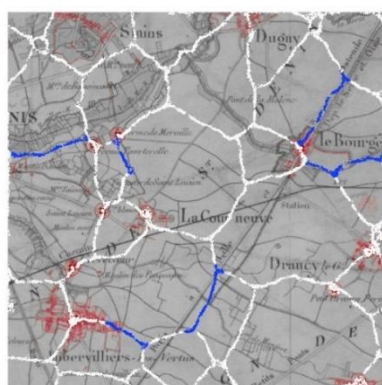
5



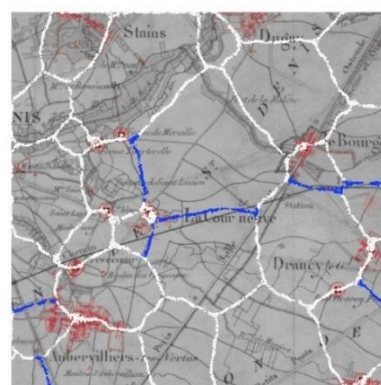
6



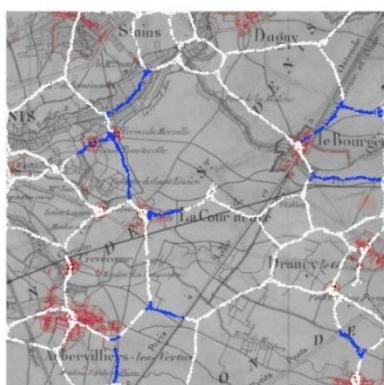
7



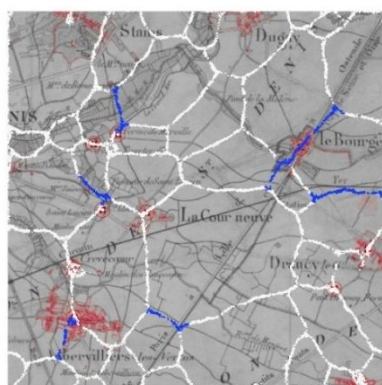
8



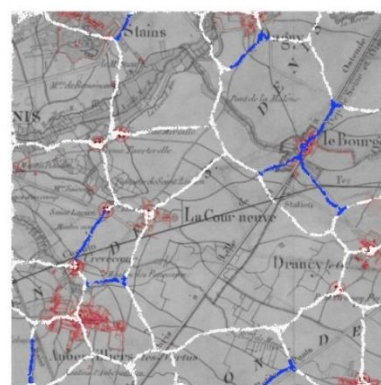
9



10



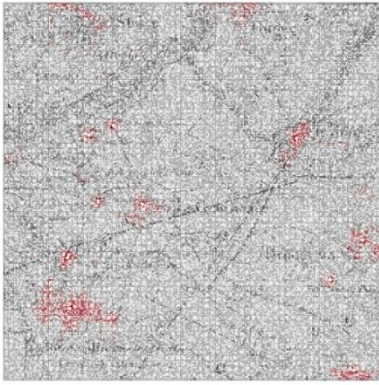
11



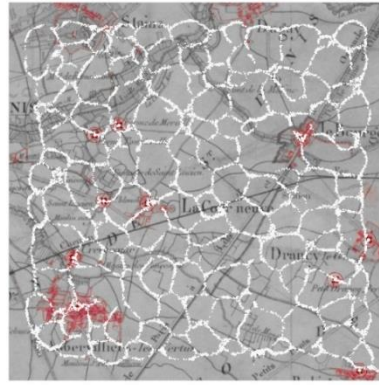
12

Figure 31. Simulation K, nourriture comme méthode d'attraction.

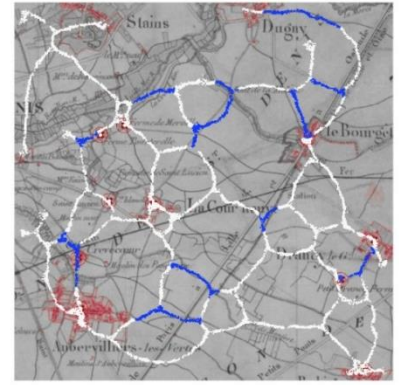
Valeurs différentes pour dix points - Wrap : True - Figure K1 à K12. © Zahra ASADOLLAHI



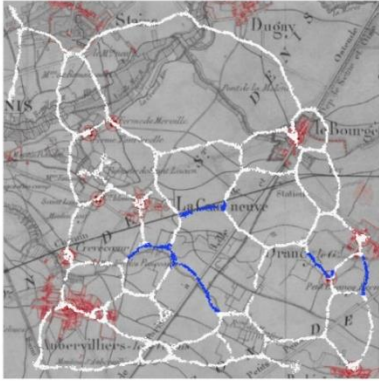
1



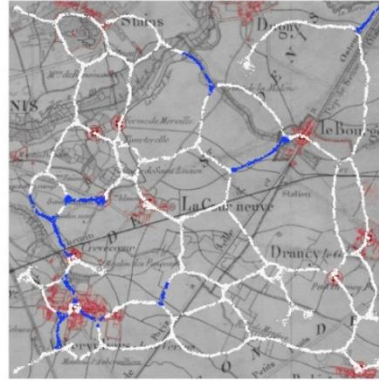
2



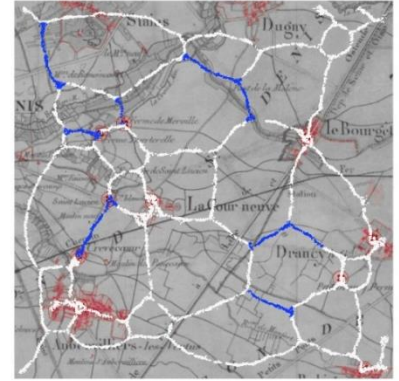
3



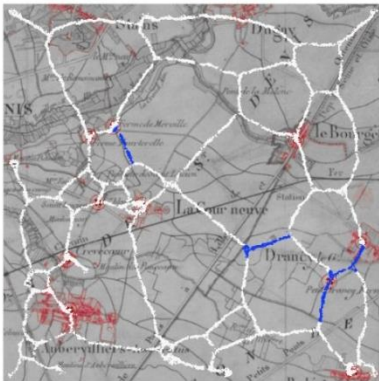
4



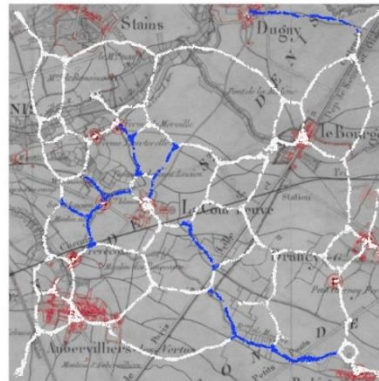
5



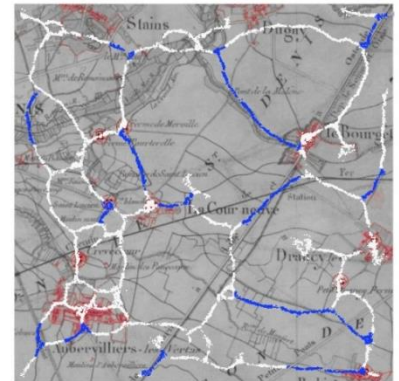
6



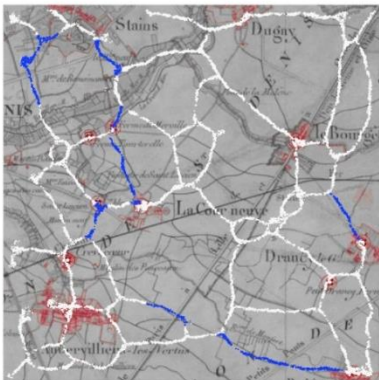
7



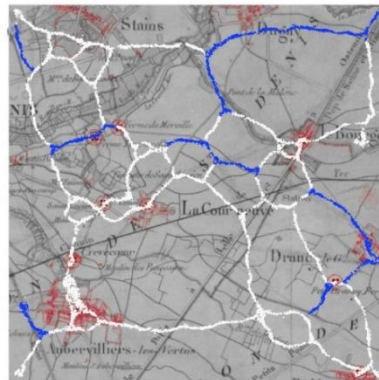
8



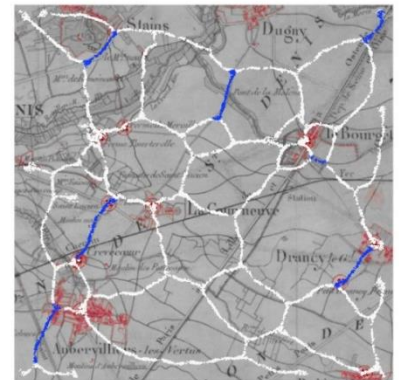
9



10



11



12

Figure 32. Simulation L, nourriture comme méthode d'attraction.

Valeurs différentes pour dix points - Wrap : False - Figure L1 à L12. © Zahra ASADOLLAHI

6.2 Analyse et interprétation des résultats

Le tableau ci-dessous(Figure 33) indique si les simulations sont valides ou non. Chaque simulation montre des étapes importantes dans plus de dix milles itérations en 12 images. Dans l'image une, la simulation démarre et dans les images deux et parfois trois, les images sont encore trop denses et n'ont pas la validité pour être vérifiées, les résultats des images trois et parfois quatre sont lisibles.

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	–	–	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B	–	–	–	x	x	x	x	x	x	✓	✓	x
C	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
E	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
G	–	–	–	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x
H	–	–	–	x	x	x	x	x	x	x	x	x
I	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
J	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
K	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
L	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figure 33. Tableau de validité ou non validité des simulations. © Zahra ASADOLLAHI

6.2.1 Précision

Dans la carte historique, il existe une connexion directe ou indirecte entre les dix points sélectionnés. Par conséquent, dans les résultats de la simulation, ceux qui connectent les dix points en même temps sont acceptables.

Par exemple dans le cas de G4, nous pouvons observer comment les cheminements proposés passe de tous les point définis. Tandis dis que dans le cas de G9, les circulations créés par l'algorithme s'éloigne de certains points d'attirances. La raison est inconnue pour l'auteure mais les cas non valides sont l'issue de paramètres de distances de détection comme méthode d'attractions (Figure 34).

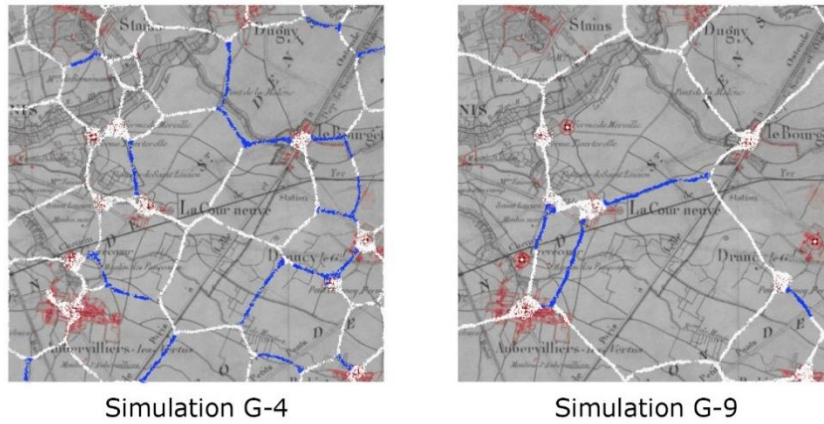


Figure 34. Précision sur la validité des simulations. © Zahra ASADOLLAHI

6.3 Retours sur l'hypothèse

Maintenant que les résultats des comparaisons sont disponibles, il est possible de vérifier si l'hypothèse est valide ou non.

Hypothèse : Les réseaux de circulation d'une ville dans une période historique définie, ressemblent aux motifs spatiaux du physarum.

Bien que la similitude soit faible (de 5 à 20 pourcents), elle est présente. Dans certains cas, des chemins courts sont similaires, et dans d'autres cas, des chemins plus longs.

Dans ces simulations, on a tenté de simplifier l'expérience par les deux moyens suivants :

1. Utilisation d'une carte historique contenant moins de routes et de détails que les cartes actuelles.
2. Le principal facteur qui a été pris en compte pour le lancement du complément Nuclei était que les voies de communication sont formées entre les agglomérations.

En définissant des facteurs de plus en plus précis par une personne maîtrisant davantage le logiciel et les bases de programmation, cet outil peut être utile à un historien pour faire des recherches sur la formation des routes et son lien avec l'intelligence collective.

La similitude entre la ville et Physarum renseigne sur le potentiel qui peut contribuer à améliorer la mobilité dans la ville. Par exemple, dans les cas où la ville fonctionne de manière auto-organisée, elle n'aura pas besoin d'intervention extérieure. En ce qui concerne la recherche de chemins, certaines routes ont une longue histoire et ont conservé leur forme pendant des années. Cette recherche peut être le sujet d'étude est la raison de la formation et de la continuation de la vie d'une route.

Par exemple, les routes ayant une longue histoire peuvent être protégées de la destruction ou de la modification (de sorte qu'elles perdent leur fonction) dans la planification urbaine future, ou elles peuvent être élargies si elles sont très utilisées.

7 Conclusion

Dans cette expérience et ces simulations, je cherche des similitudes entre la carte historique et les moyens proposés par Physarum. La raison pour laquelle j'ai essayé de trouver ces similitudes, est la manière dont elles influencent la création et la survie des routes historiques dans la carte d'aujourd'hui.

Une autre raison est de parvenir à des propositions prospectives qui permettent d'utiliser simultanément les quatre propos mentionnés dans la section ville et Physarum (Complexité, Approche ascendante, Auto-organisations, Émergence) et d'améliorer les réseaux de transport dans la question de la recherche de chemins.

Ville, en tant que système complexe (Meyers, 2009), peut être formée partiellement ou entièrement avec l'approche ascendante, qui aboutit à un système auto-organisé et se complète simultanément ou ultérieurement, par des organisations d'un niveau supérieur. Ces quatre termes : **la complexité, l'approche ascendante (Bottom-up), auto-organisation et émergence**, sont les ressemblances d'une ville et certains organismes naturels comme Physarum polycephalum.

Par exemple, lorsque la ville et ses voiries sont façonnées par des décisions et des interactions à l'échelle locale, cela peut conduire à l'auto-organisation. Autrement dit, les décisions locales émergent des nouvelles conditions qui répondent aux besoins de cette région sans la présence de la direction ou d'ordres de l'extérieur. Ce passage de règles de bas niveau à une sophistication de haut niveau est ce que nous appelons "l'émergence" (Johnson, 2004).

En tant que système complexe, la ville possède une intelligence décentralisée et le but de l'utilisation d'algorithmes comme Physarum est d'améliorer ou d'utiliser cette intelligence de manière optimale. En d'autres termes, en s'inspirant de structures naturelles comme celle-ci, il est possible de combiner des méthodes ascendantes et descendantes pour améliorer les réseaux de circulation d'une ville.

Cet organisme abondant dans la nature, appelé Physarum, également connu sous le nom non scientifique de blob, présente des caractéristiques similaires à une ville. Il ne possède pas d'une intelligence centrale, et les moyens qu'il propose pour sa survie sont formés par l'interaction entre ses petites entités, qui manquent d'intelligence et ne peuvent assumer que de simples responsabilités. À la fin, cela émerge des conditions qui conduisent à la survie de l'organisme.

Il est un système multiagent naturel qui est capable de produire des réseaux efficaces entre les particules alimentaires pour résoudre les problèmes d'aménagement spatial (Johnson, 2004), et ces ressemblances à une ville, dévoilés un potentiel pour l'analyse urbaine depuis quelques années.

Pour trouver cette similitude, j'ai utilisé le complément de Nuclei pour Grasshopper et j'ai essayé de trouver les paramètres et réglages qui donnent le résultat le plus proche des chemins historiques.

Une partie de la ville de La Courneuve dans le département de l'Île-de-France en France a été sélectionnée pour vérifier l'hypothèse, et sa carte historique a été utilisée comme arrière-plan des simulations. Cela a permis de voir les similitudes entre la simulation et la carte en temps réel et les images enregistrées sont plus adaptées à l'analyse.

Ensuite, sur la carte historique, chaque fois qu'il y avait une zone bâtie, elle était mise en évidence et considérée comme des points qui attirent la population. 12 simulations ont été réalisées avec différentes méthodes et paramètres afin de trouver les meilleurs paramétrages.

La similitude entre la ville et Physarum renseigne sur le potentiel qui peut contribuer à améliorer la mobilité dans la ville. Par exemple, dans les cas où la ville fonctionne de manière auto-organisée, elle n'aura pas besoin d'intervention extérieure. En ce qui concerne la recherche de chemins, certaines routes ont une longue histoire et ont conservé leur forme pendant des années. Cette recherche peut être le sujet d'étude est la raison de la formation et de la continuation de la vie d'une route.

Par exemple, les routes ayant une longue histoire peuvent être protégées de la destruction ou de la modification (de sorte qu'elles perdent leur fonction) dans la planification urbaine future, ou elles peuvent être élargies si elles sont très utilisées.

L'algorithme n'avait aucune autre lecture de la carte, à l'exception des points importants qui lui étaient spécifiés. Cependant, dans ces 12 simulations, il a montré une similarité de 5 à 20 % avec la carte historique. Ces routes similaires peuvent être des routes qui existent depuis longtemps ou des routes qui ont été construites plus tard pour relier l'agglomération.

L'intérêt ultime de cette recherche est de savoir si certains organismes naturels comme Physarum peuvent proposer des solutions pour des problèmes à l'échelle urbaine (dans le cas de Physarum, des problèmes de circulation sont ciblés), ou ils peuvent proposer un outil pour d'autres domaines comme l'histoire pour analyser une ville et sa création. Par conséquent, trouver un lien adaptatif entre l'approche ascendante (Bottom-up) et l'approche descendante (top down) applicable sur une ville sera envisageable dans les recherches ultérieures de ce sujet.

En fin de compte, pour améliorer les recherches futures dans ce domaine, il est préférable d'utiliser des ordinateurs qui ont la capacité d'effectuer des simulations pendant de longues heures. En effet, l'algorithme de Physarum a besoin d'un long moment pour atteindre la stabilité afin de pouvoir suggérer le meilleur chemin. Dans ce cas, il peut obtenir des résultats plus intéressants.

De plus, l'utilisation de l'outil de comparaison en Java Script, pour comparer les résultats des simulations et de la carte historique, permet de faire les comparaisons en peu de temps, alors que dans cette expérience, les comparaisons ont été faites manuellement, chaque fois qu'une similitude est vue, elle est colorée.

8 Liste des tableaux et figures

Figure 1.Algorithme comportemental de l'agent de base et morphologie de l'agent (Jones, 2010)	11
Figure 2.Formation de réseaux chez <i>Physarum polycephalum</i> .(YONG, 2010)	12
Figure 3.Comparaison des réseaux <i>Physarum</i> avec le réseau ferroviaire de Tokyo.(Jones, 2010)	13
Figure 4.Principes simplifiés de la croissance plasmodiale de <i>Physarum polycephalum</i> . (Kay et al., 2022)	14
Figure 5.Exemples de modèles de simulation de <i>Physarealm</i> .	17
Figure 6.Des modèles simplifiés à partir de simulations.	17
Figure 7.Accès non-véhiculaire proposé. (Azad, 2021)	18
Figure 8.Configuration de l'environnement de simulation. (Lee et Lee, 2018)	19
Figure 9.L'émergence de particules d'agents sur un modèle de terrain 3D. (Lee et Lee, 2018)	20
Figure 10.L'émergence de réseaux de particules d'agents sur le modèle de terrain 3D. (Lee et Lee, 2018)	20
Figure 11.Le développement du <i>Physarum</i> .(Veloso et Krishnamurti, 2016)	23
Figure 12. Conclusion de l'état de l'art. © Zahra ASADOLLAHI	25
Figure 13.Explication de l'algorithme : voxels et particules.(« Biomorphic Networks V2.0 », s. d.)	29
Figure 14.Fonctionnement de l'algorithme. (« Biomorphic Networks V2.0 », s. d.)	31
Figure 15.Carte de Cassini (1790). (Géoportail, s. d.)	33
Figure 16.Carte de l'état majeur (1820_1866). (Géoportail, s. d.)	33
Figure 17.Carte de 1950 (1820_1866). (Géoportail, s. d.)	34
Figure 18.Photographie aérienne (récente) . (Géoportail, s. d.)	34
Figure 19.Esri world topographic map (1820_1866) . (Géoportail, s. d.)	34
Figure 20.Carte de l'état majeur et ses agglomérations. (Géoportail, s. d.) et © Zahra ASADOLLAHI	36
Figure 21.Simulation A, distance de détection comme méthode d'attraction.	39
Figure 22.Simulation B, distance de détection comme méthode d'attraction.	40
Figure 23.Simulation C, densité minimale comme méthode d'attraction.	41
Figure 24.Simulation D, densité minimale comme méthode d'attraction.	42
Figure 25.Simulation E, nourriture comme méthode d'attraction.	43
Figure 26.Simulation F, nourriture comme méthode d'attraction.	44
Figure 27.Simulation G, distance de détection comme méthode d'attraction.	46
Figure 28.Simulation H, distance de détection comme méthode d'attraction.	47
Figure 29.Simulation I, densité minimale comme méthode d'attraction.	48
Figure 30.Simulation J, densité minimale comme méthode d'attraction.	49
Figure 31.Simulation K, nourriture comme méthode d'attraction.	50
Figure 32.Simulation L, nourriture comme méthode d'attraction.	51
Figure 33.Tableau de validité ou non validité des simulations. © Zahra ASADOLLAHI	52
Figure 34.Précision sur la validité des simulations. © Zahra ASADOLLAHI	53

9 Bibliographie

- Architectural Design*. (s. d.). Wiley Online Library. [https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1554-2769](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1554-2769)
- Awad, A., Pang, W., Lusseau, D. et Coghill, G. M. (2021). *A Survey on Physarum Polycephalum Intelligent Foraging Behaviour and Bio-Inspired Applications* (version 3). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2103.00172>
- Azad, S. B. (2021). Computational Design Approach to Re-Establish the Urban Fabric of Mongla: A Perspective from Grasshopper. *MIST International Journal of Science and Technology*, 9(2), 23-29, Bangladesh.
- Biomorphic Networks V2.0*. (s. d.). DesignMorphine - Biomorphic Networks V2.0. <https://designmorphine.com/education/biomorphic-networks-v2-0>
- Buhl, J., Gautrais, J., Reeves, N., Solé, R. V., Valverde, S., Kuntz, P. et Theraulaz, G. (2006). Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 49(4), 513-522. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1>
- Complexity and Urban Dynamics*. (s. d.). <https://www.ura.gov.sg/Corporate/Resources/Ideas-and-Trends/Complexity-and-Urban-Dynamics>
- Cybernétique : définition et explications*. (s. d.). Techno-Science.net. <https://www.techno-science.net/definition/8112.html>
- Diniz, N. et Melendez, F. (2018). Playing with Growth Patterns: Merging Biotechnology and Architectural Design to Sense Environmental Toxins. ACSA Fall Conference « PLAY with the rules ». <http://www.augmented-architectures.com/publications2.html>
- Géoportail*. (s. d.). <https://www.geoportail.gouv.fr/>
- Hursh, J. (2022, 25 mars). Emergence and Cities. *Rethinking Emergent Cities and Their Slums*. <https://medium.com/rethinking-slums-and-cities/emergence-and-cities-c0ab6fea53c2>
- Johnson, S. (2004). *Emergence: the connected lives of ants, brains, cities and software* (1. Scribner trade paperback ed). Scribner.
- Jones, J. (2009). Approximating the Behaviours of Physarum polycephalum for the Construction and Minimisation of Synthetic Transport Networks. Dans C. S. Calude, J. F. Costa, N. Dershowitz, E. Freire et G. Rozenberg (dir.), *Unconventional Computation* (vol. 5715, p. 191-208). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03745-0_23
- Jones, J. (2010). Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks. *Artificial Life*, 16(2), 127-153. <https://doi.org/10.1162/artl.2010.16.2.16202>
- Jones, J. (2015). *From Pattern Formation to Material Computation: Multi-agent Modelling of Physarum Polycephalum* (1st ed. 2015). Springer International Publishing : Imprint: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16823-4>
- Kay, R., Mattacchione, A., Katrycz, C. et Hatton, B. D. (2022). Stepwise slime mould growth as a template for urban design. *Scientific Reports*, 12(1), 1322. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05439-w>
- La France en cartes*. (s. d.). <https://gallica.bnf.fr/html/und/cartes/la-france-en-cartes>

- Lee, J. et Lee, H. (2018). The Visible and Invisible Network of a Self-Organizing Town - Agent-Based Simulation for Investigating Urban Development Process (p. 411-420). CAADRIA 2018: Learning, Prototyping and Adapting. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2018.2.411>
- Ma, Y. (2015, 7 novembre). Physarealm [C#]. <https://github.com/maajor/Physarealm>
- Ma, Y. et Xu, W. (2017). Physarealm - A Bio-inspired Stigmergic Algorithm Tool for Form-Finding (p. 499-508). CAADRIA 2017: Protocols, Flows, and Glitches. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2017.499>
- Meyers, R. A. (2009). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer New York.
- Nakagaki, T., Yamada, H. et Tóth, Á. (2000). Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature*, 407(6803), 470-470. <https://doi.org/10.1038/35035159>
- Nuclei. (2022, 3 mai). [Text]. Food4Rhino. <https://www.food4rhino.com/en/app/nuclei?lang=en>
- Physarum polycephalum - Définition et Explications*. (s. d.). Techno-Science.net. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Physarum-polycephalum.html>
- Planification top down et bottom up, un aspect important de l'EPM*. (s. d.). <https://www.jedox.com/fr/blog/planification-top-down-bottom-up/>
- Présentation du logiciel Rhinocéros 3D*. (s. d.). <https://dumetier.org/publications/presentation-du-logiciel-rhinoceros-3d>
- Programmation procédurale : définition et explications*. (s. d.). Techno-Science.net. <https://www.techno-science.net/definition/11446.html>
- Qu'est-ce que l'auto-organisation ? - Matière et Révolution*. (s. d.). <http://www.matierevolution.fr/spip.php?article564>
- Sanders, L. (2010, 22 janvier). *Slime Mold Grows Network Just Like Tokyo Rail System* / WIRED. <https://www.wired.com/2010/01/slime-mold-grows-network-just-like-tokyo-rail-system/>
- Slime design mimics Tokyo's rail system: Efficient methods of a slime mold could inform human engineers*. (s. d.). ScienceDaily. <https://www.sciencedaily.com/releases/2010/01/100121141051.htm>
- Système multi-agents - Définition et Explications*. (s. d.). Techno-Science.net. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Systeme-multi-agents.html>
- Tero, A., Kobayashi, R. et Nakagaki, T. (2006). Physarum solver: A biologically inspired method of road-network navigation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363(1), 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.053>
- Tero, A., Kobayashi, R. et Nakagaki, T. (2007). A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold. *Journal of Theoretical Biology*, 244(4), 553-564. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2006.07.015>
- Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R. et Nakagaki, T. (2010). Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design. *Science*, 327(5964), 439-442. <https://doi.org/10.1126/science.1177894>

« *Top down* » et « *bottom up* » — *Géoconfluences*. (s. d.) [Terme]. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/top-down-et-bottom-up>

Veloso, P. et Krishnamurti, R. (2016). On Slime Molds and Corridors: The application of network design algorithms to connect architectural arrangements.

Werner, L. C. (2018). *Biological Computation of Physarum: from DLA to spatial adaptive Voronoi*. <https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-7675>

What are Emergent Cities? (s. d.). Simplicable. <https://simplicable.com/new/emergent-cities>

YONG, E. (2010, 21 janvier). *Slime mould attacks simulates Tokyo rail network*. Science & Science. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/slime-mould-attacks-simulates-tokyo-rail-network>

10 Glossaire

Physarum : *Physarum polycephalum* est un myxomycète vivant dans des zones fraîches et humides telles que les tapis de feuilles des forêts ou le bois mort. (« *Physarum polycephalum* - Définition et Explications », s. d.)

Bottom-up : Avec la méthode de planification Bottom-up, des objectifs relativement précis sont fixés au plus bas de la hiérarchie. Ils sont ensuite progressivement intégrés aux objectifs et de la stratégie globale en remontant les branches de la hiérarchie. Il s'agit donc d'une approche convergente. (*Planification top down et bottom up, un aspect important de l'EPM*, s. d.)

Top down : Dans le cadre d'une planification Top-down, des objectifs globaux sont d'abord définis et les moyens pour les atteindre sont déterminés. Puis, ces objectifs descendent progressivement dans les différentes branches de la hiérarchie pour être développés et précisés. Il s'agit d'une approche divergente. (*Planification top down et bottom up, un aspect important de l'EPM*, s. d.)⁷

Auto-organisation : L'auto-organisation vise à comprendre comment de l'ordre peut apparaître spontanément au sein du désordre. Des niveaux de structuration peuvent ainsi apparaître sans intervention d'une quelconque volonté et du fait des propriétés des lois naturelles. Ainsi, un nuage de gaz et de poussière donne une étoile. Le désordre des dépôts de molécules donne la structure du cristal. Le désordre des interactions moléculaires donne le processus vivant, etc..

Le terme d'auto-organisation fait donc référence à un processus dans lequel l'organisation interne d'un système, habituellement un système hors équilibre, augmente automatiquement sans être dirigée par une source extérieure. Typiquement, les systèmes auto-organisées ont des propriétés émergentes. (*Qu'est-ce que l'auto-organisation ? - Matière et Révolution*, s. d.)

Complexité : Dans un système complexe, le tout est plus grand que la somme de ses parties. Une ville existe en raison des interactions entre les habitants et du comportement collectif qui en résulte, qui sont distincts des caractéristiques des composants individuels, ce qui rend son comportement difficile à prévoir. De nombreux schémas observés dans les villes, tels que le lieu et la manière dont les gens font la navette, ne peuvent être expliqués de manière adéquate par la simple addition des effets de divers facteurs, tels que la distance par rapport au domicile, le coût du voyage, l'expérience de la navette, etc. (*Complexity and Urban Dynamics*, s. d.) Traduit avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite) et vérifié par l'auteur

Emergence : c'est une forme obtenue à la suite de certains processus. Le contraire de l'émergence est la conception : c'est une forme conçue par un concepteur qui servira de plan pour sa réalisation. (Hursh, 2022) Traduit avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite) et vérifié par l'auteur

Une ville émergente est une zone urbaine qui a évolué en fonction des contributions spontanées des individus et des propriétaires, des quartiers et des citoyens. De grands quartiers de nombreuses villes

⁷ Référence outil : (« *Top down* » et « *bottom up* » — *Géoconfluences*, s. d.)

ont émergé au fil du temps sans que l'on ait pensé à une planification ou à une conception centralisée. Dans de nombreux cas, ces zones sont appréciées pour leur caractère et leur charme mais sont coûteuses à développer, à entretenir et à desservir. (« What are Emergent Cities? », s. d.) Traduit avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite) et vérifié par l'auteur

Système multi-agents : Un système multi-agent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Ce peut-être un processus, un robot, un être humain, etc. (« Système multi-agents - Définition et Explications », s. d.)

Cybernétique : La cybernétique est une modélisation de l'échange, par l'étude de l'information et des principes d'interaction. Elle est issue en particulier du passage par la théorie entre l'étude du système nerveux et sa reproduction en intelligence artificielle. Le mot cybernétique formalisé en 1948 par Norbert Wiener est le résultat de tout un mouvement scientifique très largement interdisciplinaire et source d'une nouvelle école de pensée. Techniquement, c'est une méthode interdisciplinaire qui étudie l'évolution dynamique des systèmes. (« Cybernétique : définition et explications », s. d.)

La conception procédurale : La programmation procédurale est un paradigme de programmation basé sur le concept d'appel procédural. Une procédure, aussi appelée *routine*, *sous-routine*, *méthode* ou *fonction* (à ne pas confondre avec les fonctions de la programmation fonctionnelle reposant sur des fonctions mathématiques) contient simplement une série d'étapes à réaliser. N'importe quelle procédure peut être appelée à n'importe quelle étape de l'exécution du programme, incluant d'autres procédures voire la procédure elle-même (récursivité).

La programmation procédurale est souvent un meilleur choix qu'une simple programmation séquentielle ou programmation non-structurée. (« Programmation procédurale : définition et explications », s. d.)

11 Archive

Les fichiers les plus importants des expériences présentées dans ce mémoires, y compris les fichiers de définitions de GrassHopper, sont accessibles par le lien de google drive ci-dessous.

shorturl.at/eos69

