

Université Libre de Bruxelles  
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire  
Faculté des Sciences  
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Approche biomimétique dans la conception de réseaux de  
transports au niveau d'une ville.  
Étude de cas : Région de Bruxelles-Capitale.**

Mémoire de Fin d'Études présenté par  
ESKANDER Alexandre  
En vue de l'obtention du grade académique de  
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement  
Finalité Gestion de l'Environnement ENVI4

Année Académique 2020-2021

Directeur : Prof. Marie-Françoise GODART  
Co-promoteur : Dr. Ig. Karim LAPP



*En premier lieu, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin dans l'écriture de cet exercice qu'est celui d'un mémoire de fins d'études.*

*Merci à mon père, à ma mère, et à ma sœur qui m'ont apporté le soutien essentiel et nécessaire durant cette année académique particulière.*

*Merci à Marie-Françoise Godart et à Karim Lapp pour les relectures et les conseils d'écriture.*

*Merci à Hugo Périlleux et à Pierre Marissal pour m'avoir aidé à obtenir les données SIG utiles à la réalisation de ce mémoire.*

*Merci à Audrey Dussutour du CNRS pour les conseils de mise en culture du *Physarum polycephalum*.*



## Résumé

L'essor de l'automobile dans les grandes métropoles du XXI<sup>ème</sup> siècle a offert une liberté de déplacement aux urbains qui s'est traduite au fil des années par un coût social, environnemental et économique. Afin de diminuer le poids de la voiture dans les villes, la logique veut qu'on renforce l'utilisation des transports en commun. L'une des actions à entreprendre pour rendre les transports collectifs plus attractifs réside entre autres dans une conception polycentrique de la ville à travers le renforcement des connexions entre les différents pôles de celle-ci. Pour autant que l'on distingue quels pôles voulons-nous connecter et comment les connecter.

Tandis que les villes se complexifient et se transforment continuellement, les approches classiques d'aménagement du territoire ne seront peut-être à l'avenir plus suffisantes pour résoudre ce genre de problèmes. Ce mémoire de fin d'études vise à explorer modestement une approche alternative basée sur le biomimétisme. Ces approches consistent à prendre la nature (ses formes, ses processus, et ses fonctions) comme modèle afin de répondre aux enjeux du développement durable.

L'organisme étudié ici est l'unicellulaire *Physarum polycephalum* qui sous sa forme de plasmode visible à l'œil nu développe un réseau protoplasmique reliant plusieurs sources de nourriture. Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses études ont révélé la capacité de l'organisme à élaborer des réseaux similaires et parfois mieux construits que les réseaux de transport élaborés par nos sociétés. L'exercice a été jusqu'à ce jour réalisé à l'échelle d'une nation ou d'une région, mais pas encore à l'échelle urbaine.

L'objectif de ce mémoire est d'analyser comment l'organisme relie les différents pôles de la région bruxelloise et de comparer ses résultats avec un modèle cartographique et avec le réseau existant. Nous avons sélectionné les 25 gares et pôles d'échange du Plan régional stratégique de mobilité (Good Move) et les avons expérimentés au travers de six essais. D'un point de vue mathématique, nous n'avons obtenu aucun arbre couvrant (réseau reliant l'ensemble des sommets) contrairement aux résultats obtenus dans la littérature scientifique. Toutefois, des structures similaires aux modèles cartographiques (arbre couvrant de poids minimal) ont été observées confirmant la capacité de l'organisme à élaborer un réseau à moindre coût. L'organisme a également construit de nouveaux nœuds s'apparentant à des points Steiner et lui permettant de construire une meilleure résolution du problème. L'analyse comparative avec le réseau existant a confirmé certaines caractéristiques connues du réseau de transport bruxellois comme les difficultés de connexion avec le sud d'Uccle, celles entre l'est et l'ouest du canal ou bien encore le rôle potentiel que peut jouer la Région flamande.

Nous notons plusieurs limites rendant fragile l'interprétation de ces résultats. Premièrement, malgré l'accessibilité et la simplicité de mise en culture de l'organisme, les conditions expérimentales (hors laboratoire) n'ont pas empêché l'apparition de moisissures après plus de 72 heures. Deuxièmement, l'origine de la souche du matériel biologique a véritablement un impact en termes de comportement dans la construction du réseau. Ce qui suggère l'intérêt et la nécessité de faire intervenir différentes expertises lorsque l'on tente de résoudre un tel problème sous une approche biomimétique. Et troisièmement, nous avons interprété les résultats sous un angle comparatif. Des résultats basés sur des critères plus objectifs (coût du réseau, niveau de résilience, etc.) seraient recommandés pour confirmer ou non l'intérêt de développer une telle approche en aménagement du territoire. Néanmoins, les résultats obtenus renforcent tout de même l'idée que le monde naturel regorge d'inspiration durable à de nombreux domaines y compris en matière de mobilité urbaine.

**Mots-clés :** *Physarum polycephalum*, biomimétisme, réseau de transport, aménagement du territoire, mobilité urbaine, mobilité durable.

## Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>8</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Problématique.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Mobilité, déplacement, et transport. L'enjeu de la mobilité. ....</b>	<b>13</b>
1.1.1 Histoire de la mobilité urbaine : de la première roue au véhicule individuel. ....	13
1.1.2 Transport urbain et nuisances environnementales.....	16
1.1.2.1 Pollution de l'air .....	17
1.1.2.2 Augmentation de la concentration de gaz à effet de serre .....	20
1.1.2.3 Pollution sonore .....	23
1.1.2.4 Imperméabilisation des sols et perte d'espace .....	25
1.1.2.1 Autres nuisances environnementales .....	25
1.1.3 L'offre en transport collectif. ....	26
1.1.4 Un réseau de transport en commun structuré par des pôles intermodaux. ....	29
<b>1.2 Le biomimétisme à la rescousse des villes .....</b>	<b>30</b>
1.2.1 Éléments de définition.....	30
1.2.2 Cadre méthodologique pour une approche biomimétique .....	32
1.2.3 <i>Physarum polycephalum</i> , un outil d'aménagement du territoire ?.....	33
1.2.3.1 Description biologique et cycle de vie.....	33
1.2.3.2 Description comportementale et déplacement.....	35
1.2.3.3 Optimisation combinatoire et conception d'un réseau performant : la vision mathématique. ....	37
1.2.3.4 Optimisation combinatoire et conception d'un réseau performant : la vision du <i>Physarum polycephalum</i> .....	40
<b>1.3 Approche biomimétique dans la conception des réseaux de transport collectifs .....</b>	<b>44</b>
<b>2. Matériels et méthodes.....</b>	<b>45</b>
<b>2.1 La zone d'étude : La Région de Bruxelles-Capitale .....</b>	<b>45</b>
2.1.1 La Région de Bruxelles-Capitale .....	45
2.1.2 Sélection des lieux à desservir.....	45
<b>2.2 Modèle biologique.....</b>	<b>47</b>
2.2.1 <i>Physarum polycephalum</i> – mise en culture du matériel biologique .....	47
2.2.1 <i>Physarum polycephalum</i> – expérience du réseau .....	47
<b>2.3 Modèle cartographique.....</b>	<b>48</b>

<b>3. Résultats et Discussion.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Réseaux obtenus par SIG.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2 Réseaux obtenus par <i>Physarum polycephalum</i>.....</b>	<b>51</b>
3.2.1 Expérience 1a : filmé dans une boîte de Petri (Ø 150 mm). ....	51
3.2.1 Expérience 1b : dans une boîte de Petri (Ø 150 mm).....	52
3.2.2 Expérience 2 (2a, 2b, 2c, 2d) : Dans les boîtes de Petri (Ø 90 mm). ....	52
<b>4. Discussion.....</b>	<b>53</b>
<b>5. Limites et perspectives.....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>58</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>68</b>
<b>Annexe 1: Fonds de plan utilisées pour les expériences (à l'échelle d'une feuille A4) .....</b>	<b>68</b>
<b>Annexe 2 : Reportage photographique de l'expérience 1a. ....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe 3 : Reportage photographique des expériences 2. ....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Taux de motorisation en Belgique et en RBC - Nombre de voitures privées pour 1000 habitants. Réalisation sur Microsoft Excel à partir des données disponibles de population de Statbel (2020), du nombre de véhicules en Belgique (Statbel, 2020) et en RBC (IBSA, 2021). .....	14
Figure 2 : Répartition sectorielle des émissions de NO en RBC en 2012 (Bruxelles Environnement, 2014).....	18
Figure 3 : Répartition modale des émissions de polluants et de CO2 par les transports à Bruxelles (Lebeau et Macharis, 2014).....	19
Figure 4: Responsabilité des émissions de gaz à effet de serre provenant du secteur des transports (routiers, aériens et maritimes). Réalisation sur base des données de l'IEA (2020), de l'EEA (2021), de la NCC (2020) et de Bruxelles Environnement (2016). .....	20
Figure 5 : Évolution des différents secteurs pour la période de 1990 – 2019 (Climat.be, 2019). .....	21
Figure 6 : Émission de CO <sub>2</sub> par mode de transport en milieu (péri)urbain (Ademe, 2008) .....	22
Figure 7 : Cartographie du bruit du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2010). .....	23
Figure 8 : Cartographie du bruit du trafic ferroviaire (à g.) et des métros aérien et trams (à d.) en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2010).....	24
Figure 9 : Répartition de l'espace viaire par type d'usage en région bruxelloises en 2014 (Brandeleer et al., 2016). .....	25
Figure 10 : Configuration des réseaux tram (à g.) et bus (à d.) de la STIB. Source : Lebrun et al., 2012 .....	26
Figure 11 : Réseaux bruxellois des lignes de bus De Lijn (à g.) et TEC (à d.). Source : MobiGIS, (2021) .....	27
Figure 12 : Réseau du métro et du prémétro et localisation de la futur ligne 3 (STIB, 2021) .....	28
Figure 13 : Le réseau ferré bruxellois (Lebrun et al, 2012).....	28
Figure 14 : Gare et pôles d'échange du Plan régional de mobilité 2020-2030 (Bruxelles Mobilité, 2020, p95).....	29
Figure 15 : Cycle de vie du Physarum polycephalum (Schaap et al., 2016). .....	33
Figure 16 : Physarum polycephalum à l'état de plasmode (Illustration : Hans-Günther Döbereiner in IOPScience (2021)). .....	34
Figure 17 : Expérience de Nakagaki et al. (2000) : (a) Situation des différents chemins possibles avec le tronçon $\alpha$ et ses options $\alpha_1$ et $\alpha_2$ , et le tronçon $\beta$ et ses options $\beta_1$ et $\beta_2$ . Les sources de nourriture sont notées « AG ». .....	35

Figure 18 : Exemples de graphes de voisinage : (1) Configuration initiale de sommets, (2) Graphe du plus proche voisin, (3) Arbre couvrant de poids minimal, (4) Triangulation de Delaunay. (Illustrations : Adamatzky, 2009).....	37
Figure 19 : Exemple de chemin le plus courts entre les sommets A et F (Poids du chemin ACEDF = 20) .....	38
Figure 20 : Arbre couvrant de poids minimal (Illustration : Wikipédia, 2021). .....	38
Figure 21 : Comparaison entre un réseau obtenu par l'algorithme de l'arbre couvrant à poids minimal – APM (à g.) et par l'algorithme de l'arbre de Steiner – AMS (à d.). (Illustration : Glaus et al., 2012). ..	39
Figure 22 : Expérience de Nakagaki et al. (2004) : (a) Résultats avec trois sources de nourriture, (b) avec 6 et 7, et (c) avec 12.....	40
Figure 23 : Développement du Physarum polycephalum dans l'expérience de Tero et al. (2010). .....	41
Figure 24 : Comparaison du réseau protoplasmique (1) avec le réseau ferroviaire tokyoïte (2) et les réseaux formés par l'algorithme de l'arbre couvrant à poids minimal (3)-(4). (Source : Tero et al., 2010) .....	42
Figure 25 : Les trois étapes pour l'élaboration d'un modèle mathématique inspiré du Physarum polycephalum (Sun, 2017).....	43
Figure 26 : Arrêts et réseaux de la Société des transports intercommunaux de Bruxelles (STIB). .....	45
Figure 27 : Localisation des 25 lieux sélectionnés (Réalisation à partir de QGis. Source : UrbIS).....	46
Figure 28 : Diagramme de traitement pour la construction de la couche vectorielle des 25 sommets sélectionnés.....	48
Figure 29 : Diagramme de traitement pour la construction des couches vectorielles STP et MST des 25 sommets sélectionnés .....	49
Figure 30 : Résultat obtenu pour l'arbre de Steiner (STP) avec les 25 gares et pôles d'échange.....	50
Figure 31 : Résultat obtenu pour l'arbre couvrant de poids minimal (MST) avec les 25 gares et pôles d'échange.....	50
Figure 32 : Situation de l'expérience 1 après 120 heures (5 jours).....	51
Figure 33 : Situation de l'expérience 2 après 72 heures (3 jours).....	52
Figure 34 : fragmentation du réseau observé après 72 heures.....	52
Figure 35 : Similitude entre le réseau protoplasmique et le réseau créé par GRASS. ....	53
Figure 36 : Exemples de point Steiner créés par l'organisme. ....	53
Figure 37 : Comparaison du cheminement entre le Ceria et Albert avec le réseau protoplasmique et avec le réseau de transport en commun bruxellois (Illustration à gauche provenant de Google en date du 7 août 2021).....	54



## Introduction

Longtemps, on a considéré les déplacements quotidiens en ville comme étant un simple problème d'organisation des flux des personnes, de véhicules ou de marchandises. Depuis une vingtaine d'années, on commence à prendre conscience de l'enjeu sociétal, environnemental et économique que représente la mobilité urbaine. Le tout à la voiture qui a longtemps été pratiqué dans les métropoles occidentales depuis l'essor du véhicule particulier a généré son flux constant de nuisances et a modifié la physionomie des villes. L'une des solutions réside dans le renforcement de l'utilisation des transports en commun. Toutefois, élaborer un réseau de transport en commun garantissant une connexion satisfaisante entre les différentes parties de la ville, assurant une bonne accessibilité à celui-ci, et diminuant ainsi son lot de nuisances n'est pas aisé à mettre en œuvre. À cette fin, il y a les approches classiques qui se basent sur des modèles mathématiques et sur une analyse spatiale. Et il y a les approches alternatives, encore jeunes, basées sur le concept de biomimétisme en s'inspirant de ce que fait la nature pour résoudre des problèmes similaires aux nôtres, mais en les réalisant de manière durable et résiliente.

Ce mémoire de fins d'études se construit en quatre parties. La première partie contextualise la problématique. Nous y abordons deux disciplines à première vue complètement différentes à savoir la mobilité et le biomimétisme. Dans le volet « mobilité » de cette première partie, après une contextualisation historique de l'essor de l'automobile, nous examinons les nuisances environnementales qu'engendrent les transports et le véhicule particulier en ville. Nous présentons ensuite le réseau de transport collectif et les pôles d'échanges intermodaux de la région bruxelloise. Dans le volet « biomimétisme », nous présentons les définitions retenues du terme, l'émergence de ce concept dans la littérature scientifique, son évolution et enfin l'intérêt que celui-ci peut apporter dans les problématiques environnementales. Nous nous focalisons ensuite sur l'organisme *Physarum polycephalum*. Une revue de la littérature concernant la capacité de l'organisme à établir un réseau performant est ensuite présentée. Enfin, le troisième volet vise à synthétiser la question de recherche sur base des présentations de ces deux disciplines. En quoi une approche biomimétique dans la conception d'un réseau de transport et donc plus généralement en aménagement du territoire peut nous proposer une solution durable et résiliente ?

La deuxième partie énonce la méthodologie adoptée pour répondre à la question de recherche. Celle-ci se base sur une comparaison entre le modèle biologique et le modèle cartographique. Le modèle biologique consiste en l'expérimentation de l'organisme en milieu solide et dans une boîte de pétri et le modèle cartographique consiste quant à lui à l'élaboration de réseau à partir de logiciels de systèmes d'information géographique (Quantum GIS et GRASS GIS).

La troisième partie présente les résultats obtenus pour les deux modèles. Enfin, les quatrième et cinquième parties abordent respectivement l'interprétation des résultats obtenus et les limites de ces interprétations.

# 1. Problématique

## 1.1 Mobilité, déplacement, et transport. L'enjeu de la mobilité.

### 1.1.1 Histoire de la mobilité urbaine : de la première roue au véhicule individuel.

Pendant longtemps, les déplacements étaient marqués par la lenteur. Effectivement, avant la période industrielle, les transports étaient entièrement dépendants de la force motrice d'origine animale ou humaine et la force motrice d'origine naturelle (vent, courant d'eau, etc.). L'invention de la roue vers 3000 av. J.-C. a certes permis un allongement conséquent des déplacements, mais ceux-ci restaient rares. Ces déplacements longs concernaient principalement les commerçants, les armées ou encore les hommes et femmes de pouvoir. La grande majorité des gens ne se déplaçait que localement.

Avec l'émergence de l'Empire romain s'étendant entre 27 av. J.-C. et 476 apr. J.-C., un premier réseau d'infrastructures se développe dans tout le continent. Celui-ci permettait le transport de marchandises, des ressources humaines et le contrôle des territoires conquis et était axé sur la ville de Rome. Nous héritons encore aujourd'hui des tracés de ce réseau dont notamment la Chaussée romaine à Laeken qui marque la limite nord de la Région bruxelloise (CRMS, s.d.).

Le XIII<sup>ème</sup> siècle voit émerger en Europe un accroissement du commerce. Les villes qui commencent à se développer engendrent un besoin de se connecter entre elles plus efficacement. De nouveaux itinéraires se développent en Europe et particulièrement entre le nord de l'Italie et le nord-ouest de l'Europe dont l'actuelle Belgique.

Jusqu'au XVIII<sup>ème</sup>, les sociétés dépendent toujours de la force motrice d'origine animale ou humaine pour se déplacer en milieu terrestre. C'est à partir de la révolution industrielle que les modes de transport connaissent une mutation importante. L'invention de la machine à vapeur marque ainsi une première étape importante dans les déplacements d'individu. En transformant l'énergie thermique de la vapeur d'eau en énergie mécanique, on a permis de s'affranchir de l'utilisation de la force motrice d'origine musculaire moins efficace.

Toujours pendant la révolution industrielle, certaines agglomérations deviennent de véritables bassins d'emplois attirant de plus en plus d'individus. Pour permettre les déplacements d'une main-d'œuvre lointaine, des lignes de chemin de fer convergeant vers les villes s'installent progressivement. On voit alors apparaître les premiers transports collectifs. Avec l'augmentation des activités industrielles, l'Europe des XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècles connaît un exode rural lors duquel les individus qui quittent durablement les zones rurales s'installent plus près des gares ferroviaires. Ces migrations vont

profondément modifier la physionomie des villes. Des faubourgs se développent petit à petit autour des enceintes historiques des grandes agglomérations européennes. Cette période marque le début des déplacements urbains (Pinol et Walter, 2012). Naissent alors une panoplie de modes de transport urbain. On voit par exemple apparaître les premiers tramways tirés par des chevaux sur des rails. Ces derniers vont par la suite s'électrifier. Les grandes capitales comme Paris se dotent très tôt d'une ligne de métro.

Avec l'avènement des moteurs à explosion, les premiers autobus voient le jour dans les années 1920. Quant aux premières automobiles, elles ont vu le jour dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle. C'est d'ailleurs un Belge du nom de Ferdinand Verbiest qui conçut, en 1769, l'un des premiers véhicules propulsés par une machine à vapeur (Kupélian *et al.*, 2011). Toutefois, ce ne sont pas ces véhicules qui vont marquer l'histoire des déplacements d'individus, mais bien l'avènement des moteurs à explosion. Ces derniers, en utilisant des sources d'énergie fossile, sont plus adaptés aux petits véhicules (automobiles et autobus) et vont supplanter progressivement les véhicules à vapeur, mais également les véhicules électriques tout au long du XIX<sup>ème</sup> et du XX<sup>ème</sup> siècle.

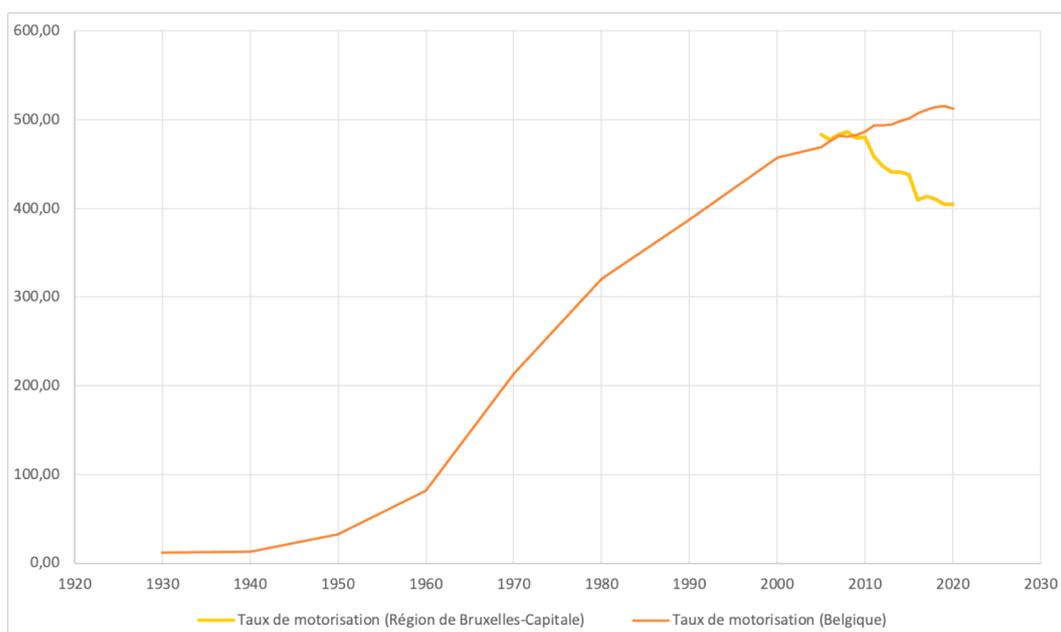


Figure 1 : Taux de motorisation en Belgique et en RBC - Nombre de voitures privées pour 1000 habitants. Réalisation sur Microsoft Excel à partir des données disponibles de population de Statbel (2020), du nombre de véhicules en Belgique (Statbel, 2020) et en RBC (IBSA, 2021).

Si les premiers véhicules représentent un objet de luxe peu accessible au grand public, le secteur industriel, et particulièrement l'Américain Henry Ford dès 1908, va rapidement modifier ses chaînes de travail afin d'optimiser sa production et de démocratiser son accès (Coulibaly, 2007). L'utilisation des véhicules individuels commence alors à se généraliser dans les années 1910-1940 et s'amplifie

durablement durant les Trente Glorieuses (1945-1975). En parallèle, se développent également les réseaux routiers d'Europe dont nous héritons encore aujourd'hui (Burgel, 2012).

Contrairement aux chemins de fer, l'automobile offre une liberté de déplacement supplémentaire : une pleine autonomie dans ses déplacements (Coulibaly, 2007). Elle reconfigure les modes de sociabilité, permet d'interagir socialement, devient une source de plaisir, donne un sentiment de liberté et de flexibilité. John Urry (2000) parle d'ailleurs d'un passage vers une société civile « de l'automobilité » dans laquelle ne pas posséder un véhicule ne permet pas de participer pleinement aux sociétés occidentales. En Belgique, l'Exposition universelle de 1958 peut être considérée comme celle du lancement massif de l'automobile dans la capitale (Hubert, 2008).

Aujourd'hui, les automobiles font partie intégrante du paysage urbain. En 2020, le nombre de véhicules en Belgique est approximativement d'une pour deux habitants (Statbel, 2020). À Bruxelles, près de 55% des ménages bruxellois possèdent une voiture (Ermans, 2019). Malgré un recul sur ces dix dernières années en passant de 523 160 véhicules immatriculés en 2010 à 492 459 en 2020 (IBSA, 2021), Bruxelles reste l'une des capitales les plus motorisées d'Europe (Lebrun *et al.*, 2013). Si l'industrie de l'automobile traduit dans ces chiffres une réussite, les nuisances qu'engendrent le « tout-à-la-voiture » ne rendent pas soutenable nos villes à long terme.

### 1.1.2 Transport urbain et nuisances environnementales

Les transformations qu'ont connues nos modes de transport ont parallèlement provoqué une augmentation significative des flux à la fois en termes de distance et de rapidité. À l'échelle urbaine, les nuisances environnementales causées par le secteur des transports sont de plus en plus citées dans le débat public. Le véhicule automobile semble être devenu à ce jour le maillon le plus problématique du secteur en matière de nuisances. En effet, les derniers chiffres cités précédemment nous démontrent que le nombre d'automobiles en ville a connu une forte croissance au point d'en rendre les villes surchargées.

Pour comprendre la progression du nombre d'automobiles en ville, il est raisonnable de s'intéresser à la croissance démographique dans les zones urbaines. En effet, depuis la révolution industrielle, le taux d'urbanisation<sup>1</sup> connaît une croissance soutenue. En 2011, l'Organisation des Nations Unies (ONU) a par exemple déclaré que pour la première fois de l'Histoire plus de la moitié des humains vivaient en ville (UN, 2011) et projette ce chiffre à 60% d'ici 2030 (UN, 2018). Si la population urbaine continue d'augmenter, elle varie également en fonction des régions du globe. On constate en effet que le taux d'urbanisation des pays dits développés augmente plus rapidement que dans d'autres pays. L'Union européenne a ainsi estimé en 2010 que 73% de sa population vivaient dans des zones urbaines et que ce chiffre atteindrait les 80% d'ici 2050 (EEA, 2010). Toujours selon l'Union européenne, cette estimation atteindrait en Belgique les 90% en 2030. Entre 1991 et 2020, la croissance démographique de la Belgique a connu une progression de +15,17% avec des disparités au sein des trois régions. C'est en effet en Région de Bruxelles-Capitale que cette progression a été la plus élevée avec +27,69% pour la même période contre +14,91% en Région flamande et +11,96% en Région wallonne (Statbel, 2021).

Ainsi, l'augmentation de la population urbaine couplée à une augmentation du nombre d'automobiles individuelles a eu des conséquences négatives sur l'environnement. Embouteillage, pollution de l'air, pollution sonore, augmentation de la production de gaz à effet de serre, perte d'espace, etc. sont le prix que nos villes paient en contrepartie d'une liberté octroyée par l'automobile individuelle. Les paragraphes suivants visent à objectiver ces nuisances au regard des dernières études en la matière.

---

<sup>1</sup> Taux d'urbanisation : Proportion (exprimée en %) de la population totale d'un pays vivant en ville.

### 1.1.2.1 Pollution de l'air

On désigne la pollution de l'air comme étant la dégradation de la qualité de l'air due à l'augmentation de polluants chimiques, biologiques ou physiques susceptibles d'avoir des effets nocifs sur la santé humaine et/ou sur l'environnement. Ces polluants peuvent être d'origine naturelle, mais proviennent principalement des activités humaines. En Europe, le secteur des transports est devenu la principale source de pollution atmosphérique depuis que l'industrie a abandonné le charbon comme source d'énergie (Colvile *et al.*, 2001). La production de ces polluants atmosphériques se réalise lors de la combustion d'hydrocarbures (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.). Dans le cas d'une combustion complète, la production d'énergie devrait uniquement produire du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O). Toutefois, cette combustion est systématiquement incomplète et produit en outre des résidus de combustion qui participent à la dégradation de la qualité de l'air.

Dans ce contexte, le Parlement européen et le Conseil de l'Europe ont adopté le 21 mai 2008 la *Directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe*. Il en ressort des valeurs critiques de concentration de polluants à ne pas dépasser. Dans les polluants atmosphériques visés, on retrouve notamment :

- les particules fines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>),
- les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>),
- l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>) responsable des pics d'ozone,
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>),
- les métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic, nickel),
- les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM),
- et le monoxyde de carbone (CO).

Ces résidus mettent à mal la santé humaine et l'environnement. Les particules fines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>) que l'on retrouve dans l'air ambiant des grandes villes sont par exemple responsables d'irritations des voies respiratoires, d'aggravations de l'asthme, ou encore d'une hausse de risque d'accidents cardiovasculaires (Bruxelles Environnement, 2015). Les chlorofluorocarbones (CFC) contribuent à la dégradation de la couche d'ozone (Gilbert et Perl, 2010). Les dioxydes de soufre (SO<sub>2</sub>) participe à la formation des pluies acides qui provoquent des impacts sur la végétation en acidifiant notamment les sols (Bruxelles Environnement, 2006). Les métaux lourds peuvent quant à eux se retrouver dans la végétation urbaine à des concentrations élevées et par conséquent dans l'alimentation issue de l'agriculture urbaine (Säumel *et al.*, 2012).

La qualité de l'air est devenue un enjeu sanitaire pour les grandes villes comme Bruxelles. Sur les vingt dernières années, des progrès ont été réalisés en région bruxelloise afin de ne pas dépasser ces valeurs cibles (suppression de l'essence contenant du plomb, amélioration technique des moteurs à combustion, équipement des voitures à essence d'un pot catalytique, etc.). Néanmoins, le rapport bruxellois sur les émissions atmosphériques pour l'année 2012 tend à démontrer que le secteur des transports est souvent la première source de ces polluants. Par exemple, le transport routier bruxellois représente 67% des émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), 49% des émissions de monoxyde de carbone (CO) et 48% des émissions de  $\text{PM}_{10}$  (Bruxelles Environnement, 2014).

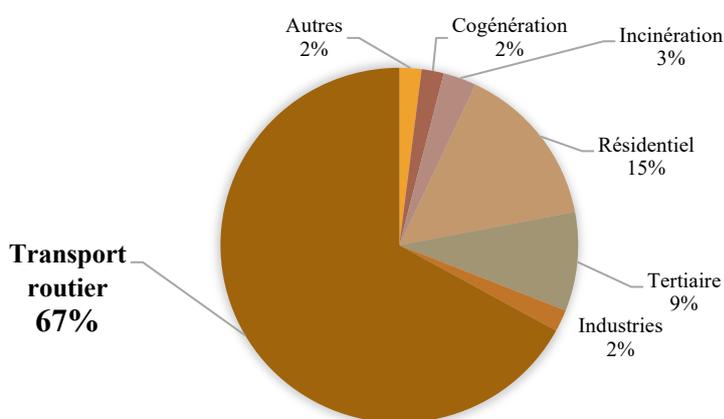


Figure 2 : Répartition sectorielle des émissions de NO en RBC en 2012 (Bruxelles Environnement, 2014)

En plus des polluants primaires, de nouveaux polluants se forment également lorsque les premiers réagissent entre eux ou avec des molécules présentes naturellement dans l'atmosphère dans des conditions météorologiques particulières (rayonnement solaire). Le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) peut par exemple se former par oxydation du monoxyde d'azote (NO) mais l'exemple le plus emblématique de polluants atmosphériques secondaires est celui de l'ozone troposphérique ( $\text{O}_3$ ). Ce dernier est issu de la réaction photochimique de polluants primaires comme les oxydes d'azote et les COV en présence des rayonnements solaires UV (Bruxelles Environnement, 2019). En période estivale, lorsque l'ensoleillement est abondant et que des températures supérieures à  $25^\circ\text{C}$  se maintiennent, la concentration en ozone troposphérique ( $\text{O}_3$ ) dans la basse atmosphère peut augmenter rapidement au point de provoquer un pic d'ozone. Ces événements ponctuels provoquent des irritations des yeux, du nez, de la gorge, des inflammations pulmonaires, des crises asthmes et abîment en outre la végétation (Bruxelles Environnement, 2015).

Enfin, au sein du secteur des transports, tous les modes de transport ne se valent pas en termes d'émissions de polluants atmosphériques. Lebeau et Macharis (2014) constatent que le trafic routier lié aux transports de marchandises constitue le deuxième émetteur de particules fines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>) et d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>), mais que les véhicules individuels restent toutefois le principal contributeur (Figure 3). Plus récemment, et dans le contexte particulier auxquels nos sociétés sont plongées depuis février 2020, He *et al.* (2020) ont par exemple mis en évidence que la restriction des déplacements de véhicules par les confinements en République populaire de Chine ont fait diminuer en quelques semaines de 25% la quantité de PM<sub>2.5</sub>. Toujours selon ces auteurs, cette diminution aurait évité la mort prématurée de 24 000 à 36 000 personnes.

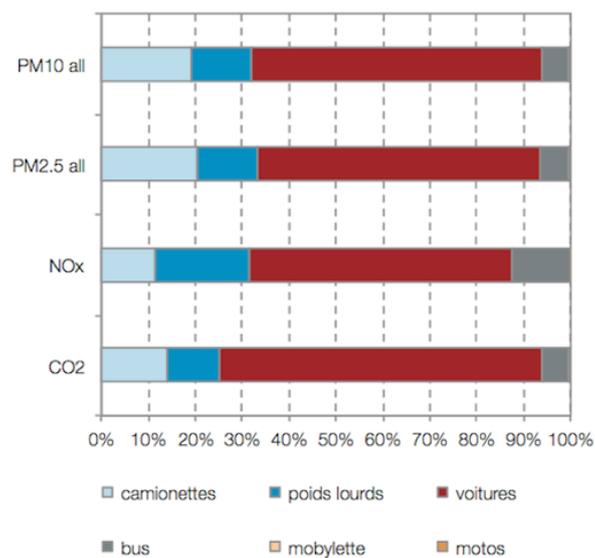


Figure 3 : Répartition modale des émissions de polluants et de CO<sub>2</sub> par les transports à Bruxelles (Lebeau et Macharis, 2014)

### 1.1.2.2 Augmentation de la concentration de gaz à effet de serre

Souvent confondu à tort avec les polluants atmosphériques, le secteur des transports émet également des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique. Le principal gaz à effet de serre émis par le secteur est le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) mais on trouve également du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et du méthane (CH<sub>4</sub>).

Au niveau mondial, en 2018, les transports constituaient la deuxième source d'émissions (25%) après le secteur lié à la production d'électricité (41%) (IEA, 2020). En Europe, la responsabilité du secteur des transports est également la deuxième source de gaz à effet de serre avec près de 20% en 2017. Au sein de celui-ci, les transports routiers (en excluant les transports maritimes et aériens) constituaient, la même année, le sous-secteur le plus polluant des secteurs liés aux transports avec 71,7% (EEA, 2021)<sup>2</sup>.

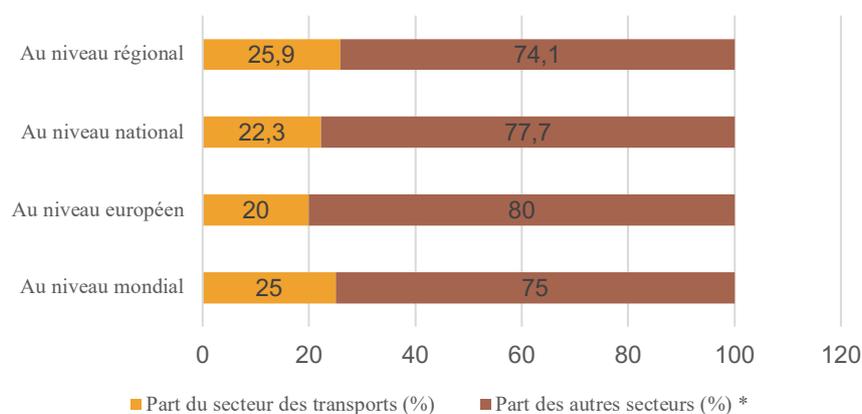


Figure 4: Responsabilité des émissions de gaz à effet de serre provenant du secteur des transports (routiers, aériens et maritimes). Réalisation sur base des données de l'IEA (2020), de l'EEA (2021), de la NCC (2020) et de Bruxelles Environnement (2016).

Au niveau national, le secteur des transports (comprenant les transports routiers, aériens et maritimes) est devenu en 2018 le premier émetteur de gaz à effet de serre en valeur absolue. Il représente près de 22,2% des émissions totales dont la grande majorité est due aux transports routiers (98,1%) (NCC, 2020).

Concernant la Région de Bruxelles-Capitale, la part de responsabilité des transports dans les émissions totales de la Région est de 25,9%. Celui-ci constitue le second émetteur après l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage qui constitue toutefois 66,6%<sup>3</sup> des émissions totales.

<sup>2</sup> Contre 13,5% pour les transports maritimes, 13,9% pour les transports aériens, 0,5% pour les transports ferroviaire, et 0,5% pour « autres catégories du secteur des transports » (EEA, 2019)

<sup>3</sup> 23,4% pour le chauffage de logements, 23,4% pour le chauffage dans le secteur tertiaire et 1,9% pour le chauffage dans le secteur de l'industrie en 2013 (Bruxelles Environnement, 2016).

\* la désignation des autres secteurs diffèrent en fonction des sources mais regroupent principalement l'agriculture, le chauffage, la production d'électricité et la gestion des déchets.

Le principal gaz à effet de serre émis par les transports à Bruxelles reste le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) à ± 99%. Les 1% restant sont constitués de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et en petite quantité de méthane (CH<sub>4</sub>) (Bruxelles Environnement, 2016). Néanmoins, même si ces deux derniers gaz sont émis en très petite quantité, leur pouvoir de réchauffement global<sup>4</sup> est respectivement estimé à 298 et à 25 (NCC, 2020).

Le graphique ci-dessous examine les tendances d'émissions de gaz à effet de serre des différents secteurs nationaux. Il y apparaît que les transports routiers ont connu une progression de 25,4% par rapport à 1990 alors que la tendance des autres secteurs a diminué<sup>5</sup> (NCC, 2020). Malgré les progrès techniques et les contraintes réglementaires, le secteur des transports est en développement rapide et ne se modernise pas suffisamment rapidement (Dobruszkes, 2021).

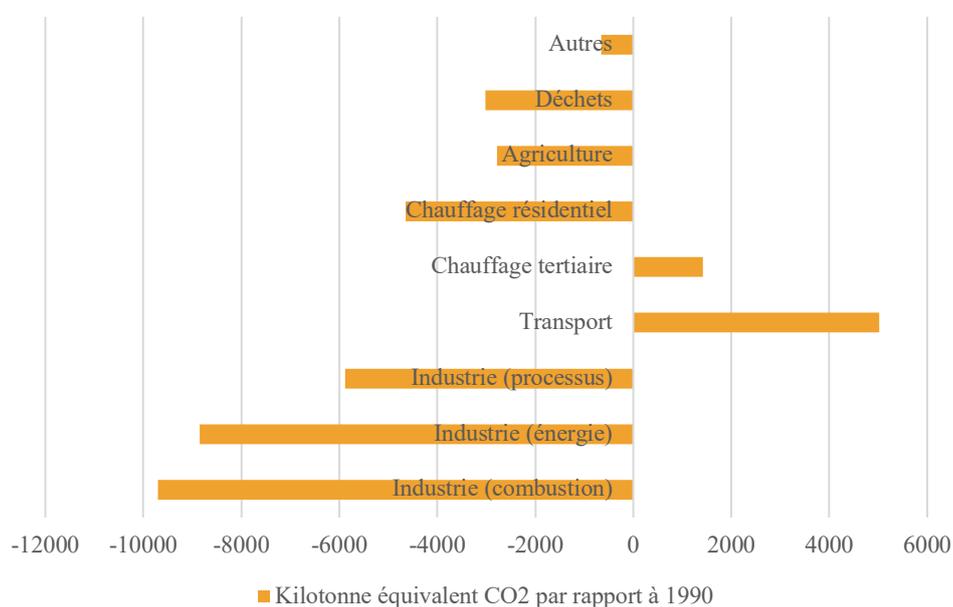


Figure 5 : Évolution des différents secteurs pour la période de 1990 – 2019 (Climat.be, 2019).

Quelle est la part de l'automobile individuelle dans les émissions de gaz à effet de serre ? L'Agence européenne pour l'environnement estime que les automobiles représentent 60,6% des émissions émises par le secteur des transports urbains (EEA, 2019). En reprenant les données de l'Agence européenne pour l'environnement (EEA), on peut estimer que le parc automobile européen contribuait à lui seul pour près de 10,69% des émissions totales.

<sup>4</sup> Le pouvoir de réchauffement global d'un gaz se réfère à la contribution totale au réchauffement global généré par l'émission d'une unité de ce gaz par rapport à une unité du gaz de référence. Le gaz de référence est le dioxyde de carbone dont sa valeur est de 1. (GIEC, 2001)

<sup>5</sup> Hormis l'utilisation de combustibles fossiles pour le secteur tertiaire qui a également connu une augmentation de 33% (NCC, 2020).

En comparant les émissions de gaz à effet de serre des différents modes de transport urbain, l'Ademe (2008) note que pour la région parisienne les émissions émanant des transports ferrés (tram, métro et train) sont largement inférieures à ceux des véhicules motorisés (deux-roues, autobus et véhicules individuels). Au sein des véhicules motorisés, c'est le véhicule individuel qui est le plus grand émetteur (Figure 6).

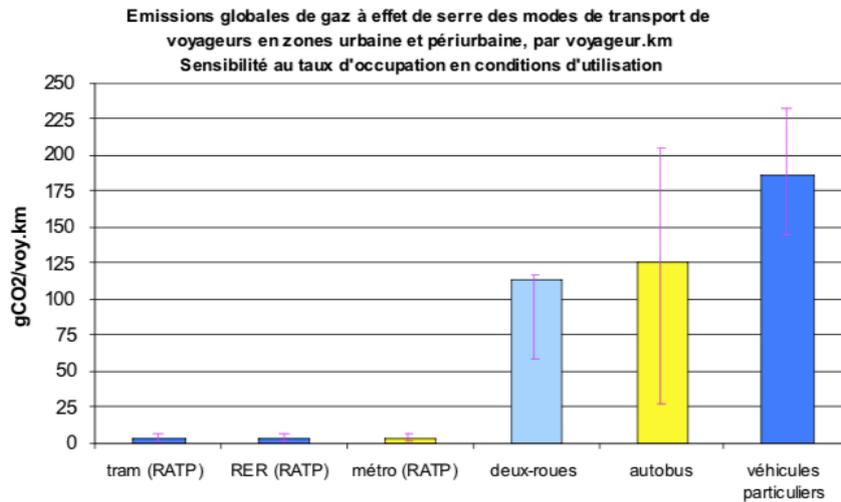


Figure 6 : Émission de CO<sub>2</sub> par mode de transport en milieu (péri)urbain (Ademe, 2008)

### 1.1.2.3 Pollution sonore

En 2017, Bruxelles Environnement a réalisé une enquête qualitative sur la perception du bruit dans la région. Il en ressort que la source de bruit considérée comme la plus gênante (pour 35% des interrogés) est celle liée au trafic routier (Bruxelles Environnement, 2017). Effectivement, l'exposition au bruit en ville est source de désagréments, mais peut également avoir des effets sur la santé humaine. Passchier-Vermeer & Passchier (2000) invoquaient déjà en 2000 une hausse des problèmes d'audition, de troubles du sommeil ou encore une augmentation des maladies cardio-vasculaires en conséquence de la pollution sonore en ville.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a par ailleurs fixé le seuil de gêne diurne de 55 décibels à ne pas franchir. Sur la grande majorité du territoire bruxellois, celui-ci est dépassé à cause du secteur des transports. Et c'est d'ailleurs le trafic routier qui prédomine dans ce franchissement. Près de 39% de la population bruxelloise subit quotidiennement un franchissement de ce seuil en raison du trafic routier. En comparaison, près de 2% de la population subit ce même franchissement à cause du réseau ferroviaire. Les réseaux de métro et de tramways sont quant à eux largement minoritaires dans l'émission de nuisances sonores (Bruxelles Environnement, 2010). La Figure 7 cartographie l'exposition au bruit dû au trafic routier en région bruxelloise. L'unité de mesure est le Lden (Level day-evening-night) qui décrit le niveau sonore équivalent moyen pondéré pendant 24h et observé sur une année entière (Bruxelles Environnement, 2010). On peut constater que le bruit émis par le trafic routier a un impact généralisé sur toute la région.



Figure 7 : Cartographie du bruit du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2010).

Toutefois, bien que les véhicules motorisés (voitures, deux-roues, bus et camions) soient le premier contributeur de nuisances sonores, les transports ferrés (trams, trains, et métros extérieurs) sont localement générateurs de bruit dépassant le seuil des 55 dB. Diminuer le nombre de véhicules motorisés en milieu urbain au profit des transports collectifs peut contribuer à une diminution du bruit. Cependant, cette diminution doit également s'accompagner d'un progrès technique au niveau des infrastructures et des modes de transport.

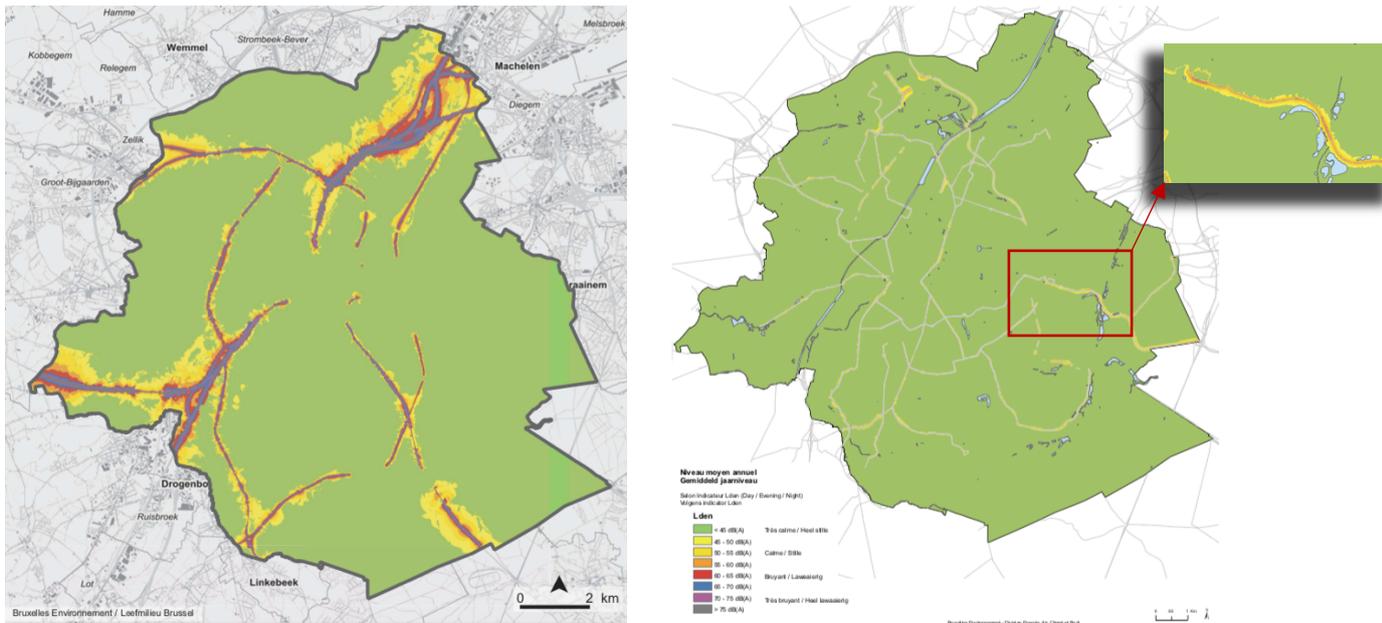


Figure 8 : Cartographie du bruit du trafic ferroviaire (à g.) et des métros aérien et trams (à d.) en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2010).

#### 1.1.2.4 Imperméabilisation des sols et perte d'espace

En milieu urbain, les infrastructures de transport occupent une superficie importante dans l'espace public. En région bruxelloise, l'espace dédié aux infrastructures linéaires et terminales représentait près de 21,6% du sol en 2007 (INS, 2007 in Dobruszkes, 2021). Concernant les infrastructures dédiées à l'automobile (voiries de circulation et de stationnement), une grande part de la superficie du sol bruxellois est consacrée à ce mode de transport. Si on compare cet espace à l'espace viaire<sup>6</sup> c'est-à-dire l'ensemble des voiries de circulation (autoroutes urbaines, boulevards, rues, avenues, trottoirs, impasses, etc.) et par conséquent hors espaces bâtis, espaces verts et intérieurs d'îlot (Geoconfluences, 2015), l'espace dédié à l'automobile représente près de 57,7%<sup>7</sup> contre 2,5% pour les sites propres des transports collectifs (Brandeleer *et al.*, 2016).

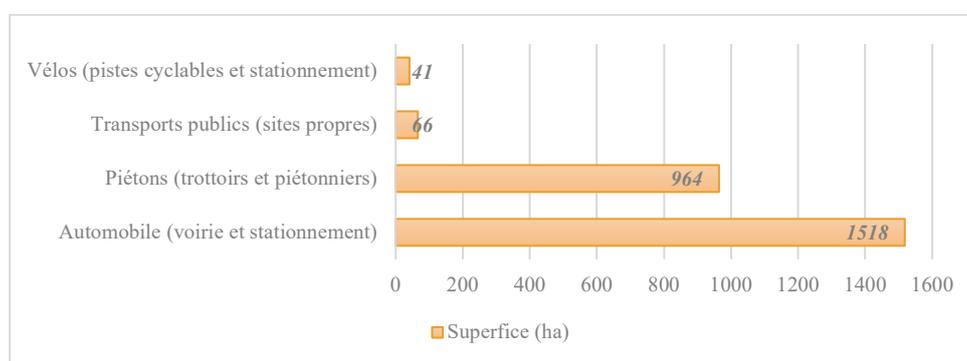


Figure 9 : Répartition de l'espace viaire par type d'usage en région bruxelloises en 2014 (Brandeleer *et al.*, 2016).

Cette consommation de l'espace urbain au profit des infrastructures de transport et en particulier au profit de l'automobile a non seulement fait diminuer la qualité de vie de la ville, mais a également contribué à l'imperméabilisation des sols. Les sols, même en milieu urbain, offrent des fonctions écosystémiques en entretenant une diversité biologique, en diminuant le risque d'inondations, ou encore en régulant les microclimats urbains (UE, 2012). Une des bonnes pratiques pour limiter l'imperméabilisation des sols consiste à renforcer les infrastructures de transport collectif (UE, 2012) car ceux-ci ont un taux de remplissage plus important.

#### 1.1.2.1 Autres nuisances environnementales

Enfin, les eaux de ruissellement issues des voiries sont chargées de polluants provenant des véhicules qui y circulent et contribuent ainsi à la pollution des eaux (Bruxelles Mobilité, 2020). Ces polluants sont susceptibles de s'accumuler dans les chaînes alimentaires. Notons également les nuisances que les transports en général et l'utilisation des véhicules individuels en particulier engendrent sur les paysages.

<sup>6</sup> également appelé « réseau viaire ».

<sup>7</sup> Cette superficie connaît toutefois une tendance baissière depuis 2005 en passant de 1577 ha à 1532 ha soit une diminution de 2,5% (Brandeleer *et al.* 2016, p33).

### 1.1.3 L'offre en transport collectif.

La Région de Bruxelles-Capitale possède une offre relativement variée de formes de transport en commun. De fait, on y retrouve des trams, des métros, des bus, et des trains. Ce réseau est géré par quatre opérateurs de transport public : la STIB, la SNCB, De Lijn, et le TEC. La STIB (Société des transports intercommunaux de Bruxelles) regroupe le réseau bruxellois de trams, bus et métro. La SNCB (Société nationale des chemins de fer belges) relie les gares bruxelloises entre elles et au réseau ferroviaire du pays. De Lijn constitue la société flamande de transports en commun et fait communiquer les communes limitrophes situées en Flandre avec la Région de Bruxelles-Capitale. Enfin, le TEC (Transport En Commun en Wallonie) assure quant à lui les liaisons entre la région bruxelloise et la Région wallonne (Bruxelles Mobilité, 2021).

Le réseau de tram bruxellois est constitué de dix-huit lignes totalisant une longueur de 147 kilomètres et est exploité dans son entièreté par la STIB. Ce dernier dessert les 19 communes de la région bruxelloise et s'étend également dans les communes flamandes de Drogenbos, de Grand-Bigard, de Kraainem, de Tervuren, et de Wezembeek-Oppem. Sur la Figure 10, on peut constater que si le réseau dessert bien toutes les communes de la région, le sud-est et l'est restent peu desservis par ce mode de transport. Historiquement, le réseau de tram était en effet plus développé avant la fin de la Seconde Guerre mondiale (241 km en 1945) et s'est réduit ensuite principalement sur les tracés des axes routiers importants (Lebrun *et al.*, 2012).

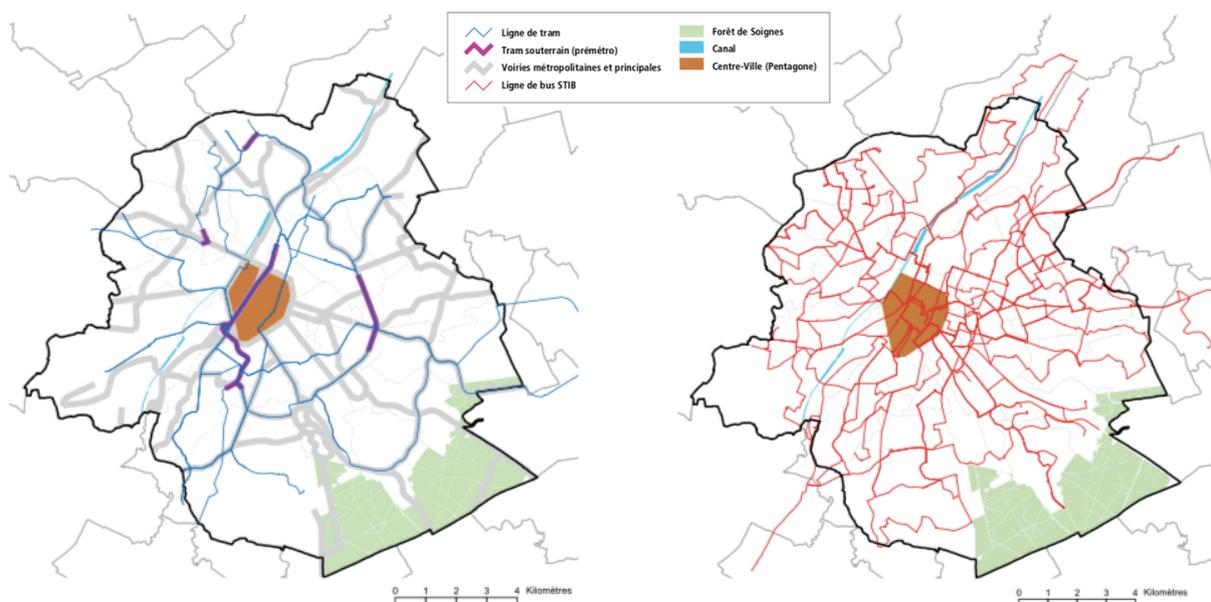


Figure 10 : Configuration des réseaux tram (à g.) et bus (à d.) de la STIB. Source : Lebrun *et al.*, 2012

Le réseau de bus en région bruxelloise est essentiellement exploité par la STIB, mais est également complété par des lignes de bus appartenant à De Lijn et au TEC. En opposition au raccourcissement du réseau de tram, le réseau de bus s'est largement développé à partir des années 1950-1960 avec l'essor de l'automobile privée (Figure 10). Subséquemment, ce dernier apparaît aujourd'hui plus maillé que celui du tram et s'étend dans l'entièreté de la région hormis les zones plus faiblement peuplées comme le sud d'Uccle et l'ouest d'Anderlecht (Lebrun *et al.*, 2012). En ce qui concerne le nombre de lignes de bus, la STIB propose 50 lignes qui s'étendent sur 363,6 km (STIB, 2021) tandis que le TEC propose 9 lignes (TEC, 2021) et De Lijn 74 lignes (Delijn, 2021). Si le nombre de lignes de bus de l'opérateur flamand paraît élevé, son réseau se concentre principalement sur un nombre limité d'axes de pénétration reliant la Région flamande à Bruxelles. Quant aux 8 lignes de bus exploitées par le TEC, ces dernières se concentrent principalement au sud et à l'est de la région (Lebrun *et al.*, 2012). Ces deux opérateurs n'ont pas vocation à desservir l'ensemble de la région, mais à amener leurs utilisateurs sur leur lieu de travail.

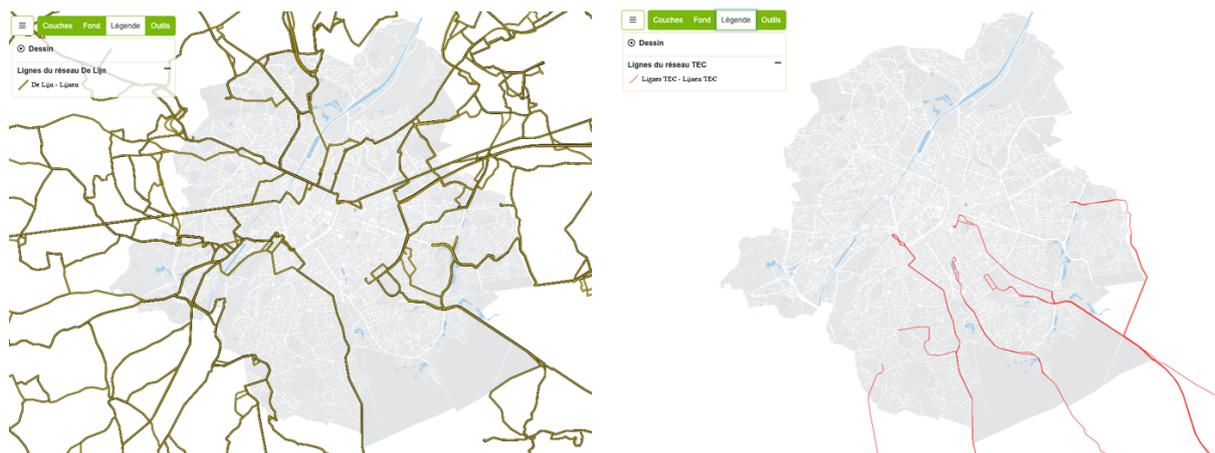


Figure 11 : Réseaux bruxellois des lignes de bus De Lijn (à g.) et TEC (à d.). Source : MobiGIS, (2021)

Pour ce qui est du réseau de métro, celui-ci est uniquement exploité par la STIB et est constitué de quatre lignes totalisant 39,9 km (STIB, 2021). De manière simplifiée, le réseau se structure autour d'une boucle située au centre de la région bruxelloise dont les quatre lignes se dirigent vers quatre directions différentes (Figure 12).

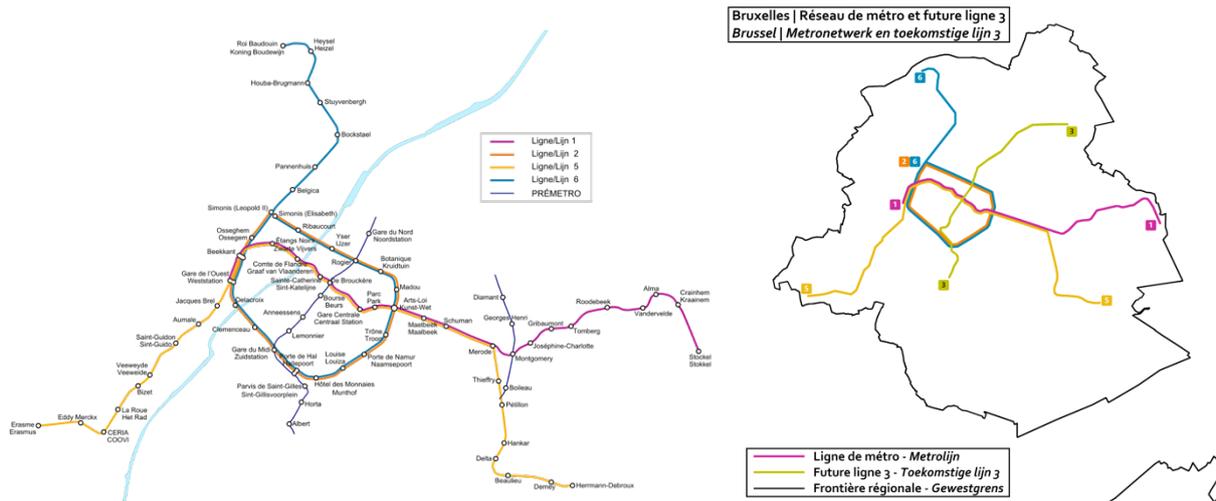


Figure 12 : Réseau du métro et du prémétro et localisation de la futur ligne 3 (STIB, 2021)

Notons également l'existence d'un prémétro dans lequel les trams circulent en souterrain avant d'être convertis en métro lourd (STIB, 2021). Cette conversion se fait notamment aux arrêts Rogier, Gare du Midi et Porte de Hal et constitue le projet de la future ligne 3 du métro bruxellois (Figure 12).

Enfin, pour ce qui est du réseau ferroviaire, l'unique opérateur qui exploite ce dernier est la SNCB. Depuis l'extérieur des frontières de la Région de Bruxelles-Capitale, les lignes ont la particularité de toutes converger vers le centre-ville de Bruxelles. Toutefois, nous remarquerons l'existence de voies interrégionales constituées de 31 gares et dont les directions sont placées selon un axe principal nord-sud (SNCB, 2020).

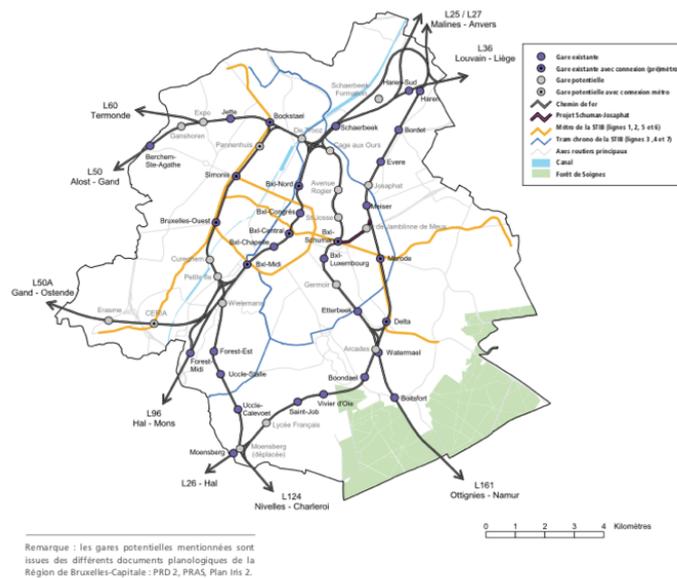


Figure 13 : Le réseau ferré bruxellois (Lebrun et al, 2012)

### 1.1.4 Un réseau de transport en commun structuré par des pôles intermodaux.

Le réseau de transport en commun de la région bruxelloise est relativement dense avec toutefois une forte hétérogénéité perceptible entre le centre de la région bien desservi et certaines zones périphériques qui présentent un déficit d'accessibilité aux transports collectifs (Lebrun, 2018). Afin de mieux structurer un réseau de transport collectif et donc d'en favoriser le recours à son usage, l'une des possibilités est d'identifier les différents pôles d'échange et de les relier entre eux. Le Plan régional de mobilité 2020-2030 approuvé en 2020 distingue plusieurs points de centralité à mettre en avant afin de mieux structurer le réseau bruxellois. Ces points de centralité sont notamment les gares accessibles à l'échelle nationale (Gare centrale, Gare du Midi, etc.), des espaces intermodaux notables (Simonis, Montgomery, etc.) ou encore des nouveaux pôles à renforcer comme la gare de Moensberg ou celle d'Heembeek. L'ensemble des axes et pôles d'échange du réseau métropolitain existant ou à créer est présenté à la figure suivante.

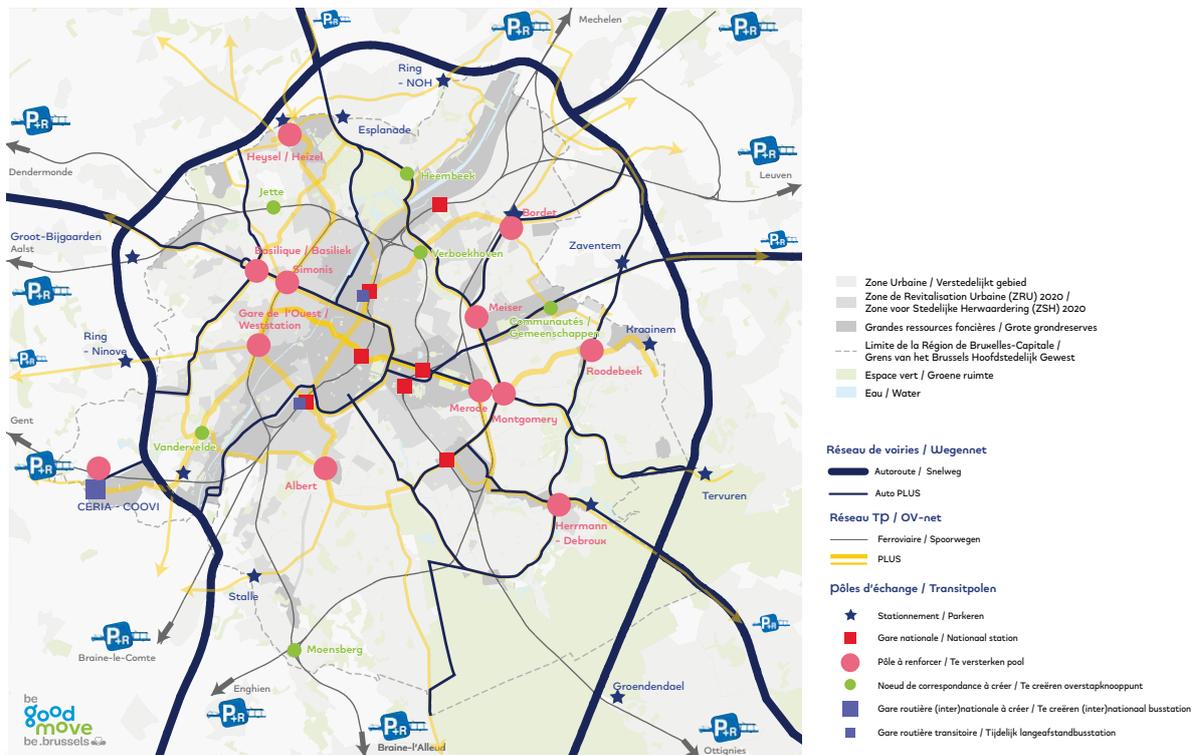


Figure 14 : Gare et pôles d'échange du Plan régional de mobilité 2020-2030 (Bruxelles Mobilité, 2020, p95).

## 1.2 Le biomimétisme à la rescousse des villes

### 1.2.1 Éléments de définition

S'inspirer de la nature n'est pas en soi une démarche récente. Les Égyptiens de l'antiquité sculptaient déjà les colonnes de leurs temples en forme de palmier ou de papyrus. À cet aspect esthétique, on va également y ajouter un aspect pratique lorsqu'imiter ce que l'on retrouve dans la nature permet de résoudre des problèmes de la vie quotidienne. La formation défensive des armées romaines s'est par exemple inspirée des écailles de la tortue pour les rendre moins vulnérables. Les exemples de biomimétisme dans l'histoire sans en nommer le concept ne manquent pas, mais le premier à le théoriser à travers ses esquisses est probablement Leonardo da Vinci dès les XV<sup>ème</sup> siècles. Nombreuses sont ses inventions, réussites ou non, qui ont été directement inspirées de la nature.

Le terme de « *biomimétisme* » n'apparaît dans la littérature scientifique qu'à partir des années 1950 avec les premiers travaux de l'ingénieur et physicien Otto Schmitt qui s'intéressa aux flux électriques du système nerveux des calmars géants. D'un point de vue étymologique, le mot « *biomimétisme* »<sup>8</sup> est la contraction de deux radicaux d'origine grecque : βίος (bios) désignant la nature ou la vie et μιμεῖσθαι (mimeisthai) désignant l'acte d'imiter. De manière simplifiée, le biomimétisme désigne l'action d'imiter la nature. Otto Schmitt complète en désignant le biomimétisme comme étant « *le transfert d'idées et d'analogies depuis la biologie vers la technologie* »<sup>9</sup> (Schmitt, 1969 in Vincent et al., 2006). Selon cette définition, il ne s'agit donc plus d'imiter simplement la nature, mais de s'en inspirer à des fins technologiques. Suite aux travaux d'Otto Schmitt, le Dictionnaire Webster, faisant autorité concernant l'anglais américain, incorpore même le terme en 1974 dans son ouvrage en le définissant comme étant :

*« The study of the formation, structure, or function of biologically produced substances and materials (as enzymes or silk) and biological mechanisms and processes (as protein synthesis or photosynthesis) especially for the purpose of synthesizing similar products by artificial mechanisms which mimic natural ones. »* (Harkness, 2001 in Vincent et al., 2006).

Pour s'inspirer de la nature, on parle dès lors de l'étude des formes, des structures et des matériaux produits biologiquement, mais également de l'étude des mécanismes et des processus comme la photosynthèse. Notons qu'à titre informatif, le terme de « *biomimétisme* » est à ce jour inexistant dans la dernière édition du dictionnaire de l'Académie française.

---

<sup>9</sup> In english: "transfer of ideas and analogues from biology to technology" (Schmitt, 1969).

Le concept va ensuite se populariser à partir de 1997 par la biologiste américaine Janine M. Benyus à travers son ouvrage *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*. Elle y définit le biomimétisme comme étant une approche qui examine les lois, les stratégies et les principes employés par les organismes vivants afin de les imiter ou de s'en inspirer pour répondre aux problématiques contemporaines (Benyus, 1997). À l'idée de s'inspirer de la nature pour résoudre des problèmes du quotidien, l'autrice met ainsi en avant une démarche environnementale. Le concept se voit alors annexer d'une nouvelle dimension, celle de s'inspirer de la nature pour répondre aux problématiques environnementales actuelles.

En parallèle au développement conceptuel du biomimétisme, d'autres termes issus du premier vont également émerger. La *bionique* est par exemple la science des systèmes qui recherche dans l'ingénierie du vivant à concevoir des modèles artificiels possédant les caractéristiques du vivant (Roth, 1983) comme les prothèses bioniques ou encore les fermetures autoagrippantes de la marque Velcro. La *bio-inspiration* désigne un processus créatif puisant son inspiration dans un ou plusieurs systèmes vivants (Fayemi *et al.*, 2015). On peut également constater les termes récurrents dans la littérature scientifique anglophone comme « *biomimesis* », « *biomimetics* », ou encore « *biognosis* » qui sont finalement des synonymes de « *biomimicry* » (Vincent *et al.*, 2006).

Face à l'évolution en termes d'interprétation du concept de biomimétisme et à l'apparition de termes souvent analogues au premier, le concept de biomimétisme est devenu parfois confus pour le grand public, mais également pour les décideurs politiques et économiques (Ricard, 2015). Dans ce contexte, les instances de normalisation comme l'Organisation internationale de normalisation ont récemment mis à jour ses deux normes liées au domaine de la biomimétique. La norme ISO 18458:2015 (Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologies) vise à fournir un cadre pour la terminologie relative à la biomimétique dans la science, l'industrie et l'enseignement. La norme ISO 18459:2015 (Biomimétisme – Optimisation biomimétique) spécifie quant à elle les fonctions et les domaines d'application des méthodes d'optimisation structurale de la biomimétique (ISO, 2021).

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études d'un Master en Sciences et gestion de l'environnement, nous retenons la définition de Fayemi *et al.* (2015) qui nous paraît la plus appropriée :

« *Le biomimétisme est une philosophie consistant à prendre la nature comme modèle, notamment à un niveau organisationnel, afin de répondre aux enjeux du développement durable (sociaux, environnementaux et économiques).* »

### 1.2.2 Cadre méthodologique pour une approche biomimétique

Le potentiel des solutions innovantes basées sur une approche biomimétique peut être considérable pour autant qu'une structure méthodologique soit proposée. En termes de méthodologie dans l'approche biomimétique, Baumeister *et al.* (2013) proposent quatre étapes :

- 1) Définition des champs d'application, du contexte et de la problématique,
- 2) Recherche de modèles biologiques offrant une réponse à la problématique,
- 3) Lister les solutions possibles inspirées par les modèles biologiques,
- 4) Évaluation et analyse de l'efficacité et les impacts de la solution trouvée.

Le transfert de connaissances de la biologie vers la technologie demeure un processus complexe (Fayemi *et al.*, 2015). Benyus (1997) distingue trois niveaux de biomimétisme : l'inspiration par la forme, l'inspiration par le processus, et l'inspiration par l'écosystème. Un exemple d'inspiration par la forme est celui de la centrale électrique conçue par BioPower Systems qui utilise des turbines ayant la forme des nageoires caudales (Chekchak et Lapp, 2011). S'inspirer de la façon dont le *Physarum polycephalum* façonne son réseau protoplasmique pour en étudier nos réseaux de transport est un exemple d'inspiration par le procédé. Enfin, l'inspiration par l'écosystème consiste à comprendre comment les relations interspèces permettent à un écosystème d'être durable dans le temps et de s'en inspirer (Lepora *et al.*, 2013 ; Kennedy *et al.*, 2015).

### 1.2.3 *Physarum polycephalum*, un outil d'aménagement du territoire ?

#### 1.2.3.1 Description biologique et cycle de vie.

*Physarum polycephalum* est un organisme eucaryote unicellulaire dont les premières descriptions datent de 1822 (von Schweinitz, 1822). Il fut dans un premier temps classé dans le règne des champignons (Link, 1833), ensuite parmi les végétaux (Macbride, 1899), et par la suite parmi les protistes (Olive et Whittaker, 1969). Ce n'est qu'en 2015 que le séquençage génétique a révélé son appartenance au règne des amibozoaires – *Amobozoa* (Schaap *et al.*, 2016). Il se présente principalement sous la forme d'une masse visqueuse de couleur jaune visible à l'œil nu appelée *plasmode*.

Son complexe cycle de vie, illustré à la figure suivante, peut être décrit en deux phases : la phase haploïde (n) sous la forme de cellules amiboïdes et la phase diploïde (2n) sous la forme de plasmode.

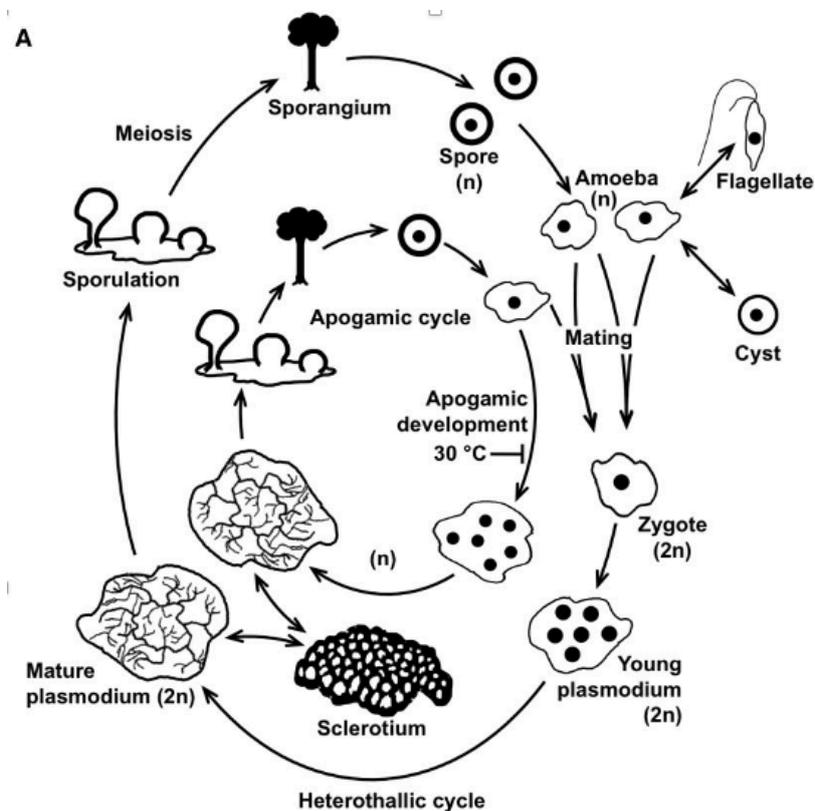


Figure 15 : Cycle de vie du *Physarum polycephalum* (Schaap *et al.*, 2016).

Lorsque les spores germent, ils donnent naissance à des cellules amiboïdes vivant dans le sol et se nourrissant par phagocytose de bactéries et d'autres micro-organismes (Olive, 1975). En milieu aqueux, ces derniers développent des flagelles leur permettant de se déplacer dans l'eau. En milieu défavorable, les cellules amiboïdes du *Physarum polycephalum* se transforment en cellule dormante en développant une paroi cellulaire leur assurant une protection en attendant le retour d'un milieu favorable (Raub et Aldrich, 1982).

La troisième transformation possible des cellules amiboïdes du *Physarum polycephalum* est contrairement aux deux précédentes irréversible et désigne la phase visible à l'œil nu du plasmode. Ce dernier est constitué d'une masse de cytoplasme possédant de nombreux noyaux et dont la taille semble augmenter indéfiniment tant que des sources de nourritures y sont présentes (Burland *et al.*, 1993). Lorsque le plasmode est privé de nourriture, il peut se transformer de deux manières différentes en fonction de la luminosité. Dans l'obscurité, le plasmode se contracte, rentre en dormance, et forme une cellule appelée *sclérote* qui peut perdurer des années. Dans la luminosité, le plasmode produit des sporanges composés de spores (Burland *et al.*, 1993) qui germeront à leur tour en cellules amiboïdes.

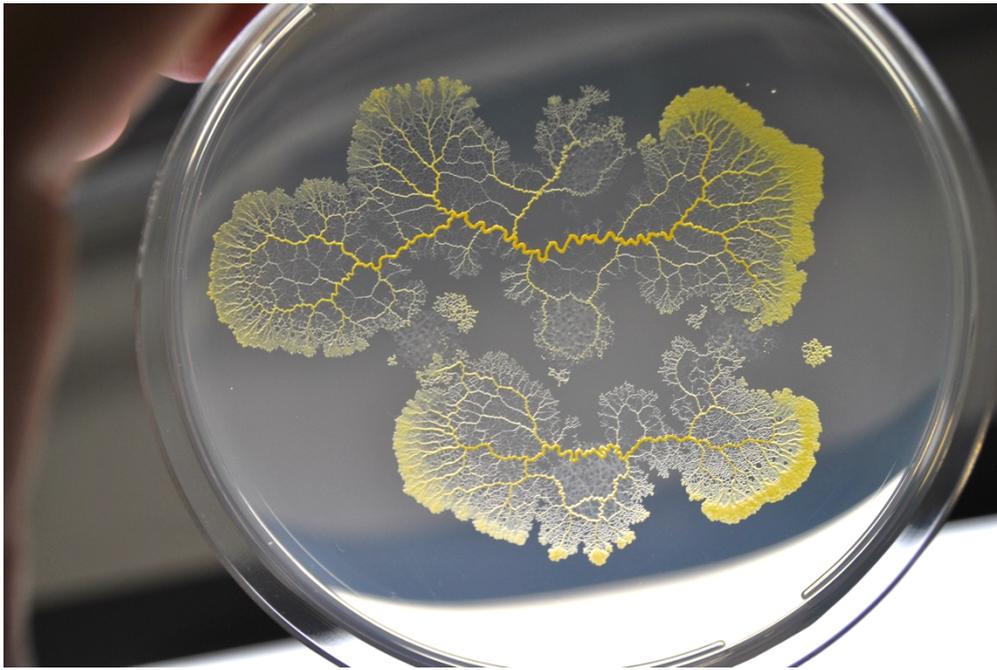


Figure 16 : *Physarum polycephalum* à l'état de plasmode (Illustration : Hans-Günther Döbereiner in IOPScience (2021)).

### 1.2.3.2 Description comportementale et déplacement.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons uniquement à la phase du plasmode. En effet, après avoir été délaissées dans les années 1990, les recherches sur le comportement du *Physarum polycephalum* ont connu un intérêt grandissant durant ces vingt dernières années (Oettmeier, 2020). C'est notamment son mode de déplacement qui a intrigué dès les années 2000. Nakagaki *et al.* (2000) ont constaté qu'à l'état de plasmode, le *Physarum polycephalum* se déplace continuellement à la recherche de nourriture. Son déplacement se caractérise par un mouvement de va-et-vient de la membrane cytoplasmique appelé « *shuttle streaming* » déjà décrit dans les années 1960 (Kamiya, 1960 *in* Oettmeier, 2017). De couleur jaune, l'intérieur du corps du plasmode est formé d'un maillage de tubes (ou veines) dans lesquels circule le protoplasme, liquide riche en nutriments et autres molécules essentielles à sa survie (Dussutour *et al.*, 2010). Outre le transport des nutriments, ces veines agissent comme des « jambes » qui peuvent s'assembler ou se dissocier en fonction des sources de nutriments présentes dans son environnement proche (Nakagaki *et al.*, 2004). Le *Physarum polycephalum* secrète également une substance répulsive qui lui permet d'éviter d'explorer inutilement deux fois une zone sans nutriments disponibles (Reid *et al.*, 2012).

En laboratoire, si deux sources de nourriture sont placées sur du gel d'agarose, l'organisme développe une veine connectant ces deux dernières (Nakagaki *et al.*, 2001). En allant plus loin, Nakagaki *et al.* (2000) ont placé cette fois-ci dans un labyrinthe du *Physarum polycephalum* et deux sources de nourriture. La première source se trouvant à l'entrée du labyrinthe et la seconde à la sortie. De l'entrée à la sortie, quatre chemins étaient possibles : deux tronçons comportant chacun deux options possibles. Dans le premier tronçon, la longueur de l'option  $\alpha_1$  était de  $\pm 41$  mm et celle de l'option  $\alpha_2$  était de  $\pm 33$  mm, soit 22% de différence. Dans le deuxième tronçon, la longueur de l'option  $\beta_1$  était de  $\pm 44$  mm et celle de l'option  $\beta_2$  était de  $\pm 45$  mm, soit 2% de différence (Figure 17-a).

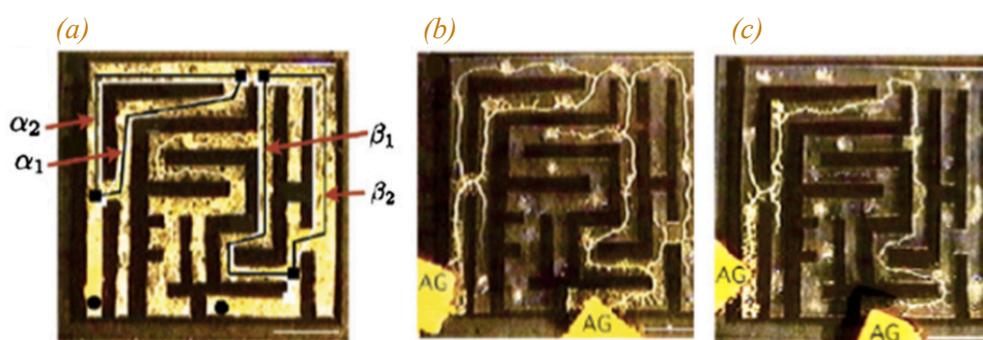


Figure 17 : Expérience de Nakagaki *et al.* (2000) : (a) Situation des différents chemins possibles avec le tronçon  $\alpha$  et ses options  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ , et le tronçon  $\beta$  et ses options  $\beta_1$  et  $\beta_2$ . Les sources de nourriture sont notées « AG ».

L'expérience de Nakagaki *et al.* (2000) est illustrée à la Figure 17. Lorsque l'organisme se met en recherche de nourriture, il se déploie dans l'entièreté du labyrinthe (a), développe plusieurs veines reliant les deux sources de nourriture (b), et sélectionne enfin ce qu'il considère être la veine la plus courte parmi les différentes possibilités (c). Après avoir répété l'expérience plusieurs fois<sup>10</sup>, le *Physarum polycephalum* a systématiquement opté pour l'option  $\alpha_2$  qui était plus courte de 22%. Pour le tronçon  $\beta$ , le plasmode a cependant sélectionné autant de fois les options  $\beta_1$  et  $\beta_2$  (2% de différence entre les deux options). De ce constat, les auteurs ont suggéré que le *Physarum polycephalum* peut résoudre le problème du chemin le plus court.

Nakagaki *et al.* (2001) ont également mis en évidence que ce comportement de recherche de nourriture s'effectue selon deux règles. Premièrement, les veines cytoplasmiques qui ne rentrent pas en contact avec une substance nutritive tendent à disparaître. Et deuxièmement, lorsque plusieurs veines se connectent à une même source de nourriture, les veines les plus longues tendent à disparaître au profit de la plus courte. Le réseau ainsi formé permet dès lors à l'organisme un transfert rapide et efficace des substances nutritives au sein du cytoplasme (Tsompanas *et al.*, 2016).

Aujourd'hui, la recherche sur le comportement du *Physarum polycephalum* ne s'est pas arrêtée comme le confirme l'envoi de l'organisme unicellulaire dans l'espace ce mardi 10 août 2021 à destination de la Station spatiale internationale (ISS) en vue d'observer son comportement en absence de gravité<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Les auteurs ne précisent cependant pas combien de fois l'expérience a été réalisée.

<sup>11</sup> Lascar O. (2021, 9 août), Le blob part mardi 10 août dans l'espace pour rejoindre l'ISS et Thomas Pesquet. *Sciences et Avenir* [en ligne]. Récupéré de [https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/le-blob-part-dans-l-espace-pour-rejoindre-l-iss-et-thomas-pesquet\\_156435](https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/le-blob-part-dans-l-espace-pour-rejoindre-l-iss-et-thomas-pesquet_156435)

### 1.2.3.3 Optimisation combinatoire et conception d'un réseau performant : la vision mathématique.

Lors de la conception d'un réseau performant, l'intérêt est de relier différents lieux tout en minimisant le coût de déplacement entre ceux-ci. En mathématiques appliquées et en informatique, ce problème est exploré dans la théorie des graphes. On appelle « graphe » un ensemble abstrait d'objets dans lequel certaines paires d'objets sont en relation. Les objets sont appelés sommets (aussi appelés nœuds ou points) et les liens entre les sommets sont appelés segments (aussi appelés arêtes ou lignes) (Sache, 1974 ; Pellet, 1966 ; Roux, 2012). Mathématiquement, on appelle « graphe » le couple  $G = (X, U)$  formé par un ensemble  $X$  d'éléments points et par une famille  $U$  de couples de points, les segments (Sache, 1974). En matière d'analyse spatiale, un graphe est donc « une représentation simple de la structure, des connexions et des cheminements possibles d'un réseau exprimant les relations et les dépendances entre ses éléments » (Caloz et Collet, 2011).

On distingue les graphes planaires des non-planaires. Les graphes planaires sont des graphes qui peuvent être tracés sur une surface de telle sorte que deux segments quelconques ne se recoupent pas, excepté aux sommets (Price, 1974). Parmi les différents types de graphes planaires, on retrouve les graphes de voisinage<sup>12</sup>. Ceux-ci sont des graphes planaires dans lesquels deux sommets sont reliés par un segment en fonction d'une certaine proximité. Ces types de graphes permettent d'étudier les relations de proximité entre plusieurs points (Maniadakis & Varoutas, 2016) et constituent donc un outil dans les problèmes d'analyse spatiale des réseaux (Caloz et Collet, 2011).

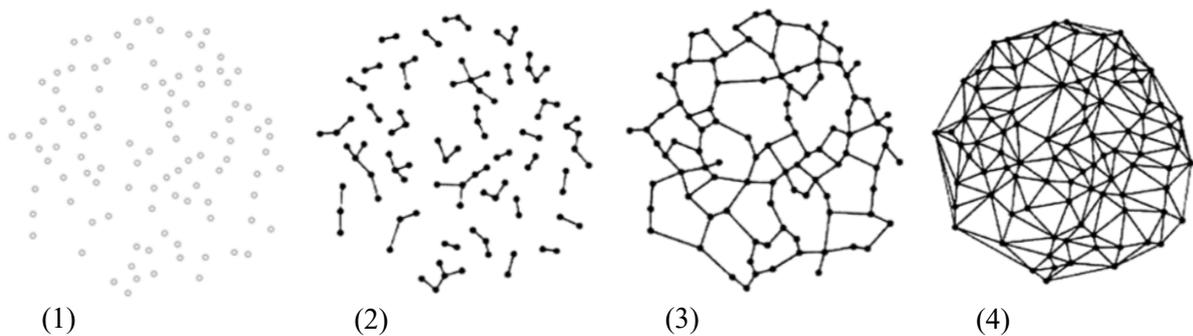


Figure 18 : Exemples de graphes de voisinage : (1) Configuration initiale de sommets, (2) Graphe du plus proche voisin, (3) Arbre couvrant de poids minimal, (4) Triangulation de Delaunay. (Illustrations : Adamatzky, 2009).

---

<sup>12</sup> « proximity graph » in english

Parmi les graphes de voisinage qui sont utilisés dans l'élaboration d'un réseau performant, on retrouve les principaux algorithmes suivants :

- Le problème du chemin le plus court, ou « *Shortest path problem (SPP)* » en anglais, qui vise à trouver le chemin le plus court entre deux sommets dans un graphe composé de plusieurs sommets (Price, 1974) ;
- L'algorithme de Dijkstra qui détermine les chemins les plus courts à partir d'une source vers tous les autres sommets d'un graphe (Price, 1974) ;
- Le problème du voyageur de commerce, ou « *Travelling salesman problem (TSP)* » en anglais, qui permet l'identification du chemin le plus court parcourant l'ensemble des sommets d'un graphe (Gross et Yellen, 2004) ;
- L'arbre couvrant de poids minimal, ou « *Minimum spanning tree (MST)* » en anglais, qui permet d'identifier un réseau arborescent construit de manière à lier un sommet du graphe à son plus proche voisin (Graham et Hell, 1985 in Glaus et al., 2012) ;
- Et l'arbre couvrant de Steiner, ou « *Steiner tree problem (STP)* », qui désigne une variante de l'APM plus performante en créant de nouveaux sommets (Mathieson et Moscato, 2019);

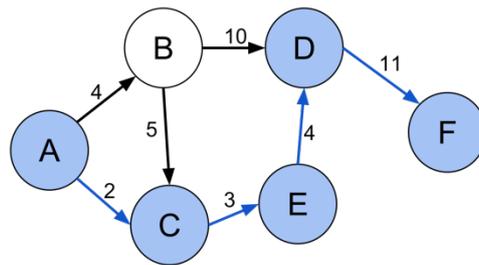


Figure 19 : Exemple de chemin le plus courts entre les sommets A et F (Poids du chemin ACEDF = 20)

Les deux derniers algorithmes cités précédemment peuvent contribuer à l'élaboration d'un réseau performant. Dans un graphe, un *arbre couvrant* est un réseau qui relie tous les sommets du graphe. Un arbre couvrant de poids minimal (APM) d'un graphe est un arbre couvrant où la somme des poids des arêtes est minimale parmi tous les arbres couvrants possibles (Mathieson et Moscato, 2019).

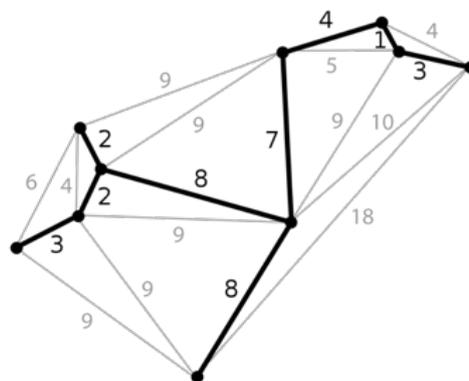


Figure 20 : Arbre couvrant de poids minimal (Illustration : Wikipédia, 2021).

La Figure 20 représente l'élaboration d'un réseau connectant chaque sommet à son plus proche voisin selon l'algorithme de l'arbre couvrant de poids minimal. Dans cet exemple, le poids de chaque segment y est identifié et le poids du réseau tel quel est de 38.

L'arbre couvrant de Steiner est une variante de l'arbre couvrant de poids minimal. Contrairement à ce dernier qui vise à relier l'ensemble des sommets à moindre coûts, l'arbre de Steiner permet de réduire la longueur totale du réseau en créant de nouveaux sommets appelés points « Steiner » (Mathieson et Moscato, 2019). La longueur totale du réseau ainsi formé est réduite de 7 à 9% (Robins et Zelikovsky, 2008 *in* Glaus *et al.*, 2012). Sur la Figure 21, à partir d'un même ensemble de sommets, deux graphes ont été créés. À gauche, les sommets ont été reliés selon l'arbre couvrant de poids minimal et à droite selon l'arbre de Steiner. Les points « Steiner » sont représentés par les points noirs a-b-c-d-e.

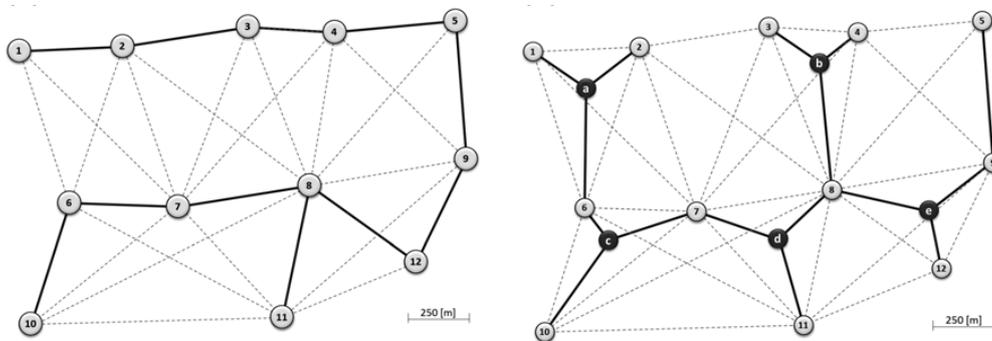


Figure 21 : Comparaison entre un réseau obtenu par l'algorithme de l'arbre couvrant à poids minimal – APM (à g.) et par l'algorithme de l'arbre de Steiner – AMS (à d.). (Illustration : Glaus *et al.*, 2012).

#### 1.2.3.4 Optimisation combinatoire et conception d'un réseau performant : la vision du *Physarum polycephalum*.

La capacité du *Physarum polycephalum* à résoudre le problème du chemin le plus court a été premièrement observée par Toshiyuki Nakagaki et ses collaborateurs lors des expériences citées précédemment au point 1.2.3.2 (Nakagaki *et al.* 2000 ; Nakagaki *et al.* 2001). Le réseau créé par l'organisme dans le labyrinthe lui permettait d'exploiter au maximum les nutriments à proximité en un minimum de temps.

Ces observations laissaient donc suggérer que l'organisme était capable de résoudre des problèmes plus complexes. L'expérience suivante visait à observer le comportement du plasmode lorsqu'il était confronté cette fois-ci à plus de deux sources de nourriture (3, 6, 7, et 12) et d'évaluer la performance des réseaux établis. Pour évaluer la performance du réseau, les critères utilisés par Nakagaki *et al.* (2004) étaient la longueur totale du réseau protoplasmique (TL), le niveau de résilience (c'est-à-dire la possibilité de rejoindre chaque nœud du réseau, et ce même en cas de ruptures aléatoires) (FT), et le degré de séparation des points du réseau (AS).

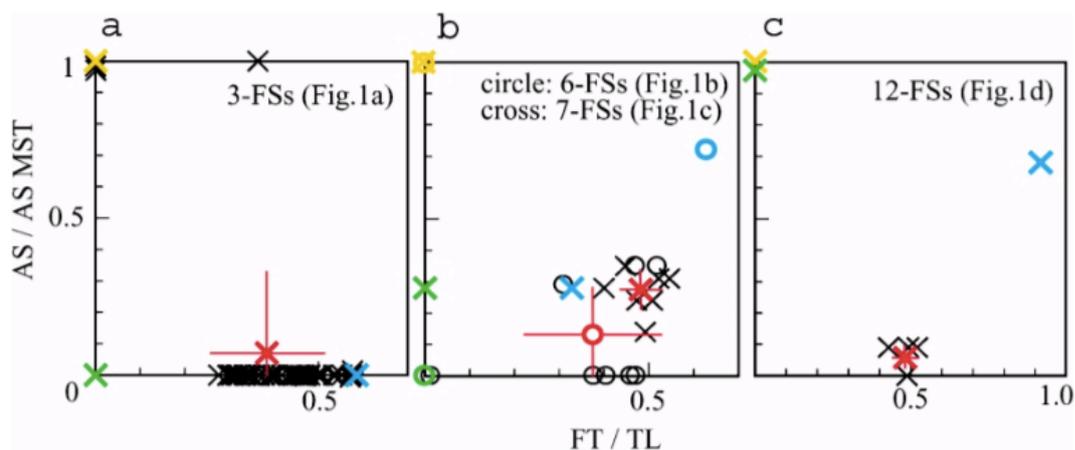


Figure 22 : Expérience de Nakagaki *et al.* (2004) : (a) Résultats avec trois sources de nourriture, (b) avec 6 et 7, et (c) avec 12.

La Figure 22 résume les résultats obtenus par Nakagaki *et al.* (2004) pour l'évaluation de la performance des réseaux protoplasmiques et leur comparaison avec des modèles mathématiques. En abscisse est indiqué le rapport FT/LS et en ordonnée la valeur AS. Un réseau performant requiert un niveau bas d'AS et un niveau haut du rapport FT/LS. Les symboles noirs représentent le résultat obtenu pour chaque expérience et les symboles rouges la moyenne de ces résultats. Les symboles jaunes, verts et bleus représentent respectivement les valeurs obtenues mathématiquement pour l'arbre couvrant de poids minimal, l'arbre de Steiner et la triangulation de Delaunay. Selon ces critères, pour chaque expérience, le réseau protoplasmique était plus performant que le modèle mathématique hormis pour la triangulation

de Delaunay avec 3 sources de nourriture. La performance du réseau protoplasmique était plus significative lorsque celui-ci est confronté à un plus grand nombre de sources de nourriture.

Ces expériences ont donné une lecture mathématique à la configuration du réseau protoplasmique. Lorsque deux veines protoplasmiques se rencontrent, elles fusionnent en formant une jonction en T. Les réseaux formés par l'organisme sont des graphes planaires (Adamatzky, 2009) au sens de la théorie des graphes. En reliant l'ensemble des sources de nourriture par un réseau de veines protoplasmiques, le réseau se comporte comme un arbre couvrant. Pour Adamatzky (2008), celui-ci se développe comme un arbre couvrant de poids minimal. Pour Nakagaki *et al.* (2004), la capacité de l'organisme a créé des jonctions supplémentaires assimilables à des points Steiner fait du réseau protoplasmique un arbre de Steiner. Ces nouvelles jonctions permet en effet à l'organisme de réduire la longueur totale du réseau (Sun, 2017). D'autres expériences vont démontrer la capacité du réseau protoplasmique à résoudre différents problèmes d'optimisation combinatoire liés à la théorie des graphes comme le problème du voyageur du commerce (Aono *et al.* 2011 ; Zhu *et al.* 2013 ; Jones et Adamatzky, 2013), le diagramme de Voronoï (Shirakawa et Gunji. 2010), ou encore la triangulation de Delaunay (Shirakawa *et al.* 2009).

Ces expériences insolites ont un caractère intrigant, car elle pose la question de comment un être unicellulaire sans réel cerveau est capable de résoudre un problème aussi complexe que l'arbre de Steiner. Un autre intérêt est celui de l'application qu'on peut en retirer dans d'autres domaines notamment dans la construction d'un réseau de transport. Un réseau de transport performant a de l'intérêt dans le sens où celui-ci peut contribuer à la réduction de l'utilisation de la voiture automobile et par conséquent à la réduction des nuisances environnementales induites par cette dernière.

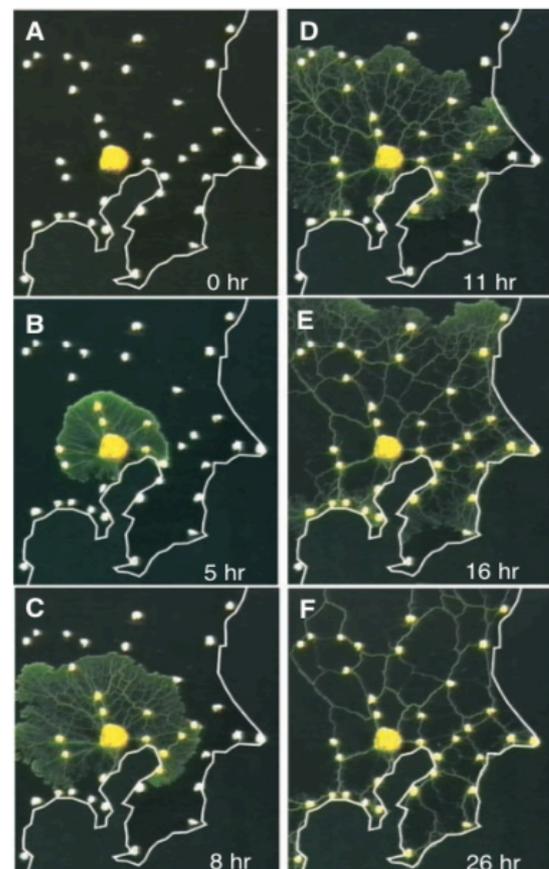


Figure 23 : Développement du *Physarum polycephalum* dans l'expérience de Tero *et al.* (2010).

Afin d'observer la performance du réseau protoplasmique avec les réseaux de transport conçus par les sociétés humaines, Tero *et al.* (2010a) ont placé sur du gel d'agarose trente-six sources de nourriture (sous forme de flocons d'avoine) représentant les grandes villes de la région de Tokyo. Après avoir été inoculé « géographiquement » à Tokyo, l'organisme a développé un réseau graphiquement similaire à celui du réseau ferroviaire (Figure 23 et Figure 24). Les différences observées étaient principalement dues aux contraintes topologiques (comme les lacs ou les montagnes) imposées au réseau ferroviaire. En reprenant les critères de Nakagaki *et al.* (2004), la performance du réseau protoplasmique était également similaire à celui du réseau ferroviaire) et supérieur au réseau résolu par l'arbre couvrant de poids minimal.

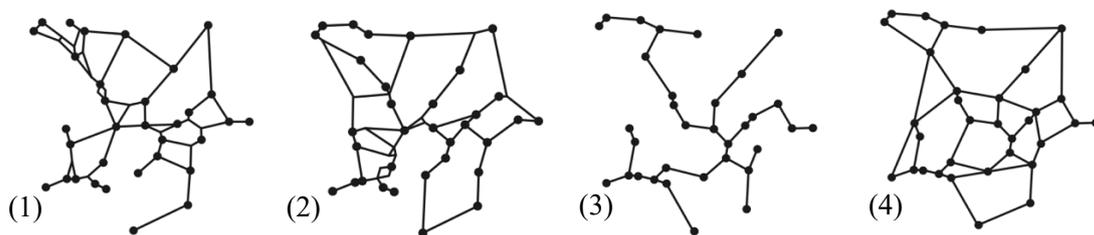


Figure 24 : Comparaison du réseau protoplasmique (1) avec le réseau ferroviaire tokyoïte (2) et les réseaux formés par l'algorithme de l'arbre couvrant à poids minimal (3)-(4). (Source : Tero *et al.*, 2010)

Le *Physarum polycephalum* peut donc construire un réseau performant reliant plusieurs sources de nourriture. Une fois que le réseau a relié toutes les sources de nourriture, l'organisme crée également des points intermédiaires s'assimilant à des points Steiner. Le *Physarum polycephalum* développe ainsi un réseau plus performant. Pour Nakagaki *et al.* (2004), le réseau protoplasmique s'assimile davantage à un *arbre couvrant de Steiner*. Cette capacité permet donc à l'organisme de réduire la longueur totale du réseau (Sun, 2017).

Après les résultats encourageants de Tero *et al.* (2010), le degré de correspondance entre le réseau de l'organisme et les réseaux de transport ont été notamment mises en évidence en Grèce (Tsonpanas *et al.*, 2016), sur la péninsule ibérique (Adamatzky et Alonso-Sanz, 2011), en Belgique (Adamatzky, 2011), au Mexique (Adamatzky *et al.*, 2011), au Royaume-Uni (Adamatzky et Jones, 2010), en Australie (Adamatzky et Prokopenko, 2012) et dans les Balkans (Evangelidis *et al.*, 2015).

Ces exemples démontrent l'intérêt de collecter des informations sur le développement du réseau protoplasmique afin de les comparer entre elles. L'approche classique pour modéliser un réseau de transport relève pour la plupart des algorithmes issus de la théorie des graphes. Depuis que les premiers algorithmes d'arbre couvrant de poids minimal ont été développés dans les années 50, de nombreux nouveaux modèles ont apporté des améliorations ou des spécifications (Adamatzky, 2008). En partant de l'hypothèse que des années de sélection évolutive ont permis au *Physarum polycephalum* de trouver un compromis entre la longueur totale de son réseau, la résilience de celui-ci, et le degré de séparation, l'organisme est capable d'élaborer un réseau performance. Suite aux premiers travaux de Toshiyuki Nakagaki, de modèles mathématiques ont été construits sur base de l'observation de la construction des veines protoplasmiques (Tero *et al.*, 2007 ; Bonifaci *et al.*, 2012). Sun (2017) qui a fait une revue de la littérature concernant les algorithmes inspirés du *Physarum polycephalum*<sup>13</sup> propose trois étapes pour développer un modèle mathématique inspiré de l'organisme. Premièrement, il paraît nécessaire de révéler l'intelligence du *Physarum polycephalum* à développer des réseaux optimisés à travers des expériences. Deuxièmement, il faut pouvoir modéliser cette intelligence sur base de l'observation des expériences. Et troisièmement, les modèles mathématiques inspirés du *Physarum polycephalum* doivent par la suite être adaptés aux différentes applications possibles.

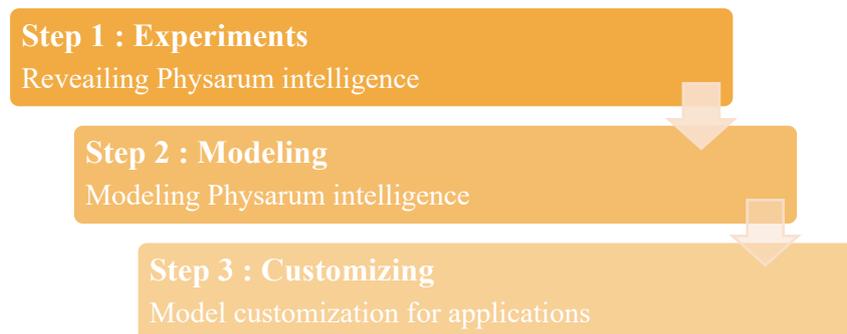


Figure 25 : Les trois étapes pour l'élaboration d'un modèle mathématique inspiré du *Physarum polycephalum* (Sun, 2017).

---

<sup>13</sup> "Physarum-inspired Algorithms (PAs)"

### 1.3 Approche biomimétique dans la conception des réseaux de transport collectifs

L'essor du véhicule particulier a révolutionné nos pratiques quotidiennes de déplacement. Les grandes métropoles du Monde sont aujourd'hui marquées par cet essor. Progressivement, on s'est rendu compte que cette liberté de déplacement s'acquittait d'un prix à payer d'ordre environnemental, social et économique. La diminution du véhicule particulier en ville passe par le renforcement de l'utilisation des transports collectifs qui passe à son tour par une meilleure accessibilité à celui-ci et à une meilleure connexion entre les différentes zones de la ville.

Distinguer les pôles d'échanges intermodaux d'une ville en vue de les connecter entre eux est l'une des solutions possibles pour renforcer le réseau de transports collectifs. L'enjeu de la mobilité réside entre autres dans l'élaboration d'un réseau performant attractif. Parmi les approches dites « classiques », il y a celles qui s'inscrivent dans la théorie des graphes (Glaus *et al.*, 2012) via notamment des outils SIG. Toutefois, il existe également des approches alternatives qui ont le potentiel de répondre différemment et éventuellement mieux à certains problèmes que rencontrent nos sociétés tout en ayant une vision durable. Les recherches sur le *Physarum polycephalum* ont ainsi démontré sa capacité à élaborer des réseaux au moins aussi efficaces que ceux construits par nos sociétés. Ces approches qui s'inscrivent dans le biomimétisme ont été étudiées dans la littérature scientifique à l'échelle d'une nation ou d'une région, mais pas encore à l'échelle urbaine.

L'objectif initial de ce mémoire de fin d'études est d'explorer le potentiel de ces approches alternatives à travers l'expérimentation du *Physarum polycephalum*. Ce travail s'articule autour de plusieurs questions : Quelles similitudes peut-on retirer entre le réseau développé par l'organisme et ceux développés par des modèles cartographiques (SIG) ? Est-ce que le réseau de l'organisme est théoriquement plus efficace ou non que celui de la région bruxelloise ? Est-il possible de développer une méthodologie basée sur cette approche pour concevoir un réseau de transport urbain ? Est-ce que les expérimentations de l'organisme peuvent nous apporter des éléments nouveaux à propos des connexions entre les différentes zones de Bruxelles ou bien confirmer certaines caractéristiques connues ? Est-ce que l'inspiration par le processus d'élaboration des réseaux protoplasmiques du *Physarum polycephalum* peut constituer un outil d'aménagement du territoire ?

Finalement, la question de recherche peut se tourner de la sorte : En quoi une approche biomimétique dans la conception d'un réseau de transport et donc plus généralement en aménagement du territoire peut nous apporter une solution durable et résiliente ?

## 2. Matériels et méthodes.

### 2.1 La zone d'étude : La Région de Bruxelles-Capitale

#### 2.1.1 La Région de Bruxelles-Capitale

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, la zone modèle est la Région de Bruxelles-Capitale en Belgique. Nous entendons ici le territoire régional fixé par la loi spéciale du 12 janvier 1989. Ce territoire comprend 19 communes dont la commune de Bruxelles (à ne pas confondre avec la Région de Bruxelles-Capitale) et fait une superficie de 162 km<sup>2</sup>. Bien qu'une analyse des réseaux de transports de la région bruxelloise devrait prendre en compte les territoires adjacents, nous avons pris le parti de nous restreindre aux limites du territoire administratif de la région.

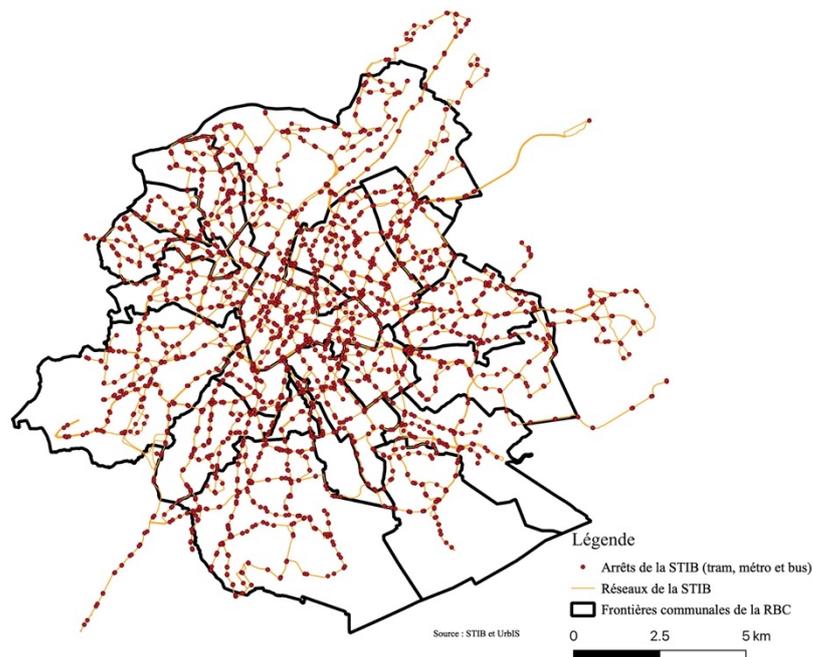


Figure 26 : Arrêts et réseaux de la Société des transports intercommunaux de Bruxelles (STIB).

#### 2.1.2 Sélection des lieux à desservir

Lors de leur expérience sur le réseau routier belge, Adamatzky *et al.* (2011) avaient sélectionnés les 21 zones urbaines les plus peuplées. Tero *et al.* (2010) avaient quant à eux sélectionné les 36 gares ferroviaires de la région de Tokyo. A l'échelle urbaine, la sélection des sommets les plus pertinents à relier nécessite un travail plus complexe en amont. Le réseau de la STIB possède par exemple plus de 2200 arrêts (Figure 26) et tous les arrêts ne se valent pas en terme d'importance. L'arrêt desservi par une unique ligne de bus n'a pas le même impact sur le réseau que l'arrêt desservi par plusieurs lignes d'un même mode de transport et par différents modes de transport. L'intérêt est alors de sélectionner les principaux lieux intermodaux qui structurent les réseau de transport d'une ville.

Dans cette logique, nous avons sélectionné les 25 gares et pôles d'échange du réseau TP du Plan régional de mobilité pour la Région de Bruxelles-Capitale 2020-2030 (Bruxelles Mobilité, 2020). Ces 25 lieux comprennent 7 gares nationales, 12 pôles à renforcer et 6 nœuds de correspondance à créer (Figure 14 et Figure 27) :

- Les gares nationales :

- |                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| (1) Gare centrale        | (5) Gare de Schaerbeek |
| (2) Bruxelles-Nord       | (6) Bruxelles-Midi     |
| (3) Schuman              | (7) Gare d'Etterbeek   |
| (4) Bruxelles-Luxembourg |                        |

- Les pôles à renforcer :

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| (8) Erasme            | (14) Roodebeek       |
| (9) Albert            | (15) Bordet          |
| (10) Herrmann-Debroux | (16) Gare de l'Ouest |
| (11) Merode           | (17) Simonis         |
| (12) Montgomery       | (18) Basilique       |
| (13) Meiser           | (19) Heysel          |

- Et les nœuds de correspondance à créer :

- |                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| (20) Veeweyde   | (23) Verboekhoeven |
| (21) Moensberg  | (24) Heembeek      |
| (22) Communauté | (25) Gare de Jette |

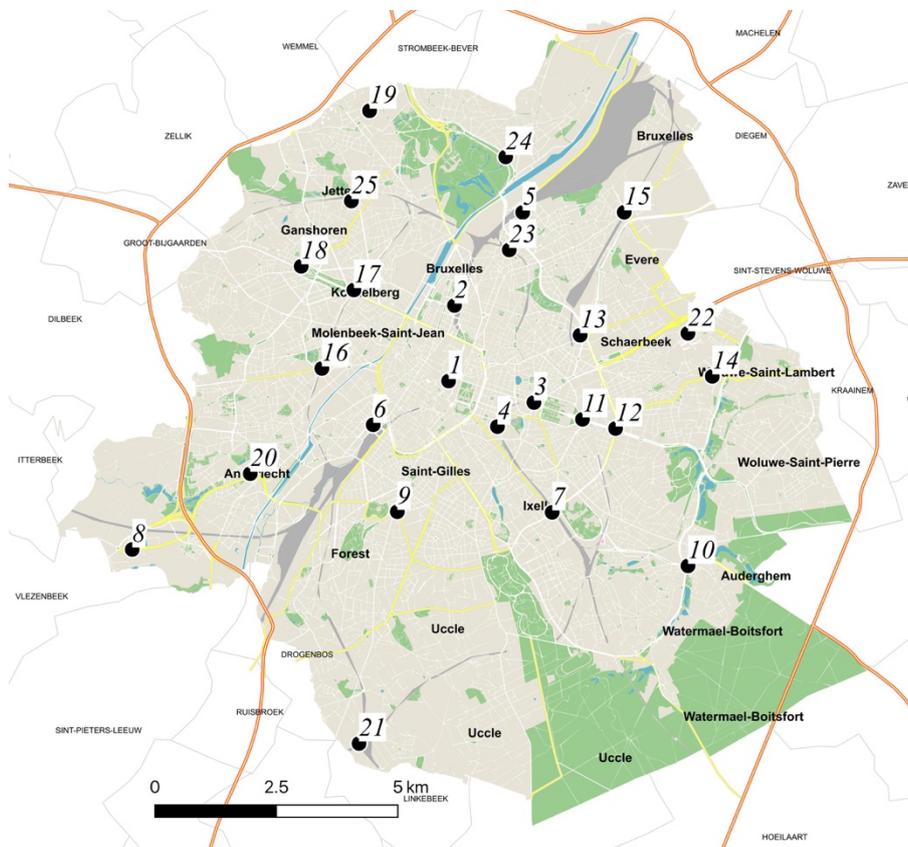


Figure 27 : Localisation des 25 lieux sélectionnés (Réalisation à partir de QGIS. Source : UrbIS).

## 2.2 Modèle biologique

### 2.2.1 *Physarum polycephalum* – mise en culture du matériel biologique

La matériel biologique est une souche de *Physarum polycephalum* fournie sous forme de sclérotés par la société Bluedot-Tech SAS<sup>14</sup>. Selon le commerçant, les sclérotés proviennent d'une souche d'origine américaine.

L'organisme a été cultivé en milieu solide (1% d'agar) dans une boîte de Petri (Ø 90 mm). Après humidification des sclérotés, ceux-ci se sont développés en plasmode après au minimum 2 à 3 heures et au maximum 24 heures. Une fois le *Physarum polycephalum* développé sous forme de plasmode, celui-ci est nourri quotidiennement avec des flocons d'avoine (Quaker Oats Company) et multiplié dans plusieurs boîtes de Petri. Le milieu solide est renouvelé au maximum tous les 2 jours. Les flocons d'avoine qui ne sont pas consommés par l'organisme après 24 heures sont systématiquement retirés afin d'éviter toutes contaminations. L'ensemble des boîtes de Petri est conservé dans un placard sombre et à une température de 25°C. Le matériel, la surface de travail et le placard sont désinfectés avec de l'alcool à 96% avant chaque manipulation.

### 2.2.1 *Physarum polycephalum* – expérience du réseau

Pour l'expérience du réseau, le *Physarum polycephalum* provenant de la mise en culture du matériel biologique est inoculé au point 1 de la Figure 27 (Gare Centrale) en milieu solide (1% d'agar). L'expérience est réalisée six fois : deux fois dans une boîte de Petri de 150 mm de diamètre (expériences 1a et 1b) et quatre fois dans une boîte de Petri de 90 mm de diamètre (expériences 2a, 2b, 2c et 2d). Un flocon d'avoine est placé sur les 24 autres points de la Figure 27 et le fond de plan de la Région de Bruxelles-Capitale est posé sous la boîte de Petri (Cfr. Annexe 2). Les flocons d'avoine qui ne sont pas consommés par l'organisme après 48 heures sont retirés afin d'éviter toutes contaminations. L'expérience se déroule dans un placard sombre et à une température constante de 25°C. Le matériel, la surface de travail et le placard sont désinfectés avec de l'alcool à 96% avant chaque manipulation.

Pour le suivi de l'élaboration du réseau protoplasmique de l'expérience 1a, un smartphone (Google Pixel 4A) est placé à 20 cm de hauteur. Une photographie est prise toutes les 600 secondes (10 minutes) afin de réaliser un time-laps. Les résultats pour les expériences 2 (a,b,c, et d) sont photographiés après 48, 72 et 96 heures (Cfr. Annexe 3).

---

<sup>14</sup> Bluedot-Tech (2021), *Kit de culture Physarum polycephalum*. Récupéré de <https://lekitblob.fr/fr/blob-accueil>.

## 2.3 Modèle cartographique

Les modèles cartographiques sont réalisés avec les logiciels de système d'information géographique Quantum Gis 3.4 (version Madeira) et GRASS GIS. Les couches vectorielles et rasters utilisées proviennent de la banque de données de la STIB<sup>15</sup> et d'UrbIS<sup>16</sup>.

À partir des couches vectorielles provenant des banques de données d'UrbIS et de la STIB, les 25 points sont reliés selon les algorithmes du problème de l'arbre de Steiner (Steiner Tree Problem - STP) et de l'arbre couvrant de poids minimal (Minimum Spanning Tree – MST). Les diagrammes des traitements sont présentés aux Figure 28 et Figure 29 selon le formalisme adopté par Caloz et Collet (2011) et vu au cours de Systèmes d'information géographique et projections (GEOG-F211).

Pour l'algorithme du problème de l'arbre de Steiner, nous utilisons l'outil de traitement « *v.net.steiner* » de GRASS<sup>17</sup>. Pour l'algorithme de l'arbre couvrant de poids minimal, nous utilisons le module d'extension pour Quantun Gis « *Geo-MST* » développé par Çalışkan et Anbaroğlu (2020).

### 1. Construction de la couche vectorielle (points) des 25 gares et pôles d'échanges.

À partir de la table d'attribut de la couche *Actu\_Stops.shp* de la STIB reprenant l'ensemble des arrêts du réseau, une requête attributaire a été réalisée afin de sélectionner les 25 gares et pôles d'échanges du Plan régional de mobilité 2020-2030. Les points sont sectionnés en fonction de l'expression :

```
"descr_fr" = 'HEYSEL' or "descr_fr" = 'HEEMBEEK' or "descr_fr" = 'GARE DE JETTE' or "descr_fr" = 'COLLEGE S.-COEUR' or "descr_fr" = 'SIMONIS' or "descr_fr" = 'ROODEBEEK' or "descr_fr" = 'GARE DE L'OUEST' or "descr_fr" = 'VEEWYDE' or "descr_fr" = 'ERASME' or "descr_fr" = 'MOENSBURG GARE' or "descr_fr" = 'GULLEDELLE' or "descr_fr" = 'VERBOEKHOVEN' or "descr_fr" = 'BORDET STATION' or "descr_fr" = 'MEISER' or "descr_fr" = 'MERODE' or "descr_fr" = 'MONTGOMERY' or "descr_fr" = 'HERRMANN-DEBROUX' or "descr_fr" = 'GARE DU MIDI' or "descr_fr" = 'SCHUMAN' or "descr_fr" = 'ETTERBEEK GARE' or "descr_fr" = 'GARE CENTRALE' or "descr_fr" = 'LUXEMBOURG' or "descr_fr" = 'GARE DU NORD' or "descr_fr" = 'SCHAERBEEK GARE' or "descr_fr" = 'ALBERT'
```

Pour les lieux n'apparaissant pas dans la table d'attribut, nous prenons l'arrêt le plus proche de telle sorte que « COLLEGE S.-CŒUR » = Basilique et « GULLEDELLE » = Communauté.

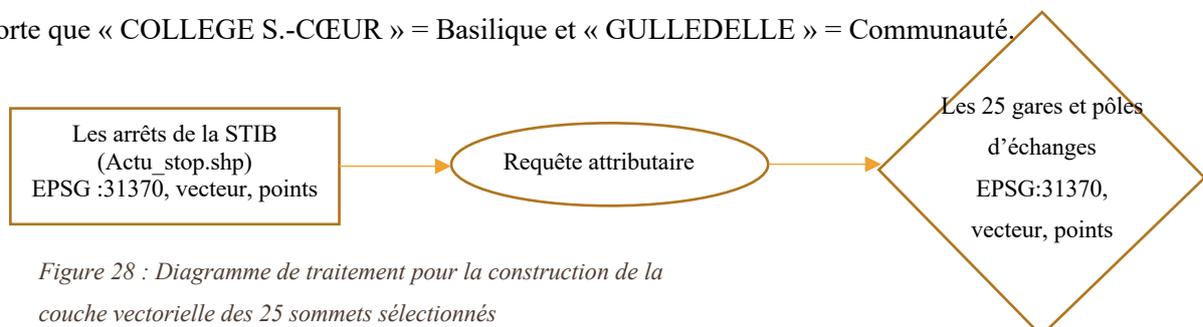


Figure 28 : Diagramme de traitement pour la construction de la couche vectorielle des 25 sommets sélectionnés

<sup>15</sup> STIB (2018), *Open Data*. Récupéré de <https://opendata.stib-mivb.be/store/data>

<sup>16</sup> GeoBru (2021), *Web Services pour utilisateurs avancés*. Récupéré de <https://geobru.irisnet.be/fr/webservices/>

<sup>17</sup> GRASS (2021), *v.net.steiner - Creates Steiner tree for the network and given terminals*. Récupéré de <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/v.net.steiner.html>

## 2. Construction des couches vectorielles MST et STP.

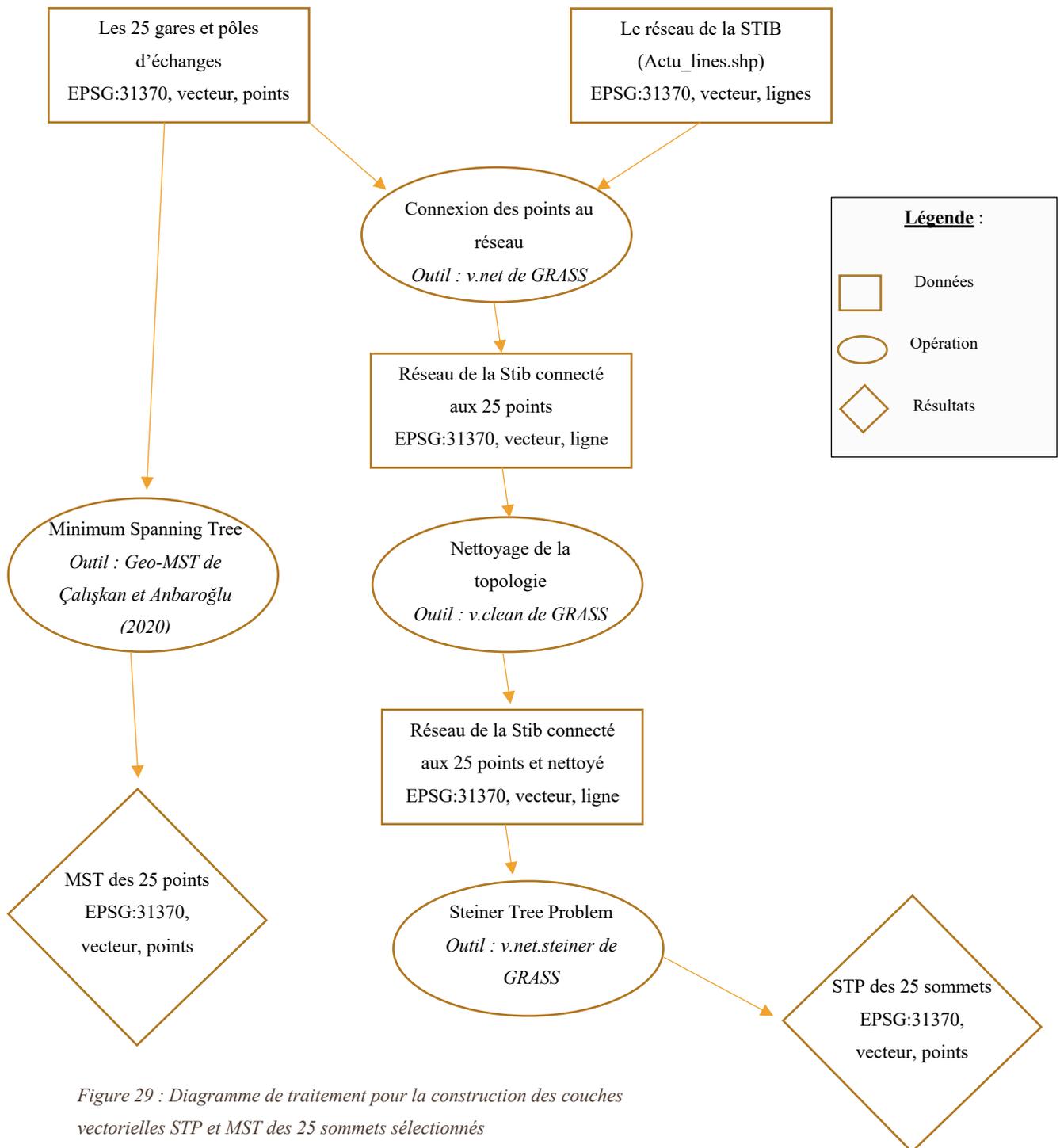


Figure 29 : Diagramme de traitement pour la construction des couches vectorielles STP et MST des 25 sommets sélectionnés

### 3. Résultats et Discussion

#### 3.1 Réseaux obtenus par SIG

Les réseaux obtenus par SIG sont visibles aux Figure 30 et Figure 31. Le coût total du réseau de l'arbre couvrant de poids minimal est de 43,531 km et celui de l'arbre de Steiner est de 49,157 km.

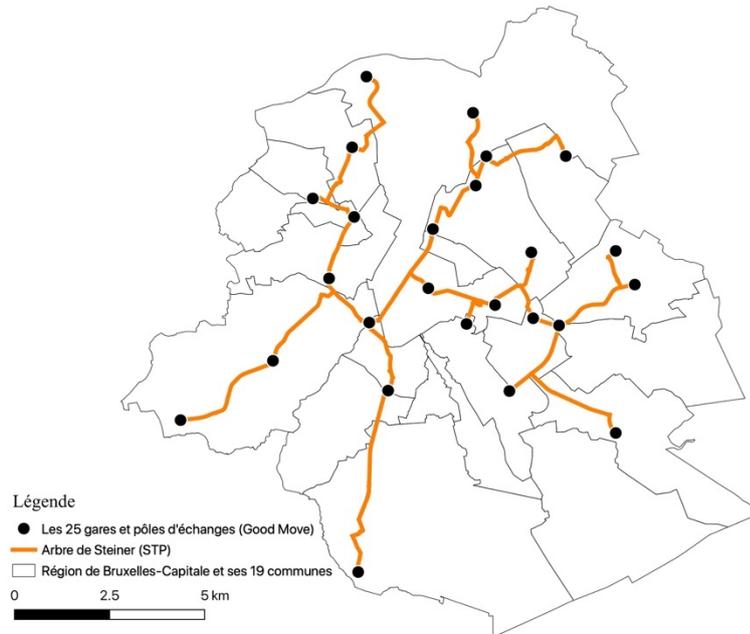


Figure 30 : Résultat obtenu pour l'arbre de Steiner (STP) avec les 25 gares et pôles d'échange.

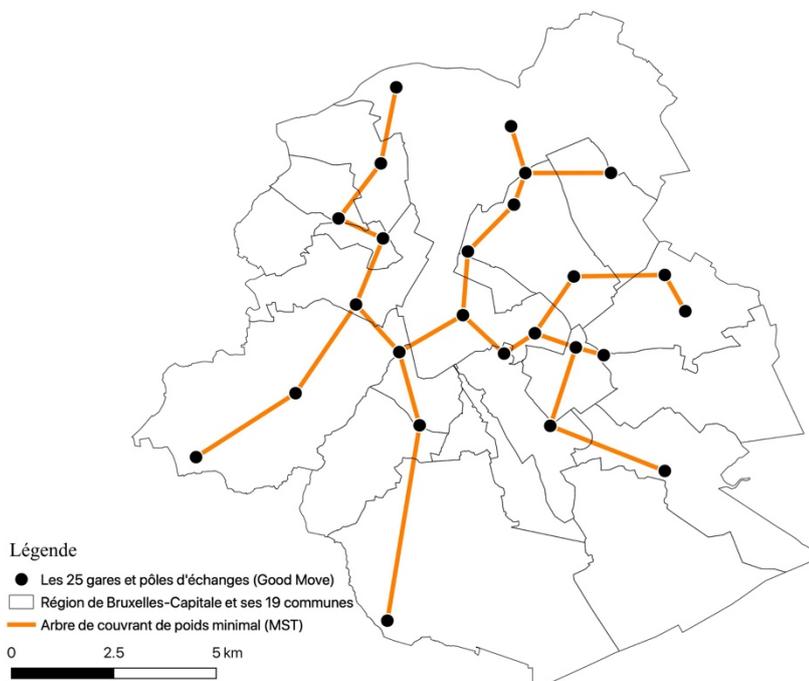


Figure 31 : Résultat obtenu pour l'arbre couvrant de poids minimal (MST) avec les 25 gares et pôles d'échange.

## 3.2 Réseaux obtenus par *Physarum polycephalum*

### 3.2.1 Expérience 1a : filmé dans une boîte de Petri (Ø 150 mm).

Inoculé en Gare centrale, le *Physarum* se dirige premièrement vers la Gare de Moensberg en passant par Bruxelles-Midi et Albert. La partie de l'organisme présente sur la Gare de Moensberg se sépare de la partie située au centre de la région et rejoint la Gare d'Etterbeek. Les deux parties se rejoignent finalement au niveau de Bruxelles-Luxembourg, de Schuman, de Merode et de Montgomery. L'organisme explore ensuite le nord de la région en passant par Meiser pour ensuite redescendre vers le centre de Bruxelles. Une partie de l'organisme s'isole une seconde fois au niveau de la Gare de Moensberg jusqu'à s'y retirer définitivement. Le déroulement de l'expérience 1a qui a duré au total 148 heures est disponible sous forme de Time-laps sur le lien suivant : <https://youtu.be/T86810cwaKU>.

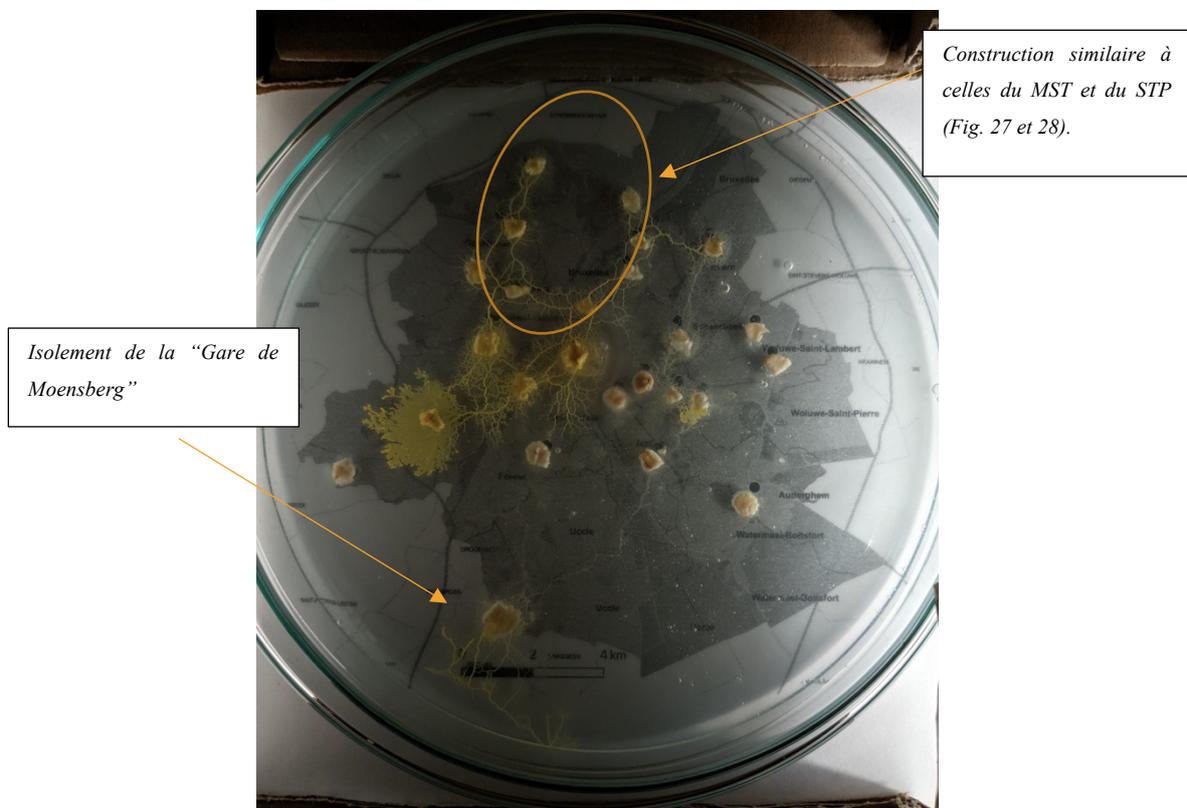


Figure 32 : Situation de l'expérience 1 après 120 heures (5 jours).

### 3.2.1 Expérience 1b : dans une boîte de Petri (Ø 150 mm).

La deuxième expérience n'a pas été filmée et a duré 72 heures. Celle-ci a dû être écourtée après l'apparition de moisissures. Toutefois, le réseau formé est plus net que dans l'expérience 1a. La Gare de Moensberg n'a de nouveau pas été connectée au réseau, mais l'organisme a créé de nouveaux nœuds notamment au niveau du parc des étangs à Anderlecht (1) et à proximité du campus du CERIA (2). L'organisme a également relié la station Bordet au nœud « Communauté » en passant par la Région flamande (3).

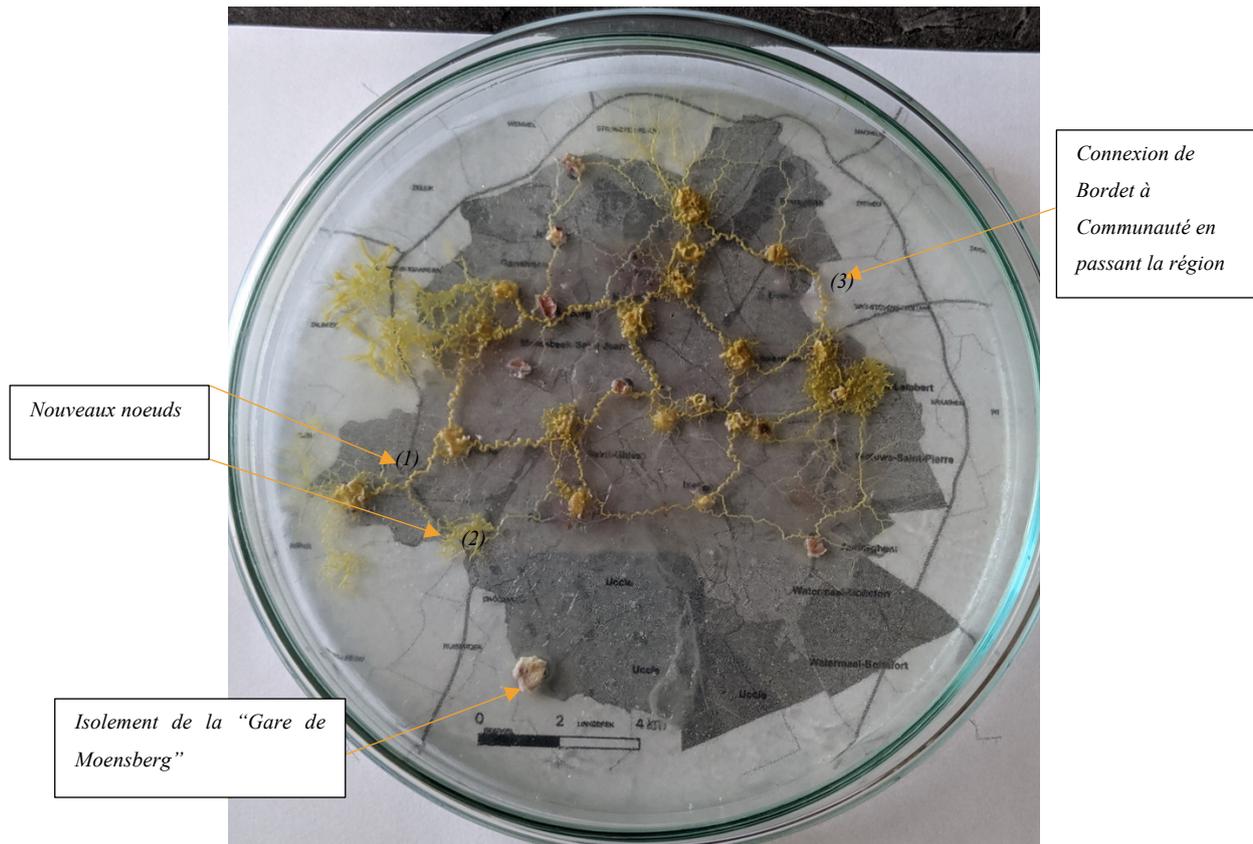


Figure 33 : Situation de l'expérience 2 après 72 heures (3 jours).

### 3.2.2 Expérience 2 (2a, 2b, 2c, 2d) : Dans les boîtes de Petri (Ø 90 mm).

Les résultats obtenus sont relativement peu concluants. Les quatre expériences ont d'abord colonisé les sommets situés au nord de la région mais aucune ne les a tous connectés entre eux. La connexion avec la gare de Moensberg n'a pas été réalisée. Après 72 heures, le plasmode a eu tendance à se fragmenter. Seule l'expérience 2b a montré une construction intéressante du réseau au nord de la région et similaire aux modèles cartographiques. Les résultats obtenus après 48, 72, et 96 heures sont tout de même présentés à l'annexe 3.

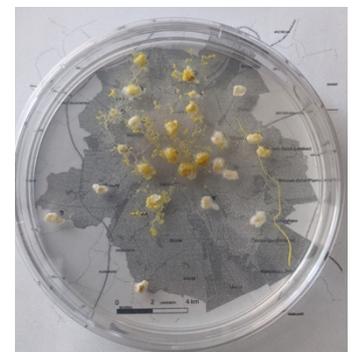


Figure 34 : fragmentation du réseau observé après 72 heures.

## 4. Discussion

Les expériences 1a et 1b confirment le caractère planaire du réseau protoplasmique déjà observé par Adamatzky (2009). Les deux réseaux construits par l'organisme sont bien des graphes planaires de proximité. Cependant, dans nos expérimentations, nous ne pouvons pas parler d'*arbre couvrant*, car tous les sommets ne sont pas reliés entre eux. Ce qui limite la pertinence d'une comparaison avec les modèles cartographiques proposés par QGis et GRASS. Le développement du réseau protoplasmique dans l'expérience 1a est même peu cohérent à ce qui a été observé dans la littérature scientifique (Nakagaki *et al.*, 2004 ; Nakagaki *et al.*, 2001 ; Tero *et al.*, 2010) en colonisant des zones avant de les abandonner. Toutefois, si l'on omet le fait que l'organisme n'ait pas relié tous les sommets du graphe, on peut retirer des similitudes dans la construction du réseau protoplasmique à ceux développés par les modèles cartographiques. Au nord de la région, le réseau s'est construit comme un arbre couvrant de poids minimal (Figure 35) et confirme les premières constatations d'Adamatzky (2008).

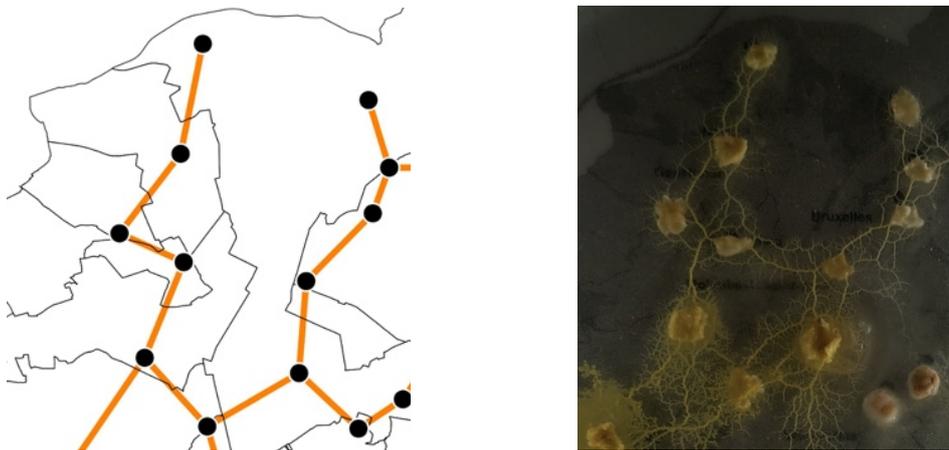


Figure 35 : Similitude entre le réseau protoplasmique et le réseau créé par GRASS.

Dans l'expérience 1b, le réseau protoplasmique s'est partiellement comporté comme un arbre couvrant de Steiner en créant de nouveaux nœuds (point Steiner) comme l'avaient observé Nagakaki *et al.* (2004). Cette capacité à construire son réseau à la fois en arbre couvrant de poids minimal et en arbre de Steiner confirme l'intérêt de collecter davantage d'informations sur ce comportement afin d'en tirer des modèles mathématiques inspirés du *Physarum polycephalum* (Sun, 2017) mais cela fait appel à des compétences qui sortent du cadre d'un master en sciences et gestion de l'environnement.

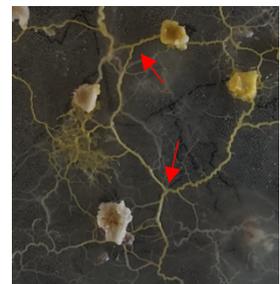


Figure 36 : Exemples de point Steiner créés par l'organisme.

Les points Steiner créés dans l'expérience 1b par l'organisme se situent au niveau du parc des étangs à Anderlecht et à proximité du campus du CERIA (Figure 33 et Figure 37). Le nœud créé au parc des étangs à Anderlecht est relié à Érasme, à Veeweyde et au campus du CERIA et ce dernier est quant à lui relié à Albert. La comparaison de cette configuration avec celle du réseau de transport existant révèle la difficulté de déplacement de part et d'autre du chemin de fer qui agit comme une barrière physique. Alors que le réseau protoplasmique relie directement la zone à proximité du campus du CERIA à l'arrêt Albert, le réseau de transport en commun bruxellois fait passer l'utilisateur par la gare du Midi pour redescendre vers Saint-Gilles (Figure 37).



Figure 37 : Comparaison du cheminement entre le Ceria et Albert avec le réseau protoplasmique et avec le réseau de transport en commun bruxellois (Illustration à gauche provenant de Google en date du 7 août 2021).

La difficulté pour l'organisme à relier la gare de Moensberg au réseau principale a été observée lors des six expériences. Lors de l'expérience 1a, l'organisme a même abandonné par deux fois celle-ci. Il est ici intéressant de constater que l'organisme rencontre les mêmes difficultés que l'utilisateur qui veut se rendre dans le sud d'Uccle en transport collectif. Le sud d'Uccle possède en effet l'une des densités les plus faibles en arrêts de transport collectif de la région avec moins de 10 arrêts par km<sup>2</sup> contre 40 à 70 arrêts par km<sup>2</sup> dans le centre-ville (Lebrun *et al.*, 2012). L'absence d'une connexion avec la gare de Moensberg peut être interprétée par un coût jugé trop élevé par l'organisme à maintenir une connexion aussi lointaine. Ce qui suggère que le choix du pôle est soit trop désaxé soit implique la création d'un nouveau pôle entre la gare de Moensberg et le centre de la région.

Enfin, la connexion entre le pôle à créer « Communauté » et la station Bordet a été réalisée en passant la Région flamande (Figure 33). Bien qu'il aurait fallu davantage d'expérimentations, ceci peut confirmer l'intérêt de faire coopérer les différents acteurs territoriaux dans l'élaboration d'un réseau de transport bien structuré et attractif.

## 5. Limites et perspectives

La première difficulté qui rend fragile l'interprétation des résultats est certainement les conditions expérimentales et la gestion du matériel biologique. En effet, les manipulations n'ont pas été réalisées en laboratoire, mais ont tenté de s'en approcher au maximum. Malgré des manipulations appropriées, les boîtes de Petri ont fréquemment été contaminées par d'autres microorganismes (bactéries et champignons). Ces conditions expliquent peut-être le comportement incohérent observé lors de l'expérience 1a et les fragmentations du plasmode lors des expériences 2.

Le choix du matériel biologique est possiblement problématique. La souche de *Physarum polycephalum* utilisée provenait d'une souche américaine. Vogel *et al.* (2015) ont par exemple constaté que les souches japonaises et australiennes se développent uniformément dans toutes les directions depuis le lieu d'inoculation contrairement à la souche américaine qui se développe de manière plus directionnelle. Ce genre de démarches alternatives requiert en amont des compétences variées et confirme la nécessité de faire travailler ensemble des expertises issues de diverses disciplines.

Troisièmement, l'analyse des résultats s'est construite autour d'une comparaison simple avec les modèles cartographiques et le réseau de transport existant. Dans l'idéal, il aurait été intéressant de transposer les réseaux construits par l'organisme et de tester leurs performances à l'aide d'outils informatiques (SIG) sur base de critères objectifs comme ceux proposés par Tero *et al.* (2010).

## Conclusion

Le tout à l'automobile pratiqué pendant des décennies dans les grandes métropoles occidentales et particulièrement à Bruxelles ont modifié durablement la physionomie des villes et ont engendré une succession de conséquences environnementales, sociales et économiques. Le renforcement des transports collectifs fait partie des solutions pour diminuer le poids de la voiture en ville. Une conception polycentrique de la ville avec de solides connexions entre les différents pôles de celle-ci permettrait de rendre ce réseau accessible, efficace et résilient et par conséquent attractif. Encore faut-il désigner les pôles que l'on veut relier et comment les relier.

Ce mémoire de fins d'études a voulu explorer les approches alternatives dans la conception d'un réseau de transport et plus généralement dans l'aménagement du territoire. Nous nous sommes intéressés à ce que peut apporter l'approche biomimétique en s'inspirant de ce fait la nature pour résoudre des problèmes similaires aux nôtres, mais en les résolvant de manière durable et résiliente. L'organisme unicellulaire *Physarum polycephalum* est connu pour sa capacité à construire des réseaux efficaces reliant plusieurs sources de nourriture. De nombreuses études ont également démontré sa capacité à élaborer en laboratoire un réseau aussi bien construit, voir plus efficace, que ceux construits par nos sociétés.

En partant du principe qu'un réseau de transport collectif bien construit le rende suffisamment attractif au point de diminuer le poids du véhicule particulier en ville et par conséquent les nuisances que ce mode de transport engendre, nous nous sommes intéressés aux solutions que le *Physarum polycephalum* propose pour la Région de Bruxelles-Capitale. Nous avons confronté six fois l'organisme aux 25 gares et pôles d'échanges du Plan régional de mobilité. Les solutions proposées par le *Physarum polycephalum* ont été comparées avec les modèles cartographiques réalisés à l'aide de logiciels SIG et avec le réseau de transport existant.

Nous n'avons pas obtenu de réseaux complets (réseau reliant l'ensemble des points au même instant)<sup>18</sup>. Toutefois, nous avons observé des similitudes avec les modèles cartographiques développés confirmant les capacités de l'organisme à proposer un réseau performant. Les réseaux protoplasmiques ont également mis en évidence des difficultés connues du réseau de transport à savoir la complexité de rejoindre le sud d'Uccle en transport collectif, les difficultés de se déplacer de part et d'autre du chemin de fer et l'intérêt potentiel de la Région flamande à intervenir dans la conception d'un réseau performant bruxellois.

---

<sup>18</sup> Time-laps de l'expérience 1a : <https://youtu.be/T868l0cwaKU>

Nous avons noté plusieurs limites à nos résultats. Premièrement, les conditions expérimentales n'ont pas été optimales expliquant probablement les résultats incomplets et parfois contradictoires. Deuxièmement, nous constatons qu'une telle approche biomimétique nécessite les compétences de plusieurs disciplines et fait donc appel à la collaboration de différentes expertises. Et troisièmement, une interprétation des résultats plus objectivée basée sur des critères précis serait nécessaire pour confirmer l'utilité d'une approche biomimétique dans la conception d'un réseau de transport.

Néanmoins, la difficulté de l'organisme à relier le sud d'Uccle à son réseau principal tout comme c'est le cas dans le réseau de transport actuel suscite de l'intérêt à approfondir davantage une méthodologie basée sur une approche biomimétique.

## Bibliographie

- Adamatzky A. et Alonso-Sanz R., (2011), Rebuilding Iberian motorways with slime mould. In : *BioSystems*, Vol. 105, n° 1, pp. 89-100. DOI 10.1016/j.biosystems.2011.03.007.
- Adamatzky A. et Jones J. (2010), Road planning with slime mould: If Physarum built motorways it would route M6/M74 through Newcastle. In : *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2010. Vol. 20, n° 10, pp. 3065-3084. DOI 10.1142/S0218127410027568.
- Adamatzky A. et Prokopenko M. (2012), Slime mould evaluation of Australian motorways, *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 27:4, 275-295 <http://dx.doi.org/10.1080/17445760.2011.616204>
- Adamatzky A., De Baets B. et Van Dessel W. (2012), Slime mould imitation of Belgian transport networks: Redundancy, bio-essential motorways, and dissolution. In : *International Journal of Unconventional Computing*. 2012. Vol. 8, n° 3, pp. 235-261.
- Adamatzky A., Martínez G.J., Chapa-Vergara S.V., Asomoza-Palacio R. et Stephens C.R. (2011), Approximating Mexican highways with slime mould. In : *Natural Computing*. 2011. Vol. 10, n° 3, pp. 1195-1214. DOI 10.1007/s11047-011-9255-z.
- Adamatzky, A. (2008), Growing spanning trees in plasmodium machines. In : *Kybernetes*. 2008. Vol. 37, n° 2, pp. 258-264. DOI 10.1108/03684920810851168.
- Adamatzky, A. (2009), Developing proximity graphs by physarum polycephalum: Does the plasmodium follow the toussaint hierarchy? In : *Parallel Processing Letters*. 2009. Vol. 19, n° 1, pp. 105-127. DOI 10.1142/S0129626409000109.
- Ademe (2008), *Efficacités énergétique et environnementale des modes de transport, synthèse publique*, 29 p. Récupéré de [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/51911\\_synthese-transport.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/51911_synthese-transport.pdf)
- Aono M, Hirata Y, Hara M, et Aihara K (2011), Greedy versus social: resource-competing oscillator network as a model of amoeba- based neurocomputer. *Natural Computing* 10(4):1219–1244
- Baumeister, R. Tocke, J. Dwyer, S. Ritter, J. Benyus (2013), *Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices* First Public Print ed.
- Benyus J. (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, New York: HarperCollins Publishers Inc, 320 p.
- Bluedot-Tech (2021), *Kit de culture Physarum polycephalum*. Récupéré de <https://lekitblob.fr/fr/blob-accueil>.
- Bonifaci, V., Mehlhorn, K. et Varma, G., (2012), Physarum can compute shortest paths. In : *Journal of Theoretical Biology* [en ligne]. 2012. Vol. 309, pp. 121-133. DOI 10.1016/j.jtbi.2012.06.017.

- Brandeleer C., Ermans T., Hubert M., Janssens I., Lannoy P., Loir C. et Vanderstraeten P. (2016), Le partage de l'espace public en Région de Bruxelles-Capitale, Cahiers de l'Observatoire de la mobilité de la Région de Bruxelles-Capitale, Cahier n°5, récupéré de [https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/le\\_partage\\_de\\_lespace\\_public.pdf](https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/le_partage_de_lespace_public.pdf)
- Bruxelles Environnement (2010), *Bruit des transports Cartographie stratégique en Région de Bruxelles-Capitale*, Atlas, p. 39. Récupéré de [http://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/Bruit\\_atlas\\_Cartographie\\_2010.pdf?langtype=2060&\\_ga=2.86169050.353185586.1623963397-1491131488.1623963397](http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Bruit_atlas_Cartographie_2010.pdf?langtype=2060&_ga=2.86169050.353185586.1623963397-1491131488.1623963397)
- Bruxelles Environnement (2014), *Inventaires des émissions atmosphériques de l'année 2012, soumission 2014*, Collection fiches documentées, p. 8. Récupéré de [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/Air\\_43](https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Air_43)
- Bruxelles Environnement (2015), *Pollution atmosphérique en Région de Bruxelles-Capitale : Constats*, Collection fiches documentées, p. 12. Récupéré de [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/Air%20](https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Air%20)
- Bruxelles Environnement (2016), *Les émissions de gaz à effet de serre en Belgique et en Région de Bruxelles-Capitale*, Collection fiches documentées, p. 13. Récupéré de [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/Clim\\_05.PDF](https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Clim_05.PDF)
- Bruxelles Environnement (2017), Enquête de la perception du bruit préalable à la rédaction du nouveau plan bruit auprès des habitants de la Région de Bruxelles-Capitale, Rapport final, p. 111. Récupéré de [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/index.php?lvl=notice\\_display&id=11108](https://document.environnement.brussels/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=11108)
- Bruxelles Environnement (2019), *Les accords internationaux et engagements belges et bruxellois pour lutter contre le changement climatique*, Observatoire des données de l'environnement, p. 14. Récupéré de [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/Clim\\_04](https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Clim_04)
- Bruxelles Mobilité (2020), Bruxelles Mobilité, Service Public Régional de Bruxelles. Récupéré de <https://mobilite-mobiliteit.brussels/fr>
- Bruxelles Mobilité (2021), Le Plan régional de mobilité 2020-2030, Plan stratégique et opérationnel, p. 290. Récupéré de [https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/plan\\_goodmove.pdf](https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/plan_goodmove.pdf)
- Burgel G. (2012), *Histoire de l'Europe urbaine. La ville contemporaine après 1945*. Sous la direction de Jean-Luc Pinol. Éditions Points. Paris : Éditions du Seuil. 343 p. ISBN 978.2.7578/2983.7.
- Burland, T.G., Solnica-Krezel, L., Bailey, J., Cunningham, D.B. et Dove, W.F. (1993), Patterns of inheritance, development and the mitotic cycle in the protist *Physarum polycephalum*. In *Advances in Microbial Physiology*, 35, 1-69. DOI 10.1016/s0065-2911(08)60096-x.
- Çalışkan M. et Anbaroğlu B. (2020), SoftwareX Geo-MST : A geographical minimum spanning tree plugin for QGIS. In : *SoftwareX*, Vol. 12, pp. 100553. DOI 10.1016/j.softx.2020.100553.
- Caloz R., et Collet, C. (2011), *Analyse spatiale de l'information géographique*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 381 p. ISBN :978-2-88074-902-6.

- Chekchak T. et Lapp K. (2011), Biomimétisme, la nécessaire resynchronisation de l'économie avec le vivant. *Écologie & politique*, 43, 159-166. <https://doi.org/10.3917/ecopo.043.0159>
- Climat.be (2019), *Le site fédéral belge pour une information fiable sur les changements climatiques, Émissions par secteur*, Récupéré de <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre/emissions-par-secteur#:~:text=Les%20%C3%A9missions%20de%20GES%20de,5%20%25%20entre%201990%20et%202018>
- Colville R.N., Hutchinson E.J., Mindbell J.S. et Warren R.F. (2001), The transport sector as a source of air pollution. In *Atmospheric Environment*, 35(9), 1537-1565. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00551-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00551-3)
- Coulibaly T. (2007), *Il y a un siècle de l'automobile*. Rennes : Edition Ouest-France, pp 138. ISBN-10 : 2737341272
- CRMS. (s.d.), *Inventaire du patrimoine architectural. Chaussée Romaine*. Récupéré de [https://monument.heritage.brussels/fr/Bruxelles\\_Laeken/Chaussee\\_Romaine/10208191](https://monument.heritage.brussels/fr/Bruxelles_Laeken/Chaussee_Romaine/10208191)
- Delijn (2021), Vlaamse Vervoermaatschappij « De Lijn », Récupéré de <http://www.delijn.be/fr/index.htm>
- Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe, *J.O.C.E.*, 11 juin 2008, L 152, p. 44.
- Dobruszkes F. (2021), *Tourisme, transports et environnement, TOUR-F-407*, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles : Presses universitaires de Bruxelles, p. 186.
- Dussutour A., Latty T., Beekman M. et Simpson, S., (2010), Amoeboid organism solves complex nutritional challenges. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2010. Vol. 107, n° 10, pp. 4607-4611. DOI 10.1073/pnas.0912198107.
- Dussutour, A. (2017), *Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le blob sans jamais oser le demander*. Paris : Editions J'ai lu, p. 186. ISBN :978-2-290-16734-2
- EEA / European Environment Agency (2010), *The European environment -State and Outlook 2010 (Synthesis)*, 228 p. Récupéré de <https://www.eea.europa.eu/soer/2010/synthesis/synthesis>.
- EEA / European Environment Agency (2021, 4 février), EEA greenhouse gas - data viewer. Dans *Data and maps*. Récupéré de <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
- EEA / European Environment Agency (2019?), EEA greenhouse gas - data viewer. Dans *Data and maps*. Récupéré de <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
- Ermans T. (2019), Les ménages bruxellois et la voiture, Focus, IBSA, n°32. Récupéré de [http://ibsa.brussels/sites/default/files/publication/documents/Focus-32\\_FR\\_rb%20%281%29.pdf](http://ibsa.brussels/sites/default/files/publication/documents/Focus-32_FR_rb%20%281%29.pdf)

- Evangelidis V., Tsompanas M.A., Sirakoulis G. et Adamatzky A., (2015), Slime mould imitates development of Roman roads in the Balkans. In : *Journal of Archaeological Science: Reports*. 1 juin 2015. Vol. 2, pp. 264-281. DOI 10.1016/j.jasrep.2015.02.005.
- Fayemi PE, Checkchak T., Bersano G., Maranzana N. et Aoussat A. (2015), Biomimétisme et supports méthodologiques, *Techniques de l'ingénieur, Innovation, réf. n°IN218 VI*, p. 16.
- GeoBru (2021), *Web Services pour utilisateurs avancés*. Récupéré de <https://geobru.irisnet.be/fr/webservices/>
- Geoconfluences (2015), *Ressources de géographie pour les enseignants, Réseau viaire*. Récupéré de <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/reseau-viaire>
- GIEC / Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2001), *Annexe B. Glossaire*, Troisième rapport d'évaluation du GIEC, p. 25. Récupéré de <https://archive.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf>
- Gilbert R. et Perl A. (2010), *Transport Revolutions: Moving people and freight without oil*, London: Routledge, 448 p. ISBN 9781844076987
- Glaus, M., Maiorano, M. et Hausler, R., (2012), Conception des réseaux par biomimétisme : application au transport des déchets. In : *Déchets, sciences et techniques*. 2012. n° 62, pp. 16-21. DOI 10.4267/dechets-sciences-techniques.2530.
- Graham, R. L. et Hell, Pavol, (1985), On the History of the Minimum Spanning Tree Problem. In : *Annals of the History of Computing*. 1985. Vol. 7, n° 1, pp. 43-57. DOI 10.1109/MAHC.1985.10011.
- GRASS (2021), *v.net.steiner - Creates Steiner tree for the network and given terminals*. Récupéré de <https://grass.osgeo.org/grass79/manuals/v.net.steiner.html>
- Gross J.L. et Yellen J. (2004). *Handbook of Graph theory. Discrete mathematics and its applications*. États Unis d'Amérique : CRC Press, 1167 p.
- Harkness, J. M. (2001), A lifetime of connections—Otto Herbert Schmitt. In: *Physics in Perspective*, 1913–1998.
- He G., Pan Y. et Tanaka T. (2020), COVID-19, City Lockdowns, and Air Pollution: Evidence from China. In : *medRxiv*. 2020. DOI 10.1101/2020.03.29.20046649.
- Hubert M. (2008), L'Expo 58 et le « tout à l'automobile ». Quel avenir pour les grandes infrastructures routières urbaines à Bruxelles ? In *Brussels Studies*, n°22, pp 18. DOI:<https://doi.org/10.4000/brussels.621>
- IBSA / Institut bruxellois de statistique et d'analyse (2021), *Mobilité et transport : Véhicules et réseau routier*. Récupéré de <https://ibsa.brussels/themes/mobilite-et-transport/vehicules-et-reseau-routier>
- IEA / International Energy Agency (2020), *Statistics report: Key world energy. Statistics 2020*. Récupéré de <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>.

- IOPScience (2021), *Special Issue on the Physics of Physarum polycephalum*. Illustration récupérée de [https://iopscience.iop.org/journal/0022-3727/page/Physics\\_of\\_Physarum\\_Polycephalum](https://iopscience.iop.org/journal/0022-3727/page/Physics_of_Physarum_Polycephalum)
- ISO / International Organization for Standardization (2015), Quand la réponse est dans la nature. Récupéré de <https://www.iso.org/fr/news/2015/05/Ref1952.html>
- Jones J. et Adamatzky A. (2013), Computation of the travelling salesman problem by a shrinking blob. *Natural Computing* pp 1–16.
- Kamiya, N. Physics and chemistry of protoplasmic streaming. (1960), In *Annual Review of Plant Biology*, 11, 323-340
- Kennedy E., Fecheyr-Lippens D., Hsiung, B., Niewiarowski, P. et Kolodziej M. (2015), Biomimicry: A Path to Sustainable Innovation. In : *Design Issues*, Vol. 31, n° 3, pp. 66-73.: [https://doi.org/10.1162/DESI\\_a\\_00339](https://doi.org/10.1162/DESI_a_00339)
- Kuntzmann, J. (1972), *Théorie des Réseaux (Graphes)*. Paris : Dunod, 288 p.
- Kupélian Y., Kupélian J. et Sirtaine J. (2011), *Le grand livre de l'automobile belge*. Bruxelles : Éditions FSA (Fonds belge pour le patrimoine automobile et moto), pp. 304. ISBN:978-287212-662-0
- Lascar O. (2021, 9 août), Le blob part mardi 10 août dans l'espace pour rejoindre l'ISS et Thomas Pesquet. *Sciences et Avenir* [en ligne]. Récupéré de [https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/le-blob-part-dans-l-espace-pour-rejoindre-l-iss-et-thomas-pesquet\\_156435](https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/le-blob-part-dans-l-espace-pour-rejoindre-l-iss-et-thomas-pesquet_156435)
- Lebeau P. et Macharis C. (2014), Le transport de marchandises à Bruxelles : quels impacts sur la circulation automobile ?, *Brussels Studies* 80, <http://journals.openedition.org/brussels/1236>
- Lebrun K., Hubert M., Dobruszkes F. et Huynen P. (2012), L'offre de transport à Bruxelles, *Cahiers de l'Observatoire de la mobilité de la Région de Bruxelles-Capitale*, Cahier n°1, récupéré de [https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cahiers-observatoire-mobilite\\_loffre\\_de\\_transports\\_a\\_bruelles.pdf](https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cahiers-observatoire-mobilite_loffre_de_transports_a_bruelles.pdf)
- Lebrun K., Hubert M., Huynen P., De Witte A., Macharis C. (2013), Les pratiques de déplacement à Bruxelles, *Cahiers de l'Observatoire de la mobilité de la Région de Bruxelles-Capitale*, Cahier n°2, récupéré de [https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cahiers\\_mobilite-2\\_.pdf](https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cahiers_mobilite-2_.pdf)
- Lebrun, K. (2018), Temps de déplacements en transport public à Bruxelles : l'accessibilité des pôles d'activités, in *Brussels Studies, Collection générale, n°123*, p 23. DOI : <https://doi.org/10.4000/brussels.1652>
- Lepora N.F., Verschure P. et Prescott T.J. (2013), The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration and Biomimetics*, 8(1), p. 19. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/1/013001>
- Link, J.H.F. (1833), *Handbuch zur Erkennung der nutzbarsten und am häufigsten vorkommenden Gewächse*. 3. Ordo Fungi, subordo 6, Myxomycetes, Berlin, 405-422, 432-433.
- Macbride, T.H. (1899), *The North American Slime-moulds*.

- Maniadakis D. et Varoutas D. (2016), Fitting Planar Proximity Graphs on Real Street Networks. In: *Battiston S., De Pellegrini F., Caldarelli G., Merelli E. (eds) Proceedings of ECCS 2014*. Springer Proceedings in Complexity. Springer, Cham, p. 11-20. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29228-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29228-1_2)
- Mathieson L., et Moscato P. (2019), An Introduction to Proximity Graphs. In: Moscato P., de Vries N. (eds) *Business and Consumer Analytics: New Ideas*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-06222-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06222-4_4)
- MobiGIS (2021), Portail cartographique de Bruxelles Mobilité. Récupéré de <https://data.mobility.brussels/mobigis/fr/>
- Nakagaki, T., Yamada, H. et Tóth, Á. (2000), Maze-solving by an amoeboid organism. In *Nature*, 407(6803), 470. DOI 10.1038/35035159.
- Nakagaki, T., Yamada, H. et Tóth, Á., (2001), Path finding by tube morphogenesis in an amoeboid organism. In : *Biophysical Chemistry*. Vol. 92, n° 1-2, pp. 47-52. DOI 10.1016/S0301-4622(01)00179-X.
- Nakagaki, T., Yamada, H. et Hara, M. (2004), Smart network solutions in an amoeboid organism. In : *Biophysical Chemistry*. Vol. 107, n° 1, pp. 1-5. DOI 10.1016/S0301-4622(03)00189-3.
- NCC / National Climat Commission (2020), *Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2018)*, National Inventory Report Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change, p. 42. Récupéré de <https://climat.be/doc/nir-15-april-2020-final.pdf>
- Oettmeier, C., Brix, K. et Döbereiner, H.G. (2017), *Physarum polycephalum* – a new take on a classic model system. In *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(41), 1-6. DOI 10.1088/1361-6463/ab866c.
- Oettmeier, C., Nakagaki, T. et Döbereiner, H.G. (2020), Slime mold on the rise: The physics of *Physarum polycephalum*. In *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(31), 1-6. DOI 10.1088/1361-6463/ab866c.
- Olive, L.S. et Whittaker, R.H. (1969), Reassignment of Gymnomycota. In *Science*, 164(3881), 857-857.
- Olive, L. S. (1975), "The Mycetozoans". Academic Press, New York.
- Ollivro J. (2002), L'homme à toutes vitesses. De la lenteur homogène à la rapidité différenciée. In *Annales de Géographie*, t. 111, n°623, p 101.
- Passchier-Vermeer, W. et Passchier, W.F. (2000), Noise exposure and public health. In *Environmental Health Perspectives*, 8(1), 123-131. DOI 10.1289/ehp.00108s1123.
- Pellet, R. (1966), *Initiation à la théorie des graphes : vocabulaire descriptif*, Paris : Entreprise moderne d'édition, 76 p.
- Pinol, J-L. et Walter F. (2012), *Histoire de l'Europe urbaine. La ville contemporaine jusqu'à la Seconde Guerre mondiale*. Sous la direction de Jean-Luc-Pinol. Pinol. Editions Points. Paris : Editions du Seuil. 442 p.

- Price, W.L. (1974), *Introduction aux graphes et aux réseaux*. Traduction française par H. Grunspan. Paris : Masson et Cie, 116 p.
- Raub, T. J. and Aldrich, H. C. (1982), *Cell Biology of Physarum and Didymium*, vol. 11, p. 21, Academic Press, New York.
- Reid C., Latty T., Dussutour A. et Madeleine Beekman (2012), Slime mold uses an externalized spatial “memory” to navigate in complex environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(43), 17490- 17494. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215037109>
- Roth, R. R. (1983), *The Foundation of Bionics. Perspectives in Biology and Medicine*, 26(2), 229–242. doi:10.1353/pbm.1983.0005
- Robins G. et Zelikovsky, A. (2009), Minimum Steiner Tree Construction. In : Alpert C.J., Mehta D.P. and Sapat- nekar, S.S. (eds). *Handbook of Algorithms for Csi Physical Design Automation*, CRC Press, 2009 pp.
- Ricard (2015), *Le biomimétisme : s’inspirer de la nature pour innover durablement*, Journal officiel de la République française, NOR : CESL1500023X, p. 138.
- Roux, C. (2012), *Initiation à la théorie des graphes*. Mesnil-sur-l’Estrée : Éditions ellipses. 210 p. ISBN 978-2-7298-4163-8
- Sache, A. (1974), *La théorie des graphes*. Collection « Que sais-je ? », le point des connaissances actuelles, n°1554, Paris : Presses universitaires de France. 128 p.
- Säumel I., Kotsyuk I., Hölscher M., Lenkerei C., Weber F., Kowarik I. (2012), How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany, *Environmental Pollution*, 165, p. 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.02.019>
- Schaap, P., Barrantes, I., Minx, P., Sasaki, N., Anderson, R.W., Bénard, M., Biggar, K.K., Buchler, N.E., Bundschuh, R., Chen, X., Fronick, C., Fulton, L., Golderer, G., Jahn, N., Knoop, V., Landweber, L.F., Maric, C., Miller, D., Noegel, A.A., Peace, R., Pierron, G., Sasaki, T., Schallenberg-Rüdinger, M., Schleicher, M., Singh, R., Spaller, T., Storey, K.B., Suzuki, T., Tomlinson, C., Tyson, J.J., Warren, W.C., Werner, E.R., Werner-Felmayer, G., Wilson, R.K., Winckler, T., Gott, J.M., Glöckner, G. et Marwan, W. (2016), The physarum polycephalum genome reveals extensive use of prokaryotic two-component and metazoan-type tyrosine kinase signaling. In *Genome Biology and Evolution*, 8(1), 109-125. DOI 10.1093/gbe/evv237.
- Schmitt, O. (1969), Some interesting and useful biomimetic transforms. In *Third Int. Biophysics Congress*, p. 297.
- Shirakawa T, Adamatzky A, Gunji YP, et Miyake Y (2009), On simultaneous construction of Voronoi diagram and Delaunay triangulation by Physarum polycephalum. *Int J Bifurcation and Chaos* 9:3109–3117

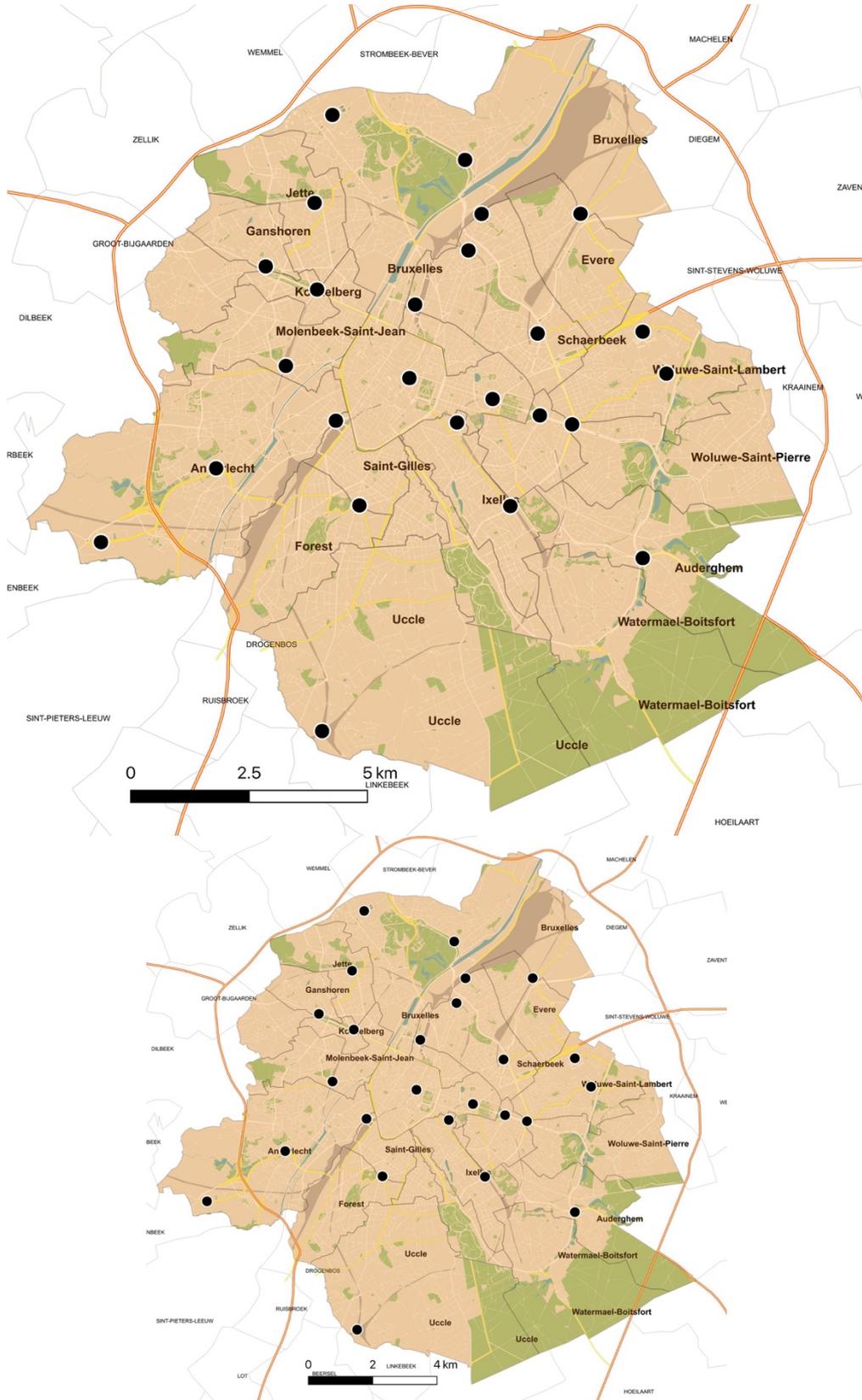
- Shirakawa T. et Gunji, Y-P. (2010), Computation of Voronoi Diagram and Collision-free Path using the Plasmodium of Physarum polycephalum. *IJUC*. 6. 79-88.
- SNCB (2021), Société nationale des chemins de fer belges. Récupéré de <https://www.belgiantrain.be/fr>
- Statbel (2020), Parc de véhicules. Récupéré de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/mobilite/circulation/parc-de-vehicules#news>
- Statbel (2021), Structure de la population. Récupéré de <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population#figures>
- STIB (2018), *Open Data*. Récupéré de <https://opendata.stib-mivb.be/store/data>
- STIB (2021), Société des transports intercommunaux de Bruxelles. Récupéré de <https://www.stib-mivb.be/>
- Sun, Y., 2017. Physarum-inspired Network Optimization: A Review, pp. 1-9. Récupéré de <http://arxiv.org/abs/1712.02910>.
- TEC (2021), Opérateur de Transport de Wallonie. Récupéré de <https://www.letec.be/>
- Tero, A., Kobayashi, R. et Nakagaki, T., (2007), A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold. In : *Journal of Theoretical Biology*. 2007. Vol. 244, n° 4, pp. 553-564. DOI 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. In : *Science*, Vol. 327, n° 5964, pp. 439 DOI 10.1126/science.1177894.
- Tsompanas, M., Sirakoulis, G. et Adamatzky, A., (2016), Physarum in silicon: the Greek motorways study. In : *Natural Computing* [en ligne]. Vol. 15, n° 2, pp. 279-295. DOI 10.1007/s11047-014-9459-0.
- UE / Union Européenne (2012), Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols, p. 68. DOI : <https://doi.org/10.2832/14305>
- United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs - Population Division. (2011), *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*, p. 50 (ST/ESA/SER.A/322).
- United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs - Population Division. (2018), *The World's cities in 2018 - Data Booklet*, p. 34 (ST/ESA/ SER.A/417).
- Urry J. (2000), *Sociology beyond societies: Mobilities for the twenty-first century*. Londres : Taylor & Francis Group, pp 255. ISBN 0-203-02161-4
- Vincent, J., Bogatyreva, O.A., Bogatyrev, N.R., Bowyer, A. et Pahl, A.K. (2006), Biomimetics: Its practice and theory. In *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482. DOI 10.1098/rsif.2006.0127.
- Vogel D., Nicolis S.C., Perez-Escudero A., Nanjundiah V., Sumpter D. et Dussutour A. (2015), Phenotypic variability in unicellular organisms: From calcium signalling to social behaviour. In :

- Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2015. Vol. 282, n° 1819.  
DOI 10.1098/rspb.2015.2322.
- von Schweinitz, L.D. (1822), Synopsis fungorum. Supplement. In *Naturforschende gesellschaft in Leipzig*, n°383, 63.
- Wikipedia Foundation (2021), Arbre couvrant de poids minimal. Illustration récupérée le 30 mai 2021 de [https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre\\_couvrant\\_de\\_poids\\_minimal](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_couvrant_de_poids_minimal)
- Zhu, L., Aono, M., Kim, S.J. et Hara, M., (2013), Amoeba-based computing for traveling salesman problem: Long-term correlations between spatially separated individual cells of *Physarum polycephalum*. In : *BioSystems* [en ligne]. 2013. Vol. 112, n° 1, pp. 1-10.  
DOI 10.1016/j.biosystems.2013.01.008.



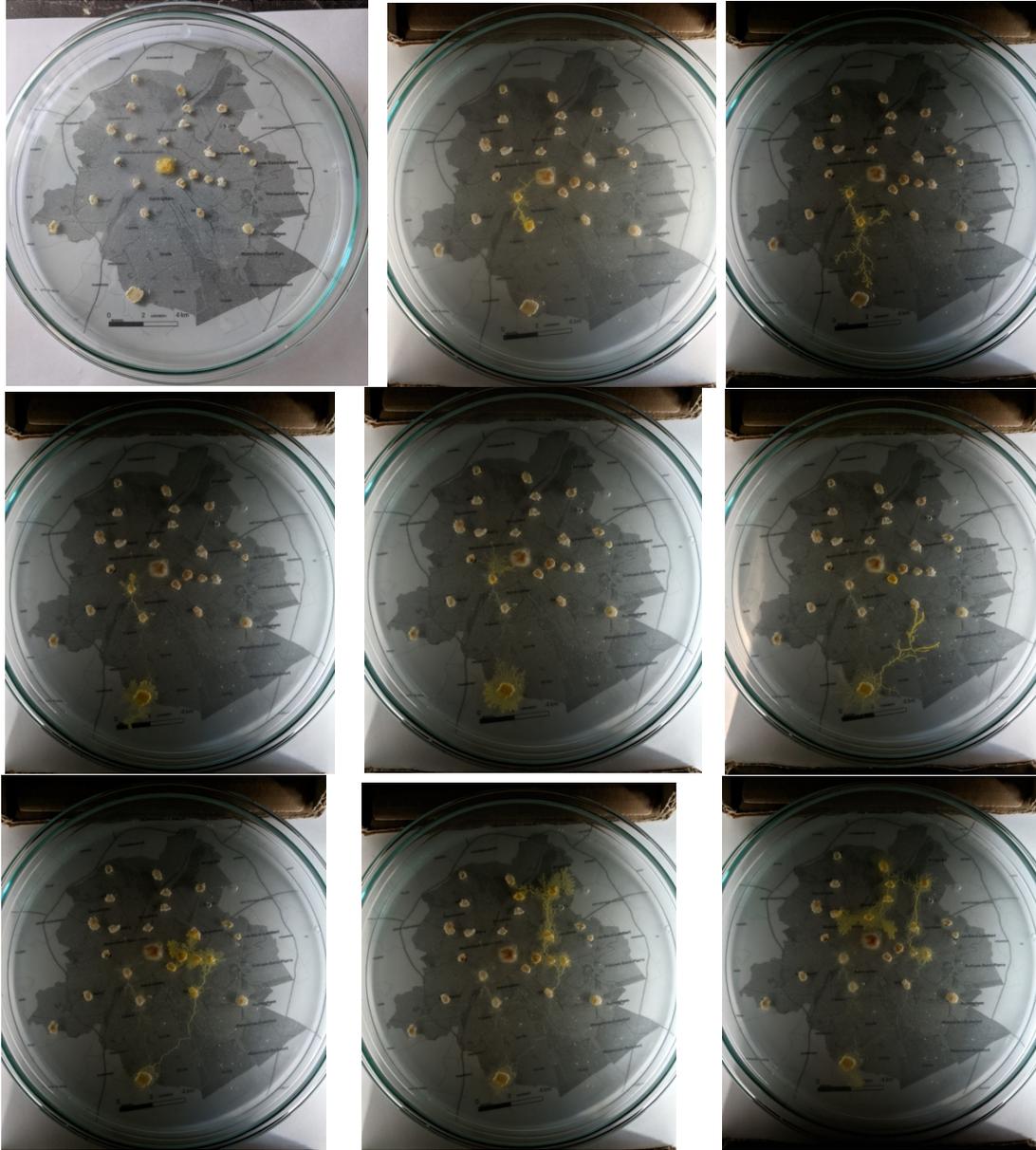
# Annexes

## Annexe 1: Fonds de plan utilisées pour les expériences (à l'échelle d'une feuille A4)



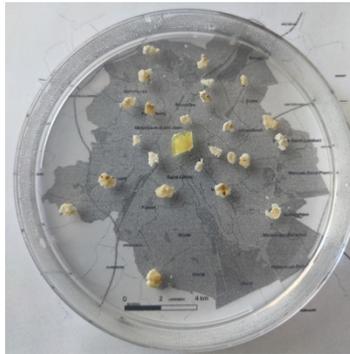
## Annexe 2 : Reportage photographique de l'expérience 1a.

Time-laps du développement du *Physarum polycephalum* lors de l'expérience 1a depuis son inoculation (T=0s) à (T= 48h). Le Time-laps est également disponible sur le lien suivant : <https://youtu.be/T86810cwaKU>.

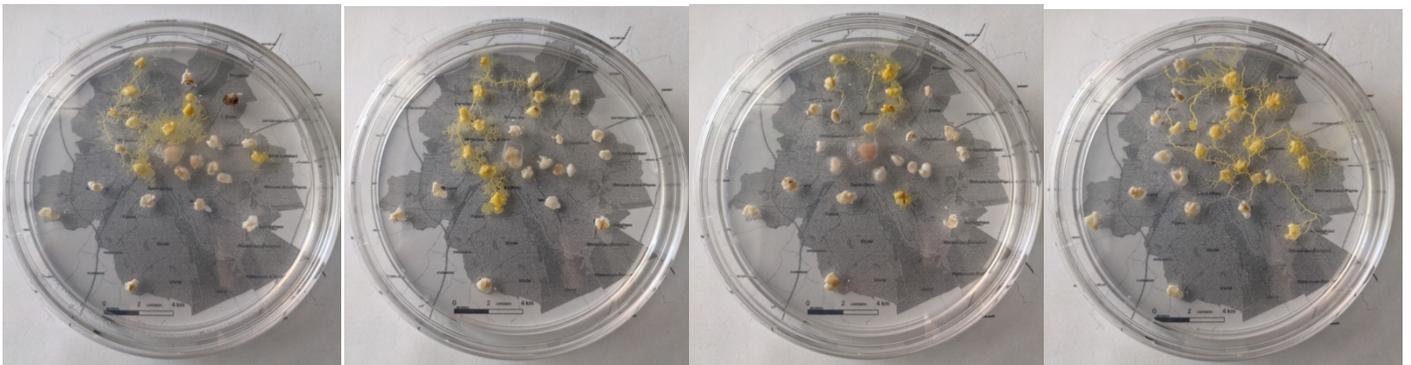


### Annexe 3 : Reportage photographique des expériences 2.

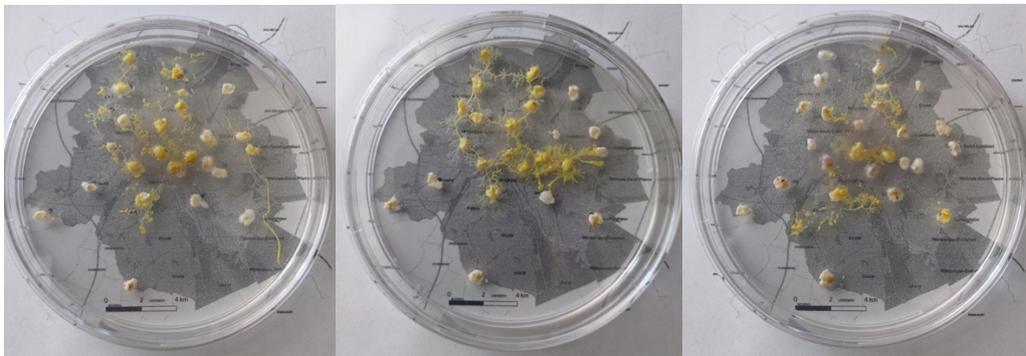
Inoculation en Gare centrale :



Résultats après 48 heures (de gauche à droite : expériences 2a, 2b, 2c, 2d) :



Résultats après 72 heures (de gauche à droite : expériences 2a, 2b, 2c) :



Résultats après 96 heures (de gauche à droite : expériences 2a, 2b, 2c, 2d) :

