

Application de la stratégie de gestion des ressources d'une
colonie de fourmis à une organisation anthropique

par

Tina LÉVESQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 7 AOÛT 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Tina Lévesque, 2018



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de mémoire

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, président du jury

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, membre du jury

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 JUILLET 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Mathias Glaus, pour ses encouragements, ses conseils et son écoute. J'ai eu l'occasion de m'aventurer dans un projet de recherche qui reliait l'entomologie à des problèmes environnementaux associés aux activités humaines. Un énorme merci puisqu'il a toujours été présent en tout temps pour toute question.

Également, je remercie toute l'équipe de recherche à Toulouse, pour leur soutien et leur partage de connaissance sur la myrmécologie. J'ai énormément appris sur les fourmis et le monde de la recherche grâce à cette expérience outre-Atlantique. Leur bonne humeur a été contagieuse tout au long de ce périple.

Étant un projet multidisciplinaire, j'ai dû converser avec plusieurs personnes de différentes expertises. Je remercie l'équipe de l'ÉTS pour la construction d'un compteur à fourmis et des fourmilières pour l'élevage des fourmis.

Tout au long de ma formation, j'ai entamé des lectures de sujets variables et écouté des conférences pour avoir les pour et les contres. Alors, je remercie tous ces gens m'ayant permis d'en apprendre davantage sur une variété de sujets.

Finalement, un énorme merci à mon fiancé Cyril. Il est resté tout au long de ce projet, du tout début à la correction finale. Il m'a conseillé, encouragé et aidé dans les projets connexes. Il m'a appris à utiliser plusieurs logiciels, fabriquer des fourmilières, récolter des fourmis et encore. C'est grâce aux innombrables discussions et questionnements partagés que j'ai réussi à mettre en place ce mémoire.

APPLICATION DE LA STRATÉGIE DE GESTION DES RESSOURCES D'UNE LA FOURMI À UNE ORGANISATION ANTHROPIQUE

Tina LÉVESQUE

RÉSUMÉ

Actuellement, la présence anthropique ne cesse de croître. Cette croissance se traduit par l'augmentation de la densité de la population et par l'étalement urbain. Alimentées par les réseaux d'échanges mondiaux leur fournissant certains types d'énergie et de matière dont elles dépendent, les sociétés humaines occidentales sont devenues une sphère distincte de l'environnement naturel. Tandis que la majorité des études veulent améliorer l'aménagement urbain afin d'avantage son organisation interne, peu de recherches se concentrent sur les interactions de la ville avec son environnement à proximité. Le métabolisme urbain forme des inégalités avec les ressources. Une meilleure gestion en amont, c'est-à-dire l'approvisionnement, est encouragée. Le but de cette étude est d'analyser les caractéristiques des interactions naturelles entre les besoins d'une ville et les ressources disponibles en prenant pour exemple une colonie de fourmis. Trois sous-objectifs dessinent la méthodologie, à savoir, évaluer le comportement de la colonie de fourmis en équilibre sous des perturbations internes (besoin) et externes (disponibilité de la source) (1), modéliser ce comportement (2) et simuler l'analogie de ce modèle biologique avec un modèle d'une organisation anthropique (3). Des expérimentations en laboratoire avec *Linepithema humile* ont été réalisées. Un modèle transposant les comportements des fourmis a également été construit tandis qu'un modèle de croissance d'une agglomération anthropique en fonction des besoins et de la disponibilité des ressources a été simulé.

Pour la première partie, les données ont démontré que les fourmis savent répondre à leur besoin de façon précise et elles montrent une flexibilité de réponse face aux conditions internes et externes. Alors que le besoin chez les fourmis ne se présente pas de façon égale pour chacune, les fourrageuses ont la capacité de choisir collectivement les ressources nécessaires. Aussi, lorsqu'une source de qualité s'offre à la suite d'une de moins bonne qualité, elles sont aptes à modifier le choix collectif vers la meilleure source. Pour la dernière partie, ces notions de flexibilité face aux besoins et à la disponibilité variable des sources qui sont retrouvées chez les fourmis sont appliquées dans la modélisation de la ville. Les données de l'application analogique ont démontré que la ville peut répondre aux variations sans engendrer des déséquilibres d'utilisation de l'espace. Aussi, les résultats suggèrent qu'augmenter la considération de la relation entre les ressources disponibles versus le coût déployé pour de nouvelles constructions permet l'ajustement de la croissance de façon plus raisonnable. Ce modèle de croissance de ville incite le déploiement de nouveaux types de ressources présentes à proximité et favorise l'importance de l'état de l'environnement dans les décisions humaines. L'application analogique a servi d'exemple d'approche écosystémique et motive à innover.

Mots clés: *Linepithema humile*, gestion des ressources, efficience, transposition à un système anthropique

APPLICATION OF THE RESOURCE MANAGEMENT STRATEGY BY THE ANT THROUGH ANTHROPIC ORGANIZATION

Tina LÉVESQUE

ABSTRACT

Currently, the anthropogenic use of space keeps on increasing. This growth results into increased density and urban sprawl. Fueled by global trading networks, which provide certain types of energy and material, Occident human societies are locked into a sphere distinct from the natural environment. While the majority of studies want to improve urban design in order to optimize their own organization, few researches are focused on the city's interactions with the surrounding environment. Indeed, at a time when sustainable development seems to be a win-win solution, others claim the impossibility of unlimited growth in a limited world. Thus, urban metabolism cause inequalities with resources. Better upstream management, ie supply, is encouraged. The purpose of this study is to analyze the characteristics of the natural interactions between the needs of a city and the available resources by taking as an example an ant colony. Three sub-objectives outline the methodology; to model the growth of the ant colony in equilibrium under internal (need) and external (source availability) perturbations (1), model this behavior (2) and to simulate the growth analogy of the biological model with a model of an anthropic organization (3). Laboratory experiments with *Linepithema humile* are carried out. A growth model of an anthropogenic agglomeration according to needs and the availability of energy and materials is simulated in order to obtain a balance with the environment. With the intention of supporting the analogy of the results found in *L. humile*, the effect of disturbances on the development of the city is analyzed. Finally, some parameters influencing the evolution of the city growth are compared in order to evaluate their importance.

For the first part, the data proves that ants know how to fill their own needs in a precise way and adopt a response's flexibility against internal and external conditions. While the need of each ant may not be equal, foragers have the ability to make a collective decision regarding the amount of resources necessary. Also, when a source of good quality is offered after a lower quality, they are able to change the collective choice towards the best source. Concerning the last part, those concepts of flexibility, faced with the needs and the variability of sources found in ants, are applied in the city's model. Simulation data showed that the city can respond to variations without deploying space utilization imbalances. Also, the results suggest that increasing the consideration of the relationship between available resources versus the cost deployed to build new construction is profitable and can adapt the growth more efficiently. This city's model encourages deployment of new types of resources present and promotes the importance of the environment's state in human decisions. Among the results provided by this study, the analogy application has served as an example of ecosystem approach and motivates to innovate.

Keyword: *Linepithema humile*, city growth, resource management strategy, efficiency

TABLE DES MATIÈRES

| | Pages |
|---|-------|
| INTRODUCTION | 1 |
| | |
| CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES | 5 |
| 1.1 La ville | 6 |
| 1.1.1 Définition de la ville | 6 |
| 1.1.2 Développement de la ville | 7 |
| 1.1.3 Caractéristiques de la ville | 8 |
| 1.1.4 Les interactions de la ville avec l'environnement | 10 |
| 1.2 Les enjeux entourant la complexité de la ville | 13 |
| 1.2.1 Complexité des exigences de la ville | 13 |
| 1.2.2 Les enjeux de la croissance | 14 |
| 1.3 Principe d'organisation de la colonie de fourmis | 17 |
| 1.3.1 Écologie et organisation sociale des fourmis | 18 |
| 1.3.2 Les besoins nutritionnels | 21 |
| 1.3.3 Les interactions entre les fourmis et l'environnement | 24 |
| 1.3.4 Analogie entre colonie de fourmis et communauté humaine | 25 |
| | |
| CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE | 29 |
| 2.1 Dynamique de l'approvisionnement d'une colonie de fourmis | 29 |
| 2.1.1 Matériel et méthodologie | 30 |
| 2.1.2 Plans des expériences | 31 |
| 2.1.3 Paramètres de mesure du comportement collectif | 34 |
| 2.2 Élaboration d'un modèle de quête alimentaire d'une colonie de fourmis | 36 |
| 2.2.1 Conditions associées à l'analogie entre la ville et la colonie de fourmis | 38 |
| 2.3 Élaboration d'un modèle d'approvisionnement d'une ville | 40 |
| 2.3.1 Analogie de l'organisation de la colonie de fourmis avec une ville | 41 |
| 2.3.2 Simulation des scénarios | 42 |
| | |
| CHAPITRE 3 RÉSULTATS | 43 |
| 3.1 Dynamique de l'approvisionnement de <i>Linepithema humile</i> | 43 |
| 3.1.1 Variation du besoin (condition interne) | 43 |
| 3.1.2 Variation de la disponibilité (condition externe) | 45 |
| 3.1.3 Indicateurs | 49 |
| 3.2 Modèle des interactions entre les fourmis et les ressources | 51 |
| 3.3 Modèle des interactions entre une ville et les ressources | 53 |
| 3.3.1 Paramètres dans le modèle transposé | 54 |
| 3.3.2 Effets temporels de la variation du besoin (interne) et de la disponibilité (externe) | 59 |

| | |
|--|----|
| CHAPITRE 4 DISCUSSION | 65 |
| 4.1 Caractéristique des expériences ville-fourmis | 65 |
| 4.1.1 Modèle de gestion d'approvisionnement des fourmis | 65 |
| 4.1.2 Analogie entre une colonie de fourmis et une ville | 68 |
| 4.2 Proposition des perspectives du modèle et les limites | 69 |
| 4.2.1 Facteur sur la croissance | 70 |
| 4.2.2 Motif de croissance d'une ville : les emplois..... | 71 |
| 4.2.3 Les limites | 71 |
| 4.3 Utilisation des concepts de la nature comme analogie à une communauté humaine .. | 72 |
| 4.4 Perspectives d'études | 73 |
| CONCLUSION | 75 |
| ANNEXE I INFORMATION SUR LINEPITHEMA HUMILE..... | 77 |
| ANNEXE II VISUALISATION DU COMPTAGE ANTETHOC | 79 |
| ANNEXE III SUPPORT AUX EXPÉRIMENTATIONS AVEC LES FOURMIS | 81 |
| ANNEXE IV SUPPORT À LA MODÉLISATION DE LA CROISSANCE VILLE..... | 85 |
| ANNEXE V MODÉLISATION ANYLOGIC | 87 |
| ANNEXE VI RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES SUR LES FOURMIS | 91 |
| ANNEXE VII RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES SUR LA MODÉLISATION | 93 |
| BIBLIOGRAPHIE | 99 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--|------|
| Tableau 1.1 Description des comportements des fourmis | 27 |
| Tableau 1.2 Description de l'écologie et des caractéristiques physiques des fourmis | 28 |
| Tableau 2.1 Synthèse des expérimentations de comportement de quête alimentaire des fourmis | 32 |
| Tableau 2.2 Composition des solutions pour les carences et les sources des expériences B | 33 |
| Tableau 2.3 Détail de la disponibilité de la source pendant l'heure d'enregistrement | 35 |
| Tableau 2.4 Scénarios évalués dans Anylogic | 38 |
| Tableau 2.5 Analogie simplifiée entre une colonie de fourmis et une ville | 41 |
| Tableau 2.6 Conditions associées aux différents scénarios | 42 |
| Tableau 3.1 Synthèse et comparaison des résultats du comportement des fourrageuses en laboratoire avec le modèle informatique | 53 |
| Tableau 3.2 Paramètres pour la simulation dans Anylogic concernant les variables stock (a), les bilans (b), les constantes (c), les variables dynamiques (d) et les flux (e) | 56 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|--|------|
| Figure 1.1 Schéma de l'organisation et du développement polycentrique | 9 |
| Figure 1.2 Schéma de la consommation par type d'énergie à travers le temps dans le monde | 13 |
| Figure 1.3 L'évolution de la population urbaine et rurale dans le monde | 15 |
| Figure 1.4 Concept de géométrie nutritionnelle | 23 |
| Figure 2.1 Disposition du pont et des branches lors de l'enregistrement | 31 |
| Figure 2.2 Modèle simplifié de la gestion d'approvisionnement dans le système dynamique de la colonie..... | 37 |
| Figure 2.3 Niveau de l'étude..... | 39 |
| Figure 2.4 Modèle simplifié de la gestion d'approvisionnement dans le système dynamique de la ville | 40 |
| Figure 3.1 Proportion d'exploration pour les essais en carence nutritionnelle..... | 44 |
| Figure 3.2 Proportion du flux aller-retour de chaque branche dans le temps | 46 |
| Figure 3.3 Proportion du flux aller-retour de chaque branche | 48 |
| Figure 3.4 La moyenne du flux aller et retour pour l'exploitation dans le temps..... | 49 |
| Figure 3.5 Moyennes des unités de sucres récoltés ajustée avec la concentration de source selon la quantité de mètres parcourus lors de chaque manipulation..... | 50 |
| Figure 3.6 Ratio d'exploitation pour chaque source pour les essais statiques E | 51 |
| Figure 3.7 Ratio d'exploitation pour chaque source pour les expériences d'instabilités D dans le temps | 52 |
| Figure 3.8 Relation de la superficie de la ville versus la forêt..... | 54 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 3.9 | Proportion de coupe selon la variation du besoin en énergie versus en matière pour les 24 premiers pas de temps | 59 |
| Figure 3.10 | Utilisation de l'énergie et de la matière selon les perturbations pour 60 pas de temps (mois) | 60 |
| Figure 3.11 | Proportion de coupe entre l'énergie et la matière selon les perturbations pour 60 pas de temps (mois) | 62 |
| Figure 3.12 | Relation d'efficience selon les perturbations | 63 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AA Acides aminés

AAE Acides aminés essentiels

ACO Algorithme de la colonie de fourmis

Ala Alanine

Ess Essence

Fd Flux droite

Fg Flux gauche

His Histidine

Phé Phénylalanine

Mét Méthionine

Thr Thréonine

Try Tryptophane

Val Valine

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

cm centimètre

ET écart-type

g gramme

m mètre

mL millilitre

uV unité de volume

°C degré Celsius

INTRODUCTION

Divers courants de pensés souscrivent à la confrontation entre la Nature et l'Homme. Lorsqu'il est question d'enjeux entre l'environnement et son exploitation, il est nécessaire de se questionner sur les rôles de chacun. En occident, il existe deux sphères bien distinctes. D'un côté, il y a l'Homme. Il est celui qui contrôle et utilise la nature selon ses besoins, sans considération de ses effets néfastes à long terme. De l'autre côté se tient la Nature, une ressource muette qui donne (Descola, 2005 ; Abraham *et al.*, 2011). Un anthropologue reconnu, Philipe Descola (2005), affirme que cette façon de composer le monde de donneur-preneur se réalise au détriment de la diversité des espèces. Or, il est possible d'imaginer d'autres façons de composer ce monde, où les activités nécessaires au développement des sociétés humaines seraient en équilibre avec l'environnement. Dans ce cas, c'est la nature qui possède l'Homme et non plus l'inverse (Descola, 2005). Alors, il serait intéressant de planifier les activités humaines en fonction de l'environnement.

Par ses actions, l'Homme modifie continuellement la nature, générant certains déséquilibres (Descola, 2005). La ville est une structure résultante de l'organisation et du développement anthropique. Elle est la réalisation la plus formelle d'anthropisation de l'environnement et une forme complète qui marque l'Anthropocène par Paul Crutzen (D'alisa *et al.*, 2015; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Comme une entité propre, elle naît et meurt. La ville a des phases de croissances, de stabilité et de décroissances qui évoluent selon ses interactions (Glaeser, 2011; D'alisa *et al.*, 2015). D'ailleurs, elle interagit avec son milieu au moyen d'entrées et de sorties d'éléments qui régulent et influencent son évolution. Néanmoins, à présent, les villes ont tendance à croître continuellement, générant un déséquilibre avec les ressources naturelles (Lapointe, 2003; Abraham *et al.*, 2011; D'alisa *et al.*, 2015; Descola, 2015 ; Jacques, 2015). Cette croissance peut être expliquée par plusieurs facteurs. Un de ses éléments dominants est le réseau d'importation et d'exportation présent à travers le globe (Paulet, 2009; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). À force de vouloir homogénéiser l'accessibilité à tous types de matériaux et d'énergie, il en devient fortement alimenté. À terme, ce réseau entame une rupture avec son environnement à proximité. Ainsi, en restant dans l'optique de la croissance, la

quantité des ressources naturelles n'est plus suffisante pour supporter les villes (Descola, 2005; Abraham *et al.*, 2011; D'alisa *et al.*, 2015; Jacques, 2015). De plus, les décisions des sociétés humaines sont majoritairement prises selon des raisons économiques ou politiques. Les raisons environnementales arrivent couramment en second plan (Jacques, 2015).

Dans le cadre de cette recherche, la problématique générale se traduit par la question suivante: quels sont les facteurs naturels pouvant répondre aux besoins d'une ville en développement, et ce, en équilibre avec les ressources à proximité? Selon Philipe Descola (2005), la dynamique d'un écosystème doit entrer en jeux dans la conception d'une ville. Dans cette perspective, il devient pertinent d'étudier les exemples venant de l'écologie. Effectivement, un vaste nombre d'espèces animales ont su s'adapter à l'environnement pendant des millions d'années (Ratnieks, 2008; Benyus, 2011). Leur survie dépend directement de l'équilibre entre leur croissance et l'accessibilité aux ressources. Elles font partie de la sphère nature, formant un réseau d'interactions fonctionnelles diversifiées. Ainsi, l'objectif principal de la présente étude est d'analyser les caractéristiques des interactions naturelles entre les besoins d'une communauté d'êtres vivants et les ressources disponibles en prenant pour exemple une colonie de fourmis. Dans la perspective de tentative d'application d'une analogie entre le comportement de quête alimentaire des fourmis et la gestion des ressources par l'homme.

Cet objectif principal est composé de trois sous-objectifs :

1. analyser le comportement, en terme d'approvisionnement, d'une colonie de fourmis soumise à des perturbations au niveau interne (besoin) et externe (disponibilité de la source);
2. développer le modèle dynamique du comportement de la colonie de fourmis soumis aux différentes perturbations étudiées;
3. proposer une analogie du modèle biologique avec un modèle de croissance d'un système anthropique (communauté humaine).

Au moyen de ces sous-objectifs, le comportement d'approvisionnement de la colonie de fourmis est retracé dans un modèle de croissance d'une ville. C'est par la simulation des

différents scénarios de perturbations que les caractéristiques des interactions naturelles entre une ville et les ressources sont analysées.

Le premier chapitre aborde l'état des connaissances de l'évolution des villes et du modèle biologique. D'une part, les différentes approches pour définir la ville, son développement, son histoire et les motifs de ses fondations et la complexité de ce système sont alors expliquées. D'autre part, l'écologie, l'organisation sociale du modèle biologique, les besoins et les interactions entretenues avec l'environnement sont présentés. Le second chapitre porte sur la méthodologie appliquée. L'élevage, le matériel nécessaire et les observations faites sur le comportement de la fourmi en laboratoire sont exposés. Ensuite, les étapes pour la proposition de l'analogie entre le modèle biologique et anthropique sont présentées. Le troisième chapitre est la représentation graphique des résultats. Les résultats des expérimentations en laboratoire avec le modèle biologique sont présentés et analysés. Puis, ce sont les courbes de développement résultantes des simulations des fourmis et de la ville qui sont exposées. Le dernier chapitre est la discussion. Cette partie répond à la problématique en discutant sur les résultats obtenus, l'utilisation d'une analogie comme et l'ampleur des enjeux actuels. Cette section se conclut par les perspectives futures et des ouvertures de recherches.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le premier chapitre regroupe deux grands volets: l'organisation anthropique et la fourmi. Pour le premier volet, la recherche sur l'organisation anthropique rassemble un domaine principal avec un domaine connexe, soit la géographie urbaine accompagnée de l'anthropologie. D'une part, la géographie urbaine est l'étude de l'organisation spatiale des villes et des relations entre elles, dont l'urbanisation (Paulet, 2009; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). La géographie urbaine est nécessaire pour comprendre les enjeux de croissance de la ville. D'autre part, l'anthropologie est le domaine qui étudie les phénomènes humains en analysant ses cultures sous plusieurs angles (Descola, 2005). Ce champ d'études se base sur les comportements humains et informe sur les interactions existant entre les membres d'une organisation anthropique. Il instruit également sur l'interaction de l'Homme à l'égard de l'environnement. Par conséquent, le premier volet aborde une revue des connaissances sur la définition de la ville, ses caractéristiques, ses origines et son développement. Aussi, cette section intègre l'interaction de cette organisation avec l'environnement. Cette partie se termine avec la description de l'enjeu. Quant au deuxième volet, c'est l'information générale du modèle biologique qui est abordée. Cette section du chapitre nécessite une étude du domaine de myrmécologie, plus spécifiquement la cognition de la fourmi. Vaste sujet de lecture, la compréhension du comportement des fourmis est nécessaire afin d'entrevoir les phénomènes qui gèrent leurs prises de décisions. Elle débute avec l'écologie et l'organisation sociale des colonies de fourmis accompagnées de leurs besoins nutritifs. Les connaissances des éléments influençant l'interaction des fourmis et l'environnement sont expliquées. Enfin, l'état des connaissances sur l'analogie des colonies de fourmis avec l'organisation anthropique est présenté.

1.1 La ville

D'après l'économiste Edward Glaeser (2011), la ville est la création la plus admirable réalisée par l'humain. L'histoire de la ville, les raisons d'agglomération et de progression d'urbanisation font partie des sujets de plusieurs de ses ouvrages. De fait, la ville est la résultante de l'organisation anthropique. En politique, il y a deux façons distinctes de composer la ville, soit c'est un habitat, soit ce sont ses habitants (Glaeser, 2011). Pour cette présente recherche, la ville est perçue comme une entité propre, structurée indirectement à travers ses habitants.

1.1.1 Définition de la ville

La portée d'une ville dans une région donnée dépend de la condition du milieu dans lequel elle s'insère, du statut du territoire, de la législation et majoritairement de la taille de la population (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). D'une manière générale, pour être considérée comme ville, elle doit contenir une organisation suffisante pour dépasser un certain seuil d'autonomie. Ce seuil est atteint grâce à la diversité de production et de service (Lapointe, 2003). Alors, ce terme possède une signification variable selon le pays et le contexte.

En géographie urbaine, la ville se définit par plusieurs approches et est perçue de différentes manières (Humain-Lamour et Laporte, 2017). C'est un milieu physique et urbain composé de politiques, d'activités économiques, d'une forte activité professionnelle, d'une culture, d'un réseau de transports et des infrastructures de commerce, d'habitation et d'éducation (Lapointe, 2003; Paulet, 2009, Humain-Lamour et Laporte, 2017). Au moyen des échanges d'information, de la diffusion du savoir et du brassage d'idées, ce rassemblement de gens est à l'origine de diverses innovations économiques, sociales et culturelles (Lapointe, 2003; Piéchaud, 2013). La ville est évolutive comme un organisme vivant et peut ainsi se définir comme un système dynamique formé d'éléments en interactions.

1.1.2 Développement de la ville

Les villes évoluent. Afin de comprendre le cheminement des agglomérations actuelles, cette section exprime l'histoire et les motifs de fondation. Les villes d'aujourd'hui se sont toutes développées différemment pour des raisons d'implantations, des prises de décisions des habitants et de l'état de l'environnement qui les soutient.

Histoire

C'est à partir du Néolithique que les villes ont pris naissance. Cette formation est en majeure partie expliquée par l'accumulation des richesses et la division du travail entre individus à des endroits donnés (Maddison, 2001). Jusqu'au début du 19^e siècle, la majorité des villes n'avait pas en sa possession tous les types de matériaux. Uniquement des constructions à partir des ressources présentes à proximité étaient réalisées. Durant la révolution industrielle, il y a une transition des sociétés majoritairement agricoles vers des sociétés commerciales et industrielles (Paulet, 2009; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Cette transition marque l'ère de l'Anthropocène à la fin du 18^e siècle avec l'invention de la machine à vapeur et l'utilisation des combustibles fossiles. C'est donc depuis ce temps jusqu'à aujourd'hui que le développement s'est accéléré et dynamisé pour former les sociétés modernes (Maddison, 2001; D'alisa *et al.*, 2015). Cette intensification est présente dans la majorité des domaines, avec notamment des avantages et des désavantages (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Une composante importante du développement des villes est l'interaction qu'elles forment entre elles. Puisque la ville est un rassemblement de gens favorisant l'échange du savoir et des connaissances (Lapointe, 2003), il y a apparition de diverses innovations qui vont potentiellement influencer l'évolution des villes. D'une part, par exemple, un élément ayant marqué l'évolution des villes est la création du chemin de fer. Cela a permis d'échanger des matières sur de plus grandes distances, et donc de fonder des villes sur des lieux faibles en ressources premières (Lapointe, 2003). D'autre part, cette innovation s'est établie en parallèle du développement de la consommation d'énergie, devenue aujourd'hui critique (Lapointe, 2003; Paulet, 2009). Désormais les échanges par trains, avions et bateaux, définissent un large

réseau indispensable au maintien des agglomérations à travers le monde (Paulet, 2009; Humain-Lamoure et Laporte, 2017).

Motifs des fondations

La fondation d'une ville peut être classifiée selon son origine ou sa fonction principale. Le rassemblement des gens lors de la fondation d'une grande ville peut s'établir par; plaisir, force, autorité, utilité, commodité et fécondité du terrain ou commodité du transport (Botero, 2014). Actuellement, les motifs de mise en place sont relatifs à la proximité des ressources naturelles, l'accessibilité d'emplois, la religion, l'industrie, l'accessibilité aux échanges, la réduction des coûts de transport et l'attraction touristique, administrative ou universitaire (Lapointe, 2003; Paulet, 2009; Botero, 2014). D'ailleurs, la présence d'emplois est primordiale pour le fonctionnement d'une ville et peut être considérée comme un inciteur principal. Notamment, les gens et les entreprises décident d'être en ville selon les bénéfices que la ville leur procure face aux coûts que cela peut leur occasionner (Lapointe, 2003).

1.1.3 Caractéristiques de la ville

Les villes sont caractérisées de façon structurelle et fonctionnelle. Leurs attributs influencent le développement, l'état de la ville et les relations internationales. Chaque ville reste unique puisqu'elle est l'alliance de localisation et d'architectures variées, mais aussi de par les gens qui l'habitent et qui possèdent des idées et des cultures différentes (Lapointe, 2003).

Caractères spatiaux et structurels

L'époque, la culture présente et les activités de la société agencent l'organisation spatiale (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Parallèlement, les caractéristiques spatiales forment la ville et influence à son tour le développement. Quelques exemples spatiaux peuvent être énumérés. La ville peut être de formes et de dimensions variables qui affecteront l'efficacité et la robustesse de son fonctionnement (Le Nchet, 2015). La ville est fréquemment organisée de

façon centralisée et hiérarchisée. Puis sa forme va ensuite évoluer dans le temps selon la politique courante, l'activité économique et les ressources environnementales. Cet espace polarisé présente un système urbain organisé par des structures et un réseau qui les relie (Paulet, 2009). La plupart du temps, la diversité des structures prend forme par la croissance centrifuge d'un centre principal avec émergence des centres secondaires (Figure 1.1). Aussi, il y a le processus d'incorporation, duquel, une ville principale en croissance qui absorbe ensuite d'autres villes. Ce processus crée alors une plus grande ville de type polycentrique (Charmes et Souami, 2009; Paulet, 2009; Le Néchet, 2015). D'ailleurs, le polycentrisme est favorisé puisqu'il augmente la robustesse et améliore les déplacements quotidiens. De plus, des villes économies en espace, en énergie et en déplacement, tel que la notion de densification est encouragée par plusieurs chercheurs (Glaeser, 2011; Le Néchet, 2015). Ceci permet de préserver des espaces naturels et répondre au besoin démographique (Charmes et Souami, 2009; Glaeser, 2011; Duflot, 2013).

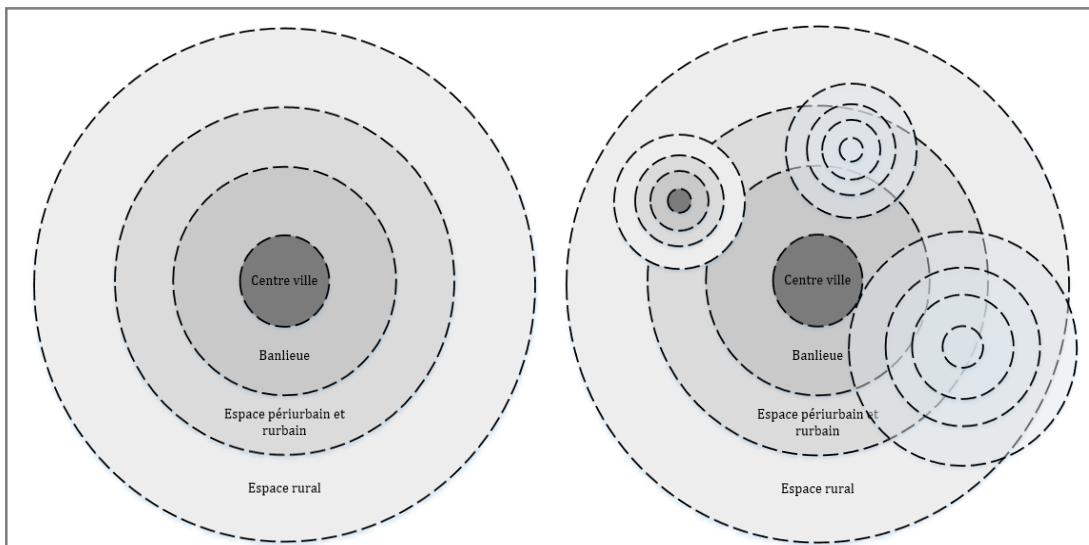


Figure 1.1 Schéma de l'organisation et du développement polycentrique
Adaptée de Le Néchet, 2015

Les caractéristiques structurelles décrivent également l'aménagement, les types de ressources et matériaux qui constituent la ville. Concrètement, le type de ressources utilisées pour les constructions dépend en premier lieu des ressources présentes à proximité. En plus de l'hétérogénéité des bâtiments, le microclimat urbain est influencé conformément à la

perméabilité des matériaux urbains et par la présence des espaces verts (CNRM, 2014). L'augmentation du ratio des espaces verts apparaît comme un facteur-bénéfice. Ils génèrent une réduction d'utilisation d'énergie en modérant les écarts de températures et une réduction des émissions de gaz carboniques par le processus de photosynthèse (Marchand, 2012; CNRM, 2014).

Caractères fonctionnels

Les caractéristiques fonctionnelles concernent le niveau d'échange, le flux d'information, la quantité de population et l'organisation économique et politique. L'état de richesse de la population suscite une variation dans le développement de la ville (Mongin, 2005; Glaeser, 2011; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). La division du travail entre les citadins affecte l'activité globale et alors le développement de la ville (Maddison, 2001; Lapointe, 2003; Glaeser, 2011). Cette activité influence à son tour les demandes en ressources et les émissions de polluants (Lapointe, 2003). Aussi, l'autorité politique attribue des croissances, des décroissances et des moments de stagnation de la ville. Elle peut avantager les valeurs sociales, économiques et environnementales à des niveaux inégaux (D'Alisa *et al.*, 2015). Dès lors, ces fonctions modifient la structure de la ville. Il y a deux exemples qui assemblent l'économie et la politique avec l'activité environnementale. Ce sont la bioéconomie qui est apparue avec l'économiste Nicholas Georgescu-Roegen en 1970 et l'écologie politique dont André Gorz est le précurseur (D'Alisa *et al.*, 2015).

1.1.4 Les interactions de la ville avec l'environnement

Pour la majorité des gens, étant dans une société de clivage entre l'Homme et la nature, la relation avec l'environnement est une question de maîtrise (Paulet, 2009; Descola, 2015). Maîtriser la nature pour soutirer les bénéfices. Déjà au Moyen-Âge, la nature pouvait être perçue négativement, étant alors un milieu sauvage qui devait être dominé (Paulet, 2009). Le métabolisme urbain permet d'appréhender l'interaction de la ville avec son environnement.

La nature et l'Homme

Quatre grandes classes définissent la façon dont l'humain compose le monde selon Philippe Descola (2005): le naturaliste, l'animisme, le totémisme et l'analogisme. En fonction des continuités et discontinuité entre l'aspect physique et l'intériorité, ces ontologies sont décrites. En occident, et dans le secteur industriel, seulement le naturaliste est comblé. Prime à bord, pour le naturaliste la terre est au service de l'Homme par le biais de l'activité industrielle. Il est au-dessus et tout le reste est au même plan (Abraham *et al.*, 2011). En contrepartie, les trois classes suivantes se réfèrent à d'autres manières de composer le monde, où la relation entre l'humain et le non-humain est différente. Par exemple, les Aztèques et les Incas souscrivent à l'analogisme, dont il y a une discontinuité d'intériorité et d'aspect physique. Les chasseurs-cueilleur et les aborigènes d'Australie forment la classe du totémiste, qui au contraire du précédent, il y a continuité d'intériorité et d'aspect physique (Descola, 2005).

Métabolisme urbain

Le métabolisme urbain est une métaphore. Il consiste à étudier et contrôler les flux de matières et d'énergie dans le système de la ville (Jolivet et Carré, 2017). C'est l'approvisionnement, l'utilisation, et la transformation de l'énergie, la matière, l'eau et la nourriture. Ces flux constituent l'acheminement constant de ressources vers un point dense : la ville (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Le métabolisme de la ville peut être conçu de manière linéaire ou circulaire. Cependant l'utilisation des sources engendre toujours des conséquences en amont et en aval. En amont, c'est la manière dont les ressources sont prélevées et acheminées vers la ville. En aval, c'est la gestion de ces sources une fois usées et transformées (Jolivet et Carré, 2017). Pour lors, ce cheminement des ressources vers des points centraux peut avoir des conséquences négatives à l'égard de l'environnement (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Par conséquent, une bonne gestion en amont et en aval s'avère primordiale.

Approvisionnement

Les villes ont besoin d'énergie et de matières, qu'elles soient de nature renouvelable ou non. De nos jours, ce sont majoritairement les ressources non renouvelables qui sont exploitées, telles que des minéraux et les hydrocarbures (Legault, 2007).

Concernant la matière, elle définit les éléments nécessaires pour toute structure, tels que les objets, réseaux et bâtiments. Pour l'énergie, il y a six formes principales: électrique, mécanique, thermique, chimique, rayonnante et nucléaire (Legault, 2007). Actuellement, la consommation de l'énergie primaire est en grande partie tirée du pétrole (31,7 %), suivi du charbon (28,1 %), du gaz naturel (21,6 %), des énergies renouvelables (13,7 %) et du nucléaire (4,9 %). Les énergies renouvelables sont majoritairement l'hydroélectricité (2,5 %), la biomasse (9,7 %), la géothermie, l'éolien, le solaire (IEA, 2017). Les ressources renouvelables engendrent une dynamique variée (Legault, 2007). Certaines nécessitent des coûts élevés de mise en place, comme l'énergie solaire et l'éolien. D'autres nécessitent un changement total de la nature, à l'exemple de l'hydroélectricité (Legault, 2007). Pour sa part, bien que la consommation de l'énergie en biomasse du bois représente moins de 2 % dans le monde, c'est une ressource très présente et utilisée dans certains milieux (Gouvernement du Québec, 2017). Le territoire forestier est considérable pour plusieurs régions du monde et le bois, à lui seul, peut offrir de l'énergie et de la matière à une ville.

L'exploitation de ces ressources naturelles sert à alimenter les besoins des activités humaines pour la production de biens et d'équipements, la construction des infrastructures, l'alimentation de la population (nourriture et eau), les déplacements ainsi que l'accès à l'information (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Concernant l'énergie, en plus d'accroître sa consommation par individus et dans le monde, l'utilisation d'énergie non renouvelable est plus que majoritaire face aux autres (Tverberg, 2012). L'évolution de la consommation en quantité pour chaque type d'énergie est présentée à la figure 1.2.

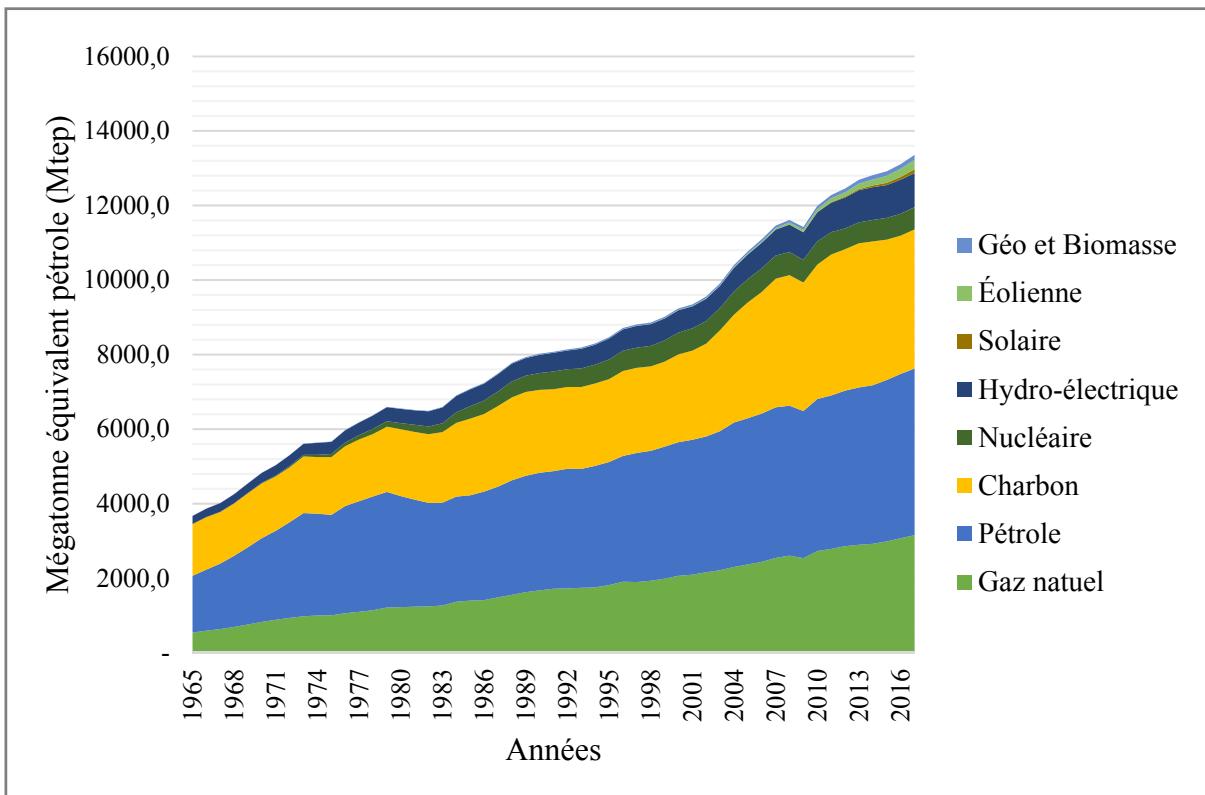


Figure 1.2 Schéma de la consommation par type d'énergie à travers le temps dans le monde
Adaptée de Tverberg, 2012

1.2 Les enjeux entourant la complexité de la ville

Afin de répondre aux exigences de la ville, il faut au préalable connaître les besoins mêmes. Outre les besoins fondamentaux précédemment exprimés, les types de besoins peuvent dépendre de la culture, de la politique et de l'état des richesses. Lorsque les exigences de la ville sont comblées, la ville croît verticalement et/ou horizontalement (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). La complexité de ses exigences et les causes de sa croissance sont détaillées dans cette section.

1.2.1 Complexité des exigences de la ville

Globalement, la ville est façonnée avec l'organisation environnementale, sociale et économique qui la compose. Comme précisé précédemment, pour Glaeser (2011), les villes sont synonymes de gens et non de structure. Les politiques doivent agir en fonction des

personnes et non des territoires. Par ce biais, l'activité et le développement de la ville sont synonymes des volontés et de besoins des gens qui la composent. Alors, la ville résultante est complexe. Contrairement aux besoins fondamentaux, les volontés et les besoins secondaires ne suivent pas de règles préétablies, et varient constamment (Conradt et List, 2009). De même, l'usage du territoire dépend de la perception de celui qui l'utilise et la perception de cette espace est différente selon la personne qui la regarde puisque chacun la perçoit d'après ses sens et ses valeurs (Bédard *et al.*, 2012). Conséquemment, plus l'Homme se perçoit différent et distinct de la nature, plus le développement de la ville peut converger vers un déséquilibre.

1.2.2 Les enjeux de la croissance

Dans cette section, l'enjeu de la croissance urbaine est détaillé par une définition de la croissance, ses causes et impacts, puis, elle se termine avec l'approche utilisée dans cette étude.

La croissance verticale et horizontale

Par l'augmentation de la population dans le monde et l'exode rural, les villes sont davantage peuplées (figure 1.3). Entre 2005 et 2010, la population en ville dépasse la population rurale (La Banque Mondiale, 2018). Or, l'intérêt d'habiter une ville est multiple. Assurément, elle offre un accès à plusieurs services et échanges, concentre des industries, bureaux et commerce (Glaeser, 2011).

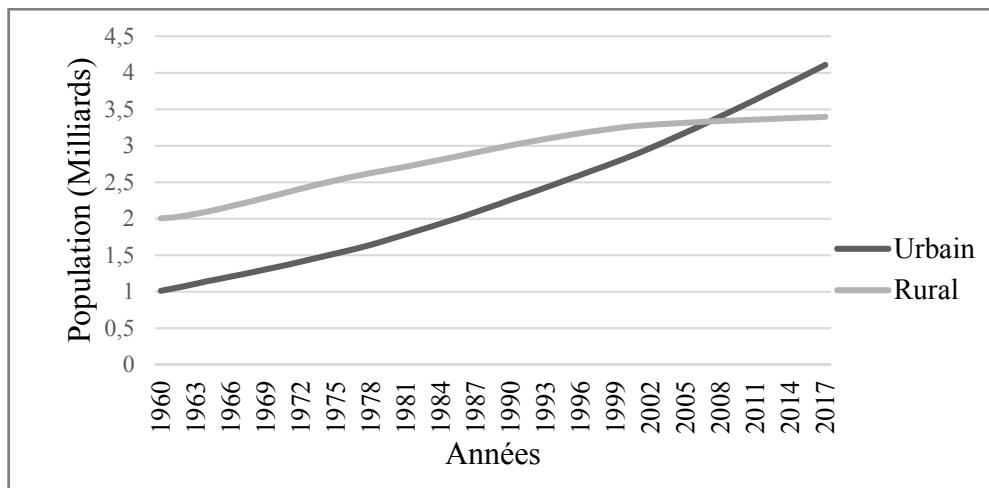


Figure 1.3 L'évolution de la population urbaine et rurale dans le monde
Adaptée de La Banque Mondiale, 2018

Pour certains pays développés, en raison du taux d'urbanisation déjà élevé, il y a un phénomène d'étalement résultant sur la périurbanisation (Lapointe, 2003; Paulet, 2009; Glaeser, 2011; Marchand, 2012; Le Nechet, 2015; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Par conséquent, il y a deux types de croissance de la ville, l'une verticale et l'autre horizontale. Tout d'abord, une croissance verticale se traduit par l'augmentation de la densité de la population. Les avantages environnementaux sont la diminution des distances et l'accessibilité aux transports non motorisés ou collectifs. La compacité des bâtiments occasionne également moins de pertes énergétiques. Par conséquent, les émissions de pollution par habitant demeurent moins élevées (Glaeser, 2011; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). La croissance horizontale consiste quant à elle à l'étalement de la superficie. Un avantage environnemental est la favorisation du polycentrisme et réduit les conséquences négatives face aux catastrophes ou épidémies de maladies (Humain-Lamoure et Laporte, 2017).

Les causes et impacts de la croissance

La ville croît en fonction de l'état économique, les emplois, des échanges, de la juridiction, de la politique, de l'importance historique, des avantages de service et de l'accessibilité aux ressources. En ce qui concerne cette dernière, les espaces anthropiques alimentent les flux de

matière et d'énergie et les réseaux d'échange, et ces flux et réseaux définissent le développement des espaces (Bédard *et al.*, 2012).

Pour commencer, jusqu'au 14^e siècle, c'était majoritairement l'agriculture qui transformait le milieu. C'était l'activité nécessitant de grandes modifications du milieu naturel. Dans les régions ayant des saisons et un climat imprévisibles, une importance particulière est portée sur le concept de stockage. L'Homme a appris à conserver les aliments pendant de longues périodes pour assurer sa survie lors de périodes hivernales plus rudes. Avec l'agriculture, les populations devaient alors recourir à des procédés de conservation et de gestion de l'espace spatiale en vue du stockage. Actuellement, c'est en additionnant la surexploitation, la destruction du couvert végétal, l'utilisation des pesticides, des polluants ménagers, l'augmentation de l'urbanisation et l'augmentation des réseaux routiers que les milieux naturels ont été durement modifiés (Paulet, 2009). L'artificialisation des sols occasionne des îlots de chaleur urbains, épuise les nappes phréatiques et affaiblit les couches souterraines (Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Par ailleurs, les villes absorbent plus de la moitié des ressources planétaires et sont responsables de grandes quantités d'émissions en CO₂. Un autre élément d'envergure est la longueur des distances d'échanges, empruntées par divers moyens de transport (bateaux, trains et avions). En plus de créer une pollution par l'utilisation de carburants, ces distances ont provoqué des problèmes environnementaux par l'introduction d'espèces envahissantes. Ces espèces exotiques sont maintenant la cause principale de disparition d'autres espèces indigènes (Primack, 2008). Les terres, les océans, les pôles et l'air sont pollués par l'activité humaine. Par conséquent, à présent, il est difficile de trouver un milieu dit naturel puisque l'Homme a modifié l'équilibre de la plupart des écosystèmes (Paulet, 2009). Même des territoires fragiles, pourtant difficilement accessibles sont conquis par l'Homme, comme les montagnes. Subséquemment, la croissance des villes n'a plus de limite. Que ce soit par densité ou l'étalement urbain, elles croissent à tout prix. Or, comme pour les ressources, l'espace sur Terre, qu'elle soit utilisée de manière dense ou espacée, elle possède une limite (Jacques, 2015).

Alors que l'Homme modifie les milieux et que les villes croissent, l'écart entre la consommation et la capacité de renouvellement augmente (Paulet, 2009). Les causes de l'utilisation excessive des ressources doivent être examinées. Ces causes sont multiples, telles que la surconsommation des utilisateurs, une mauvaise gestion d'approvisionnement, l'augmentation générale de la démographie, l'autorité politique qui avantage la croissance économique et les entreprises privées qui ne sont pas concernées par le développement local. C'est l'assemblage d'une multitude de facteurs qui alimente cette mauvaise utilisation des ressources (Paulet, 2009).

Concernant le niveau mondial, autrement dit, les interactions entre les villes, c'est en grande partie la répartition du réseau d'importation et d'exportation qui dessine l'évolution des villes. À présent, les sociétés occidentales dépendent totalement de ce système d'échanges (Paulet, 2009; Humain-Lamoure et Laporte, 2017). Comme l'indique J.-P. Paulet, il y a constamment une « *pression de mondialisation, de l'économie de marché et des stratégies à court terme des firmes qui entraînent une croissance urbaine désordonnée* » (Paulet, 2009, p. 53). Or, grâce aux échanges mondiaux, les exigences de la ville peuvent demeurer hautes et les exigences deviennent alors davantage hétéroclites. La mentalité est présentement figée sur une expansion continue qui cause un déséquilibre entre les entrées et les sorties du système ville (Paulet, 2009). En effet, la ville est un organisme qui consomme sans cesse et par conséquent, produit des déchets en grande quantité (Paulet, 2009; Humain-Lamoure et Laporte, 2017).

1.3 Principe d'organisation de la colonie de fourmis

La fourmi a déjà été l'objet de biomimétisme pour des résolutions de problèmes, tel que les trajets de réseaux d'exploitation avec l'algorithme de la colonie de fourmis (ACO) (Monmarch, 2000; Dorigo et Blum, 2005). Il existe plusieurs variantes de l'ACO et elle a été utilisée pour résoudre une variété de problèmes anthropiques de domaines différents. Bien que l'ACO soit reconnu et bien étudié, il n'existe pas d'autres études formelles qui emploient cet insecte social comme modèle. Pourtant, la majorité des recherches myrmécologiques envisage en ouverture des avancées possibles si l'humain prenait exemple de ces dernières (Ratnieks, 2008). La

section aborde l'écologie de la fourmi, les notions d'organisation sociale et ses interactions avec l'environnement ainsi que les analogies étudiées entre colonie de fourmis et communauté humaine.

1.3.1 Écologie et organisation sociale des fourmis

Tout d'abord, la similitude de la fourmi et de l'Homme repose sur l'eusocialité (Holldobler et Wilson, 1990; Passera et Aron, 2005; Lach *et al.*, 2010). La définition d'eusocialité est l'apparition d'une division des tâches dans un groupe, la cohabitation des différentes générations, la forte présence d'échanges d'informations entre les individus ainsi que la réception des soins nécessaires pour le bon développement des jeunes (Passera et Aron, 2005; Wilson et Holldobler, 2005). Apparemment, les fourmis ont développé une forme de socialité avancée au cours du temps. Néanmoins, il est essentiel de considérer que la conception du monde par les fourmis est totalement différente de celle d'un Homme.

Descriptions générales des fourmis

Les besoins des fourmis sont plus fondamentaux que ceux de l'Homme. Elles nécessitent un taux d'humidité précis, une température optimale, un substrat particulier, un nettoyage constant et une alimentation composée de sucre et de protéines (Holldobler et Wilson, 1990; Lach *et al.*, 2010). Aussi, les fourmis n'ont pas à proprement parler une volonté. D'une perspective élémentaire, elles répondent simplement à leur besoin pour la survie de la colonie.

En termes de nombres, elles vivent sur terre depuis plus de 100 millions d'années (Hölldobler et Wilson, 1990). En classification, les fourmis sont une famille (*Formicidae*). Il existe environ 12 000 espèces répertoriées dans le monde. Au Québec, il y a près de 100 espèces de fourmis présentes (Francoeur, 2008). Pour imager un ordre de grandeur, la biomasse totale sur terre des fourmis est plus importante que celui de l'Homme. Elle représente de 15 à 20 % de la biomasse totale de toutes les espèces animales terrestres (Schultz, 2000). Bref, c'est une espèce qui a fait ces preuves sur terre. Ce succès écologique peut s'expliquer par le développement de la

socialité, la formation d'un super-organisme, de l'intelligence collective et du processus d'auto-organisation (Hölldobler et Wilson, 1990).

Un organe particulier est leur jabot social, c'est-à-dire un deuxième estomac. C'est grâce à cet organe qu'elles peuvent stocker de la nourriture et la partager avec ces congénères. Généralement, elles conservent cette nourriture pour le déplacement d'un point à un autre, et elles la conservent aussi jusqu'à ce qu'une autre fourmi envoie un signal de nécessité à l'aide d'un contact d'antenne. L'échange se fait par régurgitation par la bouche de la nourriture en partie digérée du jabot social, la trophallaxie (Hölldobler et Wilson, 1990; Passera et Aron, 2005).

Comportement et adaptation des fourmis

Pour chacune des espèces, des adaptations disparates ont été développées et sélectionnées par les conditions abiotiques et biotiques environnantes. Les conditions abiotiques sont les variations cycliques et ponctuelles du climat. Pour les conditions biotiques, ce sont les interactions avec d'autres espèces animales, végétales et de champignons qui ont façonné l'évolution des fourmis. Ces interactions directes ou indirectes peuvent soit être de type mutualisme, compétitif ou de prédation (Hölldobler et Wilson, 1990; Passera et Aron, 2005). Ces insectes présentent des comportements diversifiés qui ont permis la survie de leurs espèces.

Par ailleurs, au moyen de règles simples remplies par des entités plutôt simples, il résulte d'une intelligence collective pouvant résoudre des problèmes complexes (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine *et al.*, 2001). Bien qu'une seule fourmi soit considérée comme simple, la colonie présente, quant à elle, de fortes interactions entre les individus qui la composent. Leur méthode de défense, leur mode de communication via les phéromones, leur allocation pour diverses tâches, leur pratique d'élevage sont tous des comportements qui sont encore sujets à des recherches scientifiques.

Notamment, chaque espèce de fourmis forme une division de travail au sein de la colonie (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine et al., 2001; Passera et Aron, 2005). Concernant la caste royale et la caste ouvrière, le rôle de la reine n'est pas de diriger l'action de ses filles, mais simplement de pondre pour agrandir la colonie. Chez les ouvrières, il y a une spécialisation selon la forme ou l'âge. Comme rôle, il y a celles qui s'occupent des larves, celles qui vont à la recherche de la nourriture et celles qui protègent le nid (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine et al., 2001). Or, il y a une division du travail bien établie et qui peut être modulée selon les besoins immédiats. Cette caractéristique fonctionnelle est primordiale pour le bon fonctionnement de l'entièreté de la colonie.

Concernant la quête de la nourriture, pour se rendre à une source profitable, les fourmis communiquent entre elles via des phéromones. Elles répondent aux concentrations locales des phéromones (Perna *et al.*, 2012). Celles-ci peuvent être de différentes formes, envoyant un message de forte ou de faible attractivité (Czaczkes *et al.*, 2015). En effet, selon les espèces, elles modulent l'approvisionnement conformément aux phéromones « pas d'entrée », de courte et longue durée et/ou des zones de marquage (Devigne et Detrain, 2002; Robinson *et al.*, 2005; Dussutour *et al.*, 2009b). C'est alors par rétroaction négative et positive qu'elles réussissent à choisir la meilleure source. Une meilleure source se traduit par celle qui répond le mieux aux besoins de la colonie (type et/ou qualité) et demandant le moins d'énergie (distance). Elle savent balancer leur niveau d'exploration et d'exploitation (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine et al., 2001; Czaczkes *et al.*, 2015).

Ce sont les processus d'auto-organisation qui sont à l'origine de l'intelligence collective. Étant un mécanisme d'amplification, il y a formation de structure à partir d'un état homogène (Deneubourg *et al.*, 1990; Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine et al., 2001). Au lieu d'être dirigé par un contrôle central ou externe, ces individus répondent aux informations locales de l'environnement et entre elles. C'est alors un système distribué et non centralisé (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine et al., 2001).

En termes d'approvisionnement, les fourmis font généralement un choix collectif plus marquant vers les sources de sucres versus les protéines. En revanche, lorsqu'elles sont soumises à deux sources identiques en sucres, elles ont tendance à sélectionner qu'une seule source (Beckers *et al.*, 1992; Portha *et al.*, 2002; Czaczkes *et al.*, 2015). Le recrutement engendre une petite différence entre la quantité de phéromones d'une source à l'autre. Par conséquent, cette différence de concentration de phéromones amplifie le recrutement vers la source ayant davantage de phéromones et ainsi de suite (Deneubourg et Goss, 1989; Beckers *et al.*, 1990; Perna *et al.*, 2012; Czaczkes *et al.*, 2015). Par contre, lorsqu'il est question de deux sources identiques de protéines, le choix est plutôt homogène (Portha *et al.*, 2002). Toutefois, il faut considérer la surestimation des capacités individuelles. Par le procédé d'amplification, certains choix individuels peuvent affecter le choix collectif (Dussutour *et al.*, 2005). Ainsi, leur prise de décision est influencée par des éléments internes, individuelle, collective et externe (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine *et al.*, 2001).

1.3.2 Les besoins nutritionnels

Comme toute communauté d'êtres vivants, le succès de la colonie dépend de la capacité d'obtenir suffisamment d'énergie pour toute action, par exemple, la prédation, la reproduction, le déplacement et la défense (Ricklefs et Miller, 2005). Les sources d'énergies nécessaires sont de nature et de quantité différentes en fonction de l'espèce, et même de l'individu. Plusieurs situations, telles que les saisons, engendrent des fluctuations connues de disponibilité de la nourriture, générant ainsi d'innombrables adaptations de la part des animaux pour contrebancer ce manque, soit par réserve, soit par changement physiologique et soit par changement morphologique (Simpson et Raubenheimer, 2012). Puisque l'environnement est dynamique, et que les variations de sources disponibles peuvent être grandes et imprévisibles, il arrive qu'il manque d'entrée d'énergie. Alors l'individu se doit de faire un compromis dans son allocation optimale, le rendant plus vulnérable, et ayant une plus faible valeur sélective (Ricklefs et Miller, 2005). Un obstacle chez les insectes sociaux est que seulement une partie de la colonie doit gérer l'approvisionnement pour les besoins de tous (Hölldobler et Wilson, 1990). Concernant les fourmis, le besoin en protéine et en sucre est différent entre elles; les

larves et la reine ont majoritairement besoin de protéines pour la construction des muscles et des tissus, alors que les ouvrières ont plutôt besoin de sucre pour le déplacement (Cassill et Tschinkel, 1999; Dussutour et Simpson, 2009). Chez les fourmis, ce sont les ouvrières, particulièrement les fourrageuses, qui partent à la recherche des besoins de toute la colonie malgré le fait que les protéines puissent être toxiques pour celles-ci (Dussutour et Simpson, 2009; Arganda *et al.*, 2017). Elles savent choisir la diète la mieux balancée en fonction des besoins de l'ensemble des individus qui composent la colonie (Arganda *et al.*, 2017). De base, plus la satiété (jeûne) est longue, davantage elles vont collectivement explorer et exploiter (Mailleux *et al.*, 2011; McGrannachan *et al.*, 2012). En effet, une variété de facteurs peut avoir des conséquences sur la façon dont ces insectes vont équilibrer leur stratégie alimentaire. Par exemple, il y a la variation individuelle, la grosseur de la foule, le substrat, le besoin alimentaire, le niveau de satiété, les effets de goulot, la luminosité et autres (Burchill et Moreau, 2016; Lanan, 2014; Sundstrom, 1993). Que ce soit au niveau collectif ou individuel, elles régulent la quantité de protéine et de sucre qui entrent dans le nid (Dussutour et Simpson, 2008a; Bazazi *et al.*, 2016).

La présence des larves permet une diminution de la mortalité de la colonie lorsque les diètes sont fortes en protéine et génère une meilleure régulation et balance les récoltes (Dussutour et Simpson, 2009). Les protéines sont formées de plusieurs acides aminés (AA), dont dix sont essentiels et dix sont non essentiels pour les fourmis. Les acides aminés sont essentiels (AAE) lorsqu'ils doivent être obligatoirement assimilés lors de l'alimentation puisqu'il ne peuvent pas être synthétisés par le corps (Wu *et al.*, 2013). La colonie de fourmis doit s'alimenter de chacun de ces AAE pour sa croissance. Cependant, certains apportent des bénéfices marquants et pour d'autres, ils peuvent être nocifs à certains niveaux (Betts et Russell, 2003; Arganda *et al.*, 2017). Par conséquent, en plus d'être précises entre le besoin en protéine et en sucre, les fourrageuses doivent s'assurer que la composition en AA soit optimale pour toute la colonie.

La géométrie nutritionnelle

La géométrie nutritionnelle est une nouvelle méthode pour analyser les effets de certains éléments nutritifs. Il s'agit de ne pas observer uniquement les besoins d'un seul nutriment, mais plutôt d'un ratio entre nutriments (principe de combinaison). Lorsqu'un aliment est mélangé avec un autre aliment, l'effet de la substance peut être amplifié ou diminué. L'effet sert de troisième variable, que ce soit de la durée de vie, de la formation des œufs ou du développement de la colonie (Simpson et Raubenheimer, 2012). La figure 1.4, adaptée de Simpson et al. (2017), présente ce concept de base. L'étoile représente une nutrition ciblée. Lorsqu'un organisme est soumis à de la nourriture 2, il peut soit prioriser une bonne quantité de protéine (source a), octroyant un excès de sucre, soit prioriser une bonne quantité de sucre (source b), générant un déficit de P. Lorsque l'organisme a le choix entre différentes diètes de ratio varié (source c + d), il peut les combiner pour obtenir au final une diète complète et équilibrée.

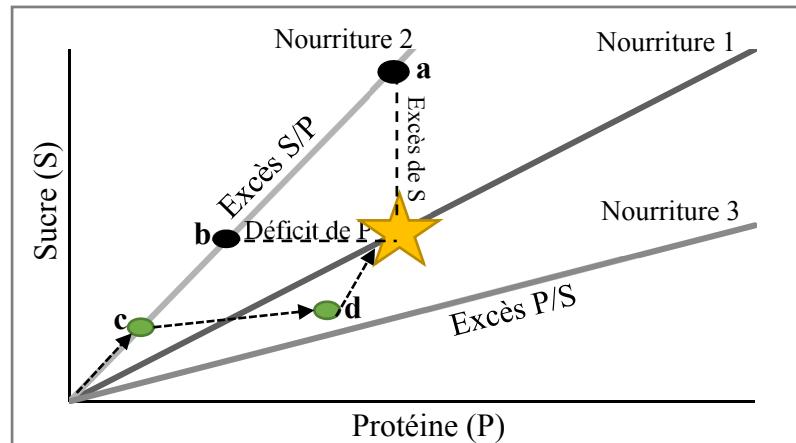


Figure 1.4 Concept de géométrie nutritionnelle
Adaptée de Simpson *et al.* 2017

Concernant les fourmis, il a été établi qu'elles savent choisir la diète la mieux équilibrée selon les besoins de la colonie entière (Dussutour et Simpson, 2009; Simpson et Raubenheimer, 2012; Arganda *et al.*, 2017; Simpson *et al.*, 2017). En termes de géométrie nutritionnelle, lorsque les fourrageuses sont soumises à un ratio riche en sucre, elles ont tendance à récolter un surplus de sucres pour subvenir au besoin en protéines. Par contre, lorsque la diète soumise

est forte en protéines versus en sucres, c'est l'excès de protéines qui cause de la mortalité, et non un manque de sucres. Or, la mortalité augmente avec la consommation d'acides aminés. Cependant, une faible exposition à une diète forte en sucres diminue les conséquences négatives. Aussi, du sucre accompagné d'acide aminé est préféré à une diète présentant que du sucre. C'est donc une question de ratio qui affecte la survie et non seulement un nutriment seul (Dussutour et Simpson, 2009; Dussutour et Sumpter, 2012; Arganda *et al.*, 2012; Arganda *et al.*, 2014; Bazazi *et al.*, 2016; Arganda *et al.*, 2017). Toutefois, les effets de chaque acide aminé ont aussi été sujets d'une étude par Arganda et al. (2017). Bien qu'essentiels, ils ont démontré que certains acides aminés peuvent être dangereux à faible dose.

1.3.3 Les interactions entre les fourmis et l'environnement

Les relations qu'entretiennent les fourmis avec l'environnement sont variées. Les fourmis font partie de l'environnement et conservent plusieurs interactions en symbiose avec d'autres espèces vivantes. À titre d'exemple, des plantes qui forment un habitat parfait pour des fourmis qui vont la protéger des prédateurs (Hölldobler et Wilson, 1990). De plus, elles sont les premières espèces animales connues à cultiver et faire de l'élevage. Les espèces du genre *Atta* sont reconnues pour cultiver le champignon en travaillant sans relâche pour la croissance de ce champignon dont elles se nourrissent (Hölldobler et Wilson, 1990; Lach *et al.*, 2010). Aussi, multiples espèces de fourmis font de l'élevage de pucerons sur des plantes afin d'obtenir le miellat (Hölldobler et Wilson, 1990; Detrain et Prieur, 2014).

En raison des environnements variés, de nombreuses espèces de fourmis favorisent la capacité de flexibilité. Cette capacité est effectivement importante pour profiter des meilleures conditions qu'offre un milieu. Les fourmis modulent leurs réponses face à un environnement dynamique. Une variété de stratégies a été établie (Sundstrom, 1993; Heller et Gordon, 2006; Dussutour *et al.*, 2009; Dussutour et Nicolis, 2013; Flanagan *et al.*, 2013; Lanan, 2014). Des expérimentations en laboratoire ont confirmé leur capacité à résoudre des problèmes complexes (Reid *et al.*, 2011). Notamment, elles ont la capacité de sélectionner collectivement la source la plus proche et une source de meilleure qualité (Beckers *et al.*, 1993; Devigne et Detrain, 2006; Czaczkes *et al.*, 2015). Cependant, lorsque la source de meilleure qualité

apparaît après que les fourmis aient déjà commencé à fortement exploiter l'autre source, certaines espèces restent dans la source de moins bonne qualité (Beckers *et al.*, 1990; Czaczkes *et al.*, 2015). Certaines espèces de fourmis fonctionnent à l'aide de différentes phéromones (Reid *et al.*, 2011; Latty et Beekman, 2013; Latty *et al.*, 2017). Celles-ci leurs permettent de changer collectivement la source à exploiter si l'une est plus intéressante d'après les besoins à combler. Elles ont tendance à utiliser différentes stratégies lorsqu'il est question de sources éphémères ou permanentes (Sundstrom, 1993). D'ailleurs, la température influence leur niveau d'exploration; plus il fait froid, moins elles partent en quête alimentaire, davantage il y a de la chaleur, plus les fourmis sont rapides (McGrannachan *et al.*, 2012). Or, en plus de l'augmentation de la vitesse, c'est surtout leur capacité à découvrir de nouvelles sources et l'exploitation de manière efficiente qui engendre une meilleure efficacité d'exploitation (McGrannachan *et al.*, 2012). De plus, elles sont généralement connues pour sélectionner des chemins faciles vers une source (Grüter *et al.*, 2015).

Étant présentes sur terre depuis le crétacé, elles sont reconnues pour leur résilience et robustesse face aux perturbations extérieures (Hölldobler et Wilson, 1990). La robustesse est la capacité d'être fonctionnelle et de s'accorder une stabilité tandis que la résilience est l'habileté de survivre suite à des perturbations (Walls et Paquin, 2015). D'ailleurs, les fourmis peuvent également montrer d'autres caractéristiques, comme un niveau d'efficacité, d'efficience et de précision envers les besoins de la colonie (Latty *et al.*, 2011; Reid *et al.*, 2011; Detrain et Prieur, 2014; Bottinelli *et al.*, 2015). L'efficience considère le rapport de production par rapport à l'entrée (Aquaportail, 2015). Certaines études ont démontré que diverses espèces de fourmis ont tendance à créer plusieurs chemins entre elles. Elles forment alors un réseau de plusieurs branchements en début de développement. Par la suite, lorsque la colonie atteint un seuil d'individus, elles forment des réseaux plus efficient et moins robuste avec moins de branchement (Bottinelli *et al.*, 2015). De ce fait, au début, la croissance peut avantager la robustesse pour ensuite encourager l'efficience.

1.3.4 Analogie entre colonie de fourmis et communauté humaine

Il existe plusieurs recherches qui s'appuient sur diverses propriétés comportementales de la fourmi. Sur certains points, l'organisation sociale de l'humain ressemble à celui des fourmis, alors que ce dernier existe il y a des millions d'années (Keller et Gordon, 2009). Par ailleurs, plusieurs des études présentent une ouverture vers une application possible à un système anthropique (Bogatyreva, 2002; Ratnieks, 2008). Dans ce contexte d'analogie, certains comportements offrent un intérêt pour les systèmes anthropiques, tels que la non-centralité, l'autofonctionnalité, le polycentrisme, la robustesse (tableau 1.1).

Tableau 1.1 Description des comportements des fourmis

| Comportement | | |
|-------------------------|---|---|
| Termes | Description/Définition | Avantages |
| Auto-organisation | Mécanisme d'amplification et de rétroaction négative sans contrôle central (Deneubourg <i>et al.</i> , 1990; Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine <i>et al.</i> , 2001). | Le comportement de quête alimentaire se forme en fonction de l'auto-organisation de la colonie de fourmis. Alors, il faut avoir ses rétroactions négatives et positives pour former un choix collectif |
| Intelligence collective | La résolution des problèmes complexes de façon collective (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine <i>et al.</i> , 2001). | L'intelligence individuelle est plutôt simple, et c'est collectivement que le système prend forme. Il faut qu'il y ait une coordination de manière indirecte. |
| Non centralisé | Chaque action des entités simples répond seulement aux informations locales pour atteindre un objectif. Aucun contrôle central ou externe et absence de hiérarchie (Hölldobler et Wilson, 1990; Camazine <i>et al.</i> , 2001). | C'est selon les conditions de l'environnement local que les réponses sont analysées. L'expérimentation effectuée analyse le comportement de ces entités simples. Ainsi, il faut que les décisions partent d'elles conformément des perturbations présentes. |
| Choix collectifs | Récolter collectivement une source plutôt qu'une autre. | Permet d'évaluer si leur choix collectif répond réellement à leur besoin lorsque les sources diffèrent de peu. |
| Recrutement de masse | Déposer une phéromone sur le sol pour recruter plusieurs fourmis vers la source trouvée (Hölldobler et Wilson, 1990). | Sans recrutement de masse, l'analyse des expérimentations n'est pas utile. |
| Flexible | Être capable de modifier son comportement selon les conditions spatio-temporelles variables (Deneubourg <i>et al.</i> , 1990). | Certaines espèces restent dans des situations suboptimales. Il qu'elles soient capables de modifier leur comportement pour répondre aux variations environnementales et de leur besoin. |
| Efficiente | C'est la capacité de rendement. C'est être efficace à coût moindre (McGrannachan <i>et al.</i> , 2012). | Dans le modèle, il faut qu'il soit construit à un moindre coût. |

Le tableau 1.2 présente les caractéristiques attendues d'une colonie de fourmis ainsi que les raisons associées.

Tableau 1.2 Description de l'écologie et des caractéristiques physiques des fourmis

| Écologie et caractéristiques physiques | | |
|--|--|---|
| Termes | Description | Raisons |
| Présente dans les climats tempérés | Présente un cycle selon les saisons. | Puisque le modèle est sous un climat tempéré, il est préférable que la fourmi présente des adaptations face à des cycles de température variable. |
| Polygyne | Avoir plusieurs reines dans une même colonie. | La récolte de fourmis polygyne augmente la facilité de trouver des reines. De cette manière, ayant des reines, il n'est pas nécessaire de toujours récolter de nouvelles fourmis pour avoir des larves. |
| Généraliste en nutrition | Avoir un besoin en nutriment varié. | Puisque des carences nutritionnelles font partie de l'étude, il faut que la colonie de fourmis ait besoin de plusieurs types de sucres et de protéines. |
| Grande taille de la colonie | Une colonie doit pouvoir avoir plus de 1000 ouvrières. | Il n'est pas intéressant d'analyser un comportement collectif d'une colonie présentant seulement 50 individus. Il faut qu'il y ait des résultats en 1h d'expérience. |

La fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*) fait partie des espèces couramment étudiées en laboratoire. Elle connaît un intérêt particulier auprès des myrmécologues et son étude vise soit des connaissances fondamentales (Deneubourg *et al.*, 1990; Abril *et al.*, 2010; Perna *et al.*, 2012), sa dynamique de croissance et d'expansion (Keller et Suzzoni, 1989; Giraud *et al.*, 2002; Inoue *et al.*, 2015), les conséquences associées à sa présence (Harris, 2002) ou dans le cadre d'applications visant à diminuer sa prolifération (Harris, 2002). Elle est utilisée pour divers sujets en recherche, que ce soit pour sa flexibilité face à un environnement dynamique (Heller et Gordon, 2006; Flanagan *et al.*, 2013; Latty *et al.*, 2017), sa nutrition (Grover *et al.*, 2007; Dussutour et Simpson, 2009; Arganda *et al.*, 2012; Arganda *et al.*, 2014; Arganda *et al.*, 2017) ou ses capacités envahissantes (Holway, 1999; McGrannachan et Lester, 2012).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce deuxième chapitre présente l'approche méthodologique suivie dans le cadre de la présente recherche. Une approche consiste à visualiser l'évolution d'une ville en fonction de son milieu par des lois naturelles. Suite à la description des enjeux mondiaux et de la complexité interne de la ville, le sujet de ce mémoire est orienté vers le niveau intermédiaire. C'est-à-dire, l'analyse des interactions naturelles entre les besoins d'une communauté d'êtres vivants et les ressources disponibles en prenant pour exemple une colonie de fourmis. Il y a trois phases pour atteindre chacun des sous-objectifs spécifiques fixés. La première phase s'intéresse au comportement des fourmis soumises à différentes diètes (besoins ou ressources modifiés) à l'aide d'un banc d'essai expérimental. La deuxième phase correspond au développement du modèle dynamique de la collecte de nourriture par les fourmis en fonction des différents scénarios testés sur le banc d'essai. La dernière phase vise à proposer une transposition du modèle de la colonie de fourmis à un système anthropique (communauté humaine) simplifié.

2.1 Dynamique de l'approvisionnement d'une colonie de fourmis

L'analyse du comportement des ouvrières face à différentes conditions internes (besoins) et externes (ressources) vise à mesurer leur capacité à adapter leur stratégie d'approvisionnement pour assurer le développement de la colonie. Pour réaliser les essais expérimentaux, cette section présente plus spécifiquement les dispositions de l'élevage, le matériel et le plan des expériences réalisées pour les essais associés soit à la variation du besoin soit, à la variation de la disponibilité.

2.1.1 Matériel et méthodologie

Une série de matériels et d’actions est présente afin de conserver des organismes vivants dans un bon état. De ce fait, la sélection de la fourmi d’Argentine pour l’étude réside qu’elle répond aux critères précédemment exprimés et rencontre peu de difficultés en laboratoire. Une fiche descriptive de cette espèce est présentée en Annexe I. De plus, il est proscrit de choisir une espèce rare, vulnérable ou menacée. Pour commencer, il faut que ces fourmis soient récoltées et conditionnées dans un environnement neutre qui répond à leurs besoins. Cette partie exprime les conditions relatives à l’élevage de ces fourmis et le matériel nécessaire à la méthodologie.

Matériel

L’élevage de fourmis pour les besoins des essais est composé de 20 colonies de fourmis d’Argentine de 800 à 1000 individus. Chacune des colonies contient six reines et du couvain. En dehors des périodes d’expérimentation, elles sont nourries *ab libdium* (sans limite) avec une solution Bhatkar modifiée (Dussutour et Simpson., 2008b). Tous les acides aminés essentiels (AAE) sont présents dans leur alimentation de base (méthionine, histidine, valine, arginine, thréonine, tryptophane, isoleucine, leucine, phénylalanine et la lysine) accompagnée d’autres éléments (quantité nécessaire en vitamines, acide ascorbique, inositol et choline chloride). Les facteurs environnementaux demeurent contrôlés, avec une période de « lumière : sombre » programmée de « 14h :10h » à une température de 23°C. Chaque colonie a accès à trois éprouvettes, avec un coton humide, protégées de la lumière, le tout dans une bassine entourée de fluons permettant d’éviter les fuites (Dussutour et Simpson., 2008b).

Montage expérimental

Pour garantir un environnement contrôlé et constant, le dispositif pour les expériences est entouré de murs avec la présence d’un drap blanc et la luminosité est contrôlée. La configuration du banc d’essai pour mesurer le comportement des ouvrières en quête de nourriture est présentée à la figure 2.1.

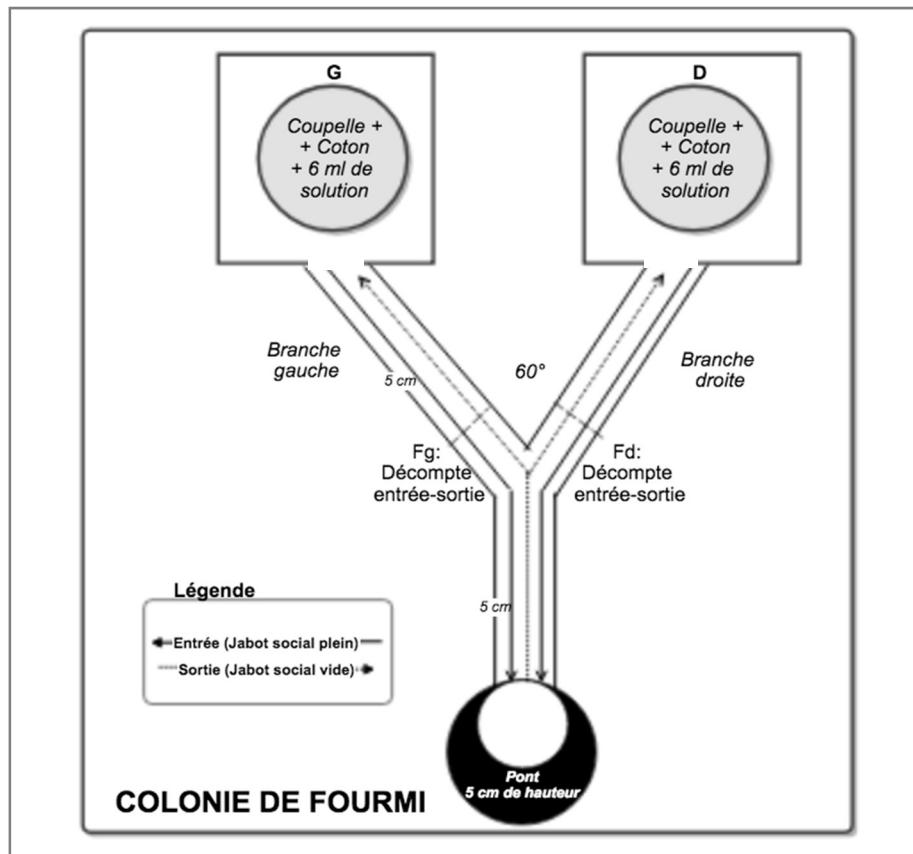


Figure 2.1 Disposition du pont et des branches lors de l'enregistrement

La colonie de fourmis a accès au corridor en Y pour s'approvisionner à une des deux solutions de nourriture (6 mL) G ou D. Le pont Y (angle de 60°) est composé de trois branches d'une longueur de 5 cm chacune. Les flux d'entrée et de sortie sont enregistrés aux limites Fg et Fd pour un pas de temps de 60 secondes. Les essais sont filmés afin de procéder à un comptage à l'ordinateur. Ce comptage du flux est calculé manuellement à l'aide du logiciel AntEthoc.

2.1.2 Plans des expériences

Toutes les expériences sont réalisées avec une colonie comprenant un nombre d'ouvrières similaire de 900 +/- 100 et de six reines. Par ailleurs, chaque expérience est réalisée avec chacune de 20 colonies disponibles (réplicas) et la mesure du comportement (choix collectif de la source de nourriture) est enregistrée pendant une heure.

Trois séries d'expériences ont été réalisées pour mesurer le comportement collectif de collecte de nourriture soit : expériences de référence (E); variation du besoin (B); variation de la disponibilité des ressources (D). Chaque expérience comprend un nombre d'essais variant d'un à trois et chaque essai comporte des conditions particulières de : (i) période de carence (de 0 à 10 jours) avec la nature de la carence; (ii) période de jeûne (de 0 à 5 jours) et (iii) de formulation des deux sources de nourriture disponibles lors de l'expérimentation. Le tableau 2.1 résume chaque essai des différentes expériences réalisées.

Tableau 2.1 Synthèse des expérimentations de comportement de quête alimentaire des fourmis

| Expérience | Essai | Carence | Jeûne | Expérimentation (1h) | |
|---|----------|---|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | Source 1 | Source 2 |
| Variation du besoin : Carence nutritionnelle dans la colonie | | | | | |
| B1 | 1 | 10 jours (≠ Thréonine + Arginine) | 5 jours | Thréonine, Arginine, Sucrose | Histidine, Valine, Sucrose |
| | 2 | 10 jours (≠ Histidine + Valine) | 5 jours | Histidine, Valine, Sucrose | Thréonine, Arginine, Sucrose |
| B2 | 1 | 10 jours (≠ Méthionine + Thréonine) | 5 jours | Méthionine, Thréonine, Sucrose | Tryptophane, Phénylalanine, Sucrose |
| | 2 | 10 jours (≠ Tryptophane + Phénylalanine) | 5 jours | Tryptophane, Phénylalanine, Sucrose | Méthionine, Thréonine, Sucrose |
| B3 | 1 | 6 jours (≠ Sucrose) | Aucun | Sucrose | 10 AAE |
| | 2 | 6 jours (≠ 10 AAE) | Aucun | 10 AAE | Sucrose |
| | 3 | Aucun | Aucun | 10 AAE | Sucrose |
| Variation de la disponibilité : Instabilité temporelle des gisements | | | | | |
| D1 | 1 | Aucun | 5 jours | Sucrose 2 % | Sucrose 20 % |
| D2 | 1 | Aucun | 5 jours | Sucrose 2 % | Sucrose 20 % |
| D3 | 1 | Aucun | 5 jours | Sucrose 2 % | Sucrose 2 % |
| D4 | 1 | Aucun | 5 jours | Sucrose 2 % | Sucrose 20 % |
| Comportement d'exploration de base | | | | | |
| E1 | 1 | Aucun | 5 jours | Sucrose 2 % | Sucrose 2 % |
| E2 | 1 | Aucun | 5 jours | Sucrose 20 % | Sucrose 20 % |

Pour les essais où une période de carence s'applique, les fourmis ont accès à tous les aliments nécessaires à leur développement hormis les éléments spécifiquement indiqués au tableau 2.1. Pour les périodes de jeûne, seulement de l'eau est disponible. Les sources 1 et 2 sont

disponibles lors de l'analyse du comportement de quête alimentaire aux extrémités du dispositif en Y pendant 1 heure. La composition des solutions de carences pour les expériences B et de sources lors des essais est détaillée dans le tableau 2.2. Les masses de chaque composant sont versées dans une solution d'eau à 500 ml.

Tableau 2.2 Composition des solutions pour les carences et les sources des expériences B

| | | Composition de la solution de carence | | | Composition des solutions des sources à l'étude | |
|-----------|----------|---|--------------|--|--|--|
| Exp | Essai | AAE (1g de chaque) | Sucre | Autres | Source 1 | Source 2 |
| B1 | 1 | tryptophane, méthionine, histidine, valine, lysine, leucine, phénylalanine, isoleucine | 100g Glucose | 1g Vitamine 1g Choline 1g Chloride 1g Inositol 1g Acide ascorbique | 100g Sucrose 1g thréonine 1g arginine | 100g Sucrose 1g histidine 1g valine |
| | 2 | tryptophane, méthionine, thréonine, arginine, lysine, leucine, phénylalanine, isoleucine | 100g Glucose | | 100g Sucrose 1g histidine 1g valine | 100g Sucrose 1g thréonine 1g arginine |
| B2 | 1 | tryptophane, histidine, valine, arginine, lysine, leucine, phénylalanine, isoleucine | 100g Glucose | | 100g Sucrose 1g méthionine 1g thréonine | 100g Sucrose 1g phénylalanine 1g tryptophane |
| | 2 | méthionine, histidine, valine, arginine, lysine, leucine, thréonine, isoleucine | 100g Glucose | | 100g Sucrose 1g phénylalanine 1g tryptophane | 100g Sucrose 1g méthionine 1g thréonine |
| B3 | 1 | méthionine, valine, thréonine, histidine, lysine, isoleucine, leucine, arginine, tryptophane, phénylalanine | Aucun | | 100g Sucrose | 1g de chaque AAE |
| | 2 | Aucun | 100g Glucose | | 1g de chaque AAE | 100g Sucrose |

Variation du besoin (condition interne)

La première perturbation est dans le besoin de la colonie. La mesure du comportement se situe à travers le choix collectif des fourrageuses. De cette manière, il y a évaluation de leur capacité à répondre à leur besoin selon une carence émise. L'Annexe III présente un schéma du choix collectif lors de la quête alimentaire en fonction des conditions internes. Trois expériences sont

réalisées afin d'analyser le niveau des fourmis à répondre à des besoins de spécificité différente. Aussi, la carence est toujours inversée pour s'assurer qu'il n'y ait pas de préférence pour l'un des acides aminés. Donc, il y a deux essais par expérience. De manière à examiner le niveau de réponse des ouvrières fourrageuse face à un besoin précis exprimé seulement par les larves, deux expériences (B1 et B2) d'une carence à deux AAE sont réalisées. Concernant l'expérience B3, les fourmis ont été soumises à trois essais afin d'obtenir plus d'informations sur le comportement d'approvisionnement des fourmis face aux besoins en sucres versus protéines. Afin d'analyser statistiquement les résultats, un test de Kruskal-Wallis est appliqué pour chaque essai à l'aide du logiciel R.

Variation de la disponibilité (condition externe)

Relativement à la variation de la disponibilité de la ressource, quatre expériences ont été menées pour mettre en avant la flexibilité de réponse des fourmis face à cet environnement dynamique. L'Annexe III présente le schéma du déplacement et des choix collectifs par les fourrageuses. L'expérience D1 permet l'évaluation du comportement lorsque les fourmis ont le choix entre une source de meilleure et une source de moins bonne qualité. L'expérience D2 permet de confirmer la flexibilité de réponse de *Linepithema humile* face à l'instabilité temporelle. Pour les expériences D3 et D4, la source 2 est instable à deux périodes durant l'expérimentation. Concernant les expériences D2, D3 et D4 lorsque la source n'est pas présente, les fourmis peuvent continuer à visiter son emplacement, mais reviennent sans nourriture. Par la suite, pour compléter l'information, deux expériences statiques E1 et E2, ont été faites au préalable. De cette manière, les comportements d'exploitations face à des sources identiques, soit de meilleure ou de moins bonne qualité, peuvent être analysés.

2.1.3 Paramètres de mesure du comportement collectif

La mesure principale associée à chacun des essais résulte du flux de fourmis empruntant l'une ou l'autre des deux branches pour se rendre aux sources de nourritures et ainsi évaluer le choix préférentiel en fonction d'un besoin spécifique (expériences B) ou d'une disponibilité en

éléments nutritifs (sucre) (expériences D). La mesure du flux de fourmis est enregistrée toutes les minutes pendant une heure permettant d'exprimer l'évolution du comportement en fonction de la collecte de nourriture.

L'analyse de l'expérience (B) s'inscrit au niveau de leurs capacités à sélectionner la source en carence, et non leur comportement temporel durant l'heure d'enregistrement. Dans le cas des expériences (D), certains essais ont porté sur le comportement collectif en considérant une indisponibilité de la ressource en cours d'expérience. Le niveau d'exploitation dans le temps est présenté aux expériences (E). Alors, le flux pour chaque minute est à examiner. Le tableau 2.3 présente les spécificités de ces essais où le (X) indique la présence de ressource et le (■) indique son absence.

Tableau 2.3 Détail de la disponibilité de la source pendant l'heure d'enregistrement

| 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | Temps (minutes) |
|--|----|----|----|----|----|-------------------------------|
| Variation de la disponibilité : Instabilité temporelle | | | | | | |
| Essai D1 | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 20 % de concentration |
| Essai D2 | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| ■ | X | X | X | X | X | Sucrose 20 % de concentration |
| Essai D3 | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| ■ | X | X | ■ | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| Essai D4 | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| ■ | X | X | ■ | X | X | Sucrose 20 % de concentration |
| Comportement d'exploration de base | | | | | | |
| Essai E1 | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 2 % de concentration |
| Essai E2 | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 20 % de concentration |
| X | X | X | X | X | X | Sucrose 20 % de concentration |
| Variation du besoin: Carence nutritionnelle dans la colonie | | | | | | |
| Pour tous les essais B | | | | | | |
| X | X | X | X | X | X | Source en carence |
| X | X | X | X | X | X | Source pas en carence |

Le deuxième paramètre de mesure est le volume des différentes ressources collectées au cours des essais. Ce paramètre permet d'analyser la récolte versus le coût du déplacement. À l'aide de cet indicateur secondaire d'efficience, il est possible d'évaluer une de leur capacité : leur efficience. Elle est calculée par la quantité d'unités de volume (uV) de la source estimée selon le déplacement en mètre. Autrement dit, c'est l'addition de chaque concentration de la source en sucres récoltée sur la distance. N'ayant pas la concentration exacte d'exploitation de la source par les fourrageuses, cette concentration est estimée et décrite comme étant une unité de volume (uV). Cette unité de volume est calculée et ajoutée dès qu'une fourrageuse explore la source. Le trajet est calculé au moyen de l'addition de la distance pour une fourmi de se rendre à une source en passant sur le pont Y, jusqu'à la source et revenir au nid. Ceci permet d'obtenir le niveau d'adaptation des fourmis face au coût du déplacement versus l'entrée des sources.

2.2 Élaboration d'un modèle de quête alimentaire d'une colonie de fourmis

La deuxième phase de l'étude est l'élaboration du modèle dynamique du comportement de quête alimentaire des fourmis face aux perturbations soit du besoin, soit de la disponibilité de la ressource.

La colonie de fourmis ne croît pas dans les 60 pas de temps d'une minute des expérimentations. La croissance de la colonie est visible seulement dans une perspective de temps plus long. Néanmoins, le comportement actuel assure le maintien et le développement en fonction des ressources présentes en vue d'une éventuelle croissance. À l'aide des données expérimentales de la première phase, un modèle à petite échelle d'une colonie de fourmis est construit dans Anylogic. La figure 2.2 présente le modèle simplifié de gestion d'approvisionnement des fourmis face à deux sources. L'Annexe III soutient cette figure en présentant les flux du sucre et des protéines dans le système.

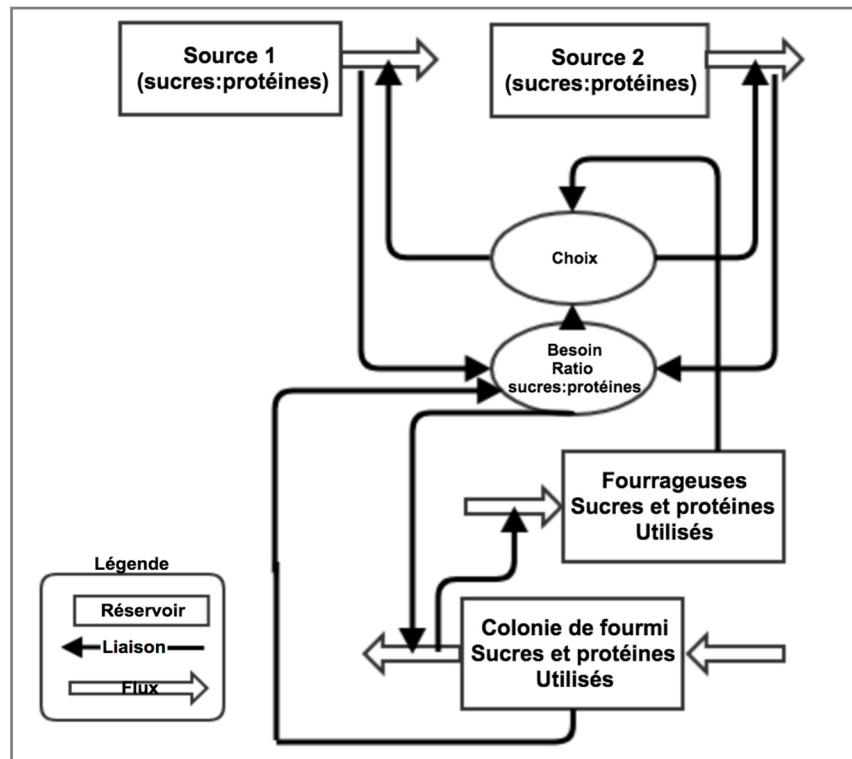


Figure 2.2 Modèle simplifié de la gestion d'approvisionnement dans le système dynamique de la colonie

La structure du modèle simplifié est composée de quatre réservoirs; la colonie de fourmis présente dans la fourmilière (ouvrières pas en quête alimentaire, larves et reines), les fourrageuses (ouvrières en quête alimentaire), source 1 et source 2. Les flux accompagnent les réservoirs selon leur direction; ils expriment soit une entrée ou une sortie. Concernant les sources, ils sont seulement accompagnés de sortie puisqu'il n'y a pas d'ajout de ressources durant les expérimentations. La valeur initiale est la même pour toutes. Le flux d'entrée vers la colonie de fourmis sert à simuler la croissance de la colonie pour une portée plus grande de temps. Il y a deux paramètres dynamiques, le besoin et le choix qui influencent la quantité récoltée de chaque source. D'une part, le besoin (ratio sucre : protéines) est exprimé en fonction des sources présentes et de la quantité de fourmis dans la colonie. Ainsi, il évolue d'après l'état et la nature des sources et le développement de la colonie. La capacité de varier le ratio est ajustée depuis les données sur la flexibilité de réponses des fourmis. D'autre part, la valeur du choix (source 1 : source 2) dépend la quantité de fourrageuses et du besoin.

Lorsque la simulation du modèle est d'une durée plus longue que les 60 pas de temps d'une minute, d'autres variables dynamiques affectent l'évolution de la colonie. En effet, en plus de cette représentation du modèle, il y a un facteur de nécessité de développement qui oscille en fonction de l'état des ressources entreposées et le coût de déplacement. Ce facteur démontre la capacité de la colonie de croître selon l'état de l'environnement.

Des scénarios sont simulés dans Anylogic afin d'obtenir un modèle qui reflète les comportements obtenus en laboratoire. Ils diffèrent soit en la valeur des sources (fort/faible qualité) et de disponibilité dans le temps (stable/instable). Pour les données lors de la perturbation du besoin, ils sont intégrés dans la modélisation par la capacité d'exploitation vers les sources demandées. Ces scénarios sont détaillés au tableau 2.4.

Tableau 2.4 Scénarios évalués dans Anylogic

| Scénarios | | Expérimentation | Source 1 | Source 2 |
|---|---|-----------------|----------------|-----------------------------|
| Aucune perturbation | 1 | E1 | Faible qualité | Faible qualité |
| | 2 | E2 | Forte qualité | Forte qualité |
| | 3 | D1 | Faible qualité | Forte qualité |
| Perturbation dans la disponibilité des ressources | 4 | D2 | Faible qualité | Forte qualité semi-instable |
| | 5 | D3 | Faible qualité | Faible qualité instable |
| | 6 | D4 | Faible qualité | Forte qualité instable |

2.2.1 Conditions associées à l'analogie entre la ville et la colonie de fourmis

L'analogie entre la ville et la colonie de fourmis est sous certaines conditions. Diverses limites sont à définir pour ce projet: le cadre, le type de ressource et la variation du milieu. La définition de la ville est réduite au minimum de manière à concentrer le sujet vers les interactions comprises dans l'échange de l'énergie et de la matière plutôt que dans la complexité du modèle. Concernant le cadre, la frontière du système urbain prend en compte le périmètre de la ville et son environnement immédiat correspondant à la zone potentielle d'approvisionnement (figure 2.3). Tout ce qui concerne le niveau global, tel que les échanges

internationaux, et le niveau interne, tel que l'aménagement urbain, sont deux études extérieures au système présenté ici.

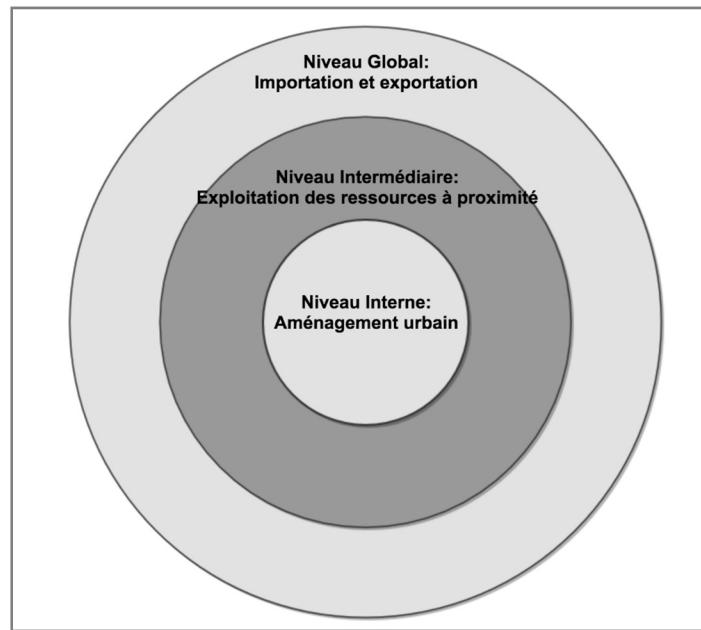


Figure 2.3 Niveau de l'étude

De plus, uniquement les paramètres naturels constants et dynamiques les plus fondamentaux sont présentés dans l'interaction entre une ville et le milieu naturel. Tout ce qui a trait à la politique ou à l'économie n'est pas intégré dans le modèle. En effet, seules les interactions d'approvisionnement entre le centre et le milieu sont considérées. Les décisions humaines concernant la croissance se prendront qu'en fonction de l'état de l'environnement.

Quant à la ressource utilisée pour la modélisation, c'est le potentiel d'énergie et de matière disponibles à travers la biomasse du bois. Enfin, ayant des climats de types différents sur la planète, c'est dans un climat tempéré avec des saisons qui est présenté pour la simulation. Effectivement, les besoins varient en fonction des saisons. Même la disponibilité des ressources varie naturellement de cette façon cyclique (Legault, 2007).

2.3 Élaboration d'un modèle d'approvisionnement d'une ville

Dans cette troisième phase, les étapes pour atteindre une analogie du comportement de la fourmi avec une ville sont décrites. Comme pour la fourmi, une façon de représenter le développement de la ville est par l'état de la source dans le système (Annexe III). La figure 2.4 démontre le même schéma que les fourmis avec des réservoirs propres à la ville. En effet, pareille des fourmis, l'Homme exploite l'énergie et la matière dans son environnement. Le modèle montre le choix entre deux essences d'arbres ayant de l'énergie et de la matière à différentes proportions.

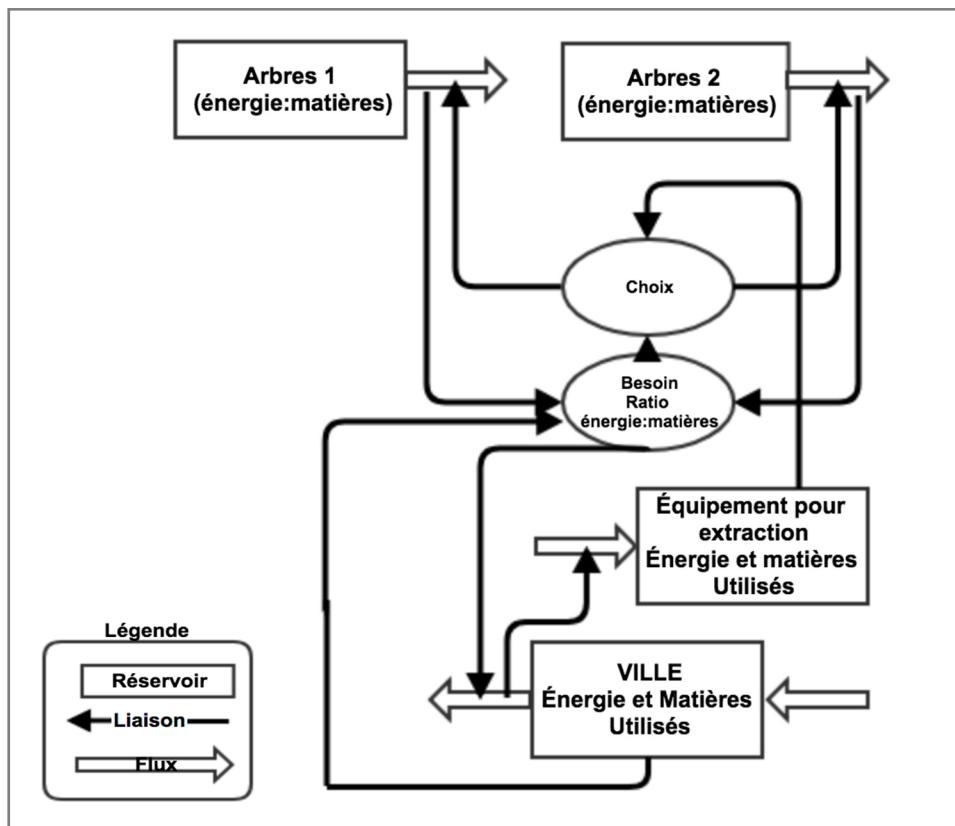


Figure 2.4 Modèle simplifié de la gestion d'approvisionnement dans le système dynamique de la ville

La consommation de la ressource dans l'environnement se fait par l'exploitation, par exemple, de la biomasse des arbres. Elle est transformée puis entreposée. Une fois transformée, la ressource peut soit être utilisée pour de nouvelles constructions, le maintien, les déplacements

ou encore l'entretien de l'entreposage. C'est par l'utilisation de l'énergie et de la matière que les besoins de la ville pour son développement sont satisfaits. Ce développement amplifie à son tour le besoin. La construction du modèle est réalisée dans le logiciel Anylogic. Les figures qui représentent l'entrée des valeurs, leur cheminement dans le procédé de la simulation et les variables résultantes sont présentés à l'Annexe IV.

2.3.1 Analogie de l'organisation de la colonie de fourmis avec une ville

L'analogie entre la ville et une colonie de fourmis est étudiée selon des similitudes dans l'organisation du système en gestion d'approvisionnement. Le tableau 2.5 présente ces similitudes existantes entre les composants qui simulent la progression de leur organisation respective. Une ville est composée de constructions qui nécessitent majoritairement de l'énergie pour son maintien et de la matière afin d'assurer son développement. Comme pour une colonie de fourmis, elle est composée d'ouvrières qui nécessitent du sucre pour son maintien et des protéines pour le développement des larves.

Tableau 2.5 Analogie simplifiée entre une colonie de fourmis et une ville

| Colonie de fourmis | Ville |
|---|--------------------------------|
| Sucres | Énergie |
| Protéines | Matières |
| Une fourrageuse (classe d'ouvrières qui s'occupe de la quête alimentaire) | Un équipement (l'exploitation) |
| Une fourmi adulte (toutes ouvrières, sauf les fourrageuses) | Une construction |
| Développement des larves (plusieurs stades larvaires avant de se transformer en ouvrière) | En construction |
| Colonne (toutes les fourmis) | Ville |
| Stockage abdomen (jabot social) | Stockage entrepôt |
| Une goutte de ressource | Un arbre |

2.3.2 Simulation des scénarios

Quatre scénarios sont simulés afin de vérifier l'applicabilité du modèle de gestion d'approvisionnement de la colonie de fourmis avec celle de la ville. Le tableau 2.6 résume les conditions associées aux différents scénarios. Dans l'intention d'évaluer le modèle de croissance de même façon que les fourmis, les perturbations de besoins et de disponibilités sont intégrées dans le scénario. Ces conditions sont provoquées par les saisons. La variation des conditions internes se fait de manière cyclique au sein de la demande d'énergie et de matière dans le maintien de la ville. En effet, en hiver, la demande est plus importante. La variation des conditions externes se réalise au niveau du renouvellement d'une essence d'arbre. Dans la même perspective, durant l'hiver, la croissance des arbres est plus lente. Des analyses sur le développement de la ville et de l'approvisionnement sont traitées.

Tableau 2.6 Conditions associées aux différents scénarios

| Scénarios | Ville | Fourmis |
|---|---|--|
| Aucune perturbation | Les saisons n'affectent pas le modèle. | Les fourmis n'ont pas de carence et les sources sont disponibles tout au long de l'enregistrement. (E1, E2, et D1) |
| Perturbation dans le besoin | Les saisons affectent le besoin en énergie et en matière. Le besoin pour le maintien augmente en hiver. | Une carence en certains acides aminés (B1, B2 et B3-essai 2) ou sucres (B3-essai 1) est soumise à chaque colonie de fourmis. |
| | *À chaque 12 pas de temps, le besoin revient à la valeur initiale. | *Le besoin est stable pour 60 pas de temps. |
| Perturbation dans la disponibilité des ressources | Les saisons affectent le taux de renouvellement d'une essence d'arbre. Le taux de renouvellement de l'essence 1 est très faible en hiver. | Lors de l'enregistrement de 60 pas de temps, une source est volontairement retirée pendant les 10 premières minutes et entre 30 et 40 minutes. (D2, D3 et D4) |
| | *À chaque 12 pas de temps, le taux de renouvellement revient à la valeur initiale. | *Au pas de temps 0 à 10 et 30 à 40, la source instable n'est pas présente. |
| Doubles perturbations | Les saisons affectent le besoin et la disponibilité. | Pas présent dans les expérimentations. |

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats associés aux trois sous-objectifs du projet sous trois parties distinctes. La première phase aborde l'analyse du comportement des fourmis. La deuxième phase présente le modèle de quête alimentaire d'une colonie de fourmis. Ce modèle est obtenu suite à l'analyse des résultats des expérimentations sur le comportement de quête alimentaire face à la variation du besoin et de la disponibilité de la source. La troisième phase présente les résultats des simulations de croissance de la ville, à court terme, sous ces mêmes perturbations.

3.1 Dynamique de l'approvisionnement de *Linepithema humile*

Dans cette première partie, les résultats des différents bancs d'essais effectués sont présentés. Une série de figures présente les résultats sur le choix collectif de *Linepithema humile*. Tout d'abord, ce sont les figures des résultats des essais de la variation du besoin qui sont présentés, suivi des résultats des essais de la variation de la disponibilité et finalement des indicateurs de leur comportement d'exploration et d'efficience.

3.1.1 Variation du besoin (condition interne)

La variation du besoin affiche une condition interne de la colonie. L'expérience B1 et B2 concernent une carence de deux acides aminés et l'expérience 3 concerne une carence en sucres ou en protéines. La figure 3.1 présente les résultats des essais réalisés (20 réplicas chacun) pour les trois expériences B1, B2 et B3 sous forme de boîte à moustache. Chaque diagramme correspond à la fraction des ouvrières ayant choisi l'une des deux sources de nourriture pour chaque minute (60 minutes) au cours de l'expérimentation qui a duré une heure. Les boîtes à moustaches blanches montrent l'étendue des résultats de proportion du flux aller-retour vers la source en carence. Celles de couleur noire sont les sources non en carence. Ces résultats de proportion expriment le flux aller-retour vers une source sur le flux aller-retour total de la manipulation pour les deux sources. Les boîtes correspondent à 50 % des résultats du flux et

le trait du milieu situe la médiane. Les traits horizontaux de chaque côté de la boîte expriment chacun 25 % des résultats, et ce, du maximum au minimum. Les points extérieurs sont des valeurs extrêmes.

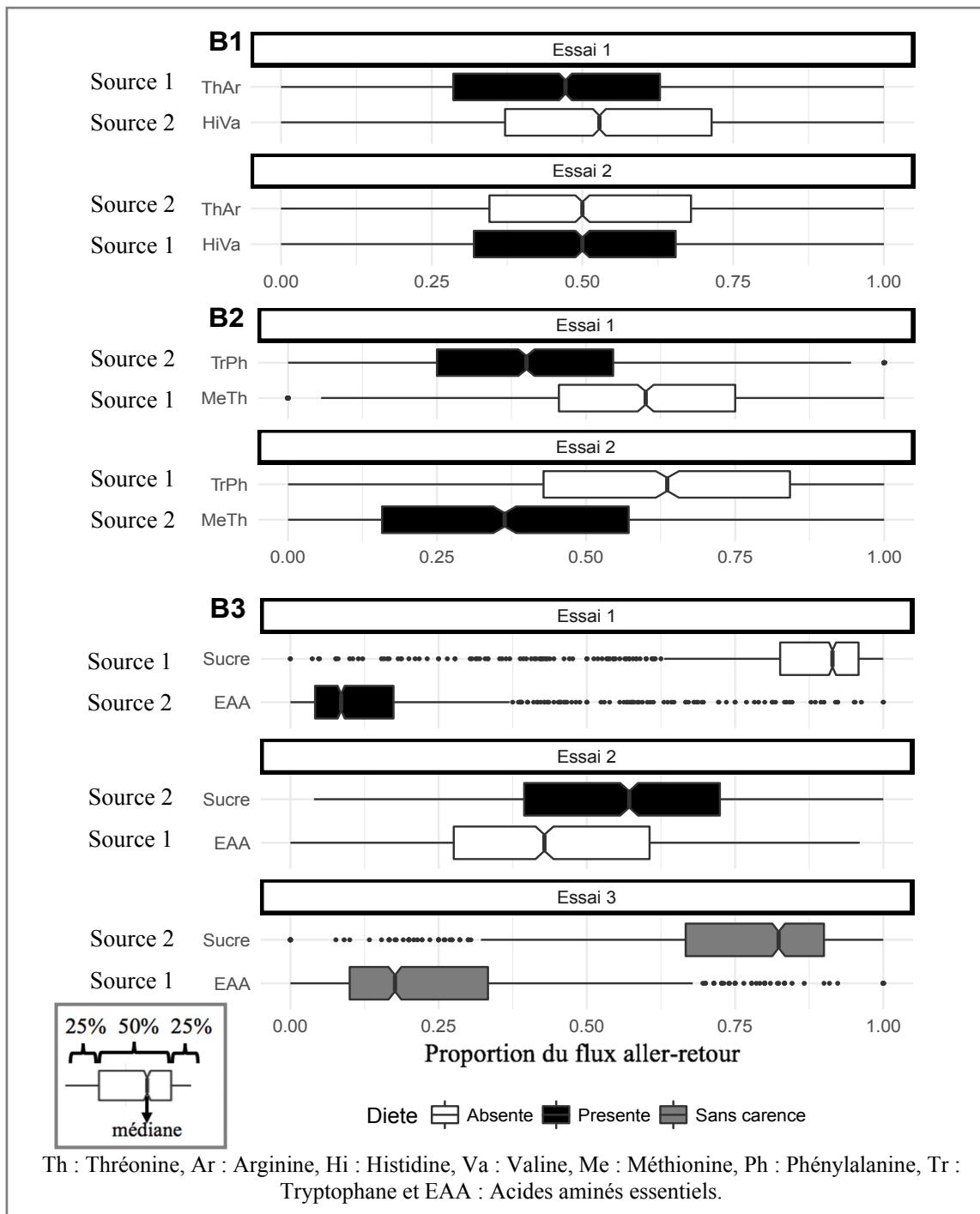


Figure 3.1 Proportion d'exploration pour les essais en carence nutritionnelle

Pour l'expérience B1, il n'y a pas de différence significative entre le choix collectif d'une source en carence versus non en carence. Au regard des résultats des essais de l'expérience B2, la nature de l'acide aminé affecte la capacité des fourrageuses à répondre aux besoins de la colonie. Il y a une différence significative entre le choix de la source en carence et pas en carence pour les deux essais de B2, avec une valeur $p<0.05^*$. Cette différence de capacité peut s'expliquer par l'importance de l'acide aminé (Arganda *et al.*, 2017). Certains peuvent rapidement être toxiques pour les ouvrières, dont les fourrageuses et d'autres peuvent être considérés comme plus importants pour les larves. Lorsque ce sont la Tryptophane et la Phénylalanine (essai 2), ou la Méthionine et la Thréonine (essai 1), le choix collectif va vers le besoin de la colonie à plus de 60 %. Ceci suggère que les fourmis savent différencier les sources et s'y adapter. Malgré que la carence ne soit restreinte qu'à deux acides aminés, elles présentent la capacité d'être en accord envers le besoin de la colonie entière. Or, ce besoin en protéine est uniquement exprimé par les larves et la demande est transmise aux ouvrières.

En ce qui concerne l'expérience B3, elle porte soit sur une carence en sucres (essai 1), soit sur une carence en acides aminés essentiels (essai 2), soit aucun des deux carencés (essai 3). Lorsque c'est le sucre qui est carencé, le choix collectif va davantage vers le sucre à 86 % (valeur $p<0.05^*$), alors que, lorsque ce sont les AAE, le choix est légèrement en faveur du sucre (valeur $p<0.05^*$). Il y a deux points à soulever ici. D'abord, les ouvrières n'aiment absolument pas les sources composées de protéines seules. Ensuite, la quantité de protéines nécessaires est plus faible que le sucre puisqu'il n'y a pas énormément de larves comparativement aux ouvrières présentes. Ainsi, malgré que seulement 44 % des fourrageuses se dirigent vers les AAE à l'essai 2 de B3, cela est suffisant pour répondre au besoin de la colonie. Enfin, lorsqu'aucune source n'est en carence, alors le choix collectif va naturellement vers le sucre (80 %) (valeur $p<0.05^*$).

3.1.2 Variation de la disponibilité (condition externe)

La variation de la disponibilité affiche une condition externe de la colonie. Il y a une expérience statique, une semi-stable et deux d'instabilités. Le taux moyen du flux à chaque minute vers

une source versus l'autre des expériences D sont présentés à la figure 3.2. Les points présentent la moyenne de proportion du flux aller-retour vers une source pour chaque minute des 20 réplicas. Les deux branches menant aux deux gisements sont affichées et différenciées par leur disponibilité dans le temps, sauf pour D1. La source instable (points gris) n'est pas présente dans les périodes sous encadrés gris, alors que la source stable (points noirs) est continuellement présente.

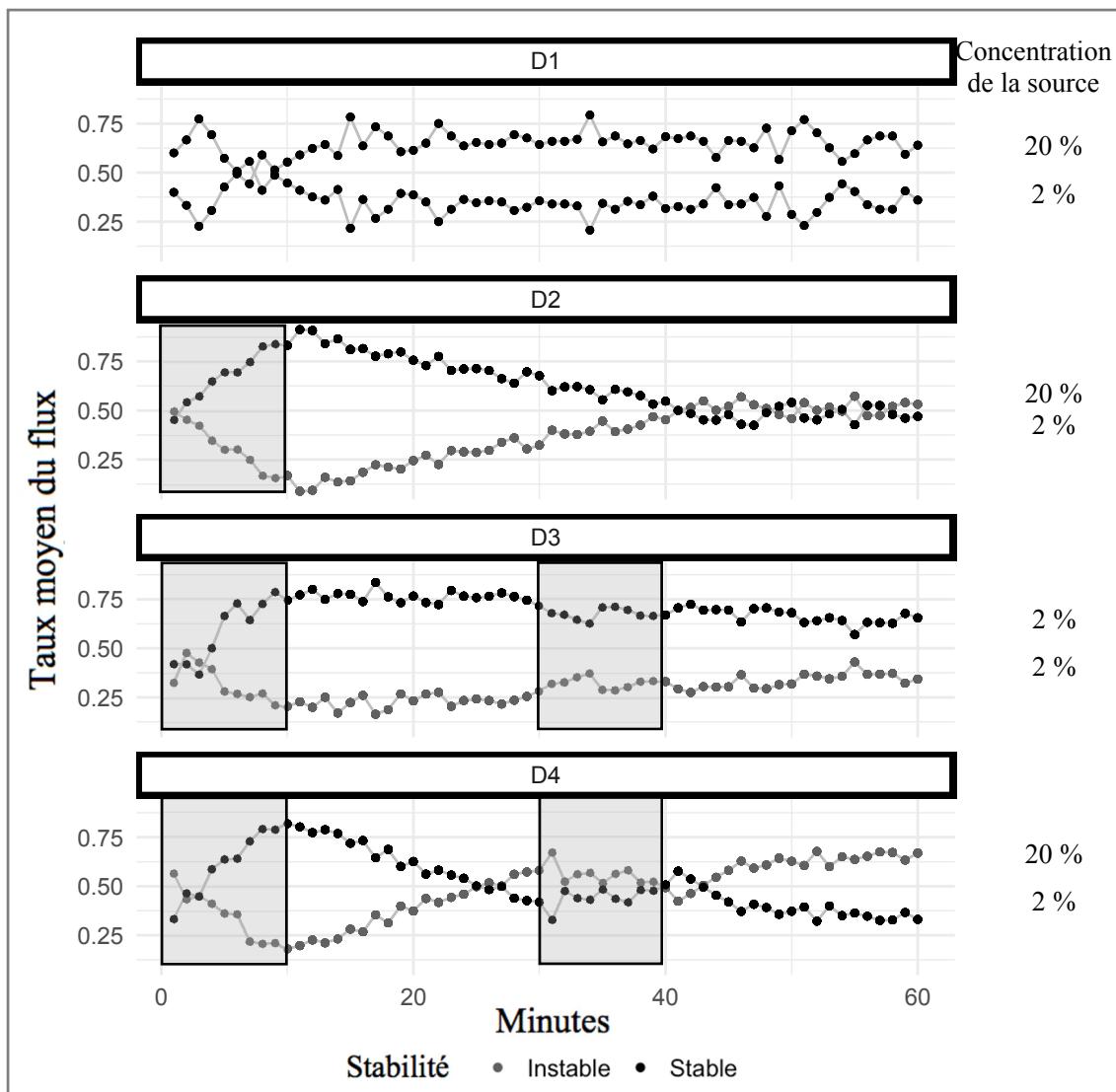


Figure 3.2 Proportion du flux aller-retour de chaque branche dans le temps

Pour l'expérience D1, les deux sources sont stables, dont une est de meilleure qualité. Visiblement, le choix collectif est dirigé vers la source de meilleure qualité. Lors de l'expérience D2, la source de meilleure qualité n'apparaît que 10 minutes après le début de l'expérience. Le choix collectif se dirige, après 15 minutes de présence, vers la source de meilleure qualité. En situation d'instabilité, la source instable n'est pas présente dans les encadrés (de 0 à 10 minutes et de 30 à 40 minutes). Lors de l'expérience D3, les deux sources sont de même qualité (2 %), dont une est instable. Les visites sont plus élevées vers la source stable. Ceci indique que les fourmis, par choix collectif, restent vers une source stable plutôt qu'instable, toutes deux ayant la même qualité. Lors de l'expérience D4, la source présentée en gris est instable et de meilleure qualité (20 %). Tandis que cette source est présente plus tard, à partir de la dixième minute, les fourmis vont modifier leur choix collectif vers cette source dès son apparition. Lorsqu'elle réapparaît une deuxième fois entre 40 et 60 minutes, les fourmis vont davantage la récolter. À la fin, près de 70 % des fourmis vont explorer cette source instable.

Dans le cas des essais D3 et D4, il y a variabilité de la disponibilité d'une source. Afin d'analyser le niveau à laquelle les fourrageuses modifient leur exploitation, la figure 3.3 montre les contenus des données de flux par minutes de 0 à 60 min versus la compilation des 10 dernières minutes. Pour l'expérience D3, il y a quelques valeurs extrêmes présentées par des points en dehors des lignes. Les lignes extérieures représentent chacune 25% des résultats et vont jusqu'à la valeur maximale et minimale. L'encadrée de la boîte contient 50 % des données avec la médiane comme trait vertical. Les boîtes blanches indiquent les données de la source instable et les boîtes noires montrent celles de la source stable.

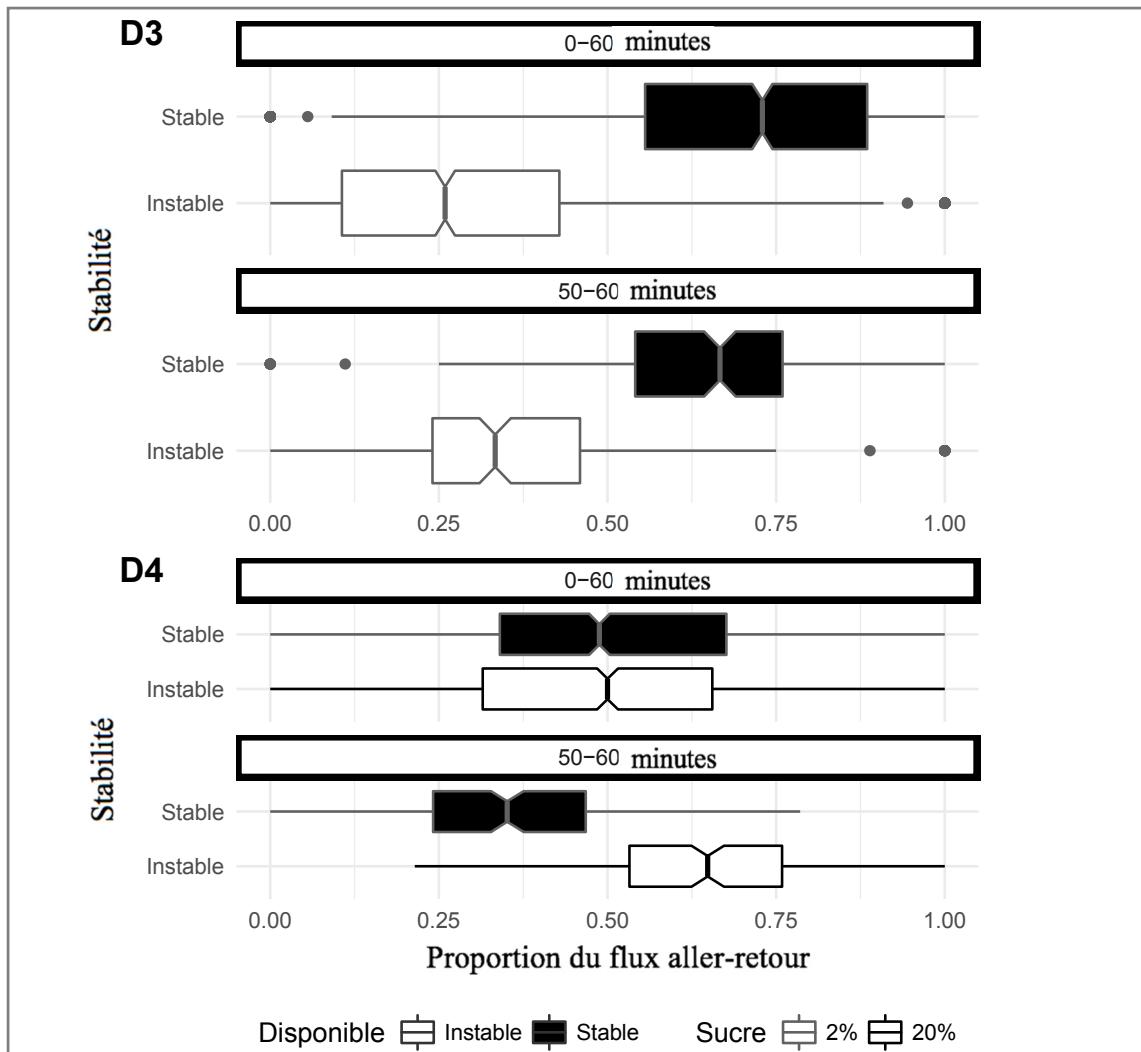


Figure 3.3 Proportion du flux aller-retour de chaque branche

Pour l'essai D3, l'exploitation est continuellement vers la source stable à 70-75 % de flux en moyenne par minute. En ce qui a trait à l'essai D4, il n'y a pas une branche qui domine l'autre pour les 60 minutes compilées, tandis que pour les 10 dernières minutes, le choix est plus important vers la source instable de plus forte concentration à près de 70 % de flux en moyenne par minute. Ceci suggère que les fourrageuses peuvent s'adapter à la variation de la disponibilité lorsqu'une source exprime une source de concentration plus élevée.

3.1.3 Indicateurs

Les indicateurs sont des résultats supplémentaires des perturbations. Ces indicateurs informent sur le niveau d'exploration dans le temps et l'efficience.

Indicateur du niveau d'exploitation

L'indicateur du niveau d'exploitation mesure l'importance du trafic dans le temps. L'exploitation évolue dans le temps en fonction du besoin qui diminue à force d'être satisfait. La figure 3.4 présente ce comportement au moyen des flux pour chaque minute, sur le flux total de la manipulation (60 minutes). La ligne présente la moyenne des proportions de flux des deux branches compilées pour chaque essai (E1 et E2). La courbe enveloppe grise est l'écart-type associé à la moyenne de chaque minute.

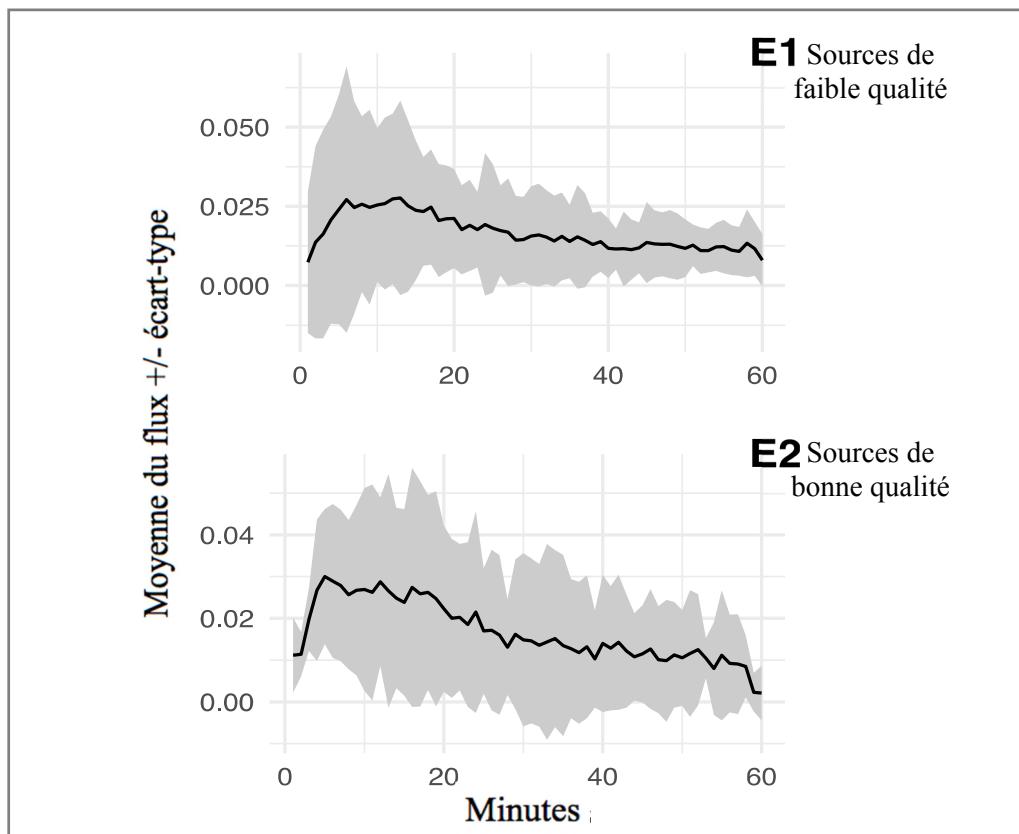


Figure 3.4 La moyenne du flux aller et retour pour l'exploitation dans le temps

La figure 3.4 illustre une forte augmentation du trafic pour les 10 premières minutes des essais. Par la suite, elle diminue graduellement jusqu'à la fin de l'essai. Les fourmis affichent un intérêt notable dans l'exploitation vers les sources lorsque le besoin est à son maximum. Puis, plus le temps s'écoule, plus l'exploitation perd en intensité, révélant un besoin atténué dû à l'effet de satiété. Cette diminution est plus marquée pour l'essai E2 comparativement à l'essai E1. Ceci laisse supposer que lorsque la source est de meilleure qualité, le besoin est satisfait plus rapidement.

Indicateur d'efficience

L'indicateur d'efficience est une mesure sur ce que les fourmis ont récolté versus les déplacements nécessaires. La figure 3.5 présente une compilation de chaque donnée par minute des essais E1, E2, D1, D2, D3 et D4. Les expériences B ne font pas partie de cette section puisque leurs sources assemblent les sucres avec les protéines. Le rapport d'efficience équivaut la quantité de sucres (uV) estimée récoltée par mètre.

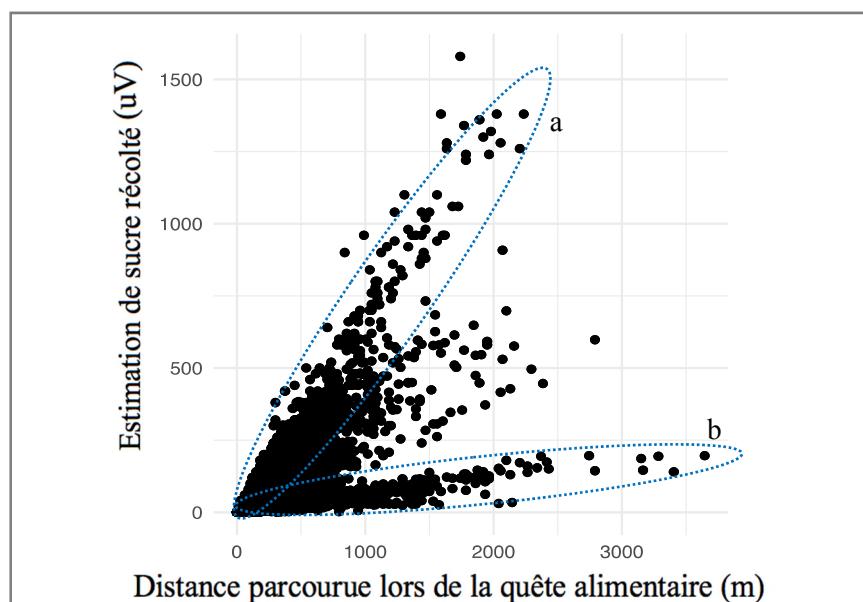


Figure 3.5 Moyennes des unités de sucres récoltés ajustée avec la concentration de source selon la quantité de mètres parcourus lors de chaque manipulation

La quantité de sucres récoltée estimée augmente avec le nombre de mètres parcourus. Deux corrélations ressortent (encerclé (a) et (b)). Effectivement, l'encerclé (a) démontre une droite qui monte plus rapidement puisqu'elle présente les sources de concentration de sucres à 20 %. Inversement pour l'encerclé (b), où les sources sont plutôt de concentration de sucre à 2 %. La relation reste positive entre la quantité de sucres récoltés et la distance aux deux échantillons distincts. En revanche, pour toutes les expériences, même lorsque la qualité est faible, le coût du déplacement est toujours moindre que le bénéfice d'aller acquérir la source. Toutes les données quantitatives sont présentées en synthèse à l'Annexe VI.

3.2 Modèle des interactions entre les fourmis et les ressources

Afin d'appliquer les connaissances de la première phase de l'étude, une transposition du comportement des fourrageuses est réalisée vers un modèle dynamique «fourmis-ressources» informatique. Avec ce modèle simplifié présenté à l'annexe V, des simulations pour les 60 (minutes) pas de temps ont été réalisées avec Anylogic. La simulation des scénarios correspondant aux essais statiques (E1 et E2) et aux essais avec une instabilité de la nourriture (D1, D2, D3 et D4). Toutefois, les données reçues sur les essais concernant la variation du besoin ne sont pas intégrées dans une simulation dans le temps, car ce ne sont pas les données temporelles qui sont mesurées, mais plutôt la capacité de sélectionnée une source qui exprime un besoin versus un « non » besoin. La figure 3.6 montre la simulation de la proportion du flux des fourrageuses par minute dans les deux branches confondues pour les expériences E.

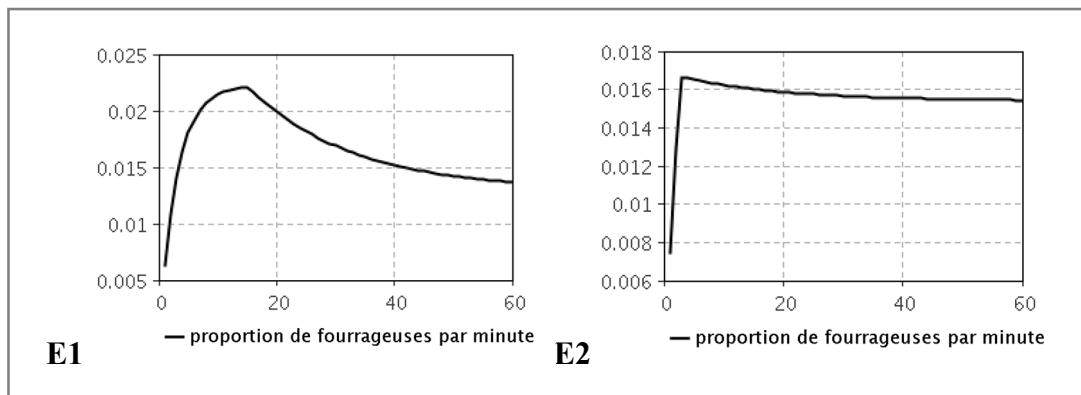


Figure 3.6 Ratio d'exploitation pour chaque source pour les essais statiques E

À l'essai E1 (sources à 2 %) et E2 (sources à 20 %), il y a augmentation graduelle vers la source pour finalement observer une réduction graduelle. Ceci représente de manière virtuelle ce qui a été analysé en laboratoire.

En plus des essais E, les essais D montrent une évolution du comportement dans le temps selon des conditions externes. La figure 3.7 présente les courbes de développement du taux de flux pour chaque branche dans le temps.

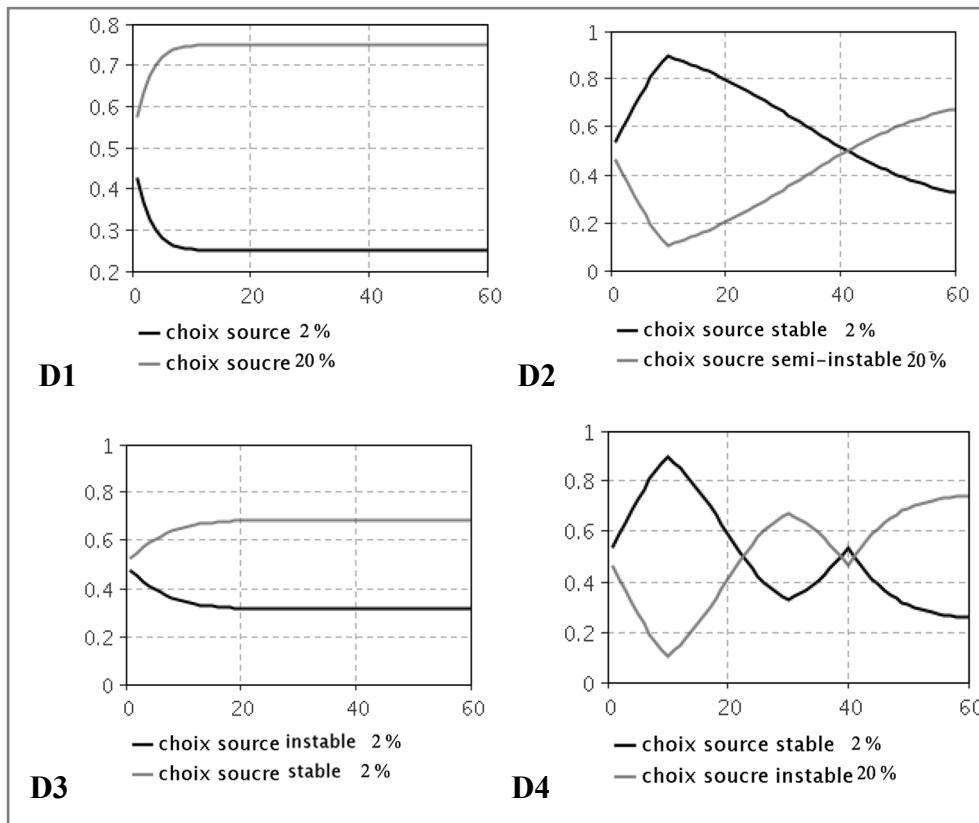


Figure 3.7 Ratio d'exploitation pour chaque source pour les expériences d'instabilités D dans le temps

Les résultats générés par la simulation montrent un même type de ratio d'exploitation de chaque source lors de la variation des conditions externes. L'évolution du choix entre deux sources est contrôlée selon le niveau du besoin dans la colonie et l'état de la source. La modélisation prend en considération de continuer à visiter une source moins bonne (D1) ou instable (D3), comme ce qui a été mesuré en laboratoire. Pour les essais D2 et D4, le

comportement virtuel des fourmis change en fonction de l'état de la source, puisque la source la plus intéressante n'est pas toujours présente. Le tableau 3.1 synthétise les résultats du modèle et les compare avec les précédentes expérimentations. Pour les essais E, ce sont des proportions du flux d'exploitation vers les sources pour chaque minute sur le flux total de l'expérimentation. Le tableau affiche ce taux pour la 10^e minute, suivi de la 30^e, 40^e et 60^e minute. Quant aux essais D, ce sont le taux du flux pour chaque source sur le flux total par minute pour ces mêmes périodes de temps. Le facteur de comparaison permet d'évaluer la différence entre les résultats observés et simulés. Un facteur de 1 équivaut à une même donnée.

Tableau 3.1 Synthèse et comparaison des résultats du comportement des fourrageuses en laboratoire avec le modèle informatique

| Conditions imposées | Source | Résultats observés | | | | Résultats simulés | | | | Facteur de comparaison | | | |
|---------------------|--------|--------------------|------|------|------|-------------------|------|------|------|------------------------|------|------|------|
| | | 10 | 30 | 40 | 60 | 10 | 30 | 40 | 60 | 10 | 30 | 40 | 60 |
| Temps (minutes) | | 10 | 30 | 40 | 60 | 10 | 30 | 40 | 60 | 10 | 30 | 40 | 60 |
| E1 | G+D | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 1,14 | 0,94 | 0,73 | 0,62 |
| E2 | G+D | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 1,59 | 0,94 | 0,93 | 0,13 |
| D1 | 1 | 0,45 | 0,36 | 0,32 | 0,36 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 1,80 | 1,44 | 1,28 | 1,44 |
| | 2 | 0,55 | 0,64 | 0,68 | 0,64 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,73 | 0,85 | 0,91 | 0,85 |
| D2 | 1 | 0,85 | 0,65 | 0,45 | 0,40 | 0,85 | 0,63 | 0,52 | 0,35 | 1,00 | 1,03 | 0,87 | 1,14 |
| | 2 | 0,15 | 0,35 | 0,55 | 0,60 | 0,15 | 0,37 | 0,48 | 0,65 | 1,00 | 0,95 | 1,15 | 0,92 |
| D3 | 1 | 0,80 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,63 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 1,27 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
| | 2 | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,37 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,54 | 0,86 | 0,86 | 0,86 |
| D4 | 1 | 0,80 | 0,40 | 0,50 | 0,30 | 0,88 | 0,33 | 0,55 | 0,28 | 0,91 | 1,21 | 0,91 | 1,07 |
| | 2 | 0,20 | 0,60 | 0,50 | 0,70 | 0,12 | 0,67 | 0,45 | 0,72 | 1,67 | 0,90 | 1,11 | 0,97 |

3.3 Modèle des interactions entre une ville et les ressources

Le modèle de fourmis est transposé dans un modèle informatique de développement d'une ville. Les mêmes variations des conditions interne et externe et des variations des paramètres sont appliquées pour évaluer l'applicabilité de l'analogie. À ce niveau, la gestion d'approvisionnement d'une ville est analysée et comparée de la même manière que les fourmis. Les résultats du modèle ville sont présentés dans cette section. Au final, l'étude des caractéristiques des interactions naturelles entre les besoins d'une communauté d'êtres vivants et les ressources disponibles sera complétée.

3.3.1 Paramètres dans le modèle transposé

Dans l'intérêt d'élaborer un modèle d'interaction de la ville avec son environnement, une liste de variables essentielles a été sélectionnée. Brièvement, la superficie de la forêt et de la ville évolue à travers le temps. L'état de l'une se répercute directement sur l'autre. Au fur et à mesure que les arbres sont coupés puis transformés, la ville s'agrandit et la forêt rétrécit (figure 3.8).

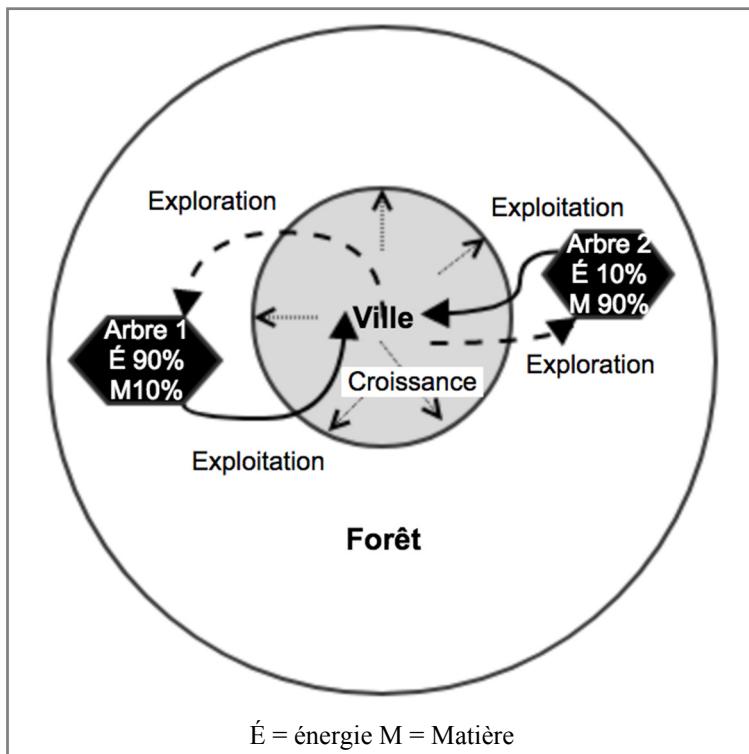


Figure 3.8 Relation de la superficie de la ville versus la forêt

Concernant ce modèle élaboré, les arbres de la forêt sont source d'énergie et de matière pour combler les besoins de l'agglomération humaine. Cette quantité d'arbres dans la forêt exprime un potentiel de disponibilité de ces sources. Il y a deux essences d'arbres (A_1, A_2) déclarées, ayant chacune des propriétés spécifiques. Ces propriétés dissemblables se traduisent dans leur ratio d'énergie et de matière contenu dans le bois ainsi que dans leur taux de renouvellement. Selon la superficie de la forêt (S_F) et le taux de renouvellement, les arbres poussent. La quantité

d'arbres coupés varie selon la quantité de travailleurs (H) et le facteur de besoin (F_{B1}, F_{B2}). Le facteur de besoin de coupe influence la proportion de coupe A₁:A₂. Ce facteur change en fonction de la quantité d'énergie et de matière transformée versus la quantité utilisée pour chaque type d'essence. Une fois coupés, les arbres transformés sont entreposés. Cet entreposage nécessite lui-même des ressources pour le maintenir. La ressource nouvellement acquise peut être utilisée soit pour la conservation en stockage, soit pour des nouvelles constructions, soit pour le maintien ou soit pour le déplacement occasionné par toute ces activités. Le nombre de travailleurs croît au fur et à mesure des nouvelles constructions. Le nombre de constructions (C) dépend de la capacité maximale (K_C) et du facteur de nécessité de construire (F_C). Ce facteur varie entre 0 et 1 selon la quantité de bois transformée et le coût engendré par le déplacement. Une fois les constructions établies, la demande en ressource vers le maintien des établissements s'accroît. Concernant le déplacement, il équivaut à la distance entre le centre, les ressources, l'entreposage et l'utilisation. Plus la ville est grande, plus la distance augmente. Enfin, les variables évoluent dans le temps selon les liens qui les unissent. Ces liens peuvent être positifs, négatifs ou cycliques et forts ou faibles.

Interaction des paramètres

Le modèle simplifié de la ville est conçu afin de représenter un développement au cours du temps en fonction de l'état des ressources à proximité et de la variabilité du besoin. Les interactions entre les paramètres dessinent l'évolution du système. Le tableau 3.2 résume les variables utilisées, les formules qui définissent la simulation et l'analogie avec la fourmi.

Tableau 3.2 Paramètres pour la simulation dans Anylogic concernant les variables stock (a), les bilans (b), les constantes (c), les variables dynamiques (d) et les flux (e)

| (a) | | | |
|--|--|---|--|
| Variables ayant des entrées et des sorties | | Analogie Fourmis | |
| <i>Dans la forêt</i> | | | |
| S _F | Superficie de la forêt | Valeur initiale : 25 000 S _F -S _V | Superficie de l'environnement |
| A ₁ , A ₂ | Quantité d'arbres des essences 1 et 2 | Valeur initiale : 25 000 P ₁ -Cou ₁ , P ₂ -Cou ₂ | Quantité de solutions nutritive |
| <i>Dans la ville</i> | | | |
| S _V | Superficie de la ville | Accroissement | Superficie de la colonie |
| E _{1T} , E _{2T} | Quantité d'énergie des ess. 1 et 2 transformées | Valeur initiale : 100 TrE ₁ -UE ₁ , TrE ₂ -UE ₂ | Quantité de sucres récoltée jabot social |
| M _{1T} , M _{2T} | Quantité de matière des ess. 1 et 2 transformées | Valeur initiale : 100 TrM ₁ -UM ₁ , TrM ₂ -UM ₂ | Quantité de protéines récoltée jabot social |
| C | Quantité de construction | Valeur initiale : 1 C _o | Quantité d'ouvrières |
| (b) | | | |
| Bilan | | | Analogie Fourmis |
| H | Quantité de travailleurs | C*2 | Quantité de fourrageuses |
| E _U , M _U | Quantité d'énergie et de matière utilisée | C _E +T _E +D _E +I _E , C _M +T _M +D _M +I _M | Quantité de sucres et protéines utilisés |
| E _{1D} , E _{2D} | Quantité d'énergie totale dans les ess. 1 et 2 | A ₁ * E ₁ , A ₂ * E ₂ | Quantité de sucres totale dans les solutions nutritives |
| M _{1D} , M _{2D} | Quantité de Matière totale dans les ess. 1 et 2 | A ₁ * M ₁ , A ₂ * M ₂ | Quantité de protéines totale dans les solutions nutritives |

Tableau 3.2 (suite)

| (c) | | | |
|------------------|--|---|--|
| Constantes | | Analogie Fourmis | |
| E_1, E_2 | Quantité d'énergie dans un arbre | 500, 40 | Quantité de sucres dans une goutte de solution nutritive |
| M_1, M_2 | Quantité de matière dans un arbre | 80, 300 | Quantité de protéines dans une goutte de solution nutritive |
| C_{Ep} | Quantité d'énergie pour une nouvelle construction | 100 | Quantité de sucres nécessaire pour le développement d'une larve |
| M_{Ep} | Quantité d'énergie pour le maintien d'un bâtiment | 30 | Quantité de sucres nécessaire pour la survie d'une ouvrière |
| T_{Ep} | Quantité d'énergie pour la conservation d'un stockage | 0.002 | Quantité de sucres nécessaire pour la dépense d'un stockage |
| D_{Ep} | Quantité d'énergie pour le déplacement d'une distance | 0.008 | Quantité de sucres nécessaire pour une distance d'exploration |
| C_{Mp} | Quantité de matière pour une nouvelle construction | 1200 | Quantité de protéines nécessaire pour le développement d'une larve |
| M_{Mp} | Quantité de matière pour le maintien d'un bâtiment | 5 | Quantité de protéines nécessaire pour la survie d'une ouvrière |
| T_{Mp} | Quantité de matière pour la conservation d'un stockage | 0.01 | Quantité de protéines nécessaire pour la dépense d'un stockage |
| D_{Mp} | Quantité de matière pour le déplacement d'une distance | 0.004 | Quantité de protéines nécessaire pour une distance d'exploration |
| S_C | Superficie d'une construction | 1 | Grosseur des ouvrières |
| R_1, R_2 | Ratio d'exploitation de base des ess. 1 et 2 | 0.5, 0.5 | Ratio d'exploitation des différentes solutions |
| K_{A1}, K_{A2} | Densité maximale d'arbres | 1000, 2000 | Quantité maximale de solutions nutritives |
| K_C | Quantité maximale de construction | 17000 | Quantité maximale d'ouvrières dans une colonie |
| Tx_C | Taux de construction | 0.10 | Taux de développement |
| ajustement | Ajustement du facteur de construction | 1 | Ajustement du facteur de développement des larves |
| D | Distance de base du centre de transformation | 2 (augmentation à chaque 5 constructions) | Distance entre le nid et les solutions nutritives dans l'environnement |
| Tx_1 | Taux de renouvellement de l'ess. 1 | 0.06 | Taux de renouvellement d'une solution (G) |
| Tx_2 | Taux de renouvellement de l'ess. 2 | 0.02 | Taux de renouvellement d'une solution (D) |

Tableau 3.2 (suite)

| (d) | | | |
|----------------------|---|--|---|
| Variables dynamiques | | Analogie Fourmis | |
| C_E, C_M | Quantité d'énergie et de matière nécessaires pour la construction | $C_o * C_{Ep} * (1 + (C/(C+1))),$ $C_o * C_{Mp} * (1 + (C/(C+1)))$ | Quantité de sucres et de protéines pour les nouvelles ouvrières |
| T_E, T_M | Quantité d'énergie et de matière nécessaire pour le stockage | $(E_{1T}+E_{2T}+M_{1T}+M_{2T})*T_{Ep},$ $(E_{1T}+E_{2T}+M_{1T}+M_{2T})*T_{Mp}$ | Quantité de sucres et de protéines pour le stockage |
| D_E, D_M | Quantité d'énergie et de matière nécessaires pour le déplacement | $(C_{ou1}+C_{ou2})*D*(C/augmentation)*D_{Ep},$ $(C_{ou1}+C_{ou2})*D*(C/augmentation)*D_{Mp}$ | Quantité de sucres et de protéines pour l'exploration |
| I_E, I_M | Quantité d'énergie et de matière nécessaires pour le maintien d'une construction (<i>variation du besoin</i>) | $C * M_{Ep} * (1+aison)*(1+(C/(C+1))),$ $C * M_{Mp} * (1+2*aison)$ | Quantité de sucres et de protéines pour le maintien des ouvrières |
| saison | Saison, variation des températures | $1+\cos(0.5*time(MONTH))$ | Saison, perturbation |
| ratioE ₁ | Ratio de l'utilisation de l'énergie 1 versus 2 | $(E_{2T}>E_{1T})? 0.8:1$ | Ratio de l'utilisation du sucre de la solution G vs D |
| ratioE ₂ | Ratio de l'utilisation de l'énergie 2 versus 1 | $(E_{2T}>E_{1T})? 0.2:0$ | Ratio de l'utilisation du sucre de la solution D vs G |
| ratioM ₁ | Ratio de l'utilisation de la matière 1 versus 2 | $(M_{1T}<M_{2T})? 0.2:0.4$ | Ratio de l'utilisation de protéines de la sol. G vs D |
| ratioM ₂ | Ratio de l'utilisation de la matière 2 versus 1 | $(M_{1T}<M_{2T})? 0.8:0.6$ | Ratio de l'utilisation de protéines de la sol. D vs G |
| F_{B1}, F_{B2} | Facteur de besoin de coupe des essences 1 et 2 | $(M_{1T}-M_{1U}> E_{1T}- UE_1)?(1-(E_{1T}- UE_1)/(E_{1T} + UE_1)):(1-(M_{1T}- UM_1)/(M_{1T} + UM_1)),$ $(M_{2T}- UM_2> E_{2T}- UE_2)?(1-(E_{2T}- UE_2)/(E_{2T} + UE_2)):(1-(M_{2T}- UM_2)/(M_{2T} + UM_2))$ | Facteur de besoin d'explorer la solution G et D |
| F_C | Facteur de nécessité de construction | $(E_{1T}+E_{2T}+M_{1T}+M_{2T})-(ajustement*(D_E+D_M))/((E_{1T}+E_{2T}+M_{1T}+M_{2T})+(ajustement*(D_E+D_M)))$ | Facteur de nécessité du développement des larves en ouvrières |
| Tx_{1modif} | Taux de renouvellement de l'ess. 1 modifié (<i>variation disponibilité</i>) | $Tx_1*(1-aison/2)$ | Taux de renouvellement d'une solution (G) instable |
| (e) | | | |
| Flux | | Analogie Fourmis | |
| P_1, P_2 | Quantité d'arbres qui poussent des ess. 1 et 2 | $Tx_1*saison*A_1*((K_{A1}*S_F)-A_1)/(K_{A1}*S_F)),$ $Tx_2*A_2*((K_{A2}*S_F)-A_2)/(K_{A2}*S_F))$ | Quantité de solutions qui s'ajoute (G et D) |
| Cou_1, Cou_2 | Quantité d'arbres coupés des ess. 1 et 2 | $H* R_1* F_{B1}, H* R_2* F_{B2}$ | Quantité de solutions récoltées (G et D) |
| TrE_1, TrE_2 | Quantité d'énergie transformée des ess. 1 et 2 | $Cou_1* E_1, Cou_2* E_2$ | Quantité de sucres dans les jabots sociaux (G et D) |
| TrM_1, TrM_2 | Quantité de matière transformée des ess. 1 et 2 | $Cou_1* M_1, Cou_2* M_2$ | Quantité de protéines dans les jabots sociaux (G et D) |
| UE_1, UE_2 | Quantité d'énergie utilisée des ess. 1 et 2 | $(C_E+I_E+T_E+D_E)*ratioE_1,$ $(C_E+I_E+T_E+D_E)*ratioE_2$ | Quantité de sucres utilisée (G et D) |
| UM_1, UM_2 | Quantité de matière utilisée des ess. 1 et 2 | $(C_M+I_M+T_M+D_M)*ratioM_1,$ $(C_M+I_M+T_M+D_M)*ratioM_2$ | Quantité de protéines utilisée (G et D) |
| C_o | Quantité de nouvelle construction | $C*((K_C-C)/K_C)* Tx_C* F_C$ | Quantité de nouvelles ouvrières |

3.3.2 Effets temporels de la variation du besoin (interne) et de la disponibilité (externe)

Tout d'abord, puisque l'intégration de la condition interne dans le modèle fourmis n'est pas temporel, chaque saison du modèle ville équivaut pour un temps d'essais (1h) des expérimentations chez les fourmis. Le développement répond en fonction de l'état interne au même niveau que chez les fourmis et il est capable de s'ajuster selon le type de ce besoin. De plus, à long terme, le besoin évolue continuellement lors de la croissance de la ville. La proportion de coupe à l'égard de chaque saison selon la perturbation du besoin est présentée la figure 3.9. Elle est constituée de boîtes à moustaches correspondant à 50% des résultats sur la proportion de coupe vers l'énergie versus la matière. La figure compile 60 pas de temps (mois) du modèle sans mise à jour de la croissance. Or, ceci équivaut à cinq ans, avec les quatre saisons qui se répètent cinq fois. Chaque saison est séparée par des couleurs différentes.

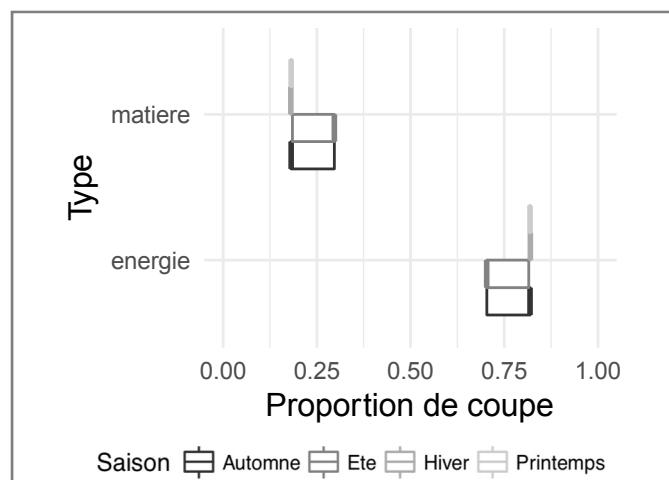


Figure 3.9 Proportion de coupe selon la variation du besoin en énergie versus en matière pour les 24 premiers pas de temps

C'est seulement durant l'été que la proportion de coupe est différente. Il y a un peu plus de matières qui sont récoltées lors de la saison chaude.

Les variations du besoin et de disponibilité se font de manière cyclique aux 12 pas de temps. Les figures 3.10 et 3.11 présentent une compilation des perturbations qui se répète à plusieurs reprises, cependant chez les fourmis, les perturbations s'affichent qu'une fois pour la variation

du besoin et à deux reprises pour la variation de la disponibilité. La figure 3.10 montre la proportion de l'utilisation de l'énergie versus la matière, autrement dit le besoin satisfait par la ville. Le modèle présente les données sur 60 pas de temps (mois). Le premier encadré est dans le scénario sans perturbation, le deuxième est lorsque le besoin en énergie et en matière varie, le troisième est lorsqu'il y a variation de la disponibilité d'une source (énergie) et le dernier est quand les conditions interne et externe varient. Comme à la figure 3.9, les variations sont causées par les saisons.

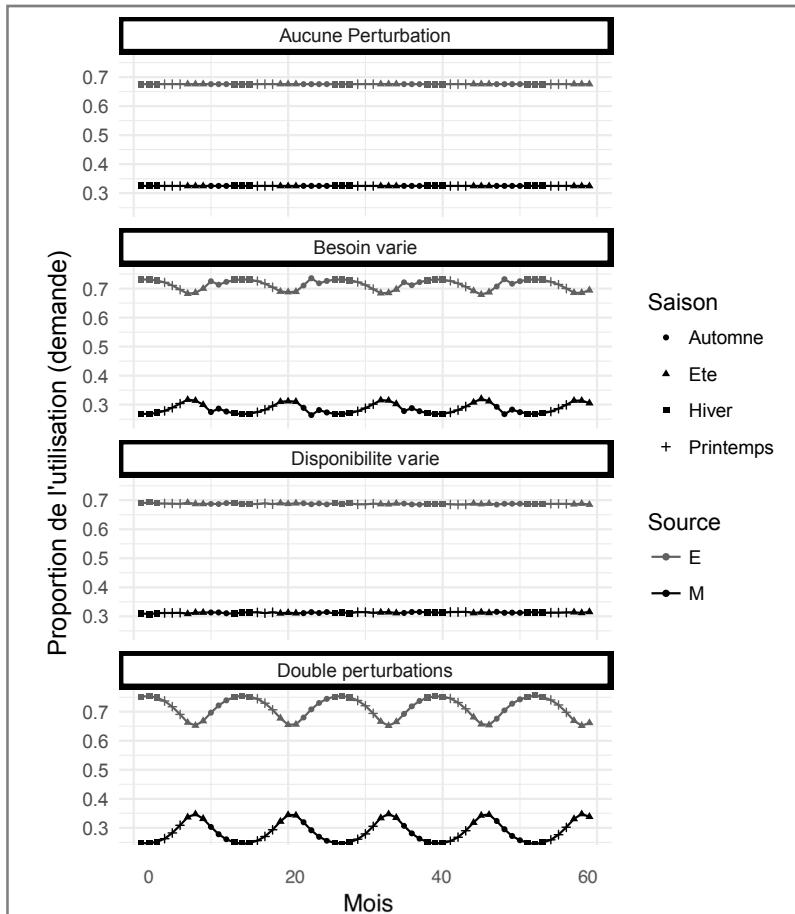


Figure 3.10 Utilisation de l'énergie et de la matière selon les perturbations pour 60 pas de temps (mois)

Des différences dans l'évolution de l'utilisation (besoin comblé de la ville) en fonction des conditions sont observées. Sans perturbation, le modèle affiche une demande plus imposante dans l'énergie. Lorsqu'il y a une variation interne ajoutée, l'utilisation oscille en fonction des

saisons. En situation de variation au niveau de la disponibilité, l'écart entre l'utilisation de l'énergie et la matière est sensiblement la même que sans perturbation. Une faible variation entre les saisons est alors observée, tandis que, en double perturbation, le scénario occasionne de plus grandes fluctuations de l'utilisation de façon cyclique. Ainsi, l'utilisation de l'énergie et de la matière fluctue particulièrement en fonction des conditions internes. L'effet de la variation de disponibilité est plus difficile à cerner. Dans le modèle, c'est dans le taux de renouvellement que la condition externe est intégré. Dans ce cas, l'effet est retardé et n'est pas directement visible à court terme, puisque le stockage et les arbres disponibles agissent comme effet tampon.

La variation des conditions interne et externe sur les coupes entre de l'énergie et la matière peuvent varier dans le temps afin d'assurer le développement de la ville. De base, la coupe totale est de plus en plus grande lors du développement de la ville (Annexe VII). Les proportions de coupe en énergie versus de la matière sont présentées à la figure 3.11 selon le même format que précédemment. Alors que l'utilisation affiche directement le besoin, les proportions de coupe permettent d'étudier plus spécifiquement le comportement d'approvisionnement du modèle élaboré.

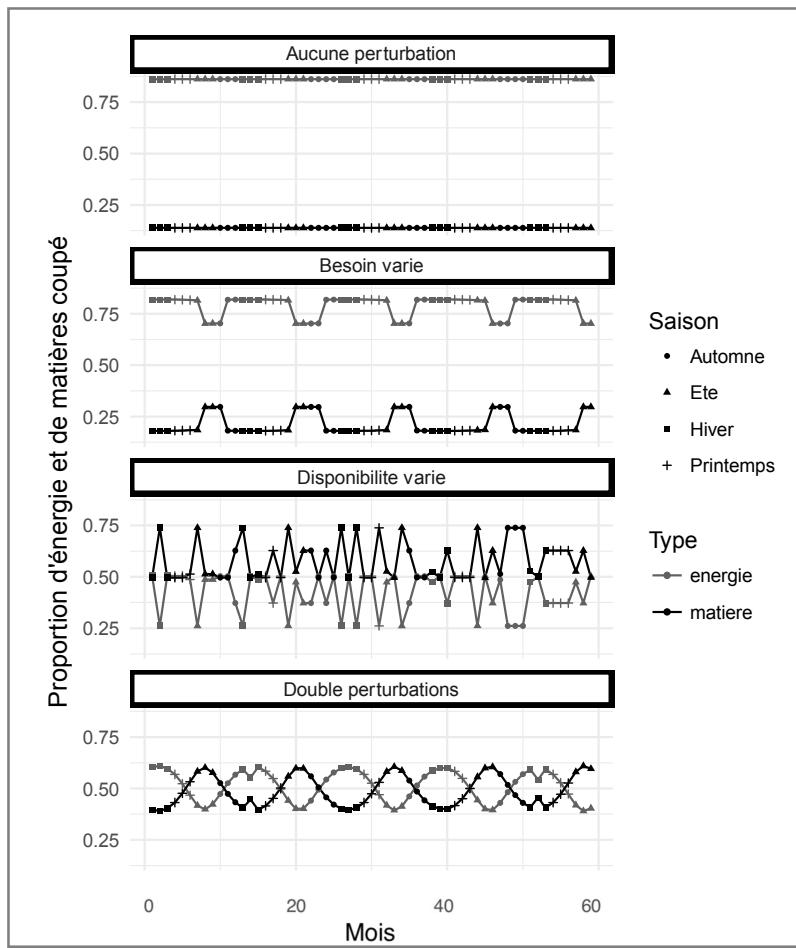


Figure 3.11 Proportion de coupe entre l'énergie et la matière selon les perturbations pour 60 pas de temps (mois)

Une forte stabilité est observée dans la proportion de coupe pour la situation sans perturbation. Le besoin est plus important vers l'énergie. Dans la circonstance de perturbation du besoin, des fluctuations sont directement créées par la fluctuation du besoin généré par les saisons. En absolu, de l'énergie est emmagasinée en surplus pour les deux premiers scénarios (Annexe VII). Pour le scénario de perturbation de la disponibilité, les fluctuations sont plus imposantes et commencent dès le début de la simulation. La variation du taux de renouvellement de l'essence 1 (énergie) occasionne une plus petite exploitation de celle-ci et une surexpression d'exploitation face à l'essence riche en matière peut être présente, peu importe les saisons. Or, ceci s'explique que l'intégration de cette perturbation soit au niveau du taux de renouvellement au lieu de la présence même de l'essence dans l'environnement. Ceci crée un décalage dans les résultats d'exploitation, alors que chez les fourmis, la perturbation de la disponibilité se

situe à la présence ou non présence complète d'une source. Toutefois, la proportion de coupe de l'essence 1 versus 2 s'entrecoupe continuellement de la même manière que les fourmis. Enfin, le dernier scénario s'entrecoupe davantage. En effet, comme pour le précédent scénario, des fluctuations sont présentes dès le début de la simulation. Au final, lorsque la figure 3.10 est comparée avec la figure 3.11 l'approvisionnement est en fonction du besoin pour chaque cycle de 12 pas de temps (un an). Par conséquent, les résultats ne sont pas similaires à ceux obtenus avec les fourmis, mais impliquent les mêmes interactions.

En ce qui a trait à l'indicateur d'efficience, il a aussi été étudié suite à la simulation de la ville. La figure 3.12 monte la relation d'efficience selon les perturbations, de même manière à la figure 3.5. Chaque point présente la quantité de matières et d'énergie récoltée selon le déplacement effectué. La relation d'efficience de l'interaction entre la ville et les ressources est similaire aux fourmis. Plus il y a des déplacements, plus la quantité récoltée est grande, peu importe le type de perturbation présente.

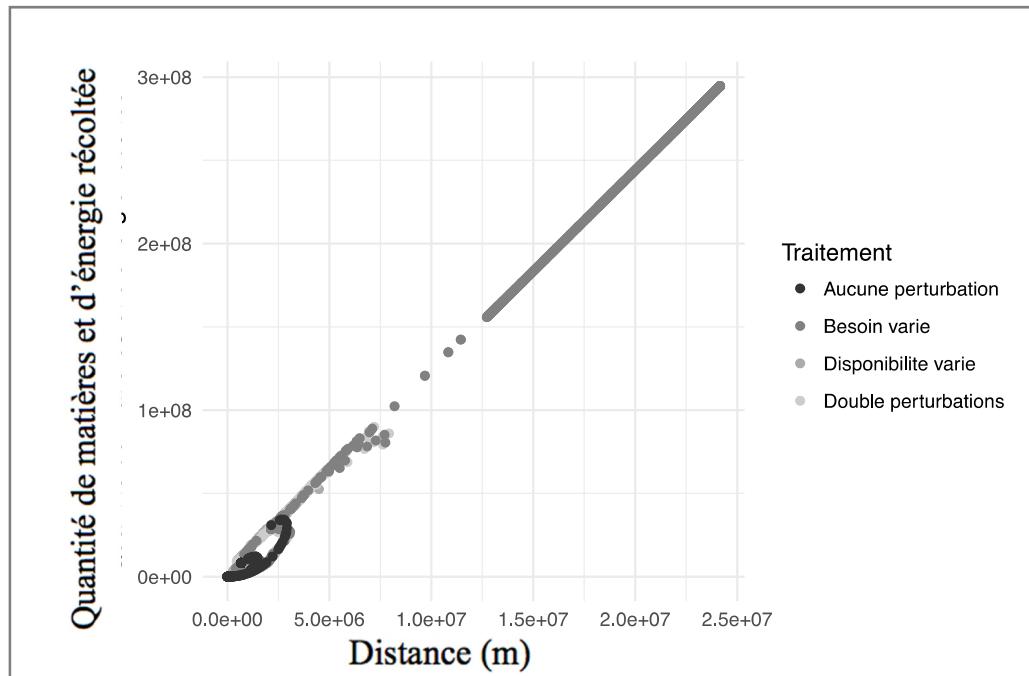


Figure 3.12 Relation d'efficience selon les perturbations

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce dernier chapitre aborde en premier lieu, une discussion des caractéristiques résultantes des essais fourmis et ville avec les ressources. Cette section inclut une analyse critique des expérimentations en laboratoire et des résultats obtenus en modélisation de la ville inspirée par les données sur les fourmis précédemment obtenues. En deuxième lieu, deux propositions des perspectives sur le modèle et les limites sont discutées. En troisième lieu, l'utilisation des concepts de la nature comme analogie à une communauté humaine est analysée. Elle aboutit sur les retombés de l'analogie des fourmis avec l'Homme. En dernier lieu, les perspectives face à l'étude sont exposées.

4.1 Caractéristique des expériences ville-fourmis

Cette section présente une description du modèle de gestion d'approvisionnement des fourmis d'Argentine et une discussion sur la modélisation du développement de la ville inspirée par ces résultats. Les comportements des fourmis face à différentes perturbations émises doivent être compris afin de cerner les facteurs qui assurent la survie de la colonie. Elle est accompagnée d'une présentation des paramètres influençant le modèle ville-ressource.

4.1.1 Modèle de gestion d'approvisionnement des fourmis

Le comportement de quête alimentaire des fourmis d'Argentine a été le fondement des expérimentations. Les résultats confirment une flexibilité de réponse en quête alimentaire en fonction du besoin exprimé par la colonie et de la variabilité de la disponibilité de la source.

Tout d'abord, l'étude sur la nutrition a permis de comprendre l'importance du besoin. Les résultats obtenus lors de la variation du besoin confirment la capacité des fourmis d'Argentine à moduler le ratio de prise en nourriture entre différentes diètes. Alors que le besoin en protéine

est manifesté que par une petite portion de la colonie, la réponse des fourrageuses face à ce besoin s'exprime même au niveau de quelques acides aminés. C'est lorsqu'il y a une carence vers la méthionine et la thréonine versus le tryptophane et la phénylalanine et inversement qu'elles savent choisir collectivement la source en carence. Ceci peut s'expliquer par l'importance de chacun et de leur niveau de toxicité lorsqu'il dépasse un seuil d'ingestion (Betts et Russell, 2003). En effet, la méthionine, la thréonine et la phénylalanine sont essentielles et peuvent causer une toxicité chez la fourmi d'Argentine (Arganda *et al.*, 2017). À propos du sucre versus les AAE, les ouvrières préfèrent naturellement le sucre; c'est pour cette raison que même sans carence, elles vont majoritairement vers le sucre. Les résultats suggèrent qu'une colonie de fourmis d'Argentine nécessitent normalement 80 % de sucres (énergie) versus 20 % de protéines (matière). L'exploration augmente vers les sources protéinées de 20 à 45 % lorsqu'elles sont en carence de ceux-ci. De façon relative, les fourmis doublent la quantité d'AAE exploitée alors que les fourrageuses ne sont pas attirées par les sources de protéines seules. En général, les ouvrières sont incitées à récolter ces sources de protéines lorsqu'elles sont accompagnées de sucres (Portha *et al.*, 2002; Portha *et al.*, 2004; Dussutour et Simpson, 2009). Le besoin en protéines chez les fourmis peut s'exprimer de différents degrés, c'est-à-dire d'acides aminés précis à des protéines complètes. Puis, leurs réponses peuvent affirmer davantage de précision et de force pour certaines sources uniques. Par conséquent, le choix collectif obtenu démontre une forme d'analyse coût-bénéfice globale et pourtant non conscientisée. Il s'avère que les fourrageuses aboutissent vers ce choix collectif au moyen d'un assemblage de phéromones simples. Ainsi, elles parviennent à répondre aux besoins. Enfin, dans le modèle ville, l'intégration de ces comportements des fourrageuses se traduit par l'ajustement des besoins et de l'utilisation de chaque ressource.

Par la suite, lors d'une perturbation dans l'accessibilité à une source, la fourmi d'Argentine réussit à faire un choix collectif vers une source de meilleure qualité même si elle est présente de façon instable. Alors qu'une fourmi individuelle n'a pas l'information des variétés de sources dans l'environnement, de manière collective, elles réussissent à modifier leur choix par le biais de leur communication (Dussutour *et al.*, 2009a; Dussutour *et al.*, 2009b; Latty *et al.*, 2017). Quant au modèle, ceci se manifeste par une rétroaction positive ou négative de la

réponse face aux conditions du milieu. Une modulation de la stratégie d'exploration et d'exploitation dans le temps est alors observée.

Par ailleurs, le comportement d'exploration des fourmis augmente jusqu'à l'atteinte d'un plateau pour finalement diminuer. L'augmentation de l'exploration s'explique par davantage de recrutement afin de collecter les ressources. La présence d'une diminution de flux aller-retour après 20 minutes suggère un intérêt à une exploitation plus faible. Cette diminution peut alors confirmer que le besoin est comblé en cet instant. Par ce fait, les fourmis ne vont pas poursuivre l'exploitation même si la source est présente, elles exploitent en réponse du besoin et non qu'en raison de la disponibilité de la source.

Une stratégie d'exploitation de la fourmi d'Argentine est leur capacité à recruter de grandes quantités d'individus (Holway, 1999). Également, il s'avère que leur découverte des ressources se révèle de manière efficiente. En effet, les essais statiques et sur l'instabilité ont permis de tirer cette conclusion. Il est évident qu'en présence de sources de mauvaise qualité uniquement, l'efficience se révèle plus faible comparativement à un environnement offrant des sources de meilleure qualité. Or, dans la circonstance où l'environnement offre le choix entre une meilleure source et une autre de moins bonne qualité, les fourmis vont démontrer une forte efficience tout en continuant à visiter faiblement la source de moindre qualité. Le niveau d'efficience est présent dans le modèle de ville en intégrant des seuils de coût de déplacements versus la récolte. Ces seuils affectent l'intérêt de nouvelles constructions, diminuant la croissance peu à peu. Dans un concept théorique et absent du modèle construit, les études comportementales de la fourmi suggèrent que la stratégie de croissance doit s'adapter à l'état même de la ville. Assurément, la stratégie de croissance peut être une non-croissance lorsqu'elle atteint un seuil.

De plus, généralement, plus un système présente une robustesse, moins l'efficience peut sembler être bonne. De fait, un système robuste présente généralement davantage de connexions et alors, génère plus de déplacements. Or, ceci demande une quantité d'énergie et de matière élevées. Le coût des déplacements augmente relativement aux bénéfices immédiats.

Pourtant, lors des perturbations, les bénéfices augmentent créant un rapport coût-bénéfice avantageux. Les fourmis ont l'aptitude de balancer le niveau de robustesse et d'efficience pour être mieux adapté à diverses conditions environnementales.

4.1.2 Analogie entre une colonie de fourmis et une ville

Les fourmis rencontrent une multitude de perturbations. Elles savent répondre aux conditions internes et externes de manière à assurer un développement équilibré avec l'environnement. Ces deux conditions sont autant présentes dans le comportement la fourmi que lors du développement de la ville. Le bon développement de la ville s'inscrit dans une bonne utilisation des ressources en fonction de leur besoin et de ce qui est disponible. La quantité d'énergie et de matière récoltée selon les disponibilités doit être balancée pour améliorer la croissance respectueuse de l'environnement. En effet, les ressources ne demeurent pas continuellement disponibles dans les mêmes quantités et certaines sont connues pour ne pas présenter une stabilité dans le temps. Alors, la taille de la ville doit être ajustée pour résister cette instabilité.

Suite à l'analyse du comportement des fourmis, il a été possible de proposer une modélisation d'une ville analogique avec des composantes trouvées chez les fourmis. Dans cette modélisation, le développement est directement et indirectement lié à l'état des sources disponible dans l'environnement à proximité. D'abord, les mêmes types de perturbations, que celles expérimentées chez la fourmi ont été appliqués dans le modèle ville dans l'optique d'évaluer l'application du modèle fourmi à une organisation humaine.

Dans tous les scénarios de la simulation, l'utilisation des ressources répond au besoin de la ville de manière directe. Autrement dit, l'utilisation d'énergie et de matière exprime le besoin satisfait. En ce qui concerne la proportion de coupe entre l'énergie et la matière, elle démontre la gestion d'approvisionnement du système ville face à la demande exprimée. En ce qui a trait aux quatre scénarios de la modélisation, c'est majoritairement l'essence d'arbre riche en énergie qui est exploitée, précisément selon la demande de la ville. Globalement, la demande exprime un besoin ajusté selon la disponibilité et ce qui a déjà été transformé comme ressource.

En partie, il y a intégration d'un coût-bénéfice. Les coûts, en plus de la construction et du maintien qui augmente avec la croissance, sont le stockage et les déplacements. Un surstockage des ressources transformées occasionne des coûts considérables et, plus la ville croît, plus les déplacements génèrent davantage de coûts.

Dans le scénario de la variation au niveau du besoin, l'exploitation se dirige vers l'essence riche en énergie lorsque la ville nécessite davantage d'énergie que de matière en hiver. Lorsque c'est la disponibilité de l'énergie qui varie, la coupe s'entrecroise continuellement. Comme interprétation, l'augmentation d'exploitation de l'essence riche en matière qui est stable semble présenter une surexploitation afin d'obtenir suffisamment d'énergie. Conséquemment, le système à l'étude avantage une surexploitation dans l'optique d'assurer la survie de la ville. Néanmoins, comme le modèle des fourmis, le comportement d'exploitation varie continuellement d'une source à une autre malgré l'instabilité de la source la plus profitable. Finalement, lorsqu'il y a une double perturbation, la proportion des coupes s'entrecoupe davantage. Ceci démontre que le système tente continuellement de répondre aux conditions interne et externe dynamique.

Pour conclure, étant dans un milieu dynamique, une ville doit démontrer une résilience à la fois dans la capacité de survivre aux chocs et dans la capacité de changer. Alors que la survie d'une ville face aux perturbations est courante, la capacité de changer est inhabituelle (Polèse, 2010). C'est pourquoi la capacité de changement dans le fonctionnement de la ville devrait être encouragée.

4.2 Proposition des perspectives du modèle et les limites

Le modèle élaboré s'est restreint à la gestion d'approvisionnement dans un espace de temps court selon seulement l'exploitation de la biomasse du bois. Deux propositions peuvent être envisagées. Premièrement, la simulation du modèle à plus long terme peut être étudiée pour visualiser l'effet de la gestion d'approvisionnement sur la croissance de la ville. Deuxièmement, l'aspect de croissance d'une ville uniquement par la présence des ressources

peut être amélioré. En effet, la quantité gens dans le présent modèle dépendait de la présence de construction, alors que dans les sociétés actuelles, le motif d'accessibilité à l'emploi est un élément primordial. Pour terminer cette section, les limites du modèle sont énoncées.

4.2.1 Facteur sur la croissance

Pour revenir au problème de croissance des villes, une modélisation à plus long terme peut être évaluée. Cette notion de croissance vise à l'équilibre d'une ville selon les ressources à proximité. Toutefois, il faut prendre en considération que la modélisation à long terme apporte plusieurs limites en termes d'application. Certaines propositions ont été intégrées à la modélisation de la ville afin d'évaluer son comportement.

La rétroaction négative de la croissance peut être provoquée selon des facteurs limitants ou des comportements naturels d'efficience. Il est intéressant d'entrevoir la limite de la croissance en fonction de la capacité de l'environnement à subvenir au besoin de la ville. Elle peut être estimée et doit prendre en considération les coûts engendrés par la croissance et les pertes d'espace pour la production d'énergie et de matières disponible. Plusieurs tests de variation des paramètres ont été réalisés à l'aide du modèle. Or, c'est l'ajustement du facteur de construction qui mène aux données les plus intéressantes. C'est-à-dire, l'augmentation de considération vers l'efficience. Les résultats de la variation de ce facteur sont présentés à la figure 7 de l'Annexe VII. Brièvement, le comportement de la coupe totale et de nouvelle construction est ralenti lorsque l'efficience est fortement considérée dans le modèle. Toutefois, l'approvisionnement reste assez semblable avec le même type de fluctuation et d'une quantité de coupe comparable.

Certaines suggestions ressortent des résultats de simulation de croissance. Premièrement, il faut explorer l'environnement à proximité et analyser les ressources présentes. Les connaissances sur celles-ci doivent être bien intégrées afin d'assurer une efficacité de leur exploitation. Deuxièmement, il faut considérer les besoins et la disponibilité des ressources régulièrement. Ainsi, l'exploration et l'exploitation fluctuent constamment selon ces derniers.

Troisièmement, l'exploitation doit se faire selon un seuil d'efficience et ce dernier doit considérer les coûts versus les bénéfices de manière à supporter une perturbation imprévisible. Quatrièmement, l'exploration face à de nouvelles sources doit être continuellement présente pour conserver une résilience. Ainsi, les capacités de résilience et d'efficience doivent être encouragées en fonction de l'état de la ville. Finalement, dans un environnement dynamique, il faut avantager la diversité et le changement dans la façon de s'approvisionner.

4.2.2 Motif de croissance d'une ville : les emplois

Il existe divers motifs qui incitent les individus à habiter une ville. Cette étude s'est concentrée qu'à l'aspect environnemental, néanmoins, bien que la disponibilité des ressources soit importante, l'accessibilité à l'emploi serait un facteur à considérer. Ajouter ce facteur dans le modèle comme inciteur de croissance et de développement de la ville, pourrait l'améliorer en formant une meilleure représentation de la réalité. De fait, l'outil économique affecte les décisions et forme les organisations anthropiques actuelles. Étant la clé de l'évolution de la ville (croissance, stabilité et décroissance), l'effet de l'accessibilité à l'emploi sur la manière dont les ressources à proximité sont exploitées peut à leur tour affecter la disponibilité des emplois. Se concentrer sur cette interaction entre le système économique et les ressources qui forment une ville peut s'avérer intéressant. Dans cet ordre d'idée, l'aspect économique pourrait être intégré dans le modèle, tout en considérant l'environnement de manière importante.

4.2.3 Les limites

Cette tentative d'analogie entre deux systèmes est réalisée de manière à étudier certains éléments et interactions entre eux de manière élémentaire. Par conséquent, l'élaboration du modèle de ville ne contient pas tous les facteurs réels qui influencent sa croissance. L'ajout de paramètres peut grandement influencer le développement de la ville et la réponse aux perturbations. Ces paramètres peuvent rapidement ajouter une complexité au modèle. En effet, l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation dans modèle de croissance nécessite une réflexion puisqu'il peut varier selon plusieurs facteurs. De plus, concernant la nature de l'analogie présentée dans cette étude, il existe d'autres perturbations et l'effet de ceux-ci sur la

croissance des fourmis pourrait être étudié. Des suggestions sont présentent dans la section des perspectives de futures recherches.

4.3 Utilisation des concepts de la nature comme analogie à une communauté humaine

Alors que l'humain occidental est conditionné par certaines méthodes d'apprentissage, l'ouverture pour la recherche de solutions se restreint. Trouver des solutions aux problèmes anthropiques par des concepts de la nature peut s'avérer innovant. Outre l'utilisation des fourmis comme analogie et les recommandations pour les sociétés humaines, cette section revient sur les principes d'analogie pour une communauté, pour en dégager des retombées.

L'utilisation des fourmis comme analogie à l'Homme se reconnaît utile. Que ce soit par l'analyse de leur comportement face à divers chemins, différentes diètes et de leur capacité de compromis, elles démontrent une réponse collective rapidement. Tel que démontré dans cette étude, les fourmis réussissent à choisir une solution nutritive dont elles ont besoin, et ce, malgré que ce ne soit pas l'ouvrière même qui en nécessite. Plusieurs autres recommandations de cette analogie entre organisation des fourmis et anthropique sont à envisager. Par exemple, le concept de géométrie nutritionnelle est encouragé dans les études de la nutrition, n'importe pour les fourmis ou toute autre espèce animale, dont l'Homme (Simpson et Raubenheimer, 2012). De plus, elles ont aussi des capacités intéressantes de géolocalisation, de fabrication de structure au moyen d'éléments secondaires et d'elles-mêmes (Hölldobler et Wilson, 1990). En termes de compromis, les fourmis démontrent généralement une flexibilité de réponse face aux conditions. Notamment, certaines fourmis, les Ecitons, ajustent la quantité d'ouvrières aux fins de former un pont d'individus de manière à raccourcir un chemin versus la quantité d'ouvrières à la recherche de la nourriture (Reid *et al.*, 2015). Quant à l'Homme, il est possible d'analyser leur comportement pour calculer un coût-bénéfice. Aussi, selon les espèces, leur succès dépend de leur capacité à balancer leur niveau d'exploration versus l'exploitation (Biesmeijer et de Vries, 2001; Cook *et al.*, 2013). Ceci est intéressant pour les études de nature anthropique voulant ajuster leur niveau d'exploration de nouvelles connaissances par exemple et continuer à appliquer du savoir. Enfin, c'est par les innombrables adaptations des fourmis et de leur vie

en société qu'elles restent un insecte considérable pour des études utilisant une approche biomimétique, que ce soit pour la forme, le procédé ou les fonctions écosystémiques.

En conclusions, il peut être difficile de concevoir un monde différent de ce qui a déjà été et de ce qui est présentement. Alors que l'humain tente d'aller outre les limites de son propre conditionnement, l'utilisation des principes d'analogie permet de faire un pont. D'ailleurs, certaines solutions face à la croissance sans limites demandent une restructuration totale. Cette restructuration peut prendre forme à l'aide d'une étude qui se base sur les principes de l'analogie. Lorsque l'organisation d'une communauté anthropique prend comme exemple l'organisation d'une autre communauté d'espèces différentes, les retombées peuvent s'avérer grandes. Les fondements qui supportent les systèmes actuels qui foncent vers un déséquilibre avec la nature peuvent être revisités. Par conséquent, les études sur les analogies, aussi lointaines que près de l'Homme, devraient être encouragées afin d'ouvrir l'horizon des possibilités.

4.4 Perspectives d'études

Cette étude a permis d'explorer une partie d'un large problème de croissance chez l'Homme et d'étudier le comportement d'une organisation d'insecte sociale. Dans le même cheminement de pensée, il serait lucratif d'étudier plus en profondeur l'interaction entre l'humain et son environnement, ainsi que les autres dimensions, l'activité économique, politique et sociale dans l'évolution de la croissance. La présente étude suggère alors différentes perspectives de futurs travaux de recherche.

La modélisation de l'évolution de la croissance d'une ville pourrait être accompagnée d'une simulation structurelle. Cette simulation entreprendrait des croissances de type horizontale et verticale selon l'implantation d'algorithme de décision. Ces algorithmes pourront être par exemple formés par les comportements des fourmis.

Alors que les ressources pour alimenter les besoins humains sont variées, seulement la biomasse du bois était à l'étude. En ce cas, il serait possible d'intenter une modélisation de croissance face à d'autres types de ressources. De plus, il serait concevable d'ajouter la notion de retour énergétique selon la ressource, puisque ce retour énergétique est connu pour être plus faible pour les ressources renouvelables que non renouvelables (D'alisa *et al.*, 2015). Par la suite, la comparaison selon ces variétés de ressources pourrait être réalisée.

Selon le principe social chez l'Homme versus la fourmi, d'autres possibilités d'études peuvent être amorcées. En effet, avec la croissance, plus il y a de production, plus il est possible d'obtenir des objets secondaires qui deviennent chez l'Homme des besoins. Puis, dans les sociétés humaines, l'importance des instruments secondaires dans l'organisation sociale intensifie le conflit entre individus, tandis que chez les fourmis, l'organisation de la production est faite de manière collective et chaque individu ont seulement leur des instruments primaires (leur corps). Alors, le désir d'obtention des instruments secondaires chez l'Homme forme les hiérarchies sociales et occasionne des conflits. Une solution est le détachement et l'indépendance de ces instruments. Par conséquent, il serait avantageux d'étudier l'analogie entre une organisation anthropique qui fonctionne sans cette hiérarchie et celles des fourmis (Georgescu-Roegen, 1971).

Assurément, le territoire d'exploration et d'exploitation des fourmis dépend de la grandeur de la colonie. Plus la colonie est grande, plus le territoire d'exploration et d'exploitation grandit. Par contre, c'est le niveau d'efficience de la colonie face à l'énergie posée sur la défense versus le gain octroyé par ce territoire qui limite la croissance (Sakata et Katayama, 2001). Donc, il serait intéressant d'élucider ce niveau d'efficience entre l'énergie posée pour conserver et exploiter un territoire versus l'énergie générée chez des espèces de fourmis comme métaphore à l'approvisionnement des villes humaines. Aussi, le principe de subdivision de la colonie en sous-colonies pourrait être comparé avec le concept de polycentrisme des villes.

CONCLUSION

Comme plusieurs chercheurs l'affirment, une croissance illimitée dans un monde limité est impossible. L'enjeu de cette étude concernait la croissance des villes. L'ampleur de l'enjeu est vaste puisque plusieurs acteurs interagissent ensemble pour maintenir ce développement et évoluent eux aussi selon cette même règle. Malgré cette complexité, la présente étude avait comme objectif d'étudier les caractéristiques des interactions naturelles entre les besoins d'une communauté humaine et les ressources disponibles. Les ressources qui circulent dans la ville pourraient alors être en équilibre avec le dynamisme de l'environnement à proximité seulement si les décisions humaines sont déployées en fonction de l'état des sources. Dans l'optique d'élargir l'étude sur l'organisation humaine, ce projet a fait l'application du comportement de quête alimentaire des fourmis comme analogie à la gestion d'approvisionnement anthropique. En milieu naturel, les fourmis peuvent être dans l'obligation à accumuler trop de protéines pour combler un manque de sucres, alors que l'Homme tend actuellement à consommer trop de ressources, soit au-delà de ses besoins pour avoir assez d'énergie. Afin d'atteindre un équilibre entre ses besoins (fourmis et ville) et les ressources, l'exploitation doit être ajustée. En effet, pour réussir à limiter la croissance, il s'avère nécessaire de considérer la relation entre les besoins et la disponibilité des ressources.

Concernant les essais réalisés avec les fourmis, les résultats ont démontré que les fourmis savent réguler l'entrée en sucres et en protéines selon les besoins et la disponibilité, et ce, de manière précise. Malgré l'inégalité du besoin dans la colonie, les fourrageuses ont réussi à répondre aux besoins des acides aminés allant jusqu'à deux acides aminés isolés. Aussi, lorsqu'elles sont confrontées à deux choix de qualité de sucres, elles sélectionnent la plus concentrée. Dans les traitements d'instabilité, la source de meilleure qualité peut apparaître une fois que le choix collectif est établi sur la source de moins bonne qualité. Malgré cela, les fourrageuses ont la capacité de modifier le choix collectif vers la source de meilleure qualité. Cette flexibilité de réponse découle des divers types de phéromones générées par les fourmis. Dès lors, ce système basique, généré par des simples individus, répond à des situations plus complexes.

En ce qui a trait à la tentative d'applicabilité du comportement des fourmis sur la gestion d'approvisionnement anthropique, la croissance de la ville peut être limitée par des relations qui encouragent le respect entre les besoins des individus et les disponibilités des ressources à proximité. Les limites territoriales de l'utilisation de l'environnement sont dirigées par les coûts de déplacement qui peuvent être plus grands que les bénéfices d'exploration et d'exploitation engendrés. L'utilisation est elle-même limitée selon le rapport entre la quantité disponible, la quantité transformée et la quantité demandée. L'application de l'analogie dans la modélisation est instaurée par des forces d'interactions avantagées et désavantagées selon ces rapports. Comme chez les fourmis, certaines interactions sont suggérées. Par exemple, lorsqu'il y a considération du niveau d'efficience, le coût de déplacement ne doit pas être trop élevé comparativement à la quantité exploitée.

Les résultats obtenus ont permis d'analyser plus profondément les interactions de la ville en fonction de l'environnement. À travers des lectures sur divers sujets concernant la problématique de cette étude, certaines conclusions et solutions supportent ces résultats. En effet, d'un point de vue du domaine de l'anthropologie, lorsque l'Homme se perçoit en harmonie avec la nature, le développement anthropique devrait l'être tout autant. Toutefois, cette relation entre l'humain et la nature n'est pratiquement pas présente dans les solutions face à la croissance de l'activité anthropique. Dans les actions amorcées par les sociétés modernes occidentales, beaucoup d'énergie est engagée dans la protection de façon préventive et curative de la biodiversité. Pourtant, encore dans les sociétés modernes, il n'y a pas de changement entrepris face aux relations entre humain et non-humain. Par conséquent, convertir la façon de composer le monde de l'Homme peut avoir un impact nouveau sur les sociétés actuelles en occident, car la modification de cosmologie n'engendre pas seulement une transformation de la vision face à l'autre, mais de toutes les actions qui s'en suivent.

ANNEXE I

INFORMATION SUR LINEPITHEMA HUMILE

Tableau-A-I Fiche descriptive de la fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*)

| Caractéristiques | <i>Linepithema humile</i> |
|-------------------------|---|
| Morphologie | Les ouvrières ont une petite taille qui varie entre deux et trois mm. Elles sont de couleur brun clair (AntWeb, 2018). |
| Alimentation | Elles sont généralistes omnivores. Elles pratiquent l'élevage de pucerons pour leur miellat (Grover <i>et al.</i> , 2007). Lorsque les fourmis communiquent une source de nourriture, c'est par recrutement de masse qu'elles attirent les autres. |
| Colonie | Elles forment une méga-colonie. Elles sont polygyynes, c'est-à-dire plusieurs reines au sein d'une même colonie et ce, sans hiérarchie (AntWeb, 2018). Elles sont plutôt mobiles selon les conditions extérieures (Heller et Gordon, 2006) |
| Cycle de vie | La méga-colonie se forme par scission de la colonie principale. Lorsque les reines sont fécondées, elles restent dans la colonie principale jusqu'à ce qu'elles soient trop nombreux. À ce moment, les nouvelles reines partent plus loin pour agrandir la colonie. Pour cette raison, bien qu'au départ elles aient des ailes, les femelles sexuées ne possèdent pas d'ailes (Passera et Keller, 1990). L'avantage est la diminution des pertes lors des vols nuptiaux. En contrepartie, il y a moins de brassage et elles ne peuvent pas aller loin. Chaque saison de reproduction, les anciennes reines sont exécutées pour les remplacer par les nouvelles reines (Keller <i>et al.</i> , 1989; Inou <i>et al.</i> , 2015). L'espérance de vie des ouvrières est d'environ sept mois. |
| Habitat | Elles aiment les milieux modifiés par l'Homme. Elles aménagent de longues pistes à l'extérieur et des galeries sous terre. Elles se retrouvent souvent sous les dalles au début de l'été pour capter de la chaleur. Fortement présentes en Amérique du sud, mais aussi aux États-Unis et en Europe, elles sont également présentes dans certains pays d'Afrique et d'Asie (AntWeb, 2018). |
| Température et Humidité | Elles peuvent vivre à des températures comprises entre 4 et 40 °C, mais préfèrent évoluer entre 20 et 30 °C. Leur activité est au plus fort à 26 °C (Abril <i>et al.</i> , 2010). Elles aiment les milieux plutôt humides. Elles ne font pas de diapause. |
| Points à noter | Elles sont très flexibles pour trouver le meilleur itinéraire vers une bonne source (Deneubourg <i>et al.</i> , 1990). |

ANNEXE II

VISUALISATION DU COMPTAGE ANTETHOC

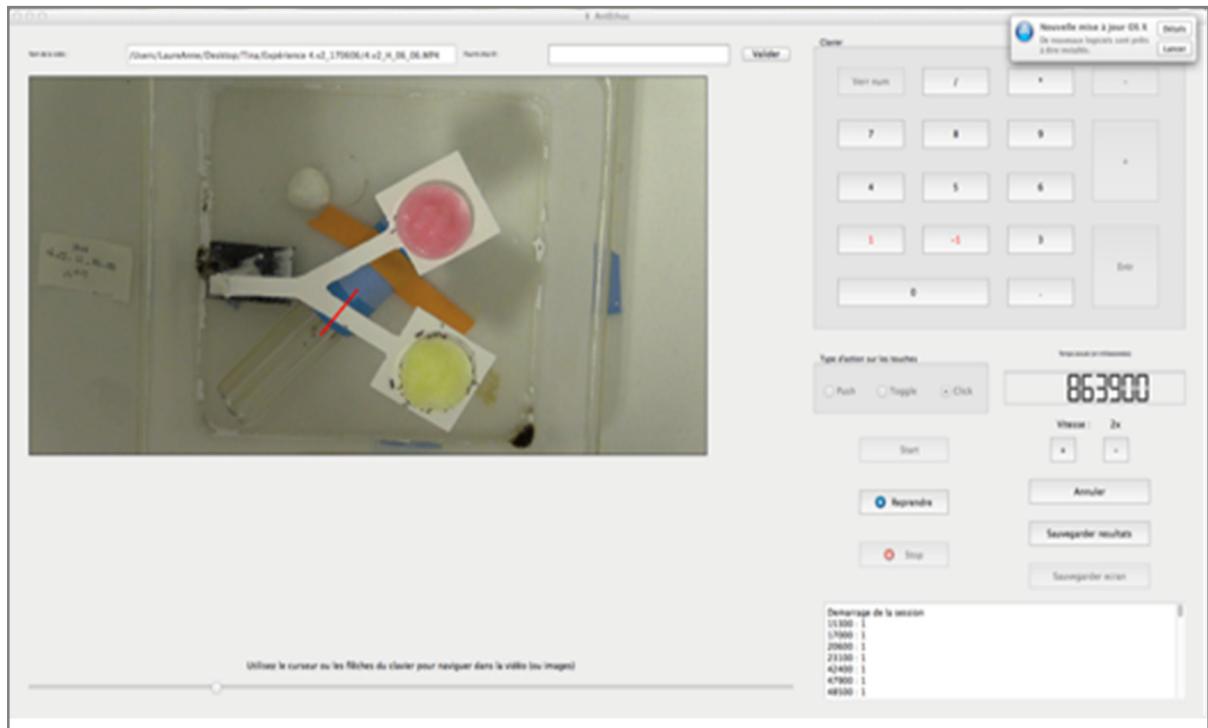


Figure-A-II Image du comptage des fourmis à l'aide du logiciel AntEthoc

ANNEXE III

SUPPORT AUX EXPÉRIMENTATIONS AVEC LES FOURMIS

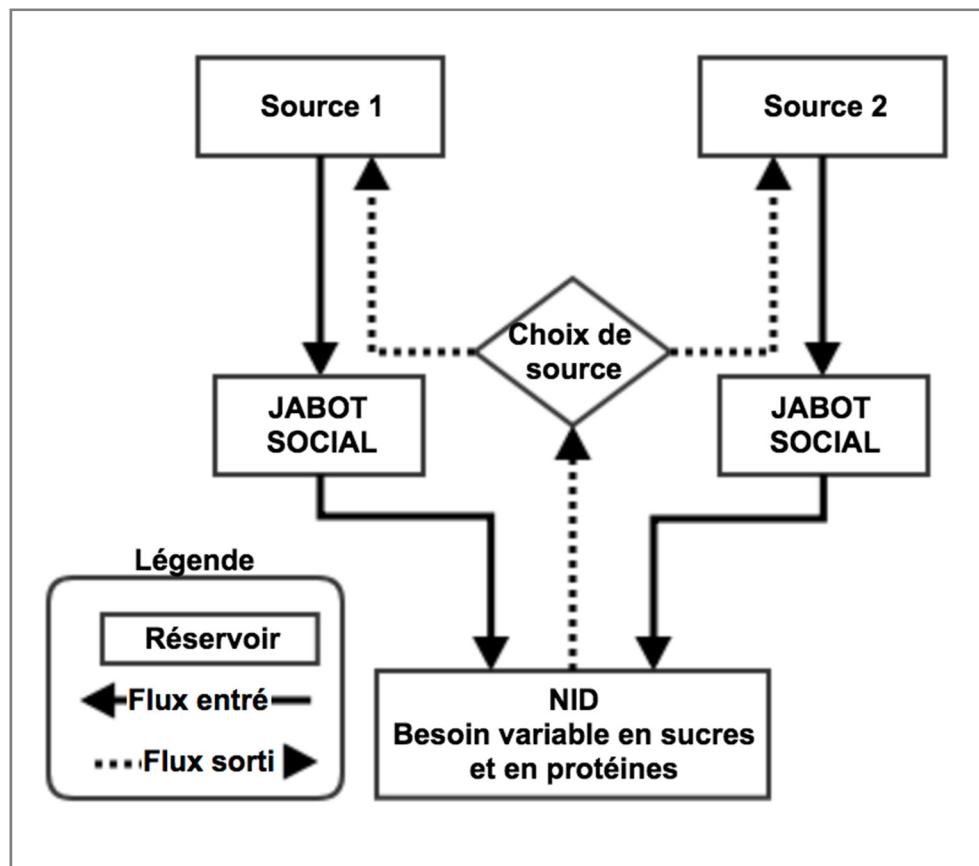


Figure-A-III 1 Schéma du choix entre deux sources en situation de carence

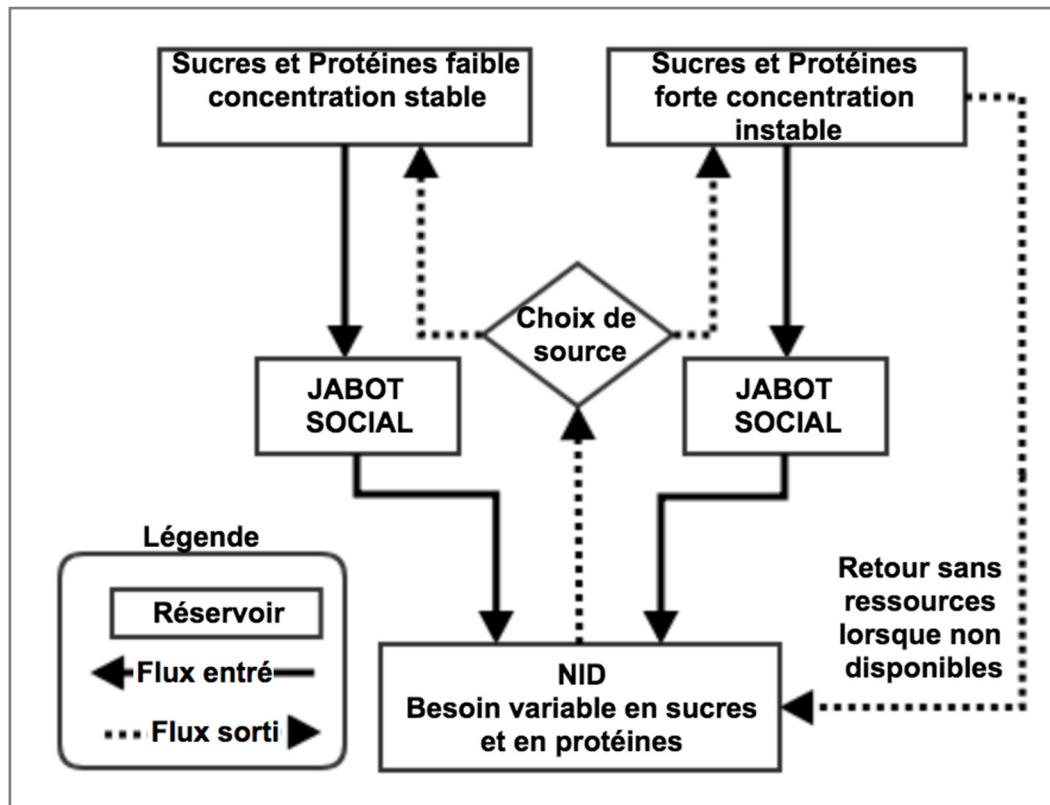


Figure-A-III 2 Schéma du choix entre deux sources en situation d'instabilité d'une source (Représentation de l'expérience D4)

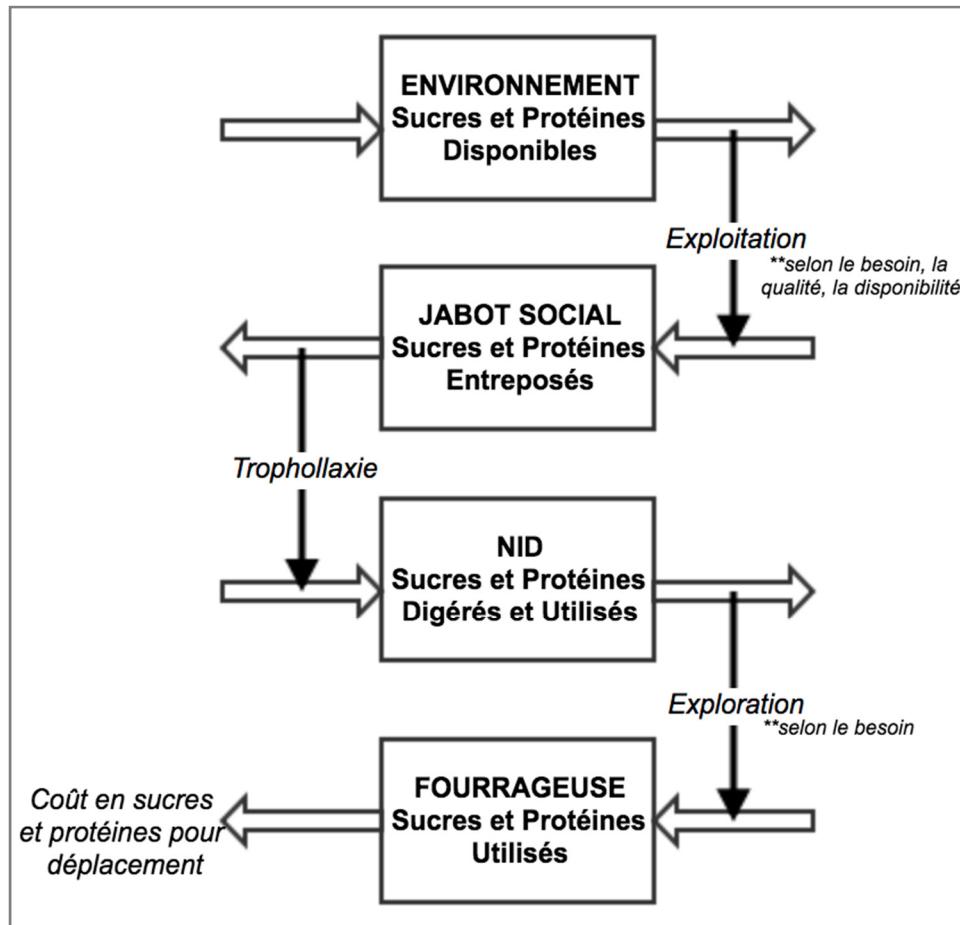


Figure-A-III 3 Flux des différents états de sucres et protéines dans la gestion d'approvisionnement d'une de la colonie de fourmis

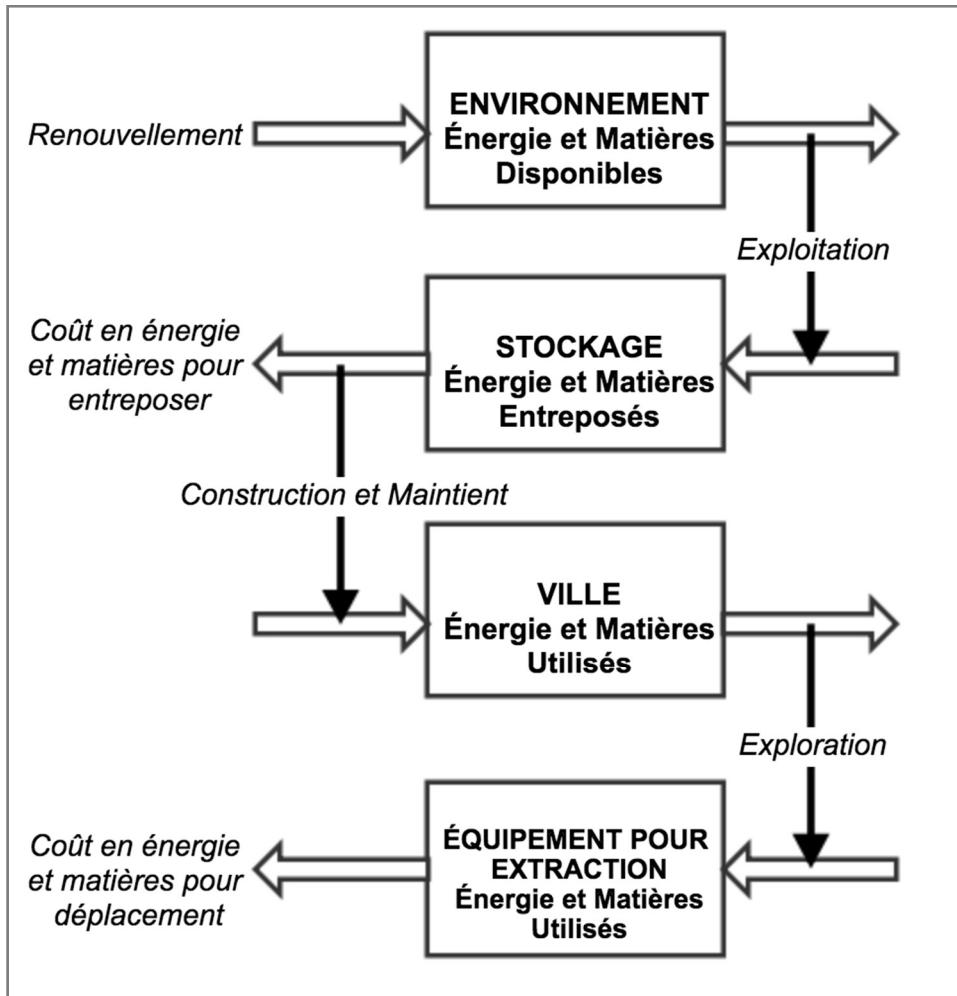


Figure-A-III 4 Flux des différents états d'énergie et de matières dans la gestion d'approvisionnement d'une ville

ANNEXE IV

SUPPORT À LA MODÉLISATION DE LA CROISSANCE VILLE

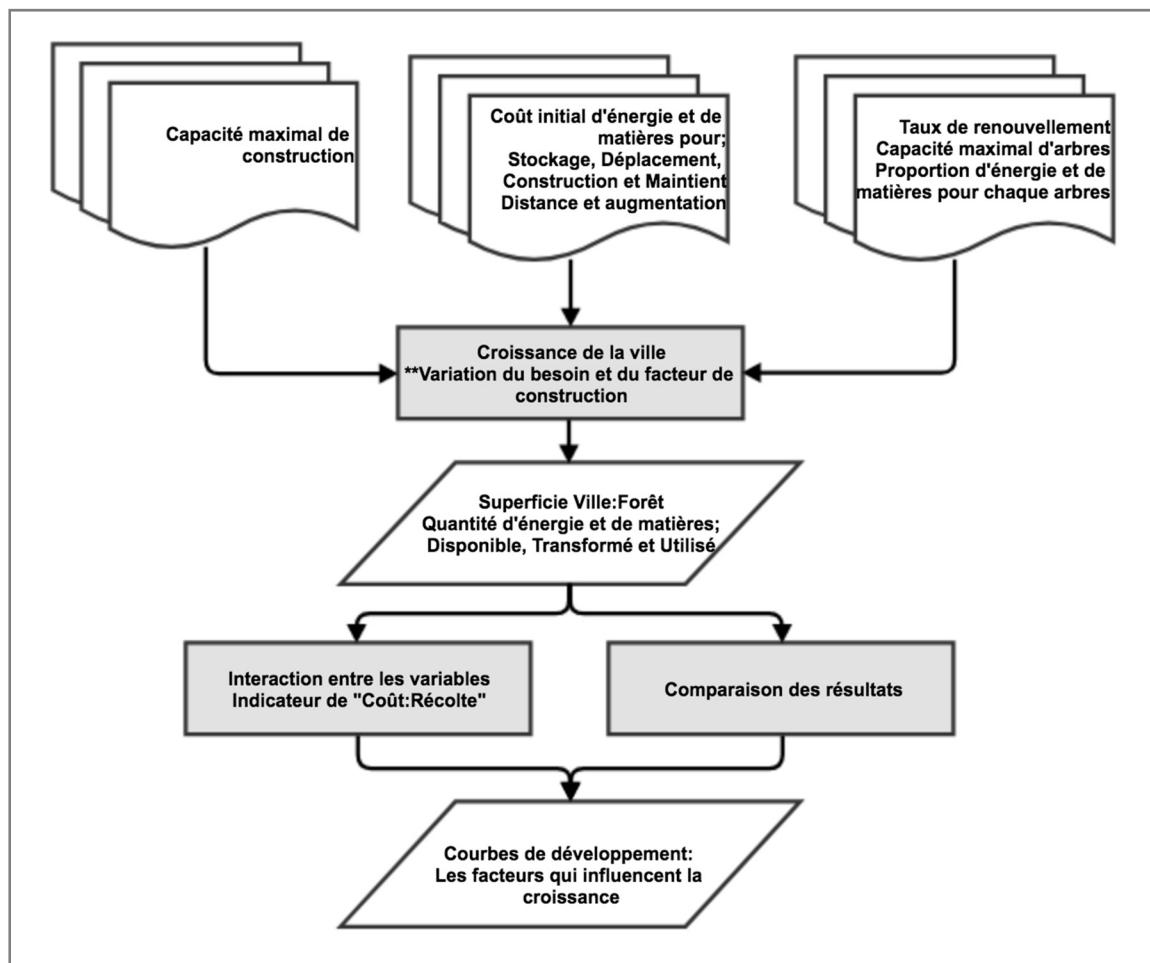


Figure-A-IV 1 Input, Process et Output pour la modélisation de la croissance de la ville

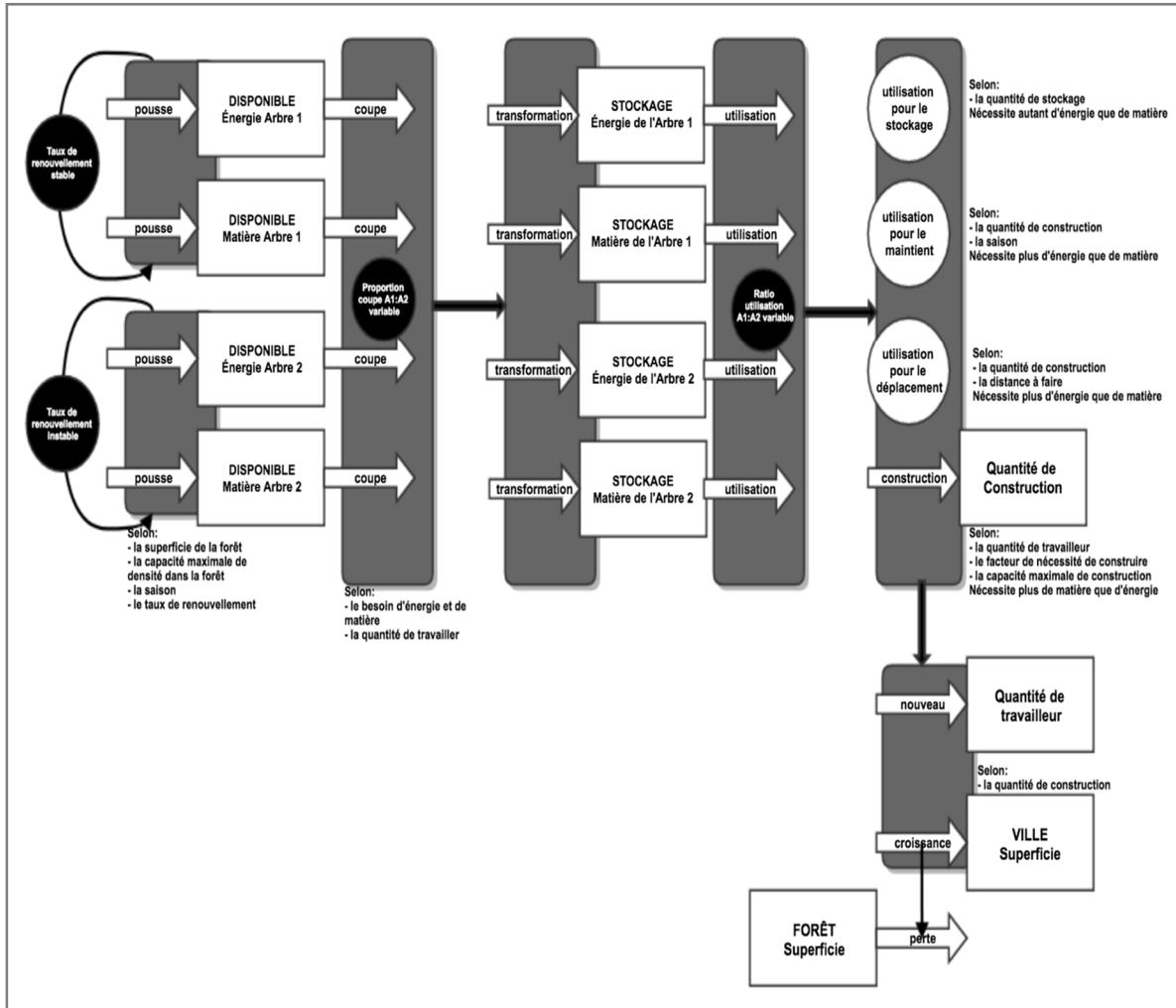


Figure-A-IV 2 Simplification de la modélisation du scénario ville

ANNEXE V

MODÉLISATION ANYLOGIC

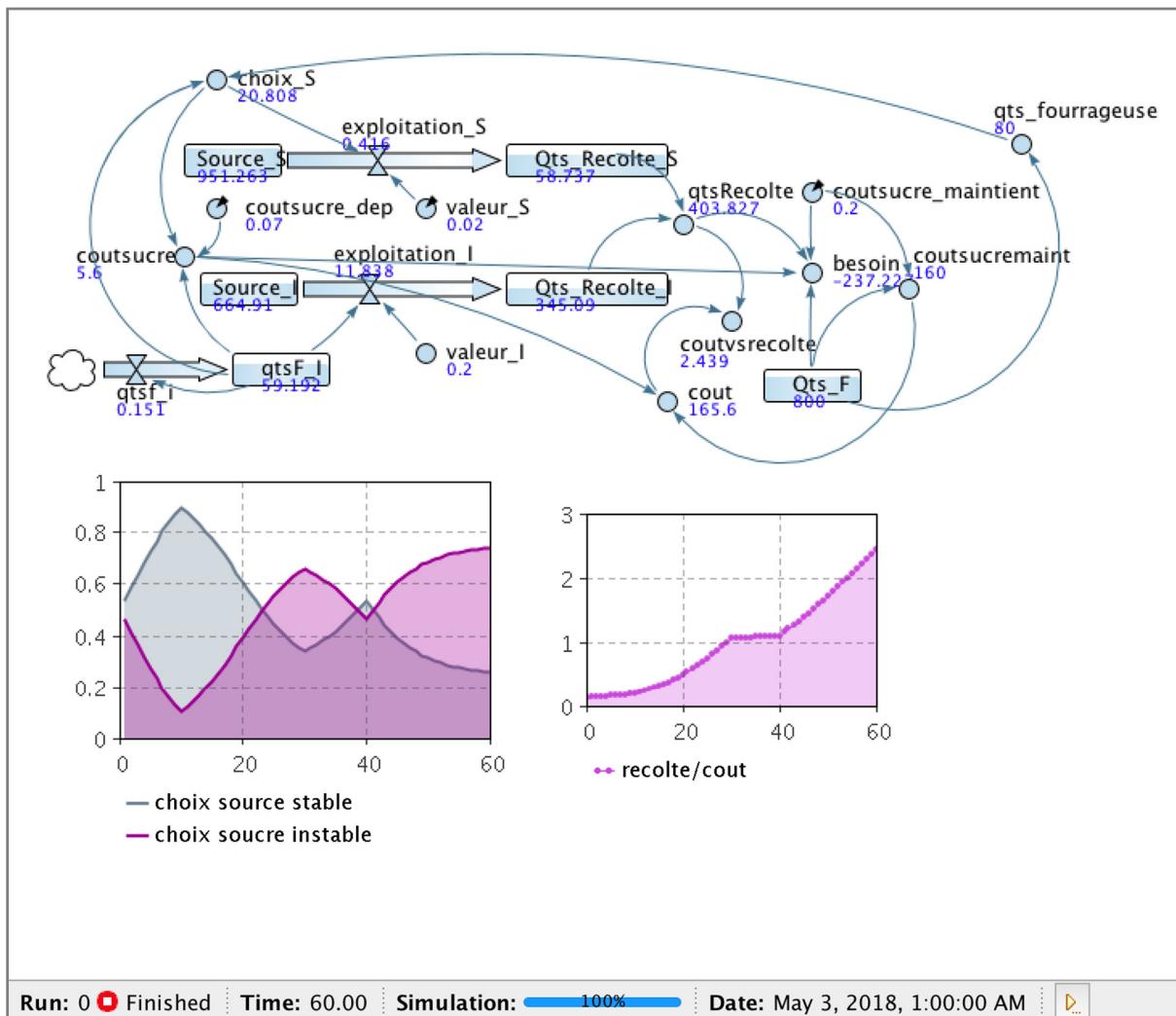


Figure-A-V 1 Schéma de la modélisation simplifiée des fourmis (expérience D4)

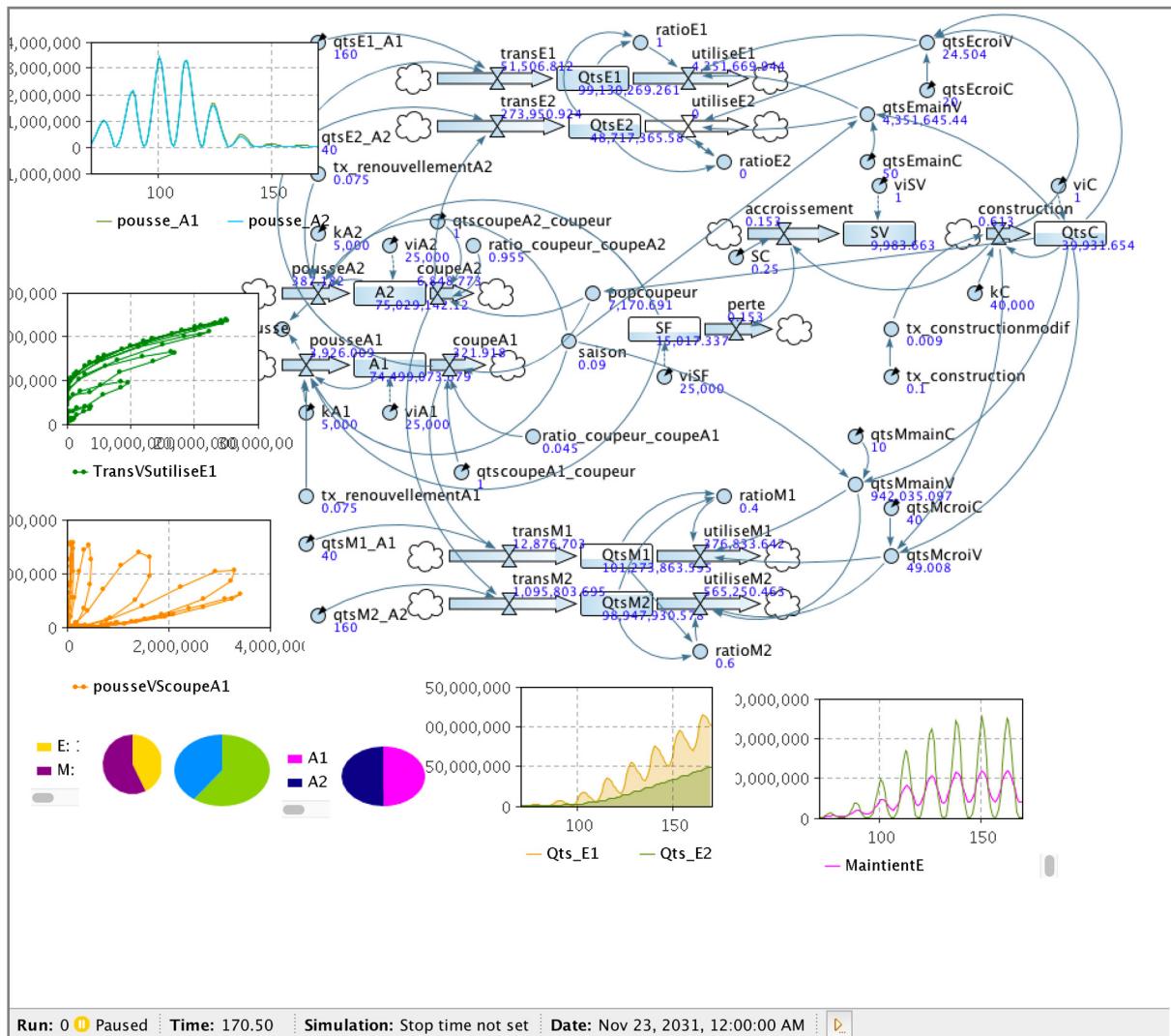


Figure-A-V 2 Schéma de la modélisation ville simplifié (scénario double perturbations)

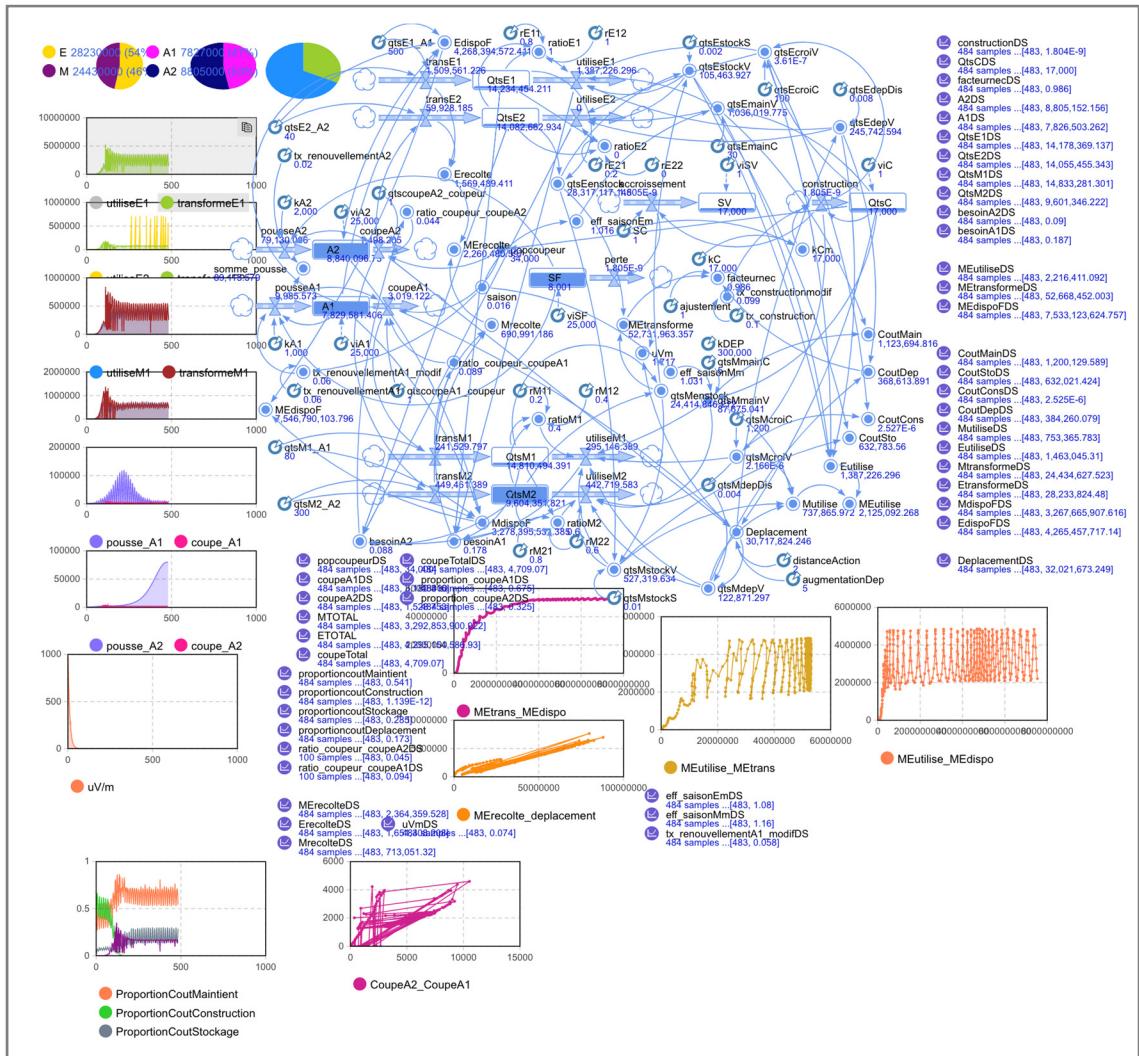


Figure-A-V 3 Schéma de la modélisation ville-fourmi (scénario double perturbations)

ANNEXE VI

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES SUR LES FOURMIS

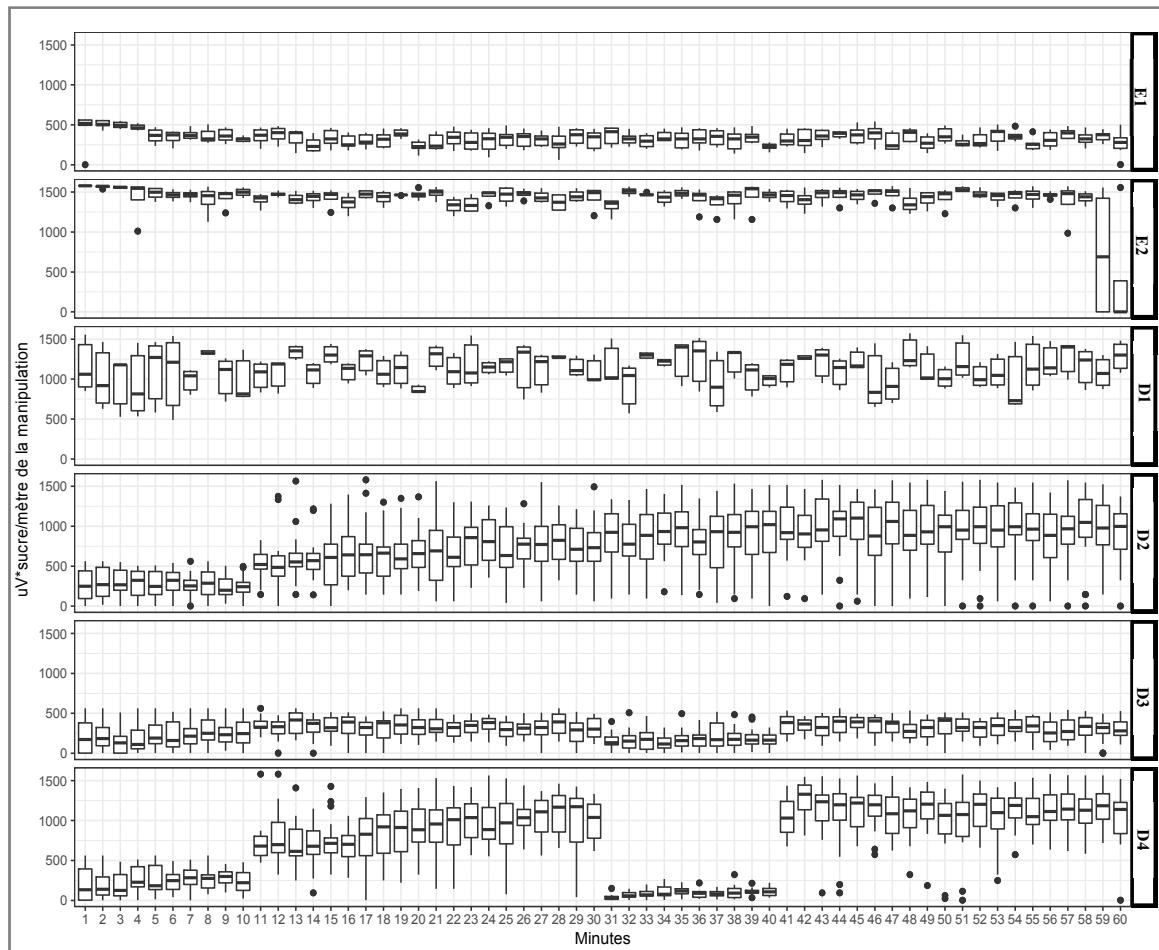


Figure-A-VI 1 Rapport d'efficience dans le temps pour les expériences D et E

Tableau-A-VI Synthèse des résultats sur les expérimentations
du comportement des fourmis sur les besoins (a),
la disponibilité (b) et statique (c)

| (a) | | | | | |
|------------|-------|----------|----------|--|--|
| Expérience | Essai | Source 1 | Source 2 | | |
| B1 | 1 | 54% | 46% | | |
| | 2 | 48% | 52% | | |
| B2 | 1 | 59% | 41% | | |
| | 2 | 62% | 38% | | |
| B3 | 1 | 86% | 14% | | |
| | 2 | 44% | 56% | | |
| | 3 | 20% | 80% | | |

| (b) | | Source | 10 | 30 | 40 | 60 |
|------------|--------------|--------|-----|-----|-----|----|
| Expérience | | | | | | |
| D1 | 1 (2%) | 45% | 36% | 32% | 36% | |
| | 2 (20%) | 55% | 64% | 68% | 64% | |
| D2 | 1 | 85% | 65% | 45% | 40% | |
| | 2 (instable) | 15% | 35% | 55% | 60% | |
| D3 | 1 | 80% | 70% | 70% | 70% | |
| | 2 (instable) | 20% | 30% | 30% | 30% | |
| D4 | 1 | 80% | 40% | 50% | 30% | |
| | 2 (instable) | 20% | 60% | 50% | 70% | |

| (c) | | 10 | 30 | 40 | 60 |
|------------|------|------|------|------|----|
| Expérience | | | | | |
| E1 | 2,5% | 1,6% | 1,1% | 0,8% | |
| E2 | 2,7% | 1,5% | 1,4% | 0,2% | |

ANNEXE VII

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES SUR LA MODÉLISATION

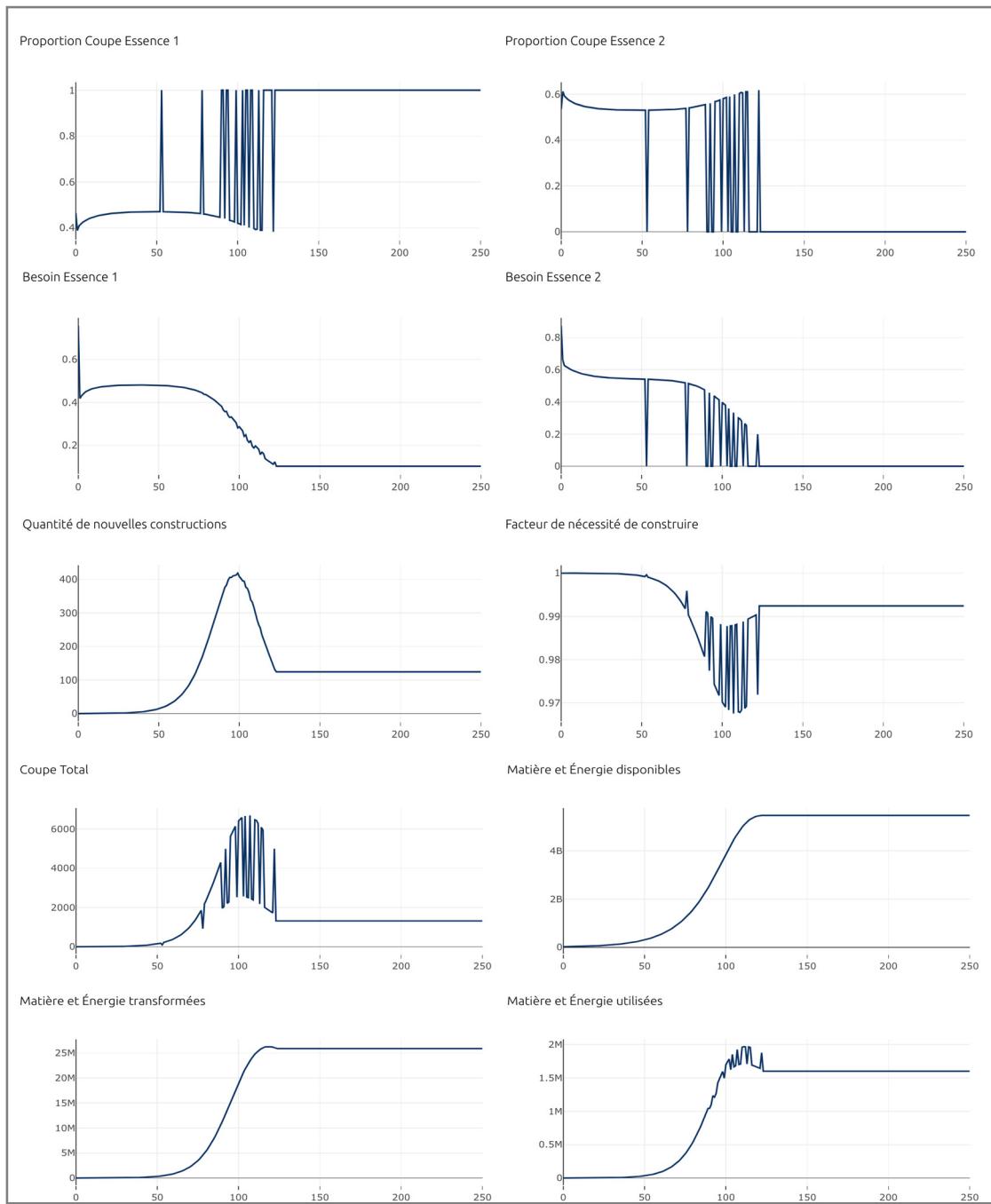


Figure-A-VII 1 Courbes de développements sans perturbations pour 250 pas de temps (mois)

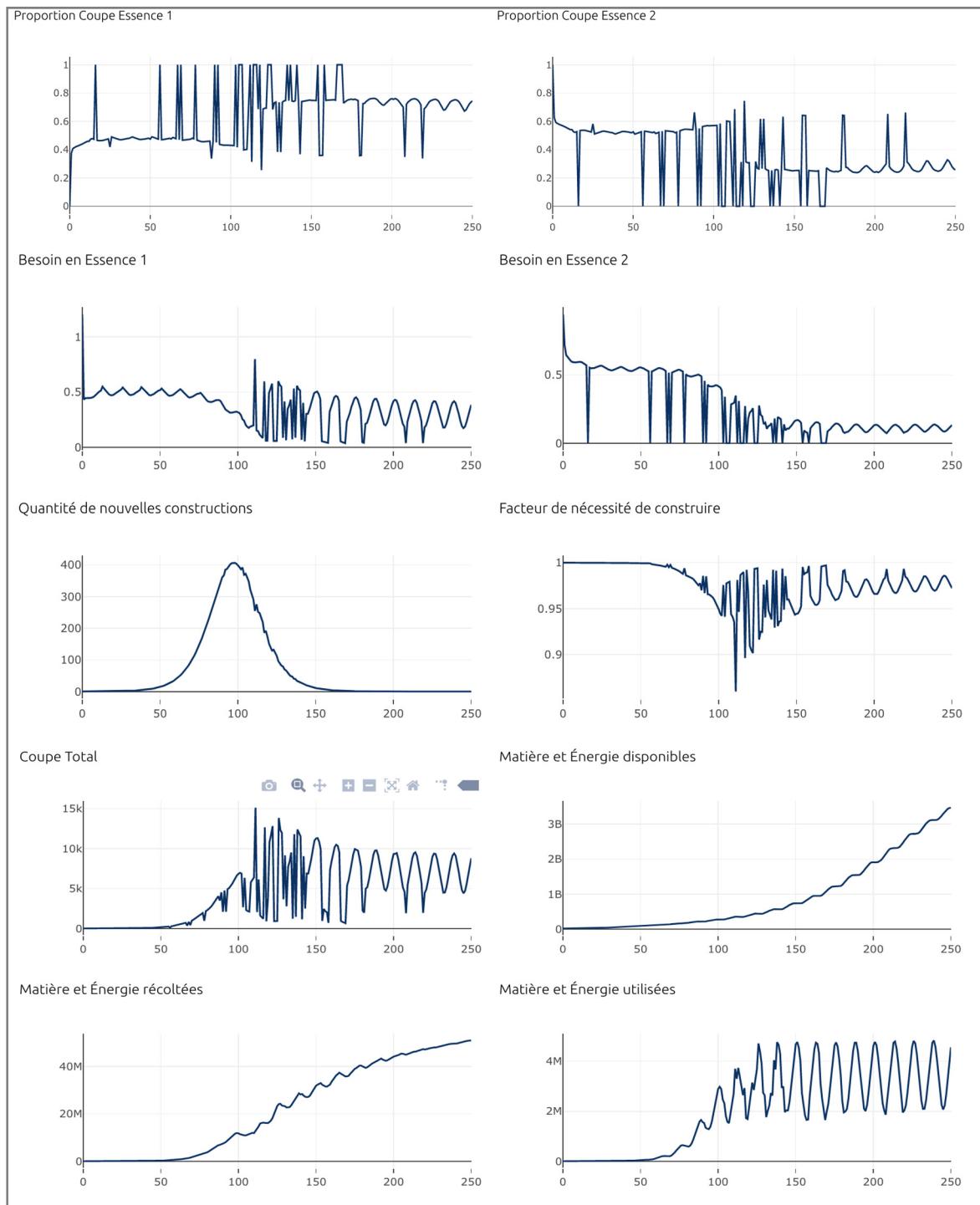


Figure-A-VII 2 Courbes de développements double perturbations pour 250 pas de temps (mois)

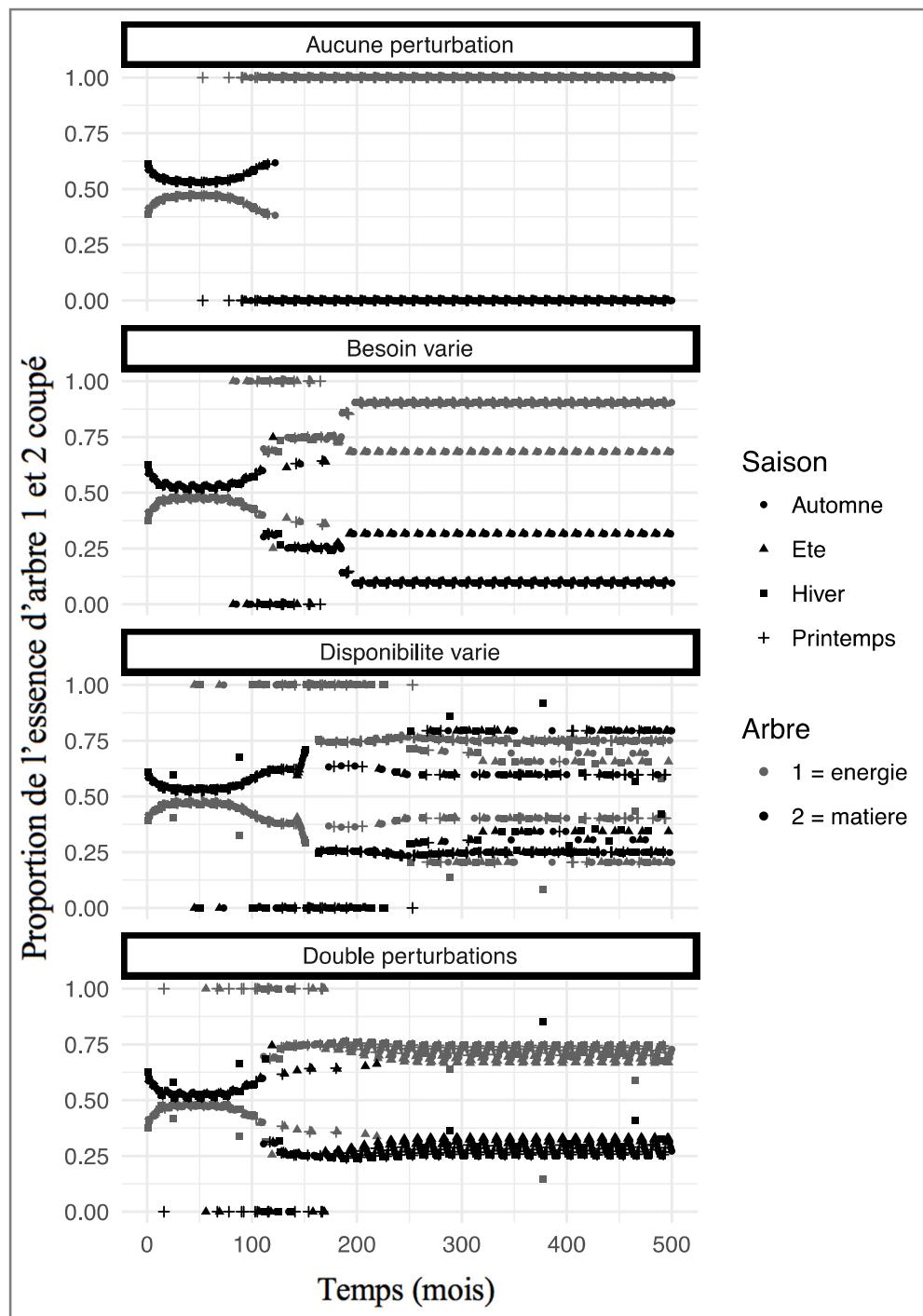


Figure-A-VII 4 Proportion de coupe selon les perturbations pour 500 pas de temps (mois)

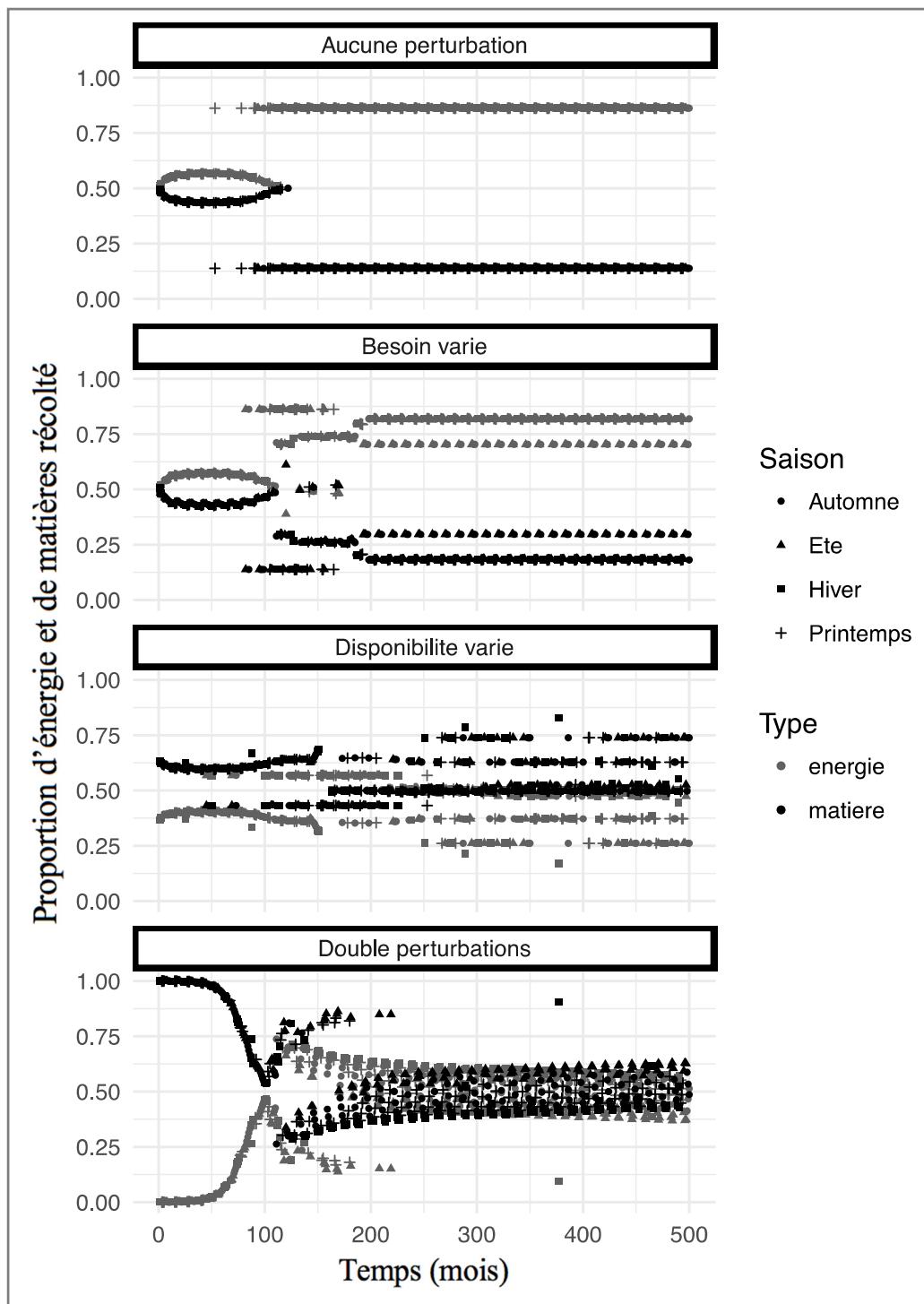


Figure-A-VII 5 Proportion d'énergie et de matières récolté selon la perturbation pour 500 pas de temps (mois)

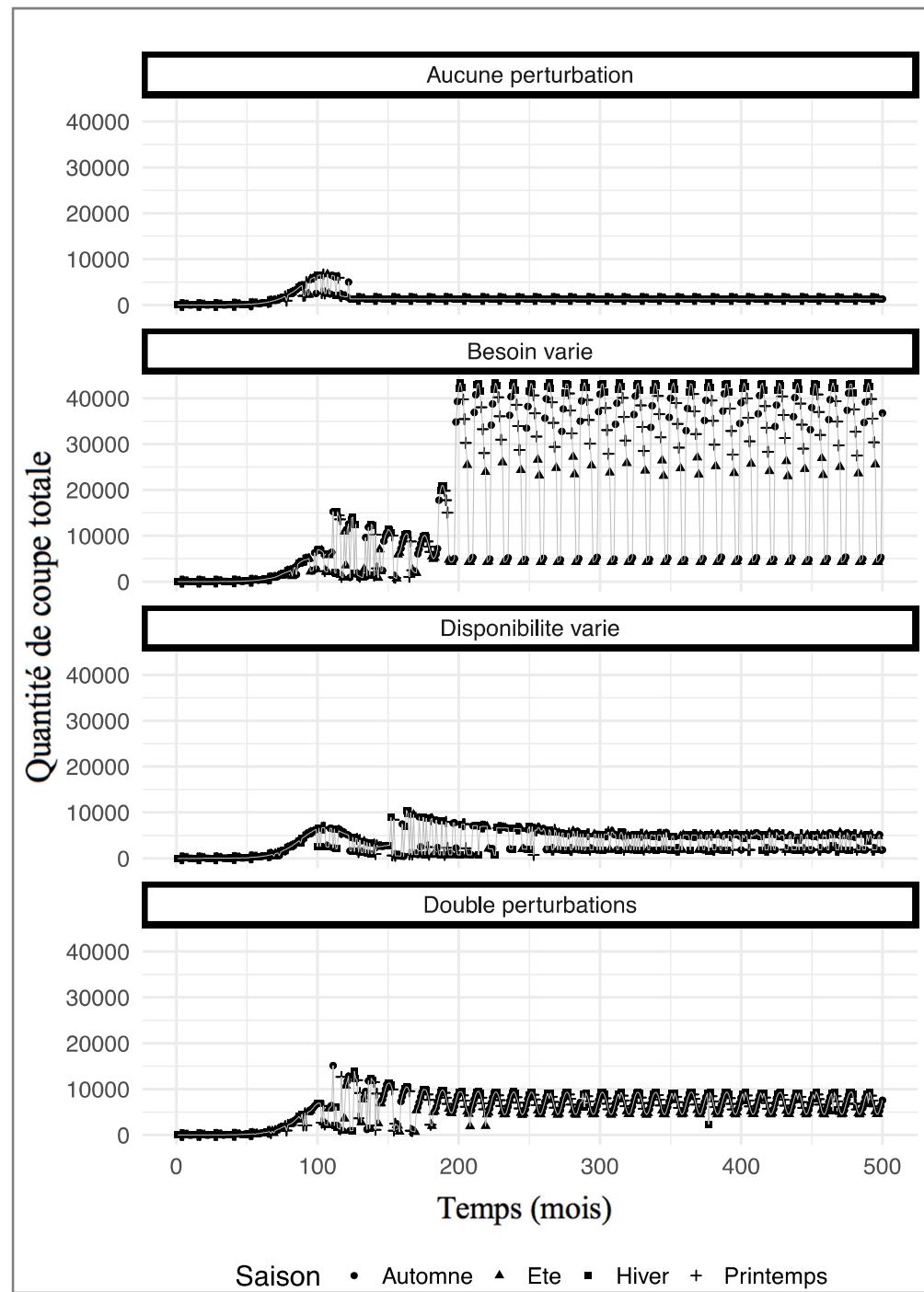


Figure-A-VII 6 Quantité de coupe totale selon les perturbations pour 500 pas de temps (mois)

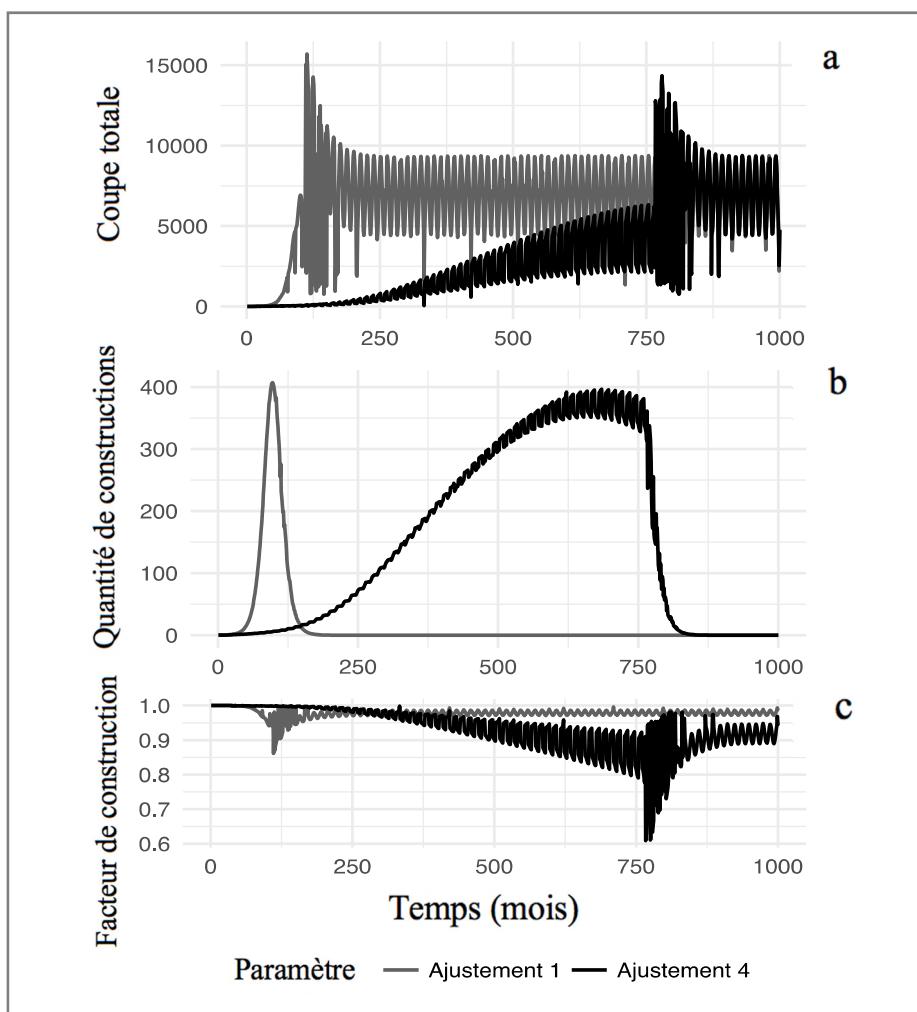


Figure-A-VII 7 Évolution du développement de la coupe totale (a), des nouvelles constructions (b) et du facteur de construction (c) selon l'ajustement du niveau d'importance du facteur de construction

BIBLIOGRAPHIE

- AntWeb, 2018. « Species : Linepithema humile ». In *AntWeb*. En ligne < <https://www.antweb.org/description.do?rank=species&genus=linepithema&name=humile>>. Consulté le 12 mars 2018.
- Abraham, Yves-Marie, Louis Marion et Hervé Philippe. 2011. *Décroissance versus Développement durable : Débat pour la suite du monde*. Québec : Les Éditions Écosociété, 237 p.
- Abril, Silvia, Jordi Oliveras et Crisanto Gomez. 2010. « Effect of temperature on the development and survival of the Argentine ant, *Linepithema humile* ». *Journal of Insect Science*, vol. 10, no 1, p. 1-12
- Aquaportal. 2015. « Efficience ». In *Aquaportal*. En ligne. < <https://www.aquaportal.com/definition-6268-efficiency.html>>. Consulté le 20 septembre 2017.
- Arganda, Sara, Alfonso Pérez-Escudero et Gonzalo G. de Polavieja. 2012. « A common rule for decision making in animal collectives across species ». *PNAS*, vol. 109, n° 50, 20508-20513.
- Arganda, Sara, Stamatios C. Nicolis, A. Perochain, C. Péchabaudens, Gérard Latil et Audrey Dussutour. 2014. « Collective choice in ants: The role of protein and carbohydrates ratios ». *Journal of Insect Physiology*, vol. 69, p. 19-26.
- Arganda, Sara, Sofia Bouchebti, Sepideh Bazazi, Sophie Le Hersan, Camille Puga, Gérard Latil, Stephen J. Simpson et Audrey Dussutour. 2017. « Parsing the life-shortening effects of dietary protein: effects of individual amino acids ». *Proceedings of The Royal Society*, vol. 284, n° 1846, 20162052.
- Bazazi, Sepideh, Sara Arganda, Mathieu Moreau, Raphael Jeanson et Audrey Dussutour. 2016. « Responses to nutritional challenges in ant colonies ». *Animal Behaviour*, vol. 111, p. 235-249.
- Beckers, Ralph, Jean-Louis Deneubourg, Simon Goss et Jean-Michel Pasteels. 1990. « Collective decision making through food recruitment ». *Insectes sociaux*, vol. 37, n° 3, p. 258-267.
- Beckers, Ralph, Jean-Louis Deneubourg et Simon Goss. 1992. « Trail laying behaviour during food recruitment in the ant *Lasius niger* (L.) ». *Insectes Sociaux*, vol. 39, n° 1, p. 59-72.

- Beckers, Ralph, Jean-Louis Deneubourg et Simon Goss. 1993. « Modulation of trail laying in the ant *Lasius niger* (Hymenoptera : Formicidae) and its role in the collective selection of a food source ». *Journal of Insect Behavior*, vol. 6, n° 6, p. 751-759.
- Bédard, Mario, Jean-Pierre Augustin et Richard Desnoilles. 2012. *L'imaginaire géographique: Perspectives, pratiques et devenirs*. Coll. « Géographie contemporaine ». Québec : Presses de l'Université du Québec, 412 p.
- Benyus, Janine M. 2011. *Biomimetisme : Quand la nature inspire des innovations durables*. Paris : Rue de l'échiquier, 407 p.
- Betts, Matthew J. et Robert B. Russell. 2003. « Amino Acid Properties and Consequences of substitutions ». In *Bioinformatics for Geneticists*, sous la dir. de Barnes, Michael R. et Ian C. Gray, p. 289-314, Angleterre: John Wiley & Sons, Ltd.
- Biesmeijer, Jacobus Christiaan et Han de Vries. 2001. « Exploration and exploitation of food sources by social insect colonies: a revision of the scout-recruit concept ». *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 49, p. 89-99.
- Bogatyreva, Olga. 2002. « Management in ant colonies: Natural analogue of the resolution of social contradictions using TRIZ tools ». *Triz Future*, p. 17-27.
- Botero, Giovanni. 2014. *Des causes de la grandeur des villes*. Paris : Éditions Rue D'Ulm, 191 p.
- Bottinelli, Arianna, E. van Wilgenburg, David J.T. Sumpter et Tanya Latty. 2015. « Local cost minimization in ant transport networks : from small-scale data to large-scale trade-offs ». *The journal of The Royal Society Interface*, vol. 12, p. 1-13.
- Burgel, Guy. 2006. *La revanche des villes*. Paris : Hachette Littératures, 233 p.
- Camazine, Scott, Jean-Louis Deneubourg, Nigel R. Franks, James Sneyd, Guy Theraulaz et Eric Bonabeau. 2001. *Self-organization in Biological Systems*. Oxford: Princeton University Press, 538 p.
- Cassill, Deby Lee et Walter R. Tschinkel. 1999. « Regulation of diet in the fire ant, *Myrmica rubra* ». *Journal of Insect Behavior*, vol. 12, n° 3, p. 307-328.
- Charmes, Éric et Taoufik Souami. 2009. Villes rêvées, villes durables?. Paris : Éditions Gallimard.
- CNRM. 2014. « Climat urbain ». In *Centre National de Recherches Météorologiques*. En ligne. <<https://www.UMR-CNRM.fr/spip.php?rubrique134>>. Consulté le 20 septembre 2017.

- Cook, Z., Daniel W. Franks et Elva J.H. Robinson. 2013. « Exploration versus exploitation in polydomous ant colonies ». *Journal of theoretical biology*, vol. 323, p. 49-56.
- Conradt, Larissa et Christian List. 2009. « Descisions in humans and animals: a survey ». *Philisophical Transactions of The Royal Society B*, vol. 364, p.719-742.
- Czaczkes, Tomer J., Christoph Grüter et Francis L.W. Ratnieks. 2015. « Trail Pheromone: An integrative view of their role in social insect colony organization ». *Annual Review of Entomology*, vol. 60, p. 581-599.
- D'Alisa, Giacomo, Federico Demaria et Giorgos Kallis. 2015. *Degrowth : Vocabulary for a New Era*. Londre: Routledge, 371 p.
- Deuneubourg, Jean-Louis et Simon Goss. 1989. « Collective patterns and decision-making ». *Ethology Ecology Evolution*, vol. 1, n°4, p. 295-31.
- Deneubourg, Jean-Louis, Serge Aron, Simon Gross et Jacques Pasteels. 1990. « The self-Organizing Exploratory Pattern of the Argentine Ant ». *Journal of Insect Behavior*, vol. 3, n° 2, p. 159-168.
- Descola, Philipe. 2005. *Par-delà nature et culture*. Paris : Éditions Gallimard, 578 p.
- Detrain, Claire et Jacques Prieur. 2014. « Sensivity and feeding efficiency of the black garden ant *Lasius niger* to sugar resources ». *Journal of Insect Physiology*, vol. 64, p. 74-80.
- Devigne, Cédric et Claire Detrain. 2002. « Collective exploration and area marking in the ant *Lasius niger* ». *Insectes Sociaux*, vol. 49, p. 357-362.
- Devigne, Cédric et Claire Detrain. 2006. « How does food distance influence foraging in the ant *Lasius niger*: the importance of home-range marking ». *Insecte Sociaux*, vol. 53, p. 46-55.
- Dufluot, Cécile. 2013. « Construire là où sont les besoins ». En ligne. <<http://www.constructif.fr/>>. Consulté le 06 octobre 2017.
- Dussutour, Audrey, Jean-Louis Deneubourg et Vincent Fourcassié. 2005. « Amplification of individual preferences in a social context: the case of the wall-following in ants ». *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, vol. 272, p. 705-714.
- Dussutour, Audrey et Stephen J. Simpson. 2008a. « Description of a simple synthetic diet for studying nutritional responses in ants ». *Insectes sociaux*, vol. 55, n° 5, p. 329-333.
- Dussutour, Audrey et Stephen J. Simpson. 2008b. « Carbohydrate regulation in relation to colony growth in ants ». *The Journal of Experimental Biology*, vol. 211, p. 2224-2232.

- Dussutour, Audrey, Madeleine Beekman, Stamatis C. Nicolis et B. Meyer. 2009a. « Noise improves collective decision-making by ants in dynamic environments ». *Proceedings of The Royal Society*, vol. 276, p. 4353-4361.
- Dussutour, Audrey, Stamatis C. Nicolis, Grace Shephard, Madeleine Beekman et David J.T Sumpter. 2009b. « The role of multiple pheromones in food recruitment by ants ». *The journal of Experimental Biology*, vol. 212, p. 2337-2348.
- Dussutour, Audrey et Stephen J. Simpson. 2009. « Communal Nutrition in Ants ». *Current Biology*, vol. 19, p. 1-5.
- Dussutour, A., et David J.T Sumpter. 2012. « Ant workers die young and colonies collapse when fed a high-protein diet ». *Proceedings of The Royal Society*, vol. 279, n° 1737, p.2402-2408.
- Dussutour, Audrey et Stamatis C. Nicolis. 2013. « Flexibility in collective decision-making by ant colonies: Tracking food across space and time ». *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 50, p. 32-38.
- Dorigo, Marco et Christian Blum. 2005. « Ant colony optimization theory, A survey ». *Theoretical Computer Science*, vol. 344, n° 5, p. 243-278.
- Flanagan, Tatiana P., Noa M. Pinter-Wollman, Melanie E. Moses et Deborah M. Gordon. 2013. « Fast and Flexible: Argentine Ants Recruit from Nearby Trails ». *Plos One*, vol. 8, n° 8, e70888.
- Francoeur, André. 2010. « Les fourmis du Québec». En ligne. 4 p. <<http://entomofaune.qc.ca/entomofaune/fourmis/FourmisPublications/FourmisQ.ListeTaxons.pdf>>. Consulté le 20 septembre 2017.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge : Harvard University Press, 472 p.
- Giraud, Tatiana, Jes S. Pedersen et Laurent Keller. 2002. « Evolution of supercolonies: The Argentine ants of southern Europe ». *PNAS*, vol. 99, n° 9, p. 6075-6079
- Glaeser, Edward. 2011. *Triumph of the City. How Our Greatest Invention Make Us Richer, Smarter, Greener, Healthier and Happier*. USA: The Penguin Press, 364 p.
- Gouvernement du Québec. 2017. Panorama des régions du Québec. Institut de la statistique Québec, 193 p.
- Grover, Crystal D., Adam D. Kay, Jessica A. Monson, Thomas C. Marsh et David A. Holway. 2007. « Linking nutrition and behavioural dominance: carbohydrate scarcity limits

- aggression and activity in Argentine ants ». *Proceedings of the royal society B*, vol. 274, n° 1628, p. 2951-2957
- Grüter, Christoph, Diane Maitre, Alex Blakey, Rosemary Cole et Francis L.W. Ratnieks. 2015. « Collective decision making in a heterogeneous environment, *Lasius niger* colonies preferentially forage at easy to learn locations ». *Animal Behaviour*, vol. 104, p. 189-195.
- Harris, R.J. 2002. *Potential impact of the Argentine ant (*Linepithema humile*) in New Zealand and options for its control*. Nouvelle-Zélande: Département of Conservation, 36 p.
- Heller, Nicole E. et Deborah M. Gordon. 2006. « Seasonal spatial dynamics and causes of nest movement in colonies of the invasive Argentine ant (*Linepithema humile*) ». *Ecological Entomology*, vol. 3, n° 5, p. 499-510.
- Hölldobler, Bert et Edward O. Wilson. 1990. *The Ants*. Cambrige: Springer-Verlag, 732 p.
- Holway, David A. 1999. « Competitive mechanisms underlying the displacement of native ants by the invasive Argentine ant ». *Ecology*, vol. 80, n° 1, p. 238-251.
- Humain-Lamoure, Anne-Lise et Antoine Laporte. 2017. *Introduction à la géographie urbaine*. France : Armand Colin, 206 p.
- IEA. 2017. « Key world energy statistics ». En ligne. <<http://www.iea.org/statistics/>>. Consultée le 15 mai 2018.
- Inoue, Maki N. Fuminori Ito et Koichi Goka. 2015. « Queen execution increases relatedness among workers of the invesive Argentine ant, *Linepithema humile* ». *Ecology and Evolution*, vol. 5, n° 18, p. 4098-4107
- Jacques, Guy. 2015. *Oser la décroissance*. Paris : L'Harmattan, 221 p.
- Jolivet, Violaine et Marie-Noëlle Carré. 2017. « Métabolisme urbain et quartiers péricentraux dans la métropolisation. L'exemple du quartier de Saint-Michel à Montréal ». *Cybergeo : European Journal of Geography*. En ligne. Document 816. <<http://journals.openedition.org/cybergeo/28067>>. Consulté le 12 mars 2018.
- Kamal-Chaoui, Lamia et Marissa Plouin. 2012. *Villes et croissance verte : Étude de cas de la région Paris/Ile-de-France*. Paris : Éditions OCDE, 149 p.
- Keller, Laurent et Élisabeth Gordon. 2009. *The lives of ants*. Angleterre : Oxford University Press, 252 p.

- Keller, Laurent, Luc Passera et Jean-Pierre Suzzoni. 1989. Queen execution in the Argentine ant, *Iridomyrmex humilis*. *Physiological Entomology*, vol. 14, n° 2, p. 157-163
- La Banque Mondiale. 2018. « Population urbaine et rurale ». En ligne. <<http://www.banquemondiale.org/>>. Consulté le 31 juillet 2018.
- Lach, Lori, Catherine L. Parr et Kristi L. Abbott. 2010. *Ant Ecology*. New York: Oxford University Press, 429 p.
- Lanan, Michele. 2014. « Spatiotemporal resource distribution and foraging strategies of ants (Hymenoptera: Formicidae) ». *Myrmecological News*, vol. 20, p. 53-70.
- Lapointe, Alain. 2003. *Croissance des villes et économie du savoir: Une perspective nord-américaine*. Québec : Les Presses de l'Université de Laval, 188 p.
- Latty, Tanya, Kai Ramsch, Kentaro Ito, Toshiyuki Nakagaki, David J.T. Sumpter, Martin Middendorf et Madeleine Beekman. 2010. « Structure and formation of ant transportation networks ». *The journal of The Royal Society Interface*, p. 1-9.
- Latty, Tanya et Madeleine Beekman. 2013. « Keeping track of changes: the performance of ant colonies in dynamic environments». *Animal Behaviour*, vol. 85, p. 637-643.
- Latty, Tanya, Michael J. Holmes, James C. Makinson et Madeleine Beekman. 2017. «Argentine ants (*Linepithema humile*) use adaptable transportation networks to track changes in resource quality ». *Journal of Experimental Biology*, vol. 220, p. 686-694.
- Legault, Albert. 2007. *Pétrole Gaz et les autres énergies*. Paris : Éditions Technip, 308 p.
- Le Néchet, Florent. 2015. *De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain*. Cybergeo : European Journal of Geography, 40 p.
- Maddison, Angus. 2001. *L'économie Mondiale : Une perspective millénaire*. Centre de développement de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques, 402 p.
- Mailleur, Anne-Catherine, A. Buffin, Claire Detrain et Jean-Louis Deneubourg. 2011. «Recruitment in starved nests, the role of direct and indirect interactions between scouts and nestmates in the ant *Lasius niger* ». *Insectes sociaux*, vol. 58, p. 559-567.
- Marchand, Catherine. 2012. *La ville de demain*. Rapport de recherche réalisé pour le compte du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, 282.

- McGlone, Darby. 2015. « Is Holistic City Design the Answer to Urban Population Growth ?». In *Planet Forward*. En ligne < <https://www.planetforward.org/idea/is-holistic-city-design-the-answer-to-urban-population-growth> >. Consulté le 7 mai 2018.
- McGrannachan, Chris M. et Philip J. Lester. 2012. « Temperature and starvation effects on food exploitation by Argentine ants and native ants in New Zealand ». *Journal of Applied Entomology*, vol. 137, p. 550-559.
- Mlot, Nathan J., Craig A. Tovey et David L. Hu. 2011. « Fire ants self-assemble into waterproof rafts to survive floods ». *PNAS*, vol. 108, n° 19, p. 7669-7673.
- Mongin, Olivier. 2005. *La condition Urbaine: La ville à l'heure de la mondialisation*. Paris : Éditions Du Seuil, 330 p.
- Monmarch, Nicolas. 2000. « Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation ». Thèse de docteur en informatique, Tours, Université de Tours, 216 p.
- Paulet, Jean-Pierre. 2009. *Géographie Urbaine*. France : Armand Colin, 81 p.
- Passera, Luc et Serge Aron. 2005. *Les fourmis : comportement, organisation sociale et évolution*. Ottawa : Les Presses scientifiques du CNRC, 480 p.
- Passera, Luc et Laurent Keller. 1990. Loss of mating flight and shift in the pattern of carbohydrate storage in sexuals of ants (Hymenoptera; Formicidae). *Journal of Comparative Physiology B*, vol. 160, p. 207-211
- Perna, Andrea, Boris Granovskiy, Simon Garnier, Stamatios C. Nicolis, Marjorie Labédan, Guy Theraulaz, Vincent Fourcassié et David J.T. Sumpter. 2012. « Individual Rules for Trail Pattern Formation in Argentine Ants (Linepithema humile) ». *PLoS Comput Biol*, vol. 8, n° 7, e1002592.
- Piéchaud. Jean-Pierre. 2013. « La ville, l'habitat, l'aménagement du territoire ». *Encyclopédie du développement durable*, n° 212, p. 1-11.
- Portha, Stéphane, Jean-Louis Deneubourg et Claire Detrain. 2002. « Self-organized asymmetries in ant foraging: a functional response to food type and colony needs ». *Behavioral Ecology*, vol. 13, n° 6, p. 776-781.
- Portha, Stéphane, Jean-Louis Deneubourg et Claire Detrain. 2004. « How food type and brood influence foraging decisions of *Lasius niger* scouts ». *Animal Behaviour*, vol. 68, n° 1, p. 115-122.
- Primack, Richard B. 2008. *A Primer of Conservation Biology*. Sunderland: Sinauer Associates Inc., 351 p.

- Ratnieks, Francis L.W. 2008. « Biomimicry: Further Insights from Ant Colonies? ». *Bio-inspired Computing and Communication*, vol. 5151, p. 58-66.
- Reid, Chris R., David J.T. Sumpter et Madeleine Beekman. 2011. « Optimisation in natural system: Argentine ants solve the Towers of Hanoi ». *The journal of Experimental Biology*, vol. 214, p. 50-58.
- Reid, Chris R., Matthew J. Lutz, Scott Powell, Albert B. Kao, Iain D. Couzin et Simon Garnier. 2015. « Army ants dynamically adjust living bridges in response to a cost-benefit trade-off ». *PNAS*, vol. 112, n° 49, p. 15113-15118.
- Rickelfs, Robert E. et Gary L. Miller. 2005. *Écologie*. Bruxelles: Éditions De Boeck Université, 821 p.
- Robinson, Elva J.H., Duncan E. Jackson, Mike Holcombe et Francis L.W. Ratnieks. 2005. « Insect communication: 'No entry' signal in ant foraging ». *Nature*, vol. 438, n° 7076, p. 442.
- Sakata, Hiroshi et Noboru Katayama. 2001. « Ant defence system: A mechanism organizing individual responses into efficient collective behavior ». *Ecological Research*, vol. 6, n° 16, 395-403.
- Schultz, Ted R. 2000. « In search of ant ancestors ». *PNAS*, vol. 97, n° 26, 14028-14029.
- Simpson, Stephen J. et David Raubenheimer. 2012. *The nature of Nutrition: A unifying Framework from Animal Adaptation to Human Obesity*. Oxford: Princeton University Press, 239 p.
- Simpson, Stephen J., David G. Le Couteur, David E. James, Jacob George, Jenny E. Gunton, Samantha M. Solon-Biet et David Raubenheimer. 2017. « The Geometric Framework for Nutrition as a tool in precision medicine ». *Nutrition and Healthy Aging*, vol. 4, n° 3, p. 217-226.
- Sundstrom, L. 1993. « Foraging responses of *Formica truncorum* (Hymenoptera; Formicidae); exploiting stable vs spatially and temporally variable resources ». *Insectes Sociaux*, vol. 40, n° 2, p. 147-161.
- Tverberg, Gail. 2012. « World Energy Consumption Since 1820 in Charts ». In *Financial Sense*. En ligne <<https://www.financialsense.com/contributors/gail-tverberg/world-energy-consumption-since-1820-in-charts>>. Consulté le 7 mai 2018.
- Walls, Judith L. et Raymond L. Paquin. 2015. « Organizational Perspectives of Industrial Symbiosis: A Review and Synthesis ». *Organization and Environment*, vol. 28, n° 1, p. 32-53.

- Wilson, Edward O. et Bert Hölldobler. 2005. « Eusociality: Origine and consequences ». *PNAS*, vol. 102, n° 38, p. 13367-1337.
- Wu, Guoyao, Zhenlong Wu, Zhaolai Dai, Ying Yang, Weiwei Wang, Chuang Liu, Bin Wang, Junjun Wang et Yulong Yin. 2013. « Dietary requirements of nutritionally non-essential amino acids by animals and humans ». *Amino Acids*, vol. 44, n° 4, p. 1107-1113.
- Zaccarello, Benedetta. 2011. « Principes d'analogie pure et appliquée : notes sur la présence d'une logique analogique dans l'épistémologie et l'ontologie valéryennes ». *Tangence*, vol. 95, p. 29-41.