

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
Stéphanie BLAIS

INFLUENCE DE LA DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES HYDRIQUES ET
AGRICOLES SUR LA DYNAMIQUE URBAINE

MONTREAL, LE 29 MAI 2014



Stéphanie Blais, 2014



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 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. Robert Hausler, directeur de mémoire ou thèse
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. Mathias Glaus, 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 20 MAI 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire, Robert Hausler pour avoir soulevé en moi plusieurs questionnements et réflexions concernant la façon dont les villes sont développées et gérées actuellement. Nos discussions m'ont amené à voir le développement urbain sous un autre jour.

Mes remerciements vont également à Mathias Glaus pour m'avoir fait découvrir le logiciel STELLA, dans le cadre du cours ENV810-01 - Dynamique des systèmes environnementaux. Merci également pour ses conseils et ses instructions quant au fonctionnement de ce logiciel.

Un merci spécial à M. Rabindranarth Romero-López de l'Université de Veracruzana, chercheur à la Faculté de Génie civil de l'Institut mexicain de technologie, pour m'avoir permis de consulter ses travaux de recherches portant sur le bassin Lerma-Chapala.

Merci finalement à ma famille, mes amis et mes collègues de travail pour leur compréhension, leur encouragement et leur soutien durant ces trois dernières années. Nombreuses ont été les soirées et les fins de semaine passées à la bibliothèque de l'ÉTS.

INFLUENCE DE LA DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES HYDRIQUES ET AGRICOLES SUR LA DYNAMIQUE URBAINE

Stéphanie BLAIS

RÉSUMÉ

Cette recherche vise à déterminer l'impact de la dynamique des systèmes urbains sur la consommation des ressources naturelles renouvelables et, plus particulièrement, sur les ressources en eau douce et en sol mis à la disposition d'une ville. D'un autre côté, l'étude permet de situer dans le temps, les limites de croissance, en fonction de la disponibilité de ces ressources. L'impact de la dynamique sur le développement en hauteur et l'agriculture comme activité urbaine à part entière ont aussi été pris en compte.

La dynamique entre trois groupes qui occupent la ville (travailleurs, population active et agriculteurs) a été modélisée à partir du logiciel STELLA 9.1, pour ensuite évaluer leur influence sur le développement des uns sur les autres et sur l'évolution de la population totale. L'impact de certains facteurs de qualité de vie a été pris en compte dans l'évolution du système et la densité d'activité urbaine a également été considérée comme un facteur d'influence sur le développement urbain.

Afin de vérifier si le modèle développé peut s'appliquer à la réalité des systèmes urbains, deux scénarios ont été réalisés. Dans un premier temps, le modèle a été transposé dans un contexte de ville émergente, c'est-à-dire une petite population initiale et dans un deuxième temps, dans un contexte de ville existante, semblable à l'agglomération de Montréal.

Les principaux résultats obtenus démontrent que la densité urbaine est un facteur limitatif de la croissance d'une ville, au même titre que la disponibilité des ressources naturelles. D'un autre côté, ils prouvent qu'à long terme, l'agriculture traditionnelle (en champs) sans importation ne permet pas à une ville de se développer alors que l'agriculture verticale est souhaitable dans une optique de souveraineté alimentaire. Ils démontrent aussi que le développement en hauteur n'a pas le même impact sur les groupes et que la qualité de vie des individus est davantage une limite à la croissance, dans le cas d'une ville semblable à Montréal.

L'étude révèle l'importance de prendre en compte l'impact du développement urbain sur la qualité de vie de chacun des groupes et sur la verticalisation de l'espace. Elle questionne finalement sur le concept même des villes durables et sur l'efficacité de gestions des ressources, dans une situation où celles-ci ne compromettent pas le développement d'une ville.

Mots clés : modélisation, dynamique, système urbain, développement, ville durable, qualité de vie, densité, consommation d'eau, consommation d'espaces, agriculture urbaine

INFLUENCE OF THE AVAILABILITY OF THE HYDRIC AND AGRICULTURAL RESOURCES ON THE URBAN DYNAMICS

Stéphanie BLAIS

ABSTRACT

This research aims to determine the impact of the dynamics of urban systems on the consumption of renewable natural resources, more specifically, on fresh water resources and land use of a city. The study sets the limit of growth on a time scale, depending on the availability of the resource. The impact of the dynamics on the development in height and the agriculture as the full urban activity (for self-sufficiency) were also taken into account.

The dynamic between three groups who occupy the city (workers, farmers and residents) was modeled with STELLA 9.1 software and then, their influences on the development on each other and the evolution of the total population were evaluated. The impact of life quality factors were reflected in the evolution of the system. The density of urban activity has also been considered as a factor of influence on urban development.

To verify whether the developed model can be applied to the reality of urban systems, two scenarios were performed. At first, the model was transposed into a context of emergent city, with a small initial population and secondly, into a context of existing city, similar to the greater Montreal.

The main obtained results demonstrate that the urban population density is a restrictive factor for the growth of a city, in the same way as the availability of natural resources. On the other hand, the analysis of the results proves that on long term, the traditional agriculture (in fields), without import, does not allow a city to develop while the vertical agriculture (vertical farm) is desirable in an optics of food sovereignty. The results also demonstrate that the development in height has not the same impact on the groups and that the quality of life of the individuals is a further limit for the growth in the case of a city similar to Montreal.

The study reveals the importance to take into account the impact of the urban development on the quality of life of each group and on the verticalization of the space. Finally, the study shows an analysis about the concept of the sustainable cities and about the efficiency of resource managements, in a situation where these do not compromise the development of a city.

Keywords: modeling, dynamic urban system development, sustainable city, quality of life, density, water consumption, land use, urban agriculture

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	25
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	31
1.1 La ville : entre croissance et développement durable.....	31
1.1.1 Principes de ville durable et qualité de vie urbaine.....	32
1.1.2 Le contre-exemple : Détroit	35
1.1.3 Dynamique d'un système urbain.....	36
1.2 L'agriculture urbaine	40
1.3 L'eau.....	43
1.3.1 Facteurs anthropiques.....	44
1.3.2 Facteurs d'influence naturels	45
1.3.3 Renouvellement de la ressource hydrique.....	45
1.3.4 Concept du dépassement des limites	46
1.3.5 Modèle dynamique de gestion de l'eau.....	47
1.4 Le sol et la densité	48
1.4.1 La densité urbaine	50
1.4.2 Le renouvellement du sol	51
1.4.3 Contamination du sol	52
1.4.4 Minéralisation du sol.....	53
1.4.5 Épuisement du sol	53
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	55
2.1 Approche systémique	55
2.1.1 Logiciel utilisé : STELLA 9.1.1	58
2.1.2 Les données statistiques utilisées	59
2.2 Modèle de référence	60
2.2.1 Les données utilisées.....	60
2.2.1.1 Les travailleurs.....	60
2.2.1.2 La population active.....	61
2.2.1.3 Les agriculteurs.....	63
2.2.2 Modèle incluant les facteurs d'influence	65
2.2.2.1 Les espaces végétalisés	65
2.2.2.2 Les espaces minéralisés	66
2.2.2.3 Le chômage.....	66
2.2.2.4 L'emploi.....	67
2.2.2.5 L'exploitation du sol.....	67
2.2.2.6 L'importation de nourriture	68
2.2.3 Modèle incluant la consommation d'eau	69
2.2.3.1 Demande industrielle	69
2.2.3.2 Demande résidentielle.....	70
2.2.3.3 Demande agricole	70

2.2.3.4	La quantité d'eau disponible.....	71
2.2.4	Modèle incluant la consommation de sol.....	71
2.2.4.1	Demande industrielle.....	72
2.2.4.2	Demande résidentielle.....	72
2.2.4.3	Demande agricole.....	72
2.2.4.4	La quantité d'espace disponible.....	73
2.3	Modèle du contexte de ville existante : les données de Montréal.....	74
2.3.1	Données sur la ressource hydrique.....	74
2.3.2	Données sur la superficie disponible.....	75
2.3.3	Données sur les travailleurs.....	75
2.3.4	Données sur la population active.....	76
2.3.5	Données sur les agriculteurs.....	77
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....		79
3.1	Calibration du modèle.....	79
3.1.1	Dynamique initiale.....	79
3.1.2	Dynamique en fonction des seuils retenus.....	80
3.1.3	Dynamique en fonction de l'importation.....	82
3.1.4	Dynamique en fonction de l'agriculture verticale.....	83
3.2	Validation de l'hypothèse.....	86
3.2.1	Application du modèle à un contexte de ville émergente.....	86
3.2.1.1	La superficie du territoire et l'espace occupé.....	88
3.2.1.2	Limites de croissance en fonction de la ressource hydrique.....	90
3.2.1.3	Impact sur le taux de satisfaction de la population.....	93
3.2.1.4	Synthèse sur le modèle de ville émergente.....	94
3.2.2	Application du modèle à un contexte de ville existante.....	95
3.2.2.1	La densité urbaine.....	96
3.2.2.2	Contexte d'agriculture traditionnelle (avec importation).....	98
3.2.2.3	Contexte d'agriculture verticale.....	101
3.2.2.4	Limites de croissance en fonction de la ressource hydrique.....	103
3.2.2.5	Synthèse sur le modèle de ville existante.....	104
3.3	Analyse des paramètres.....	105
3.3.1	La population initiale.....	105
3.3.2	Les facteurs d'influences.....	107
3.3.2.1	Les espaces végétalisés et minéralisés.....	107
3.3.2.2	Le taux de chômage et d'emplois.....	109
3.3.2.3	Le taux d'exploitation.....	111
CHAPITRE 4 DISCUSSION.....		113
4.1	Dynamique du modèle développé.....	113
4.2	Développement urbain et consommation des ressources dans un contexte de ville émergente.....	114
4.3	Développement urbain et consommation des ressources dans un contexte de ville existante.....	116
4.4	Agriculture urbaine.....	117

4.5	Facteurs d'influences sur la qualité de vie	119
4.6	Autres éléments à considérer lors des travaux futurs	121
CONCLUSION.....		125
RECOMMANDATIONS		129
ANNEXE I	DONNÉES SUR LA CONSOMMATION D'EAU DES TRAVAILLEURS	133
ANNEXE II	ÉQUATIONS TIRÉES DE STELLA 9.1	135
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		141

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Synthèse des termes utilisés pour désigner l'utilisation du sol	50
Tableau 2.1 Principales sources de données utilisées	59
Tableau 2.2 Équations utilisées - Travailleurs	61
Tableau 2.3 Équations utilisées - Population active (pop. active)	62
Tableau 2.4 Synthèse des données utilisées pour la conversion des besoins en nourriture en agriculteurs	64
Tableau 2.5 Équations utilisées - Agriculteurs	65
Tableau 2.6 Synthèse des données agricoles utilisées pour la consommation d'eau par agriculteur (données arrondies).....	71
Tableau 2.7 Synthèse des données agricoles utilisées pour la consommation de sol par agriculteur.....	73
Tableau 2.8 Données 2012 sur le débit moyen mensuel (m^3/s) à la station LaSalle et volume (m^3) estimé	74
Tableau 2.9 Synthèse des données pour le secteur industriel	76
Tableau 2.10 Synthèse des données pour le secteur résidentiel.....	76
Tableau 2.11 Synthèse des données pour le secteur agricole.....	77
Tableau 3.1 Synthèse des données utilisées dans le cadre des modèles développés	79
Tableau 3.2 Seuils associés aux facteurs d'influence retenus.....	81
Tableau 3.3 Synthèse des données utilisées dans le contexte de ville émergente.....	88
Tableau 3.4 Synthèse des données utilisées dans le contexte de ville existante	96
Tableau 3.5 Résumé des données utilisées afin de comparer l'évolution de la population totale en fonction du nombre de personnes initial	106

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Évolution de la population de la ville de Détroit entre 1820 et 2010.....35
Figure 1.2	Étages de la serre Sky Greens42
Figure 1.3	Exemple d’emprise au sol d’un bâtiment.....49
Figure 2.1	Dynamique du système d’un point de vue d’ensemble.....56
Figure 2.2	Dynamique du système incluant les facteurs d’influence du point de vue des travailleurs.....57
Figure 2.3	Dynamique du système en fonction de la consommation d’eau58
Figure 2.4	Dynamique du modèle de référence du point de vue des travailleurs.....61
Figure 2.5	Dynamique du modèle de référence du point de vue de la population active62
Figure 2.6	Dynamique du modèle de référence du point de vue des agriculteurs.....64
Figure 3.1	Dynamique initiale des groupes sur une période de 250 ans80
Figure 3.2	Dynamique des groupes en fonction des facteurs d’influence sur une période de 250 ans82
Figure 3.3	Dynamique des groupes en fonction de l’absence d’importation (avec facteurs d’influence) sur une période de 250 ans83
Figure 3.4	Dynamique des groupes dans un contexte d’agriculture verticale (avec facteurs d’influence), sur une période de 100 ans85
Figure 3.5	Dynamique des groupes dans un contexte d’agriculture verticale (avec facteurs d’influence), sur une période de 250 ans86
Figure 3.6	Évolution de la population totale en fonction du nombre d’étages moyen fixé sur une période de 250 ans89
Figure 3.7	Nombre d’étages maximaux par groupe en fonction du nombre d’étages moyen fixé90
Figure 3.8	Évolution de la population totale en fonction du % d’efficacité de gestion scénario de 6 étages, sur une période de 250 ans91

XVIII

Figure 3.9	Évolution de la population totale en fonction du % d'efficacité de gestion scénario de 13 étages, sur une période de 250 ans	92
Figure 3.10	Répartition de la superficie de plancher et de la quantité d'eau consommée entre les groupes et répartition des groupes en fonction de la population totale, scénario de 6 étages	93
Figure 3.11	Évolution du taux de satisfaction des groupes, sur une période de 250 ans.....	94
Figure 3.12	Comparaison de l'évolution de la population totale selon le type d'agriculture, en fonction de la densité maximale permise, sur une période de 500 ans.....	97
Figure 3.13	Évolution de la population totale en fonction du nombre d'étages moyen fixé, sur une période de 500 ans	99
Figure 3.14	Nombre d'étages maximal par groupe, en fonction du nombre d'étages moyen fixé	100
Figure 3.15	Répartition de la superficie de plancher et de la quantité d'eau consommée entre les groupes et répartition des groupes en fonction de la population totale scénario de 4 étages	101
Figure 3.16	Évolution de la population totale en fonction du nombre d'étages moyen, sur une période de 500 ans	101
Figure 3.17	Nombre d'étages maximal par groupe en fonction du nombre d'étages moyen.....	102
Figure 3.18	Répartition de la superficie de plancher et de la quantité d'eau consommée entre les groupes et répartition des groupes en fonction de la population totale scénario de 6 étages	103
Figure 3.19	Évolution de la population totale en fonction du % d'efficacité de gestion et d'un scénario 6 étages moyens – contexte d'agriculture traditionnelle et verticale, sur une période de 500 ans	104
Figure 3.20	Évolution de la population totale en fonction du nombre de personnes initial, sur une période de 100 ans.....	107
Figure 3.21	Comparaison de l'évolution du taux d'espaces végétalisés, ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans	108
Figure 3.22	Comparaison de l'évolution du taux d'espaces minéralisés, ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans	109

Figure 3.23	Comparaison de l'évolution du taux de chômage ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans	110
Figure 3.24	Comparaison de l'évolution du taux d'emploi, ville existante et ville émergente sur une période de 100 ans	111
Figure 3.25	Comparaison de l'évolution du taux d'exploitation, ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (France)
MAMROT	Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (Québec)
AIDELF	Association Internationale des Démographes de Langue française
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
C.A.U.E	Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
COS	Coefficient d'occupation des sols
CNURE	Le Comité des Nations Unies sur les ressources en eau
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GES	Gaz à effet de serre
ICI	Industrie, commerce, institution
I.U.T.	Institut universitaire de technologie
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
OCPM	Office de consultation publique de Montréal
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONU-Habitat	Programme des Nations Unies pour les établissements humains
RMR	Région métropolitaine de recensement

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Longueur

m	mètre
km	kilomètre

Aire

m ²	mètre carré
km ²	kilomètre carré
ha	hectare

Volume

m ³	mètre cube
km ³	kilomètre cube
L	litre

Débit

m ³ /s	mètre cube par seconde
-------------------	------------------------

INTRODUCTION

« Si nous ne changeons pas notre façon de penser, nous ne serons pas capables de résoudre les problèmes que nous créons avec nos modes actuels de pensée » - Albert Einstein (Gérard *et al.*, 2003, p.1)

Selon l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (2012), la terre devrait compter près de 9 milliards d'êtres humains d'ici 2050, dont 70 % vivront dans les villes. Des espaces urbanisés signifient des espaces artificialisés. La croissance démographique mondiale des prochaines années aura donc un impact direct sur les ressources naturelles. Le concept d'empreinte écologique développé par Mathis Wackernagel met en lumière le fait que la population mondiale consomme déjà trop de ressources (Meadows *et al.*, 2013). Selon la WWF « si tout le monde sur Terre avait le même mode de vie que le Canadien moyen, il nous faudrait l'équivalent de trois planètes et demie pour assurer notre subsistance » (WWF, 2012). De plus, ces ressources seront de plus en plus soumises à la concurrence entre les différents usages d'une ville et entre les villes. De là, l'intérêt d'anticiper les besoins futurs et d'apprendre à consommer de façon responsable, sans compromettre les besoins des générations futures.

Selon Etchelecou (1992, p.133), « on peut considérer que si toutes les formes de sociétés [...] ont tendance à accroître leur population, il arrive nécessairement qu'une capacité soit jugée maximale au regard des [...] ressources localement disponibles ». De nombreux événements anthropiques ont ainsi démontré que les ressources renouvelables ne sont pas inépuisables et que leur disparition peut mettre en péril la survie des êtres vivants. De là l'importance de comprendre l'impact de notre consommation sur l'environnement et d'apprendre à consommer différemment.

À titre d'exemple, dans le but de développer la culture intensive du coton et du riz, les Asiatiques ont surexploité la ressource hydrique des fleuves Amou-Daria et Syr-Daria pour irriguer les terres arides de la région (Étienne, 2007). En conséquence, la mer d'Aral s'est

peu à peu asséchée, entraînant avec elle la disparition de plusieurs espèces et des problèmes de santé humaine. Bien que controversée, la théorie de l'Île de Pâques est un autre exemple de surexploitation de la ressource. Abritant autrefois une vaste forêt, les habitants de l'île auraient, au fil des générations, exploité la ressource plus vite qu'elle se régénère (pour la fabrication de canots, d'outils de pêche, transport des statuts de Moäi, etc.). Cela aurait par la suite provoqué la dégradation de l'écosystème et la disparition d'une grande partie de la population (Brander et Taylor, 1998).

Au niveau des ressources non renouvelables, Murdochville, un village minier de la région de la Gaspésie, au Québec, a également subi les contrecoups de l'épuisement des ressources. En effet, suite à l'exploitation intensive du cuivre durant 45 ans, la mine Noranda a dû fermer ses portes pour des raisons économiques et d'épuisement des ressources, mettant ainsi à pied près de 300 travailleurs. Ayant une économie basée sur une seule ressource (le cuivre), la ville a perdu plus de 30 % de sa population, passant ainsi de 1171 habitants en 2001 à 764 en 2011 (Statistique Canada, 2012).

Bien que le Canada se classe 4^e au rang des plus grands consommateurs d'eau douce par habitant au monde, les études ont démontré que la majorité des provinces canadiennes présente de faibles risques de stress hydrique au cours des 30 prochaines années, comparativement à l'Asie du Sud, le Moyen-Orient, la Chine ou l'Afrique du Nord (OCDE, 2012). Toutefois le Gouvernement du Canada a identifié certaines lacunes en termes de recherches et d'études sur les ressources actuelles en eau. Il soulève entre autres un manque au niveau des « Recherches sur l'interaction des impacts du changement climatique et des autres facteurs de stress, comme les changements dans le mode d'occupation du territoire et la croissance de la population » et des « Études cherchant surtout à comprendre et à déterminer les seuils critiques dans les systèmes des ressources en eau, plutôt qu'à prévoir les impacts des variations des conditions moyennes » (Ressources naturelles Canada, 2004, p. 79).

L'eau demeure une ressource vitale, essentielle à la survie de tous êtres vivants et permet l'exploitation de plusieurs autres ressources qui influencent à leur tour la quantité d'eau disponible pour les activités humaines. L'eau est aussi la ressource la plus difficilement remplaçable, d'où l'importance d'apprendre à la consommer de manière responsable.

Dans un autre ordre d'idée, les services écologiques et la valeur économique et sociale associée aux écosystèmes font de plus en plus l'objet de recherche. L'arbre joue par exemple un rôle important dans la captation de polluants, la climatisation du milieu et l'infiltration de l'eau (Vergriete et Labrecque, 2007). Par le transport des marchandises, la fabrication de produits industriels et agricoles, la production d'énergie et le maintien en vie de l'Homme, l'eau demeure certainement le meilleur exemple des services écologiques à valeur économique.

L'agriculture fait également partie de ces services vitaux que la nature rend à l'Homme, d'où l'importance d'en prendre en compte au niveau local. Dans le cas contraire, la destruction des écosystèmes ou des « infrastructures vertes » peut engendrer des coûts supplémentaires pour rétablir les services généralement offerts par la nature. De plus, l'appauvrissement des écosystèmes rend la ville plus vulnérable aux chocs climatiques, tels que les inondations et les crises alimentaires (ONU-Habitat, 2011).

La façon dont l'espace s'articule en fonction des usages dans un milieu urbanisé a fait l'objet de multiples recherches. Toutefois, ces recherches ne semblent pas faire de liens directs entre l'utilisation de la ressource et la superficie occupée par les différents usages d'une ville. Aussi, bien que plusieurs projections de consommation aient été faites à l'échelle mondiale, au niveau local, il demeure difficile d'établir avec exactitude quelle sera la demande en eau et en sol au cours de prochaines années. En clair, la demande future ne peut pas être adaptée en fonction de la disponibilité des ressources en eau et en sol, car aucune donnée ne permet de prévoir cette dernière, à l'échelle d'une ville.

Dans un autre ordre d'idées, de plus en plus de recherches s'interrogent sur l'intégration de l'agriculture en ville. En effet, le concept d'agriculture urbaine prend de l'ampleur et cette activité semble de plus en plus encouragée dans les villes nord-américaines. Toutefois, les recherches qui témoignent de l'impact de cette activité dans un but fonctionnel, c'est-à-dire qui vise à combler les besoins de la population résidente, demeurent peu nombreuses. Les recherches se concentrent davantage sur le rôle social et environnemental de l'agriculture urbaine. En ce sens, il demeure difficile de savoir si la valorisation de l'agriculture urbaine est justifiable dans le but de subvenir aux besoins ou s'il s'agit seulement d'une façon de « verdir » les villes. Il semble ainsi intéressant de considérer l'agriculture traditionnelle (en sol) et les fermes verticales comme des usages à part entière pour évaluer leur influence respective sur la dynamique d'un système urbain.

Dans un contexte de changements climatiques et à la lumière des recherches antérieures, il semble pertinent de se questionner sur l'impact de l'intégration d'une nouvelle fonction urbaine, dans ce cas-ci l'agriculture sur le développement d'une ville, à long terme.

La présente étude porte ainsi sur la dynamique qui existe entre trois groupes (travailleurs, habitants et agriculteurs) présents à l'intérieur d'un même système urbain et tente d'intégrer l'impact de la disponibilité des ressources sur le développement urbain. Dans la mesure où un être humain a besoin de se loger et de se nourrir et qu'il doit travailler pour y arriver, il est pertinent d'évaluer la dynamique de ces trois usages essentiels. Dans le cadre de cette recherche, le concept de durabilité urbaine signifie maintenir une qualité de vie acceptable et consommer les ressources naturelles de façon responsable.

L'étude intègre une partie des données portant sur l'agglomération de Montréal qui comprend la Ville de Montréal (19 arrondissements) et 14 villes liées. Étant une île en majorité développée, ce territoire a été retenu parce que ses limites de croissance sont observables et circonscrites. De plus, l'agglomération représente bien le contexte des villes nord-américaines qui ont connu une forte croissance démographique durant la période industrielle et les années 50 (baby-boom).

Il s'agit finalement d'une étude macro dans la mesure où la dynamique urbaine et la consommation annuelle des ressources sont observées à l'échelle globale d'un territoire, selon trois grands groupes d'usage : la population active, les travailleurs et les agriculteurs.

Objectifs et hypothèse de recherche

Dans un premier temps, à partir des données existantes, l'objectif est de modéliser la dynamique d'une ville émergente à partir du logiciel STELLA 9.1.1. Le modèle développé vise aussi à :

- comparer l'influence de l'agriculture traditionnelle et de l'agriculture verticale sur le développement urbain;
- intégrer des paramètres de la qualité de vie qui auront une influence sur les différents groupes (facteurs d'influence);
- évaluer l'impact de la dynamique sur le développement urbain et sur la disponibilité des ressources en eau et en sol mises à la disposition d'une ville;
- déterminer si le modèle développé peut s'appliquer à un contexte de ville déjà existante semblable à l'agglomération de Montréal. La recherche permet aussi de caler certaines données statistiques sur Montréal et de poser certaines hypothèses quant à son évolution.

De ce fait, l'hypothèse suivante a été posée : dans un contexte de ville émergente ou existante où les ressources naturelles sont limitées, l'agriculture en serre verticale permettrait de multiplier la population initiale par dix alors que l'agriculture traditionnelle sans importation ne permettrait pas une telle croissance.

L'intérêt de la recherche réside principalement dans l'avancée de la compréhension du fonctionnement d'un système urbain qui intègre l'activité agricole et la consommation des ressources naturelles. Les résultats obtenus pourraient ainsi servir à éclairer les élus et décideurs municipaux face à ces enjeux du développement urbain ou servir d'outil d'aide à la décision et à la planification des villes.

Ce travail de recherche a été divisé essentiellement en quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur la revue de la littérature, le deuxième chapitre présente la méthodologie utilisée pour la construction du modèle alors que le troisième chapitre présente les résultats obtenus à partir du modèle développé. Finalement, le dernier chapitre porte sur la discussion en lien avec les principaux résultats obtenus et sur les suggestions pour les travaux futurs.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre traite principalement des concepts de ville durable, d'agriculture urbaine et de disponibilité des ressources naturelles renouvelables (eau et sol). Les travaux soulevés ont permis d'orienter et de documenter le présent travail.

1.1 La ville : entre croissance et développement durable

Étroitement lié à la croissance démographique, le taux de croissance des villes peut se définir comme l'augmentation d'une population sur une aire concentrée, en fonction de la croissance du pays et de l'évolution du système de la ville. La taille d'une ville évolue dans le temps, en fonction des ressources disponibles et des investissements dans les infrastructures publiques, qui se traduisent par les conditions de vie.

On peut définir la ville comme des regroupements de populations ne produisant pas elles-mêmes leurs moyens de subsistance alimentaire. L'existence des villes suppose donc, dès leur origine, une division technique, sociale et spatiale de la production, et implique des échanges de natures diverses entre ceux qui produisent les biens de subsistance et ceux qui produisent les biens manufacturés [...] La dynamique de l'urbanisation est liée au potentiel d'interactions qu'offrent les villes [...] à la puissance multiforme qu'engendre le regroupement de grandes quantités de populations dans un même lieu. (Ascher, 2010, p. 11)

Selon, Clément et Fauteux (1979), l'autosuffisance d'une ville, en termes d'emploi, de main-d'œuvre et d'accessibilité influence la croissance démographique d'une ville. Une ville sera aussi caractérisée par la prédominance des espaces construits, où la nature n'est pas un élément structurant, par la vitalité de la vie sociale et par diverses fonctions qui interagissent entre elles. La forme urbaine sera ainsi orientée en fonction de cette dynamique (Rémy et Voye, 1992). D'un autre côté, les villes contribuent à l'uniformisation et l'artificialisation des

milieux, ce qui entraîne la détérioration et la destruction des milieux naturels (MAMROT, 2012).

1.1.1 Principes de ville durable et qualité de vie urbaine

Le concept de ville durable a pris forme suite au Rapport de la Commission Brundtland au début des années 1990, lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement au Sommet de la Terre de Rio (Dubiel, 2011). Par la suite, La Charte d'Aalborg (1994), le Plan d'action de Lisbonne (1996), l'Appel de Hanovre (2000) Les Principes de Melbourne (2002) et L'Accord de Bristol (2005) viendront entre autres préciser et encadrer certains aspects du concept (Marchand, 2012). Depuis, une multitude d'articles portant sur les villes durables a vu le jour (Zheng *et al.*, 2014), mais il ne semble pas y avoir de consensus entourant la définition d'une ville durable (Voiron-Canicio, 2005). Cela rend le concept difficile à définir clairement.

Selon les orientations stratégiques de l'ADEME (2013), la durabilité urbaine se caractérise par « une ville économe, adaptable et robuste » (ADEME, 2013, p.5), qui prend aussi en compte les aspects humains et sociaux. L'urbanisme durable doit viser à lutter contre l'étalement urbain et les nuisances qui portent atteinte à la qualité de vie des habitants. La cohésion et la mixité sociales et générationnelles doivent également être prises en compte dans le but d'encourager les échanges entre les habitants et d'assurer l'attractivité de la ville. Une ville durable intègre enfin la préservation des ressources, développe des modes de production et de consommation responsable, notamment au niveau agricole. Selon l'ADEME, « La protection du foncier agricole, par exemple, ou la prise en compte de la qualité des sols permettent de maintenir ou développer des productions [agricoles] locales avec des circuits courts de distribution » (ADEME, 2013, p. 6).

Selon Brochet *et al.* (2007), le concept de ville durable prend forme en réaction à l'étalement urbain qui a suivi la motorisation des individus et d'autre part à la métropolisation. En effet, la séparation des usages due aux infrastructures de transport, à la diminution des espaces

publics et à l'apparition de ville dortoir des dernières années. Ces phénomènes ont engendré une augmentation de la consommation des ressources naturelles et une empreinte écologique de plus en plus grande. Face à cette réalité, les auteurs proposent de remettre la ville en forme, c'est-à-dire une ville compacte. Bien qu'il soit difficile d'évaluer la densité souhaitable, une ville compacte signifie des économies d'espaces et d'argent (rentabilité du réseau et des servitudes publiques), ce qui rendrait également plus facile le transport actif et collectif. Il est également proposé de créer des villes en réseau, connecté par des espaces publics qui eux seraient rattachés au réseau de transport en commun.

Selon Denis Meadows *et al.* (2013), une société durable se définit comme étant « une société qui perdure de génération en génération et qui est suffisamment prévoyante, flexible et réfléchie pour ne pas fragiliser les systèmes physiques et sociaux qui la sous-tendent. » Elle se planifie à long terme, tend à réduire au maximum l'utilisation des ressources non renouvelable et exploite les ressources renouvelables au même rythme qu'elles se régénèrent. Une société durable encourage également les technologies qui permettent d'être plus efficient face aux ressources naturelles et elle définit le nombre d'individu et d'industrie souhaitable et durable.

Selon l'architecte et urbanisme Jan Gehl (2012), une ville durable se définit avant tout par une densité raisonnable (de sorte que le soleil atteigne les arbres), une priorisation du transport actif relié à un système de transport en commun (projets de *Transit Oriented Development*) et une égalité dans l'accès aux espaces publics. Toutefois, une densité trop élevée décourage selon lui les interactions sociales puisque les gens auraient tendance à moins fréquenter l'espace public. Pour assurer le contact entre la rue et les bâtiments, ces derniers devraient avoir une hauteur d'environ quatre étages.

Mancébo (2011) avance que les défis des villes durables consistent à *redéfinir l'équilibre global du tissu urbain* et à repenser l'ensemble de la ville, entre autres en fonction de critères de multifonctionnalité et de densité urbaine. Il avance également que le renouvellement et le

fonctionnement des villes reposent sur les modalités de localisation, délocalisation et relocalisation de la population urbaine.

Le concept de qualité de vie urbaine est souvent rattaché à celui des villes durables. Par contre, les chercheurs ne sont pas encore arrivés à un consensus concernant sa définition, « [...] le concept de qualité de vie est en constante évolution, variable selon l'idéologie dominante. » (Dubiel, 2010, p. 75). Tel qu'abordé par Sénécal *et al.* (2005), le concept renvoie aux conditions matérielles d'existence (hygiène) et aux disparités socio-économiques (accessibilité aux services). La qualité de vie dépendrait de plusieurs facteurs tels que la densité et la diversité du cadre bâti, l'équité sociale, la relative égalité dans l'allocation des services et des équipements et l'accessibilité à un logement décent et abordable. Se rapportant à Lynch, les auteurs avancent qu'une forme urbaine adéquate se traduit par une économie des ressources, un accès aux espaces végétalisés et aux services et aux infrastructures publiques. Le bien-être de la population et la qualité de l'environnement semblent ainsi ultimement liés. Leur recherche visait entre autres à mesurer la qualité de vie et de l'environnement de Montréal et sa banlieue, à partir de différents facteurs; la compacité urbaine, les revenus, le temps de transport et la distribution de la végétation. Ces facteurs ont été représentés à partir d'images satellitaires et se sont vus attribuer des scores pour évaluer leur contribution. Il en ressort que dépendant du contexte de la ville, certains facteurs seront plus élevés. Par exemple, en banlieue, les espaces végétalisés seront plus nombreux alors qu'au centre-ville, la compacité urbaine sera un facteur plus important.

Les recherches tendent ainsi à démontrer que le concept de ville durable renvoie essentiellement à assurer la qualité de vie sociale, environnementale et économique des générations actuelles et à venir. De plus, une ville durable devrait être compatible avec son environnement. La compatibilité, la densité, la mixité et la diversité des usages sont des principes mis de l'avant, de même que les transports actifs et collectifs sont vus comme un moyen de limiter les émissions de gaz à effet de serre. La consommation équitable et raisonnable des ressources vise finalement à répondre aux besoins actuels sans compromettre ceux des générations futures.

1.1.2 Le contre-exemple : Détroit

La ville de Détroit au Michigan, qui a déclaré faillite en 2013, traduit bien le phénomène de suburbanisation et le déclin des villes nord-américaines développées durant la période industrielle. Tel que démontré à la figure 1.1, la ville qui possédait 1,8 million d'habitants au milieu du XX^e siècle a vu sa population chuter de 61 % en 60 ans, au profit de sa banlieue (AFP, 2013). Le taux de chômage atteint aujourd'hui 30 % dans certains secteurs de la ville et plusieurs bâtiments sont laissés à l'abandon (Staszak, 2010).

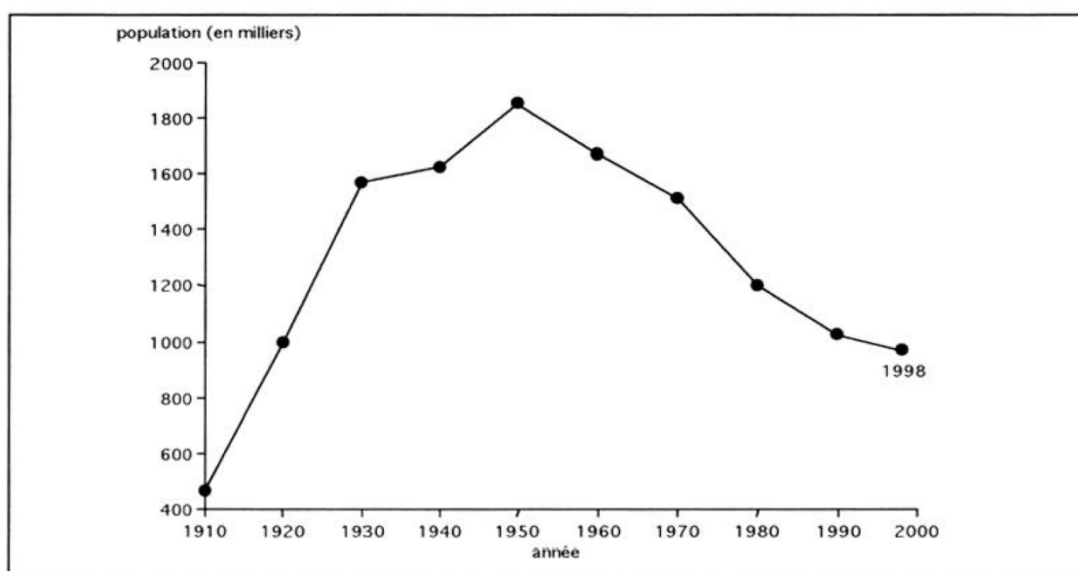


Figure 1.1 Évolution de la population de la ville de Détroit entre 1820 et 2010
Tirée de Staszak (2010, p. 280)

Selon Staszak (2010), le départ massif de la population blanche, à partir des années 50, peut s'expliquer en fonction des facteurs économiques et culturels. Dans un premier temps, par l'anticipation de la baisse du marché foncier qui coïncide avec l'arrivée de la population noire, suivie par la migration des emplois et des commerces vers la banlieue, encouragés par l'arrivée de l'automobile. Dans un deuxième temps, « la volonté de ségrégation raciale [et l'incapacité des Blancs à] protéger leur quartier des Noirs [encourager par l'idéalisation de la banlieue] (Staszak, 2010, p. 287). En résumé, le départ successif de la population active blanche peut être relié au départ de l'industrie de l'automobile (principale activité

économique de la ville), aux tensions sociales et à une dégradation des services publics dus au taux de pauvreté élevé (peu d'impôt). Aujourd'hui, la ville fait face à de graves problèmes de criminalité, de pauvreté et de manque de services publics, ce qui provoque un climat d'insécurité. Bien que les mentalités aient changé, la population aisée et les emplois ne réintègrent pas la ville.

Depuis 2003, plusieurs initiatives collectives voient le jour à Détroit, telles que la reconversion des friches en potagers urbains, ce qui démontre qu'un certain processus de résilience s'enclenche. À ce jour, 1200 exploitations agricoles sont en actions, ce qui représente annuellement 150 tonnes d'aliments. Au cours des 10 prochaines années, plus de 4 km² pourraient être aménagés pour l'agriculture (Coste, 2010).

1.1.3 Dynamique d'un système urbain

Selon Ginoux (2006), les fondements modernes de la dynamique des populations remontent à la fin du 18^e siècle, avec Thomas Robert Malthus. Considérant qu'une population peut croître de façon exponentielle, Malthus suggérait que la croissance d'une population dans le temps est proportionnelle au nombre d'individus dans cette population. La théorie ne tient toutefois pas compte des facteurs qui peuvent limiter la croissance d'une population. Le modèle peut donc être considéré, tant que la densité de population ne sature pas le milieu dans lequel celle-ci se trouve. Ainsi l'évolution d'une population dans le temps se traduit par l'équation 1.1, où N représente le nombre de personnes et r , le taux de croissance, ce qui permet d'obtenir une croissance exponentielle (malthusienne).

$$\frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \quad (1.1)$$

D'un autre côté, le taux de croissance d'une population (dL/dt dans l'équation 1.2) peut être influencé par plusieurs facteurs, mais il dépendra initialement des taux de natalité (b) et de mortalité (d). Les taux d'immigration et de migration peuvent également influencer grandement le taux de croissance des sociétés modernes. Selon Ginoux (2006), la croissance

des populations dépend aussi des ressources disponibles et de la consommation qui en est faite. En effet, Malthus a réussi à établir un lien entre la consommation des ressources par habitant ($\phi\alpha\beta S$) et le taux de croissance démographique. Plus la consommation est élevée, plus le taux de croissance est élevé. Ainsi :

$$\frac{dL}{dt} = L(b - d + \phi\alpha\beta S) \quad (1.2)$$

En 1837, le biologiste Pierre-François Verhulst présente un modèle de dynamique des populations intégrant des facteurs limitant la croissance d'une population (Ginoux, 2006). Ces facteurs sont la nourriture disponible et la capacité du milieu à supporter la population. Ainsi, la croissance des populations apparaît inversement proportionnelle à celle de la production de nourriture locale. La capacité du milieu traduit en quelque sorte la population maximum qu'un milieu peut accueillir et une fois ce maximum atteint, la population ne peut plus augmenter.

Même un système urbain dont les tendances sont connues et qui repose sur des lois déterministes peut présenter des comportements chaotiques, à cause des variations, en apparence insignifiantes, qui peuvent subvenir au cours de son évolution. Un système chaotique est sensible aux conditions initiales. La théorie du chaos développée en 1987 par R. Thom, mais en lumière le fait que l'apparition d'événements chaotiques dépend grandement de l'état initial d'un système. L'évolution du système sera par la suite influencée par des attracteurs (Buda, 1992). Cette théorie sera reprise par l'École flamande au travers du modèle proie-prédateurs.

Alfred J. Lotka et Vito Volterra ont développé un modèle permettant d'illustrer l'équilibre et la dynamique qui existe entre les proies, par exemple les lièvres et les prédateurs comme les loups. Selon Ginoux (2006), le modèle suggère que si les proies étaient seules, leur croissance serait exponentielle alors que si les prédateurs se retrouvaient seuls, ils s'épuiseraient jusqu'à disparaître. De la sorte, si le nombre de proies et de prédateurs est éliminé de façon proportionnelle, les proies augmentent et les prédateurs diminuent. Ce

phénomène traduit en fait la loi de perturbation des moyennes. Le système développé informe que le taux de natalité des prédateurs dépend de la quantité de proies et que le taux de mortalité des proies est influencé par le nombre de prédateurs.

Ce modèle a toutefois été critiqué pour son manque de réalisme puisqu'il ne comprend pas le temps de gestation des espèces et que la croissance de l'un est directement proportionnelle à la décroissance de l'autre (Ginoux, 2006). Le modèle demeure néanmoins pertinent pour évaluer l'évolution globale de deux espèces.

À partir de 1969, le concept de la dynamique urbaine fut repris par Jay W. Forrester, sous l'approche de la modélisation mathématique d'un système complexe, c'est-à-dire non linéaire (Oberkampf, 1980). Il développe entre autres le concept d'attractivité qui « actionne » la dynamique d'une ville et qui est influencé, soit par la pression fiscale, les valeurs foncières, le prix du logement, les salaires et autres conditions favorables aux entreprises et aux habitants. Il avance également qu'il existe des boucles de rétroaction pour chacune de ces variables qui influence la croissance ou la décroissance d'une ville. Un système peut donc se trouver en déséquilibre et dès lors, la ville doit se reconstruire sur elle-même, le retour vers l'équilibre doit se faire de l'intérieur. Dans ce contexte de résilience urbaine, la ville pourrait alors croître à nouveau.

Le Club de Rome, à l'origine des premières réflexions sur les limites de croissances (Meadows *et al.*, 1972), a par la suite repris ses travaux durant les années 70. Ce groupe proposait alors de réduire le taux de natalité avant que le seuil de durabilité ne soit atteint ou dépassé. Le développement des populations devrait ainsi dépendre des limites de disponibilité des ressources (Dubiel, 2011).

La dynamique d'un système urbain se définit comme le comportement d'une partie de la réalité socio-économique dans le temps. Étudier cette dynamique permet non seulement de saisir les causalités d'un phénomène, mais également d'anticiper l'évolution du système et d'agir en conséquence. Un système dynamique se définit comme un système de couplage,

non linéaire (c'est-à-dire sans relations de cause à effet proportionnelles), composé de calculs différentiels. Il comprend différents facteurs qui influencent les boucles de rétroaction positive et négative (Dantas et Point, 2009).

En 1972, reprenant le concept d'empreinte écologique, un groupe de recherche dirigé par Dennis Meadows a développé un modèle informatique permettant d'illustrer la dynamique des systèmes (Meadows *et al.*, 2013). Le modèle World3, basé sur un enchaînement de boucles de rétroactions, met en lumière les limites de croissance et l'impact de l'épuisement des ressources sur la population, l'industrie (la consommation de biens) et l'agriculture. Il permet ainsi de présenter différents scénarios de développement mondial. À titre d'exemple, le modèle informe que si le taux de mortalité augmentait (ou le taux de natalité chutait), la consommation et donc la production diminueraient, ce qui abaisserait l'empreinte écologique.

Plus simplement, la répulsion du milieu de départ et l'attraction du milieu d'arrivée expliquent en partie la dynamique urbaine (Rallu, 1990). La théorie du cycle urbain de Leo Klaassen (Buda, 1992) avance que la croissance urbaine ne peut pas être illimitée et que la formation de l'espace urbain dépend du transfert de population entre la ville et sa banlieue. Ce processus peut se traduire de façon cyclique (urbanisation-suburbanisation-désurbanisation-réurbanisation).

Dantas et Point (2009) ont finalement repris le concept de dynamique des systèmes afin de modéliser les interactions liées à la gestion du sol urbain dans le but d'évaluer les politiques en lien avec le contrôle de l'étalement urbain et la valorisation des espaces naturels, d'un point de vue économique.

Selon une étude de Bousquet *et al.* (2002), la dynamique des systèmes se définit par les interactions entre individus et avec entre les individus et leur environnement. La régulation du système dépendrait donc de la relation entre les individus et la distribution des ressources naturelles.

La Dynamic Urban Water Simulation Model a été développée à partir de 2007 dans le but de modéliser les effets de l'urbanisation et des changements climatiques sur le cycle urbain de l'eau (Willuweit et O'Sullivan, 2013). Ce modèle permet d'évaluer la relation entre la dynamique d'un système urbain et son environnement. Il intègre et relie certains paramètres d'influences dont un modèle sur le climat (LARS-WG) et un autre portant sur la dynamique d'utilisation du sol (MOLAND). À partir des données obtenues, un autre modèle qui porte sur la projection du cycle de l'eau en milieu urbain sur une période de 20 ans (DUWSiM-WB) est intégré à la modélisation globale.

Le modèle MOLAND (Willuweit et O'Sullivan, 2013) a quant à lui été développé en 2007 par le European Commission's Joint Research Center dans le but d'évaluer l'impact socio-économique des projections démographiques et du marché de l'emploi sur la croissance urbaine. Pour ce faire, ces deux facteurs ont été étudiés à partir de cartographies urbaines et convertis en superficie de sol utilisée. Le modèle prend en compte l'effet de voisinage et de l'attractivité que certaines utilisations du sol engendrent.

1.2 L'agriculture urbaine

De par leurs activités et leurs modes de vie, les zones urbaines et agricoles ont longtemps été opposées. Toutefois, depuis les années 30-40, l'agriculture réintègre peu à peu les milieux urbanisés (Salomon, 2012). Initialement dans le but de subvenir aux besoins en temps de guerre, l'agriculture urbaine a aujourd'hui une vocation sociale et même environnementale qui suscite de plus en plus l'intérêt des citoyens. Selon Éric Duchemin, professeur associé à l'Institut des sciences de l'environnement de l'UQAM, « [...] l'agriculture urbaine est aujourd'hui en plein essor à Montréal, ainsi que dans plusieurs villes des États-Unis et d'Europe » (Martin, 2012, p. 8). Selon Salomon (2012, p. 29), « l'agriculture devient l'affaire de tous. Il s'agit souvent d'un acte militant visant à se réapproprier la production alimentaire, à recréer un lien avec la nature ou avec les autres dans la ville ». L'agriculture urbaine est donc devenue synonyme de réappropriation de l'espace par la collectivité et de préservation de la « nature » en ville. Pour certains même, l'agriculture urbaine représente un

facteur d'amélioration de la qualité de vie et s'ajoute aux caractéristiques des villes durables. L'agriculture urbaine se différencie par le fait qu'elle est intégrée dans le système économique et écologique d'une ville. L'agriculture agit ainsi en interaction avec les autres usages de la ville (Conchita *et al.*, 2010).

Actuellement, la majorité des grandes villes nord-américaines n'ont pas d'autonomie alimentaire (Vidal et Fleury, 2010). Pourtant, favoriser l'agriculture urbaine permettrait de diminuer les coûts d'entreposage et de transport et part le fait même de limiter les émissions de GES. Accorder une place à l'agriculture en champ permettrait également de réduire les risques d'inondation dus à la perméabilité du sol urbain (refoulement d'égouts) et les risques de pénuries alimentaires (MAPAQ, 2014).

Par contre, certaines craintes demeurent quant à la qualité des aliments produits dans les zones urbaines (Gaudreault, 2011). En effet, bien que les recherches demeurent peu nombreuses sur le sujet, la contamination des sols et la pollution de l'air pourraient poser certaines problématiques quant à l'agriculture en champs, dans un périmètre urbanisé.

Plusieurs initiatives d'agriculture voient actuellement le jour. Dans la métropole de Portland en Oregon, l'approvisionnement local est encouragé dans les restaurants. À Utrecht en Hollande l'élevage hors-sol est autorisé. La ville de New York et la région de la Lea Valley à l'est de Londres expérimentent la culture hydroponique alors qu'en Ontario et à Tokyo, la culture sur toit fait l'objet de plusieurs recherches (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche de France et Agro ParisTech, 2009). La ville de Seattle a intégré l'agriculture urbaine dans son schéma d'aménagement et Londres permet à la communauté d'occuper les terrains vacants à des fins d'agriculture en sacs (Martin, 2012). Ainsi, ces villes réussissent à créer un engouement autour de l'approvisionnement local et à innover en matière d'agriculture urbaine.

Le concept de la ferme verticale a été pensé en fonction de la croissance démographique et des changements climatiques prévus au cours des prochaines années (Despommiers, 2010).

Face à des préoccupations de souveraineté alimentaire et de consommation responsable des ressources, plusieurs voient la nécessité de rapprocher, voire même d'intégrer la production agricole des grands centres urbains. Par manque d'espaces et par souci de recyclage des déchets de la ville (valorisation énergétique, par exemple), les fermes en hauteur s'avèrent une solution que certaines villes expérimentent déjà. Dépendant des aliments cultivés, les fermes verticales permettraient en rendement de 4 à 30 fois plus élevé que l'agriculture traditionnelle. À titre d'exemple, pour 74 hectares de culture de fraises extérieure, les fermes verticales permettent de produire la même quantité sur 0,4 hectare (Despommiers, 2010).

À Singapour, la serre verticale Sky Greens (tel que démontré à la figure 1.2) possède 120 étagères de neuf mètres de hauteur réparties sur 3,2 hectares, ce qui permet de produire 5 à 10 fois plus de légumes que la culture en champs (par unité de surface). La production de légumes équivaut en moyenne à 0,5 tonne par jour. Cette ferme verticale qui pratique la culture hydroponique utiliserait également 85 % moins d'eau que l'agriculture traditionnelle et permettrait de combler les besoins de 7 % de la population locale (Sky Greens, 2011).



Figure 1.2 Étages de la serre Sky Greens
Tirée de Transition Verte (2013)

Despommier, chercheur et professeur à l'Université Columbia de New York est un des précurseurs du concept de la ferme verticale en Amérique du Nord. Il a développé sa propre vision futuriste de la ferme verticale. Il s'agirait en fait d'un bâtiment d'une trentaine d'étages, réparti sur près de 280 000 m² et qui permettrait de nourrir 50 000 personnes quotidiennement (Filipe, 2011). Selon le professeur, le modèle de ferme développé permettrait d'économiser de 70 % à 95 % de la quantité d'eau consommée (Despommiers, 2010). À Vancouver, le Local Garden a été inauguré en 2012. Cette installation de 560 m² et de 12 étages permettait de produire plus de 75 tonnes par année de légumes verts, de consommer 10 % moins d'eau que l'agriculture traditionnelle et d'approvisionner les commerces et les restaurants situés dans un rayon de 10 km (Pélegrin-Genel, 2014). L'installation a toutefois dû fermer ses portes en 2014, à la suite d'une faillite (CBC News, 2014).

À Montréal, les fermes Lufa ont ouvert leur première serre sur toit en 2011. La serre permet de produire plus de 25 variétés de légumes sur 2880 m² et de desservir près de 3 500 personnes annuellement (Carrot City, 2014). L'entreprise prévoit pouvoir desservir plus de 8000 personnes avec sa nouvelle serre de 3995 m², située à Laval (Champagne, 2013).

Toutefois, certains semblent inquiets face à ces nouvelles constructions (Purseigle, 2012). D'une part, parce que les fermes verticales dénaturent en quelque sorte l'activité agricole traditionnelle. D'autre part, parce que même si ces fermes polluent moins que l'agriculture en champs, leurs consommations de ressources demeurent très importantes, notamment au niveau de l'énergie, des matériaux de construction et de l'entretien qu'elles nécessitent. Finalement les fermes verticales sous-entendent des espaces artificialisés, ce qui limite les services écologiques pouvant être rendu aux citoyens.

1.3 L'eau

La section suivante porte sur la disponibilité de la ressource hydrique et sur les facteurs qui l'influencent. Elle vise également à faire ressortir les enjeux en lien avec l'épuisement de la ressource.

1.3.1 Facteurs anthropiques

« [...] la dépendance aux ressources en eau potable continue de jouer un rôle important pour la survie des villes et des sociétés. » (Dubiel, 2002, p.76). Outre que la consommation d'eau, certaines interventions et activités humaines ont un impact direct sur le niveau de l'eau. Le dragage du lit pour la navigation entraîne une modification au niveau de la profondeur et la largeur du fleuve. La régularisation des débits que provoquent les nombreux barrages hydroélectriques et les écluses en amont des villes ont aussi un impact sur la fluctuation des débits et donc sur la quantité d'eau disponible. Par exemple, le barrage Moses-Saunders situé à la hauteur de Cornwall a réduit la variation naturelle du niveau de l'eau de 70 % (Astrade, 1998). L'augmentation de surfaces construites dans les zones urbaines entraîne également une imperméabilisation du sol, une diminution du couvert végétal et donc une augmentation des eaux de ruissellement canalisées, ce qui modifie le régime hydrique naturel.

Bien que l'aspect qualitatif du fleuve ne soit pas pris en compte dans le cadre de cette recherche, il est important de noter que l'empiètement dans les plaines inondables, l'artificialisation et l'érosion des rives peuvent mener au déclin de certaines espèces animales et végétales et à la dégradation de la qualité de l'eau. Les espèces envahissantes et les micro-polluants (substances toxiques inconnues) font désormais partie de la réalité de plusieurs cours d'eau.

1.3.2 Facteurs d'influence naturels

Au niveau des facteurs naturels, les précipitations (neige et pluie), l'apport du bassin en amont, l'eau verte, c'est-à-dire la vapeur d'eau allant rejoindre l'atmosphère et le temps de renouvellement naturel de la ressource ont un impact direct sur la disponibilité des ressources. Les recherches démontrent également que les changements climatiques, accélérés par les activités humaines, ont un impact sur la quantité de ressources disponibles et sur la régularité de l'approvisionnement (Environnement Canada, 2006).

Au niveau du fleuve Saint-Laurent, en plus de la remontée de la limite d'eau salée dans le Golfe, de l'augmentation des inondations et des débordements d'égout, le groupe de recherche OURANOS (2010) avance qu'une hausse des températures engendrerait une plus grande évaporation, ce qui diminuerait le débit du fleuve, de même que le niveau de l'eau. L'assèchement de certaines zones présenterait ainsi des risques pour l'approvisionnement en eau potable et pour la navigation commerciale et de plaisance. Selon Environnement Canada (2010), il faudra prévoir une augmentation de la température des Grands Lacs de 4,5 °C d'ici 2055, traduisant une baisse du niveau de l'eau entre 0,5 et 1 m. Au niveau du fleuve, cela se traduirait par une diminution du débit sortant pouvant atteindre 20 %. Selon la WWF, « Les modèles suggèrent que les changements climatiques pourraient réduire le débit d'eau venant du lac Ontario de 4 % à 24 % annuellement d'ici 2050, et faire baisser le niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent à Montréal entre 0,2 et 1,2 m » (WWF, 2009, p. 13).

1.3.3 Renouvellement de la ressource hydrique

Certains chercheurs ont tenté de comprendre comment se régénèrent les ressources naturelles dites renouvelables. C'est le cas du modèle de Ricardo-Malthus (Brander et Taylor, 1998) sur la dynamique des ressources naturelles. En fait, selon cette théorie, la quantité de ressource disponible (stock) à un moment précis dépend de son taux de régénération, de sa capacité de charge et du taux de prélèvement. Le renouvellement de la ressource se traduit par l'équation 1.1, où R_s représente le taux de régénération de la ressource, S la quantité de ressource, K la capacité de charge et $\phi\alpha\beta S$ le taux de prélèvement.

$$\frac{ds}{dt} = Rs(1 - S/K) - \phi\alpha\beta S \quad (1.3)$$

L'eau douce est une ressource renouvelable, mais elle n'est pas inépuisable (Descôteaux, 2008), d'autant plus que l'eau d'un fleuve s'écoule vers la mer et ne revient donc pas. La Terre possède des limites « finies » et si la quantité d'eau prélevée excède l'apport naturel d'un territoire délimité dans le temps (renouvellement), la ressource s'épuise. Il faut alors prélever une ressource non renouvelable ou difficilement accessible : l'eau salée ou encore, l'eau souterraine, comme c'est le cas en Arabie saoudite et en Libye (Margat, 2008). L'utilisation durable de la ressource doit donc respecter le rythme de renouvellement de la ressource.

Le temps de renouvellement est variable d'une source à l'autre, dépendant de la taille du bassin versant, de sa localisation et de la pluviométrie de l'endroit. Selon François Valiron (1984), la durée moyenne de renouvellement des stocks pour les lacs est de 17 ans alors qu'une rivière prendra seulement 16 jours à se renouveler. D'un autre côté, Statistique Canada (2013) s'appuie sur les données du World Resources Institute et avance que la ressource en eau d'un territoire devrait être remplacée intégralement par la pluie, la neige et le ruissellement en une année. À titre d'exemple le réservoir Robert-Bourassa, situé dans le Nord-du-Québec, en aval du fleuve la Grande Rivière, prend 7 mois à se renouveler tandis qu'il faut 2 ans au réservoir Caniapiscau situé en amont de ce fleuve (Astrade, 1998).

1.3.4 Concept du dépassement des limites

Actuellement, l'empreinte écologique dépasse de 20 % la capacité de charge de la planète. Selon Dennis Meadows *et al.* (2013), le dépassement se produit principalement lorsqu'on assiste à une croissance rapide qui se heurte à une limite difficilement franchissable suivie d'un retard dans la mise en place de mesures permettant de faire redescendre le système sous la limite atteinte. Dans le cas d'une ville, le retard dans l'intervention peut être dû entre autres au processus bureaucratique, à une erreur de données ou encore à de mauvaises prédictions de la réaction du système.

Le dépassement de cette limite aura tôt ou tard un effet négatif sur le taux de croissance de la population, sauf si des moyens sont pris pour limiter son impact. La quantité d'eau pouvant être prélevée a aussi des limites qui, une fois dépassées, peuvent provoquer l'assèchement des cours d'eau. Dans la plupart des cas, l'irrigation pour l'agriculture et la consommation urbaine sont les premières causes (CNURE, 2005). Plusieurs exemples à travers le monde prouvent qu'il est possible de dépasser ces limites. Aux États-Unis, plus d'un million d'hectares agricole ne peuvent plus être irrigués en raison de la baisse de l'aquifère de l'Ogalalla. En Chine, plus de 30 km³ d'eau sont surexploités chaque année, ce qui a causé l'assèchement du fleuve Huang He (Lasserre et Descroix, 2002). Les répercussions peuvent être d'ordre économique en créant une augmentation du prix des aliments, ou environnemental, en surexploitant les nappes souterraines, ressources non renouvelables.

1.3.5 Modèle dynamique de gestion de l'eau

Mandaté par la Commission nationale de l'Eau, l'Institut mexicain de technologie de l'eau a développé un modèle à partir de la plate-forme STELLA 9.1 qui traduit la dynamique de gestion intégrée du bassin Lerma-Chapala, situé dans la région du centre du Mexique (Romero et Olaiz, 2008). Avec une superficie de 48 215 km², il s'agit du plus grand plan d'eau du Mexique. Le bassin dessert 11 % de la population (dont Mexico et Guadalajara), 13 % de la superficie irriguée et plus du tiers de la production industrielle.

Ce modèle a notamment permis de comprendre plus largement le fonctionnement et les problématiques liées à l'utilisation de la ressource en eau de la région. Par exemple, la croissance de la demande, le rejet des eaux non traitées, l'augmentation de l'érosion des sols qui se traduit par la détérioration de la qualité de l'eau dans le réservoir et l'augmentation du taux de sédimentation). Il a permis d'une part de simuler le ruissellement dans le bassin et d'établir des scénarios présentant d'éventuelles modifications (hydrologiques, technologiques, économiques, sociales, environnementales, et réglementaires). Le modèle a aussi permis de proposer un coût associé à l'usage de la ressource, de formuler des recommandations, notamment au niveau de répartition de la ressource (équitable et

responsable) et de proposer des alternatives pour la gestion intégrée de l'eau. Le modèle porte sur la dynamique des 17 bassins versants qui composent le bassin Lerma-Chapala et celle des huit districts d'irrigation ainsi que le fonctionnement des aquifères (eaux souterraines) et le système (les accords) de distribution d'eau de la région. Certains paramètres sont également développés tels que les facteurs de pluviométrie, d'humidité du sol et d'évaporation. Au niveau qualitatif, le modèle aborde le degré de contamination et de pollution du bassin (qualité de l'eau). Les facteurs politiques (réglementation et politique de gestion) et économiques (coût associé au transfert) sont aussi modélisés. Au niveau quantitatif, le modèle traite de l'utilisation de l'eau potable par région urbaine et rurale, de l'eau industrielle de huit secteurs d'activité et de l'irrigation des terres agricoles.

Les travaux soulevés dans le cadre de cette section révèlent que plusieurs facteurs peuvent influencer la disponibilité de la ressource hydrique, dépendant de l'endroit et de l'utilisation qui en ait fait. La section suivante présente un autre type de ressources dont la disponibilité peut également être affectée par différents facteurs.

1.4 Le sol et la densité

Selon le MDDEFP (2002), « le sol constitue un élément vital de l'écosystème et une ressource limitée qui doit être protégée et, là où elle a été dégradée, réhabilitée ». Le ministère identifie six fonctions essentielles rattachées au sol. Au niveau écologique, le sol « a une action tampon de filtration et de transformation qui contribue à garantir et sauvegarder la vie, constitue un habitat pour les plantes et les animaux qui y vivent [et] permet à la biomasse de se développer (agriculture et sylviculture) ». Au niveau anthropique, le sol « constitue un support pour toutes les activités humaines, autant agricoles, urbaines, industrielles, institutionnelles, commerciales et récréatives. [II] constitue une source de matières premières (gravier, sable, etc.) [et] contient une réserve d'eau souterraine essentielle à de multiples usages (eau potable, irrigation, procédés industriels, etc.) ». La théorie de Maslow confirme d'ailleurs que le sol (ou le territoire) représente un besoin de base pour les êtres vivants (Dubiela, 2011).

Tel que démontré à la figure 1.3, l'utilisation du sol se définit d'abord par l'empreinte au sol des bâtiments. Ainsi, plus l'empreinte au sol sera grande, plus la densité d'occupation du sol et donc le nombre d'habitants au km² sera élevé (Gill, 2012). Un haut taux de minéralisation et des sols imperméables sont généralement associés à une forte empreinte au sol.

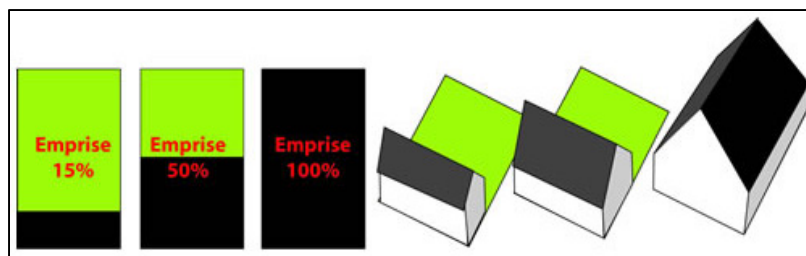


Figure 1.3 Exemple d'empreinte au sol d'un bâtiment
Tirée de C.A.U.E (date inconnue)

Selon le MAMROT (2014), « la notion de densité d'occupation du sol permet de circonscrire le rapport entre la superficie des constructions implantées sur un terrain et celle du terrain en tant que tel de manière à harmoniser la densité de construction ». Prévoir la densité d'occupation du sol souhaitable d'une ville permet donc d'évaluer les futurs besoins et rentabiliser les infrastructures publiques. La densité brute ou nette fixée (figure 4.1) influencera par la suite la forme urbaine et déterminera l'intensité et la nature de l'occupation du sol souhaité. La densité nocturne sert quant à elle à calculer la densité de population résidente.

Le coefficient d'occupation du sol (figure 1.1), calculé en fonction de l'empreinte d'un bâtiment, varie en fonction du type d'habitation, passant de 0,2 pour les maisons unifamiliales à 4 pour les milieux densément peuplés comme le centre-ville de Paris (Degraeve, 2011). Le coefficient d'empreinte au sol, calculé en fonction de tous les espaces au sol construits tels que les stationnements, les sous-sols ou les terrasses, permet quant à lui de contrôler le pourcentage d'espaces végétalisés ou de terrains potentiellement agricoles dans la ville.

Tableau 1.1 Synthèse des termes utilisés pour désigner l'utilisation du sol

Catégorie	Équation
Densité brute	Nombre de logements / Superficie de terrain incluant les infrastructures publiques
Densité nette	Nombre de logements / Superficie de terrain excluant les infrastructures publiques
Coefficient d'emprise au sol	Superficie construite / Superficie de terrain totale
Coefficient d'occupation du sol	Superficie totale de plancher / Superficie de terrain totale

Plusieurs autres facteurs peuvent influencer l'utilisation du sol. Par exemple, la contamination des terrains peut ralentir, voir freiner, le développement urbain, dû aux coûts associés à la décontamination. D'un autre côté, des politiques de préservation des milieux naturels bloqueront l'occupation de certains espaces, tant que celles-ci seront appliquées. Les règlements d'urbanisme permettent quant à eux de contrôler l'utilisation du sol. Au niveau local, le règlement de zonage viendra encadrer le développement en spécifiant les densités d'occupation du sol et la proportion de terrain pouvant être occupée par un bâtiment, ainsi que la hauteur et l'implantation des bâtiments. Le règlement de lotissement viendra quant à lui régir la superficie des terrains par usages.

1.4.1 La densité urbaine

Bien que plusieurs associent encore une forte densité urbaine à une dégradation de la qualité de vie (Gill, 2012), « [...] la notion de densité urbaine est reconnue [...] comme une composante incontournable et particulièrement performante du développement durable. » (Goulet, 2012, p.10). Alors que la CMQ vise 35 à 75 logements à l'hectare, la CMM va jusqu'à cibler une densité urbaine de 150 logements à l'hectare, comparable à celle du Plateau Mont-Royal.

Au niveau de la densité optimale, certains chercheurs avancent qu'elle demeure difficile à évaluer à cause de la culture et des modes de vie associés à chaque ville (Dubiela, 2011). Toutefois, « la capacité d'adaptation des individus de façon à permettre une plus grande densité [...] constitue un des signes d'aptitude des organismes à la santé écosystémique, car elle augmente la complexité du système. » (Dubiela, 2011, p.74). Selon l'auteur, pour qu'une densité soit jugée souhaitable, les villes devraient néanmoins tenir compte de la quantité de ressources naturelles accessibles et de son temps de renouvellement et s'assurer de l'équité dans le partage de ces ressources. Toujours selon Dubiela (2011), la densité maximale correspondrait aux limites sanitaires liées à la concentration de personne dans un espace commun et à la tolérance de la population face à l'entassement. C'est ce qui explique que des villes comme Mexico, le Caire, Sao Paulo et Tokyo puissent atteindre des seuils de densité extrême.

Les conséquences d'une trop forte densité se répercuteraient d'abord sur les personnes physiquement et mentalement plus sensibles. Malthus décrivait finalement la densité comme étant un indicateur de l'état de santé d'un système urbain (Dubiela, 2011).

1.4.2 Le renouvellement du sol

Le temps de renouvellement du sol dépend de sa santé qui est définie par la FAO comme :

[...] la capacité du sol à fonctionner comme un système vivant. Les sols en bonne santé maintiennent en leur sein une diversité d'organismes qui contribuent à combattre les maladies des plantes, les insectes et les adventices, s'associent de façon bénéfique et symbiotique aux racines, recyclent les nutriments végétaux essentiels, améliorent la structure du sol et, partant, la rétention des eaux et des nutriments, le tout contribuant à améliorer la production végétale. (FAO, 2011, p.30)

Un sol en mauvais état demandera donc plus de temps de récupération pour retrouver son état initial. Plusieurs facteurs décrits ci-dessous influencent le temps de renouvellement du sol et donc le développement des villes.

1.4.3 Contamination du sol

La problématique des terrains contaminés porte autour des délais de réhabilitation et des coûts associés à la décontamination. Un terrain contaminé est caractérisé par une concentration de contaminants emmagasinés dans le sol plus élevée que ce qui prescrit les lois ou règlement. Les terrains industriels ou à proximité des voies de circulation sont généralement les plus touchés. Bien qu'aujourd'hui, les principes de prévention¹ et de pollueur payeur² tendent à être de plus en plus appliqués, il n'en demeure pas moins que dans les villes au passé industriel, la réhabilitation de ces terrains demeure un frein au développement. Selon le MDDEFP (1998), « [...] les impacts sur la santé humaine, la dégradation de l'environnement, la perte d'usage de terrains et de nappes d'eau souterraine, et l'incertitude des investisseurs sont des conséquences directes de la présence de contamination dans les sols ».

Selon une étude réalisée par l'Université de Sherbrooke (Khatab et Ben, 2010), le coût de décontamination peut varier approximativement entre 30 \$ et 1540 \$ le m³ de sol à traiter, dépendant du degré de contamination, de la méthode utilisée et du type de contaminant. Les coûts associés à la caractérisation du sol ne sont toutefois pas inclus dans ce calcul. Les délais de réhabilitation dépendront également de ces facteurs et seront estimés entre six mois et cinq ans.

¹ « Le principe de prévention vise à empêcher que pareille situation ne se répète dans l'avenir. Il a pour but de préserver l'intégrité des sols afin d'en sauvegarder les fonctions écologiques et de garantir le plein usage de cette ressource actuellement et dans l'avenir ». (MDDEFP, 2013)

² « Le pollueur est responsable de la contamination qu'il a causée et des impacts que celle-ci peut entraîner, de même que des coûts de la caractérisation et de la restauration des terrains qu'il a dégradés, et qu'il ne peut transférer cette responsabilité aux autres membres de la société ou aux générations futures ». (MDDEFP, 2013)

1.4.4 Minéralisation du sol

L'omniprésence des espaces minéralisés est le reflet des villes développées pour l'automobile : stationnements et voies de circulation occupent désormais une grande partie des villes. Ces espaces perméables nuisent à l'infiltration de l'eau dans le sol et augmentent le ruissellement, ce qui provoque le refoulement des égouts et augmente donc les risques d'inondation et d'érosion en milieu urbain. De plus, ces espaces ont tendance à emmagasiner la chaleur et favoriser la formation d'îlots de chaleur. Finalement ces espaces sont difficiles à reconverter à cause de leur fonctionnalité et du fait qu'ils sont régis par leur propriétaire foncier.

Des initiatives voient le jour pour « déminéraliser » ou limiter l'impact de ces espaces. À titre d'exemple, l'installation de dalles alvéolées, l'utilisation de matériaux réfléchissants ou perméables et l'excavation de certains espaces de stationnement pour la plantation d'arbres permettent l'infiltration d'eau dans le sol et la réduction des îlots de chaleurs (BNQ, 2013).

1.4.5 Épuisement du sol

Selon, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (2014), l'épuisement du sol se traduit par la perte de nutriments essentiels à la survie et la croissance des végétaux. Il peut être dû à l'intensité des activités urbaines, à une mauvaise gestion des terres agricoles, à un faible taux de végétalisation ou à une « dénaturalisation » du milieu. Ce phénomène se traduit par l'érosion ou l'infertilité des sols. Dans la mesure où l'agriculture urbaine est intégrée à la ville, l'épuisement du sol limite la production de nourriture. Pour remédier à cette situation, les nutriments manquants doivent être injectés dans le sol, ce qui peut entraîner des investissements importants.

Ainsi, les travaux de recherches soulevés dans le cadre de ce chapitre ont permis d'éclairer sur les différents facteurs qui peuvent influencer le développement d'une ville et la disponibilité des ressources retenus dans le cadre de cette étude. Ils ont également permis

d'orienter sur les éléments à considérer dans la construction du modèle et dans son fonctionnement. Le chapitre suivant présente ainsi les fondements du modèle développé.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre porte essentiellement sur la construction et le fonctionnement du modèle développé. Il porte également sur les données et sur les paramètres utilisés dans le cadre de ce travail.

2.1 Approche systémique

Les systèmes urbains sont complexes, organisés et influencés par une multitude de facteurs (Donnadieu *et al.*, 2003). L'approche systémique a donc été utilisée dans le cadre de cette étude dans le but d'évaluer les interactions, les rétroactions et la dynamique des différents groupes présents à l'intérieur d'un système urbain et en retour, leur influence sur les ressources. Dans ce cas-ci, la relation se traduira en termes de flux de personnes, de m³ d'eau et de m² d'espace consommés par personne pour les usages industriel, résidentiel et agricole.

Tel que démontré à la figure 2.1, l'approche vise également à mettre en lumière l'interdépendance de ces usages. La croissance d'un groupe devrait ainsi suivre les mêmes tendances qu'un autre groupe, de sorte que :

- l'évolution des travailleurs (par rapport au nombre de travailleurs initial) influencera la croissance de la population active;
- l'évolution de la population active (par rapport à la population active initiale) influencera la croissance des agriculteurs;
- l'évolution des agriculteurs (par rapport au nombre d'agriculteurs initial) influencera la croissance des travailleurs.

Dans un contexte de compétition pour les ressources, il apparaît nécessaire que les groupes d'usages influencent également leur décroissance entre eux. De la sorte, la diminution d'un groupe favorisera la croissance d'un autre et vice versa (figure 2.1). Ainsi :

- l'évolution des travailleurs (par rapport au nombre de travailleurs initial) influencera la décroissance des agriculteurs;
- l'évolution de la population active (par rapport à la population active initiale) influencera la décroissance des travailleurs;
- l'évolution des agriculteurs (par rapport au nombre d'agriculteurs initial) influencera la décroissance de la population active.

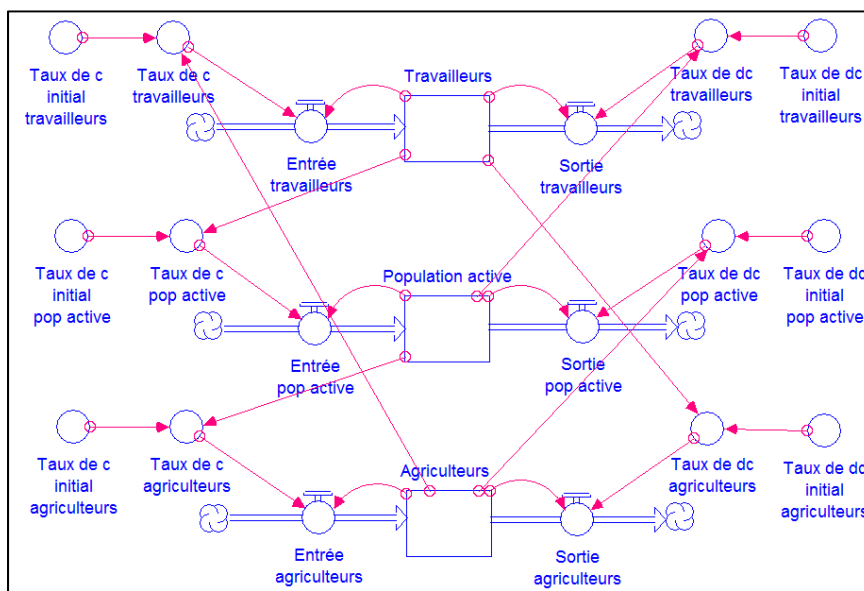


Figure 2.1 Dynamique du système d'un point de vue d'ensemble

Les relations entre les usages peuvent se traduire par des situations ou des facteurs d'influence sur la croissance et la décroissance de chacun des groupes. Tout comme la dynamique, ces facteurs évolueront dans le temps en fonction du rapport existant. À titre d'exemple, comme le démontre la figure 2.2, la croissance des travailleurs sera influencée positivement par un taux d'emplois élevé et un faible taux d'exploitation du sol. D'un autre côté, ce groupe aura tendance à décroître si le taux de chômage et le taux d'exploitation du sol sont trop élevés. Le taux associé aux facteurs d'influence a été fixé arbitrairement à 0,05 %.

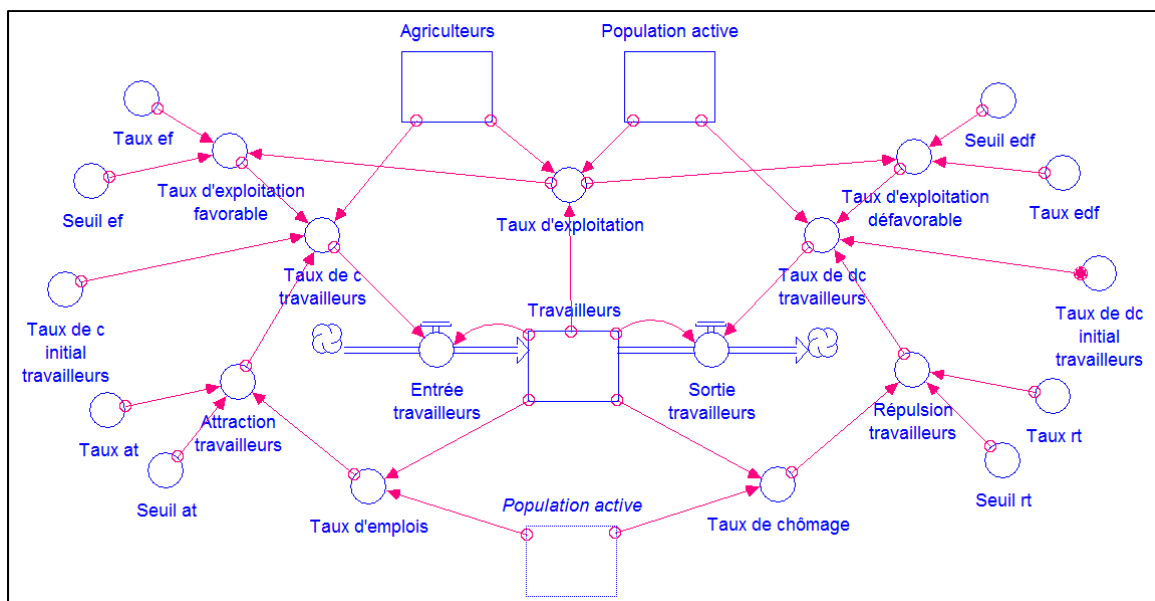


Figure 2.2 Dynamique du système incluant les facteurs d'influence du point de vue des travailleurs

Au niveau de l'intégration de la consommation des ressources dans la dynamique du système (figure 2.3), la rétroaction se fait sentir sur le taux de décroissance des groupes d'usage. Ainsi, une fois la limite de ressources disponibles atteinte, la population aura tendance à décroître et le système, à s'autoréguler. Afin d'évaluer l'impact de chacun des groupes sur les ressources, ceux-ci ont été convertis en fonction des besoins en eau (m^3) et en sol (m^2) d'un travailleur, d'un habitant et d'un agriculteur. Ces résultats ont par la suite été multipliés par le nombre d'effectifs par groupe. L'impact du manque de ressource affecte les groupes de la même façon, soit en augmentant le taux de décroissance annuel de 0,08 %, de sorte qu'il soit plus significatif que le taux des facteurs d'influence.

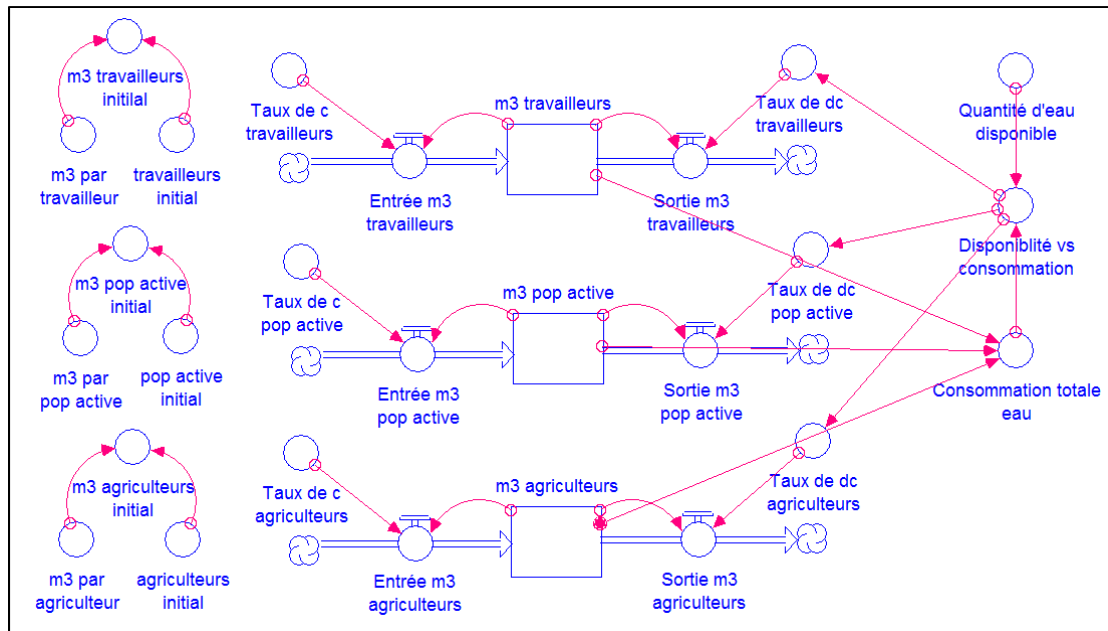


Figure 2.3 Dynamique du système en fonction de la consommation d'eau

2.1.1 Logiciel utilisé : STELLA 9.1.1

Le logiciel utilisé dans le cadre de cette recherche a été développé par l'entreprise isee systems qui se spécialise dans les logiciels de « pensée systémique » (Systems Thinking software). Il est principalement utilisé pour simuler des systèmes en fonction du temps, pour illustrer des systèmes complexes et les interactions qui existent différents éléments d'un même système ainsi que pour comprendre la dynamique globale d'un système. Il permet également de réaliser des analyses de sensibilité, d'évaluer de quelle façon le modèle évoluera dans le temps, de démontrer graphiquement les résultats obtenus et d'importer ou d'exporter des données entre autres vers Microsoft Excel.

La méthode Runge-Kutta a été utilisée pour la construction des graphiques, car elle a été conçue pour traiter des systèmes contenant des variations ou des oscillations continues et des tendances inhérentes.

Chaque logiciel de modélisation possède ses limites d'utilisation. Dans le cas de STELLA 9.1, la durée sur laquelle il est possible de calculer et d'observer la dynamique est restreinte. Ainsi, la dynamique ne peut pas s'observer sur plus de 33 000 unités de temps. Dans le cadre de cette recherche, évaluer la situation à long terme sur une base horaire ou journalière n'est donc pas possible.

2.1.2 Les données statistiques utilisées

Le manque d'uniformité, de constance, d'accessibilité et de disponibilité au niveau des données statistiques demeure un frein à l'application du modèle à une situation urbaine réelle. Par exemple, il y a un grand manque au niveau des données canadiennes sur la consommation exacte d'eau par usage et par ville. La variabilité des années des données (entre 2000 et 2013) affecte également la précision du modèle. Ainsi, tel que démontré au tableau 2.1, la recherche tient compte des données les plus récentes disponibles pour chacun des facteurs.

Tableau 2.1 Principales sources de données utilisées

Source utilisée	Contexte d'utilisation
Statistique Canada	Données socio-économiques du Québec Données sur la demande en eau pour les usages industriels et résidentiels
FAO	Données sur la demande en sol en agriculture
Water Footprint	Données sur la demande en eau en agriculture
OMS	Besoins en nourriture par habitant
Ville de Montréal	Données portant spécifiquement sur l'agglomération de Montréal

Dans un contexte comme celui de Montréal, étant donné qu'un fleuve est constamment alimenté et en mouvement, il demeure difficile de le considérer comme une réserve (stock) et d'évaluer précisément la quantité d'eau disponible à l'endroit où se situe la ville. Toutefois, il est possible de convertir son débit moyen en volume d'eau disponible par année.

2.2 Modèle de référence

La section suivante détaille les éléments et les valeurs qui ont été pris en compte dans la modélisation, dans le but de valider les hypothèses avancées. Certains éléments du système urbain ont volontairement été exclus dans le but de se concentrer sur les objectifs initiaux.

Le modèle de référence a été construit en fonction des activités industrielle, résidentielle et agricole présentes dans une ville. Il repose sur des équations différentielles afin de simuler l'évolution du système urbain et suppose donc une croissance exponentielle. Ainsi, l'évolution du système se calcule sur une base annuelle à partir du nombre initial de personnes pour les trois usages. Les taux de croissances et de décroissance des groupes ont été fixés à partir de la revue de littérature, en fonction de projections ou de tendances actuelles. Ces taux demeurent les mêmes dans le temps, mais la croissance et la décroissance des groupes seront influencées par d'autres facteurs. L'influence des facteurs externes, tels que les taux de natalité et de mortalité n'ont pas été pris en compte, dans le but de se concentrer uniquement sur la dynamique interne de ces trois groupes d'usages. Le modèle de référence suppose également que la ville possède toutes les infrastructures publiques et de transport pour se développer et que le prix initial des terrains est concurrentiel à celui du marché.

2.2.1 Les données utilisées

2.2.1.1 Les travailleurs

Dans le cadre de cette étude, il s'agit des travailleurs spécifiques au secteur de la fabrication, tels que définis par Industrie Canada (2011). Le taux de croissance et de décroissance initial des travailleurs (0,3 %) a été fixé en fonction des perspectives sectorielles 2012-2014 de Service Canada (2012), pour le secteur de la fabrication de la région métropolitaine de Montréal. Le tableau 2.2 détaille les équations de chacun des éléments présentés à la figure 2.4 qui elle, représente la dynamique du modèle de référence du point de vue des travailleurs.

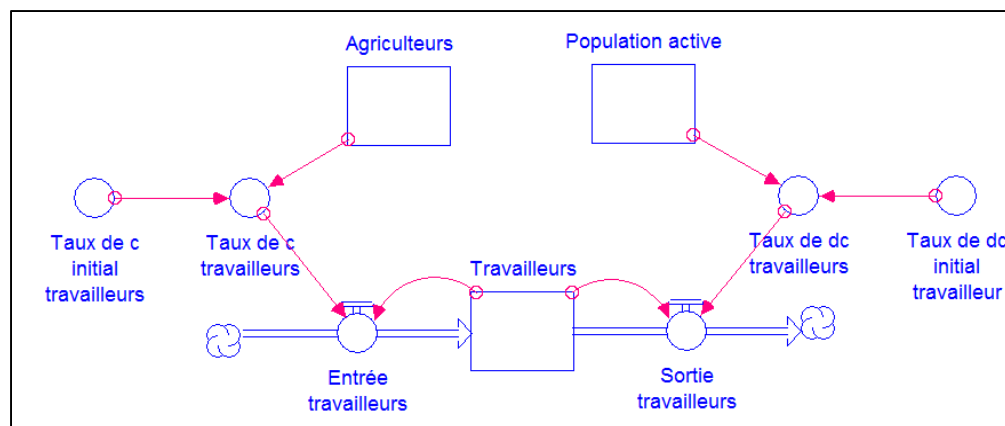


Figure 2.4 Dynamique du modèle de référence du point de vue des travailleurs

Tableau 2.2 Équations utilisées - Travailleurs

Catégorie	Équation (Voir Annexe II, p. 117 - 125)
Travailleurs	$\text{Travailleurs} + (\text{Entrée des travailleurs} - \text{Sortie des travailleurs}) \times dt$
Entrée des travailleurs	$\text{Travailleurs} \times \text{Taux de croissance (C) travailleurs}$
Taux de C	$\text{Taux de C initial des travailleurs} \times (\text{Agriculteurs/Agriculteurs initiaux})$
Sortie des travailleurs	$\text{Travailleurs} \times \text{Taux de décroissance (DC) des travailleurs}$
Taux de DC	$\text{Taux de DC initial des travailleurs} \times (\text{Population active/Population active initiale})$

2.2.1.2 La population active

Dans le cadre de cette étude, uniquement la population active dans le secteur de la fabrication a été retenue, dans le but de pouvoir observer son impact sur le nombre de travailleurs. La population active représente la population résidente de 15 ans et plus qui est apte à travailler. Bien que sa croissance puisse être exponentielle, la population active est influencée par la présence d'emploi et de nourriture ainsi que par le niveau de bien-être physique et psychologique des habitants. Ces facteurs traduisent en partie l'indice de qualité de vie d'une ville, tel que développé par l'OCDE (2013). Le taux de croissance et de décroissance

démographique initial annuel (0,4 %) ont quant à eux été fixés en fonction de la moyenne des projections 2006-2031 de l’Institut de la statistique du Québec (2009), pour la région de Montréal. Le tableau 2.3 détaille les équations de chacun des éléments présentés à la figure 2.5 qui elle, représente la dynamique du modèle de référence du point de vue de la population active.

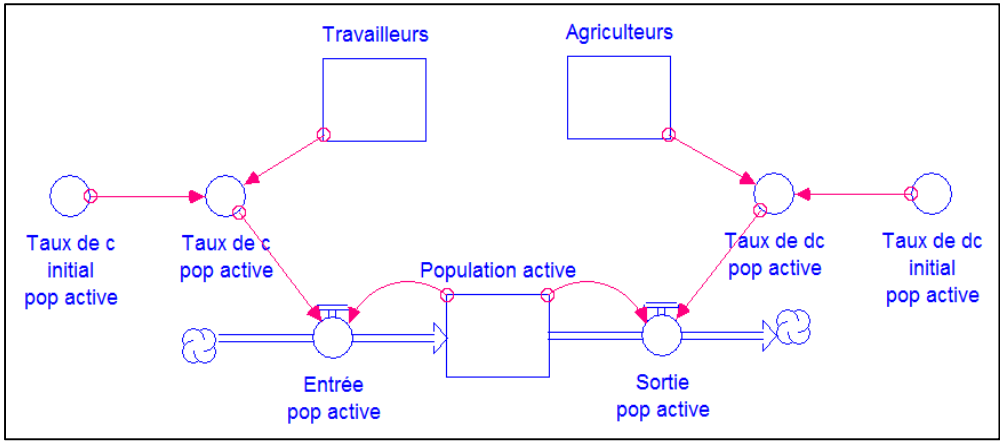


Figure 2.5 Dynamique du modèle de référence du point de vue de la population active

Tableau 2.3 Équations utilisées - Population active (pop. active)

Catégorie	Équation (Voir Annexe II, p. 117 - 125)
Population active	$Population\ active + (Entrée\ de\ la\ pop.\ active - Sortie\ de\ la\ pop.\ active) \times dt$
Entrée de la pop. active	$Population\ active \times Taux\ de\ C\ de\ la\ pop.\ active$
Taux de C	$Taux\ de\ C\ initial\ de\ la\ pop.\ active \times (Travailleurs/Travailleurs\ initiaux)$
Sortie de la pop. active	$Population\ active \times Taux\ de\ DC\ de\ la\ pop.\ active$
Taux de DC	$Taux\ de\ DC\ initial\ de\ la\ pop.\ active \times (Agriculteurs/Agriculteurs\ initiaux)$

2.2.1.3 Les agriculteurs

Le nombre de travailleurs industriel et agricole ont été différenciés, car leur consommation d'eau et d'espace demeure différente. Les agriculteurs symbolisent la main d'œuvre nécessaire pour la production de nourriture. L'agriculture traditionnelle (en champs) et l'agriculture verticale (en serre) ont été retenues dans le but de répondre à un des objectifs initiaux. Les deux types d'agriculture ont été évalués séparément, ce qui signifie qu'une situation d'agriculture traditionnelle ne présentera pas d'agriculteurs en serre et vice versa. Bien que cela ne soit pas observé dans le cadre de cette étude, il est toutefois pertinent de mentionner qu'il existe une dynamique entre ces deux types d'agriculture, de sorte qu'on privilégiera la culture en champs durant l'été et celle en serre durant l'hiver. Dût à l'entassement que permet l'agriculture verticale, le nombre d'agriculteurs initial a été établi arbitrairement à 10 fois plus élevé que dans le cas des agriculteurs en champs.

Dans le cadre de cette recherche, la croissance démographique influencera initialement le choix des agriculteurs à venir s'établir dans la ville. Le taux de croissance annuel des agriculteurs est donc égal à celui de la population active (0,4 %). Le nombre d'agriculteurs initial a été fixé afin de répondre à la demande de la population active initiale. Selon un rapport de l'OMS (2003), il faudrait produire 0,9 tonne de nourriture par année pour subvenir aux besoins d'une personne. Dans le cadre de cette étude, les besoins ont été arrondis à une tonne de nourriture par personne.

Trois types de culture ont été retenus dans le cadre de la recherche soit la production de légumes, de fruits et de céréales. L'agriculture est considérée comme étant non polluante afin de se concentrer uniquement sur son impact sur les ressources en eau et en sol. Comme le démontre le tableau 2.4, selon les données du MAPAQ (2007) et de la FAO (2013) pour ces types d'agriculture, un agriculteur produit en moyenne sept tonnes de nourriture annuellement. Ainsi, un agriculteur permettrait de répondre au besoin de sept personnes. Dans le cadre de cette étude, le rendement par agriculteur est le même dans les deux contextes d'agriculture (traditionnelle et verticale). Le nombre d'exploitations agricoles n'a

pas été retenu afin d’observer seulement les agriculteurs dans la dynamique des groupes d’usage sur le territoire. Le tableau 2.5 détaille les équations de chacun des éléments présentés à la figure 2.6 qui elle, représente la dynamique du modèle de référence du point de vue des agriculteurs (traditionnels et verticaux).

Tableau 2.4 Synthèse des données utilisées pour la conversion des besoins en nourriture en agriculteurs

Production	tonnes/ha	agriculteurs/ha	tonnes/agriculteur	agriculteurs/tonne
Légumes	16	3,0	5,0	0,18
Fruits	9,0	31	0,30	3,0
Céréales	3,0	0,18	16	0,06
Moyenne	9,0	11	7,0	1,0

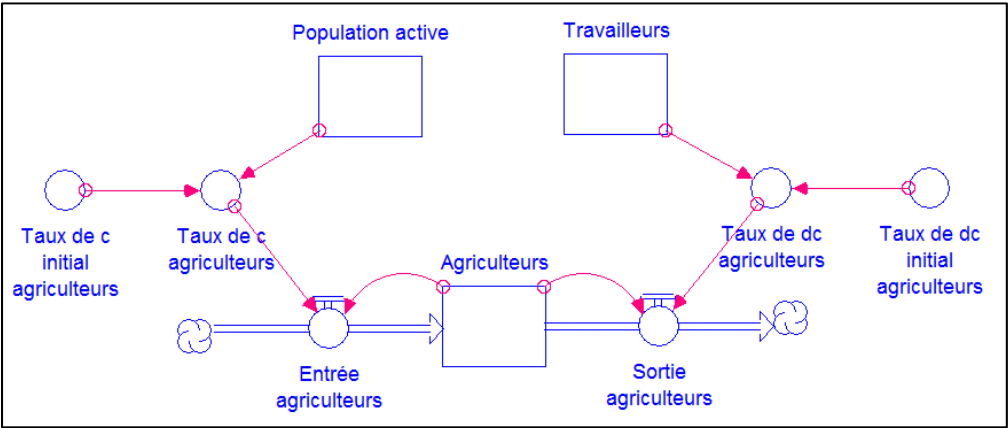


Figure 2.6 Dynamique du modèle de référence du point de vue des agriculteurs

Tableau 2.5 Équations utilisées - Agriculteurs

Catégorie	Équation (<i>Voir Annexe II, p. 117 - 125</i>)
Agriculteurs	$\text{Agriculteurs} + (\text{Entrée des agriculteurs} - \text{Sortie des agriculteurs}) \times dt$
Entrée des agriculteurs	$\text{Agriculteurs} \times \text{Taux de C des agriculteurs}$
Taux de C	$\text{Taux de C initial des agriculteurs} \times (\text{Travailleurs/Travailleurs initiaux})$
Sortie des agriculteurs	$\text{Agriculteurs} \times \text{Taux de DC des agriculteurs}$
Taux de DC	$\text{Taux de DC initial des agriculteurs} \times (\text{Travailleurs/Travailleurs initiaux})$

2.2.2 Modèle incluant les facteurs d'influence

Les villes peuvent se définir comme des systèmes complexes organisés (Bousquet *et al.*, 2002). Dans le but de rapprocher le modèle de la réalité, six facteurs d'influence sur le taux de croissance ou de décroissance des groupes (présentés ci-dessous) ont été ajoutés. L'impact de ceux-ci a été fixé à partir d'un seuil qui, une fois franchi, augmente les taux de croissance ou de décroissance. Le système subira ainsi des bifurcations au cours de son évolution. Les seuils agissent en quelque sorte comme des degrés de tolérance maximale qui, une fois atteints, augmentent l'insatisfaction et donc le départ des différents acteurs. Au contraire, si le degré de tolérance n'est pas atteint, la situation favorisera l'arrivée et donc la croissance des différents acteurs. Ces seuils ont été fixés de façon arbitraire, mais peuvent tout de même traduire en partie la réalité de certaines villes.

2.2.2.1 Les espaces végétalisés

Dans ce cas-ci, ces espaces sont représentés par la proportion d'agriculteurs (traditionnels et verticaux) par rapport à la population totale (équation 2.1). En fait, l'agriculture en champs permet de conserver d'une certaine manière des espaces végétalisés, alors que même si l'agriculture verticale représente des espaces artificialisés, son impact a quand même été considéré au même titre, puisqu'en réduisant la quantité de matières destinées à l'enfouissement et en économisant l'eau, son impact sur l'environnement peut être

comparable à celui des espaces végétalisés. Le modèle suppose ainsi que si une ville possède une quantité suffisante d'agriculteurs et donc d'espaces « végétalisés », cela permettra d'attirer la population active. Au contraire, si la ville présente un faible taux d'espaces « végétalisés », la population active aura tendance à quitter la ville, afin de retrouver une qualité de vie acceptable.

$$\begin{aligned} \text{Taux d'espaces végétalisés} & \quad (2.1) \\ &= \frac{\text{Agriculteurs}}{\text{Agriculteurs} + \text{Pop. active} + \text{Travailleurs}} \times 100 \end{aligned}$$

2.2.2.2 Les espaces minéralisés

La relation entre les industries et les agriculteurs est inversement proportionnelle. De la sorte, plus les activités industrielles sont nombreuses dans une ville, plus le taux de répulsion des agriculteurs sera élevé. Dans un premier temps parce que les industries ont une grande emprise au sol, ce qui laisse donc moins d'espace pour l'agriculture et ensuite, parce que les industries sous-entendent des terrains minéralisés et contaminés, où l'agriculture en sol devient presque impossible. Dans ce cas-ci, si le rapport entre les travailleurs et la population totale (équation 2.2) est significativement élevé, les agriculteurs vont vouloir quitter la ville alors que dans le cas contraire (faible proportion de travailleurs), leur taux de croissance va augmenter.

$$\begin{aligned} \text{Taux d'espaces minéralisés} & \quad (2.2) \\ &= \frac{\text{Travailleurs}}{\text{Agriculteurs} + \text{Pop. active} + \text{Travailleurs}} \times 100 \end{aligned}$$

2.2.2.3 Le chômage

Tel que le démontre l'équation 2.3, le taux de chômage se calcule en fonction du nombre de personnes sans emplois par rapport à la population active, dans le secteur de la fabrication. Si ce taux demeure relativement élevé, cela peut désigner une situation économique instable,

voire défavorable, pour les industries, ce qui aura tendance à faire partir les travailleurs et la population active qui chercheront de l'emploi ailleurs. Il faut toutefois tenir compte de la population active puisque si elle est égale à zéro, le taux de chômage obtenu ne traduira pas la réalité.

$$Taux\ de\ chômage = \frac{Population\ active - Travailleurs}{Pop.\ active} \times 100 \quad (2.3)$$

2.2.2.4 L'emploi

Le taux d'emplois se calcule en fonction du nombre de personnes en emplois par rapport à la population active (équation 2.4), dans le secteur de la fabrication. Le taux d'emplois traduit en quelque sorte la « santé » économique de la ville. Un taux d'emploi élevé encouragera ainsi la venue d'industries et donc celle des travailleurs et de la population active.

$$Taux\ d'emploi = \frac{Travailleurs}{Pop.\ active} \times 100 \quad (2.4)$$

2.2.2.5 L'exploitation du sol

Le taux d'exploitation (exp.) traduit la densité d'occupation résidentielle et agricole (équation 2.5), ainsi que le concept d'offre et de demande. Si ce taux est très élevé, il traduira en quelque sorte le manque d'espaces pour les industries. Bien qu'une certaine densité soit souhaitable pour une ville, la rareté des espaces disponibles aura aussi tendance à faire augmenter la valeur foncière des terrains. Dans le cadre de cette étude, l'impact se fera sentir uniquement sur les industries, étant donné les coûts plus élevés pour l'achat d'un bâtiment et l'espace plus grand qu'elles nécessitent (sauf dans le cas de l'agriculture traditionnelle). Si la proportion d'agriculteurs et de population active par rapport à la population totale est très élevée, le taux de départ des travailleurs augmentera. Au contraire, une ville ayant plusieurs terrains disponibles aura tendance à offrir des incitatifs aux industries, dans le but de les attirer. Cela aura donc pour effet d'augmenter le taux de croissance des travailleurs.

$$Taux\ d'exp. = \frac{Pop.\ active + Agriculteurs}{Pop.\ active + Agriculteurs + Travailleurs} \times 100 \quad (2.5)$$

2.2.2.6 L'importation de nourriture

Le taux d'importation de nourriture traduit les besoins que l'agriculture locale n'arrive pas à combler. Comme le démontre l'équation 2.6, il est calculé en fonction de la population active par rapport aux besoins comblés par les agriculteurs présents (*Agriculteurs* * 7). L'importation permet ainsi de pallier le manque de nourriture, si les agriculteurs urbains n'arrivaient plus à subvenir aux besoins de la population.

$$Taux\ d'importation = \frac{(Pop.\ active - (Agriculteurs \times 7))}{Pop.\ active} \times 100 \quad (2.6)$$

Bien que cela ne soit pas pris en compte dans cette étude, l'importation peut également être influencée par des politiques encourageant ou non la production agricole locale. Un taux d'importation élevé aura tendance à décourager la venue de nouveaux agriculteurs, dus à la trop forte concurrence au niveau des prix de la nourriture et du fait qu'ils ne peuvent rivaliser avec les prix courants. Un faible taux produira au contraire, une demande d'agriculteurs locaux et permettra de créer des économies d'échelles.

Le système a été conçu de sorte que si l'agriculture locale ne subvenait pas aux besoins de la population active et que l'importation de nourriture était rendue impossible, le taux de décroissance de la population active augmenterait. Le modèle de référence sous-entend que l'importation fait partie du système. Dans une situation où l'importation est autorisée, le manque d'agriculteurs locaux pour répondre à la demande a donc très peu d'influence sur l'équilibre du système.

2.2.3 Modèle incluant la consommation d'eau

Afin d'évaluer l'impact de la dynamique des usages sur les ressources, il semblait pertinent de démontrer la manière dont la demande est présentement calculée. Les études tendent à démontrer que la demande mondiale en eau augmentera de façon linéaire, en fonction de la croissance démographique. D'un point de vue local, une dynamique est pourtant observable. À titre d'exemple, l'efficacité de gestion traduite par le pourcentage de fuites dans le réseau de distribution d'eau potable a un impact non négligeable sur la quantité d'eau prélevée. Le renouvellement de la ressource à plus petite échelle influence également la disponibilité annuelle de la ressource.

L'efficacité de gestion de la ressource a été calculée en fonction de la quantité d'eau totale disponible, multipliée par un pourcentage d'efficacité. Ainsi, l'efficacité donnera accès à une plus grande quantité d'eau annuellement.

La consommation d'eau des trois groupes d'usage a été estimée sur une base annuelle en prenant en compte uniquement la quantité d'eau de surface dans le calcul de disponibilité de la ressource. Le modèle suppose que la consommation annuelle d'eau par personne demeure constante à travers le temps pour les trois groupes d'usage.

2.2.3.1 Demande industrielle

La demande en eau des industries peut se calculer soit en m³ d'eau par tonne produite ou encore par m³ d'eau par employé, soit la méthode retenue dans le cadre de cette étude. Ces données demeurent partielles et approximatives, mais peuvent tout de même éclairer sur la quantité prélevée. La quantité d'eau prélevée par travailleur a été calculée à partir de la moyenne d'eau totale prélevée dans chaque sous-secteur de la fabrication (Statistique Canada, 2005), divisée par le nombre total d'employés de ces mêmes secteurs (2572 m³/travailleur, par année) (*Voir Annexe, p. 115 et 116*).

2.2.3.2 Demande résidentielle

La consommation d'eau de la population active est calculée en m^3 par habitant, par année, multipliée par la population active. La consommation d'eau annuelle moyenne a été estimée en fonction des données 2013 de la Ville de Montréal (252 litres/personne, par jour). La consommation a par la suite été ajustée à 214,2 litres/personne, par jour, en fonction de l'objectif du Plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010-2015 de « Réduire de 15 % la production d'eau potable d'ici 2015 par rapport à l'an 2000 » (Ville de Montréal, 2010, p. 10). La consommation d'eau par habitant a finalement été convertie en m^3 et multipliée par 365 jours. La consommation a donc été établie à 78,11 m^3 /personne, par année.

2.2.3.3 Demande agricole

La quantité d'eau prélevée est traduite en m^3 d'eau par agriculteur, en fonction du nombre de tonnes produites par agriculteurs pour répondre aux besoins d'une personne. La demande d'eau par agriculteur a ainsi été calculée à partir de la moyenne d'eau prélevée pour la production d'une tonne de légumes, de fruits et de céréales, selon les données du Water Footprint (2013), soit 6832 m^3 par agriculteur (tableau 2.6). Le modèle développé ne tient pas compte des saisons et donc des variations de consommation que cela engendre.

En fonction de la revue de littérature, les besoins en eau pour l'agriculture verticale ont quant à eux été évalués arbitrairement à 27 % de ceux de l'agriculture traditionnelle, soit à 1845 m^3 /agriculteur. L'agriculture verticale représente ainsi une économie d'eau de 73 % par rapport à l'agriculture traditionnelle.

Tableau 2.6 Synthèse des données agricoles utilisées pour la consommation d'eau par agriculteur (données arrondies)

Production	Tonnes/ agriculteur	m³/tonne	m³/agriculteur traditionnel	m³/tonne	m³/agriculteur vertical
Légumes	5,0	322	1610	97,0	435
Fruits	0,3	962	288,6	289	76,0
Céréales	16	1644	26 304	493	7102
Moyenne	7,0	976	6832	293	1845

2.2.3.4 La quantité d'eau disponible

La consommation d'eau est limitée par la disponibilité de la ressource annuelle et par la capacité de stockage et de traitement d'une ville. Dans le cadre du système, l'efficacité de gestion traduit la capacité de la ville à optimiser la ressource, ce qui permet d'augmenter sa disponibilité. La quantité d'eau totale disponible est fixée en m³, en fonction du débit annuel d'un fleuve ou d'une rivière ou de la quantité d'eau totale d'un bassin ou d'un lac. Le modèle a donc été conçu de sorte que, si la consommation totale dépasse la quantité disponible annuellement, le taux de décroissance des trois usages augmente rapidement. Le modèle suppose que la capacité de stockage et de traitement de l'eau s'adapte facilement à la croissance de la ville.

2.2.4 Modèle incluant la consommation de sol

Tout comme la ressource hydrique, l'utilisation du sol demeure influencée par la dynamique des usages. À l'échelle mondiale, l'espace occupé est en croissance constante, quoiqu'accélérée dans certaines régions. La dynamique globale est difficilement observable du point de vue de l'empreinte au sol, alors qu'au niveau local, elle s'observe plus facilement. Dans le cadre de cette recherche, la densité désigne le nombre d'habitants, de travailleurs et d'agriculteur au km². Il s'agit en fait de la densité d'activité urbaine, traduite par le nombre de personnes qui y participent. Le modèle tient compte uniquement de la superficie qui peut être occupée par les trois groupes.

Le nombre d'étages occupés par chacun des groupes a été calculé en fonction de l'espace total occupé divisé par la superficie de plancher disponible. L'étude pose certaines limites quant au développement en hauteur de certains groupes. Les agriculteurs « traditionnels » ont été limités à un étage. Le modèle considère que l'espace consommé par personne demeure le même à travers le temps, pour les trois groupes d'usage.

2.2.4.1 Demande industrielle

Selon la littérature, les travailleurs consommeraient en moyenne 10 m² pour les espaces de bureaux (Institut Nationale de Santé et de Sécurité, 2013) et 50 m² pour les espaces industriels (ADR *et al.*, 2005). La consommation d'espace par un travailleur a donc été établie à 30 m².

2.2.4.2 Demande résidentielle

La superficie occupée par un habitant a également été fixée en fonction de la littérature. À titre d'exemple, selon la Caisse nationale des Allocations familiales (date inconnue), pour que le logement d'une personne vivant seule soit jugé décent, sa superficie doit être supérieure à 9 m². Dans les années 30, Le Corbusier a développé un modèle d'habitat pour son concept de ville radieuse, appelé la Cellule, qui permettait de loger un habitant dans 14 m² (Léger, 1990). De nos jours, les plans d'aménagement urbain ont plutôt tendance à suggérer un espace de 30 m² par habitant, comme c'est le cas entre autres en Grande-Bretagne (Williams, 2009) et en Suisse (ADR *et al.*, 2005). L'occupation d'espace résidentiel a donc été fixée à 30 m² par habitant.

2.2.4.3 Demande agricole

La superficie occupée par les agriculteurs dépend grandement de la fertilité du sol, affecté par l'utilisation du sol fait par les autres usages. Selon les données de la FAO (Minoiu, 2005), au niveau mondial, un hectare permet la production moyenne de 9,4 tonnes de nourriture (légumes, fruits et céréales). D'un autre côté, tel que démontré au tableau 2.7,

selon les données du MAPAQ (2007) un travailleur agricole nécessiterait en moyenne 1,82 ha pour la production de 7,44 tonnes de nourriture. Un agriculteur aura donc besoin d'environ 0,25 ha pour produire une tonne de nourriture. La consommation d'espace en hectare a donc été transposée en m^2 et fixée à 18 200 m^2 par agriculteur en champs, pour répondre aux besoins de sept personnes annuellement. En ce qui concerne l'agriculture verticale, étant donnée sa production étagée et optimisée, la superficie requise a été divisée par dix (1820 m^2 /agriculteur).

Tableau 2.7 Synthèse des données agricoles utilisées pour la consommation de sol par agriculteur

Production	Tonnes/agriculteur	ha/agriculteur
Légumes	5,42	0,34
Fruits	0,29	0,03
Céréales	16,61	5,54
Moyenne	7,44	1,82

2.2.4.4 La quantité d'espace disponible

La consommation de l'espace est inévitablement liée à la notion de densité urbaine, de sorte que le nombre d'étages ou de « couches » occupés demeure aussi important à considérer que l'empreinte au sol. Ainsi une ville peut être limitée par sa superficie au sol (une île comme Montréal ou Laval par exemple), mais continuer de croître en hauteur. La limite sera ainsi fixée en fonction de l'impact de la densité du bâti sur la qualité de vie des habitants. Par exemple, une trop grande densité due à la « hauteur » de la ville pourrait diminuer la luminosité au sol et les espaces végétalisés, ce qui diminuerait le niveau de bien-être des habitants.

La consommation d'espace a été limitée par la superficie totale de la ville dans les temps et multipliée par le nombre de « couches » ou d'étages maximal permis. Ces étages permettent d'augmenter ou de diminuer la densité d'activité au km^2 . Tout comme le modèle de

consommation d'eau, celui-ci a été conçu de sorte que, si la consommation totale dépasse la quantité disponible annuellement, le taux de décroissance des trois usages augmente rapidement.

2.3 Modèle du contexte de ville existante : les données de Montréal

2.3.1 Données sur la ressource hydrique

Les données sur le débit du fleuve Saint-Laurent à la station LaSalle proviennent d'Environnement Canada (2012). Le débit moyen mensuel (tableau 2.8) a été converti en volume d'eau en m³ mensuel. L'impact des changements climatiques sur le débit a été pris en compte (baisse de 15 %). Le volume d'eau total d'eau disponible annuellement correspond donc à environ 226 milliards m³, divisés en deux (considérant qu'une partie pourrait servir à alimenter la Rive-Sud de Montréal), moins 15 %, en prévision des changements climatiques, ce qui donne une quantité d'eau disponible de 96 milliards m³/année.

Dans le cas de Montréal, 33 % de l'eau prélevée est non utilisée, principalement à cause des nombreuses fuites (Ville de Montréal, 2013). Il semblait donc pertinent d'en tenir compte dans le modèle, étant donné son impact important sur la quantité d'eau totale prélevée.

Tableau 2.8 Données 2012 sur le débit moyen mensuel (m³/s) à la station LaSalle et volume (m³) estimé

Mois	Débit moyen	Débit total	Volume (m³)	Mois	Débit moyen	Débit total	Volume (m³)
Janvier	7480	231 940	20 039 616 000	Juillet	6800	210 750	18 208 800 000
Février	8870	257 140	22 216 896 000	Août	6670	206 660	17 855 424 000
Mars	10 200	315 700	27 276 480 000	Septembre	6740	202 170	17 467 488 000
Avril	9120	273 710	23 648 544 000	Octobre	6830	211 600	18 282 240 000
Mai	8280	256 540	22 165 056 000	Novembre	6870	206 200	17 815 680 000
Juin	7280	218 260	18 857 664 000	Décembre	6900	214 000	18 9 600 000

2.3.2 Données sur la superficie disponible

Les limites de croissance ont dans un premier temps été fixées en fonction du cadre bâti et du zonage actuel (bâtiments et infrastructures existants). La superficie de plancher maximum pouvant être occupée a été fixée en fonction de l'occupation actuelle du sol additionnée des espaces restant à développer, pour chacun des usages. Tel qu'expliqué dans les sections suivantes, la superficie totale disponible pour les activités industrielle, résidentielle et agricole a été fixée à 74 000 000 m². La densité maximale pouvant être atteinte a été fixée à 50 000 pers/km², ce qui correspond à quatre fois la densité du Plateau Mont-Royal en 2006, à Montréal (12 430 pers/km²) (Ville de Montréal, 2014). La population totale a donc été limitée à 3 700 000 personnes, sans quoi, la qualité de vie se détériore et les gens quittent rapidement la ville.

2.3.3 Données sur les travailleurs

Selon la Direction du développement économique et urbain de Montréal (Ville de Montréal, 2010), les parcs industriels couvrent 8 450 000 m² du territoire montréalais et accueillent près de 550 établissements et plus de 35 000 emplois. De ces espaces réservés aux industries, 1 700 000 m² ne sont pas utilisés et 750 000 m² sont sous-utilisés. Considérant donc que 2 450 000 m² présentent un potentiel de développement, cela représente une croissance de 38 % soit 13 400 nouveaux emplois et 220 nouvelles industries. Ces données ont été converties pour être appliquées à l'ensemble des emplois du secteur de la fabrication dans l'agglomération de Montréal en 2012.

Les données du tableau 2.9 ont été déterminées à partir des explications suivantes. L'espace occupé par travailleur correspond à la superficie occupée en 2010, divisée par le nombre de travailleurs en 2012. La quantité d'eau moyenne prélevée a été calculée à partir du nombre d'emplois par sous-secteur d'activité, multiplié par la consommation d'eau par travailleur, propre à chacun de ces sous-secteurs pour finalement faire la moyenne globale. Le nombre de travailleurs (en emploi) initial a été déterminé selon les données du profil économique 2013 de la Ville de Montréal (2013).

Tableau 2.9 Synthèse des données pour le secteur industriel

Catégorie	Quantité
Nombre de travailleurs secteur de la fabrication	155 670
Espace occupé par travailleur (m ²)	171
Eau prélevée par travailleur par année (m ³)	2271
Superficie initiale occupée estimée (m ²)	26 619 570
Superficie totale disponible (m ²)	29 069 570

2.3.4 Données sur la population active

Selon le plan d'urbanisme 2005-2015 de Montréal (2005), 130 000 logements supplémentaires pourraient être construits sur l'île. Toujours selon ce plan, il serait possible de construire plus de 55 000 logements sur une superficie de 13 000 000 m². En équivalent, il serait donc possible de construire les 130 000 logements sur une superficie d'environ 31 000 000 m². La moyenne de personne par ménage à Montréal étant de 2,2, l'île de pourrait accueillir 286 000 nouveaux habitants, ce qui représente une superficie de 108 m² par habitant. La densité urbaine serait alors d'environ 4535 habitants/km², soit l'équivalent de la ville de Vichy en France ou encore Stockholm en Suède. La population active initiale (en emploi et chômeurs) dans le secteur de la fabrication a été estimée à partir de celles pour l'ensemble de l'agglomération de Montréal, en 2006 (Ville de Montréal, 2013) (tableau 2.10). La consommation d'eau par habitant demeure la même que celle déterminée au chapitre 5.7.2.

Tableau 2.10 Synthèse des données pour le secteur résidentiel

Catégorie	Quantité
Population active initiale dans le secteur de la fabrication	170 500
Espace occupé par habitant (m ²)	108
Eau prélevée par habitant par année (m ³)	78,11
Superficie initiale occupée (m ²)	18 360 000
Superficie totale disponible (m ²)	21 117 498

2.3.5 Données sur les agriculteurs

La production agricole en champs a été limitée à 2047 ha (20 470 000 m²), soit la superficie réservée à cette activité sur l'île de Montréal selon le MAPAQ et de la CMM (2013). La Ville de Montréal estimait en 2005 la superficie de terrains actuellement vacants à 26 000 000 m². De ceux-ci, 4 000 000 m² se trouvent dans des secteurs à reconvertir, qui sont sous-utilisés par les activités humaines et qui pourrait être repris par l'activité agricole. Étant donné qu'il n'a pas été possible de fixer le nombre d'agriculteurs initiaux en champs pour l'agglomération de Montréal, il a été fixé arbitrairement à 2361 agriculteurs traditionnels, alors que le nombre d'agriculteurs en serre a été établi à 100 fois plus élevé (tableau 2.11). Le nombre de m² cultivé initial provient du *Portrait statistique agricole du Grand Montréal* qui estime à 7 870 000 m² cultivés en 2010 (MAPAQ et CMM, 2013). La quantité d'eau par agriculteur correspond à celle du chapitre 2.2.3.3, tandis que la consommation d'espace par agriculteurs a été calculée en fonction de la superficie initiale occupée, divisée par le nombre d'agriculteurs initial. En ce qui concerne l'agriculture verticale, étant donnée sa production étagée et optimisée, la superficie requise par agriculteur a été divisée par dix.

Tableau 2.11 Synthèse des données pour le secteur agricole

Catégorie	Quantité
Nombre d'agriculteurs initiaux (agriculture traditionnelle)	2361
Nombre d'agriculteurs initiaux (agriculture verticale)	236 100
Moyenne d'eau prélevée par agriculteur (m ³) (agriculture traditionnelle)	6832
Moyenne d'eau prélevée par agriculteur (m ³) (agriculture verticale)	1845
Espace occupé par agriculteur (m ²) (agriculture traditionnelle)	3 333
Espace occupé par agriculteur (m ²) (agriculture verticale)	333,3
Superficie initiale occupée 2010 (m ²)	7 870 000
Superficie totale disponible (m ²)	24 470 000

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Le chapitre suivant présente les résultats obtenus à partir de la modélisation. La première partie porte sur la calibration du modèle, du point de vue de la dynamique des groupes. La seconde partie vise à valider l'hypothèse portant sur les limites de développement du système. Finalement, la troisième partie présente l'analyse des principaux paramètres affectant le système.

3.1 Calibration du modèle

3.1.1 Dynamique initiale

Le modèle de base (figure 2.1) a été développé de façon à être initialement en équilibre, à partir des besoins d'une population active de 100 personnes, de 100 travailleurs et de 14 agriculteurs (tableau 3.1) opérant leurs activités de manière traditionnelle, c'est-à-dire la culture du sol. Il met en lumière la façon dont les villes sont actuellement pensées et développées. Le modèle sous-entend également qu'une partie de la nourriture provient de l'importation, ce qui permet ainsi à la population de croître normalement. La calibration du modèle a été calculée sur une période de 250 ans, afin d'avoir une vision à moyen terme tout en pouvant observer la dynamique de manière assez précise.

Tableau 3.1 Synthèse des données utilisées dans le cadre des modèles développés

Paramètres initiaux	Travailleurs	Population active	Agriculteurs traditionnels	Agriculteurs verticaux
Nombre de personnes	100	100	14	140
Taux de croissance initial	0.3	0.4	0.4	0.4
Taux de décroissance initial	0.3	0.4	0.4	0.4

La figure 3.1 démontre une situation où les périodes de croissance et décroissance sont constantes, en fonction des taux fixés initialement. La courbe des agriculteurs a dans ce cas-ci été multipliée par 7, afin de pouvoir observer sa dynamique avec les deux autres groupes. Le faible pourcentage de croissance annuelle s'explique en raison de ces taux initiaux qui seront ensuite augmentés par les facteurs d'influence. L'évolution des groupes est influencée uniquement par celle des autres. Il s'agit d'un système périodique, ce qui explique que, sur un cycle de 100 ans, les groupes de populations connaîtront une montée d'environ 50 ans, de même qu'une décroissance de 50 ans. Les délais d'arrivée et de départ entre les groupes s'expliquent par l'effet de la croissance des uns sur la décroissance des autres.

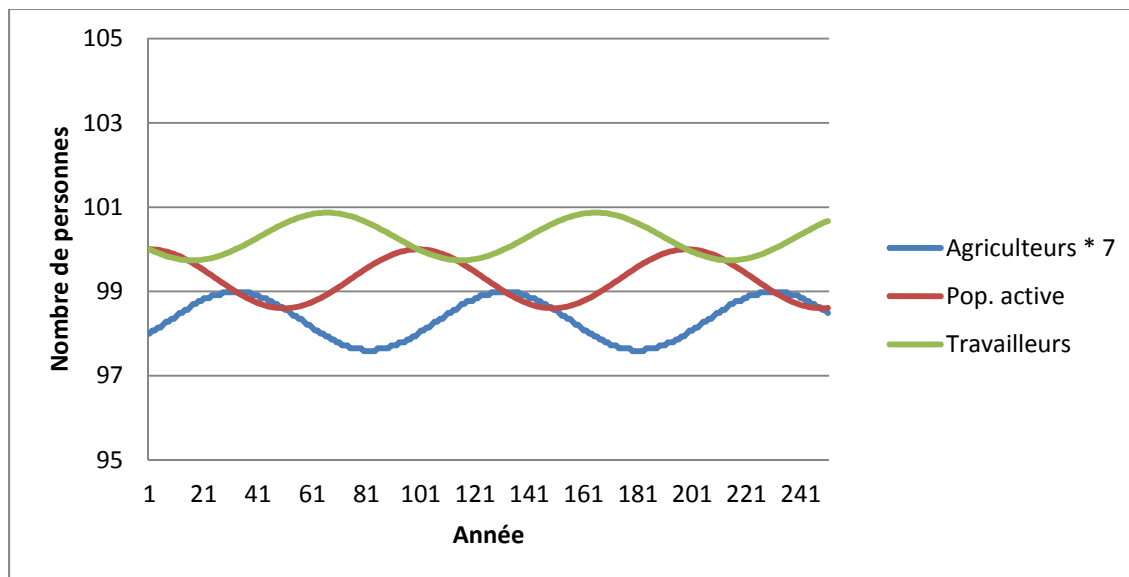


Figure 3.1 Dynamique initiale des groupes sur une période de 250 ans

3.1.2 Dynamique en fonction des seuils retenus

Les cinq facteurs d'influence retenus (tableau 3.2) permettent de rapprocher le modèle initial de la réalité, en présentant ainsi des phases de développement variables. Ils sont déterminés en fonction du rapport entre les différents groupes et ont un impact sur la dynamique globale. Associés à ces facteurs, les seuils retenus (tableau 3.2) représentent en quelque sorte des degrés de tolérance qui, une fois atteints, affectent la dynamique. Si la situation fait en sorte

que ces seuils sont dépassés ou ne sont pas atteints, le taux de décroissance des groupes associés sera affectée (augmentation du nombre de départ). Transposés dans un contexte réel, ces seuils pourraient être déterminés en partie par les règlements d'urbanisme d'une ville.

Tableau 3.2 Seuils associés aux facteurs d'influence retenus

Facteurs d'influence	Seuils utilisés
Espaces végétalisés	6.54 %
Espaces minéralisés	50 %
Taux de chômage	13 %
Taux d'emplois	87 %
Taux d'exploitation	55 %

La figure 3.2 correspond à une situation d'agriculture traditionnelle avec importation. La courbe des agriculteurs a également été multipliée par 7, afin de pouvoir observer sa dynamique avec les deux autres groupes. Le premier groupe affecté par les facteurs est celui des agriculteurs, en raison de la forte proportion de travailleurs qui traduisent les espaces minéralisés. Par la suite, les travailleurs connaissent une diminution un peu avant 50 ans, en raison du nombre d'agriculteurs et de population active en croissance, traduit par un taux d'exploitation élevé. Une fois la décroissance des travailleurs amorcée, le taux de chômage augmente et finit par affecter également le départ de la population active (toutefois moins important). Finalement, les agriculteurs subissent à nouveau une baisse marquée à partir de la 75^e année, en raison de la reprise de croissance des deux autres groupes.

Les courbes d'arrivée et de départ prennent de plus en plus d'ampleur au fil de temps, mais retrouvent un certain équilibre dépassé 100 ans, dans la mesure où les périodes de développement deviennent équivalentes. Toutefois, à long terme, le système devrait s'effondrer en raison des taux de croissance et de décroissance toujours plus grands, qui accélèrent la dynamique en affectant autant l'arrivée que le départ des populations.

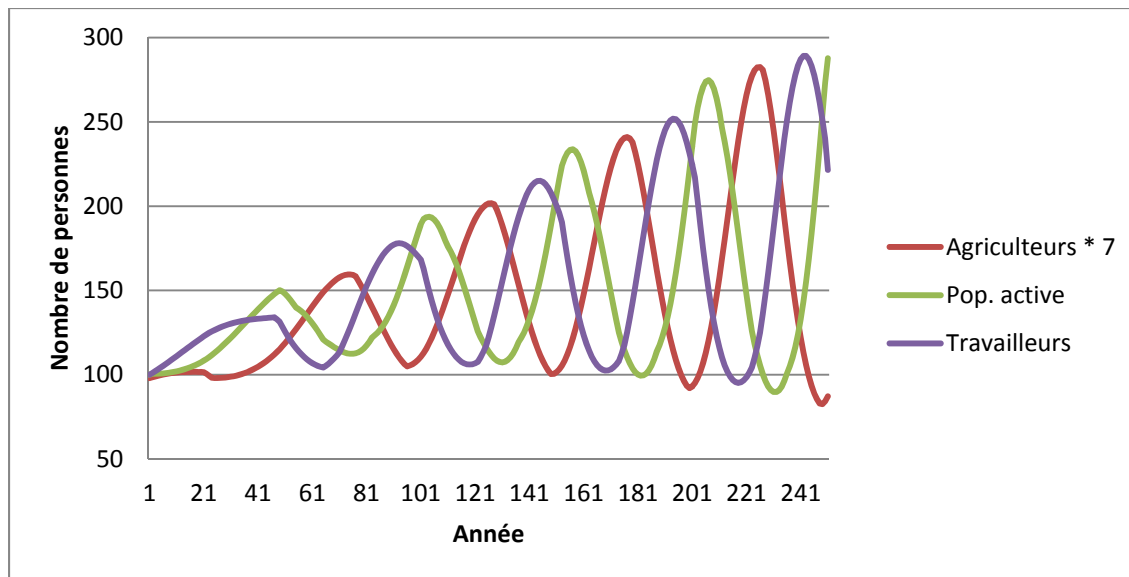


Figure 3.2 Dynamique des groupes en fonction des facteurs d'influence sur une période de 250 ans

3.1.3 Dynamique en fonction de l'importation

L'adéquation entre les agriculteurs locaux et externes agit sur la dynamique d'une ville. À partir du modèle initial, il est possible d'observer l'impact de l'importation de nourriture sur la population active, en rendant celle-ci impossible.

La figure 3.3 démontre que sans importation, l'agriculture traditionnelle n'arrive pas à subvenir aux besoins de la population locale. La courbe des agriculteurs a également été multipliée par 7, afin de pouvoir observer sa dynamique avec les deux autres groupes. Tout comme les deux figures précédentes, la courbe représentant le nombre d'agriculteurs a été multipliée par dix. Le modèle présente une instabilité de la population active durant les 50 premières années, en raison du manque de nourriture. Le nombre de travailleurs augmente seulement parce que la population active et les agriculteurs diminuent, ce qui libère de l'espace. En réalité, cela suppose que les travailleurs habitent à l'extérieur de ville et peuvent donc s'approvisionner convenablement, à leur lieu de résidence.

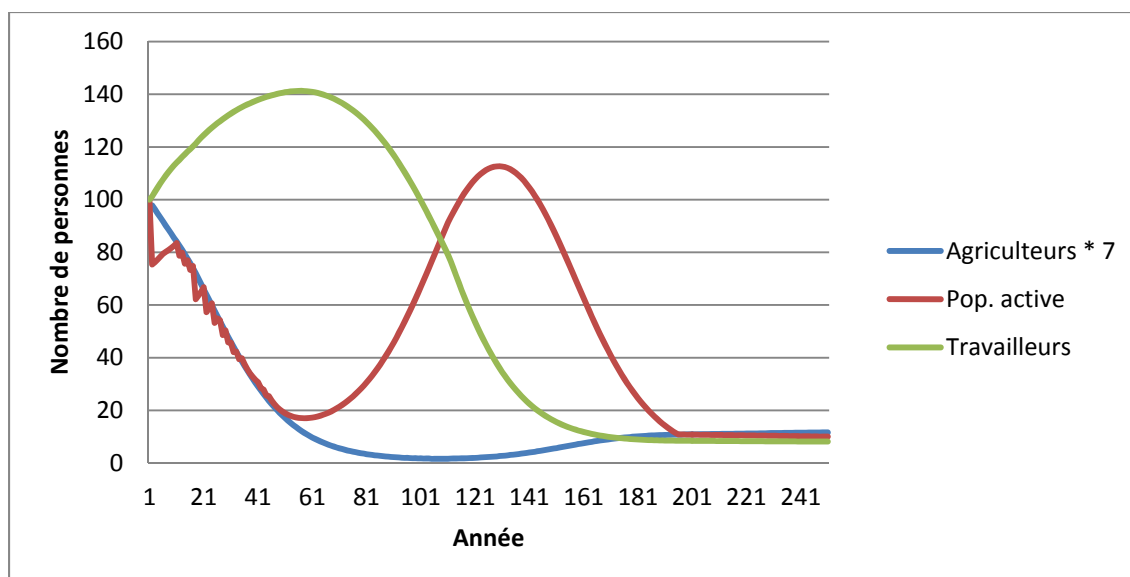


Figure 3.3 Dynamique des groupes en fonction de l'absence d'importation (avec facteurs d'influence) sur une période de 250 ans

La phase de croissance que la population active connaît après 50 ans témoigne en quelque sorte de la résilience du système, mais la population finira tout de même par décroître. Durant ces périodes, la ville pourrait être approvisionnée par ses voisines, dans la mesure où celles-ci possèdent des surplus alimentaires. Les agriculteurs connaissent également une légère croissance après 125 ans, mais ils ne réussissent pas à attirer à nouveau la population active, ce qui fait que le système se stabilise aux alentours de 20 personnes après 200 ans, dont la majorité est des travailleurs.

En résumé, dans ce scénario où une ville peut uniquement compter sur l'agriculture traditionnelle locale pour son approvisionnement, la population totale finira par quitter définitivement l'endroit. Par manque de nourriture, la population active cherchera ainsi à s'établir dans une autre ville qui répond à ses besoins.

3.1.4 Dynamique en fonction de l'agriculture verticale

Le modèle présentant un scénario où l'agriculture traditionnelle serait remplacée par l'agriculture verticale vise à déterminer si la souveraineté alimentaire (sans importation) est

possible dans un contexte urbain et si elle permet à la population de croître davantage. Cette activité permet de répondre aux besoins de la population active initiale dans la mesure où le nombre d'agriculteurs est au départ multiplié par 10, tout en conservant la même superficie de sol occupée. C'est ce qui explique la différence de population totale initiale par rapport au modèle de référence. Les mêmes seuils que ceux utilisés à la figure 6.2 ont été retenus, dans le but de comparer l'impact des facteurs d'influence.

La figure 3.4 démontre que l'agriculture verticale favorise une croissance de la population totale semblable à celle de la figure 3.2. En fait, sur une période de 100 ans, la croissance démographique est légèrement plus élevée (69 % dans le cas de l'agriculture verticale, comparativement à 65 % dans le cas de l'agriculture traditionnelle). D'un autre côté, l'ensemble des facteurs affecte moins la dynamique que dans le scénario d'agriculture traditionnelle, ce qui se traduit par des courbes plus régulières. Cela peut être dû au nombre plus élevé d'espaces végétalisés, engendrés par une présence initiale importante d'agriculteurs, ce qui permet d'augmenter le taux de croissance de la population active dès le départ. Dans le même ordre d'idée, le taux d'espaces minéralisé tend à être moins élevé en raison de la faible proportion de travailleurs par rapport à l'ensemble de la population. Cette situation explique aussi la stagnation de travailleurs durant les 20 premières années, due à un taux d'exploitation élevé (non-industrielle). Ces résultats permettent une fois de plus de démontrer l'impact des espaces végétalisés sur la dynamique du système.

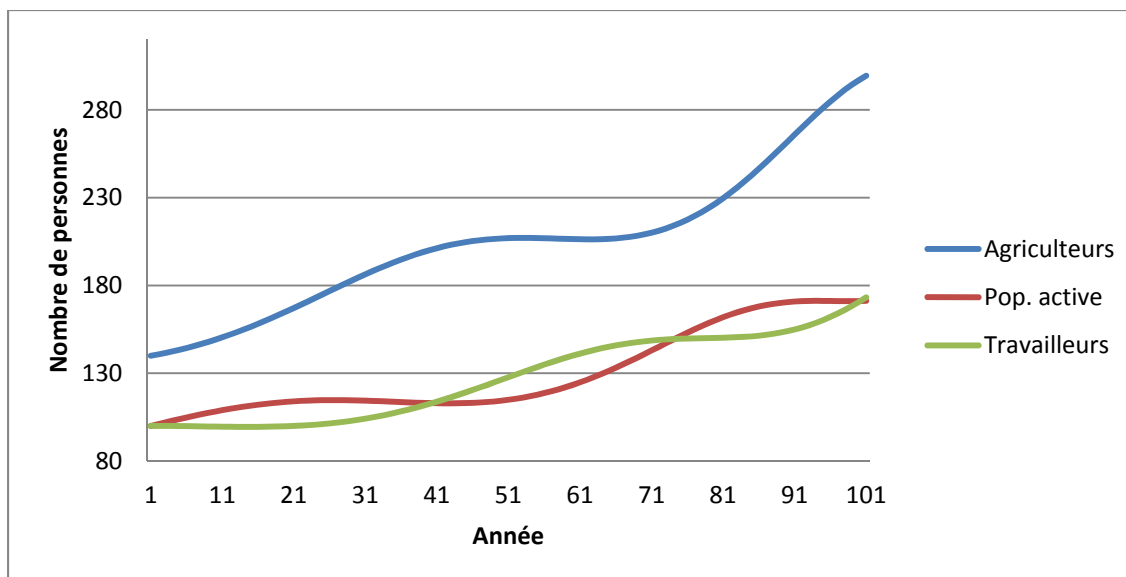


Figure 3.4 Dynamique des groupes dans un contexte d'agriculture verticale (avec facteurs d'influence), sur une période de 100 ans

Les facteurs d'influence ont donc moins d'impact sur ce système. Le départ des différents groupes est ainsi beaucoup moins important, il s'agit plutôt de phases de ralentissement de croissance. La figure 3.5 illustre la dynamique des groupes sur une période de 250 ans et révèle que l'accroissement de la population totale devrait être exponentiel, étant donné que le modèle ne présente pas de période de décroissance marquée avant que les limites fixées ne soient atteintes. Dans ce cas-ci, la densité maximale de population a été limitée à 20 000 personnes au km² et l'espace pouvant être occupée a été fixé à 100 fois la superficie initiale.

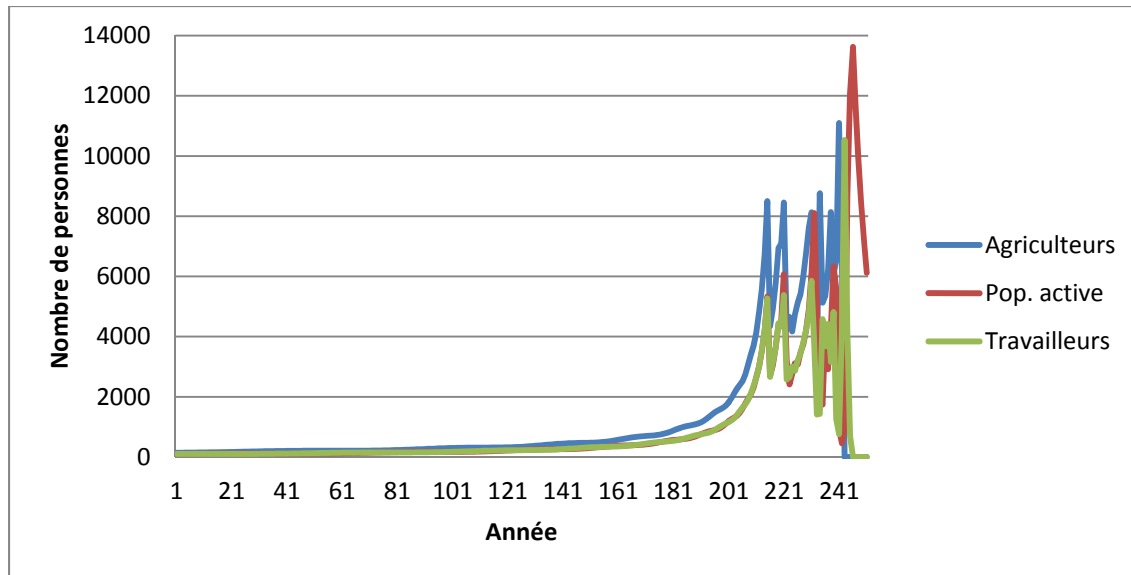


Figure 3.5 Dynamique des groupes dans un contexte d'agriculture verticale (avec facteurs d'influence), sur une période de 250 ans

3.2 Validation de l'hypothèse

3.2.1 Application du modèle à un contexte de ville émergente

Étant donné que les trois groupes d'usages consomment différemment les ressources en eau et en sol, et donc qu'ils ont un impact distinct sur celles-ci, il apparaît pertinent de démontrer la réaction du système urbain émergent, une fois les limites de disponibilité atteintes.

La densité d'activité a également été utilisée comme facteur limitatif du développement urbain, entre autres pour freiner la croissance exponentielle du système démontrée à la figure 6.4. La limite de densité traduit ici l'impact (physique et psychologique) de l'entassement des populations sur le taux d'insatisfaction. Ainsi, en fonction de la quantité de ressources disponibles et la densité maximale fixée, le développement d'une ville devrait être restreint au cours de son évolution.

La décroissance de la population observable une fois les limites atteintes sert à titre indicatif puisque le modèle ne permet pas de prévoir comment réagira le système. Il est ici supposé

que le franchissement des limites engendre soit un taux d'insatisfaction très élevé et donc un départ rapide des trois groupes, soit une période d'adaptation qui fait osciller la population jusqu'à ce que la densité maximale soit touchée. L'évolution du système a été évaluée sur une période de 250 ans, afin de pouvoir observer sa réaction, jusqu'à ce que la limite de consommation et donc de développement soit atteinte.

Afin de démontrer comment la disponibilité des ressources peut influencer le système, un scénario de ville type a donc été développé. Il s'agit à la base d'une ville émergente, donc qui est très peu peuplée. Cette ville est limitée par la superficie de son territoire, comme c'est le cas pour les villes insulaires ou celles ayant des contraintes géographiques ou politiques. À partir de cette superficie, le nombre d'étages a été testé pour comprendre l'impact du développement en hauteur sur chacun des groupes.

Ce territoire est également limité dans son approvisionnement en eau, comme c'est le cas pour les villes qui tirent leur ressource d'un lac ou d'une nappe phréatique. L'efficacité de gestion de l'eau a aussi été prise en compte, dans une optique de maximisation de la ressource disponible. La densité d'activité maximale a été établie à 40 000 personne/km², ce qui pourrait se rapprocher de la situation actuelle des villes de Dhaka (Bangladesh) et de Mumbai (Inde). Bien que cette densité semble particulièrement élevée, elle permet d'observer le moment où les limites de ressources seront atteintes.

Finalement, en considérant que la souveraineté alimentaire est souhaitable dans une optique de ville durable, uniquement l'agriculture verticale sans importation a été retenue dans le cadre de ce scénario. Le tableau 3.3 présente les données qui ont été utilisées dans le cadre de cette section-ci.

Tableau 3.3 Synthèse des données utilisées dans le contexte de ville émergente

Paramètres initiaux	Travailleurs	Population active	Agriculteurs
Nombre de personnes	100	100	140
Consommation annuelle – sol (m ² /pers.)	30	30	1820
Consommation annuelle – eau (m ³ /pers.)	2572	78,11	1845
Nombre d'étages maximal	2,5	30	40
Quantité d'eau disponible	20 000 000 m ³ /année		
Superficie disponible	0,5 km ²		
Densité maximale	40 000 personnes/km ²		

3.2.1.1 La superficie du territoire et l'espace occupé

Les limites de développement ont dans un premier temps été évaluées sur une période de 250 ans. Le nombre d'étages moyen traduit en fait le nombre de fois que la superficie initiale (0,5 km²) a été augmentée. Par exemple, un développement sur 4 étages signifie un développement sur l'équivalent de quatre fois la superficie initiale (2 km²).

La figure 3.6 démontre le moment où les limites d'espaces, en fonction du nombre d'étages moyen permis, affecteront la croissance de la ville. Ainsi, si la limite de développement correspondait uniquement à la superficie de sol, la densité d'activité devrait atteindre 1184 personnes/km². En revanche, dans une situation où l'espace de développement sera limité à 9 étages, cela permettrait d'atteindre une densité urbaine de près de 10 600 personnes/km².

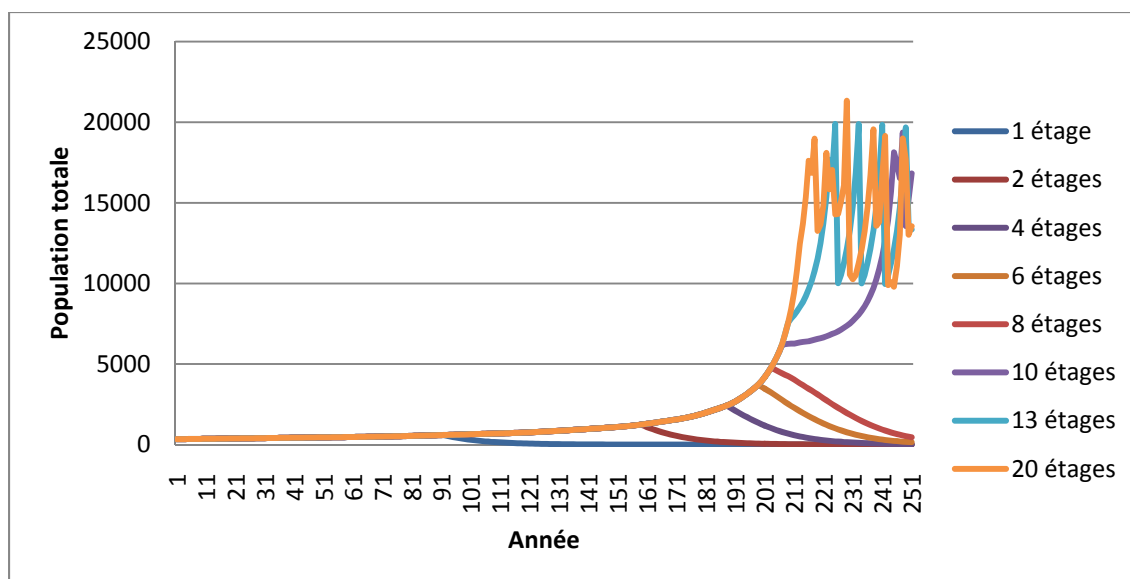


Figure 3.6 Évolution de la population totale en fonction du nombre d'étages moyen fixé sur une période de 250 ans

Les scénarios de 10 et 13 étages présentent une situation particulière dans la mesure où tous deux atteignent pratiquement la densité maximale de population ($38\,712\text{ pers/km}^2$ dans le premier cas et $39\,780\text{ pers/km}^2$ dans le second). Toutefois, ils connaissent une rupture de croissance, un peu après 200 ans. Cette situation ne semble pas être due aux facteurs d'influence ni à la disponibilité de la ressource hydrique qui dans ce cas-ci, est pratiquement illimitée (1000 milliards de m^3 par année). Le modèle présente donc de comportements imprévisibles, malgré les principes établis. Le scénario de 20 étages présente la plus grande période d'instabilité, puisque la densité maximale est atteinte plus rapidement que dans les scénarios précédents. La population oscille donc davantage et plus longtemps.

Au niveau des résultats présentés à la figure 3.7, il y a une différence marquée entre les scénarios de 10 et 13 étages, malgré une densité d'activité similaire, et ce, surtout en ce qui concerne le nombre d'habitants. Cela s'explique par une présence moins importante du nombre d'agriculteurs, dans le scénario de 10 étages (8569 agriculteurs comparativement à 8885 dans le scénario de 13 étages). Étant donné que les agriculteurs nécessitent de beaucoup plus d'espaces que la population active, ceux-ci font une grande différence dans l'occupation de l'espace. Cela contraint donc les habitants à se concentrer en hauteur. Il est à noter que ces

scénarios peuvent s'avérer réalisables dans la mesure où la technologie permet une agriculture verticale de cette ampleur et que le taux de satisfaction de la population active n'est pas affecté. Un scénario de type 6 étages ressemble toutefois davantage au genre de développement que connaissent les villes nord-américaines, actuellement. Les scénarios d'un et de trois étages ressemblent davantage au type de développement des banlieues qu'à celui des grands centres urbains et il ne semble pas correspondre à la définition d'une ville, au sens large du terme.

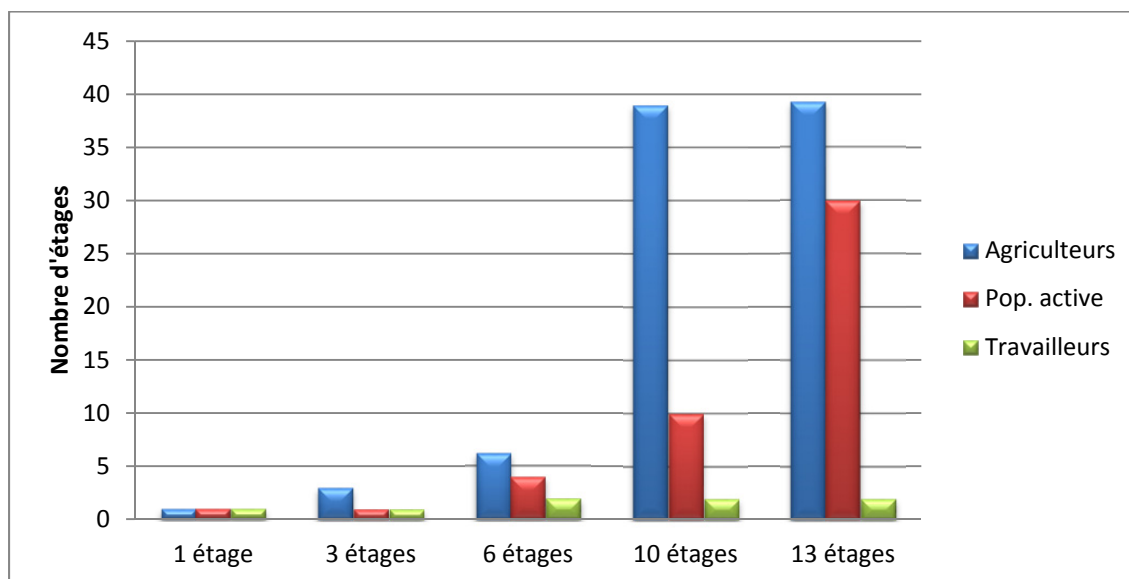


Figure 3.7 Nombre d'étages maximaux par groupe en fonction du nombre d'étages moyen fixé

3.2.1.2 Limites de croissance en fonction de la ressource hydrique

La consommation d'eau a été calculée selon un contexte où le nombre d'étages moyen permis serait de 6 étages. Les mesures d'efficacité de gestion ont été fixées dès le départ, en fonction du pourcentage d'économie d'eau que celles-ci permettent, par rapport à la situation initiale.

La figure 3.8 démontre qu'au-dessus de 15 % d'efficacité de gestion, la densité de population maximale demeure semblable. Toutefois, ce n'est qu'à partir de 19,4 % d'efficacité de

gestion que la limite d'espace pouvant être occupé est atteinte. La consommation d'eau serait alors d'environ 2 388 000 m³/année. En considérant qu'aucune mesure n'est mise en place pour maximiser la quantité d'eau disponible, la densité maximale serait d'environ 2600 personnes/km².

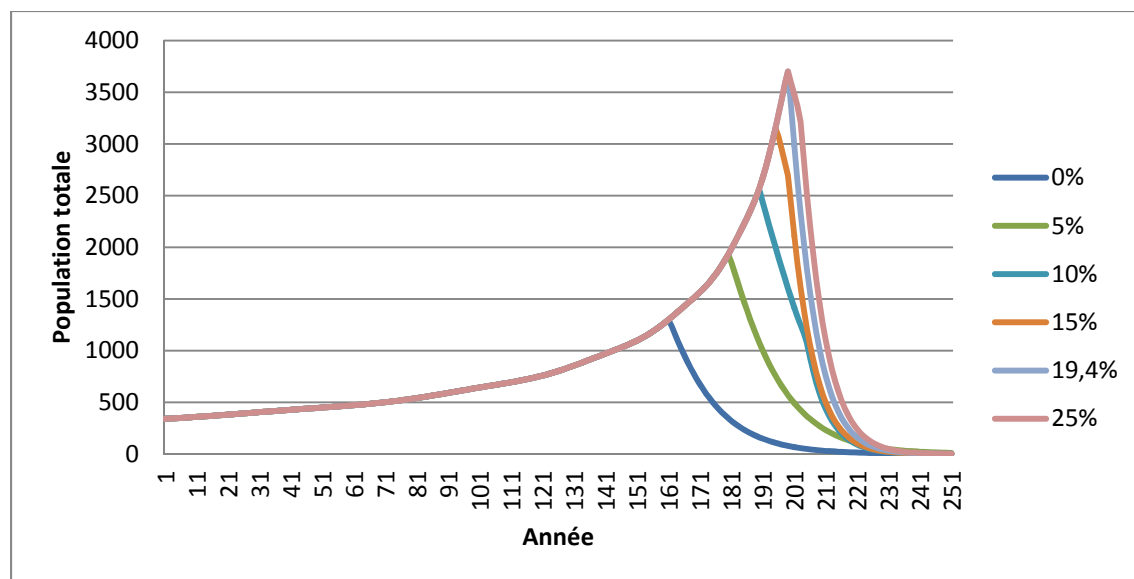


Figure 3.8 Évolution de la population totale en fonction du % d'efficacité de gestion scénario de 6 étages, sur une période de 250 ans

Dans un scénario où il serait permis de construire en moyenne 13 étages (figure 3.9), la ville devrait s'efforcer d'atteindre un taux d'efficacité surélevé de 585 % pour atteindre la limite de quantité d'eau disponible. Il serait alors possible d'atteindre la densité urbaine maximale fixée dans le cadre de ce modèle. En revanche, en conservant une efficacité de gestion de 19,4 %, la ville pourrait tout de même atteindre une densité très élevée de 18 426 personnes/km².

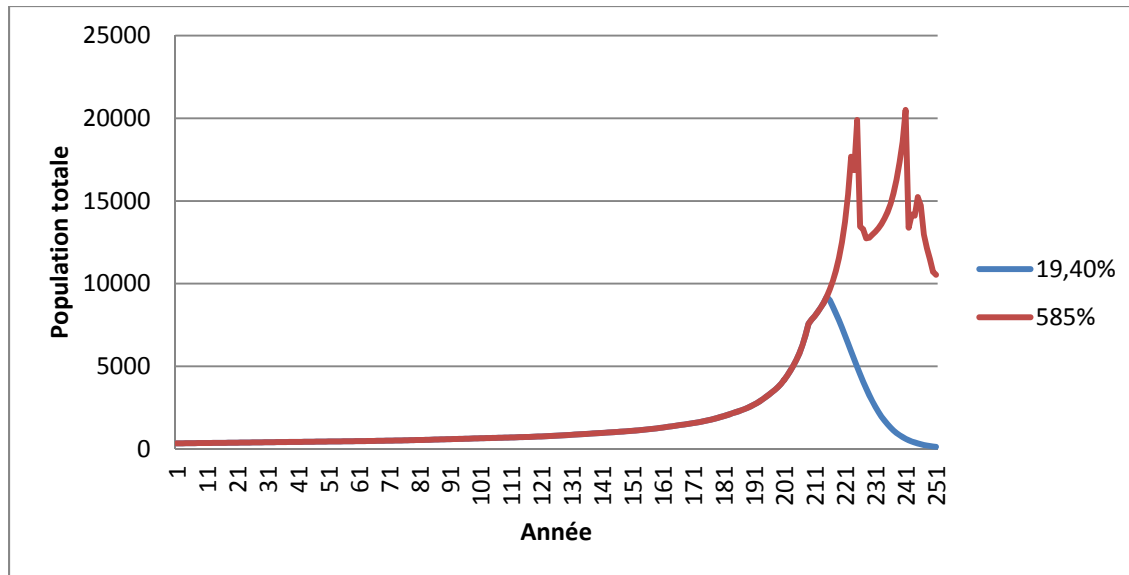


Figure 3.9 Évolution de la population totale en fonction du % d'efficacité de gestion scénario de 13 étages, sur une période de 250 ans

Contrairement à la réalité, le modèle ne permet pas d'appliquer de nouvelle mesure d'efficacité au cours de l'évolution de la ville pour par exemple, pallier une pénurie d'eau. Il démontre toutefois qu'il est important de prévoir ces mesures, dans une optique de développement durable.

La figure 3.10 démontre la répartition des ressources au moment où la densité maximale est atteinte, dans un scénario qui permet en moyenne 6 étages. Malgré le fait que l'agriculture verticale demande moins de ressources que l'agriculture traditionnelle, il s'agit tout de même du groupe qui consomme le plus d'eau. Les agriculteurs consomment en effet 52 % de la quantité totale et occupent la plus grande surface de plancher (95 % de la superficie du territoire). Les agriculteurs représentent également la plus grande proportion de la population totale (44 %), ce qui explique en partie les constatations précédentes. La figure 7.5 démontre que l'activité industrielle demande également une grande quantité d'eau (47 % de l'eau totale consommée) par rapport à la proportion d'espace occupé (3 %), alors que l'activité résidentielle demeure celle ayant le moins d'impact sur les ressources.

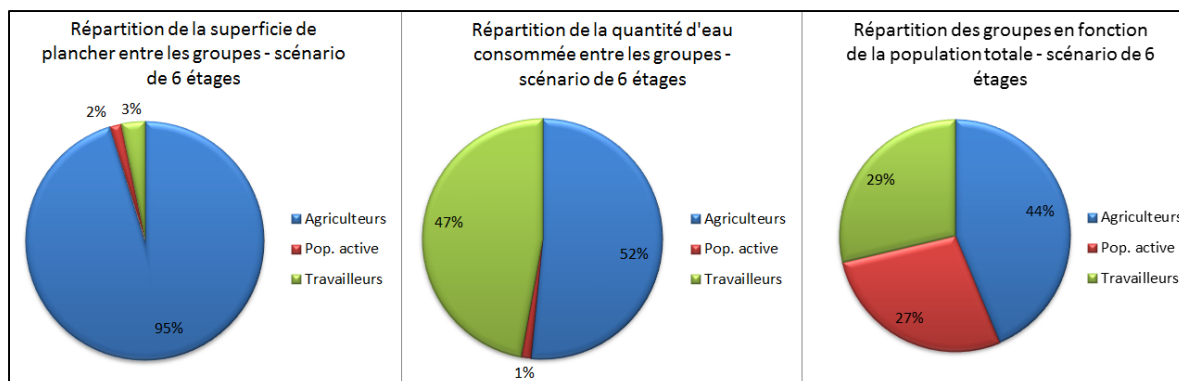


Figure 3.10 Répartition de la superficie de plancher et de la quantité d'eau consommée entre les groupes et répartition des groupes en fonction de la population totale scénario de 6 étages

3.2.1.3 Impact sur le taux de satisfaction de la population

Les taux de satisfaction sont observés à partir de la différence entre les taux de croissance et de décroissance annuels de chacun des groupes. Ainsi, à partir de la figure 3.11, il est possible d'observer qu'au fur et à mesure que les groupes se rapprochent des limites de croissance, les taux de satisfaction deviennent de plus en plus instables. Cela traduit en fait les inconvénients liés à la rareté des ressources et la compétition pour celles-ci qui s'enclenche. Dans ce cas-ci, la rareté du sol engendre des nuisances qui font diminuer rapidement le taux de satisfaction de certains groupes, au profit de ceux des autres. Ainsi, le taux de satisfaction de chacun des groupes demeure différent en raison de la dynamique et il détermine en quelque sorte l'évolution de la ville.

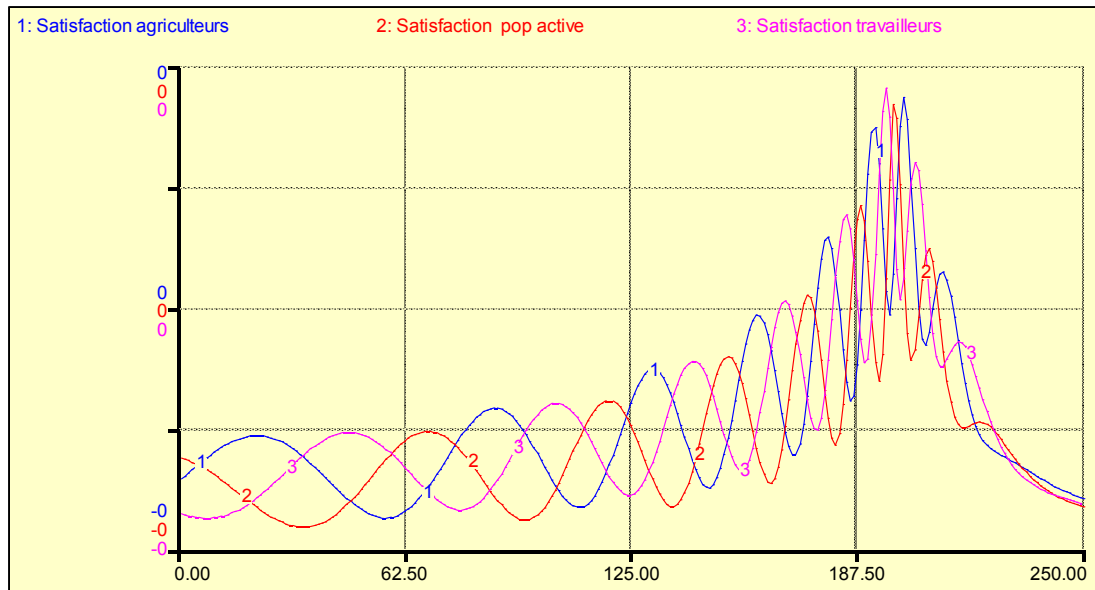


Figure 3.11 Évolution du taux de satisfaction des groupes, sur une période de 250 ans

3.2.1.4 Synthèse sur le modèle de ville émergente

Le modèle permet globalement d'illustrer l'impact de la disponibilité des ressources naturelles sur le développement urbain. Toutefois la densité urbaine est aussi une limite de développement à considérer, car plus elle augmente, plus elle agit négativement sur le niveau de bien-être de la population. Son impact demeure toutefois subjectif et propre à chaque individu et collectivité. Elle sert avant tout à démontrer que malgré l'optimisation des ressources naturelles et les technologies mises en place pour permettre à une ville d'accroître sa population, le facteur humain, c'est-à-dire le taux de satisfaction, doit demeurer un des éléments centraux du développement urbain.

Le modèle démontre également que dans un contexte d'agriculture verticale, même si une ville possède une superficie limitée, elle peut subvenir aux besoins de la population active. Toutefois, elle peut seulement se développer si le nombre d'étages prescrit le permet et que des mesures d'efficacité de gestion de l'eau sont prévues dès le début de la croissance.

En réalité, la population devrait commencer à quitter la ville avant que ces limites ne soient atteintes à cause des inconvénients liés à la rareté de la ressource (compétition pour les ressources) ou au surpeuplement. Le départ devrait également se faire de façon plus progressive et le système devrait être en mesure de connaître une seconde phase de croissance, ce qui témoignerait de la capacité des villes à s'adapter aux changements de situation.

3.2.2 Application du modèle à un contexte de ville existante

Tout comme la section précédente, celle-ci tente de mettre en lumière les limites de développement en fonction des ressources disponibles. En estimant les limites d'un territoire semblable à celui de l'île de Montréal et la quantité d'eau disponible comparable à celle que permet le fleuve Saint-Laurent, à la hauteur de Montréal, il a été possible de modéliser un système urbain présentant une situation similaire à celles de l'agglomération montréalaise.

De la sorte, l'application du modèle de base à un système urbain déjà existant et qui s'inspire de données réelles permet d'évaluer sa fiabilité. Le système a été observé sur une période de 500 ans, selon deux scénarios qui distinguent un contexte où l'agriculture traditionnelle (avec importation) serait privilégiée de celui où uniquement l'agriculture verticale serait mise de l'avant. Contrairement à la section précédente, l'agriculture traditionnelle a été étudiée puisqu'il s'agit du mode d'agriculture qui est encore valorisé en Amérique du Nord, plus particulièrement au Québec. La comparaison des deux modes de culture permettra de faire ressortir l'impact de chacun sur le développement urbain. Le tableau 3.4 présente les données utilisées pour la section portant sur le contexte de ville existante.

Tableau 3.4 Synthèse des données utilisées dans le contexte de ville existante

Paramètres initiaux	Travailleurs	Population active	Agriculteurs traditionnels	Agriculteurs verticaux
Nombre de personnes initiales	155 670	170 000	2361	236 100
Consommation annuelle-sol (m ² /pers.)	171	108	3333	333,3
Consommation annuelle d'eau (m ³ /pers.) + 33 % de fuite dans le réseau	2271	78,11	6832	1845
Taux de croissance initial	0,3	0,4	0,4	0,4
Taux de décroissance initial	0,3	0,4	0,4	0,4
Nombre d'étages maximal	2	30	1	40
Quantité d'eau disponible	96 milliards m ³ /année			
Superficie disponible	74 km ²			
Densité maximale	50 000 personnes/km ²			

3.2.2.1 La densité urbaine

La figure 3.12 démontre l'évolution de la population totale en prenant uniquement en compte la densité urbaine maximale permise. Le nombre d'étages a tout de même été fixé à 100 étages et la quantité d'eau initiale à 1000 milliards de m³ par année, ce qui n'apparaît pas être des limites atteignables en raison de la densité maximale fixée.

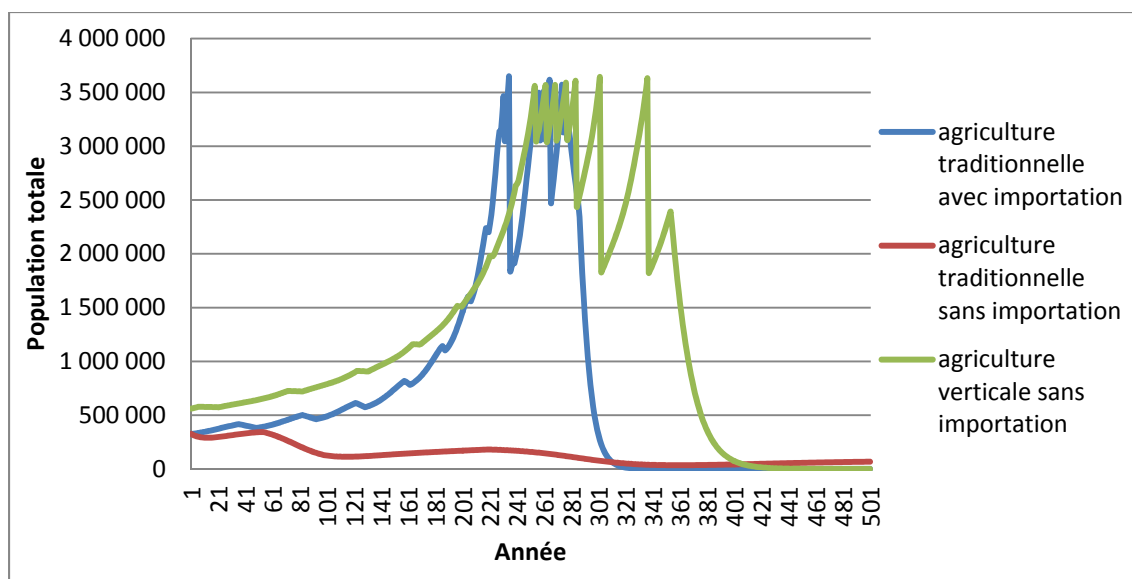


Figure 3.12 Comparaison de l'évolution de la population totale selon le type d'agriculture, en fonction de la densité maximale permise, sur une période de 500 ans

Dans le cas des scénarios d'agriculture traditionnelle, avec importation et d'agriculture verticale, sans importation, les oscillations à partir de la 200^e année demeurent à titre indicatif et signifient seulement que le système se rapproche de la densité maximale permise. Ainsi, dans un contexte d'agriculture traditionnelle avec importation, la population devrait décroître une fois que le système se sera rapproché le plus de la limite, soit à partir de la 243^e année. La population maximale atteindrait un peu plus de 3,6 millions de personnes, ce qui correspond à 11 fois la population initiale. La ville permettrait ainsi un accroissement de la population du départ de 1000 % et une densité maximale très élevée d'environ 49 000 personnes/km². Malgré le fait que l'importation permette à la population de croître, les phases de décroissance seront tout de même plus marquées que celles du scénario d'agriculture verticale, sans importation. Cela semble dû au taux d'espaces végétalisés qui demeure relativement faible, comparativement au taux d'espaces minéralisé.

Dans une situation d'agriculture traditionnelle, sans importation (a. trad. sans imp.), la décroissance se ferait sentir rapidement, ce qui ne permettrait pas au système d'atteindre les limites des ressources disponibles. La compétition pour les ressources semble inexistante à cause de la répulsion que le manque de nourriture engendre. Toutefois, la ville connaîtrait

tout de même une deuxième phase de croissance, ce qui témoigne d'une certaine résilience du système. La ville atteindrait une population maximale de 345 000 personnes et permettrait ainsi une croissance de 5 %, ce qui représente une densité maximale de 4662 personnes/km², soit une densité similaire à celle de la Ville de Montréal en 2011 (4512 pers/km²). Ce scénario présente donc les mêmes tendances que celles observées dans le modèle de base développé (figure 3.3).

Au niveau du scénario d'agriculture verticale sans importation, la population pourrait atteindre un maximum de 3 643 797 personnes pour une densité urbaine de plus 49 000 personnes/km². Cette croissance représenterait plus de 6 fois la population initiale. La limite serait toutefois atteinte plus tard dans l'histoire de la ville, soit 60 ans après celle du scénario d'agriculture traditionnelle avec importation, ce qui permettrait à la ville de se développer sur une plus longue période et de réagir avant l'atteinte des limites. Néanmoins, le taux de croissance de la population totale (549 %) demeure beaucoup moins élevé que celui de l'agriculture traditionnelle (avec importation). La courbe se rapproche davantage de la limite de densité maximale en raison de la population initiale plus élevée. L'agriculture verticale permettrait finalement une croissance plus linéaire et des oscillations moins importantes.

3.2.2.2 Contexte d'agriculture traditionnelle (avec importation)

Les limites de développement ont dans un premier temps été évaluées sur une période de 500 ans. Le nombre d'étages moyen traduit en fait le nombre de fois que la superficie initiale (74 km²) a été augmentée. Par exemple, un développement sur 4 étages signifie un développement sur l'équivalent de quatre fois la superficie initiale (296 km²).

Tel que le démontrent les résultats illustrés à la figure 3.13, dans un contexte d'agriculture traditionnelle qui intègre l'importation de nourriture, la densité maximale serait atteinte à partir de 8 étages.

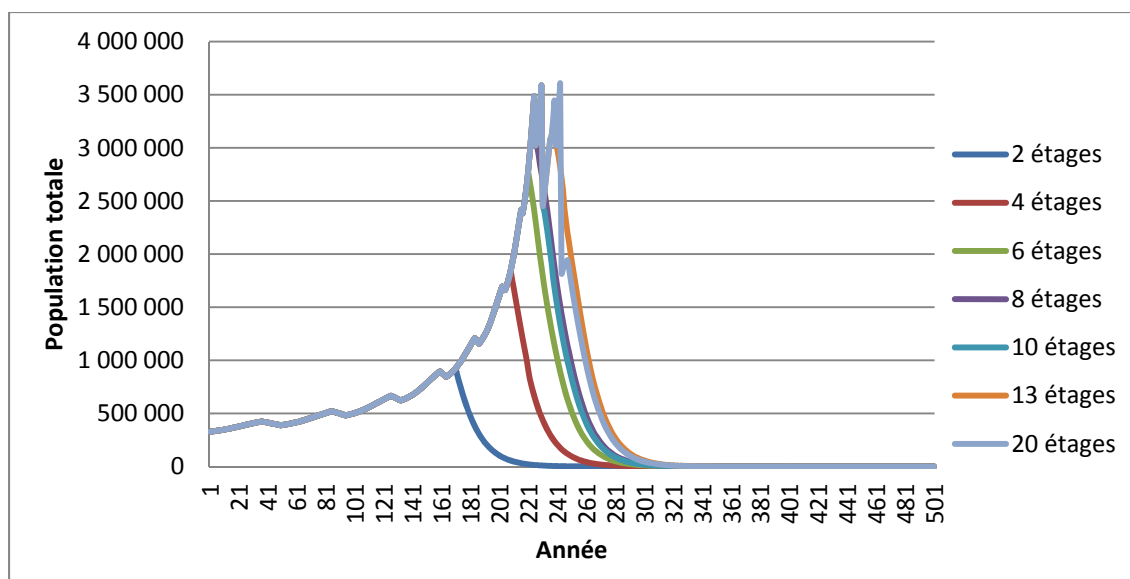


Figure 3.13 Évolution de la population totale en fonction du nombre d'étages moyen fixé, sur une période de 500 ans

Toutefois, ce scénario semble peu probable en raison du nombre d'étages par groupe que cela engendrerait, particulièrement pour les travailleurs industriels qui devraient se concentrer sur 125 étages et pour la population active qui se retrouverait sur près de 300 étages (figure 3.14). Nulle part sur terre un développement de la sorte ne s'effectue actuellement. Cette situation s'explique par le fait que les agriculteurs se retrouvent sur un seul étage et qu'il s'agit du groupe qui nécessite le plus d'espace. À partir de 8 étages, il devient donc impossible pour une ville de « survivre » sans exclure l'agriculture de ses activités, puisque cette dernière occuperait pratiquement tout l'espace. De par la définition d'une ville, celle-ci n'en serait plus une. De plus, au-delà de 4 étages, la situation pourrait devenir problématique pour certains types d'industries puisqu'elles devront se développer en hauteur.

Le scénario de 6 étages peut ainsi sembler plus probable à condition que les industries réalisent leurs activités sur 18 étages et que la population active accepte d'habiter dans des tours de près de 100 étages. Cette situation permettrait ainsi de multiplier par 8 la population initiale. Finalement, le scénario de 2 étages correspond davantage au développement qui s'effectue actuellement en Amérique du Nord, présentant une densité moyenne de 12 370 pers/km², ce qui équivaut à près de 3 fois la population du départ.

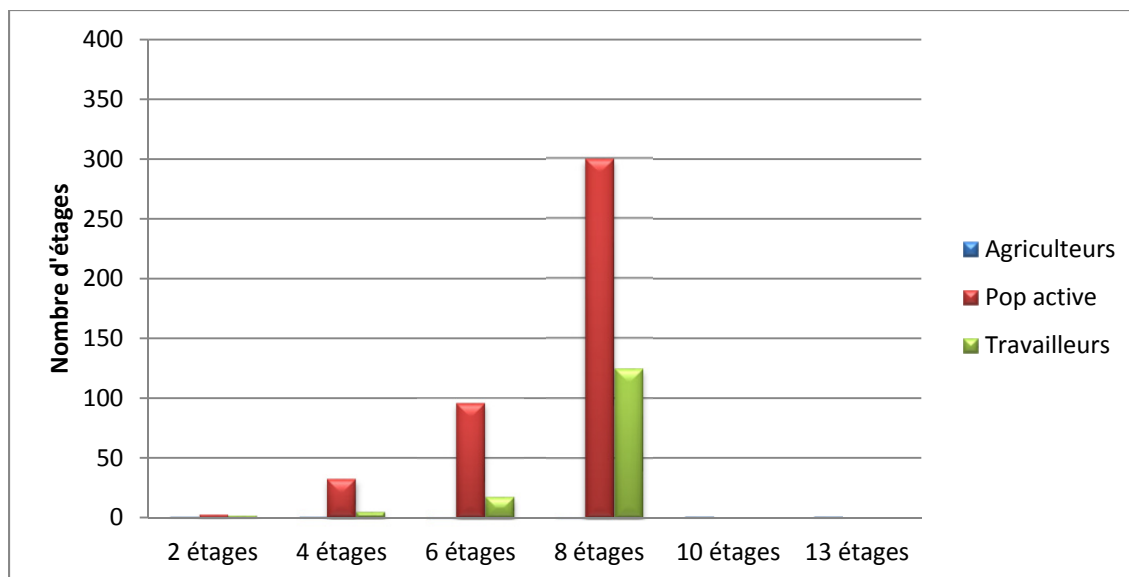


Figure 3.14 Nombre d'étages maximal par groupe, en fonction du nombre d'étages moyen fixé

La figure 3.15 met en lumière l'impact de l'agriculture comme activité urbaine. En fait, dans un scénario qui permettrait en moyenne le développement sur 4 étages, plus de la moitié de l'espace serait occupé par les agriculteurs, même si ceux-ci représentent seulement 1 % de la population totale. Toutefois, la majorité de l'eau serait consommée par les travailleurs (93 %), en raison de la forte proportion qu'ils représentent et de leurs besoins nettement plus élevés en eau que ceux de la population active. Tout comme le contexte de ville émergente, la figure 3.15 démontre que ce sont les habitants qui ont le moins d'impact sur la consommation des ressources.

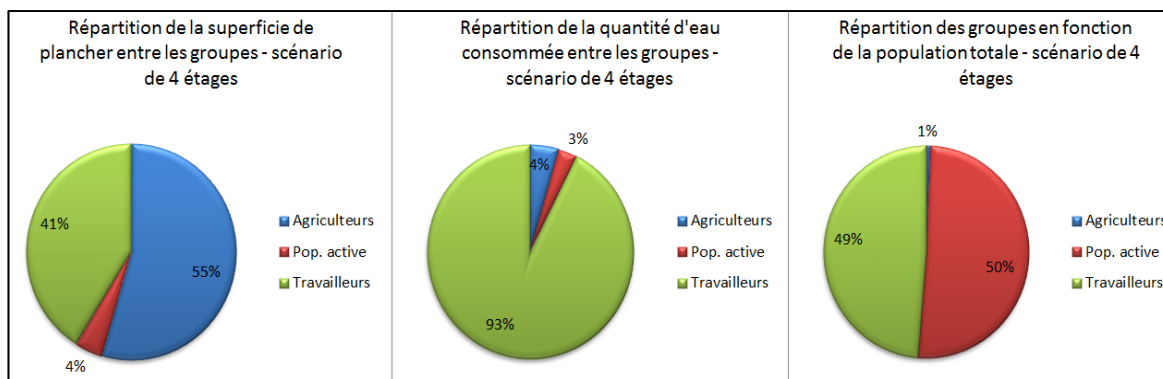


Figure 3.15 Répartition de la superficie de plancher et de la quantité d'eau consommée entre les groupes et répartition des groupes en fonction de la population totale scénario de 4 étages

3.2.2.3 Contexte d'agriculture verticale

Comme la section 3.2.2.2, les limites de développement ont été évaluées sur une période de 500 ans. Le nombre d'étages moyen traduit également le nombre de fois que la superficie initiale (74 km²) a été augmentée. Les résultats démontrés à la figure 3.16 révèlent que, dans le scénario d'agriculture verticale, la population serait affectée par la densité urbaine maximale qu'à partir de 10 étages.

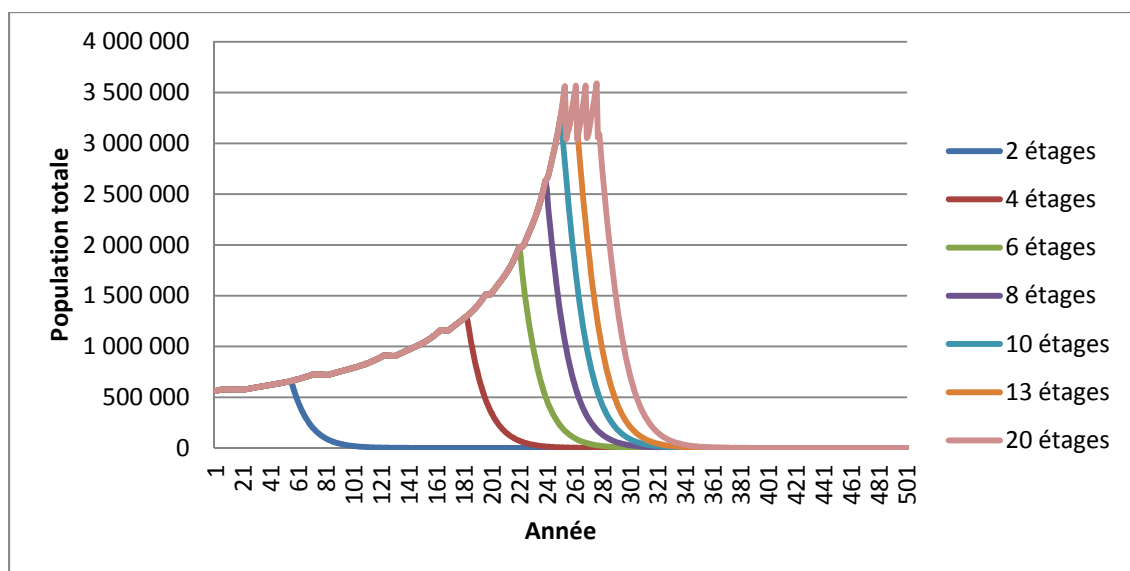


Figure 3.16 Évolution de la population totale en fonction du nombre d'étages moyen, sur une période de 500 ans

Dans un scénario de 10 étages, la figure 3.17 démontre que le nombre d'étages par groupe serait acceptable dans la mesure où les travailleurs pourraient être distribués sur 2,5 étages. Les agriculteurs seraient alors répartis sur 50 étages et la population active sur 30 étages, ce qui permettrait de multiplier par six (5,8) la population totale de départ. Contrairement au contexte d'agriculture traditionnelle, le scénario de 6 étages semble plus près du développement actuel en ramenant les travailleurs sur 2 étages, la population active sur 4 étages et les agriculteurs sur 20 étages. Ce scénario présente également une densité urbaine plus acceptable (26 737 pers/km²).

Toutefois, cette situation permettrait seulement de quadrupler (3,5) la population initiale. Le dernier scénario (20 étages) semble peu probable actuellement, quoique réalisable, en raison de la densité résidentielle que cela engendrerait. Cela équivaldrait à remplacer tous les bâtiments (en moyenne de 5 étages) par des tours d'habitation de 50 étages. Malgré tout, cette situation ne permettrait pas d'augmenter plus de 6 (6,4) fois la population initiale.

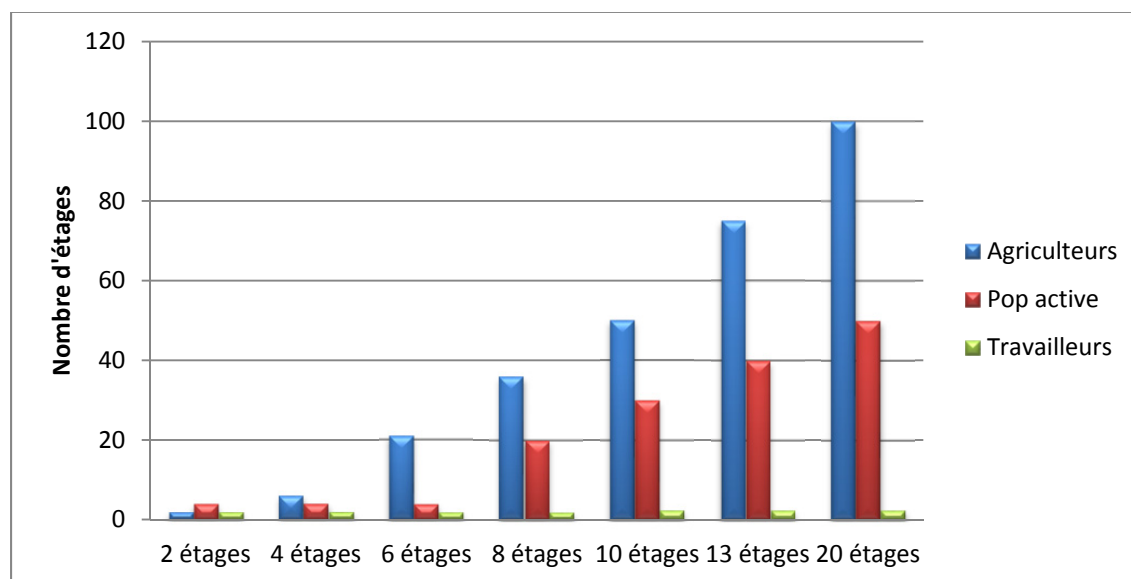


Figure 3.17 Nombre d'étages maximal par groupe en fonction du nombre d'étages moyen

Contrairement au contexte d'agriculture traditionnelle, la figure 3.18 démontre que lorsque la population urbaine atteint son maximum, ce sont les travailleurs qui occupent la plus grande

superficie de plancher. Cela est dû au nombre d'étages maximal fixé pour ce groupe, comparativement aux activités agricoles qui peuvent croître en hauteur. La consommation d'eau de ces deux groupes demeure semblable alors que la proportion d'agriculteurs par rapport à la population totale est plus élevée que celle des travailleurs, en raison de la situation initiale. Tout comme les figures 7.5 et 7.10, celle-ci démontre que la population active demeure le groupe qui exerce le moins de pression sur les ressources.

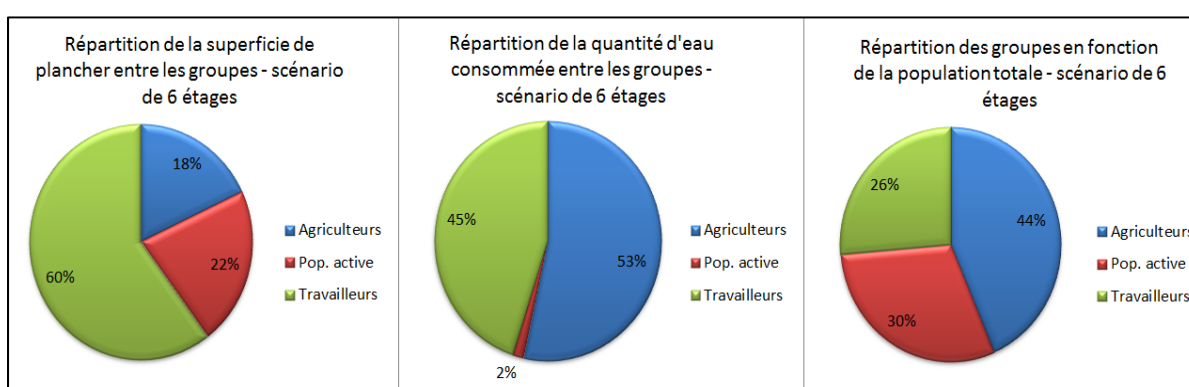


Figure 3.18 Répartition de la superficie de plancher et de la quantité d'eau consommée entre les groupes et répartition des groupes en fonction de la population totale scénario de 6 étages

3.2.2.4 Limites de croissance en fonction de la ressource hydrique

Dans le cadre de ce modèle et en fonction de la quantité d'eau disponible calculée, la limite n'est jamais atteinte, même dans un contexte où un développement d'en moyenne 20 étages seraient permis. En effet, même si cette situation semble irréaliste, la consommation d'eau ne devrait pas dépasser 12,5 milliards de m³ par année dans le cas de l'agriculture traditionnelle et 12,3 milliards de m³/année, dans le système d'agriculture verticale. Cela est dû à la densité maximale imposée qui limite ainsi la consommation. Aussi absurde que cela puisse paraître, il faudrait permettre un développement sur 1000 étages, sans limites de densité urbaine pour atteindre les limites de la quantité d'eau disponible.

Comme le démontre la figure 3.19, dans les deux scénarios développés, l'efficacité de gestion n'a pas d'impact sur l'évolution du système. Il a donc été jugé peu pertinent d'en

tenir compte dans ce chapitre. Toutefois, dans le scénario d'agriculture traditionnelle, il est important de garder en tête qu'une grande partie de l'eau nécessaire à la production de nourriture n'est pas prise en compte. En effet, la production extérieure n'est pas considérée dans le bilan de consommation.

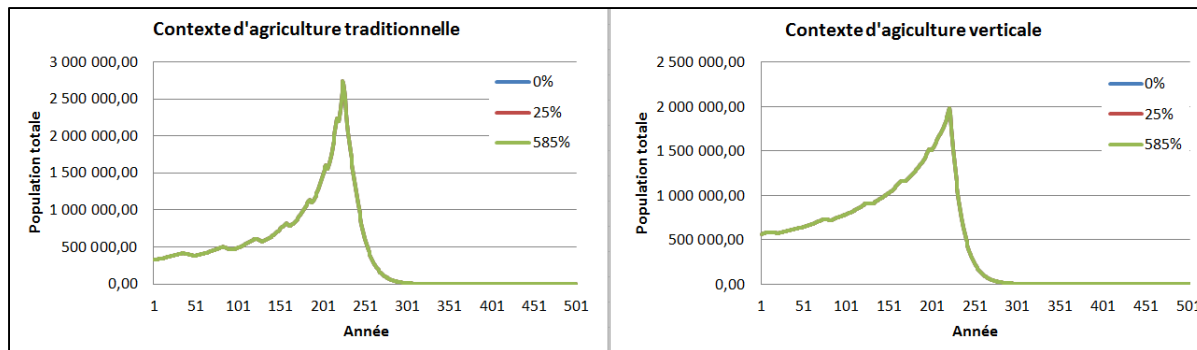


Figure 3.19 Évolution de la population totale en fonction du % d'efficacité de gestion et d'un scénario 6 étages moyens – contexte d'agriculture traditionnelle et verticale sur une période de 500 ans

3.2.2.5 Synthèse sur le modèle de ville existante

Les résultats obtenus démontrent qu'un contexte d'agriculture traditionnelle permettrait une plus forte croissance et donc une plus grande densité (11 fois la situation initiale). Toutefois, l'impact d'une telle densité sur chacun des groupes, particulièrement le nombre d'étages que chacun d'entre eux devrait occuper, semble irréalisable, puisque l'activité agricole occuperait toute la superficie. L'espace occupé optimal se situerait ainsi entre 1 et 4 étages et ne permettrait pas une densité plus grande que 25 000 pers/km². Dans ce contexte, il est toutefois pertinent de mentionner que la superficie aura tendance à limiter plus rapidement la croissance d'une ville. Dans une situation similaire (moyenne de 6 étages), les résultats démontrent qu'un contexte d'agriculture verticale permettrait d'accueillir un plus grand nombre de personnes avant que la limite ne soit atteinte. Cela est principalement dû à la population totale initiale plus élevée.

Ce chapitre démontre que dans les deux scénarios (agriculture traditionnelle avec importation et agriculture verticale), les limites de croissance devraient être atteintes durant la même période. L'application à un contexte de ville déjà existante aura permis d'intégrer des données statistiques réelles. Il est ainsi possible de conclure que le système présenté dans le cadre du chapitre 3.2.2 réagit de façon similaire à celui d'une ville émergente, ce qui permet de témoigner de l'adaptabilité du modèle à différents contextes.

Il a été démontré qu'à partir des limites développement établies, l'agriculture verticale ne permettrait pas de multiplier plus de sept fois la population initiale. L'agriculture verticale, par l'autonomie alimentaire qu'elle permet, amènerait donc une population semblable à celle de Montréal à croître encore sur une période de 200 ans.

Afin de pouvoir arriver à augmenter le développement, il faudrait doubler la concentration des populations, ce qui équivaldrait à accepter une densité urbaine de près de 100 000 personnes au km². Dans un contexte où la superficie pourrait être agrandie, il serait également possible pour la ville d'accroître sa population. Toutefois, dans ce cas-ci, la poursuite du développement se traduirait par l'étalement urbain.

Finalement, dans un contexte de ville existante semblable à celle de l'agglomération de Montréal, il demeure pertinent de se questionner quant à l'intérêt de mettre en place des actions en lien avec l'économie et l'optimisation de la ressource hydrique. Dans la mesure où celle-ci ne semblerait pas affectée par la croissance de la population locale, d'un point de vue quantitatif, les mesures d'efficacité de gestion semblent davantage rattachées à des aspects économiques.

3.3 Analyse des paramètres

3.3.1 La population initiale

Afin d'analyser la sensibilité du modèle, le nombre de personnes par groupe a été modifié. Ainsi, à partir du modèle de référence et des scénarios présentés au tableau 3.5, il est possible

d'évaluer l'impact des populations initiales sur l'évolution du système et donc, de démontrer que la dynamique du système est sensible aux conditions initiales.

Tableau 3.5 Résumé des données utilisées afin de comparer l'évolution de la population totale en fonction du nombre de personnes initial

	Agriculteurs	Population active	Travailleurs
Scénario 1	14	100	10
Scénario 2	140	100	1000
Scénario 3	1400	10 000	100
Scénario 4	140	10	100
Ville émergente (Scénario de base)	140	100	100

La figure 3.20 démontre que la population initiale influence l'allure des courbes. Dans le scénario 1, la décroissance est principalement due à la faible proportion d'agriculteurs locaux, ce qui affecte le taux d'espace vert et engendre le départ de la population active. Dans le cas du scénario 2, la croissance est principalement due au nombre élevé de travailleurs initial par rapport aux deux autres groupes, ce qui permet un taux d'emploi favorable et un faible taux d'exploitation. Toutefois, cette situation engendre des ralentissements dans la croissance, ce qui s'explique par un haut taux d'espaces minéralisés. Dans le même ordre d'idée, le scénario 3 provoque la décroissance du système en raison du nombre moins élevé de travailleurs, par rapport aux deux autres groupes, ce qui affecte le taux de chômage et le taux d'exploitation. Le scénario 4 permet une croissance légère en raison du nombre peu élevé d'habitants et les conditions sont réunies pour que la population totale puisse croître de façon constante (faible taux de chômage, taux d'espaces végétalisés et minéralisés raisonnable, etc.). Il s'agit d'une situation semblable au scénario de base, ce qui indique que la population active du départ a peu d'influence sur l'évolution globale, dans la mesure où le nombre de travailleurs initial est égal ou supérieur.

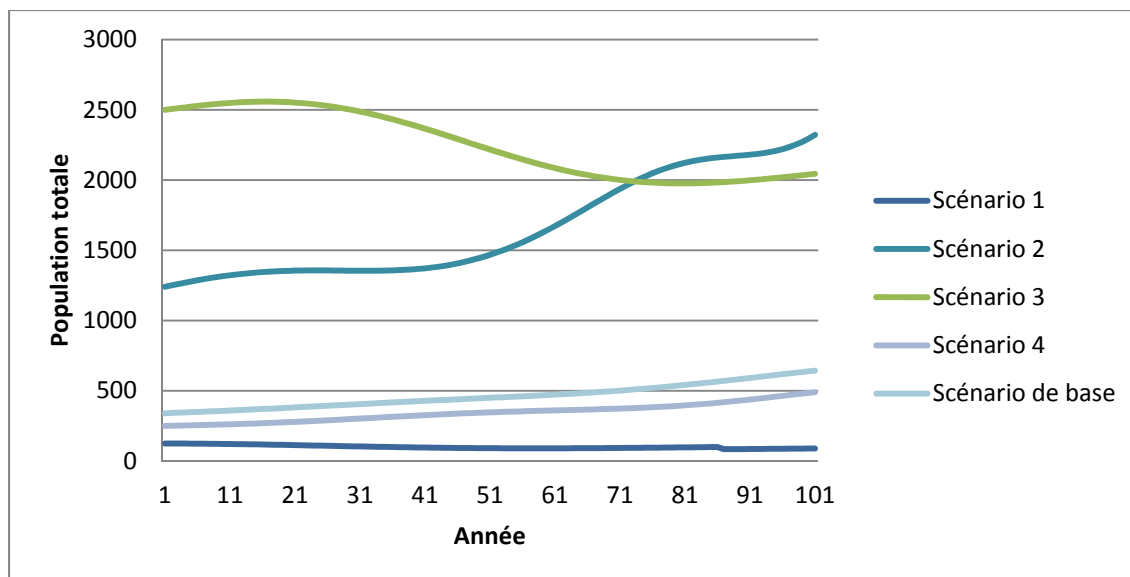


Figure 3.20 Évolution de la population totale en fonction du nombre de personnes initial sur une période de 100 ans

3.3.2 Les facteurs d'influences

Dans le but d'observer comment le modèle développé réagit et évolue, les cinq facteurs d'influence présentés ci-dessous ont été analysés. Cette analyse permet ainsi d'observer la complexité du modèle et d'illustrer l'influence des seuils sur l'évolution du système. Ainsi, si la dynamique fait en sorte qu'un facteur est supérieur ou inférieur au seuil qui lui est attribué, il affectera le taux de croissance ou de décroissance de certains groupes. Les facteurs ont été observés sur une période de 100 ans. Les situations d'agriculture traditionnelle (avec importation) et verticale ont été séparées alors que le modèle de ville émergente et celui du contexte de ville existante ont été évalués conjointement. Les mêmes seuils ont été retenus dans les deux cas, afin de comparer leur évolution respective.

3.3.2.1 Les espaces végétalisés et minéralisés

L'évolution d'une ville est en partie liée à la qualité de vie qu'elle permet. Mis à part les emplois et la nourriture, plusieurs facteurs peuvent influencer la venue de nouveaux habitants. Ceux-ci agissent sur le niveau de bien-être (physique et psychologique) des

individus. Si ce niveau est jugé trop bas, les groupes préféreront quitter la ville afin de trouver un endroit qui leur procure un niveau de bien-être acceptable. Dans le cadre de cette étude, deux facteurs d'influence sur le niveau de bien-être ont été retenus. Il s'agit de la relation entre les espaces végétalisés, traduite par le nombre d'agriculteurs et les espaces minéralisés, traduits par l'activité industrielle, qui agit sur l'arrivée et le départ de certains groupes. Le seuil associé au taux d'espaces végétalisés a été fixé arbitrairement à 6,54 % et celui du taux d'espaces minéralisés à 50 %.

Comme le démontre la figure 3.21, dans un contexte d'agriculture traditionnelle, le modèle de ville émergente évolue différemment de celui du contexte de ville existante. Alors que dans le premier cas, le taux d'espaces végétalisés varie entre 4 et 9 %, le second n'arrive pas à atteindre 1 %. La situation s'explique par la proportion d'agriculteurs initiaux par rapport à la population active. Dans un contexte d'agriculture verticale, la situation demeure semblable dans les deux scénarios. Toutefois, dans un contexte de ville existante, le taux d'espace vert est légèrement plus élevé et devance ainsi l'autre dans les périodes de croissance/décroissance, en raison de la situation initiale.

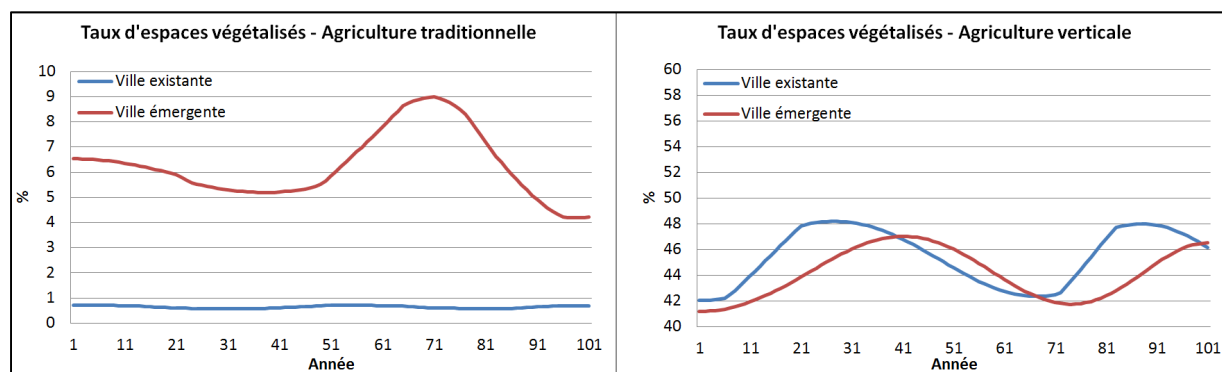


Figure 3.21 Comparaison de l'évolution du taux d'espaces végétalisés, ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans

La figure 3.22 démontre que, dans le cas du scénario de ville existante et d'agriculture traditionnel, le taux d'espaces minéralisés oscille entre 45 et 51 % et tend à se rapprocher de la moyenne des deux extrêmes. Cela peut s'expliquer par une proportion de travailleurs de

moins en moins grande par rapport à la population totale. Au contraire, le scénario de ville émergente présente un taux d'espace minéralisé qui oscille en atteignant des extrêmes de plus en plus éloignés à chacune des phases. Après 90 ans, le contexte permettrait aux travailleurs de représenter plus de la moitié de la population urbaine et désavantagerait ainsi l'agriculture urbaine, au profit de l'importation.

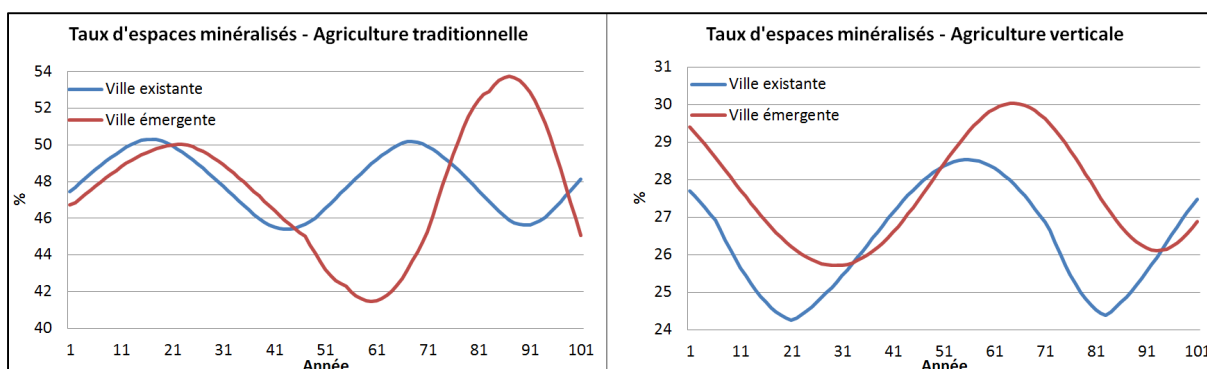


Figure 3.22 Comparaison de l'évolution du taux d'espaces minéralisés, ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans

Tout comme pour le taux d'espace vert, le contexte d'agriculture verticale engendre des taux d'espaces minéralisés semblables dans les deux scénarios, oscillant ainsi entre 24 % et 30 %. Cela signifie que le nombre de travailleurs n'est jamais supérieur au tiers de la population totale permettant ainsi une activité agricole viable.

3.3.2.2 Le taux de chômage et d'emplois

La situation économique d'une ville, traduite dans ce cas-ci par les taux de chômage et d'emplois, peut grandement influencer sa croissance ou sa décroissance. D'un côté, si l'activité économique ralentit, il devrait y avoir plus de chômage donc les gens finiront par partir. La reprise de croissance sera également plus lente, due au contexte défavorable pour les industries. Au contraire, un taux d'emplois élevé attirera de nouvelles entreprises et donc, les travailleurs et la population active. Il est à noter que la dynamique du système dépendra initialement du nombre de travailleurs par rapport à la population active, ce qui aura un impact direct sur les taux de chômage et d'emplois initiaux.

La figure 3.23 relève que dans un contexte d'agriculture traditionnelle, le taux de chômage atteint des sommets relativement élevés dans les deux cas, en raison du taux d'emplois qui est parfois inférieur à 85 %. Il y a toutefois de longues périodes où le taux de chômage est égal à zéro, étant donné que le taux d'emplois flottera au-dessus de 100 %. Dans un contexte d'agriculture verticale, les taux de chômage suivent également les mêmes tendances, dans les deux contextes. Les courbes témoignent de la diminution de l'écart entre les travailleurs et la population active au fil de temps.

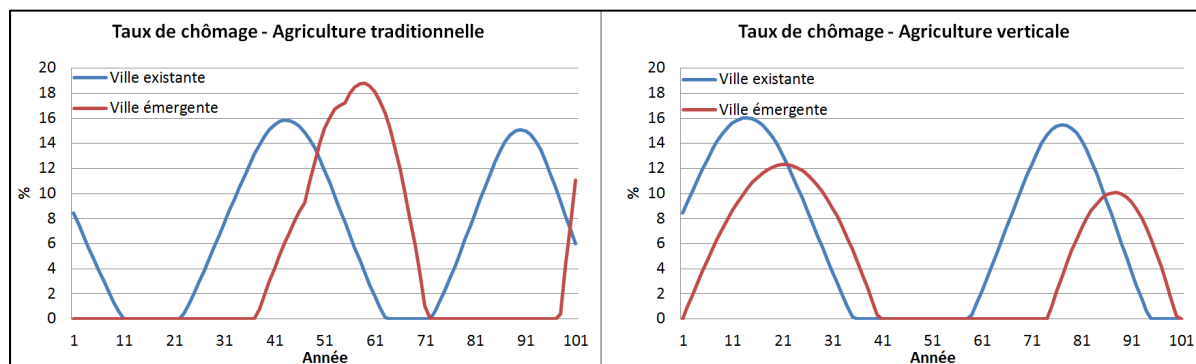


Figure 3.23 Comparaison de l'évolution du taux de chômage ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans

Dans un contexte d'agriculture traditionnelle, le scénario de ville existante permet d'atteindre un taux d'emploi supérieur à 130 % et les extrêmes tendent à être de plus en plus éloignés (figure 3.24). Le scénario de ville émergente demeure plus réaliste en oscillant entre 85 et 105 %. Logiquement, le taux d'emploi évolue inversement du taux de chômage, dans la mesure où si le taux d'emplois augmente, le taux de chômage diminue. Tout comme le taux de chômage, les taux d'emploi des deux scénarios suivent les mêmes tendances en atteignant toutefois des sommets moins élevés que dans le contexte d'agriculture traditionnelle.

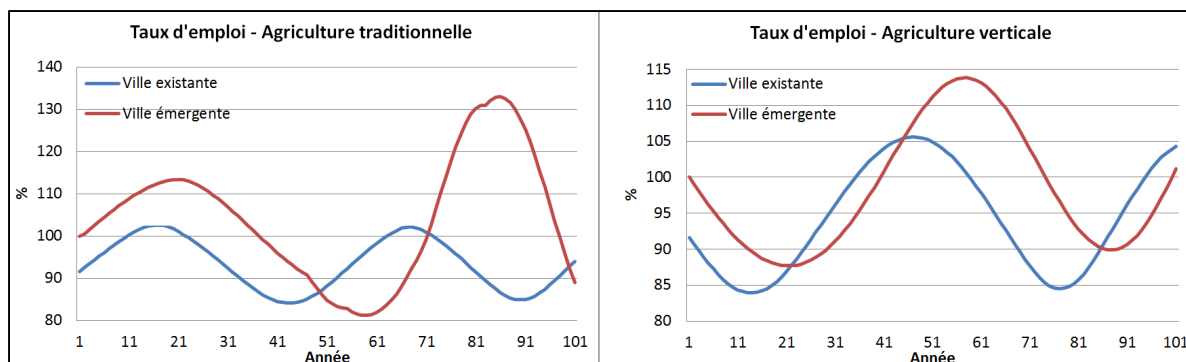


Figure 3.24 Comparaison de l'évolution du taux d'emploi, ville existante et ville émergente sur une période de 100 ans

3.3.2.3 Le taux d'exploitation

Le taux d'exploitation de l'espace, associé aux valeurs foncières, est un autre facteur qui peut traduire la situation économique d'une ville. Ainsi, un taux d'exploitation élevé démontrera le dynamisme de la ville. Par contre, s'il dépasse un certain seuil, il rendra difficile l'achat de terrains et pourrait diminuer l'attractivité de la ville au profit de celle des banlieues, où des espaces restent encore à développer. Dans le cadre des présents travaux, l'impact du nombre d'agriculteurs et de population active par rapport à l'ensemble de la population a été évalué sur le groupe des travailleurs.

Comme le démontre la figure 3.25, dans un contexte d'agriculture traditionnelle, les taux d'exploitation des deux scénarios suivent les mêmes tendances durant les 45 premières années. Toutefois, les oscillations du modèle de ville émergente prennent de l'ampleur et la courbe finit par évoluer de façon contraire à celle de la ville existante pour ressembler davantage aux courbes du taux d'emploi et d'espaces minéralisés. Au contraire, l'agriculture verticale permet des courbes du taux d'exploitation similaire dans les deux scénarios. Les taux d'exploitation varient entre 70 % et 76 %, ce qui coïncide avec les courbes du taux d'espaces minéralisés. La proportion de population active et d'agriculteurs n'est donc jamais inférieure au deux tiers de la population totale.

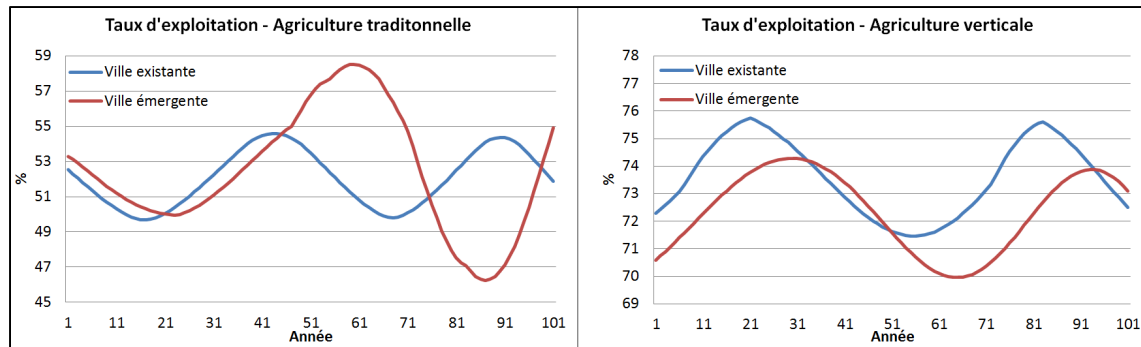


Figure 3.25 Comparaison de l'évolution du taux d'exploitation, ville existante et ville émergente, sur une période de 100 ans

L'analyse réalisée dans cette section aura permis de démontrer l'évolution d'une population urbaine en fonction du nombre de personnes initial par groupe et d'observer l'évolution d'une ville sur les facteurs influençant la qualité de vie des différents groupes. En terminant, bien que cela ne soit pas représenté dans cette section, il est important de noter que l'évolution de la population dépend du seuil initialement fixé pour chacun des facteurs et donc, que l'évolution d'un facteur variera également en fonction du seuil qu'il lui est initialement fixé.

CHAPITRE 4

DICUSSION

4.1 Dynamique du modèle développé

Le modèle initialement développé (figure 3.1) représente la façon dont les villes sont actuellement pensées et planifiées. Il s'agit d'un système périodique et déterministe dans la mesure qu'il permet de prévoir l'évolution de la population totale d'une ville dans le temps et présente des phases d'arrivée et de départ des populations constantes. L'évolution de ce modèle dépend donc uniquement des tendances de croissance et de décroissance. Ce modèle ne correspond pas à un système complexe puisqu'aucun facteur n'intervient dans l'évolution urbaine. Il n'est donc pas soumis à des perturbations, ce qui est peu représentatif du contexte des villes actuelles. Le modèle présentant un contexte d'agriculture traditionnelle et d'importation incluant les facteurs d'influence (figure 3.3) correspond davantage à la dynamique d'un système urbain. Certains éléments associés à la qualité de vie influencent l'arrivée et le départ des groupes. L'évolution dépendra ainsi des seuils fixés pour chacun des facteurs et de leur impact sur les taux de croissance et de décroissance. Le modèle présentant un contexte d'agriculture verticale incluant les facteurs d'influence (figures 3.4 et 3.5) correspond également à la dynamique d'un système urbain. La croissance de la population totale tend néanmoins à être exponentielle et les groupes semblent donc moins affectés par les facteurs que dans un scénario d'agriculture traditionnelle.

À la lumière des résultats, il faudrait répondre essentiellement à trois conditions pour maintenir un système urbain en équilibre, tout en assurant un développement modéré. Premièrement, dans un contexte où l'importation n'est pas possible, la quantité de nourriture produite localement doit subvenir aux besoins de la population active, quitte à limiter le développement urbain. Cela signifie que le taux d'espace minéralisé ne doit pas être trop élevé (moins de 50 %). La ville devrait ensuite assurer un nombre d'emplois suffisant pour la population active initiale (plus de 87 %) et un taux d'exploitation du sol (proportion d'habitants et d'agriculteurs) modéré (environ 55 %) permettent de maintenir le niveau de

bien-être pour les habitants. Finalement, la quantité de ressources naturelles disponibles doit permettre à la ville de se développer, ce qui signifie atteindre une densité d'activité acceptable pour tous les groupes d'usages.

Étant donné qu'il demeure impossible de prévoir avec exactitude le futur à cause des possibles fluctuations dues à des événements imprévisibles, le poids de certaines données pourrait également être remis en question, notamment au niveau des projections de croissance démographique et économique. Certains phénomènes imprévisibles tels que les guerres, les maladies et les catastrophes naturelles ont un impact sur le nombre d'habitants à un moment précis et peuvent donc influencer la dynamique urbaine. Les nouvelles technologies en termes de gestion et de traitement des ressources apportent également un aspect imprévisible à la recherche, tout comme l'incertitude de la situation socio-économique affaiblit les données de projections.

4.2 Développement urbain et consommation des ressources dans un contexte de ville émergente

Le modèle portant sur un contexte de ville émergente permet de calculer, de façon approximative, la consommation d'eau et la superficie occupée par groupe d'usage et donc, leur pression respective sur les ressources. De manière générale, l'agriculteur traditionnel est celui qui requière le plus de ressources, suivi du travailleur. Souvent négligé dans la planification des villes, le modèle développé a permis de considérer le sol comme étant une ressource naturelle à part entière. L'étude permet ainsi de prendre conscience de l'impact de la disponibilité des ressources sur le développement urbain, plus particulièrement sur le départ des populations.

L'étude confirme qu'il existe un seuil maximal de consommation des ressources qui, s'il est dépassé, compromet l'équilibre de la dynamique et le développement urbain. Chaque ville possède son propre seuil de consommation en fonction des ressources disponibles. Celles-ci auraient intérêt à connaître leurs limites et à en prendre compte dans la planification de leur territoire. Plutôt que de chercher à accroître sans cesse sa population et ses recettes fiscales,

une ville aurait davantage intérêt à rechercher l'équilibre entre ses usages afin d'assurer un développement à long terme, sans compromettre le renouvellement de ses ressources naturelles. D'un autre côté, dans un contexte où la ressource est pratiquement illimitée, une ville aurait intérêt à se questionner sur la pertinence d'investir dans l'efficacité de gestion de celle-ci (dans une situation comme celle de Montréal). Une ville aurait plutôt avantage à concentrer ses efforts pour déterminer ses ressources critiques et à en tenir compte dans sa planification.

La compétition pour la ressource en sol sera d'abord influencée par l'évolution des activités économiques. Un conflit peut être envisageable dans un contexte où un nouvel usage (agricole) est intégré dans une ville. Une forte croissance urbaine augmente la pression sur les ressources, et peut donc mener à des situations imprévisibles.

Dans le cadre du modèle développé, imposer une densité maximale a permis d'intégrer la notion de bien-être physique et psychologique relié à l'espace et de démontrer qu'il s'agit bien d'une limite au développement. Plus la densité d'une ville est élevée, plus le nombre d'étages augmente, ce qui diminue la qualité de vie (après un certain seuil). Bien que cela ne soit pas pris en compte dans cette étude, cela ne va pas sans entraîner une hausse des valeurs foncières et de la consommation d'énergies. À ce jour, il est encore difficile de déterminer la densité d'activité optimale, en ce qui concerne le niveau de bien-être de la population de manière généralisée. Toutefois, en améliorant le cadre de vie et en accordant du temps au changement de culture et de perception, cette densité peut être augmentée au fil du temps.

Le modèle a démontré que le nombre d'étages moyen permis ne traduit pas la réalité. Étant donné que certaines activités peuvent uniquement se réaliser sur un nombre d'étages restreint, d'autres usages devront subir le développement en hauteur. C'est ainsi le cas pour l'agriculture traditionnelle (c'est-à-dire la culture du sol) qui doit se faire sur un seul étage.

Le modèle développé permet d'observer l'impact de la dynamique sur le taux de satisfaction de la population. Ainsi, il a été possible de traduire l'impact des facteurs d'influence par la

satisfaction des différents groupes. Il s'agit d'un indice qui pourrait être pris en compte dans le développement des villes et qui simplifie la compréhension du système urbain. La modification des seuils associés aux facteurs d'influence crée des variations importantes au niveau du taux de satisfaction de chacun des groupes. Pourtant, ces variations semblent avoir peu d'impact sur l'évolution globale du système urbain. Finalement, dans la mesure où la consommation et la disponibilité des ressources sont différentes dans les deux contextes présentés, l'étude ne permet pas d'avancer que la ville émergente représente le stade initial de la ville existante.

4.3 Développement urbain et consommation des ressources dans un contexte de ville existante

Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible de transposer le modèle développé à un contexte de ville existante. Les résultats permettent également de comparer l'impact de l'agriculture traditionnelle et verticale sur un système urbain. Ils démontrent que l'agriculture verticale devrait être priorisée pour permettre une croissance à plus long terme. Les deux scénarios suivent néanmoins les mêmes tendances et atteignent les limites de développement durant la même période, aux alentours de 200 ans. Tout comme le modèle de ville émergente, la croissance de la population totale tend à être exponentielle dans les deux situations. Dans une optique de développement durable, si une ville semblable à celle de Montréal planifiait une croissance équivalant à plus de 10 fois sa population actuelle, l'équilibre et le développement du système seraient compromis, de même que le bien-être des habitants.

Contrairement à plusieurs endroits dans le monde où le développement urbain a conduit à l'épuisement des ressources naturelles, ce scénario soulève une problématique inverse. La croissance démographique du système est dans ce cas-ci davantage limitée par la superficie de la ville que par la disponibilité de sa ressource hydrique. En effet, dans un contexte comparable à celui de Montréal, en tenant compte du débit actuel, du temps de renouvellement de la ressource, des changements climatiques et de l'approvisionnement des villes voisines (50 %), il serait possible d'augmenter la consommation annuelle de plus de 10 milliards de m³ d'eau par année. D'un autre côté, en fonction de la capacité des installations

actuelles comme celle de l'agglomération montréalaise, il serait possible d'augmenter de seulement 45 % la quantité d'eau prélevée par année. Il est donc pertinent de remettre en question le temps et les dépenses investis par une ville en termes d'amélioration de l'efficacité de gestion de l'eau, dans une situation comme celle-ci.

L'étude met de l'avant le fait que chaque habitant a besoin d'une superficie et d'une quantité d'eau et de sol minimale pour vivre, travailler et se nourrir. Celle-ci demeure essentielle pour assurer un niveau de bien-être acceptable pour tous. À partir de la littérature, il a été possible de fixer ces données à 330 m²/habitants et à environ 2820 m³ d'eau/habitant par année. À partir de ces chiffres et en fonction d'une superficie équivalente à celle de Montréal, ce scénario permettrait un maximum de 1,5 million habitants. Une fois cette limite atteinte, une décroissance urbaine, d'un point de vue uniquement démographique, serait donc souhaitable dans une optique de développement durable. En transposant ces informations au contexte de Montréal et en s'appuyant sur les projections de croissance démographique faites par l'Institut de la statistique du Québec (2009) pour l'agglomération, ce seuil ne devrait pas être atteint d'ici 2030. Ainsi, en fonction de la gestion de l'espace et des relations entre les usages, la consommation de la ressource hydrique aura tendance à se stabiliser une fois que le territoire sera saturé. Dans le cas des villes en grande partie développées, celles-ci devraient concentrer leurs énergies à planifier leur territoire de façon durable, en fonction de la dynamique de ses groupes d'usages.

4.4 Agriculture urbaine

Selon les résultats obtenus, il est possible d'obtenir un système en équilibre même en intégrant l'usage agricole au sein d'une ville, à certaines conditions. L'agriculture, par l'espace qu'elle occupe, permet de limiter la croissance industrielle et donc, de restreindre la minéralisation du sol et les émissions de polluants associés aux activités manufacturières. L'agriculture urbaine assure ainsi un certain niveau de bien-être pour la population. D'un autre côté, bien que l'agriculture traditionnelle contribue au maintien de l'équilibre du système, cette activité nécessite une quantité de sol et d'eau très importante, ce qui peut

limiter la croissance des autres usages plus lucratifs pour la ville. L'activité agricole ne peut pas remplacer les emplois ni les habitants, sans affecter la densité d'activité, la mixité des usages et la situation économique de la ville. L'agriculture urbaine permet néanmoins de diversifier les activités économiques d'une ville, mais dans un contexte d'agriculture traditionnelle, l'importation demeure essentielle pour assurer le développement de la ville.

Dans le modèle incluant l'agriculture verticale, il est possible que les agriculteurs augmentent même si la population active diminue, dû à la libération de certaines terres. La ville deviendrait alors exportatrice de nourriture, ce qui pourrait retarder le retour des industries et de la population active, si cette activité devenait profitable. Le modèle développé favorise les agriculteurs dans la mesure où ceux-ci répondent toujours à la demande de la population active. L'agriculture verticale permet ainsi une autonomie alimentaire qui demeure favorable à la croissance urbaine.

Dans un contexte québécois, intégrer l'agriculture dans les villes représenterait une nouvelle concurrence pour les fermes en périphérie, pour lesquelles la situation est déjà préoccupante (Montiminy, 2010). Pertes d'emploi, pauvreté, vente des terres agricoles au profit du développement résidentiel, concurrence internationale sont en effet quelques-unes des problématiques auxquels font face les agriculteurs ruraux du 21^e siècle. De plus, dans le cas d'une ville comme Montréal, les résultats démontrent qu'il est impossible de maintenir la population actuelle et de subvenir à ses besoins uniquement par l'agriculture traditionnelle locale.

Bien que l'agriculture urbaine limite les émissions de GES liés au transport de nourriture, il faudrait prendre en compte la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement des fermes verticales et leur impact en termes de ressources énergétiques utilisées. Prendre en compte l'élevage dans l'agriculture urbaine pourrait avoir un impact important sur les émissions de GES et poserait certainement des problématiques différentes, notamment au niveau de la santé des populations.

Une étude économique sur la rentabilité de la production agricole à l'échelle d'une ville serait également pertinente afin de justifier les dépenses qu'engendrerait la construction de ces fermes verticales et le développement de nouvelles technologies. Il serait aussi intéressant de réaliser une étude sur le prix de vente de ces aliments produits localement. Cela permettrait d'évaluer si la production locale peut concurrencer avec le marché mondial et s'il s'agit d'une activité rentable pour la ville.

4.5 Facteurs d'influences sur la qualité de vie

Les résultats obtenus à partir de la modélisation permettent de confirmer que la croissance et donc l'attractivité des villes dépendent de divers facteurs d'influence du niveau de bien-être et de l'économie. La recherche démontre que le ratio travailleurs-population active-agriculteurs peut avoir un impact sur la qualité de vie des citoyens. Il est possible d'atteindre un certain équilibre qui respecte ce niveau de bien-être, tout en assurant le développement d'une ville en portant une attention au facteur d'influence mentionné précédemment. Ainsi, en fonction de la dynamique entre les trois groupes, la population totale sera affectée à différents moments par ces facteurs, augmentant le nombre de départs ou d'arrivées des populations.

Dans le modèle développé, ces facteurs sont indépendants les uns des autres, mais en réalité, ils peuvent s'influencer. Par exemple, le taux d'espace minéralisé influencera négativement le taux d'espaces végétalisés, tout comme le taux de chômage et d'emploi peuvent traduire la même situation. Le modèle développé démontre qu'un système urbain est complexe dans la mesure où une multitude de facteurs interviennent. En réalité, contrairement au modèle développé, ces facteurs n'ont pas tous la même force d'impact sur l'attraction et la répulsion des villes. Il serait pertinent d'en prendre compte lors des études à venir, afin de déterminer quels facteurs une ville devrait prioriser dans ses exercices de planification.

Au niveau des facteurs qui influencent la croissance de la population active, il a ici été retenu le taux d'espaces végétalisés, le taux de chômage et le taux d'emploi. Dans ce cas-ci, le taux

d'espaces végétalisés est traduit par la proportion d'agriculteurs par rapport à la population totale, alors que le taux d'emplois et le taux de chômage témoignent de la capacité à l'individu à subvenir à ses besoins. La capacité des agriculteurs à répondre à la demande de nourriture de la population active a également un impact, mais uniquement dans le cas où une ville ne posséderait pas d'agriculture verticale. Le coût des logements, les parcs, les commerces de proximités et l'efficacité des services publics sont quelques-uns des autres facteurs qui peuvent influencer le bien-être de la population résidente. La qualité de vie demeure un concept subjectif et les critères pour la définir peuvent varier d'une ville à l'autre. Il semble donc pertinent que chaque ville détermine ses propres critères qui permettent d'attirer et de retenir ses familles.

Les facteurs ayant un impact sur les travailleurs sont le taux d'exploitation non industrielle ainsi que les taux d'emploi et de chômage. Contrairement à la population active, ces deux derniers facteurs traduisent l'attractivité de la ville par rapport aux activités économiques. Ils traduisent donc en quelque sorte de la vitalité économique d'une ville, ce qui aura une influence sur le nombre d'emplois disponible. Bien que la croissance industrielle puisse être exponentielle, elle demeure limitée par la disponibilité et l'accessibilité aux ressources naturelles (les matières premières), humaines (la main-d'œuvre) et financières (les investissements). Sa croissance dépend aussi des commodités de transport (des marchandises et des personnes) ainsi que son accès au marché et au savoir. Plusieurs autres facteurs peuvent ainsi influencer l'attractivité des industries. Une ville devrait en prendre en compte si elle veut assurer sa vitalité économique.

Les agriculteurs sont quant à eux influencés uniquement par le taux d'espaces minéralisé, traduit par le nombre de travailleurs, par rapport à la population totale. En réalité, les facteurs qui influencent la croissance des agriculteurs en ville semblent beaucoup plus complexes. La fertilité du sol, les choix de société et les valeurs politiques jouent pour beaucoup dans le développement de l'agriculture urbaine. Longtemps séparés des milieux urbains, de plus en plus de projets voient le jour en ce sens, ce qui témoigne d'une ouverture de la part des autorités et des populations.

Le modèle développé est sujet aux instabilités dues aux facteurs d'influences et pourrait donc présenter des comportements chaotiques, traduits par l'explosion de la croissance démographique ou par le départ soudain de la population. En réalité, cela démontre qu'un système urbain demeure fragile et peut s'effondrer à différents moments de son histoire. Bien qu'il semble difficile de prévoir ce genre d'événement, il pourrait tout de même être bénéfique pour les villes de se doter d'un plan d'urgence en ce sens, ce qui permettrait d'intégrer le concept de résilience dans la planification urbaine. De plus, étant donné que le modèle est sensible aux écarts entre les groupes initiaux, cela permet également d'avancer que le système pourrait présenter des comportements chaotiques. Ainsi, un système urbain, bien qu'il soit régi par différentes lois d'évolution déterministe, demeure imprévisible quant à la croissance des différents groupes de population.

4.6 Autres éléments à considérer lors des travaux futurs

Plusieurs aspects relatifs au système urbain n'ont pas été traités dans le cadre de cette étude. Il est ainsi proposé de poursuivre les recherches en ce qui concerne entre autres les éléments ou les situations qui pourraient rendre le système développé chaotique. Cela permettrait d'intégrer au modèle des paramètres de résilience et d'adaptation des villes, une fois les limites de croissances atteintes.

Une étude pourrait également déterminer l'impact du système urbain sur les émissions de GES, dû entre autres au transport des personnes et des marchandises et à la production industrielle. Cela permettrait ainsi à orienter les actions à prioriser pour limiter les émissions d'une ville.

Au niveau de la précision du modèle, il serait pertinent d'affiner et de hiérarchiser les facteurs d'influence, de sorte que chacun ait un impact différent sur le système. Des précisions pourraient également être apportées quant à certains paramètres tels que la consommation d'eau et de sol par usages ainsi que les seuils maximaux affectant réellement la dynamique du système.

Dans un autre ordre d'idée, pour valider que le modèle soit exportable, une étude pourrait tenter de l'adapter au contexte d'une région métropolitaine. Les limites de superficie pourraient ainsi être agrandies au fil du temps, ce qui permettrait d'illustrer le phénomène de l'étalement urbain. La dynamique entre les différents groupes d'usages pourrait aussi être illustrée spatialement. Il serait aussi intéressant de transposer le modèle à un contexte différent de celui des villes nord-américaines.

Du point de vue de la ressource hydrique, il pourrait être pertinent d'étendre le modèle à plus large échelle, par exemple à l'échelle du tronçon fluvial ou d'une région métropolitaine. Il serait alors possible d'évaluer la dynamique globale d'une ville et de sa périphérie.

D'un autre côté, si le modèle était appliqué à une ville qui tire sa source d'un lac ou d'une rivière, les résultats seraient probablement différents. Dans ce cas-là, la quantité de ressources pourrait être un facteur beaucoup plus limitatif de la croissance urbaine.

Le modèle pourrait aussi inclure les autres types d'usages d'une ville (institutionnel, commercial, de services et de bureaux, les parcs, les espaces publics et naturels, etc.) et leur besoin en eau et en sol. L'intégration de ces autres groupes permettrait de dresser un portrait plus près de la réalité urbaine et d'utiliser le modèle développé comme outils d'aide à la planification. En ce sens, les facteurs d'influence externes, qui ne sont pas influencés par la dynamique des trois groupes comme les taux de natalité, de mortalité et d'immigration devraient aussi être pris en compte. Évaluer l'impact de la dynamique sur par exemple la santé publique et sur le taux de criminalité d'une ville serait également une avancée intéressante.

Il serait également possible de transposer le modèle dans une situation où les ressources naturelles disponibles ne sont pas les mêmes (le bois, l'énergie solaire ou éolienne, la pêche, etc.). Dans le même ordre d'idée, il serait pertinent d'appliquer le modèle à un contexte où les ressources ne sont pas renouvelables (minerais, pétrole, eaux sous-terrains, etc.). Cela permettrait de démontrer que ce type de ressources ne devrait pas être au cœur du

développement économique d'une ville, sans quoi le système ne repose pas sur des principes de ville durable.

Appliquer le modèle à une échelle plus petite telle qu'un quartier ou un arrondissement permettrait de dresser un portrait plus précis de la consommation d'eau et du sol et améliorerait sa fidélité. La consommation résidentielle pourrait ainsi être répartie en fonction du type d'habitation alors que celle des industries pourrait être divisée par secteur d'activité. Se référant aux principes de villes durables, il pourrait aussi être intéressant d'illustrer la verticalisation de l'espace, du point de vue de la mixité des usages. Il serait alors possible de retrouver à la fois les activités agricole, résidentielle, et industrielle à l'intérieur d'un même bâtiment.

Les terrains contaminés, le temps de renouvellement du sol et les dépenses associées à leur décontamination dans la reconversion des espaces industriels en espaces résidentiels et agricoles devraient également être pris en compte dans la dynamique des usages. Ainsi, le système devrait présenter des périodes de stagnation et des plus délais plus longs entre les phases de croissances et de décroissances.

Finalement, il serait intéressant de réaliser une étude économique rattachée au système développé, pour par exemple démontrer l'impact de la dynamique urbaine sur les valeurs foncières et les revenus générés, dans le cas où une ville devenait exportatrice. Cela permettrait également de distinguer les terrains à vocation économique (industrie et agriculture) et résidentielle et ainsi à la ville de mieux balancer les usages du sol.

CONCLUSION

La problématique portait sur l'intégration d'une nouvelle fonction urbaine (agriculture) et son impact sur la disponibilité des ressources naturelles (eau et sol), ainsi que sur le développement urbain. Les objectifs visaient essentiellement illustrer la dynamique de trois groupes de population urbaine (travailleurs, habitants et agriculteurs) afin d'observer les limites de développement d'une ville. Il s'agissait également de déterminer si le modèle développé pouvait s'appliquer autant à un contexte de ville émergente qu'à celui d'une ville existante. Pour y arriver, la dynamique et la consommation des ressources ont été modélisées à partir du logiciel Stella 9.1.1 et des données portant en partie sur l'agglomération de Montréal.

À la lumière des résultats obtenus, la recherche permet d'appuyer le fait que le développement d'une ville n'est pas linéaire. Elle démontre aussi qu'un système urbain demeure complexe et que son évolution dépend d'une multitude de facteurs qui viendront influencer la dynamique de ses groupes. De plus, bien qu'un système urbain évolue selon des principes établis, il pourrait présenter des comportements chaotiques en raison de sa sensibilité aux perturbations et aux conditions initiales (rapport de force entre les groupes). La modélisation a permis d'observer la réaction des systèmes urbains, dans un contexte de ville émergente et de ville existante. Les résultats démontrent ainsi que les deux systèmes réagissent de façon semblable.

L'étude permet aussi d'avancer que les villes possèdent inévitablement des limites de croissance dues à la quantité de ressources disponibles (l'eau et le sol). Le modèle démontre en fait qu'une ville ne peut pas croître éternellement, sans quoi l'équilibre de son environnement sera affecté. Chaque ville demeure unique et possède une quantité de ressources prédéterminées qu'elle doit connaître. De là l'importance de collecter les données précises et exhaustives, en ce qui concerne la quantité consommée par groupes d'usages, le temps de renouvellement et la disponibilité annuelle. Il s'agit là d'un frein à l'étude et souligne un manque d'informations qui peut nuire à la gestion durable des ressources. La

gestion des ressources critiques devrait être au centre de la planification urbaine, ce qui permettrait d'assurer une bonne cohabitation entre les villes (pas d'empiètement sur les ressources des autres) et ainsi, une évolution plus responsable.

L'étude réalisée n'a donc pas permis d'établir la consommation d'eau et de sol optimale pour réduire l'impact de la croissance démographique sur l'environnement. Elle a toutefois démontré l'importance de la planification des usages dans une ville et de l'harmonisation des politiques d'aménagement urbain et de l'eau.

Selon le contexte urbain, la quantité d'eau et de sol consommée au cours des prochaines années dépendra :

- du taux de croissance des habitants, des industries et de la quantité de nourriture produite;
- des efforts qui seront entrepris pour la réparation des fuites et pour l'entretien du réseau de distribution d'eau potable;
- des politiques de gestion mise en place, notamment au niveau de l'aménagement et de l'agriculture urbaine;
- du rapport entre travailleurs, de population active et d'agriculteurs.

Toutefois, dans le cadre de cette étude, certains scénarios développés à partir du modèle permettent de démontrer que ce n'est pas forcément la disponibilité des ressources naturelles (dans ce cas-ci renouvelable) qui influencera la dynamique. Même dans un contexte où les ressources naturelles semblent illimitées, le modèle démontre qu'une ville ne peut pas croître indéfiniment sans affecter la qualité de vie de ses citoyens. L'étude a ainsi permis d'intégrer de nouveaux paramètres de qualité de vie tels que le taux d'exploitation non industrielle pour les travailleurs et le taux de minéralisation de l'espace pour les agriculteurs. Dans ce cas-ci, la qualité de vie est également affectée par la densité urbaine et donc, par la répartition des groupes d'usage.

La recherche a permis de démontrer qu'un nombre d'étages moyen pour l'ensemble d'une ville ne traduit pas la situation réelle. Ainsi, dans un contexte d'agriculture traditionnelle,

bien qu'une moyenne de 6 étages semble *a priori* réaliste pour une ville, le modèle démontre que cette situation aurait un impact important sur le développement en hauteur de la population active et des travailleurs. L'étude révèle donc l'importance de considérer l'espace occupé par chacun des groupes dans la planification urbaine.

L'étude présentée intègre l'agriculture comme activité urbaine à part entière. Elle démontre que cette activité peut être souhaitable dans le cas des villes déjà développées. En effet, accorder une place importante à l'agriculture urbaine permet d'encourager l'emploi et l'économie locale. De par la superficie qu'elle occupe, l'agriculture traditionnelle permet aussi de limiter la croissance des industries, et par le fait même, la saturation de l'espace et les émissions de polluants. L'agriculture locale permet également de limiter le transport des aliments et donc des émissions de GES. La population serait donc moins sujette à quitter la ville. L'agriculture devrait ainsi être soutenue par des politiques municipales et par des incitatifs gouvernementaux, afin d'encourager la venue d'agriculteurs et d'investisseurs dans la ville. De la sorte, le scénario de croissance agricole pourrait prendre son sens.

Dans le cas des villes densément peuplées, l'étude révèle qu'il demeure difficile, voire impossible, de subvenir aux besoins d'une population urbaine, uniquement par l'agriculture traditionnelle locale. L'importation de nourriture demeure donc essentielle pour assurer la croissance urbaine. D'un autre côté, l'agriculture verticale permet quant à elle de répondre aux besoins grandissants de la population, même dans un contexte où l'importance de nourriture ne serait plus possible. Ce type d'agriculture serait donc viable à long terme, à condition d'avoir préalablement mis en place les technologies pour assurer une production suffisante et une logistique de distribution optimale.

Dans le cas des villes semblables au contexte montréalais, l'étude a permis de démontrer que la croissance urbaine est davantage influencée par la qualité de vie de la population que par la disponibilité des ressources naturelles. Assurer la qualité de vie des citoyens en considérant au même niveau les facteurs économiques (les emplois locaux, l'approvisionnement local), sociaux (l'accès aux services, une densité adéquate) et environnementaux (la préservation

d'espaces végétalisés, la limitation des émissions de GES) permettrait donc à la ville de se développer durablement.

Cette étude aura donc permis de modéliser une partie du système urbain afin de pouvoir observer la dynamique qui s'opère entre trois groupes d'usages, face aux contraintes de croissances. La recherche soulève finalement l'importance de comprendre la dynamique urbaine et d'apprendre à reconnaître les limites de croissance. Elle révèle ainsi l'importance de planifier l'évolution des villes avant que celles-ci ne compromettent l'équilibre entre milieu naturel et urbain, entre croissance démographique et préservation de la ressource. Les règlements de prélèvement et de rejet d'eau, de zonage, de lotissement et de construction et le plan d'urbanisme sont des outils précieux dont la ville dispose pour y parvenir.

RECOMMANDATIONS

Suite à l'étude présentée, trois recommandations s'imposent afin de pouvoir observer l'impact de la dynamique urbaine sur son environnement immédiat.

1- Réaliser une étude économique rattachée au modèle

Il serait pertinent de réaliser une étude économique afin de cerner l'impact du prix associé à la consommation des ressources sur la dynamique urbaine. Dépendant du montant fixé, en augmentant le prix de la nourriture produite localement, cela pourrait provoquer un désavantage concurrentiel pour l'approvisionnement local. Pour ce qui est des activités industrielles, un prix trop élevé de l'eau pourrait décourager certaines entreprises à venir s'installer dans la ville ou alors les encourager à déménager. Cela aurait un impact direct sur le taux d'emploi et de chômage et donc sur la situation économique. Considérer l'impact du prix de l'eau sur la dynamique urbaine serait donc une avancée intéressante. Toutefois, pour déterminer le prix associé aux ressources, il demeure impératif de combler les lacunes en matière d'information, soulevées à travers la présente étude.

À la lumière des résultats et dans un cas comme celui de Montréal, la tarification de l'eau semble injustifiée pour répondre à une éventuelle pénurie. Elle pourrait toutefois l'être dans le but de réparer les fuites dans le réseau de distribution d'eau potable et pour l'entretien de celui-ci. La tarification pourrait également être justifiable dans le but de construire de nouvelles installations de captage et stockage en vue de la croissance de la demande.

L'installation de compteurs d'eau dans les ICI s'avère essentielle pour obtenir des données précises sur la consommation. De manière progressive, il pourrait également être pertinent d'installer ces compteurs dans le secteur résidentiel et agricole. De la sorte, il serait possible d'obtenir des résultats plus fidèles à la réalité de chaque ville. Dans une optique de tarification de l'eau, les compteurs permettraient de moduler le prix en fonction de la

consommation. À titre d'exemple, depuis que les villes de Denver et de New York ont appliqué ce système de tarification modulaire, la consommation a chuté de 30 à 40 %.

Ajuster le prix du foncier en fonction de l'impact environnemental des activités serait justifiable pour limiter celles qui sont polluantes, pallier au futur problème de contamination des sols et forcer les entreprises à prendre leurs responsabilités. La création d'un fonds pour la décontamination pourrait par exemple servir à la réhabilitation des terrains. La ville assurerait ainsi son développement futur et se positionnerait quant au type d'activité qu'elle souhaite accueillir sur son territoire.

2- Prendre en compte l'impact de la consommation d'eau sur les voies navigables

Il serait intéressant de prendre en compte l'impact de la consommation sur le niveau d'eau minimum à respecter pour la navigation commerciale. À titre d'exemple, selon Transport Québec, pour le fleuve Saint-Laurent, le niveau ne devrait pas descendre sous la barre des 11,3 m sans quoi, il faudra procéder au dragage du chenal de navigation. Il est intéressant de prendre en compte cet aspect d'un point de vue autant économique qu'environnemental. En effet, plus le niveau d'eau diminue, plus les navires doivent réduire la charge de marchandises transportées. Cela occasionne donc plus de déplacements, ce qui augmente les coûts de transport et la quantité de GES émise. D'un autre côté, sachant que Le Port de Montréal représente plus d'un milliard de dollars rapporté aux Québec, l'impact économique de la gestion de l'eau est non négligeable.

3- Prendre en compte l'impact de la consommation sur la qualité de l'eau et du sol

Un usage durable de la ressource signifie aussi de ne pas altérer la qualité d'un milieu et son écosystème pour le bien des générations futures. Dans un contexte de changement climatique, l'utilisation judicieuse des ressources s'avère essentielle, pour préserver une qualité du sol et de l'eau acceptable. Il serait possible d'évaluer l'impact de l'augmentation des eaux usées sur l'équilibre de l'écosystème et sur les bandes riveraines d'un cours d'eau et

sur ses affluents. L'impact de la consommation sur la santé des cours d'eau en aval et des populations qui y habitent devrait aussi être considéré. Par exemple, pour les futurs développements, les autorités pourraient aussi exiger une preuve que l'approvisionnement en eau ne comporte pas de risques environnementaux à long terme, comme l'a fait l'État de Californie.

De même, la qualité du sol peut engendrer des problèmes urbains. Il serait intéressant de prendre en compte l'impact des terrains contaminés sur le développement et la santé des écosystèmes. En conclusion, prendre en compte l'impact de la dynamique des usages sur la qualité de ces ressources serait une avancée intéressante pour ne pas compromettre la santé des écosystèmes.

ANNEXE I

DONNÉES SUR LA CONSOMMATION D'EAU DES TRAVAILLEURS

Tableau-A I-1 Prélèvement d'eau annuel, nombre d'établissements
et nombre d'emplois - Québec

Secteur d'activité (Code SCIAN)	Prélèvement d'eau total (m³/année) - Données arrondies	Nombre d'établissements	Nombre d'emplois
Fabrication du papier (322)	1 593 600 000	868	57 501
Première transformation de métaux (331)	1 052 900 000	785	59 038
Fabrication de produits chimiques (325)	334 100 000	3035	81 314
Fabrication d'aliments (311)	332 300 000	7 817	232 710
Fabrication de produits du pétrole ou charbon (324)	299 800 000	355	13 152
Fabrication de boissons et de produits du tabac (312)	46 900 000	1 151	26 362
Fabrication de produits minéraux non métalliques (327)	39 000 000	3 166	47 375
Fabrication de produits en plastique et en caoutchouc (326)	27 600 000	2 861	95 069
Fabrication de produits en bois (321)	22 400 000	5 531	89 381
Fabrication de matériel de transport (336)	21 400 000	3 231	159 301
Fabrication de produits métalliques (332)	13 900 000	11 235	151 788
Usines de produits de textiles (314)	3 300 000	1 324	9 762
Activités diverses de fabrication (339)	2 800 000	9 457	56 773
Fabrication de machines (333)	2 700 000	7 450	124 056
Usines textiles (313)	800 000	621	8 026
Autres (315, 316, 323, 334, 335, 337)	12 700 000	21 028	268 402
Total	3 806 200 000	79 915	1 480 010

Tableau-A I-2 Prélèvement d'eau annuel, nombre d'établissements
et nombre d'emplois - Montréal

Secteur d'activité (Code SCIAN)	Prélèvement d'eau total (m³/année) - Données estimées	Nombre d'établissements (2011)	Nombre d'emplois (2006)
Fabrication du papier (322)	168 502 948	63	6080
Première transformation de métaux (331)	68 751 135	37	3855
Fabrication de produits chimiques (325)	45 525 100	173	11 080
Fabrication d'aliments (311)	20 512 610	351	14 365
Fabrication de produits du pétrole ou charbon (324)	30 545 316	19	1340
Fabrication de boissons et de produits du tabac (312)	7 454 328	23	4190
Fabrication de produits minéraux non métalliques (327)	2 407 916	74	2925
Fabrication de produits en plastique et en caoutchouc (326)	2 056 885	169	7085
Fabrication de produits en bois (321)	392 209	46	1565
Fabrication de matériel de transport (336)	2 270 293	93	16 900
Fabrication de produits métalliques (332)	898 352	427	9810
Usines de produits de textiles (314)	736 939	73	2180
Activités diverses de fabrication (339)	388142	383	7870
Fabrication de machines (333)	199 253	220	9155
Usines textiles (313)	344 879	67	3460
Autres (315, 316, 323, 334, 335, 337)	2 544 949	1446	53 785
Total	353 531 254	3664	1555

ANNEXE II

ÉQUATIONS TIRÉES DE STELLA 9.1

Algorithme-A II-1 Équations utilisées dans le contexte de ville émergente :
Agriculture traditionnelle

```

Agriculteurs(t) = Agriculteurs(t - dt) + (Entrée_agriculteurs - Sortie__agriculteurs) * dt
INIT Agriculteurs = Agriculteurs_initial
INFLOWS:
Entrée_agriculteurs = Agriculteurs*Taux_de_c_agriculteurs
OUTFLOWS:
Sortie__agriculteurs =
Agriculteurs*(Taux_de_dc_agriculteurs+Taux_de_dc_eau+Taux_de_dc_surface+Densité_urbaine__maximale)
Eau_agriculteurs(t) = Eau_agriculteurs(t - dt) + (Entrée_agriculteurs_eau - Sortie_agriculteurs_eau) * dt
INIT Eau_agriculteurs = m3_par_agriculteur*Agriculteurs
INFLOWS:
Entrée_agriculteurs_eau = Eau_agriculteurs*Taux_de_c_agriculteurs
OUTFLOWS:
Sortie_agriculteurs_eau = Eau_agriculteurs*(Taux_de_dc_agriculteurs)
Eau_pop_active(t) = Eau_pop_active(t - dt) + (Entrée_pop_active_eau - Sortie__pop_active_eau) * dt
INIT Eau_pop_active = m3_par_pop_active*Population_active
INFLOWS:
Entrée_pop_active_eau = Eau_pop_active*Taux_de_c_pop_active
OUTFLOWS:
Sortie__pop_active_eau = Eau_pop_active*(Taux_de_dc_pop_active)
Eau_travailleurs(t) = Eau_travailleurs(t - dt) + (Entrée_travailleurs_eau - Sortie_travailleurs_eau) * dt
INIT Eau_travailleurs = m3_par_travailleur*Travailleurs
INFLOWS:
Entrée_travailleurs_eau = Eau_travailleurs*Taux_de_c_travailleurs
OUTFLOWS:
Sortie_travailleurs_eau = Eau_travailleurs*(Taux_de_dc_travailleurs)
Population_active(t) = Population_active(t - dt) + (Entrée_pop_active - Sortie_pop_active) * dt
INIT Population_active = Pop_active_initial
INFLOWS:
Entrée_pop_active = Population_active*Taux_de_c_pop_active
OUTFLOWS:
Sortie_pop_active =
Population_active*(Taux_de_dc_pop_active+Taux_de_dc_eau+Taux_de_dc_surface+Densité_urbaine__maximale)
Surface_agriculteurs(t) = Surface_agriculteurs(t - dt) + (Entrée_agriculteurs_surface -
Sortie_agriculteurs_surface) * dt
INIT Surface_agriculteurs = m2_par_agriculteur*Agriculteurs
INFLOWS:
Entrée_agriculteurs_surface = Surface_agriculteurs*Taux_de_c_agriculteurs
OUTFLOWS:
Sortie_agriculteurs_surface = Surface_agriculteurs*Taux_de_dc_agriculteurs
Surface_pop_active(t) = Surface_pop_active(t - dt) + (Entrée_pop_active_surface - Sortie_pop_active_surface)
* dt
INIT Surface_pop_active = m2_par_pop_active*Population_active
INFLOWS:

```

```

Entrée_pop_active_surface = Surface_pop_active*Taux_de_c_pop_active
OUTFLOWS:
Sortie_pop_active_surface = Surface_pop_active*Taux_de_dc_pop_active
Surface_travailleurs(t) = Surface_travailleurs(t - dt) + (Entrée__travailleurs_surface -
Sortie_travailleurs_surface) * dt
INIT Surface_travailleurs = m2_par_travailleur*Travailleurs
INFLOWS:
Entrée__travailleurs_surface = Surface_travailleurs*Taux_de_c_travailleurs
OUTFLOWS:
Sortie_travailleurs_surface = Surface_travailleurs*Taux_de_dc_travailleurs
Travailleurs(t) = Travailleurs(t - dt) + (Entrée_travailleurs - Sortie_travailleurs) * dt
INIT Travailleurs = Travaileurs_initial
INFLOWS:
Entrée_travailleurs = Travailleurs*Taux_de_c_travailleurs
OUTFLOWS:
Sortie_travailleurs =
Travailleurs*(Taux_de_dc_travailleurs+Taux_de_dc_eau+Taux_de_dc_suface+Densité_urbaine__maximale)
Agriculteurs_initial = 140
Attraction_travailleurs = IF(Taux_d'emplois)>Seuil_attraction THEN Taux_attraction ELSE 0
Attraction_agriculteurs = IF(Taux_d'espaces__minéralisés)<Seuil_enmin THEN Taux_enmin ELSE 0
Attraction_pop_active = IF (Taux_d'emplois)>Seuil_attraction THEN Taux_attraction ELSE 0
Consommation_totale_suface = Surface_agriculteurs+Surface_pop_active+Surface_travailleurs
Consommation_totale_eau = (Eau_agriculteurs+Eau_pop_active+Eau_travailleurs)
Densité_urbaine__maximale = IF(Nombre_de_personnes_dans_la_ville_par_année)>20000 THEN 10 ELSE 0
Efficacité_de_gestion = (2000000*0)/100
Insatisfaction_espaces_verts = IF(Taux_d'espace_verts)<Seuil_efav THEN Taux_efav ELSE 0
Limite_eau = 20000000+Efficacité_de_gestion
Limite_surface = 500000*Nombre_d'étages
m2_par_agriculteur = 1820
m2_par_pop_active = 30
m2_par_travailleur = 30
m3_par_agriculteur = 1844.64
m3_par_pop_active = 78.11
m3_par_travailleur = 2572
Nombre_d'étages = 1
Nombre_de_personnes_dans_la_ville_par_année = Population_active+Travailleurs+Agriculteurs
Pas_d'importation = IF (Agriculteurs)<(Population_active/7.142857142857143) THEN 0.5 ELSE 0
Pop_active_initial = 100
Répulsion_pop_active = IF(Taux_de_chômage)>Seuil_répulsion THEN Taux_répulsion ELSE 0
Répulsion_agriculteurs = IF(Taux_d'espaces__minéralisés)>Seuil_rp THEN Taux_rp ELSE 0
Répulsion_travailleurs = IF(Taux_de_chômage)>Seuil_répulsion THEN Taux_répulsion ELSE 0
Satisfaction_espaces_verts = IF(Taux_d'espace_verts)>Seuil_ev THEN Taux_ev ELSE 0
Seuil_attraction = 87
Seuil_edf = 55
Seuil_ef = 55
Seuil_efav = 6.54
Seuil_enmin = 50
Seuil_ev = 6.54
Seuil_répulsion = 13
Seuil_rp = 50
Taux_attraction = 0.005
Taux_c_initial_agriculteurs = 0.04
Taux_c_initial_pop_active = 0.04
Taux_c_initial_tavailleurs = 0.03

```



```

Taux_d'emplois = IF((Travailleurs)/Population_active)*100<0 THEN 0 ELSE
((Travailleurs)/Population_active)*100
Taux_d'espaces_minéralisés = ((Travailleurs)/(Agriculteurs+Population_active+Travailleurs))*100
Taux_d'espace_verts = ((Agriculteurs)/(Agriculteurs+Population_active+Travailleurs))*100
Taux_d'exploitation = ((Population_active+Agriculteurs)*100)/(Population_active+Agriculteurs+Travailleurs)
Taux_d'exploitation_favorable = IF(Taux_d'exploitation)<Seuil_ef THEN Taux_ef ELSE 0
Taux_d'exploitation_défavorable = IF(Taux_d'exploitation)>Seuil_edf THEN Taux_edf ELSE 0
Taux_dc = 0.08
Taux_dc_initial_agriculteurs = 0.04
Taux_dc_initial_pop_active = 0.04
Taux_dc_initial_travailleurs = 0.03
Taux_de_chômage = IF(((Population_active-Travailleurs)/Population_active)*100)<0 THEN 0 ELSE
(((Population_active-Travailleurs)/Population_active)*100)
Taux_de_c_agriculteurs = (Taux_c_initial_agriculteurs+Attraction__agriculteurs)*(Population_active/100)
Taux_de_c_pop_active =
((Attraction_pop_active+Satisfaction_espaces_verts+Taux_c_initial_pop_active)*(Travailleurs/100))
Taux_de_c_travailleurs =
(Attraction_travailleurs+Taux_c_initial_tavailleurs+Taux_d'exploitation_favorable)*(Agriculteurs/140)
Taux_de_dc_agriculteurs = (Taux_dc_initial_agriculteurs+Répulsion__agriculteurs)*(Travailleurs/100)
Taux_de_dc_eau = IF(Consommation_totale__eau)>Limite_eau THEN Taux_dc ELSE 0
Taux_de_dc_pop_active =
(Insatisfaction_espaces_verts+Répulsion_pop_active+Taux_dc_initial_pop_active+Pas_d'importation)*(Agricu
lteurs/140)
Taux_de_dc_suface = IF(Consommation_totale_suface)>Limite_surface THEN Taux_dc ELSE 0
Taux_de_dc_travailleurs =
(Répulsion__travailleurs+Taux_d'explotation_défavorable+Taux_dc_initial_travailleurs)*(Population_active/1
00)
Taux_edf = 0.005
Taux_ef = 0.005
Taux_efav = 0.005
Taux_enmin = 0.005
Taux_ev = 0.005
Taux_répulsion = 0.005
Taux_rp = 0.005
Travaileurs_initial = 100

```

Algorithme-A II-2 Équations utilisées dans le contexte de ville émergente : Agriculture verticale

```

Agriculteurs(t) = Agriculteurs(t - dt) + (Entrée_agriculteur - Sortie__agriculteurs) * dt
INIT Agriculteurs = Agriculteurs_initial
INFLOWS:
Entrée_agriculteur = Agriculteurs*Taux_de_c_agriculteurs
OUTFLOWS:
Sortie__agriculteurs =
Agriculteurs*(Taux_de_dc_agriculteurs+Taux_de_dc_eau+Taux_de_dc_suface+Densité_maximale)
Eau_agriculteurs(t) = Eau_agriculteurs(t - dt) + (Sortie_agriculteurs_eau - Noname_15) * dt
INIT Eau_agriculteurs = m3_par_agriculteur*Agriculteurs
INFLOWS:
Sortie_agriculteurs_eau = Eau_agriculteurs*Taux_de_c_agriculteurs
OUTFLOWS:
Noname_15 = Eau_agriculteurs*(Taux_de_dc_agriculteurs)
Eau_pop_active(t) = Eau_pop_active(t - dt) + (Entrée_pop_active_eau - Sortie_pop_active_eau) * dt

```

```

INIT Eau_pop_active = m3_par_pop_active*Population_active
INFLOWS:
Entrée_pop_active_eau = Eau_pop_active*Taux_de_c_pop_active
OUTFLOWS:
Sortie_pop_active_eau = Eau_pop_active*(Taux_de_dc_pop_active)
Eau_travailleurs(t) = Eau_travailleurs(t - dt) + (Entrée_travailleurs_eau - Noname_7) * dt
INIT Eau_travailleurs = m3_par_travailleur*Travailleurs
INFLOWS:
Entrée_travailleurs_eau = Eau_travailleurs*Taux_de_c_travailleurs
OUTFLOWS:
Noname_7 = Eau_travailleurs*(Taux_de_dc_travailleurs)
Population_active(t) = Population_active(t - dt) + (Entrée_pop_active - Sortie_pop_active) * dt
INIT Population_active = Pop_active_initial
INFLOWS:
Entrée_pop_active = Population_active*Taux_de_c_pop_active
OUTFLOWS:
Sortie_pop_active =
Population_active*(Taux_de_dc_pop_active+Taux_de_dc_eau+Taux_de_dc_suface+Densité_maximale)
Surface_agriculteurs(t) = Surface_agriculteurs(t - dt) + (Entrée_agriculteurs_surface -
Sortie_agriculteurs_surface) * dt
INIT Surface_agriculteurs = m2_par_agriculteur*Agriculteurs
INFLOWS:
Entrée_agriculteurs_surface = Surface_agriculteurs*Taux_de_c_agriculteurs
OUTFLOWS:
Sortie_agriculteurs_surface = Surface_agriculteurs*Taux_de_dc_agriculteurs
Surface_pop_active(t) = Surface_pop_active(t - dt) + (Entrée__pop_active__surface -
Sortie_pop_active_surface) * dt
INIT Surface_pop_active = m2_par_pop_active*Population_active
INFLOWS:
Entrée__pop_active__surface = Surface_pop_active*Taux_de_c_pop_active
OUTFLOWS:
Sortie_pop_active_surface = Surface_pop_active*Taux_de_dc_pop_active
Surface_travailleurs(t) = Surface_travailleurs(t - dt) + (Entrée_travailleurs_surface - Sortie_travailleurs_surface)
* dt
INIT Surface_travailleurs = m2_par_travailleur*Travailleurs
INFLOWS:
Entrée_travailleurs_surface = Surface_travailleurs*Taux_de_c_travailleurs
OUTFLOWS:
Sortie_travailleurs_surface = Surface_travailleurs*Taux_de_dc_travailleurs
Travailleurs(t) = Travailleurs(t - dt) + (Entrée_travailleurs - Sortie__travailleurs) * dt
INIT Travailleurs = Travaileurs_initial
INFLOWS:
Entrée_travailleurs = Travailleurs*Taux_de_c_travailleurs
OUTFLOWS:
Sortie__travailleurs =
Travailleurs*(Taux_de_dc_travailleurs+Taux_de_dc_eau+Taux_de_dc_suface+Densité_maximale)
Agriculteurs_initial = 14
Attraction_travailleurs = IF(Taux_d'emplois)>Seuil_at THEN Taux_apa ELSE 0
Attraction_agriculteurs = IF(Taux_d'espaces_minéralisés)<Seuil_enmin THEN Taux_enmin ELSE 0
Attraction_pop_active = IF (Taux_d'emplois)>Seuil_at THEN Taux_apa ELSE 0
Consommation_totale_suface = Surface_agriculteurs+Surface_pop_active+Surface_travailleurs
Consommation_totale_eau = (Eau_agriculteurs+Eau_pop_active+Eau_travailleurs)
Densité_maximale = IF (Nombre_de_personnes_dans_la_ville_par_année)>20000 THEN 0 ELSE 0
Efficacité_de_gestion = (8000000*0)/100

```

```

Insatisfaction_espaces_verts = IF(Taux_d'espace_verts)<Seuil_efav THEN Taux_efav ELSE 0
Limite_eau = 8000000+Efficacité_de_gestion
Limite_surface = 3000000*Nombre_d'étages
m2_par_agriculteur = 18200
m2_par_pop_active = 30
m2_par_travailleur = 30
m3_par_agriculteur = 6148.80
m3_par_pop_active = 78.11
m3_par_travailleur = 2572
Nombre_d'étages = 1
Nombre_de_personnes_dans_la_ville_par_année = Population_active+Travailleurs+Agriculteurs
Pas_d'importation = IF (Agriculteurs)<(Population_active/7.142857142857143) THEN 0 ELSE 0
Pop_active_initial = 100
Répulsion_pop_active = IF(Taux_de_chômage)>Seuil_rt THEN Taux_rpa ELSE 0
Répulsion_agriculteurs = IF(Taux_d'espaces_minéralisés)>Seuil_rp THEN Taux_rp ELSE 0
Répulsion_travailleurs = IF(Taux_de_chômage)>Seuil_rt THEN Taux_rpa ELSE 0
Satisfaction_espaces_verts = IF(Taux_d'espace_verts)>Seuil_ev THEN Taux_ev ELSE 0
Seuil_at = 87
Seuil_edf = 55
Seuil_ef = 55
Seuil_efav = 6.54
Seuil_enmin = 50
Seuil_ev = 6.54
Seuil_rp = 50
Seuil_rt = 13
Taux_apa = 0.005
Taux_c_initial_agriculteurs = 0.04
Taux_c_initial_pop_active = 0.04
Taux_c_initial_tavailleurs = 0.03
Taux_d'emplois = IF((Travailleurs)/Population_active)*100<0 THEN 0 ELSE
((Travailleurs)/Population_active)*100
Taux_d'espaces_minéralisés = ((Travailleurs)/(Agriculteurs+Population_active+Travailleurs))*100
Taux_d'espace_verts = ((Agriculteurs)/(Agriculteurs+Population_active+Travailleurs))*100
Taux_d'exploitation = ((Population_active+Agriculteurs)*100)/(Population_active+Agriculteurs+Travailleurs)
Taux_d'exploitation_favorable = IF(Taux_d'exploitation)<Seuil_ef THEN Taux_ef ELSE 0
Taux_d'exploitation_défavorable = IF(Taux_d'exploitation)>Seuil_edf THEN Taux_edf ELSE 0
Taux_dc = 0.08
Taux_dc_initial_agriculteurs = 0.04
Taux_dc_initial_pop_active = 0.04
Taux_dc_initial_travailleurs = 0.03
Taux_de_chômage = IF(((Population_active-Travailleurs)/Population_active)*100)<0 THEN 0 ELSE
(((Population_active-Travailleurs)/Population_active)*100)
Taux_de_c_agriculteurs = (Taux_c_initial_agriculteurs+Attraction__agriculteurs)*(Population_active/100)
Taux_de_c_pop_active =
((Attraction_pop_active+Satisfaction_espaces_verts+Taux_c_initial_pop_active)*(Travailleurs/100))
Taux_de_c_travailleurs =
(Attraction_travailleurs+Taux_c_initial_tavailleurs+Taux_d'exploitation_favorable)*(Agriculteurs/14)
Taux_de_dc_agriculteurs = (Taux_dc_initial_agriculteurs+Répulsion_agriculteurs)*(Travailleurs/100)
Taux_de_dc_eau = IF(Consommation_totale_eau)>Limite_eau THEN Taux_dc ELSE 0
Taux_de_dc_pop_active =
(Insatisfaction_espaces_verts+Répulsion_pop_active+Taux_dc_initial_pop_active+Pas_d'importation)*(Agricu
lteurs/14)
Taux_de_dc_suface = IF(Consommation_totale_suface)>Limite_surface THEN Taux_dc ELSE 0

```

```
Taux_de_dc_travailleurs =  
(Répulsion__travailleurs+Taux_d'exploitation_défavorable+Taux_dc_initial_travailleurs)*(Population_active/1  
00)  
Taux_edf = 0.005  
Taux_ef = 0.005  
Taux_efav = 0.005  
Taux_enmin = 0.005  
Taux_ev = 0.005  
Taux_rp = 0.005  
Taux_rpa = 0.005  
Travailleurs_initial = 100
```

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADR, CITEC, ITINERA. 2005. « Schéma directeur de l'Ouest-lausannois : Chantier 3 : Route de Cossonay RC 251 /concept général et stratégie de requalification ». En ligne. 1 p. <<http://www.ouest-lausannois.ch/modules/3S-RC251/Documents/Documents%20definitifs/Annexe-potentiels.pdf>>. Consulté le 15 juillet 2013.
- ADEME. 2013. « Stratégie urbanisme-Période 2012-2015 : Orientations stratégiques de l'ADEME ». In *Le site de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie*. En ligne. 24 p. <<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=88957&p1=30&ref=12441>>. Consulté le 2 novembre 2013.
- AFP. 2013. « Faillite de Détroit : l'occasion de "remettre la ville sur les rails" ». In *Le site de MSN Actualités*. En ligne <<http://actualites.ca.msn.com/international/faillite-de-detroit-loccasion-de-remettre-la-ville-sur-les-rails>>. Consulté le 3 mars 2014.
- Caisse nationale des Allocations familiales. Date inconnue. « Pour quels types de logement puis-je bénéficier d'une aide au logement? ». In *Le site de la Caisse nationale des Allocations familiales*. <<http://www.caf.fr/aides-et-services/s-informer-sur-les-aides/logement-et-cadre-de-vie/les-aides-au-logement/pour-quels-types-de-logement-puis-je-beneficier-d-une-aide-au-logement>>. Consulté le 3 mars 2014.
- Ascher, François. 2010. Les nouveaux principes de l'urbanisme suivi de Lexique de la ville plurielle. Coll. « L'Aube proche essai ». France : Éditions de l'Aube. 275 p.
- Astrade, Laurent. 1998. « La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux ». *Annales de Géographie*, vol. 107, n° 604, p. 590-609.
- Brander, Jame, A. et M. Scott Taylor. 1998. « The Simple Economics of Easter Island : Ricardo-Malthus Model of Renewable Resource Use ». *The American Economic Review*, vol. 88, n° 1, p. 119-138.
- Brochet, Béatrice, Yves Bonard, Jean-Philippe Dind, Sandra Guinand et Marianne Thomann. 2007. « Continuité-discontinuité de l'urbain et des réponses urbanistiques : réflexion sur le champ émergent de l'urbanisme durable ». In *La ville et l'urbain : des savoirs émergents*, sous la dir. de Da Cunha, Antonio et Laurent Matthey, p. 187-206. France : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Buda, Rodolphe. 1992. « Dynamique urbaine et développement économique local : une revue de la littérature ». En ligne. 19 p. <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/3774/1/MPRA_paper_3774.pdf>. Consulté le 2 novembre 2013.

- Bureau de normalisation du Québec. 2013. « Lutte aux îlots de chaleur urbains - Aménagement des aires de stationnement : Guide à l'intention des concepteurs ». Première édition. BNQ 3019-190/2013. Québec : Bureau de normalisation du Québec, 104 p.
- Canada. Environnement Canada. 2010. « L'eau et le changement climatique ». In *Le site d'Environnement Canada*. En ligne. <<http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=3E75BC40-1>>. Consulté le 3 mars 2014.
- Canada. Industrie Canada. 2011. « Statistiques relatives à l'industrie canadienne (SIC) : Définition : Fabrication - (SCIAN 31-33). In *Le site d'Industrie Canada*. En ligne. <<https://www.ic.gc.ca/app/scr/sbms/sbb/cis/definition.html?code=31-33&lang=fra>>. Consulté le 15 juillet 2013.
- Canada. Environnement Canada. 2012. « Saint-Laurent (fleuve) à LaSalle (02OA016) : Débit moyen en 2012 (m³/s) ». In *Le site d'Environnement Canada*. En ligne. <<http://www.wsc.ec.gc.ca/applications/H2O/report-fra.cfm?station=02OA016&report=daily&year=2012>>. Consulté le 15 juillet 2013.
- Canada. Ressources naturelles Canada. 2004. « Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne ». En ligne. 219 p. <http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/perspective/pdf/report_f.pdf>. Consulté le 15 décembre 2013.
- Canada. Statistique Canada. 2005. « Caractéristiques de l'utilisation de l'eau dans les industries au Canada, selon le paramètre d'utilisation de l'eau, 2005 ». In *Le site de Statistique Canada*. En ligne. <<http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2010000/t234-fra.htm>>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Canada. Service Canada. 2012. « Perspectives sectorielles 2012-2014 : Montréal ». En ligne. 36 p. <http://www.servicecanada.gc.ca/fra/qc/perspectives_sectorielles/ps_Montreal.pdf>. Consulté le 15 décembre 2013.
- Canada. Statistique Canada. 2012. « Profil du recensement : Murdochville, Québec (Code 2403025) ». In *Le site de Statistique Canada*. En ligne. <<http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/prof/details/page.cfm?Lang=F&Geo1=CSD&Code1=2403025&Geo2=CD&Code2=2403&Data=Count&SearchText=2403025&SearchType=Begins&SearchPR=01&B1=All&Custom=&TABID=1>>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Canada. Statistique Canada. 2013. « Section 2 : L'offre d'eau au Canada - réserves et débits ». In *Le site de Statistique Canada*. En ligne. <<http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2010000/part-partie2-fra.htm>>. Consulté le 3 mars 2014.

- Carrot City. 2014. « Lufa Farms / Fermes Lufa ». In *Le site de Carrot City*. En ligne. <http://www.ryerson.ca/carrotcity/board_pages/rooftops/lufa_farms.html>. Consulté le 1^{er} mars 2014.
- CBC News. 2014. « Parking lot greenhouse goes bankrupt in Vancouver ». En ligne. <<http://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/parking-lot-greenhouse-goes-bankrupt-in-vancouver-1.2510245>>. Consulté le 3 mars 2014.
- Champagne, Stéphane. 2013. « Les Fermes Lufa : de nouvelles serres sur les toits ». In *La Presse affaires*. En ligne. <<http://affaires.lapresse.ca/pme/201305/21/01-4652643-les-fermes-lufa-de-nouvelles-serres-sur-les-toits.php>>. Consulté le 1^{er} mars 2014.
- Clément Nolette, Martial Fauteux, Denis Morin et Marc Miller. 1979. *La croissance démographique dans les zones urbaines : tendances passées et perspectives*. Québec : Office de planification et de développement du Québec, 257 p.
- Comité des Nations Unies sur les ressources en eau (CNURE). 2005. « L'eau, source de vie : 2005–2015 ». En ligne. 34 p. <<http://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/waterforlifebklt-f.pdf>>. Consulté le 30 octobre 2012.
- Conchita M. G. Kêdowidé, Michel P. Sedogo et Guéladio Cissé. 2009. « Dynamique spatio temporelle de l'agriculture urbaine à Ouagadougou : Cas du Maraîchage comme une activité montant de stratégie de survie ». *VertigO- la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 10, n° 2, 21 p.
- Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement. Date inconnue. « Emprise au sol des constructions ». In *Le site du C.A.U.E.* En ligne. <http://www.caue76.org/SRU_UH/PLU/articles/articles_9.htm>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques OURANOS. 2010. « Savoir s'adapter au changement climatique ». En ligne. 138 p. <http://www.ouranos.ca/fr/pdf/53_ssc_21_06_lr.pdf>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Coste, Philippe. 2010. « Comment Detroit se tourne vers l'agriculture ». In *Le site de L'Express*. En ligne. <http://www.lexpress.fr/actualite/monde/amerique/comment-detroit-se-tourne-vers-l-agriculture_913276.html#TXQR9im8EDev3RDJ.99>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Dantas, Monique, et Patrick Point. 2009. « La dynamique des systèmes comme outil d'aide à la gestion du sol urbain ». En ligne. 6 p. <<http://hal.inria.fr/docs/00/38/67/49/PDF/p179.pdf>>. Consulté le 2 novembre 2013.

- Degraeve, Jean-Michel. 2011. « Habiter en quartier durable : Pratiques et stratégies d'actions pour un nouvel ancrage local du logement ». En ligne. 208 p. <<http://www.maisondelurbanite.org/sites/default/files/publications/2011/habiter-en-quartier-durable/fichiers/habiter-en-quartier-durable.pdf>>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Descôteaux, Bernard. 2008. « Une ressource épuisable ». In *Le Devoir*. En ligne. <<http://www.ledevoir.com/politique/canada/193199/une-ressource-epuisable>>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Despommier, Dickson. 2010. *The Vertical Farm : Feeding the world in the 21st century*. New York: St Martin's Press. 292 p.
- Donnadieu, Gérard, Daniel Durand, Danièle Neel, Emmanuel Nunez et Lionel Saint-Paul. 2003. « L'Approche systémique : de quoi s'agit-il? ». En ligne. 11 p. <<http://www.afscet.asso.fr/SystemicApproach.pdf>>. Consulté le 2 mars 2014.
- Dubiela, Valter Tadeu. 2011. « Indicateurs de durabilité urbaine selon une approche épidémiologique : la ville de Maringá, au Brésil ». Thèse de doctorat en aménagement, Montréal, Université de Montréal, 467 p.
- Etchelecou, André. 1992. « Espace, développement, régulation démographique : du local au planétaire ». En ligne. p 133-147. <<http://www.erudit.org/livre/aidelf/1992/000965co.pdf>>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Étienne, Jean. 2007. « Mer d'Aral : comment inverser une catastrophe écologique ». En ligne. 3 p. <<http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/actu/d/oceanographie-mer-aral-inverser-catastrophe-ecologique-12400/>>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Filipe, Carlos. 2011. « Quand le paysan n'aura plus les pieds sur terre ». In *Courrier International*. En ligne. <<http://www.courrierinternational.com/article/2011/03/22/quand-le-paysan-n-aura-plus-les-pieds-sur-terre>>. Consulté le 16 juillet 2013.
- France. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche de France et Agro ParisTech. 2009. « La filière agricole au cœur des villes en 2030 ». En ligne. 60 p. <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/agriculture_en_ville_2030_SSP_2009.pdf>. Consulter le 13 octobre 2013.
- Gaudreault, Virginie. 2011. « Analyse de l'agriculture urbaine dans les grands centres urbains en Amérique du Nord ». Mémoire de maîtrise en environnement, Montréal, Université de Sherbrooke, 126 p.
- Gehl, Jan. 2012. *Pour des villes à échelle humaine*. Québec (Montréal) : Éditions Écosociété, 212 p.

- Gill, Daniel. 2012. « Au-delà des mesures de densité : Reconnaître le mode d'habiter ». *Urbanité*, Hiver 2012, p.11-12.
- Ginoux, Jean-Marc. 2006. « Le paradoxe du modèle prédateur-proie de Vito Volterra ». En ligne. 13 p. <<http://ginoux.univ-tln.fr/HDS/Le%20paradoxe%20du%20mod%20le%20pr%20dateur-proie%20de%20Vito%20Volterra.pdf>>. Consulté le 13 octobre 2013.
- Goulet, François. 2012. « L'art de densifier ». *Urbanité*, Hiver 2012, p.10.
- Institut Nationale de Santé et de Sécurité. 2013. « Fiche pratique de sécurité ED 23 ». En ligne. 4 p. <[file:///C:/Users/Andre%203/Downloads/ed23%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Andre%203/Downloads/ed23%20(1).pdf)>. Consulté le 3 mars 2014.
- Isee Systems. 1985. STELLA, version 9.1. Logiciel. États-Unis : isee systems.
- Khatab Ndiaye et Omar Ben. 2010. « Technologies de décontamination de sols contaminés par des pesticides au Mali ». En ligne. 104 p. <http://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2010/NDiaye_Omar_Ben__23-06-2010_.pdf>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Lasserre, Frédéric et Luc Descroix. 2002. *Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitique de l'eau*. Coll. « Géographie Contemporaine », Québec : Presses de l'Université du Québec, 478 p.
- Léger, Jean-Michel. 1990. *Derniers domiciles connus : Enquête sur les nouveaux logements, 1970-1990*. France : Éditions Créaphis, 170 p.
- Mancébo, François. 2011. « La ville durable est-elle soluble dans le changement climatique? ». *Environnement Urbain*, vol. 5, p. 1-9.
- 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 ». En ligne. 282 p. <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/etudes_donnees_statistiques/ville_de_demain.pdf>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Margat, Jean. 2008. « Exploitation et utilisation des eaux souterraines dans le monde ». En ligne. 52 p. <http://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SOG_1598_70A.pdf>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Martin, Valérie. 2012. « Cultiver la ville : L'agriculture urbaine est de plus en plus populaire. Et Montréal n'échappe pas au phénomène ». Magazine de l'Université du Québec à Montréal, vol. 10, n° 01, p. 8-11.

- Meadows, Dennis, Donella Meadows et Jorgen Randers. 2013. *Les limites à la croissance*. Canada : Éditions Écosociété, 426 p.
- Meadows, Dennis, Donella Meadows, Jorgen Randers et William W. Behrens III. 1972. *The Limits to Growth*. États-Unis : Éditions Universe Books, 205 p.
- Montiminy, Dominique. 2010. « La protection du territoire agricole de la région métropolitaine de recensement (RMR) de Montréal dans un contexte d'étalement urbain ». Mémoire de maîtrise en géographie, Montréal, Université de Montréal, 161p.
- Oberkampff, Eric. 1980. « Forrester (J. W.) : Dynamique urbaine ». *Revue économique*, vol. 31, n° 5, p. 1001-1004.
- Organisation de Coopération et de Développement économique (OCDE). 2012. « Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction (Chapitre 5 : Eau) ». En ligne. 79 p. <<http://www.oecd.org/fr/env/indicateurs-modelisation-perspectives/49848948.pdf>>. Consulté le 15 juillet 2013.
- Organisation de Coopération et de Développement économique (OCDE). 2013. « Better life index 2013 : Definitions and metadata ». En ligne. 8 p. <<http://www.oecd.org/statistics/OECD-Better-Life-Index-2013-definitions.pdf>>. Consulté le 3 mars 2014.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). 2011. « Produire plus avec moins : Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne ». En ligne. 116 p. <<http://www.fao.org/docrep/014/i2215f/i2215f.pdf>>. Consulté le 3 mars 2014.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). 2013. « Faire face à la pénurie d'eau : Un cadre d'action pour l'agriculture et la sécurité alimentaire ». En ligne. 97 p. <<http://www.fao.org/docrep/017/i3015f/i3015f.pdf>>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). 2014. « La santé des sols ». En ligne. <<http://www.fao.org/ag/save-and-grow/fr/3/index.html>>. Consulté le 2 mars 2014.
- Organisation mondiale de la Santé. 2003. *Régime alimentaire, nutrition et prévention des maladies chroniques*. Coll. « Rapport d'une Consultation OMS/FAO d'experts 28 janvier - 1er février 2002, Genève, Suisse (Rapport technique de l'OMS 916) ». Genève (Suisse) : Organisation mondiale de la Santé. 144 p.

- Pélegrin-Genel, Elisabeth. 2014. « Plantation sur les toits, futur de l'agriculture et de l'urbanisme? » In *Huffington Post*. En ligne. <http://www.huffingtonpost.fr/elisabeth-pelegringenel/plantation-toits-agriculture-urbaine_b_4744944.html>. Consulté le 1er mars 2014.
- Purseigle, François. 2012. La ferme verticale : image paroxystique de mondes agricoles en mutation. In *Agrobiosciences*. En ligne. <http://www.agrobiosciences.org/article.php3?id_article=3335>. Consulté le 1er mars 2014.
- Québec. Institut de la statistique du Québec. 2009. « Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2006-2056 ». En ligne. 133 p. <<http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/perspectives/perspectives-2006-2056.pdf>>. Consulté le 18 juillet 2013.
- Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 2007. « Répartition de la main-d'œuvre pour l'ensemble des secteurs et des régions, 2007 ». En ligne. 1 p. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Maindoeuvre/Profil_main_d_oeuvre_2007_Tableau11.pdf>. Consulté le 15 décembre 2013.
- Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 2007. « Répartition de la main-d'œuvre par catégorie et par statut d'emploi pour l'ensemble de l'horticulture, 2007 ». En ligne. 1 p. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Maindoeuvre/Profil_main_d_oeuvre_2007_tableau27.pdf>. Consulté le 15 décembre 2013.
- Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 2009. « Profil de la main-d'oeuvre agricole au Québec, 2007 ». En ligne. 178 p. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Profil_main_d_oeuvre_2007.pdf>. Consulté le 15 décembre 2013.
- Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Communauté métropolitaine de Montréal. 2013. « Portrait statistique agricole du Grand Montréal ». En ligne. 15 p. <http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/periodique/PortraitStatAgricole_Montreal.pdf>. Consulté le 13 octobre 2013.
- Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 2014. « Cultivez sur votre balcon, sur les toits et dans les jardins communautaires! ». In Le site du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. En ligne. <<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Agricultureurbaine/Pages/Agricultureurbaine.aspx>>. Consulté le 6 mars 2014.

- Québec. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire. 2011. « Stratégie québécoise d'économie d'eau potable ». En ligne. 38 p. <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/strategie_eau/strategie_eau_potable.pdf>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Québec. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire. 2014. « Densité d'occupation du sol ». In *Le site du Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire*. En ligne. <<http://www.mamrot.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/guide-la-prise-de-decision-en-urbanisme/planification/densite-doccupation-du-sol/>>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). 2002. « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés ». In *Le site du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs*. En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/index.htm>>. Consulté le 15 décembre 2013.
- Rallu, Jean-Louis. 1990. « Les interactions entre la croissance démographique et urbanisation : Les exemples du Pacifique et du Sud marocain ». En ligne. 11 p. <<http://www.erudit.org/livre/aidelf/1990/000909co.pdf>>. Consulté le 8 décembre 2013.
- Rémy, Jean et Liliane Voye. 1992. *La ville : vers une nouvelle définition ?*. Paris : Éditions L'Harmattan. 176 p.
- Romero-Lopez, Rabindranarth, A. Olaiz 2008. « Hydro-environmental problems of Chapala Lake and Contingent Valuation Method for its recovery ». In *1st IWA Mexico National Young Water Professionals Conference* (Mexico, 9-11 avril 2008). p. 347-352.
- Salomon Cavin, Joëlle. 2012. « Entre ville stérile et ville fertile, l'émergence de l'agriculture urbaine en Suisse ». *Environnement urbain*, vol. 6, p. 17-31.
- Sénécal, Gilles, Pierre J. Hamel et Natalie Vachon. 2005. « Forme urbaine, qualité de vie, environnements naturels et construits : Éléments de réflexion et test de mesure pour la région métropolitaine de Montréal ». *Cahier de géographie du Québec*, vol. 49, n° 16, p.19-43.
- Sky Greens. 2011. « Vertical Farming ». In *Le site de Sky Greens*. En ligne. <<http://www.skygreens.appsfly.com/>>. Consulté le 13 octobre 2013.
- Staszak, Jean-François. 1999. « Détruire Détroit : La crise humaine comme produit culturel ». *Annales de Géographie*, t. 108, n° 607, p. 277-299.

- Transition Verte. 2013. « Singapour : Une Windowfarm géante! ». In *Le site de Transition Verte*. En ligne. <<http://www.transition-verte.com/singapour-une-windowfarm-geante/>>. Consulté le 2 mars 2014.
- Union des municipalités du Québec (UMQ). 2012. « Eau : Les municipalités prêtes à faire leur part ». *Urba*, vol. 33, n° 4, p.26.
- Valiron, François. 1984. « Gestion des eaux – Tome 1 : Principes, Moyens, Structures ». Paris : Presses des ponts. 506 p.
- Vergriete, Yann et Michel Labrecque. 2007. « Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais ». En ligne. 36 p. <<http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-pepinier/documents/pdf891.pdf>>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Vidal, Roland et André Fleury. 2010. « L'autosuffisance agricole des villes, une vaine utopie? ». En ligne. 7 p. <http://www.laviedesidees.fr/IMG/pdf/20100604_villesdurables_vidal_fleury.pdf>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Ville de Montréal. 2005. « Plan d'urbanisme de Montréal : 2.1 Des milieux de vie de qualité, diversifiés et complets ». En ligne. 21 p. <http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/plan_urbanisme_fr/media/documents/061030_2_1.pdf>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Ville de Montréal. 2010. « Plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010-2015 ». En ligne. 117 p. <http://servicesenligne.ville.montreal.qc.ca/sel/publications/PorteAccesTelechargement?lng=Fr&systemName=72135795&client=Serv_corp>. Consulté le 16 juillet 2013.
- Ville de Montréal. Direction du développement économique et urbain. 2010. « Les parcs industriels municipaux : constats et pistes d'intervention ». En ligne. 118 pages. <http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/COMMISSIONS_PERM_V2_FR/MEDIA/DOCUMENTS/DOCCONSULT_SYNTHC8SE_V2_201010.PDF>. Consulté le 8 septembre 2013.
- Ville de Montréal. 2013. « Profil économique : Agglomération de Montréal ». En ligne. 29 p. <http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL_STATS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PE_VILLE_MONTRC9AL_2012.PDF>. Consulté le 13 octobre 2013.
- Ville de Montréal. Service de l'eau. 2013. « Bilan de l'usage de l'eau potable 2012 ». En ligne. 17p. <http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/eau_fr/media/documents/bilan_usage_eau_potable%20_2012.pdf>. Consulté le 8 septembre 2013.

- Ville de Montréal. Direction de l'urbanisme et du développement économique. 2014. Profil sociodémographique : Arrondissement Le Plateau Mont-Royal. En ligne. 28 p. <http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL_STATS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PROFIL_SOCIOD%C9MO_PLATEAU.PDF>. Consulté le 7 mars 2014.
- Voiron-Canicio, Christine. 2005. « Pour une approche systémique du développement durable ». *Développement durable et territoires*, Dossier 4, 8 p.
- Water Footprint. 2013. « Product Water Footprint ». In *Le site Water Footprint Network*. En ligne. <<http://www.waterfootprint.org/?page=files/Animal-products>>. Consulté le 15 juillet 2013.
- Williams, Katie. 2009. « Space per person in the UK: A review of densities, trends, experiences and optimum levels ». *Land Use Policy*, vol. 26 S, p. 83–92.
- Willuweit Lars et John J. O'Sullivan. 2013. « A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the Dynamic Urban Water Simulation Model ». *Water Research*, vol. 47, p. 7206–7220.
- WWF Canada. 2009. « Péril dans les eaux canadiennes : Les flux environnementaux et l'avenir des ressources d'eau douce au Canada ». En ligne. 16 p. <http://awsassets.wwf.ca/downloads/wwf_canadas_riversatrisk_report_fr.pdf>. Consulté le 9 janvier 2013.
- WWF Canada. 2012. « Rapport Planète Vivante 2012 : Notre mieux-être et notre prospérité dépendent de la nature ». In *Le site de la WWF*. En ligne. <http://awsassets.wwf.ca/downloads/rapport_planete_vivante_2012__bref.pdf>. Consulté le 13 octobre 2013.
- Zheng, Helen Wei, Geoffrey Qiping Shen et Hao Wang. 2014. « A review of recent studies on sustainable urban renewal ». *Habitat International*, vol. 41, p. 272-279.

