



AU/Lab

CONCEPTION ET ANALYSE D'UN SYSTEME HYDROPONIQUE DE MURS COMESTIBLES

Le projet VERTIcal Montréal, Canada

Victor BRASILÈS

Résumé

L'agriculture urbaine est un concept qui s'est ancré dans le mode de vie et le développement des villes du XXI^{ème} siècle. Ce mode de culture est aujourd'hui un des outils pour répondre au défi de l'augmentation démographique auquel la société doit faire face.

VERTIcal, projet novateur en Amérique du Nord, fait appel à une nouvelle technologie dite « murs comestibles ». La production sur 500 m² de cultures légumières et fruitières en vertical sur le toit du Palais des Congrès de Montréal et ultérieurement en serre constitue le thème du mémoire. Les objectifs fixés par le Laboratoire d'Agriculture Urbaine de Montréal en fonction des contraintes du milieu ont nécessité des séries de tests pour la conception et la mise en activité du système.

Pour la conduite du projet les recherches effectuées a permis de définir les paramètres tels que les besoins en eau des plantes, l'irrigation et la fertilisation. De même, les plantes et les matériaux présentant les résultats les plus concluants ont été sélectionnés pour optimiser les rendements.

De nouvelles phases de tests devront être réalisées dans les années à venir pour améliorer le projet VERTIcal et le rendre autonome.

Mots-clés : Agriculture urbaine, murs comestibles, hydroponie, substrats, fertilisation, rétention en eau, croissance des plantes

Abstract

Urban agriculture is a concept anchored in the way of life and the development of cities in the 21st century. This activity is one of the tools to answer of the actual challenge of the demographic increase that society is facing.

VERTIcal, innovative project in North America, involves the use of a new technology called "edible walls". The production on 500 m² of vegetables and fruits in vertical on the roof of the Montreal convention centre and in greenhouse subsequently constitute the theme of my report. The objectives fixed by the Laboratory of Urban Agriculture of Montreal and the environmental constraints within which required several tests for the conception before the VERTIcal system is launched.

The parameters such as the water requirements of plants, the irrigation and the fertilization were defined thanks to results of research conducted.

Also, plants and materials presenting interesting results were identified to optimize the yields.

New experiments will have to be realized in the coming years to improve the VERTICAL project and make it autonomous.

Keywords: Urban agriculture, vertical soilless culture, hydroponic, substrate, plants, fertilization, water retention, fertilization, irrigation, plant growth

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont accompagné durant ce stage.

Mon maître de stage, Eric Duchemin, qui a su me guider et me passionner tout au long de ces six mois. Il a su me faire découvrir une autre facette de l'agriculture urbaine et de ses composantes toujours avec bonne humeur et envie. Je le remercie de sa patience et de son implication.

Je tiens aussi à remercier Antoine Trottier, co-président de l'entreprise montréalaise La Ligne Verte, pour son implication, ses recommandations fortes d'expériences ainsi que son accueil.

Je souhaite aussi remercier toute l'équipe de La ligne Verte, pour l'aide qu'ils m'ont apportée pour la conception du prototype VERTIcal : Maxime St-Laurent, Maxime Dufresnes, Marianne Beauger, Valentin Sauvadet, Anthime Bion ainsi que les stagiaires Arno Faivre et Mathilde Eck de la faculté Gembloux AgroBioTech qui m'ont assisté quotidiennement durant une partie de mon stage, apportant leurs connaissances en la matière pour faire avancer le projet.

Merci Marie-Line Gagné, Sylvain Dallaire et l'équipe de l'entreprise d'Hydroculture Guy Dionne pour ces moments d'échange, de partage et de convivialité partagés.

Je tiens également à remercier Javier Scheiner pour son encadrement tout au long de cette année, pour ses conseils et sa disponibilité. Merci de m'avoir orienté, rassuré et motivé pendant l'écriture de ce mémoire.

J'adresse également un grand merci à Marion Sarlé de la ferme hydroponique Les Sourciers ainsi qu'au professeur Georges BERTONI pour m'avoir apporté l'aide pour la compréhension et l'analyse de circuits hydroponiques nécessaire pour la construction de ce mémoire.

Enfin, une pensée toute particulière pour mes parents et ma sœur pour leur soutien tout au long de ma formation à Purpan ainsi que durant ces derniers mois lors de la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE	
1. L'évolution de l'agriculture et sa gestion des ressources hydriques	5
2. Qu'est-ce que l'agriculture urbaine ?	7
3. L'agriculture urbaine verticale	16
4. Présentation du projet VERTIcal	18
PARTIE 2 ; MATERIEL ET METHODOLOGIE	
1 Matériel et méthodes	28
2 Dispositif expérimental du toit du Palais des Congrès	29
3 Le projet VERTIcal en serre	39
4 Mesures	42
5 Traitement statistique	45
PARTIE 3 : RESULTATS, DISCUSSION ET PROPOSITIONS	
1 Caractéristiques techniques du projet VERTIcal	50
2 Analyse du développement végétal sur le système VERTIcal	69
3 Le prototype vertical en serre	79
4 Conclusion préliminaire	82
CONCLUSION GÉNÉRALE	84

Sigles et abréviations

°C : Degrés Celsius

\$: Dollar

g/L : Gramme par litre

kg/m² : Kilos par mètre carré

m² : Mètre carré

% : Pourcentage

Iga : Radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère

H₂PO₄⁻ : Acide phosphorique

N : Azote

B : Bore

Ca : Calcium

CRAAQ : Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

DAES : Département des affaires économiques et sociales

CAD : Dollar canadien

ENSAT : École Nationale Supérieure d'Agriculture de Toulouse

ETM : Évapotranspiration maximale

ETP : Évapotranspiration potentielle

Fe : Fer

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

ITA : Institut de Technologie Agroalimentaire

NO₃⁻ : Ion nitrate

Mg : Magnesium

Mn : Manganèse

mm : millimètre

NFT : Nutrient Film Technique

ONU: Organisation des Nations Unis

CaO : Oxyde de Calcium

MgO : Oxyde de magnésium

K₂O : Oxyde de potassium

ppm : Partie par million

P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore

P : Phosphore

PSII : Photosystème II

K : Potassium

pH : Potentiel hydrogène

S: Soufre

UV : Ultra-Violet

Zn : Zinc

Introduction générale

L'évolution des techniques agricoles a permis de satisfaire les besoins croissants de la société en lui permettant de soutenir une population urbaine de plus en plus importante.

Cependant, en ce début de XXI^{ème} siècle, l'humanité fait face à un défi démographique. Effectivement, d'ici 2050 la population mondiale devrait doubler et environ 70 à 80% des habitants vivront dans des centres urbains. (FAO, 2012).

De plus, les procédés de production agricole sont de plus en plus néfastes pour la biodiversité, les écosystèmes et la qualité des sols.

Cette évolution pose de toute évidence des questions de ressources, d'accès à la nourriture et à l'eau tout en minimisant l'empreinte écologique sur l'environnement. (DANIEL, 2013)

Dans ce contexte, l'agriculture urbaine a émergé avec de nouveaux concepts, des initiatives novatrices ainsi qu'un nouveau mode de consommation reflétant une volonté de changement de la part de la société. (AUBRY *et al.*, 2013)

Cela s'est accéléré en Amérique du Nord depuis les vingt dernières années, dès lors que les espaces urbains ont commencé à se développer sur les surfaces agricoles à proximité. En effet, ce type de culture fait face à de nombreuses contraintes telles que la pression foncière et la gestion des pollutions (sol, air, eau) qui imposent une adaptation des acteurs pour la pratique de cette activité.

L'agriculture urbaine se présente sous deux formes principalement. Elle peut provenir des citoyens avec le lancement de jardins partagés pour la production maraîchère. Sinon elle peut venir de la sphère politique et planificatrice qui développe des projets de plus grande envergure tel que celui de la ferme verticale du laboratoire d'agriculture urbaine de Montréal au Canada.

Le but du stage réalisé durant l'été 2016 a été de déterminer les paramètres techniques pour la conception et la gestion d'un système hydroponique vertical de « murs comestibles » selon les différents travaux menés dans le domaine pour la réalisation de tels projets. Cependant, cette démarche étant une nouvelle technique de production développée depuis peu, au stade des prémices, elle reste à être étudiée en profondeur et sur le long terme. Ce mémoire est donc l'amorce du projet global qu'est « le projet VERTICAL ».

Afin de répondre aux objectifs, une première partie situant le contexte de la place de l'agriculture urbaine dans le monde et plus particulièrement dans la métropole québécoise permettra de comprendre l'importance et les enjeux de la problématique. Une deuxième partie détaillera la méthodologie employée afin de concevoir le projet, mais aussi, les outils utilisés. La troisième partie s'attachera à donner les résultats de cette étude et les propositions d'amélioration du système pour l'optimiser et si possible le rendre plus performant.

PARTIE 1 : Contexte

1. L'évolution de l'agriculture et sa gestion des ressources hydriques

L'intensification de l'agriculture, fortement alimentée par les innovations scientifiques et le contexte économique-social, a marqué la fin des années cinquante. Cela a engendré des problèmes écologiques aux conséquences non négligeables et a impacté la production mondiale agricole qui commence à baisser à l'opposé de la demande de plus en plus importante. (TABARLY, 2011)

Elle est aussi la source primaire de pollution avec 15% des émissions de gaz à effet de serre et contribue directement à la détérioration de la biodiversité et de son environnement. Effectivement, la FAO (2016) a dénombré la disparition de 75% de la biodiversité des plantes cultivables dans le monde.

Le secteur de l'agriculture moderne est le plus grand consommateur d'eau. Elle absorbe plus de 70 % de l'eau consommée. (MULLER, 2015)

Cette consommation peut s'expliquer par différentes raisons :

- La demande grandissante en produits agricoles suite à l'accroissement de la population
- L'amélioration constante du niveau de vie
- L'élevage dont le régime alimentaire implique la mobilisation de grandes quantités d'eau.
- L'irrigation massive des terres agricoles (ASPE, 2012)

Cependant, l'accès à l'eau potable n'est pas une réalité quotidienne pour des milliards d'êtres humains. Du fait de pressions croissantes sur les ressources hydriques, l'agriculture se trouve contrainte à produire plus mais avec moins d'eau et cherche à atteindre l'objectif de réduire l'impact sur l'environnement. Il s'agit là d'un défi de taille, qui exige une gestion durable de l'eau pour continuer de produire des volumes importants mais de manière éco-responsable avec une agriculture de précision, plus intelligente. (COLETTE *et al.*, 2011)

1.1. Croissance de la population urbaine et artificialisation des sols

Plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui dans les zones urbaines et cette tendance est en constante hausse. En effet, cette proportion devrait passer à près de 70% d'ici 2050. (ONU DAES, 2014)

Ainsi depuis la fin des années soixante, les surfaces agricoles reculent dans le monde. Entre 1971 et 2001, plus de 40 000 kilomètres carrés de terres agricoles canadiennes classées "catégorie 1" (terres fertiles) ont été supprimées au profit du développement urbain. Dans la région de Montréal, près de 40 km² de surfaces cultivables disparaissent chaque année au profit de l'expansion démographique. (BROUWERS, 2010 ; SHIELDS, 2013)

En France, 82 000 hectares de terres agricoles deviennent des surfaces urbanisées. (SAMPAIO, 2011)

Cette artificialisation des sols affecte la production agricole avec l'épuration des polluants et la régulation des eaux qui ont des effets souvent irréversibles et dommageables pour les terres cultivables (déstockage de carbone plus rapide, fragmentation de la biodiversité et des écosystèmes). (TREGOUET, 2011)

Ces disparitions de terres arables au profit de l'élargissement urbain provoquent un déséquilibre : moins d'espaces de production mais davantage de besoins. (DOMERGUES, 2012)

1.2. Un nouvel enjeu : le développement durable

Les derniers accords multilatéraux sur l'environnement (AME) signés tels que les protocoles de Montréal et de Kyoto visent à protéger et restaurer les écosystèmes tout en contribuant au développement durable. (D.I.C, 2016) c'est-à-dire un développement répondant aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. (INSEE, 2016)

D'après BARBIER et MARKANDYA, un ensemble de trois "normes-objectifs" écologiques encadre la fonction d'utilité collective :

- L'utilisation des ressources naturelles renouvelables ne doit pas excéder leur taux de renouvellement
- Les ressources épuisables doivent être extraites à un taux permettant leur remplacement par des ressources renouvelables
- Les émissions de déchets doivent être inférieures à la capacité d'assimilation du milieu

Le défi démographique futur va entraîner un besoin d'augmenter la production alimentaire ainsi que gérer les déchets et effluents qui seront multipliés par quatre dans les villes. (SMITH *et al.*, 2004) Il semble donc essentiel de développer des moyens de productions durables comme dans les pays du Sud où plus d'un quart de la consommation alimentaire des villes du sud-méditerranéen est produite par une forme d'agriculture urbaine. (PADILLA, 2004)

1.3. Cas particulier : les nouvelles priorités alimentaires de Montréal

D'après des rapports d'études menées par la Direction de Santé Publique de Montréal (DSP), seulement le tiers des résidents de la métropole québécoise consomment quotidiennement au moins 5 portions de fruits et de légumes. (POULIOT, 2009)

De même, l'approvisionnement en produits maraîchers à distance de marche (500 mètres) de leur lieu de résidence n'est pas accessible pour près de 40%. (BERTRAND, 2008)

Statistique Canada a déterminé en 2005 que près de 44 % des adultes montréalais et 16 % des jeunes âgés de 12 à 17 ans présentent un surpoids dû à une alimentation mal équilibrée. Le Dispensaire Diététique de Montréal (DDM) a estimé en 2015 le coût moyen du panier à provisions nutritif à 7,46 CAD par jour pour une famille de 4 personnes. Cette valeur est variable en fonction des quartiers et peut être nuisible au budget de familles en situation de pauvreté. (DDM, 2006)

Les rapports estiment que le panier alimentaire d'épicerie va augmenter entre 2 % et 4 % pour l'année à venir dû à un taux d'inflation alimentaire principalement des fruits et légumes supérieur au taux d'inflation général (tableau 1). (CHARLEBOIS, 2016)

Tableau 1: Prévisions pour 2016 du prix du panier d'épicier moyen au Canada (CHARLEBOIS, 2016)

Catégories	Hausse anticipée
Viandes	2,5 % à 4,5 %
Poissons et fruits de mer	1,0 % à 3,0 %
Produits laitiers et œufs	0,0 % à 2,0 %
Pains et céréales	0,0 % à 2,0 %
Fruits et noix	2,5 % à 4,5 %
Légumes	2,0 % à 4,0 %
Restauration	1,5 % à 3,5 %
Prévisions toutes catégories confondues	Hausse de 2,0 % à 4,0 %

Aujourd'hui, les prix des produits frais sont en augmentation à cause de la faiblesse du dollar canadien et des problèmes météorologiques connus par les régions productrices notamment les inondations attribuables à El Nino.

Les grossistes approvisionnant les grandes surfaces québécoises se tournent à présent vers les fournisseurs locaux, les agriculteurs urbains produisant des denrées accessibles et abordables (panier d'un ménage à 4 personnes : 345 \$ en 2016 contre 325 \$ en 2015) et augmentant la sécurité alimentaire des foyers. (MOUGEOT, 2006 ; CAPITALE MEDIAS, 2016)

En Amérique du Nord, la volonté des populations urbaines de trouver des moyens de produire en ville et dans son espace périurbain une alimentation de qualité, accessible à tous et offrant des espaces récréatifs tout en respectant l'environnement (biodiversité, sol, rivières etc.) est devenue une priorité.

Montréal présente l'un des programme d'agriculture urbaine le plus important au monde. Près de 8500 parcelles et 30% de la population du Grand Montréal sont impliquées. Ce type d'activité se révèle ainsi être enraciné dans les coutumes de la population urbaine montréalaise. (AU/LAB, 2011)

Réussir à produire, en se rapprochant des villes, garantissant les besoins alimentaires des populations urbaines actuelles comme ceux des générations futures est un défi pour les années à venir.

Le concept d'agriculture urbaine est un outil capable de répondre à ces exigences.

2. Qu'est-ce que l'agriculture urbaine ?

2.1. Principe général

« L'agriculture urbaine est un concept qui regroupe une variété d'activités en zone urbaine ou périurbaine. Elle concerne donc la culture, l'élevage, l'acheminement des matières premières ainsi que la commercialisation des produits agricoles. Elle se dissocie de l'agriculture rurale par son intégration au système économique et écologique urbain. » (HALWEIL et al., 2007)

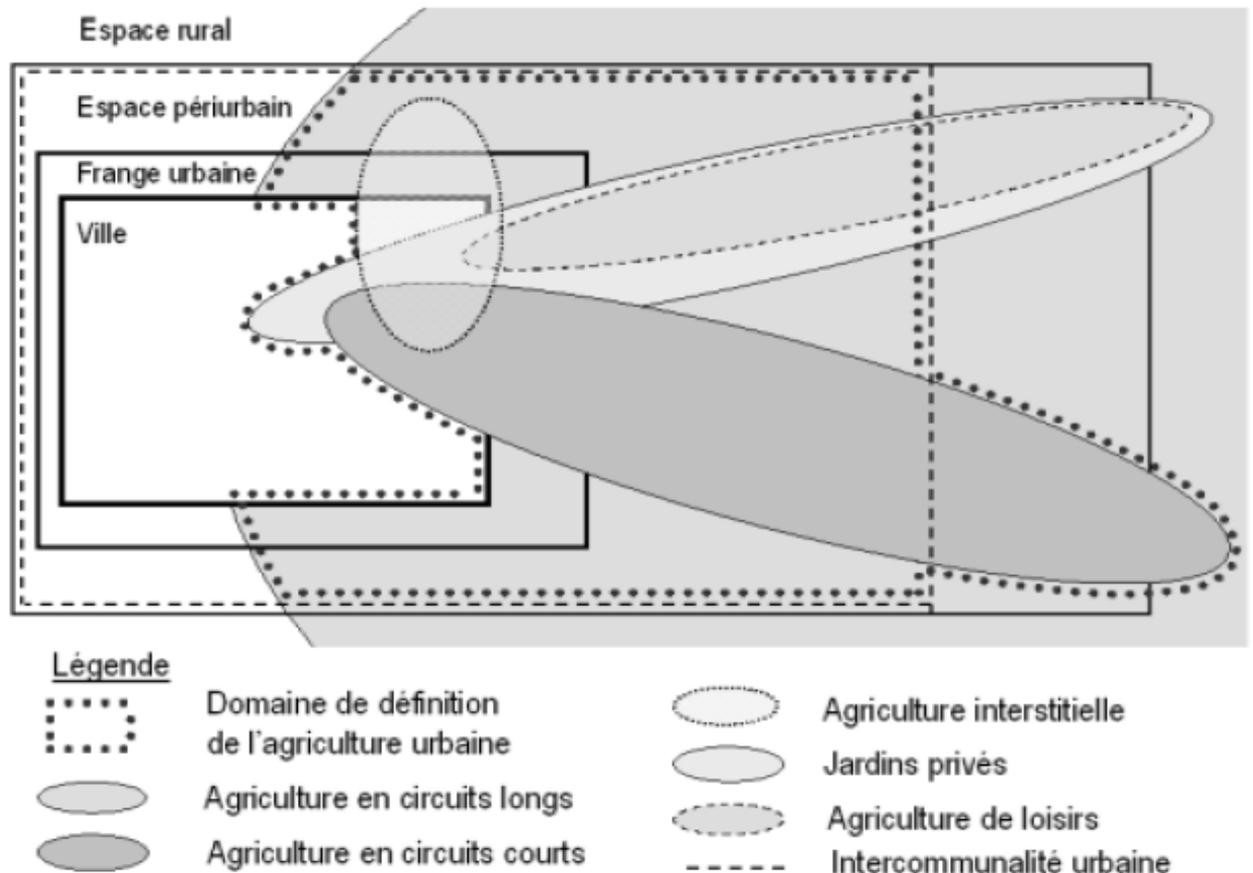


Figure 1 : Domaine de définition de l'agriculture urbaine (LE CARO et NAHMIAS, 2012)

La figure 1 permet de compléter la définition précitée en incluant la notion de territoire et la diversité des formes d'agricultures existantes.

Ainsi dans ce graphique, nous retrouvons les critères de localisation, les fonctionnalités, les dynamiques locales et les activités à travers les multiples formes agri-urbaines.

2.1.1. Les chiffres et l'évolution de l'agriculture urbaine

Cette activité serait pratiquée par 800 millions de personnes à l'échelle mondiale dont 200 millions feraient de la production marchande (vente de légumes et fruits) selon les recensements de l'observatoire de l'agriculture urbaine. (LE MONDE, 2016) Les rendements moyens de denrées fraîches horticoles produites en milieu urbain peuvent atteindre 50 kg/m² selon des rapports de la FAO. Approximativement 15% des denrées alimentaires mondiales proviendraient de l'agriculture urbaine. Cette dernière n'est d'ailleurs pas incompatible avec une certaine productivité. La chercheuse Raquel MORENO-PENERANDA a constaté, au Japon, des rendements supérieurs à l'agriculture rurale concernant la valeur économique par superficie (3% au-dessus de la moyenne japonaise). (FAO, 1999 ; MORENO-PENERANDA, 2012)

Ainsi à Montréal, une ferme urbaine de 2880 m² assure l'approvisionnement de près de 2000 personnes en produisant chaque année 70 tonnes de denrées alimentaires. (LE MONDE, 2016)

L'agriculture en milieu urbain n'est ni une pratique nouvelle, ni un phénomène limité à certaines zones. Cependant, ce concept a connu une forte régression au début du XIX^{ème} siècle avec la densification du bâti au détriment des espaces de cultures. Une certaine

forme de dépendance alimentaire des populations urbaines vis-à-vis des agriculteurs ruraux s'est installée au cours du temps.

Comme le fait remarquer Brian HALWEIL à travers son ouvrage "State of the world : Our urban future", de multiples changements dans l'urbanisme citadin sont en cours.

En prenant l'Exemple de la Chine, le gouvernement chinois a dès les années 90 remarqué l'importance de ce type d'agriculture dans la façon de nourrir les villes. De multiples « fermiers urbains » se sont implantés dans les grandes villes chinoises et ont bénéficiés d'une assistance pédagogique et matérielle. Aujourd'hui Pékin comprend des dizaines de milliers de ménages productivistes pour une population favorisant l'alimentation locale. A l'avenir, la municipalité prévoit d'augmenter les surfaces cultivables pour atteindre 3 millions de mètres carrés grâce à l'exploitation des toitures plates libres.

Ainsi, de nouvelles façons de concevoir l'aménagement urbain émergent avec le concept de ville durable qui s'adapte pour résister aux changements climatiques et aux crises économiques ou sociales futures. (LAGNEAU, 2015)

Le schéma suivant présente les différentes variables conditionnant l'ensemble des projets d'agriculture urbaine.

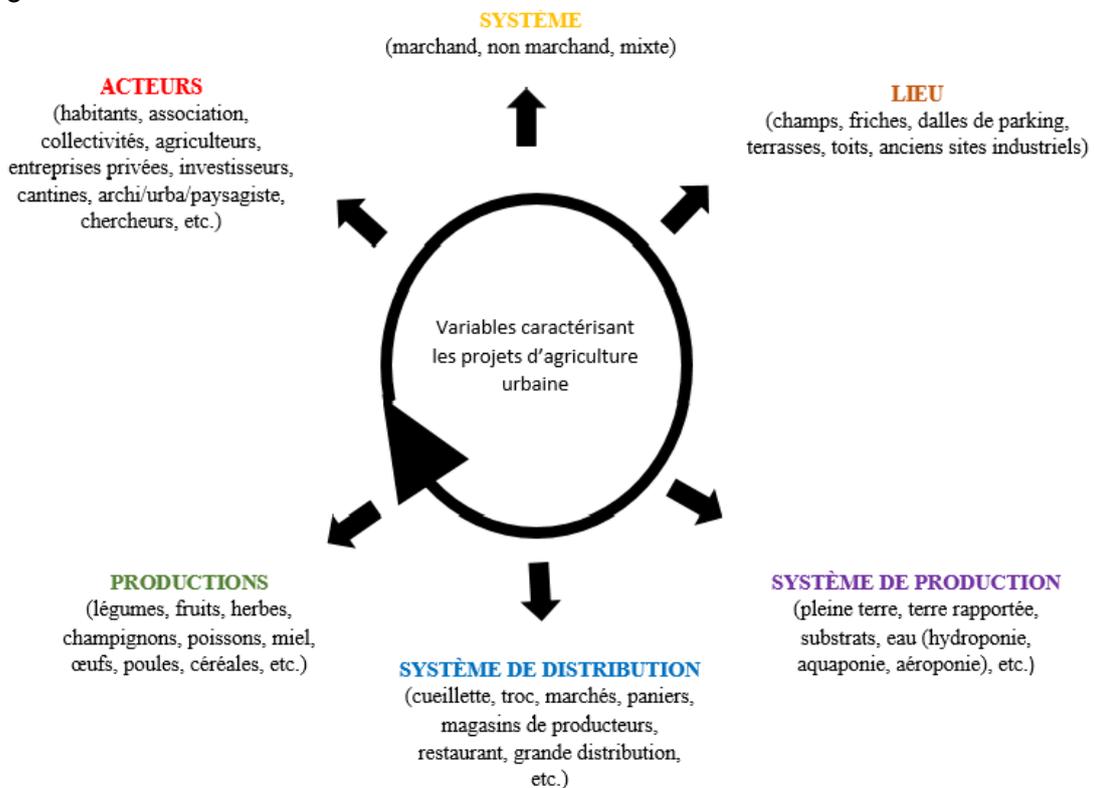


Figure 2 : Variables caractérisant les projets d'agriculture urbaine (DANIEL, 2013)

A travers ces six axes de développement, de nouveaux projets apparaissent dans le monde et contribuent à l'évolution de la société autour de ces desseins.

2.2. Les fonctions de l'agriculture urbaine

Le renouveau actuel de cette activité s'explique principalement par les multiples fonctions qu'elle accomplit.

2.2.1. Les différents types d'agriculture urbaine

L'agriculture urbaine s'illustre de diverses manières. On peut trouver le modèle de ferme commerciale en périurbain comme l'Association pour le Maintien de l'Agriculture Paysanne (AMAP) qui approvisionne directement leurs clients-adhérents en produits frais en ville.

Il y a également les fermes urbaines à la fois marchandes et non marchandes tels que « *Prinzessinnengarten* ». Ce jardin berlinois créé en 2009 est un lieu d'échange d'idées et de formation au jardinage. Les récoltes sont soit partagées soit vendues via un café-restaurant. (SCHMIDT, HIRSCHBERGER, 2013)

Il existe également les potagers urbains et les jardins associatifs. Ces derniers sont à la disposition des citoyens souhaitant cultiver en centre-ville et créer des liens avec d'autres citoyens en développant des réseaux d'échanges, d'entraide et de soutien comme les jardins Gamelin à Montréal ou à Todmorden en Angleterre avec les Incroyables Comestibles. (HERBILLON, 2012 et CORNEAU, 2015)

Enfin, AgroParisTech a développé un potager expérimental sur ses toits en utilisant des bacs et des matières résiduelles organiques comme substrat. Ce type d'agriculture urbaine est très répandu à travers le monde comme le système de Farm Garden à Brooklyn. (LE MONDE, 2012 et ESRF, 2017)

2.2.2. La multifonctionnalité de l'agriculture urbaine

L'agriculture urbaine est multifonctionnelle par ses activités et ses formes comme le présente le schéma de la figure 3. Ces initiatives en espaces urbanisés redonnent de la vie et du sens aux lieux qui en manquent cruellement. Ce type de projets permet de faire apparaître un système alimentaire et citoyen plus durable et impliqué dans l'évolution des villes.

De plus, cultiver en milieu urbain est un outil pour le développement social. La mixité des populations au sein d'un jardin contribue à éviter l'exclusion de certains tout en favorisant d'autres aspects tels que la solidarité et l'entraide. (COURTNEY *et al.*, 2012 ; DUCHEMIN, 2010)

Le but des entrepreneurs en agriculture urbaine est également de s'insérer dans le tissu urbain et de participer à la réinsertion des personnes en difficulté. C'est le cas par exemple du Palais des Congrès de Montréal qui pour son second projet Cultivert, a travaillé avec une maison de réinsertion pour personnes sans domicile fixe. (PCM, 2012)

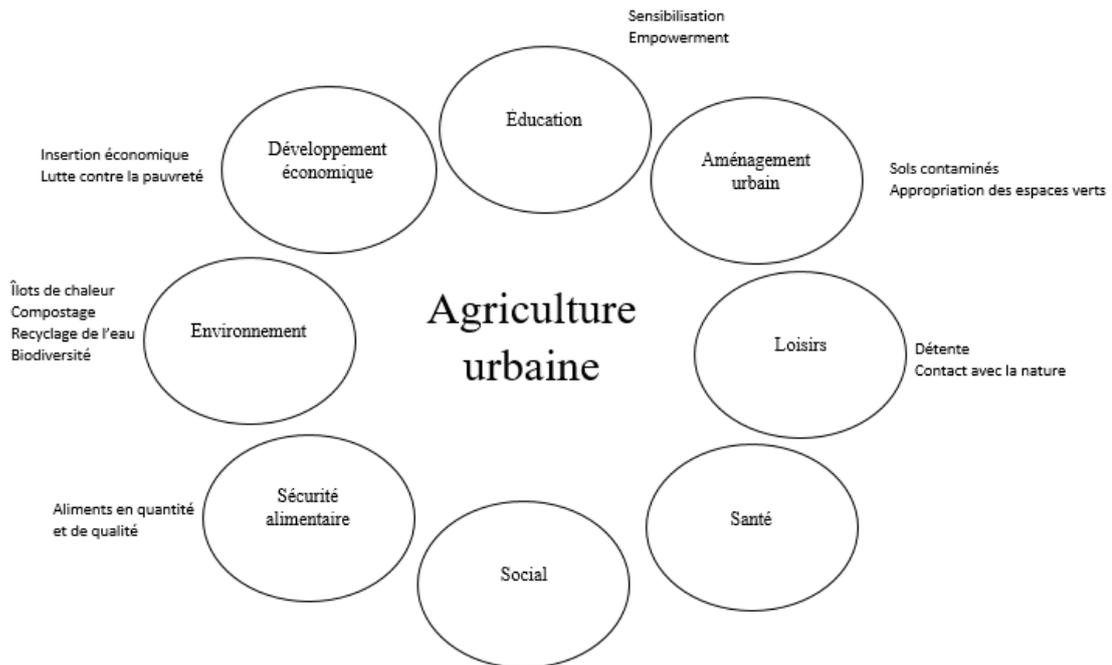


Figure 3 : Multifonctionnalité de l'agriculture urbaine (d'après DUCHEMIN *et al.*, 2008)

Ces multiples activités aussi bien marchandes que non marchandes et représentées sous différentes formes (jardins associatifs, fermes urbaines, etc.) remplissent une fonction commune : contribuer au développement durable de la société. (ECODESIGN RESOURCE SOCIETY, 2013)

2.2.3. La fonction environnementale de l'agriculture urbaine

De par sa fonction alimentaire en fournissant des produits frais et locaux, l'agriculture urbaine présente des avantages environnementaux. Elle favorise des habitats écologiques pour la flore, la faune via toutes les zones végétalisées et productives, urbaines et périurbaines. (BEILOW, 2003)

De plus, le recyclage des matières résiduelles organiques est une autre contribution pour l'environnement. Les exemples sont multiples tels que les composteurs, les broyeurs de végétaux.

Elle contribue aussi à la réduction du coût énergétique par rapport aux transports en développant les circuits de proximité et les circuits ultra-courts (producteur – consommateur). L'agriculture urbaine participe pleinement à la lutte contre les gaz à effet de serre et même contre le changement climatique. (COURTNEY, 2012) En Amérique du Nord, les produits alimentaires voyagent en moyenne plus de 2000 km avant d'atterrir chez le consommateur. Cela coûte entre 40 et 80 calories d'énergie fossile pour une seule calorie alimentaire. En comparaison, après la seconde guerre mondiale, un agriculteur local produisait 8 calories alimentaires avec une calorie fossile. (CAUCHY, 2009 ; ARTE, 2014) La végétalisation des surfaces verticales (murs) et horizontales (sol et hors-sol) réduiraient les niveaux de températures des villes ou encore des îlots de chaleur urbain. Il s'agit en fait de la différence de température de la ville et de l'extérieur de la ville, qui peut être très significative, en raison, entre autre, de l'inertie thermique des bâtiments en pierre et en béton, accentué par tous les appareillages (climatisation, chauffage etc.) qui dégagent de la chaleur. La végétalisation urbaine atténue le taux de pollution atmosphérique et acoustique. (DULUCQ, 2013)

Il faut également penser aux emballages qui consomment d'importantes quantités d'énergie et de matériaux dérivés du pétrole (LEBEDEVA, 2008). La production à proximité du consommateur, voire par le consommateur lui-même, permettrait ainsi de réduire considérablement ces dépenses énergétiques.

Pour terminer, l'agriculture urbaine par la revitalisation des friches industrielles, des anciennes voies de chemin de fer, des toits etc. favorise le ralentissement de l'écoulement des eaux pluviales et la protection contre les risques de catastrophes naturelles telles que les inondations. (SCHADEK, 2008)

2.2.4. La fonction spécifique de l'agriculture urbaine à Montréal et ses contraintes

Dans la métropole québécoise, l'agriculture urbaine n'est pas une activité isolée dans l'approvisionnement alimentaire montréalaise. Elle fait partie d'un système alimentaire englobant plusieurs phases de la production maraîchère dont la vente et la transformation. L'engouement actuel pour ce type de production fait apparaître une nouvelle conformation des quartiers et des arrondissements.

La Conférence régionale des élus de Montréal a initié une démarche afin de doter la collectivité montréalaise d'un plan de développement d'un système alimentaire durable et équitable. L'élaboration de ce plan s'articule autour de six composantes (CHAHINE, 2015)

:

- L'agriculture urbaine et périurbaine
- Les pratiques durables de production alimentaire
- Les Infrastructures locales et régionales de transformation et de distribution des aliments
- La sécurité alimentaire des communautés
- L'alimentation saine
- La réduction du gaspillage et des déchets alimentaires

Associée à l'obligation de produire pour rentabiliser les investissements réalisés, la qualité des sols est une contrainte supplémentaire importante. La région québécoise gère les sols contaminés à l'aide de critères établis en fonction de l'usage prévu pour le terrain. Ces critères qui sont au nombre de 4 et détaillés au bas de page¹, A, B, C et RESC ont été élaborés afin de protéger la santé des citoyens, la faune et la flore ainsi que prévenir la contamination des eaux souterraines. Il n'existe pas de critère spécifique pour la production urbaine de fruits et de légumes.

L'île de Montréal est particulièrement touchée par la problématique des sols contaminés en raison des anciennes activités industrielles qui s'y sont déroulées par le passé.

Entre 2006 et 2009, la DSP a analysé 80 zones pour évaluer s'il était approprié de continuer à y cultiver des légumes. Il s'est révélé que 25% présentées des risques plus ou moins important à la culture maraîchère. (MEF, 1998 ; MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUEBEC, 2003)

¹ Critère A : limite acceptable pour des sols considérés comme propres

Critère B : limite maximale acceptable pour un usage résidentiel

Critère C : limite maximale acceptable pour un usage commercial ou industriel

Critère RESC : concentration maximale permise pour enfouir des sols contaminés dans un lieu d'enfouissement autorisé sans traitement préalable selon le Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés.

2.3. La culture hors-sol – l'hydroponie

L'idée de culture hors-sol est apparue avec les jardins suspendus de Babylone au VI^{ème} siècle av J.-C. Cette technique s'est développée au fil du temps avant de disparaître et réapparaître au XIX^{ème} siècle en Allemagne à la suite de recherches agronomiques. Puis en 1930, le premier système hydroponique commercial fut construit aux États-Unis. La technique se perfectionna au Pays-Bas, en France et en Amérique du Nord dans les années 50 jusqu'à se développer partout sur le globe (HYDROBOX, 2013)

2.3.1. Définition et principes de l'hydroponie

La culture hydroponique correspond à un mode de production de plantes hors-sol sans terre, sur un support de culture inerte. Le support hydroponique inerte ne contient pour ainsi dire aucun nutriment. Ceux-ci sont apportés dans leur totalité par la solution nutritive, qui circule en continu ou par cycle régulier au niveau du système racinaire. (CERVANTES, 2011)

Ce type de culture est très répandue en horticulture et les avantages attribués à cette technique sont le faible poids facilitant sa mise en place sur les toits, une fertilisation contrôlée et optimale ainsi qu'une économie d'eau comparée aux productions conventionnelles. Dès lors, les plantes poussent plus vite car elles captent des nutriments à la vitesse à laquelle ils sont consommés. (GOUDREAU, 2011).

Le bon fonctionnement d'un système hydroponique résulte également sur l'oxygénation des substrats. En effet, ces derniers permettent aux poils absorbants des racines de capter les nutriments avec efficacité d'où une productivité accrue si leur fonctionnement est optimal. (CERVANTES, 2011)

L'expérience menée par RIPPY *et al.* (2004) sur la culture de plants de tomates selon divers modes de culture permettent d'exposer le fait que les rendements en conventionnel (CONV-SOIL) sont significativement moins importants que ceux réalisés en hydroponie avec par exemple de la laine de roche et une concentration nutritive forte (CONV-RWH).

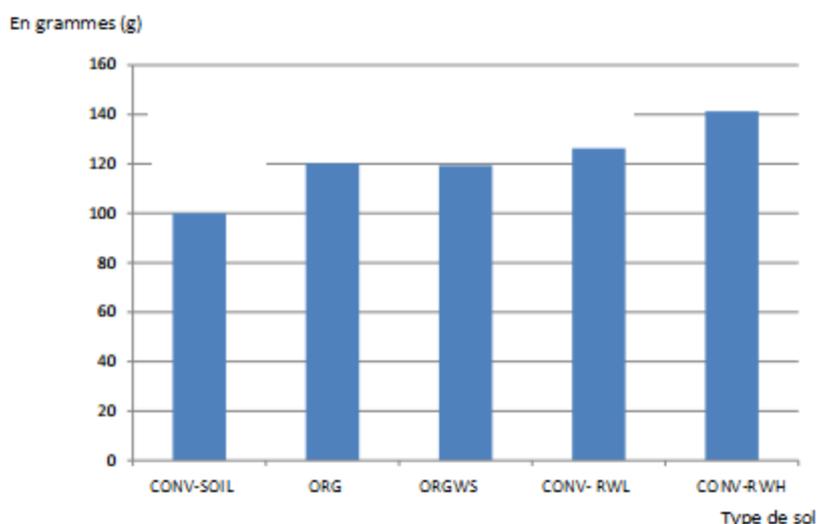


Figure 4 : Les poids des tomates par plant/semaine de récolte (RIPPY *et al.*, 2004)

Ce mode de culture nécessite un suivi important et des connaissances techniques. Effectivement, l'hydroponie est une pratique exigeante où de multiples paramètres

réclament un contrôle régulier. L'absence de terre, qui joue le rôle de tampon pour les nutriments en les retenant, doit être compensée. Cependant, un contrôle précis du régime alimentaire des plantes permet un développement moins important de feuillage et plus de fleurs d'où un gain de productivité. Les plantes cultivées en hydroponie fleurissent de manière plus précoce et peuvent être récoltées quelques jours plus tôt comparé aux plantes cultivées en terre. (FRONTY, 1982)

Dans un système hydroponique, le rapport entre le développement de la plante au-dessus et au-dessous du sol est différent de celui existant dans une culture traditionnelle en terre. Pour cette dernière, la proportion est de 50/50 contrairement en hydroponie où les rapports sont plus disproportionnés (plus du 70/30, c'est-à-dire 70% de la plante est au-dessus du sol et 30% seulement en dessous) puisque les nutriments sont directement apportés aux racines par la solution nutritive. Ainsi, les plantes n'ont pas besoin de développer un système racinaire important pour aller chercher les nutriments. (CERVANTES, 2011)

Il faut également noter que l'utilisation d'un support de culture plutôt que de la terre permet d'éviter plusieurs types de maladies tels que les racinaires (solanacées) ou celles de conservation. (RIPPY *et al.*, 2004)

2.3.2. Les avantages de l'hydroponie

Ce mode de culture, plus soucieux des questions environnementales offre de nombreux avantages :

- Le recyclage (des solutions nutritives en cours de culture, des substrats et des végétaux)
- Une économie d'énergie (énergie renouvelables plutôt qu'énergies fossiles)
- La réduction des traitements phytosanitaires et parasitaires (ciblés, lutte biologique intégrée)

De plus, un système hydroponique utilisant l'eau recyclée peut économiser près de 90 % d'eau comparé à une production agricole en pleine terre. Cette économie peut être bénéfique dans les régions où l'eau est une denrée rare. Les rendements sont souvent très satisfaisants également sur des surfaces moins importantes que pour les cultures en pleine terre. (DANIELSSON *et al.*, 2011)

En environnement urbain, les rendements sont moins importants (ombre, accessibilité, diversité des cultures, etc.) cependant des estimations faites ont permis de définir un chiffre de production minimal de l'ordre de 15 kg/m²/an. (SANYÉ-MENGUAL *et al.*, 2012)

2.3.3. Les enjeux de l'hydroponie

L'hydroponie fait face à de nombreuses réticences dont celle des européens encore attachés aux produits de la terre contrairement aux nord-américains et asiatiques. Ces derniers ont une bonne image de l'hydroponie et comptent de nombreuses fermes urbaines implantées sur leur territoire utilisant cette technologie.

Un autre point à prendre en considération pour le développement de cette technique est la diversification de la gamme de produits. En effet, les expériences à Montréal ont montré la nécessité de créer des partenariats avec des producteurs périurbains (pour les légumes racines et tubercules) puis de développer cette complémentarité entre ces deux types de production plutôt que de la concurrence.

Il est intéressant de noter que les qualités gustatives et nutritionnelles sont assurées à partir du moment où la technique de production est adéquate comme l'a prouvé des recherches dans le domaine (figure 5).

Effectivement la qualité est mesurée en fonction de la variété et non du système comme le fait remarquer le professeur G. BERTONI, chercheur à l'ENSAT. (COMMUNIQUÉ COURS BERTONI, 2017a)

Quality index ^a	
Crop systems	
ORG	59.36
ORGWS	62.45
CONV	62.56
CONV-RWL	58.51
CONV-RWH	60.92
Cultivars	
15	56.25
40	78.52
45	55.68
93	52.52

$$^a \text{Quality index} = \sum (C_s \text{ sample} * K_x) / C_0$$

Figure 5 : Qualité gustative de tomates produites selon différents modes de culture ((RIPPY *et al.*, 2004)

Les produits finaux ne présentent aucun signe de contamination par la terre, pas de problème dû à une mauvaise alimentation minérale et hydrique du fruit (fruits trop juteux ou trop farineux). Il est important de monter à l'avenir des cahiers des charges avec certification de l'absence de résidus.

Cette certification permettrait donc de valoriser les produits des différents types d'agriculture urbaine tels que les jardins partagés, les systèmes aquaponiques, les fermes hydroponiques ou bien encore les fermes verticales sur toit.

2.4. Les différents types de culture urbaine sur toit

Il existe 3 types de cultures hors-sol urbaines actuellement développées :

- L'Agriculture Green Rooftops (AGRs) ou toit vert agricole intègre des cultures comestibles dans un milieu de culture placé sur un plancher avec une isolation thermique, un revêtement d'étanchéité, une barrière anti-racines et un système d'irrigation combiné à un bon système de drainage. Ce type de système n'est pas répandu à grande échelle mais des études sont menées pour définir la viabilité du système et l'améliorer. (BASS, 2011 ; WILLIAMS, 2011)
- Il existe également des toits potagers en container (Rooftop Container Gardens) consistant en la culture dans des bacs ou sur des lits de substrats surélevés et qui contiennent de la terre ou d'autres matières organiques et minérales. AgroParisTech a développé un système de bacs de culture pour l'expérimentation du compost réalisé à partir de marc de café et broyat de bois. (AUBRY *et al*, 2013)
- Enfin, les cultures hors-sol NFT (Nutrient Film Technic) - des légumes dans des pots installés dans des gouttières avec des billes d'argiles - sont les autres sortes de systèmes communément utilisés sur les toits. Généralement sous serre, ce mode de culture permet une meilleure régulation des facteurs de croissance des plantes (température, climat, lumière, eau fertilisation).

Depuis quelques années les projets agri-urbaine se développent sur des surfaces de dimension moins importante mais avec des systèmes subdivisés à la verticale.

3. L'agriculture urbaine verticale

3.1. Aperçu de l'agriculture verticale

L'agriculture urbaine prend aujourd'hui de nouvelles formes, plus diversifiées qu'auparavant. Depuis la fin des années 90, le projet de ferme urbaine commence à être formulé de façon plus concrète. DESPOMMIER (2010) élabore un modèle de gratte-ciels convertis en fermes durables dans son livre « The Vertical Farm : Feeding the World in the 21st century ».

Des études scientifiques ont estimé qu'il fallait environ 28 m² d'espace intérieur intensivement cultivés pour produire assez de nourriture pour une seule personne vivant dans un environnement extraterrestre (ex : station spatiale ou colonie sur la Lune). (MITCHELL, 1994)

Ainsi en se basant sur ces calculs, une ferme verticale avec les dimensions d'un bloc urbain s'élevant jusqu'à 30 étages (environ 280 000 m²) pourrait subvenir aux besoins journaliers (2000 calories/jour/personne) de 10 000 personnes. Les rendements peuvent être augmentés avec des recherches plus poussées notamment en hydrobiologie, gestion des déchets, microbiologie industrielle, en architecture et design.

Même si le coût de conception estimé est important, la culture verticale est très intéressante notamment pour pallier le manque de surface cultivable en l'augmentant à l'horizontale. (DESPOMMIER, 2004)

3.2. Des exemples d'agriculture urbaine verticale

A Paris, deux fils d'agriculteurs ont créé leur propre start-up nommée « Agricool ». Souhaitant œuvrer pour l'autonomie alimentaire des villes mondiales et pour un accès à des produits de qualité, ces investisseurs se sont lancés dans la production de fraises dans des containers.



Figure 6 : Prototype Agricool Paris

Ce prototype de ferme urbaine en container utilise la pollinisation par bourdons et peut atteindre des rendements de 500g par pied avec 4 récoltes par an soit un total de 7 tonnes pour 3500 plants/container. Les fraisiers sont cultivés sur des murs végétaux contenant un substrat en plastique recyclé, sans pesticide, sous lumière artificielle LED basse-consommation et un système d'irrigation en circuit fermé (figure 5). Le procédé économise près de 90% d'eau par rapport à un système conventionnel. L'automatisation du système permet de piloter à distance le système facilement. Un homme peut gérer à lui seul 3 à 5 conteneurs.

Ils vendent 3 euros la barquette de 250g soit 12 euros le kilo trié en comparaison avec une grande entreprise dont le coût de revient oscille entre 8 et 11 euros le kilo trié. (MARION, 2014 ; AGRICOOL, 2016)

Les Galeries Lafayette, à Paris, accueillent depuis peu une ferme verticale cultivant plus de 150 variétés de plantes comestibles. Yohan Hubert a fondé « Paris sous les fraises », 1000 m² de toits non accessibles au public où est implanté un projet d'expérimentation de végétalisation durable faisant appel à des installations innovantes. Soutenu par la Mairie de Paris et l'agence de développement économique et d'innovation Paris et Co, les productions destinées aux restaurants partenaires sont produites à l'aide de matériaux recyclés ou de la laine. L'utilisation de terre dans ce projet permet le développement d'un écosystème avec l'apparition d'insectes et de mousses qui permettent à la ferme de devenir autonome. (MARION, 2014 ; VERNAT, 2016)

A Chicago, Farmed Here est la première ferme verticale américaine et la plus grande se trouvant à l'intérieur d'un ancien entrepôt (8300 m²). Utilisant les procédés de l'aquaponie, les cultures sont empilées sur six couches et chacune d'elles ont une lumière artificielle au-dessus comme on peut l'observer sur la figure 7. La location d'entrepôt présente l'avantage d'être moins onéreux que le foncier agricole, les coûts de transports sont réduits ainsi que les risques de contaminations bactériennes. (HUFFINGTON POST, 2013 ; MARION, 2014)



Figure 7 : Farmed Here Chicago

Sur le continent asiatique - pour un souci d'autonomie alimentaire et un manque de surfaces agricoles - de multiples projets d'agriculture urbaine verticale sont promus par les politiques gouvernementales locales tels que « Sky Green » à Singapour. Inaugurée fin 2012, cette ferme verticale se compose de 180 tours d'aluminium d'une hauteur de 9 mètres (figures 8). Chaque tour comprend 38 étages et produit actuellement plusieurs variétés de salades avec la possibilité de produire d'autres légumes à l'avenir. Système automatisé, l'ensoleillement est assuré par des poulies hydrauliques effectuant la rotation des bacs quotidiennement. L'eau de pluie est récupérée pour alimenter le système d'irrigation et pour le fonctionnement du mécanisme de rotation des bacs. Actuellement, la structure est capable de produire deux tonnes de légumes par jour. (DANIEL, 2013)



Figure 8 : Photos de la ferme Sky Green (ZIMMER, 2012)

Les projets d'agriculture urbaine verticale dans le monde ont inspiré l'AU/lab pour la conception de leur projet VERTical.

4. Présentation du projet VERTical

La technique des murs verticaux avec toiles dites « comestibles » fut sélectionnée pour ces multiples avantages. Le laboratoire d'agriculture urbaine ou AU/Lab est l'investigateur de ce projet à Montréal.

4.1. Le laboratoire d'agriculture urbaine de Montréal, AU/Lab

L'AU/Lab est une Organisation à But Non Lucratif comprenant six membres et fonctionnant selon plusieurs axes.

Ces axes sont interconnectés puisque la problématique générale de l'organisme est de déterminer dans quelle mesure l'agriculture urbaine peut répondre aux besoins de la sécurité alimentaire des villes et comment elle peut s'intégrer dans les stratégies de développement urbain.

Le but de cette organisation est donc de sensibiliser l'opinion pour que les comportements alimentaires urbains changent. Pour cela il est nécessaire de transformer le système de production de nourriture actuel en un modèle plus durable.

Ainsi la sensibilisation des populations à travers la formation des consommateurs de demain avec un mode de pensée plus responsable envers l'environnement pourrait également participer à la création d'un tissu social où l'aspect communautaire jouerait un rôle prépondérant.

4.2. La multifonctionnalité de l'AU/Lab

Les axes de développement du laboratoire sont :

- La formation, qui englobe une école d'été d'agriculture urbaine ainsi que la formation aux jardins pédagogiques.
- L'intervention, soit l'implémentation de projets urbains comme ceux sur le toit du Palais des Congrès de Montréal.
- L'incubation et accompagnement de nouveaux projets. Le but de cet axe est d'aider les jeunes entrepreneurs à obtenir des financements et des espaces pour démarrer.
- La communication, qui comprend le portail « Agriculture Montréal » et des pages sur les réseaux sociaux pour une meilleure sensibilisation de la population québécoise.

- La politique, les membres siègent dans plusieurs comités dont celui de la ville de Montréal et pratiquent du lobbying politique pour une meilleure sensibilisation.
- Et enfin la recherche, elle souhaite notamment développer des projets d'agriculture urbaine novateurs en relation avec les changements climatiques.

4.3. L'entreprise partenaire du projet

Plusieurs entreprises ont participé à la réalisation de ce projet mais une en particulier, la Ligne Verte.

Cette entreprise montréalaise cofondée par Antoine TROTTIER et Patrice GODIN gradués d'une maîtrise en sciences de l'environnement à l'UQAM est l'un des principaux associés de l'AU/Lab.

Depuis sa création, cette entreprise s'implique dans la conception et l'installation de projets de toits verts, d'aménagement paysager, de murs végétaux et de projets d'agriculture urbaine de tout type.

Ainsi en collaboration avec le Palais des Congrès de Montréal (PCM), l'AU/Lab et Ligne Verte ont souhaité implanter un projet-vitrine dans la métropole québécoise dans l'objectif de démontrer le potentiel de cette technique. La mission de l'entreprise associée est d'assurer le lien avec le PCM, installer le système et le gérer.

Depuis les années 2010, en coopération avec l'AU/Lab et l'entreprise Ligne Verte, le PCM a lancé une phase de verdissement de ses toits avec de multiples projets tels que CultiVert en 2010 et VERTICAL depuis l'été 2016. Financier du système à hauteur de 12 %, le conglomérat du Palais des Congrès souhaite contribuer au développement de projet écoresponsables à Montréal.

4.4. Les caractéristiques du projet VERTICAL

VERTICAL est un prototype hydroponique vertical à membrane. Il représente une superficie d'environ 560 m² et est organisé autour de structures autoportantes verticales qui permettent entre autre la densification des productions maraichères urbaines (0.01 m² au sol pour 0.23 m² d'espace cultivable en moyenne), une réduction des îlots de chaleur et l'expérimentation de différentes toiles naturelles et/ou synthétiques développées pour ce type de prototype.

4.4.1. Le concept de « murs comestibles »

L'entreprise « Paris sous les fraises » a développé une technologie innovante de culture verticale des végétaux en toiture pour démultiplier le potentiel de ces surfaces dites « résiduelles ».

Ce mode de culture repose sur un support innovant, normé et breveté : la membrane hydrobiologique. Cette dernière est un assemblage de fibres de laine de mouton et de chanvre à 80% recyclées et 100% recyclables. La mise en place de ce type de toile fabriquée en France présente des avantages tels que sa simplicité et sa durabilité. Elle nécessite peu d'entretien et permet la culture maraichère organique sans pesticide et sans engrais chimique. Elle s'oriente plutôt vers une lutte biologique intégrée ainsi qu'une alimentation organique en circuit d'irrigation fermé.

Pour le projet VERTICAL, 3 types de toiles ont été développées.

La première est composée de feutre gris F-26 confectionné par l'entreprise MultiFeutre et constituée de 45% de fibres de laine et de matériaux recyclés. (MF, 2017)

La deuxième est un assemblage de feutres conçu par l'entreprise Soleno Textile Inc. Le système breveté Aquamat présente différentes couches. Ces dernières ont différentes

fonctions : un revêtement anti-racinaire, une couche anti-évaporation, un textile réservoir et un film étanche de polyéthylène. (AQUAMAT, 2017)

Enfin la troisième toile (membrane) a été fabriquée par l'entreprise Innovex spécialiste en géosynthétique. Le géotextile non-tissé Novatex 120 est un feutre en polypropylène. (INNOVEX, 2016).

4.4.2. Les avantages du concept

La technologie des « murs comestibles » serait comparable à d'autres technologies dont les serres sur toits ou l'utilisation de systèmes de toitures végétales comme chez Lufa Farm et Brooklyn Grange (figure 9).

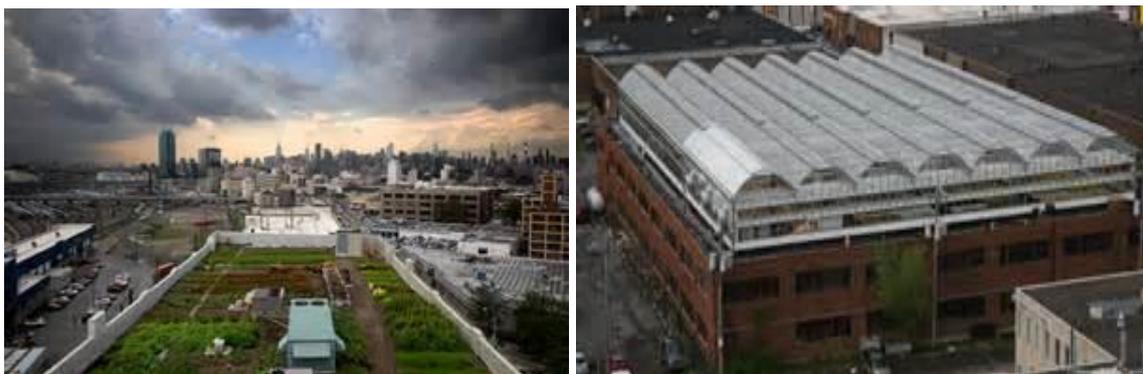


Figure 9 : Brooklyn Grange et la ferme Lufa Farm (LEAHY, 2011 ; LUFA FARM, 2017)

Cependant, en comparaison avec les projets précédemment cités, cette technologie présente des avantages non négligeables :

1) Le poids

Le système de « murs comestibles » n'utilise pas de terreau et très peu de substrat. Le poids peut ainsi être réparti pour ne pas endommager la toiture. Enlevées pendant l'hiver, les membranes hydrobiologiques ne causent aucune surcharge supplémentaire. Cela permet de réaliser des économies de l'ordre de 15 à 20 000 \$ afin d'enlever les échafaudages.

Il est estimé que le système VERTICAL représente une surcharge totale d'environ 50 kg/m² - plus faible que les systèmes de toit vert moyen d'environ 150 kg/m² – selon les normes réglementaires pour les végétalisations de toitures. (ASCHER, 2008 ; ARCHITECTEO, 2017)

En comparaison avec le projet, un système de serre est plus contraignant et requiert souvent d'être installé sur un bâtiment conçu à cet usage dès la construction.

Ainsi le système a le potentiel de pouvoir s'installer sur beaucoup de bâtiments existants comme celui du Palais des Congrès sans adaptation particulière.

2) L'adaptabilité

La technique des « murs comestibles » peut être installée partout où peuvent être installés des échafaudages. En cas de problème avec la toiture, la structure peut facilement être démontée ou déplacée.

En comparaison, en cas de fuite du toit, le système de toiture végétale doit généralement être complètement enlevé. Le coût pour enlever le système et le remettre en place est plus élevé que le coût initial. De même, ce type de technique est simple à moduler en fonction de la superficie cultivable désirée puisqu'il suffit d'y « greffer » de nouvelles structures d'échafaudages avec de nouvelles membranes de cultures.

4.5. Enjeux et problématique

Le laboratoire AU/Lab souhaite poursuivre dans le développement de projets de recherches en innovation hydroponique. Leurs objectifs, c'est-à-dire de satisfaire les besoins croissants de la société tout en favorisant le développement social au sein des villes, ont permis l'émergence et le financement de projets urbains.

Pour atteindre ces perspectives, le laboratoire doit prouver la fiabilité de leur système du point de vue technique mais également du point de vue financier.

Effectivement, l'agriculture urbaine est non marchande en France et dans les pays de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) car sinon les subventions les revenus agricoles seraient très faibles comme le fait remarquer de nombreux organismes comme « Urban Eco-Scop ». (LAGNEAU, 2015)

La commercialisation en circuit court et accessoirement par la vente directe est donc l'une des clés majeures de l'agriculture urbaine et de son évolution.

Hors comme précédemment expliqué, depuis les années soixante, les surfaces agricoles reculent au dépend des villes.

« L'artificialisation des sols agricoles correspond aux flux des terres agricoles vers ces usages ni agricoles ni forestiers : sols bâtis, infrastructures de transports, chantiers, cimetières, terrains vagues, carrières, décharges, jardins d'agrément et pelouses. » (POINTEREAU P, COULON F, 2009)

Ainsi, l'AU/Lab a décidé de monter un projet de toiles verticales hydroponiques nommé « VERTICAL ». Ce projet permettra de s'adapter à l'expansion démographique. Ses objectifs sont de maîtriser les coûts de production et de minimiser l'impact sur l'environnement.

La mission du service de recherche et développement est alors de définir les paramètres du système et de sélectionner une large gamme de matériaux afin de satisfaire les attentes et de rester un des pionniers en agriculture urbaine.

Avant de passer à la conception du système et aux phases de tests, des recherches bibliographiques furent nécessaires pour comprendre le thème et l'ensemble des composantes. L'étude des prototypes semblables existants offrit des informations pour la conception du système.

L'objectif primaire de cette étude est de présenter à de potentiels investisseurs des systèmes verticaux fonctionnels afin d'envisager leur développement sur de plus amples surfaces et à différents endroits de la métropole montréalaise dans un premier temps puis à l'échelle nationale dans un second temps.

Pour la Ferme du Palais des Congrès, l'avantage est qu'en fonction des ventes et de l'intérêt porté au prototype développé, il sera facile d'agrandir les superficies de culture en fonction de la demande pour accroître l'offre et viser un plus grand nombre de restaurateurs.

Qui plus est, selon l'approvisionnement des intrants, cet agrandissement peut se faire en comptant sur des matériaux locaux moins chers et plus abordables.

Le prototype se veut également viable dans le futur et donc assez explicite, adaptable et applicable à toutes les situations possibles.

Dans le cadre de cette problématique, les connaissances en hydroponie ainsi que les systèmes verticaux en fonctionnement seront notre référentiel. Effectivement, ce mode de culture est le plus adapté à la conception du projet VERTICAL au niveau paramétrique (fertilisation, irrigation, substrats, etc.).

4.6. Les objectifs et les hypothèses

La première phase fut de définir les paramètres pour la conception d'un système hydroponique vertical de « murs comestibles » à l'image de celui créé par Yohan HUBERT (2014) à Paris. Pour cela, la conception s'est basée sur un travail de recherches bibliographiques pour cibler les matériaux susceptibles de permettre le fonctionnement du système ainsi que les entreprises pouvant nous fournir les éléments sélectionnés. Le mémoire se base donc sur des recherches scientifiques, sur des ouvrages de spécialistes

en hydroponie ainsi que sur les recommandations de spécialistes de centres de formations en horticulture au Québec et de professionnels canadiens dans le domaine du hors-sol.

La seconde phase du projet consista à créer le système avec dans un premier temps l'assemblage de la structure de base début août 2016. Puis dans un deuxième temps les différentes toiles de culture sélectionnées furent testées pour déterminer leur capacité de rétention en eau et choisir la formulation d'irrigation la plus pertinente. Enfin, les mesures de croissance des plantes sélectionnées ont débuté mi-août. Ces différentes étapes ont permis d'orienter le choix des matériaux à favoriser pour la suite du projet mais aussi d'apporter des améliorations afin de rendre le système plus autonome, écologique et performant.

La troisième phase du projet correspondait à la détermination finale du matériel à utiliser à travers un prototype en serre où le contrôle des paramètres de croissance permettrait de poursuivre les tests alors devenu impossible à l'extérieur à cause des conditions climatiques.

Dans le cadre de ce projet de recherche, les hypothèses suivantes ont été émises :

- Il est possible de cultiver des fraises, des salades et des herbes aromatiques sur le prototype VERTICAL.
- Les toiles de Feutre Econo50 et le terreau G9 sont les matériaux les plus intéressants pour le projet.
- Les contraintes climatiques du milieu et des matériaux utilisés exigent une adaptation des cycles d'irrigation – fertilisation pour la conduite du système.

Pour valider les hypothèses, nous avons fait des recherches bibliographiques pour identifier les paramètres importants dans la conduite d'un système hydroponique et les caractéristiques de la technologie des murs comestibles. Ensuite nous avons identifié les besoins du projet avant de concevoir le système et lancer les expérimentations pour étudier la faisabilité du prototype.

PARTIE 2 : Matériel et méthodologie

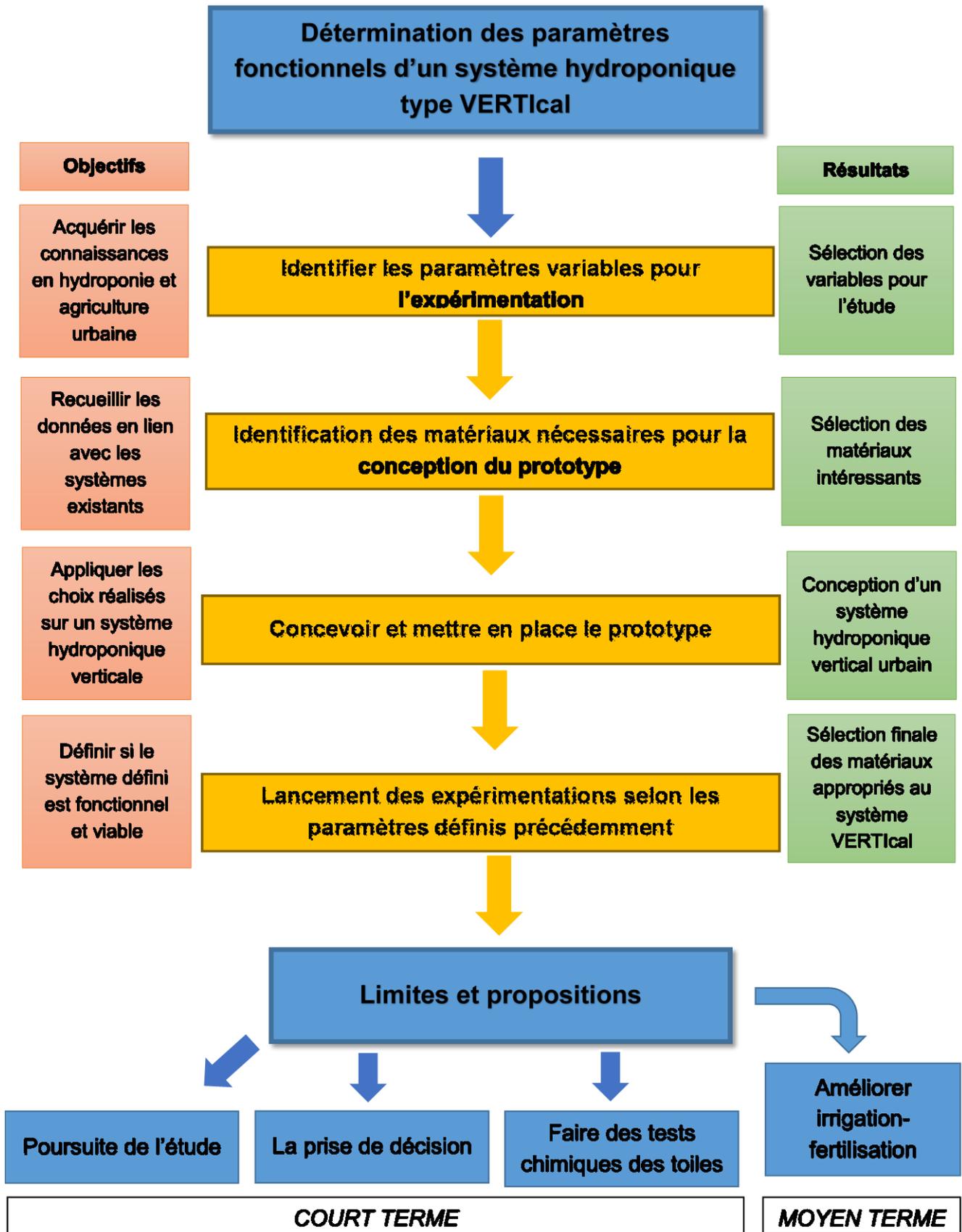


Figure 10 : Schéma méthodologique du projet VERTICAL

1 Matériel et méthodes

La démarche suit la méthodologie exposée figure 10. Celle-ci est basée sur plusieurs étapes successives.

En effet, le projet est divisé en deux parties. La première s'est déroulée sur le toit du PCM durant la période de juin à fin octobre 2016 et la deuxième partie dans les serres de l'Université du Québec à Montréal à l'automne-hiver 2016.

Différentes toiles ont été testées avec la culture de plantes sélectionnées et d'une fertilisation adaptée d'après l'entreprise « Hydroculture Guy DIONNE », un des leaders canadiens dans le domaine de la culture hydroponique et les recommandations du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.

1.1 Recherches bibliographiques et entretiens

La création d'un tel projet hydroponique nécessitait de déterminer les paramètres les plus adaptés pour son fonctionnement. N'ayant pas de ressources bibliographiques dans ce domaine, le choix des matériaux fut réalisé en fonction des différentes publications en hydroponie ainsi que sur des entretiens et des recherches menées avec des spécialistes des cultures hors-sol :

- DUCHEMIN Eric, maître de stage et spécialiste en agriculture urbaine a permis de définir les paramètres du système et a accompagné la conception du système sur toit et en serre en conseillant pour la conduite des cultures.
- Marie-Line GAGNÉ, hortultrice spécialiste en culture hors-sol a apporté son savoir et ses tests sur ce type de prototype pour définir les paramètres essentiels du projet VERTICAL. (Annexe 1)
- Antoine TROTTIER, co-fondateur et administrateur de l'entreprise la Ligne Verte a accompagné les différentes étapes de la conception du projet dans la gestion des ressources hydriques et matérielles ainsi que dans le domaine horticole avec les plants pour l'expérimentation.
- Enfin, les spécialistes en hydroculture de l'entreprise Guy DIONNE-hydroponie ont assisté les choix en matière de gestion des pH et de la conductivité ainsi qu'en matière de fertilisation avec les protocoles à suivre.

Après la phase d'expérimentation et le traitement des résultats, plusieurs contacts ont été noués avec la ferme hydroponique sous serre « *Les sourciers* », localisée à Lagraulet-du-Gers en France pour leur expertise dans la conduite de cultures hydroponiques sous serre et leurs méthodes de fertilisation. (Annexe 2)

Le professeur Georges BERTONI, enseignant spécialisé en culture hors-sol à l'ENSAT a contribué à l'amélioration du protocole expérimentale grâce à ses conseils. (Annexe 3)

1.2 Organisation expérimentale

Pour déterminer le système répondant aux attentes des commanditaires, le dispositif expérimental s'est appuyé sur les paramètres suivant le plan énoncé ci-dessous (figure 11) :

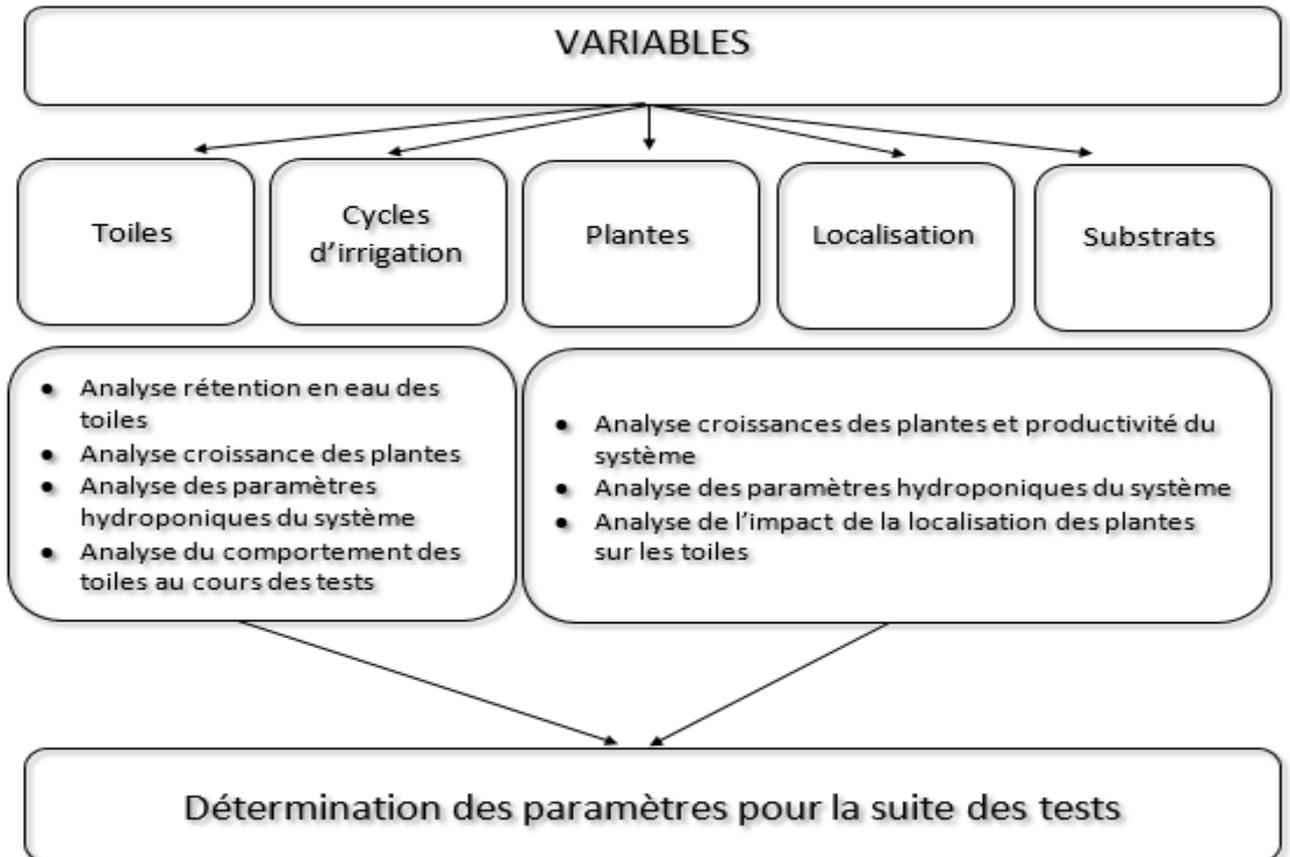


Figure 11 : Schéma récapitulatif des variables et des analyses du stage

2 Dispositif expérimental du toit du Palais des Congrès

2.1 Description des compartiments de la structure autoportante

Le Palais des Congrès est un centre de conférence situé dans le quartier international de Montréal et possédant une toiture plate d'environ 14000 m² (figure 12).

Pour le projet VERTical, la structure de base fut installée par l'entreprise Échafaudage Du-For Inc. spécialisée dans l'installation des échafaudages, début août. Le site présente un revêtement permettant l'évacuation du surplus d'eau, un accès direct au réseau hydrique de la ville et un accès au courant électrique pour le fonctionnement du système de contrôle et d'irrigation.

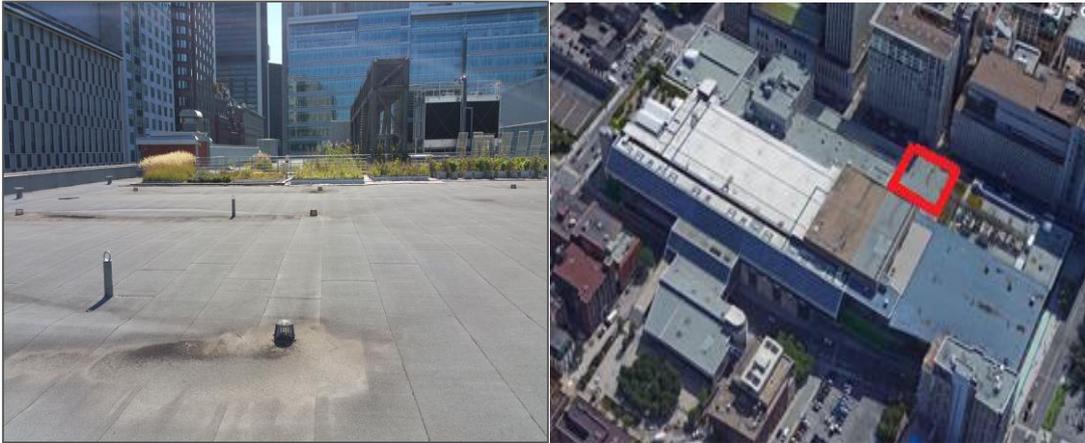


Figure 12 : Surface d'accueil du projet et photographie aérienne du PCM avec localisation de la zone d'accueil en rouge (GOOGLE MAPS, 2016)

La structure de base comporte 49 cadres ainsi que 196 croisillons et 116 tubes aluminiums de dimensions variables (figures 13, 14, 15). Toutes les structures étaient fixées entre elles pour maintenir stable l'ensemble de la construction contre les fortes rafales de vents pouvant souffler dans cette zone.

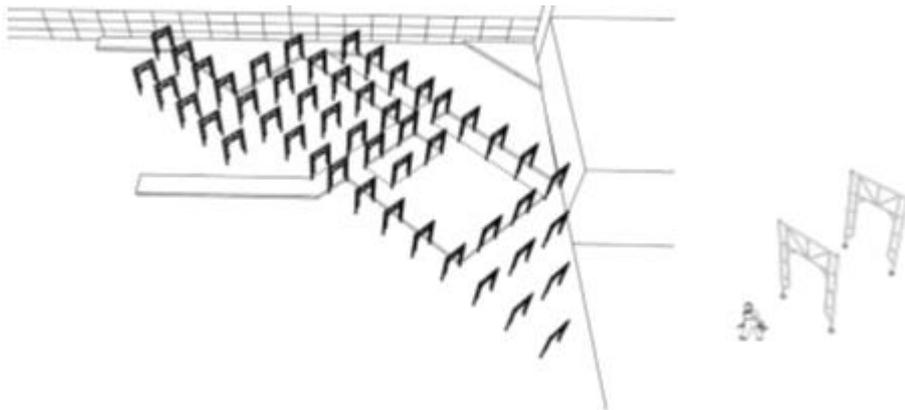


Figure 13 : structure principale - 49 cadres de 1,98m x 3,05m x 3,05m

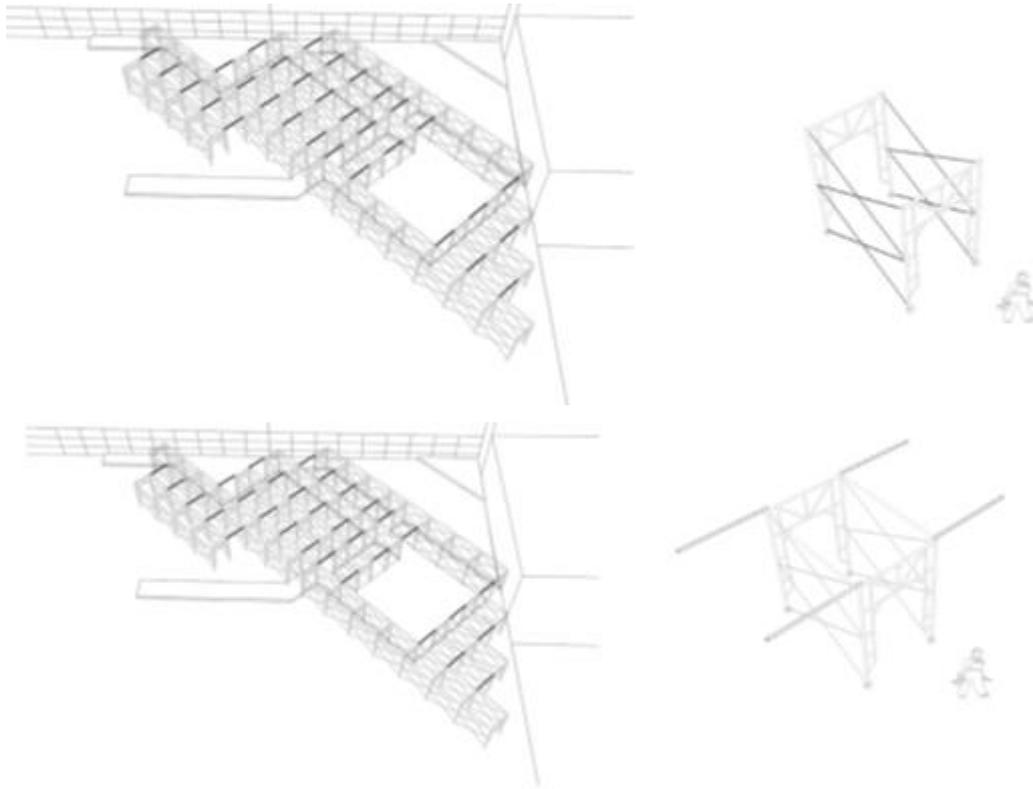


Figure 14 : Structures stabilisante du système - 196 croisillons 3,05m x 1,22m & 40 tubes aluminium de 2,13 m

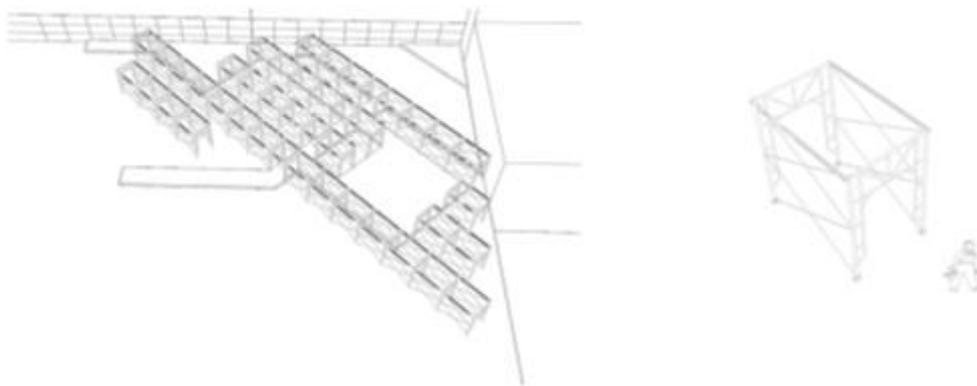


Figure 15 : Structure portante des toiles - 76 tubes aluminium de 3,05m

La surface d'accueil du toit n'étant pas plane, il a fallu adapter les échafaudages pour avoir une structure la plus homogène possible. Un niveau à bulle standard fut utilisé pour ajuster des vis sans fin à la base de chaque structure. De plus, pour protéger le revêtement du toit, une plaque d'isolant de 5 cm de largeur ainsi qu'une coupe de bois de dimension similaire ont été mises sous chaque pied des échafaudages.

2.2 Organisation expérimentale du projet sur le toit du Palais des Congrès

La zone d'expérimentation s'étend sur environ 600 m² pour une superficie de production d'approximativement 350 m² dont environ 170m² de culture pour l'expérimentation. Une cellule soit un rectangle, correspond à une surface autoportante pouvant contenir au maximum 10 toiles.

La figure 16 illustre la disposition des zones d'études et la répartition des toiles et des plantes.



Figure 16 : Schéma de la répartition des membranes et des plantes sur les échafaudages

Le système était défini en fonction de 3 zones (A ; B et C), en fonction des plantes présentes dans la section comme représenté sur la figure 16. La zone A incluait les fraises, la B comportait les laitues et la zone C le basilic thaïlandais. Les zones violettes furent des parties non destinées à la recherche mais pour la promotion marketing du Palais des Congrès avec des plantes sélectionnées en fonction des contraintes d'un tel système. La végétation choisie était principalement de la famille des Lamiacées (herbes aromatiques) ou des Astéracées (diverses salades) ainsi que des Chénopodiacées (bettes à cardes). Chaque chiffre correspond au nombre de membranes et la lettre au type de toile sur la section (« B » → Aquamat blanche ; « N » → Novatex noire ; « G » → Econo50 grise). Dans chaque zone du système expérimental la moitié des toiles avait une orientation Est et l'autre une orientation Ouest pour tester l'influence de l'ensoleillement sur la croissance des plantes.

Tableau 2 : Récapitulatif de la répartition des substrats et plantes par types de membrane

FRAISE	36 toiles	12 toiles blanches 12 toiles noires 12 toiles grises	6 Biches - G9 6 N - G9 6 Gr - G9	6 biches Vermi 6 N Vermi 6 Gr Vermi	6 fraises par toiles soit 216 pieds
LAITUE	54 toiles	18 toiles blanches 18 toiles noires 18 toiles grises	9 Biches - G9 9 N - G9 9 Gr - G9	9 biches Vermi 9 N Vermi 9 Gr Vermi	9-10 laitues par toiles soit 486 pieds
BASILIC	54 toiles	18 toiles blanches 18 toiles noires 18 toiles grises	9 Biches - G9 9 N - G9 9 Gr - G9	9 biches Vermi 9 N Vermi 9 Gr Vermi	7-8 basilics par toiles soit 432 pieds

TOTAL : 144 Toiles

48 toiles blanches
48 toiles noires
48 toiles grises

Le tableau 2 récapitule pour chaque plante sélectionnée, le nombre et le type de toiles destinées pour cette culture ainsi que le substrat qui servira de support pour les végétaux et enfin le nombre de plants par membrane.

Les plantes ont été installées aléatoirement sur les toiles pour obtenir un échantillonnage probabiliste (sélection au hasard) et ainsi produire des estimations plus fiables. (STATISTIQUE CANADA, 2016)

216 plants de fraises « Mara des bois » furent fournis par l'entreprise Ligne Verte et un de ses partenaires pépiniéristes de la région québécoise. - 486 plants de Laitue feuille de chêne verte Regal Oak de l'entreprise TOURNE-SOL-Organic seeds, et 432 plants de basilics thaïlandais Bio de la même entreprise précédemment citée ont été utilisés pour VERTICAL.

Les plants furent semés dans des bacs de semis (54cm x 48 cm x 40mm pour 30 trous de 25 mm x 25mm) avec un terreau inerte pour éviter toute contamination des plants. Ces derniers étaient arrosés 2 fois par jour, dans une zone peu ensoleillée et sous cloche pour garder un milieu humide et favoriser le développement racinaire. Les semis sont restés 3-4 semaines dans ces bacs de culture.

Le nombre de plants installés sur chaque toile fut déterminé en fonction des recommandations des spécialistes hydroponiques rencontrés ainsi que de la disponibilité des plants.

Bien que chaque toile pourrait accueillir près de 24 plants de salades en moyenne par exemple, il fut décidé de placer 10 plants de laitue par toile sur 54 d'entre elles, 6 plants de fraises par toiles pour 36 membranes (toiles) et 8 plants de basilic par toile sur 54 membranes destinées pour cette expérimentation.

Sur chaque zone devant accueillir une plante, une incision a été réalisée dans les toiles pour recevoir le futur pochon contenant la plante. Cette enveloppe était le géotextile feutré TEX-500 de la compagnie TEXEL (2017).

Les jeunes plantules de laitue ont été repiquées au stade 4-5 feuilles, environ 1 mois après leur semis. Les fraises ont été repiquées au stade 3-4 feuilles et les plants de basilic ont été transplantés au stade 2-4 feuilles 21 jour minimum après le semis. (ADAM, 2003)

Pour cette dernière, chaque pochon comprenait 3 à 4 pousses afin d'assurer l'implantation d'au moins une pousse.

La seconde partie du projet fut la mise en place du système de fertilisation et d'irrigation des plantes.

2.3 Le dispositif irrigation – fertilisation

Comme tout système hydroponique basique, une analyse de l'eau d'irrigation est nécessaire pour définir la fertilisation la plus adaptée pour la conduite du projet. En effet, lors du choix des engrais, il est important de considérer le contenu minéral de l'eau d'irrigation. (IQDHO, 2007)

Cette analyse fut effectuée par la chimiste Karin ARSENEAULT du laboratoire AgroEnviroLab à Laval.

Le système d'irrigation-fertilisation a été défini et monté par l'entreprise *Irriglobe* spécialiste en système d'irrigation. Il comprenait un panneau de contrôle avec 3 pompes doseuses reliées chacune à 3 cuves de 60L et d'un système d'irrigation adaptable.

Chaque rangée était connectée à un injecteur. Ainsi le poste de contrôle comprenait 12 injecteurs (12 rangées) pour une répartition égale de l'eau dans l'ensemble du prototype (figures 17 et 18)



Figure 17 : Panneau de contrôle du système d'irrigation – fertilisation



Figure 18 : Système d'injection de la solution nutritive

De plus, un réseau de tuyauterie fixée sur la partie supérieure des échafaudages assurait l'acheminement de l'eau pour l'irrigation – fertilisation des toiles (figure 19).

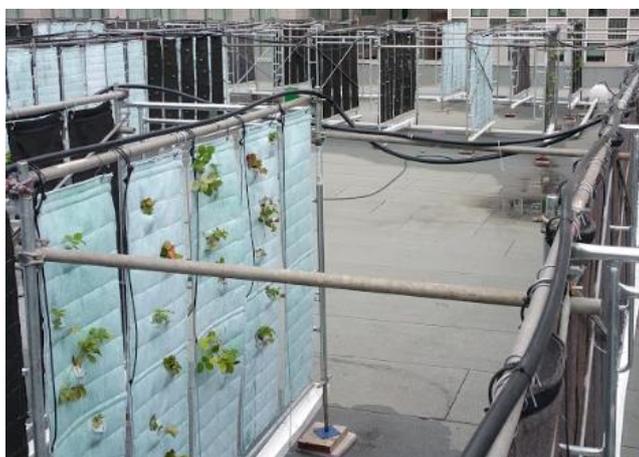


Figure 19 : Réseau de tuyauterie pour l'irrigation - fertilisation

Un logiciel de gestion de l'irrigation nommé « Rachio » a permis l'automatisation de la distribution. Ce dernier a permis de fractionner les apports dans le temps et alterner les solutions.

Le prototype incluait une citerne de 18 000 L contenant l'eau pour alimenter les toiles. La réserve était associée à un détecteur de niveau qui remplissait automatiquement la citerne avec l'eau du réseau hydrique du Palais des Congrès quand le niveau baissait et arrivait à un certain stade. Ainsi il n'y avait pas de risque d'assèchement du système.

Une pompe modèle - US644 - de l'entreprise Éconoeau située dans la citerne envoyait l'eau jusqu'au panneau de contrôle où elle était mélangée avec la solution nutritive pour former la solution fille injectée dans le système.

Une seconde arrivée dans la citerne principale rapportait l'eau usée récupérée après l'égouttement des toiles. Cela était possible grâce à un réseau de gouttières reliées à deux cuves localisées aux extrémités du système (voir figure 7) et connectées à des pompes renvoyant l'eau dans la citerne pour un recyclage de cette solution.

Cependant, pour cette première année de conception, il n'a pas été possible de mettre en place ces plans de fertilisation. Une fertigation commune a été adoptée pour l'ensemble du système et un travail de recherche a été mené pour définir pour les années à venir le système de fertigation le plus optimal pour la conduite de cultures verticales.

La solution nutritive utilisée a été formulée par la compagnie JR PETERS INC.

La composition de cet engrais présentée tableau 3 a été spécialement conçue pour la culture hydroponique (Annexe 4).

Une seconde partie de la fertilisation inclut l'utilisation de nitrate de calcium (13-0-0-18 Ca) dans un second bidon pour éviter toute précipitation des ions calciums avec les ions phosphores de la solution précédente. (PROMIX, 2016)

Ainsi ce nouvel apport fut réalisé dans un bidon séparé du reste de la solution avec un contrôle fréquent du pH pour éviter une alcalisation du système – possible avec une forte concentration en calcium - dangereux pour la conduite des cultures. (CERVANTES, 2011)

Tableau 3 : Composition de la fertilisation

Composition 5-12-26	Proportion
NO ₃ ⁻	5%
P ₂ O ₅	12%
K ₂ O	26%
Mg	6,32%
S	8,21%
B	0,05%
Cu	0,02%
Fe	0,30%
Mn	0,05%
Mo	0,01%
Zn	0,02%

L'analyse de l'eau utilisée pour le projet était une eau avec un pH élevé d'où l'utilisation d'une injection séparée dans le troisième bidon d'acide nitrique à 17% fourni par l'entreprise Guy Dionne hydroculture permettant de maintenir la solution à un pH plus satisfaisant pour la culture de plantes en hydroponie. Le mode d'utilisation de cet acide est en annexe 5.

2.4 Description du mode de fonctionnement de l'irrigation des toiles

Les toiles ont été assemblées par un couturier suite à une concertation avec des spécialistes en hydroponie et mur végétal.

La conformation définitive choisie fut des toiles d'un diamètre moyen de 182 cm découpée en deux sections haute et basse. Chaque section est composée de 28 cases pouvant potentiellement accueillir une plante.

L'irrigation-fertilisation est exécutée par 2 tuyaux en plastique flexible connectés à la tuyauterie fixée à la structure des échafaudages. Ces tuyaux sont reliés à un système de goutteurs s'insérant dans les orifices dédiés à cette fonction dans leur partie supérieur et la partie centrale des toiles. Comme on peut l'observer sur la figure 20, la partie supérieure comprend 2 lignes de 3 goutteurs alors que la partie inférieure présente seulement 1 ligne de 3 goutteurs pour l'irrigation-fertilisation. Cette conformation a été sélectionnée après la réalisation de tests sur l'humification de ces toiles. Ainsi l'eau imprègne la membrane de l'intérieur puis ruisselle le long de la surface de la toile. Le surplus est ensuite capté par le système de gouttière.

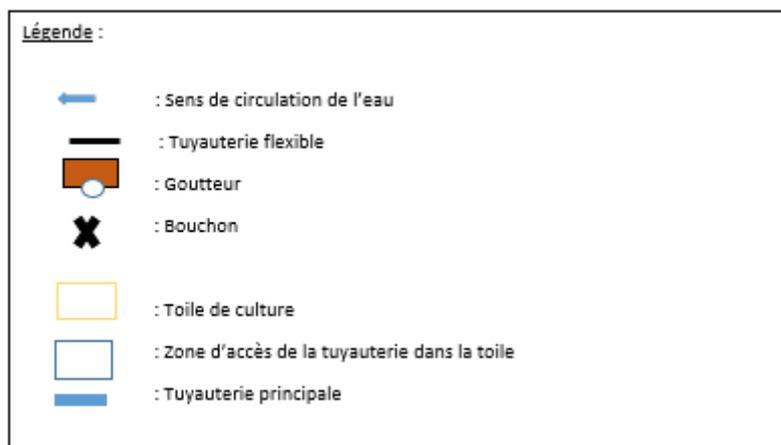
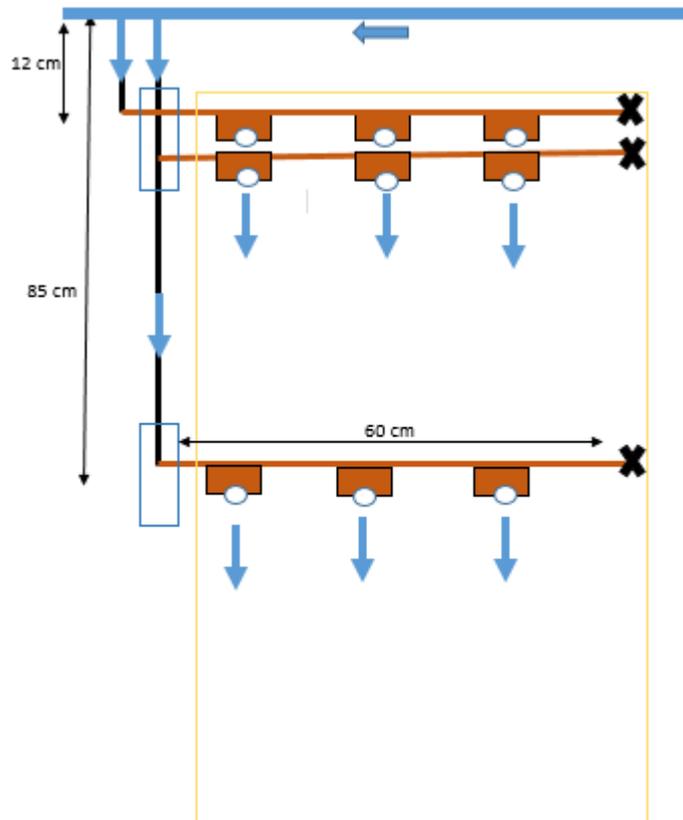


Figure 20 : Dispositif d'irrigation des toiles

La conception du système expérimental a inclus 234 toiles dont 144 en monocultures et 90 en cultures mixtes diverses de dimension moyenne (figure 21) :

- 138 toiles Feutre Econo50 (grise) - 179*52 cm – 0.5 kg poids sec (Annexe 6)
- 48 toiles Novatex 120 (noire) – 180*52 cm – 1 kg poids sec (Annexe 7)
- 48 toiles Aquamat (blanche) - 187*51 cm – 0.5 kg poids sec (Annexe 8)

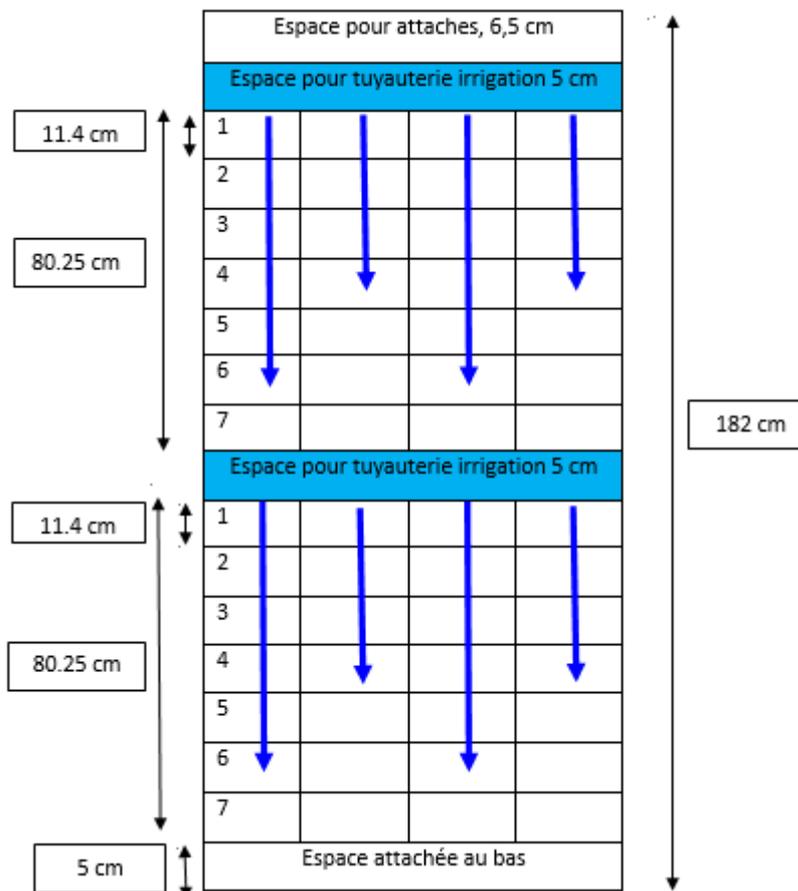


Figure 21 : Schéma descriptif du fonctionnement des toiles de culture

D'après le projet de « Paris sous les fraises » et des conseils de la spécialiste Marie-Line GAGNON, une pochette a été définie comme la méthode la plus intéressante pour accueillir les plantes et le substrat dans la toile. Cette pochette de dimension carré (12x12 cm) était du géotextile feutré TEX-500 provenant de l'entreprise *Teris*, spécialiste en horticulture et jardinage.

Comme ce prototype était novateur, deux types de substrats ont été testés : un organique, Terreau G9 (FAFARD, spécialiste en hydroculture, annexe 9) et un inorganique, la vermiculite. Ces deux produits ont été fournis par l'entreprise *Teris*. Sur chaque section, les toiles associées à la vermiculite ont été marquées d'une pastille verte et les toiles associées au G9 ont reçu une pastille jaune.

Chaque pochette comprenait entre 100 et 150 g de substrat détassé au préalable, dépendant de la densité du système racinaire de la plante.

Les toiles étaient fixées à la structure de l'échafaudage grâce à des œillets réalisés sur les angles supérieurs permettant leur fixation aux tubes d'aluminium à l'aide de crochets.

Des œillets furent également réalisés sur les parties inférieures des toiles permettant ainsi de les relier les unes aux autres afin de stabiliser l'ensemble de la structure. De plus, des tubes de fer ont été fixés et suspendus au bas des toiles pour limiter qu'elles s'envolent et ainsi contrer les effets du vent.

3 Le projet VERTical en serre

3.1 Lieu d'expérimentation

À Montréal, le temps varie entre 30 et - 30 degré Celsius donc à partir de mi-novembre, un système expérimental fut installé en serre. L'expérience s'est déroulée dans le complexe des serres de haute performance de l'Université du Québec à Montréal, l'un des plus sophistiqués au Canada. La serre d'une dimension de 39 m² était équipée de systèmes permettant un contrôle précis du climat (température, humidité relative, lumière). La ventilation était à la fois naturelle et forcée. L'humidité était contrôlée par un système de brumisation à l'eau osmosée.

L'éclairage était assuré par des lampes à sodium de 600 watts permettant le maintien d'une intensité lumineuse à raison de 20 W/m², afin d'assurer une photopériode de 18 heures minimum quand l'éclairement naturel était faible (temps nuageux). (CLA, 2006)

3.2 Description du dispositif expérimental

Les toiles Econo50 et Aquamat furent choisies selon les premiers résultats du système conçu sur le toit du palais des congrès. Le prototype comprenait 5 toiles des deux modèles. Trois toiles de chaque étaient croisées avec du terreau G9 et les autres avec de la vermiculite.

La culture de la Laitue feuille de chêne verte Regal Oak de l'entreprise TOURNE-SOL-Organic seeds fut choisie pour les phases de tests pour sa simplicité de production et sa relative rapidité de croissance pouvant apporter des informations sur le système plus rapidement qu'une autre culture. Les fraises et le basilic ne seront pas développés pour cette première année d'expérience en serre.

Les semis ont été réalisés selon les mêmes procédés utilisés pour le projet du Palais des Congrès et le même géotextile a servi à confectionner les pochettes de croissance.

Le système de fertigation était aussi similaire (goutteurs) avec deux bacs de contenance 50L et une pompe Mondi 1200X gold series permettant une alimentation du système (figure 22).

Une série de tests fut nécessaire pour la finalisation de ce prototype dans le but de définir le cycle d'irrigation. Un cycle de 15 minutes toutes les heures fut choisi avec un minuteur 24H – programmable avec intervalle minimum 15 min assurant le fonctionnement du système. Le choix de ces paramètres s'est basé sur le rapport du centre pour la lutte antiparasitaire du ministère de l'agriculture et agroalimentaire Canada (CLA, 2006).

Un programmeur fut installé au niveau de l'accès d'eau pour recharger deux fois par jour le système.

La fertilisation apportée fut adaptée pour la culture de salade en hydroponie selon un mélange réalisé par l'entreprise Hydro DIONNE. Elle comprenait une solution A de composition 5-0-2 et une solution B de composition 1-5-8 (tableau 4).

L'application a été réalisée selon le mode d'emploi défini dans l'annexe 10.

Tableau 4 : Composition des engrais pour la fertilisation des murs

Composition solution A	Proportion	Composition solution B	Proportion
NO ₃ ⁻	5%	NO ₃ ⁻	5%
P ₂ O ₅	5%	K ₂ O	2%
K ₂ O	8%	Mg	3%
Mg	0,8%	S	1,86%
S	1,86%	Cu	0,001%
B	0.011%	Ca	3,8%
Cu	0%	Fe	0,08%
Fe	0%	Mn	0,025%
Mn	0%	Agent chélatant	0,59%
Mo	0,002%	Zn	0,009%
Zn	0%	Ca	3,8%

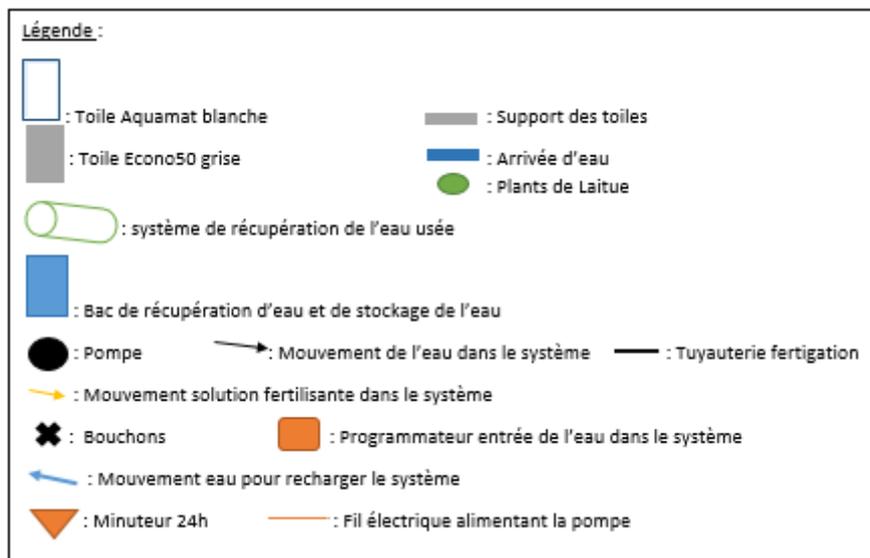
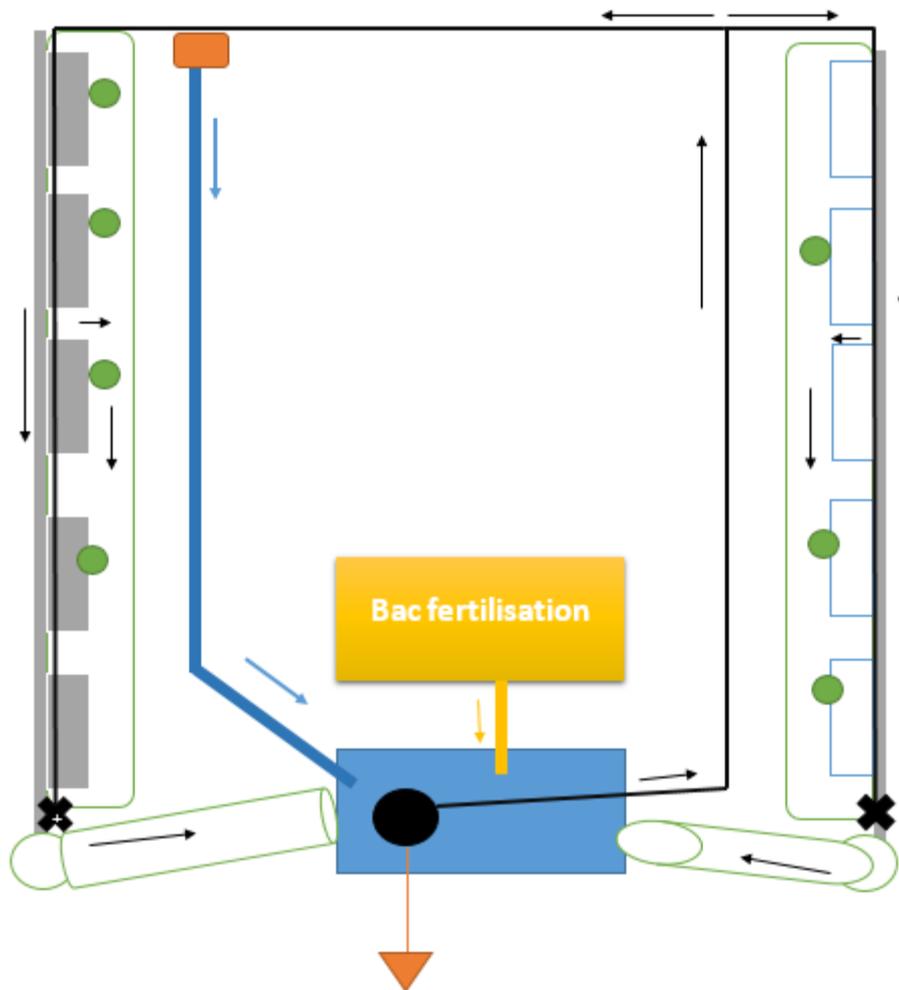


Figure 22 : Représentation schématique aérienne du prototype en serre

Ce prototype doit permettre de réaliser une comparaison par rapport au système extérieur soumis à de multiples contraintes (vent, température, luminosité, etc) non présentes en serre.

4 Mesures

4.1 Estimation des rendements

Les rendements estimés pour le système sur toit ont été réalisés en fonction de valeurs de productivité en culture hydroponique :

- La fiche technique sur la laitue sous abri hors sol - chambre d'agriculture de la Martinique (2007)
- La fiche technique de la Mara des bois - SARL Marionnet (2017)
- L'étude de la fertilisation du basilic en hydroponie – TESI (1995).

De même, la rentabilité du système a été déterminée selon les cultures qu'il serait possible de produire sur les toiles telles que les fleurs comestibles et diverses variétés de plantes aromatiques (rares ou communes).

Puis la valeur de la potentielle productivité a été comparée aux immobilisations récapitulant les coûts de la conception du projet.

4.2 Estimation besoins en eau

- Première phase d'expérimentation pour l'analyse de la rétention en eau des toiles

A partir de mi-août, une série de tests a été réalisée pour tester le comportement des toiles en fonction des conditions climatiques durant les journées d'expérimentation (figure 23).

Dans un premier cas, les toiles ont été trempées dans des bacs de 18L d'eau (dimension - 47.5x34.5x11.5cm) pendant plusieurs minutes puis suspendues à des balances pour analyser la vitesse d'évaporation en fonction de l'influence du vent et du soleil.

Dans un second temps, un système d'irrigation a été installé avec un régulateur de débit (3,33L/min) et le système final de goutteurs qui sera utilisé pour la suite du projet. Des balances pour mesurer leur poids au cours du temps ainsi que des bacs à la base complètent le protocole expérimental. Le but de ces bacs était d'estimer la quantité d'eau libérée sur une période donnée afin de déterminer le volume d'eau évaporée en fonction de la quantité d'eau injectée dans le système. Les balances testent la saturation des toiles et estiment la quantité d'eau nécessaire pour une bonne irrigation du système et des toiles. Cette expérience selon le même protocole fut réalisée plusieurs fois à des dates différentes pour avoir le résultat le plus pertinent concernant le comportement des toiles durant l'irrigation et avec des conditions climatiques différentes.



Figure 23 : Dispositif expérimental des tests de rétention des toiles en condition réelles

- Le calcul de l'évapotranspiration sur le toit du Palais des Congrès puis des besoins en eau des plantes.

Dans un second temps, pour définir le cycle d'irrigation pour la première année de fonctionnement, un calcul de l'évapotranspiration (ETP) potentielle sur le toit du PCM a été réalisé.

Ainsi, l'évapotranspiration maximale d'une culture correspond à la quantité maximale d'eau que la culture est susceptible d'évaporer lorsqu'elle est placée dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ, soit les besoins en eau des cultures.

Ces calculs se sont appuyés sur la formule de TURC présentée figure 24. (BORRELL ESTUPINA, 2011) Cette formule d'estimation de l'ETP englobe l'évaporation et la transpiration des plantes et permet de déterminer la valeur de ce paramètre selon les mois. Les calculs ont été réalisés pour la période Mai à Septembre, ce qui correspond à la phase de production.

Formule de Turc (1961)

Formule Mensuelle/Journalière

Si $hr \geq 50\%$
(en moy sur la période)

$$ETP = 0.013 * J * (Rg + 50) * \left(\frac{T}{T + 15} \right)$$

ETP : ETP en mm/période

J : nombre de jours ($J > 7$)

T : T °C température moyenne sur la période

hr : Humidité relative de l'air (%) moyenne sur la période

Rg : radiation solaire globale moyenne, en $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$
($1\text{W}/\text{m}^2 = 2.065 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$)

$$Rg = Iga * (0.18 + 0.62 * h / H)$$

Iga : radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$)

h/H : durée réelle d'insolation maximale possible (varie entre 0.1 et 1)

Figure 24 : Formule de calcul de l'évapotranspiration (BORRELL ESTUPINA, 2011)

Les valeurs météorologiques pour le calcul des ETP ont été fournies par Météo Média (2016). Le calcul de l'Iga est réalisé à partir de la base de données géographiques (annexe 11) et de la latitude de Montréal.

La détermination de l'ETP sur le toit du Palais des Congrès permet de définir les besoins des plantes selon ce paramètre et les coefficients culturaux (kc). Ces derniers retranscrivent les particularités de chaque type de plante à un stade de développement donné.

Ainsi, l'évapotranspiration maximale se définit par : **ETM = kc * ETP**. (PERRIER, 1975)

PEREIRA *et al* (1995) proposent une base théorique pour quantifier les modifications du kc en fonction des variations du vent et de l'humidité :

$$kc' = kc + [0,04.(u - 2) - 0,004(\Theta - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} u : \text{la valeur moyenne journalière du vent à 2 m de hauteur (m/s)} \\ \Theta : \text{la valeur moyenne de l'humidité relative journalière (\%)} \\ H : \text{hauteur moyenne de la culture (m)} \end{array} \right.$

Les bases de données qui ont permis le calcul de cette valeur sont en annexe 12. Le taux de rétention des toiles lors des tests et le calcul des besoins en eau du système vont permettre par la suite de déterminer les cycles d'irrigation et de la fertilisation à adopter pour le système.

4.3 Estimation de la fertilisation

La conduite du système a nécessité une période de recherches bibliographiques et d'entrevues avec des spécialistes pour définir la fertilisation à adopter tant pour le système que pour les cultures mises en place.

Dans un premier temps, les fertilisations avec les concentrations idéales des éléments ont été établies. Les résultats se basent sur plusieurs études dont celles menées par le CTIFL (2003) et sur les valeurs de la fertilisation de laitues en hors-sol de la Chambre d'Agriculture de Martinique (2007) ainsi que sur les recherches de GAGNÉ (2016) et Tesi *et al.* (1995) pour la culture de basilic.

Dans un second temps, en fonction du système d'irrigation-fertilisation mis en place pour le projet, la solution nutritive de base a été adaptée et définie avec l'aide du guide de référence en fertilisation (2^{ème} édition) du CRAAQ (PARENT *et al.*, 2011)

Pour le calcul de la quantité d'engrais à ajouter à la solution de base les variables sont les suivantes :

- Taux d'application de 150 ppm d'azote – 150 mg/litre. (PARENT *et al.*, 2011)
- Ratio d'injection de 1 : 50
- Engrais 5-12-26 et 13-0-18 Ca
- Volume du réservoir : 60 L

La formule nécessaire pour calculer la quantité d'engrais à ajouter est la suivante (PROMIX, 2016) :

$$\frac{\text{concentration désirée en ppm} \times \text{facteur de dilution}}{\% \text{ de l'élément dans l'engrais} \times \text{facteur de conversion}}$$

Le facteur de conversion est déterminé selon l'unité du résultat. Il faut utiliser un facteur de 10 pour obtenir des g/L.

L'estimation de la fertilisation et des besoins en eau du système vont permettre de tester pour la première fois la croissance des plantes selon ce mode de culture.

4.4 La croissance des plantes

Lors de leur mise en place sur les murs début septembre, deux plants sur chaque toile dans chaque section ont été sélectionnés. Les végétaux étudiés furent choisis selon les variables qualitatives tout en optant pour les plants à la croissance similaire. Les plantes tests ont été marquées d'une pastille bleue afin de toujours mesurer les mêmes rameaux. Les mesures ont été réalisées hebdomadairement en utilisant une règle graduée.

Cependant, au vu du commencement tardif de l'expérimentation et des conditions climatiques compliquées, la croissance des plants n'a pas été optimale et les plantes n'ont pas eu les rendements escomptés.

Pour les salades, le nombre de feuilles fut compté et une taille moyenne de la plante a été calculée.

Pour les fraises, le nombre de couronnes, de feuilles, de hampes florales et de ramifications ont été recensés.

Et pour le cas du basilic, la taille de la partie aérienne ainsi que le nombre de feuilles et de ramifications ont été dénombrés.

Les données de croissance ont ensuite été analysées en réalisant des courbes de croissance et en calculant les croissances moyennes et les écart-types sur Excel 2016.

Un recensement de la mortalité des plants selon le substrat et le type de toile a été réalisé au cours de l'expérimentation pour analyser leurs comportements selon ces paramètres et obtenir de nouvelles informations sur l'emploi de ces matériaux pour la pratique culturelle de murs comestibles.

4.5 Les tests de pH et de conductivité

Les tests du pH et de la conductivité sont deux paramètres importants dans la conduite d'un système hydroponique. Ainsi des mesures ont été effectuées 2 à 3 fois par semaine pour contrôler les variations.

En premier lieu, le pH et la conductivité de la solution fille (mélange solution nutritive concentrée et eau de la citerne principale) étaient testés. Puis, dans chaque section, les tests ont été réalisés à partir de l'eau drainée prélevée directement à la base des toiles. Les mesures ont été réalisées suivant les règles définies pour l'utilisation du pHmètre *Champ* by HANNA (Annexe 13) et du conductimètre ECOTest EC high (Annexe 14).

Les appareils étaient étalonnés avant toute utilisation avec des solutions d'étalonnage.

4.6 Le prototype en serre

Une mesure de la croissance des plants selon la méthode précédemment citée a été réalisé sur les plants du prototype en serre.

De même, des mesures journalières du pH et de la conductivité de la solution fille et de l'eau usée furent effectuées.

Cependant après un fort développement d'algues sur les toiles, un kit RAPITEST a été utilisé selon le protocole standard (Annexe 15) pour estimer grossièrement les quantités d'azote, de phosphore et de potasse dans le système. Les résultats devaient permettre de définir la ligne de conduite pour la fertilisation du système.

5 Traitement statistique

5.1 Box-plots

Les box-plots ou boîtes à moustache ont été réalisés pour analyser les valeurs du pH et de la conductivité au cours de l'expérimentation. Ce type de graphique permet d'analyser plus facilement le profil essentiel d'une série statistique quantitative comme les médianes, les valeurs maximales et minimales et leur homogénéité.

5.2 Régression linéaire

Des modèles de régressions linéaires ont été réalisés pour évaluer les taux de rétention des toiles. En effet, en établissant une relation linéaire entre une variable expliquée et une ou plusieurs variables explicatives, il est possible d'obtenir des ajustements affines. Cela consiste à chercher la droite permettant d'expliquer le comportement d'une variable statistique y (taux de rétention) comme étant une fonction affine d'une autre variable statistique x (le temps).

5.3 Analyse de la variance à mesures répétées (ANOVA)

L'Anova permet de déterminer si plusieurs échantillons appartiennent à une même population. Elle est utilisée afin de comparer les valeurs mesurées de la croissance des plantes sur chaque modalité (toiles, substrats, position sur la toile). Ainsi on peut déterminer si les différences constatées sont dues au hasard de l'échantillonnage ou bien traduisent une réelle différence. L'analyse des différences entre modalités est réalisée avec un intervalle de confiance de 95% et 99% s'il y a une signification à la valeur précédente.

Pour les variations de pH et de conductivité selon le type de toile et le substrat, des Anovas avec interactions ont été réalisées.

Chaque analyse fut accompagnée d'un test de Tukey. Ce dernier permet de faire des comparaisons multiples et détermine les différences significatives entre les moyennes de groupes.

L'ensemble des traitements statistiques a été effectué à l'aide du logiciel Excel Stat 2017. (XLSTAT COMPANY, 2017)

PARTIE 3 : Résultats et discussion

1 Caractéristiques techniques du projet VERTIcal

1.1 Chiffrage du système VERTIcal

1.1.1 Estimation des rendements

Selon la fiche technique de la laitue hors sol (2007), il est possible de produire une salade en 35 jours environ, en comptant le vide sanitaire entre chaque culture, selon les variétés et la période de plantation.

Ainsi en estimant produire une salade dans les mêmes délais qu'en hydroponie basique, il serait possible de produire sur la période Mai – Septembre, 5 récoltes de salades.

De même avec une densité de 17 pieds/m², les rendements escomptés peuvent atteindre entre 1.5 et 3.5 kg/m² en hors-sol.

Ainsi pour 54 toiles d'environ 1m² chaque et pouvant contenir 24 pieds de salade, on obtiendrait 3.5 kg/toiles en moyenne soit 945 kg de laitue/année d'exploitation.

Cependant pour cette première année d'expérimentation, face à plusieurs contraintes, seulement 10 laitues ont été installées sur les toiles. Ainsi pour cet été, les rendements escomptés étaient d'environ 80 kg.

La SARL MARIONNET (2017) a estimé pour la culture hors-sol de la Mara des bois un rendement variant de 5 à 10 kg/m² pour une densité de 5 à 10 plants/m² selon la densité et la technicité.

En transposant ces données au système VERTIcal, il serait possible de produire la même quantité par toile (6 plants/toiles) soit pour 36 toiles environ 270 kg.

Pour le cas du basilic, le rendement potentiel est estimé à 25 t/ha pour des densités de semis d'environ 11 pieds/m². (TESI, 1995) Ainsi, pour une densité de 8 pieds/m² on peut estimer produire 18t/ha soit une centaine de kilos pour 54m².

Le calcul de ces rendements par densité a permis d'estimer la productivité du projet VERTIcal et sa rentabilité, un des enjeux du développement du système.

1.1.2 Discussion et proposition pour le choix des cultures

Comme expliqué précédemment, les retards pris dans la conception du système n'ont pas permis de sélectionner les cultures présentant les caractéristiques les plus adaptées pour la culture verticale sur murs comestibles.

La géolocalisation du site de production est un atout non négligeable puisque on dénombre des dizaines d'hôtels, restaurants ainsi que le traiteur Capital Traiteur du Palais des Congrès qui sont toujours intéressés par des produits sortant de l'ordinaire et recherchés tels que le Shiso, l'hibiscus et les fleurs comestibles (Johnny jump up, bourrache, bourrache égyptienne, soucis, etc.). (CHEF'S GARDEN, 2016) La conservation des produits serait possible grâce à la mise à disposition d'une chambre froide dans le complexe du Palais des Congrès.

Les variétés de fraises Albion et Monterey présentent les qualités pouvant s'adapter au mur comestible (résistances maladies, tolérance à la chaleur, productivité et qualité gustative). La première s'adapte bien aux différents modes de culture. La seconde est l'une des variétés résistant le mieux à la chaleur même si la tenue des fruits se dégrade rapidement ce qui peut réduire leur mise en marché. (GAGNÉ, 2016)

Ainsi, les fraises à jours neutres dites « fraises d'automne » semblent les plus intéressantes pour la suite des expérimentations. Cependant, ces variétés remontantes requièrent de l'attention puisque durant la période de floraison si les températures excèdent les 25 degrés Celsius, les fleurs peuvent avorter. (MARIONNET, 2017)

Sur le modèle développé par Général hydroponic Europe, le choix de la culture est important pour justifier l'investissement réalisé sur des projets hydroponiques. (KEHDI, 2017)

Une enquête a été commencée pour étudier le marché actuel. Cependant, cette étude de marché n'a pas pu être mise en place par manque de temps.

Pour la suite du projet, il serait intéressant de déterminer la zone d'activité, le rayon d'action idéal ainsi qu'identifier les potentiels clients en fonction des plantes pour lesquelles ils seraient intéressés :

- Quels sont les fruits et légumes frais qu'ils ont du mal à trouver ?
- S'ils avaient un fournisseur plus proche, combien de fois iraient-ils par semaine/mois ?
- Seraient-ils intéressés s'ils les trouvaient plus rapidement, frais et produits localement ?

1.1.3 Rentabilité

Dans une première phase de développement, le coût global du système a été calculé figure 25. Les immobilisations corporelles (matériel technique) représentent 82% de l'investissement total avec plus de 82 000 dollars canadiens (soit environ 57 000 euros). Le reste du coût correspond à la mise en place du système et son entretien. Pour terminer, une marge de 10% a été inclus pour prévoir tous problèmes.

Démarrage 2016

Superficie de culture (m2) Immobilisation	500
- échafaudages et plateforme	34 000,00 \$
- membranes	10 000,00 \$
- protection/revêtement sol	9 785,37 \$
- matériel d'irrigation	8 000,00 \$
- Toile, coupe vent, ombrière	15 000,00 \$
- matériel informatique et sondes	2 000,00 \$
- cabanon technique	3 500,00 \$
Sous-total	82 285,37 \$
frais installation et administration	
- main d'œuvre - mise en place	8 501,85 \$
- temps de gestion	7 500,00 \$
Sous-total	16 001,85 \$
Total	98 287,21 \$
FRAIS DE CONTINGENCE (10%)	9 828,72 \$
Grand total	108 115,94 \$

Figure 25 : Récapitulatif des immobilisations du projet VERTIcal pour l'année 2016

Le calcul de la rentabilité du projet a été généré selon une moyenne des prix des légumes sur le marché. (DUCHEMIN, 2016)

Plusieurs scénarios ont été imaginés pour évaluer les dimensions du système productif le plus rentable (figure 26). Le premier modèle représente le projet actuel avec ses dimensions et les plantes sélectionnées.

Scénario 2016				m ²			m ²			m ²			m ²		
	rendements suggérés	Unité	%	350			925			1840			4000		
fraises rares	2,22	kg/m ²	25%	194,25	kg	8\$/kg	513,375	kg	8\$/kg	1021,2	kg	8\$/kg	2220	kg	8\$/kg
fraises communes	2	kg/m ²	25%	175	kg	12\$/kg	462,5	kg	12\$/kg	920	kg	12\$/kg	2000	kg	12\$/kg
fleurs comestibles	60	unités/m ²	10%	2100	unités	0,25\$/ l'unité	5550	unités	0,25\$/ l'unité	11040	unités	0,25\$/ l'unité	24000	unités	0,25\$/ l'unité
aromatiques rares	2	kg/m ²	20%	140	kg	70\$/kg	370	kg	70\$/kg	736	kg	70\$/kg	1600	kg	70\$/kg
aromatiques communes	2	kg/m ²	20%	140	kg	70\$/kg	370	kg	70\$/kg	736	kg	70\$/kg	1600	kg	70\$/kg
Total fraises				369,25	kg	3692,5	975,875	kg	9758,75	1941,2	kg	19412	4220	kg	42200
Total aromates				400	kg	28000	740	kg	51800	1472	kg	103040	3200	kg	224000
Total fleurs				2100	fleurs	525	5550	unités	1387,5	11040	unités	2760	24000		6000
Total vente				32217,5			62946,3			125212			272200		

Figure 26 : Estimation de la productivité et du chiffre d'affaire selon différentes dimensions du système de production

La technique des « murs comestibles » coûte environ 333\$ le mètre carré cultivable, ce qui comprend le matériel, l'expertise et la main d'œuvre. A titre comparatif, le projet Lufa Farm - une serre de près de 800 m² sur le toit d'un ancien entrepôt montréalais désaffecté - a coûté près de 700\$ le mètre carré. (DUCHEMIN, 2016)

En comptant l'espace perdu pour circuler entre les allées et la superficie cultivable potentielle, le montant avoisine environ 1.000 Dollars canadiens le mètre carré.

Les espaces libérés pour des événements peuvent être loués pour générer une nouvelle source de revenu qui pourrait se chiffrer pour des tarifs allant de 300 à 1000\$ la location à près de 20 000\$.

Ainsi selon les différents revenus, il serait possible de réaliser un chiffre d'affaire annuel de 52217.5 dollars canadiens. Il faudrait donc au minimum 2 ans pour rentabiliser l'investissement initial et commencer à générer du profit.

Un scénario impliquant la mise en place de plantes sur les 2 faces des toiles a été également imaginé. Dans ce cas, en doublant la surface de production, les rendements seraient doublés et les bénéfices également en passant à environ 63 000 dollars canadiens pour le côté production végétal.

L'estimation de ces valeurs est à mettre au conditionnel puisque ce scénario est idéal dans les rendements et ne comprends pas les maladies et ravageurs qui peuvent engendrer des dégâts dans les cultures et limiter la production. Cependant en prenant l'exemple de la ferme Lufa farm également située à Montréal, les investissements réalisés n'ont été rentabilisés qu'une dizaine d'années après la mise en place du système de production. Le projet VERTICAL présente donc aussi des atouts intéressants du point de vue financier.

1.2 Estimation consommation en eau

1.2.1 Tests de rétention des toiles

Durant la première phase de test, les toiles ont été pesées puis ensuite trempées pendant plusieurs minutes avant d'être suspendues à une balance pour jauger leur vitesse d'évaporation. La base de donnée répertoriant les valeurs est en annexe 16.

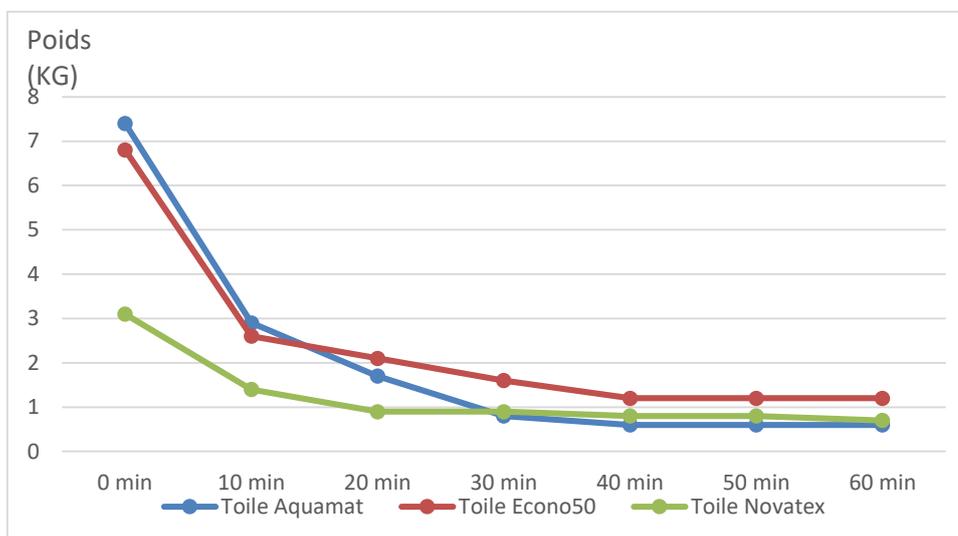


Figure 27 : Évolution du poids en eau des toiles dans le temps

Des premières observations réalisées, la toile Aquamat semble avoir le meilleur taux de rétention avec une quantité de 6,9 L d'eau après avoir été suspendue. La toile Econo50 présentait un taux de rétention intéressant également avec 5.8 L d'eau. Par contre, la toile Novatex semble peu retenir l'eau en comparaison avec les 2 autres modèles avec seulement une différence de 2.6 kg après pesée (figure 27).

Mais les poids des toiles ont très vite chuté jusqu'à être divisés par deux au bout de 10 min. Ainsi on peut infirmer ou confirmer que les trois membranes ont des réponses différentes à l'absorption de l'eau et à l'évaporation face aux facteurs abiotiques divergents.

Lors de la seconde phase du test, en faisant fonctionner le système d'irrigation final, l'eau perle sur les membranes et pénètre peu. En comparaison avec la première expérience, les mesures de poids des toiles après 5 min sont moins importantes.

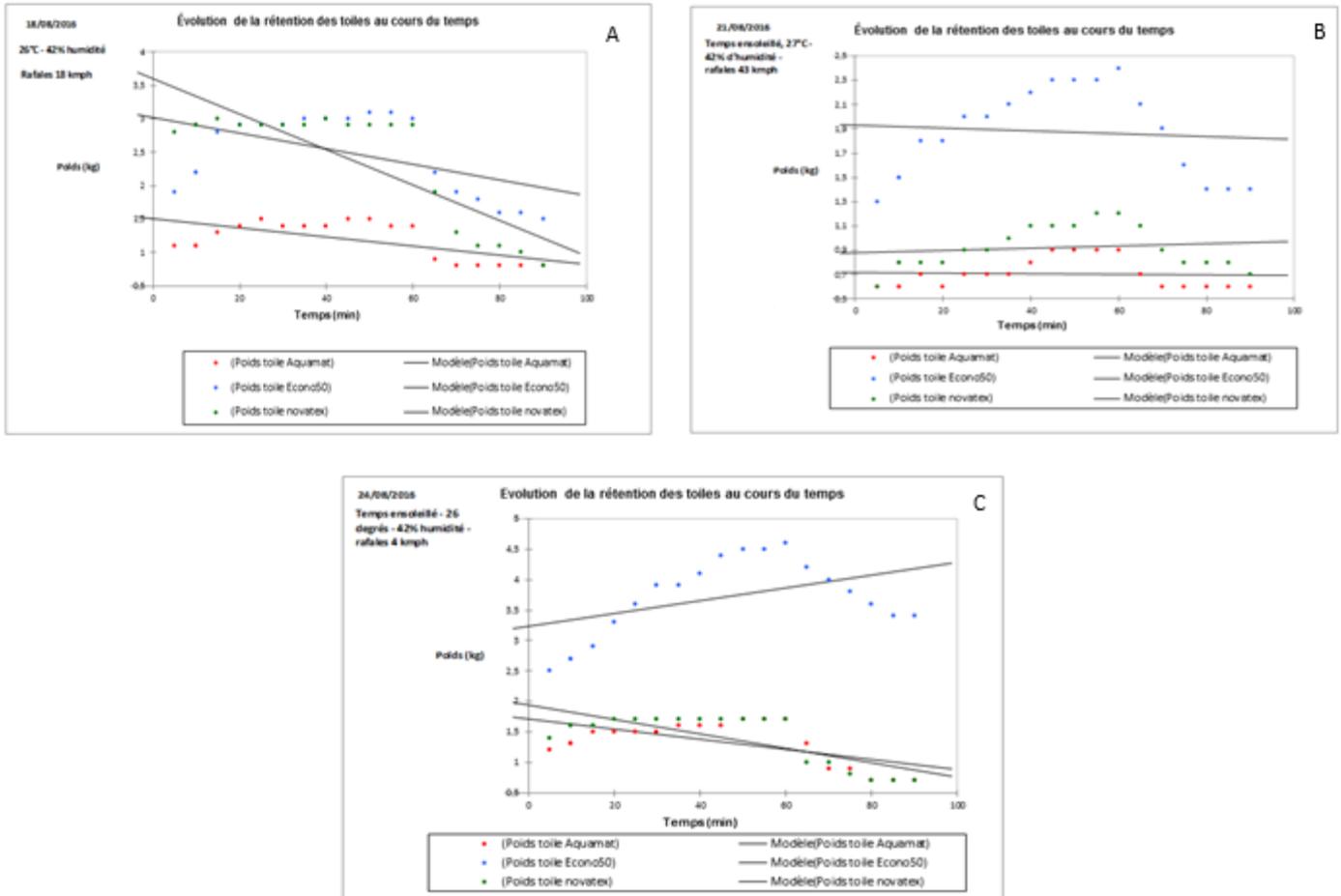


Figure 28 : Schémas récapitulatifs des régressions linéaires des poids en eau des toiles en fonction du temps à différents moments

On constate que les toiles Econo50 et Novatex absorbent plus l'eau que l'Aquamat (figure 28). Cependant, on remarque que lors de l'arrêt de l'irrigation après 60 min de tests, le poids des toiles chute relativement vite. En particulier, la toile Novatex a des courbes de régression qui chutent plus vite que les deux autres lors des tests A et C (figure 28). Cela signifie que cette toile n'a pas un pouvoir de rétention élevé. Il semble également que le pouvoir de rétention des deux autres modèles de toile soit également limité dans le temps. Elles auront besoin d'être régulièrement irriguées, au risque d'assécher la zone autour des racines et provoquer un stress hydrique potentiellement fatal pour la plante.

De plus, en comparant les graphiques entre eux on observe une influence des conditions climatiques. En effet, le poids des toiles augmente rapidement lors de l'expérience menée le 24 Août en comparaison avec les tests les jours précédents. Lors de ce test la force du vent était moins importante. (WEATHER FINDER, 2017) On peut en déduire que le vent joue un rôle significatif dans l'évolution de l'évaporation des toiles.

Ces expérimentations sur le comportement des toiles lors de l'irrigation (en continu avec goutteurs et débit constant) ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques des toiles :

- La toile Aquamat blanche libère deux fois plus d'eau que les autres toiles avec répartition de l'eau hétérogène sur sa surface et beaucoup de gouttes qui ruissellent sans rester captées à l'intérieur de la structure.

- La toile Novatex noire semble pour sa part bien humidifiée avec une répartition homogène de l'eau sur l'ensemble de la structure. C'est la toile qui s'est le plus rapidement imbibée.
- La toile Econo50 semble retenir l'eau à l'intérieur de sa structure puisque l'extérieur est peu humide. Il y a moins de pertes d'eau comparé aux deux premières.

Dans les conditions de tests avec un débit d'environ 3,33 L/min, et des bacs de récupération de 18L (47.5x34.5x11.5), il a été possible de calculer la quantité d'eau retenu dans la toile et la partie perdue soit par ruissellement soit par évapotranspiration.

Pour 199.8 L injecté dans le système en une heure, avec les conditions climatiques sur le moment, les toiles ont relâché :

- Toile Aquamat : 72 L
- Toile Econo50 : 36 L
- Toile Novatex : 54 L

Ainsi, près de 32L se seraient évaporés ou ont été perdus durant l'expérimentation soit environ 16 % des ressources hydriques injectées.

En conclusion, les besoins en eau de la membrane blanche sont plus grands que ceux avec la membrane en laine recyclée. Ainsi si les toiles blanches devaient être sélectionnées il serait nécessaire de faire fonctionner le système en continu comme une culture NFT.

Les membranes grises semblent mieux retenir l'eau en comparaison avec les deux autres testées. Ceci signifie que le projet futur devrait être muni de plusieurs pompes ou d'un système de contrôle à cycles variables selon les sections. De plus, l'utilisation d'un textile perméable pour les pochons est nécessaire pour maintenir une certaine humidité durant la culture.

1.2.2 L'évapotranspiration sur le toit du Palais des Congrès et de la consommation en eau

Comme expliqué précédemment, l'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évaporation et la transpiration des plantes sur un site donné.

En utilisant la formule de Turc lorsque l'humidité relative est supérieure à 50%, (BORRELL ESTUPINA, 2011) puis la formule de PEREIRA *et al* (1995), il est possible d'évaluer les besoins mensuels en eau, de Mai à Septembre (tableau 5).

Tableau 5 : Récapitulatif des besoins mensuels en eau (ETM)

Mois	ETP (mm)	kc' laitue	kc' fraisier	ETM laitue (mm)	ETM fraisier (mm)
Mai	49,3	0.38 - 0.68	0.38 - 0.58 - 0.88 - 0.68	18.7 - 33.5	18.7 - 28.6 - 43.4 - 33.5
Juin	57,6	0.36 - 0.68	0.36 - 0.56 - 0.86 - 0.68	20.7 - 39.2	20.7 - 32.3 - 49.6 - 39.2
Juillet	60,9	0.35 - 0.65	0.35 - 0.55 - 0.85 - 0.65	21.2 - 39.4	21.2 - 33.3 - 51.5 - 39.4
Août	51,5	0.33 - 0.63	0.33 - 0.53 - 0.83 - 0.63	17.0 - 32.4	32.4 - 27.3 - 42.7 - 32.4
Septembre	39,5	0.33 - 0.63	0.33 - 0.53 - 0.82 - 0.63	13.0 - 24.9	13.0 - 20.9 - 32.3 - 24.9

La laitue présente deux coefficients culturaux, l'un pour la phase de plantation et l'autre pour la phase de croissance active jusqu'à la récolte.

Pour le cas du fraisier, il y a 4 coefficients culturaux (plantation ; début floraison ; floraison, grossissement des fruits jusqu'à la cueillette). Les valeurs pour les calculs de kc' se trouvent en annexe 7.

On constate que les pertes seront importantes notamment durant les mois de juin et juillet. On peut estimer des pertes approximatives de 20.16 L et 21.31 L pour les mois les plus chauds de l'année.

Il semble compliqué d'évaluer le comportement du système sur le moment puisque les températures ressenties peuvent être plus importantes et engendrer une évapotranspiration plus forte aussi. Il sera donc nécessaire de surveiller les toiles et d'adapter le système d'irrigation pour éviter tout assèchement des plantes. Des cycles plus courts et plus rapprochés devraient permettre de maintenir les toiles à un bon équilibre.

Ainsi d'après les calculs réalisés, les besoins des plantes devraient s'évaluer entre 16 et 50L/mois pour des toiles comprenant 24 salades sur une superficie de 54m² et entre 16 et 43L pour des fraisiers au nombre de 24 par toiles sur une superficie de 36m². Le basilic présente des besoins similaires à la laitue donc on peut estimer les besoins des plants de basilic entre 16 et 50L pour une superficie et une densité identiques.

Le système aura donc besoin d'un minimum de 48 L/mois pour combler les besoins en eau de la plante dû à l'évapotranspiration.

Les premiers tests relevés ont montré que pour une bonne humidification des toiles, il fallait en moyenne entre 20- 30 L/m² soit environ 10500 L pour le système dans sa globalité. En se basant sur les valeurs du premier test, si le taux de récupération de l'eau drainée avoisine les 70 à 80 % alors il serait possible de récupérer approximativement 7875 L.

Le système aurait donc besoin d'un approvisionnement quotidien d'environ 2625 litres.

1.2.3 Discussion et proposition selon le comportement des toiles

La réalisation de relevés d'humidités pourrait être effectuée toutes les semaines pour s'assurer du bon fonctionnement des toiles et de la bonne rétention de la poche de culture. Des sondes capacitatives mesurent instantanément l'eau présente dans le milieu du système racinaire et pourraient ainsi définir le point de flétrissement – niveau d'eau pour lequel la plante n'est plus en capacité d'absorber l'eau retenue par les particules dans le sol - des plantes dans ces conditions de culture. (AGRALIS, 2017)

Les relevés réalisés sur les 30 dernières années dans la région de Montréal font état d'une précipitation annuelle moyenne de 748,9 mm (METEO MEDIA, 2017). Ainsi en calculant la surface du Palais des Congrès on peut estimer la quantité d'eau qui s'écoule sur l'année sur ce toit et réaliser une estimation de la quantité d'eau pluviale récupérable et utilisable pour le système VERTICAL.

La surface calculée du PCM est d'environ 32 658 m². Hors d'après le guide de la récupération d'eau de pluie (2012), une surface plane recouverte de matière synthétique ou bitume présente un taux de récupération en eau de pluie d'environ 75%. Un système de récupération d'eau de pluie pourrait ainsi récupérer chaque année environ 18 344 L d'eau pluviale.

Cette réserve d'eau pourrait être utilisée pour la dilution de la solution de drainage ou bien comme réserve d'eau en cas de panne du système de distribution d'eau. En cas de sécheresse prolongée, la citerne se remplirait de cette eau et alimenterait les toiles avec l'aide d'un capteur de niveau mesurant en permanence le niveau et émettant un signal au système de commande.

La récupération d'eau de pluie peut se révéler un système simple et peu coûteux à mettre en place. Les coûts s'échelonnent entre 8475 et 12720 Dollars canadiens.

Pour une cuve enterrée, avec raccordement au réseau d'eau d'irrigation d'un bâtiment, il faut compter environ 11300 \$ pour une cuve de 10000 L en polyéthylène. Il faut également

compter le prix du filtre et une pompe. Pour un modèle permettant de filtrer jusqu'à 100 microns (retient les particules jusqu'à 0.1 mm), il faut compter en moyenne 280 CAD. Une pompe pour une telle envergure coûterait entre 420 et 570 CAD soit en moyenne, pour un système de récupération près de 12900 CAD. La réglementation interdit d'installer une liaison fixe entre le système d'eau de pluie et le circuit alimenté en eau de distribution, ceci afin d'éviter que l'eau de pluie moins pure ne se mélange à l'eau de distribution. (ECKERT, 2012)

Il faut donc pouvoir séparer les deux systèmes en connectant chaque vanne d'alimentation à deux canalisations différentes, munies chacune de son propre robinet.

Ainsi le système général aurait besoin d'une pré-cuve accueillant l'eau utilisée pour l'irrigation ainsi que deux flotteurs verticaux - contrôlant l'un l'eau de pluie et l'autre l'eau de distribution - qui permettraient d'alimenter le système d'irrigation par l'un ou l'autre des deux circuits sans nécessité de déconnexion. (ECKERT, 2012)

Il serait également approprié d'installer des toiles pare-soleil. L'entreprise DURANET a par exemple développé un filet micro-maillages en polyéthylène stabilisé, résistantes aux UV, perméable à l'eau et au vent avec brides triangulaires en acier inoxydable et finition avec bord renforcé. Cette compagnie présente l'avantage d'être reconnue pour la qualité de ses produits et de pouvoir confectionner du sur-mesure selon les souhaits et les commandes des clients. (DURANET, 2017) Protéger les 500 m² de cultures reviendrait à un coût d'environ 5305 CAD. Il est compliqué d'estimer les avantages sur la conduite du prototype cependant on peut avancer que les pertes en eau seraient moins importantes et que les fruits pousseraient dans de meilleures conditions.

Pour pallier aux problèmes de stress hydriques menaçant les plantes, une étude a été menée en Italie sur les effets de biostimulants dérivés de végétaux sur les performances de culture de laitues poussant dans des solutions salines. (LUCINI, 2015) Ces hydrolysats permettent d'augmenter la tolérance des plantes aux stress abiotiques. Or les tests de croissance ont montré une adaptation plus ou moins compliquée des plants aux toiles. (BERTONI, 2017a) L'application de ces molécules au niveau des racines et des feuilles permet d'augmenter la performance des plantes.

De même, plusieurs effets bénéfiques ont été reconnus par COLLA *et al.* (2014), en induisant une croissance plus rapide des tiges (accélération de l'activité de PSII donc de la photosynthèse), des racines et une meilleure absorption des nutriments tels que l'azote et le fer. (LUCINI, 2015)

Pour terminer, l'installation d'un capteur de pluie permettrait d'éviter que le système ne fonctionne après une pluie récente. On réaliserait ainsi des économies sur l'eau et l'électricité consommée pour le fonctionnement des pompes et du système de contrôle.

1.3 La fertilisation du système VERTICAL

La fertilisation a été élaborée selon les différentes recherches biographiques réalisées sur les besoins nutritifs des végétaux cultivés en hydroponie et les recommandations de spécialistes de l'entreprise en hydroculture GuyDionne. Dans la première partie, les cycles d'irrigation permettant l'apport des nutriments et de l'eau nécessaires pour la croissance des plantes furent définis.

1.3.1 Les cycles d'irrigation - fertilisation

Il n'existe pas de régie d'irrigation précise pour des cultures hors-sol sur murs végétales. Selon les problèmes rencontrés dans la conduite du système d'irrigation, l'arrosage en flux continu a été adopté pour éviter que les racines ne se dessèchent en maintenant une forte humidité dans la structure. (CERVANTES, 2011)

Cependant, les résultats des recherches et des tests réalisés ont permis de définir une régie d'irrigation.

Le système général a été divisé en trois zones d'irrigation contrôlé par le logiciel Rachio. Chaque zone est irriguée chacune son tour. Les apports sont ainsi séquencés en cycle de 5 minutes par zone soit 10 minutes où les toiles des autres zones ne sont pas irriguées. Le cycle de 5 minutes toutes les 15 minutes fut défini selon les contraintes du logiciel Rachio et selon les tests de rétention en eau des toiles. Cependant, il ne s'agit que de supputations et l'année de test qui vient devra confirmer le fonctionnement de ces cycles.

Le CTIFL a testé la culture de fraisiers Darselect suspendus. Les besoins en eau du fraisier sont fonction du substrat utilisé, de la variété, du stade végétatif et de l'ensoleillement. Durant leurs tests, par temps couvert, la dose d'irrigation-fertilisation est d'environ 150 ml par sac de tourbes de 12L comprenant une demi-douzaine de pieds à raison de 6 plages horaires (9h – 10h30 – 12h – 14h – 15h – 17h). Par temps ensoleillé, des apports de 150 ml était réalisés 12 fois par jour (9h – 10h – 11h – 12h – 13h – 13h30 – 14h – 14h30 – 15h – 15h30 – 16h – 17h). Ces cycles prennent en compte la présence d'un volume élevé de substrat. Si le volume du support est plus faible, alors la réserve en eau l'est également donc il faut adapter les irrigations en diminuant la dose mais en l'apportant plus régulièrement. (BERTONI, 2017b)

En règle général, le volume de solution drainé doit être compris entre 10 et 20% du volume apporté. En circuit fermé, il est important de contrôler le drainage quotidiennement pour adapter le nombre d'irrigations. (COQUELET, 2003)

Les besoins en irrigation du basilic et de la laitue étant semblables, les cycles d'irrigation ont été basés sur la culture de laitue hors sol en Martinique (2007). Des cycles de 2-3 minutes dix fois par jour sont conseillés avec des doses d'environ 50-60 ml en moyenne.

Pour la suite Le logiciel Rachio devrait être remplacé par un logiciel. Ce dernier devrait être plus performant et permettre une adaptation plus précise de l'irrigation avec un système pouvant fonctionner sans que les pompes doseuses ne marchent en continu et ainsi faciliter la conduite du système.

De même, la technologie des « murs comestibles » nécessite une irrigation en continu des toiles pour maintenir la structure humide. Il sera donc nécessaire d'adapter le fonctionnement du prototype dans la journée en programmant des plages de fertilisation durant l'irrigation selon les besoins des plantes précédemment citées. La nuit, des cycles d'irrigation seront également nécessaire pour que les plantes ne se dessèchent pas.

1.3.2 Les besoins en fertilisation

Il n'existe pas de régie de fertilisation de base en hydroponie. En effet, les données varient d'un système à l'autre. Les variations sont en partie dû à l'eau de distribution utilisée et sa composition.

L'eau ajoutée dans le système présentait la composition tableau 6.

Tableau 6 : Composition des éléments en ppm de l'eau de distribution

Élément	Proportion (en ppm)
N	0,24
P	/
K	1,23
Ca	23,4
Mg	5,33
S	/
Fe	0,031

On constate d'après l'analyse faite par le laboratoire Agro-Enviro-Lab que l'eau est riche en calcium et en magnésium. Cela est une caractéristique commune de l'eau au Québec. Ce paramètre devra être pris en compte dans le choix de la fertilisation pour ne pas obtenir une irrigation trop alcaline et des dépôts calcaires dans les goutteurs. (COUTURE, 2004)

En prenant en compte le retard sur la finalisation du projet, les fraises n'auraient pas atteint le stade de la floraison – fructification assez important pour adapter la fertilisation selon ce stade physiologique. (COQUELET, 2003) Une fertilisation commune a donc été adoptée.

Le réglage de l'injecteur a nécessité de définir certains paramètres tel que le ratio d'injection. Pour le projet VERTIcal, les injecteurs présentaient des taux d'injection exprimés en pourcentage. Un ratio 1 : 50 correspondant à 2 % a été choisi selon les tests erreurs réalisés sur le système. Ainsi ce pourcentage signifie qu'une unité de solution de base est injectée dans cinquante unités d'eau. Cette variable était modulable selon les tests de pH et de conductivité effectués.

Selon la formule de PROMIX (2016) précédemment citée, il a été possible d'estimer une formulation de 150 g/L selon un ppm d'azote désiré de 120, soit pour un bidon de 60L (bidon A), 9 kg/bidon. Cependant, pour cette première année de tests, ne connaissant pas le comportement des toiles par rapport à la rétention des nutriments, la dose d'engrais a été divisée par deux avec une vérification régulière du pH et de la conductivité pour adapter la fertilisation.

Dans le bidon B, la quantité de nitrate de calcium ajoutée au système a été calculé également en fonction de la concentration d'azote dans la solution et la quantité souhaitée dans le système pour compléter les besoins des plantes. Par conséquent puisqu'on souhaite ajouter 30 ppm d'azote (150 ppm valeur recommandée pour culture salades et fraises au stade végétatif), 690g ont été mélangés à 60L. Ainsi la quantité de calcium ajoutée reste faible et ne devrait pas influencer le pH.

De plus, l'injection de cette solution de nitrate de calcium dans le système a été réalisée hors plages horaire fertilisation. Ainsi les éléments ont moins de risque de précipiter entre eux et obstruer les goutteurs.

Les tests de l'injecteur selon le protocole en annexe 17 ont déterminé que pour un pH de 7.9 ajouter 1.5 ml de HNO_3 permet d'obtenir un pH dans le système de 5.8 dans 10L. Ainsi en adaptant cette formule au taux d'injection d'eau dans le système, il a été possible de maintenir le pH de l'eau ajoutée dans le système à une valeur convenable pour la croissance des plantes. D'après les tests réalisés, un mélange de 2.4 L d'acide nitrique dans 60L d'eau avec un pompage d'environ 50% si les injecteurs de solution nutritives sont à 100% permet de stabiliser le pH à une valeur satisfaisante pour les plantes.

Ayant suivi les recommandations du spécialiste en hydroculture de l'entreprise Guy Dionne, le choix du nitrate de calcium ne semble pas judicieux. En effet, l'analyse de l'eau de distribution révèle un pH basique oscillant entre 7.8 – 8.2. Ces valeurs peuvent s'expliquer par la présence en forte quantité de calcium dans la composition de cette eau (23.4 ppm de Ca – tableau 6).

Or cet élément n'est pas un facteur limitant pour les cultures. (MORARD, 2007) Il est donc inutile d'apporter une fumure calcique. En cas de carence calcique observée sur les plants, il peut être intéressant de tester l'apport de gypse (sulfate hydraté de calcium) ou l'utilisation de compost de champignonnière riche en gypse. (ROBITAILLE, 1996)

Les entreprises horticoles spécialisées en hydroponie présentent différentes formulations d'engrais. Cependant, il semble plus préconisé de fabriquer sa propre formulation nutritive en se référant aux contraintes du système et de l'eau de distribution. Pour la culture de laitue, la fertilisation suivante a été mise en place tableau 7 (MORGAN, 1999, GAGNÉ, 2016) :

Tableau 7 : Valeurs en ppm des éléments pour la fabrication d'une solution

Éléments	Valeurs selon MORGAN (ppm)	Valeurs selon ITA (ppm)	Valeurs choisies (ppm)
N	100-200	150	150
P	15-90	50	50
K	80-350	150	150
Ca	122-220	150	150
Mg	26-96	30	50
S	0	0	0
Oligo-éléments		Mélange Plant-Prod d'oligo-éléments chélatés (ppm)	
Fe	5-10	7	7
Cu	0,1-1,0	0,1	0,1
Mn	0,5-1,0	2	2
Zn	0,5-2,5	0,4	0,4
Mo	0,5-1,0	0,06	0,06
B	0,4-1,5	1,3	1,3

Le mélange Plant-Prod dans le tableau 8 est une formule d'oligo-élément déjà préparée et qui coûterait moins cher que l'achat de chaque élément séparément. (PLANT PRODUCTS, 2017) La base de donnée des valeurs de l'ITA est en annexe 18.

Tableau 8 : Solution fertilisante pour la culture de fraises suspendues préconisée par le CTIFL (2003)

Composition des solutions nutritives, en meq/litre, préconisations Ctifl.

Stade	CE	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K/Ca+Mg
Développement végétatif	1,5	10,2	1,8	1,8	4,2	5,2	2,4	0,56
Floraison – fructification	1,5	10,4	0	1,6	5,7	5,7	2,2	0,72

Equilibres obtenus avec les solutions ci-dessus, après conversion des données en mg/litre.

Stade	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Développement végétatif	1	0,8	1,2	0,9	0,3
Floraison – fructification	1	0,8	1,8	1,1	0,3

Pour les oligo-éléments, la composition, en mg/litre, est identique pour les 2 périodes :

fer	manganèse	zinc	bore	cuivre	molybdène
1	0,5	0,2	0,3	0,06	0,03

Les expériences de Tesi *et al.* (1995) réalisées sur la fertilisation du basilic (variété *Genovese*) en culture hydroponique en serre, ont montré que la combinaison N-P-K dans une proportion de 1-1-2, produit un meilleur effet sur la croissance du basilic.

Pour la suite des phases de tests, les formulations suivantes peuvent être testées pour analyser le comportement des plantes.

La précédente analyse de l'eau nécessite quelques informations nécessaires pour une plus grande précision dans la gestion de la fertilisation. Une analyse du ration d'absorption du sodium ainsi que du phosphore et du sodium serait un plus pour bien adapter les solutions nutritives.

Pour terminer, la conception de solution nutritive nécessite un espace dédié pour ce processus ainsi qu'un autre pour la conservation des minéraux. Des recherches dans le

domaine seront nécessaires selon les règles définies pour la fabrication de solution nutritive.

1.3.3 Les tests pH et conductivité selon le type de toile

La gestion d'un prototype hydroponique nécessite une vérification quotidienne des paramètres tels que le pH et la conductivité.

Les mesures suivantes ont été réalisées moins de deux heures après les périodes de fertilisation. La solution fille (mélange de l'eau de distribution additionnée avec la solution nutritive) présentait un pH et une conductivité moyenne de 6.01 et 0.5.

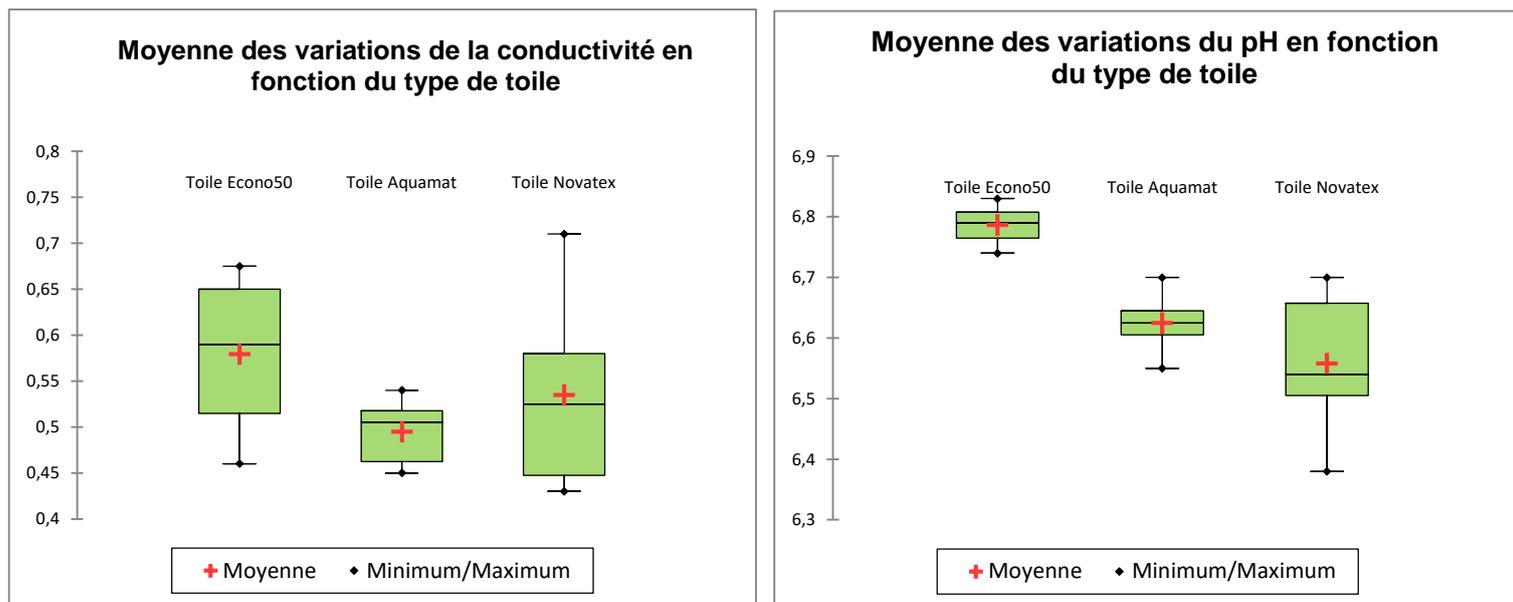


Figure 29 : Box-plots des moyennes d'électroconductivité et de pH selon les 3 types de toiles étudiées

On constate que les médianes de la conductivité de l'eau utilisée sont relativement proches, comprises entre 0,5 et 0,6 en fonction de la toile.

Un dérèglement du système de contrôle a entraîné une injection plus importante que les doses calculées dans le système. Cela est visible sur la figure 29 avec des valeurs maximales supérieures à 0,7 – 0,75.

Ce dysfonctionnement a permis de remarquer une meilleure rétention en éléments nutritifs de la toile Aquamat comparé aux autres toiles. Effectivement, la conductivité électrique (CE) mesure les ions conducteurs d'une solution. (COQUELET *et al.*, 2003) Ainsi si les mesures après les tests du conductimètre sont élevées, cela veut dire que l'eau utilisée est fortement chargée en ions donc en éléments nutritifs non disponible pour les plantes.

La toile Novatex présente des variations plus importantes que les deux autres toiles. Il est possible de l'expliquer par sa composition et ses caractéristiques. Cette toile a pour base une géomembrane en polypropylène intéressante pour les revêtements et pour ses capacités d'étanchéité importantes. (WITIER *et al.*, 1999) Il est possible que les nutriments ne puissent s'imprégner dans la matière et ruissellent le long de la toile d'où une forte conductivité de l'eau recyclée de la membrane.

Il est donc important d'analyser de manière hebdomadaire l'eau recyclée pour connaître les minéraux drainés et de réaliser des contrôles fréquents de l'évolution de la croissance des plantes pour déceler toutes marques physiologiques de carences.

Dans la seconde série de box-plot, le pH selon le type de toile est représenté (figure 29). On constate des valeurs plus homogènes pour chaque toile, comprises entre 6.5

(Novatex) et 6.8 (Econo50). Selon ce paramètre il ne semble pas y avoir une toile plus intéressante qu'une autre pour la conduite d'un système vertical.

En effet, le pH, est une échelle de mesure qui sert à évaluer l'équilibre acido-basique d'une solution aqueuse. (MORARD, 2007) Les plantes annuelles à croissance rapide poussent mieux dans un milieu au pH compris entre 5.8 et 6.5 pour une meilleure absorption et transformation des nutriments. Si le pH n'est pas dans cette tranche de valeurs alors les sels acides se lient chimiquement aux nutriments, entravant leur absorption par les racines (figure 30). Cependant, cette mesure ne permet pas de déceler un oubli d'oligo-éléments, d'où une attention toute particulière à l'apport de ceux-ci lors de la préparation de la solution mère. (CERVANTES, 2011)

Ainsi on remarque que le pH reste stable et à des valeurs convenables pour les 3 sortes de toile. Cependant, comme pour la conductivité, la toile Novatex rencontre de plus grandes variations de pH en comparaison avec les autres membranes.

Durant une période de l'expérimentation, des problèmes ont été rencontrés pour la conduite de la fertilisation du système. En effet, on peut observer des pics de variations avec des moyennes supérieures à 7. Cela peut s'expliquer par un dysfonctionnement de l'injecteur de l'acide pour stabiliser le pH de l'eau de distribution élevé.

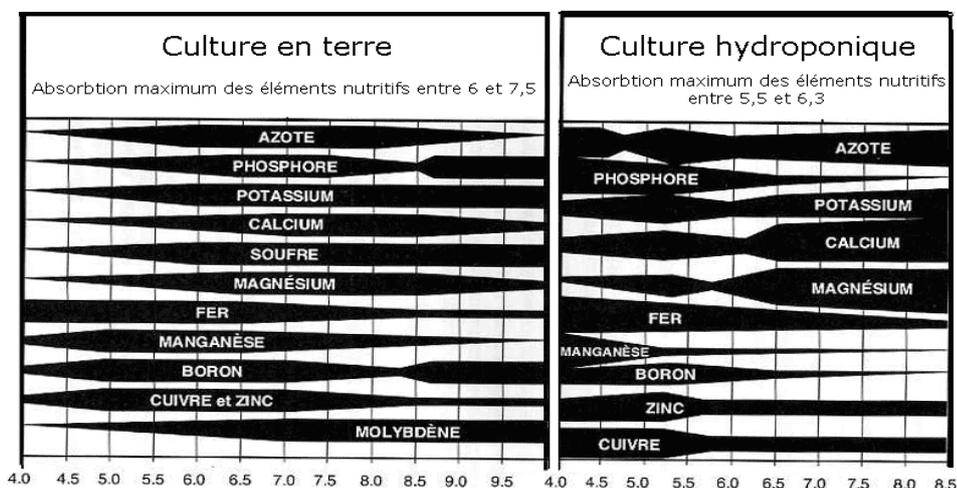


Figure 30 : Schéma d'assimilabilité des éléments nutritifs par les végétaux en fonction du pH (CERVANTES, 2011)

Cependant, il est recommandé de laisser fluctuer le pH plutôt que d'ajouter trop régulièrement des stabilisateurs de pH. En effet, les changements brusques tels que l'humidité ; la température ; le pH et la quantité de nutriments affaiblissent les plantes et retardent leur développement voir dans des conditions extrêmes les tuent. (TEXIER, 2013)

Le substrat utilisé en culture hydroponique présente également un pH à prendre en compte dans le calcul de la fertilisation. En effet la vermiculite possède un pH à l'eau de 8,7 alors que celui du terreau G9, mix de tourbe blonde et d'écorce de coco est de 5,8. (BERTONI, 2017a ; FAFARD, 2014)

Les box-plots suivant présentent les résultats du pH et de la conductivité selon le type de substrat utilisé sur les toiles (figure 31).

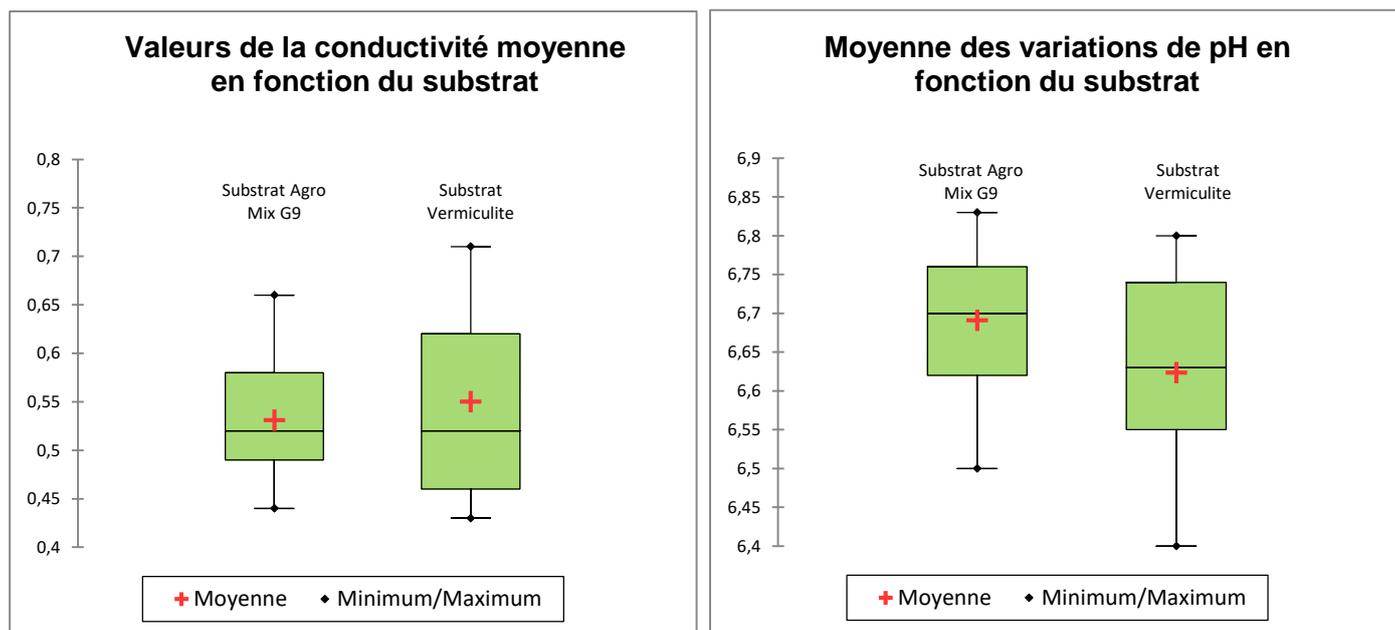


Figure 31 : Box-plots des moyennes d'électroconductivité et de pH selon les 3 types de toiles étudiées

On constate que les valeurs sont relativement homogènes selon le type de substrat. Le terreau G9 présente une conductivité relativement stable. Cela s'explique par ses propriétés physiques intéressantes, sa capacité de rétention en eau est effectivement élevée et plus importante que celle de la vermiculite. (FAFARD, 2014)

Pour le pH, les valeurs moyennes sont relativement intéressantes pour la croissance des plantes. Les valeurs comprises entre 6,4 et 6,55 sont des mesures réalisées durant les périodes de fonctionnement optimales du système. Les valeurs comprises dans la boîte sont plus dispersées à cause des problèmes de dysfonctionnement du système qui n'a pas permis de stabiliser le pH. Dans cette situation, les tests effectués auraient sûrement révélé un lien entre le substrat et ces paramètres agronomiques.

Cependant il n'est pas possible d'après les graphiques de la figure 31 d'établir un substrat meilleur qu'un autre. En effet, La vermiculite présente des caractéristiques de stérilité et une capacité d'échange élevée. Elle améliore la germination des graines et stimule la croissance vigoureuse. (DUPRÉ MINERALS, 2017)

Les interactions entre les variables qualitatives (substrat et toile) et les variables quantitatives (pH et CE) testées avec des analyses statistiques n'ont pas permis de révéler de liens entre ces différents paramètres (Annexe 19).

Cependant, comme expliqué précédemment, le système de contrôle a rencontré plusieurs problèmes qui n'ont pas permis la conduite de la fertigation du prototype avec une grande précision et donc d'obtenir des résultats pertinents lors des Anovas. Il serait intéressant de réaliser à nouveau ces tests dans des conditions plus appropriées. En effet, il est probable que les compositions des toiles et les caractéristiques physiques et chimiques des substrats jouent un rôle dans les valeurs de ces paramètres agronomiques.

Il aurait été plus judicieux la première année de faire un système ouvert pour un meilleur contrôle de la fertilisation, une meilleure analyse de la rétention des toiles et des valeurs significatives du pH et de la CE car les résultats sont floués à cause des solutions recyclées dont leur composition est inconnue.

Un système fermé nécessite donc une attention particulière pour les paramètres agronomiques puisque l'eau recyclée chargée en nutriments doit être analysée chaque semaine pour en connaître sa composition. (CERTVANTES, 2011) Un système

automatique contrôlant ces valeurs et adaptant les pompes doseuses pour ne pas surcharger le système en nutriments serait intéressant.

L'une des limites de la conduite du système fut le choix des valeurs de fertilisation les plus adaptées au prototype.

Différentes sources bibliographiques conseillent des valeurs de conductivité très dispersées entre 1,4 et 1,8 – 2.

Les valeurs sélectionnées furent celle du CTIFL et les expérimentations sur fraises suspendues ainsi que sur des expérimentations sur la culture de différentes variétés de fraises en hors-sol (tableau 9). (COQUELET, 2003 ; SARRAF, 2011)

Tableau 9 : Récapitulatif du pH et de la conductivité pour la culture de fraises hors-sol (COQUELET, 2003)

Stade	Consignes conductivité CE	Consignes pH
Développement végétatif	Débuter à 1,2 puis en fonction du drainage, augmenter graduellement à 1,5 - 1,6.	5,8 (5,3 à 6,3)
Floraison	1,6 à 1,8 sans dépasser 2 au drainage.	
Fructification	1,2 à 1,3 par temps ensoleillé, 1,4 à 1,5 par temps couvert.	

Pour la variété Mara des Bois, il est conseillé de diminuer de 0.3 mS/cm les consignes de conductivité données dans le tableau 7. (SARRAF, 2011)

La concentration en éléments minéraux de la solution nutritive doit être régulièrement mesurée et ajustée aux besoins relatifs en eau et éléments minéraux du moment. Cette adaptation dépend de facteurs tels que le climat, le stade de la plante, du substrat et la variété. (CERVANTES, 2011)

Il est conseillé de conserver la solution nutritive à une température inférieure à 20/21°C. En effet, chaque engrais a une solubilité maximale et celle-ci est affectée par la température de l'eau (basse température = faible solubilité). Si un engrais est ajouté au-delà de sa solubilité maximale, le processus de dissolution sera ralenti et des précipités se formeront dans le réservoir (TEXIER, 2013 ; PROMIX, 2016) Il faut donc conserver les cuves de fertilisant à l'abri des zones ensoleillées.

De même, si les températures sont élevées, les plantes vont transpirer. Plus elles transpirent, plus elles vont absorber de sels minéraux. Or ces derniers absorbés en trop grande quantité peuvent avoir l'effet désiré et devenir toxiques, augmenter la sensibilité aux pathogènes et au stress. (HYDROBOX, 2014)

Les plantes utilisent les éléments nutritifs sous forme d'ions apportés aux moyens de sels (association de cations et d'anions formant un produit neutre).

Si la conductivité est trop élevée, cela entraîne une trop grosse absorption de sels nuisible pour le développement de la plante. (KEHDI, 2016)

La conduite du système nécessitera donc une adaptation du taux d'injection de la solution dans les toiles suivant les périodes pour optimiser les conditions de croissance des plantes.

Pour le cas de la salade et du basilic (similaire à la culture de laitue, TESI *et al.*, 1995), les valeurs optimales de pH et de conductivité tournent autour de 1,4 et 2,0 pour la CE et se situe entre 5,5-6,0 et 5,0-6,0 selon les sources. (MORGAN, 1999 ; CHAMBRE D'AGRICULTURE DE MARTINIQUE, 2007)

Pour les phases d'expérimentations suivantes, il pourrait être intéressant de tester le taux de drainage des toiles au préalable. Le dispositif figure 32 permet de récupérer dans des contenants de même dimension le drainage de chaque type de toile.

Effectivement, la solution fille étant recyclée, l'eau injectée dans le système ne présente pas les mêmes valeurs que l'eau de distribution donc il faut continuellement adapter le système pour obtenir des paramètres hydroponiques stables. Une connaissance des éléments captés par les plantes ou présents sur les toiles faciliterait le travail du chargé de conduite.

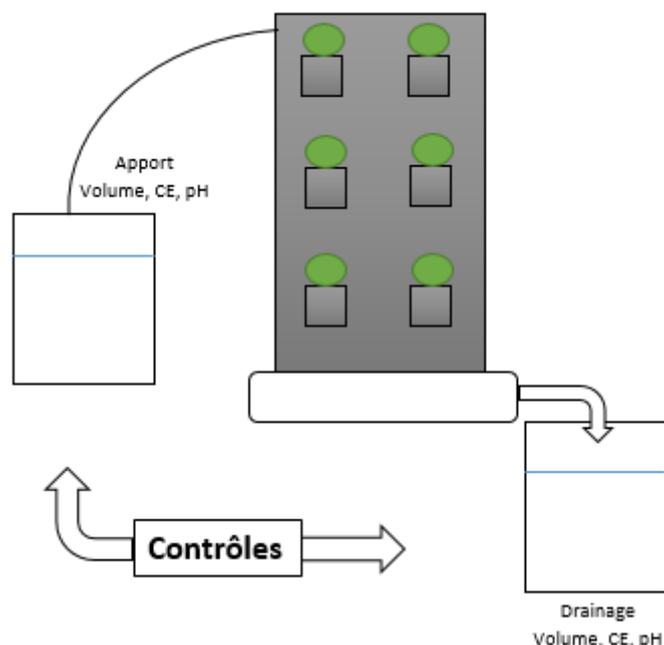


Figure 32 : Dispositif expérimental pour déterminer le volume de drainage des toiles

Ce dispositif expérimental permettrait ainsi de connaître le volume total de la solution drainée. De même, cette dernière pourrait être testée en laboratoire pour savoir sa composition et ajustée en fonction des résultats la solution nutritive pour le type de plante. Il est suggéré de maintenir un lessivage journalier de 20% et un écart maximal de pH et de la CE de 20% entre la solution d'irrigation et de lessivage. (COQUELET *et al.*, 2003 ; CERVANTES, 2011)

1.4 Conception d'un système de fertilisation adapté aux contraintes rencontrées

Pour répondre aux objectifs du laboratoire, le système conçu mérite quelques améliorations pour le rendre plus autonome et durable. Ainsi, un travail de réflexion a été réalisé sur le système de fertilisation (figure 33) selon le guide de la fertilisation dans les serres de Laurent URBAN (2010) et les renseignements fournis par le professeur BERTONI (2017b), un système de récupération a été modélisé figure 34.

Pour simplifier la conduite du système, il serait intéressant de fractionner les apports nutritifs en insérant des valves au niveau du poste de fertilisation – irrigation. Lorsqu'une zone est fertilisée, la seconde zone est irriguée avec de l'eau. Cela nécessiterait l'installation de valves fermées ou ouvertes pour alterner entre les deux cycles.

Pour adapter les fertilisations, insérer deux nouveaux bidons pour la fertilisation de la zone 2 simplifiera le travail de l'employé. Il suffira seulement de retirer les pompes des bidons de la zone 1 pour les insérer dans ceux de la zone 2.

Ce procédé permettra une meilleure gestion du système cependant cela va nécessiter un employé à temps plein sur le site pour gérer les fertilisations et contrôler le fonctionnement du prototype.

Il faudra donc dès l'année suivante engagée un nouveau stagiaire ou un spécialiste en hydroculture. Pour un coût estimé de 15\$/h, cela représenterait une charge supplémentaire de près de 13500 \$ sur la période Mai – Septembre pour une durée moyenne de 45h/semaine. Concernant le coût de l'adaptation du système, les deux nouveaux bidons ainsi que les différents raccords se chiffraient entre 500 et 1000 CAD.

Ainsi dans chaque zone la fertilisation serait adaptée pour les plantes présentes. Il n'y aurait plus de problème entre les différents besoins des végétaux comme par exemple pour les fraisiers et leurs exigences plus gourmandes que les laitues ou les plantes aromatiques. Pour une empreinte moins importante sur l'environnement, chaque système serait équipé de son recycleur d'eau drainée récupérée et réutilisée (figure 33). Cela permettrait ainsi de limiter le gaspillage de solution nutritive et de limiter la pollution des nappes phréatiques avec une surcharge en nitrates, phosphates et autres éléments. (TEXIER, 2013) Donc le système serait divisé en deux zones indépendantes pour ne pas mélanger les eaux drainées et complexifier la réintroduction de ce mélange dans le système.

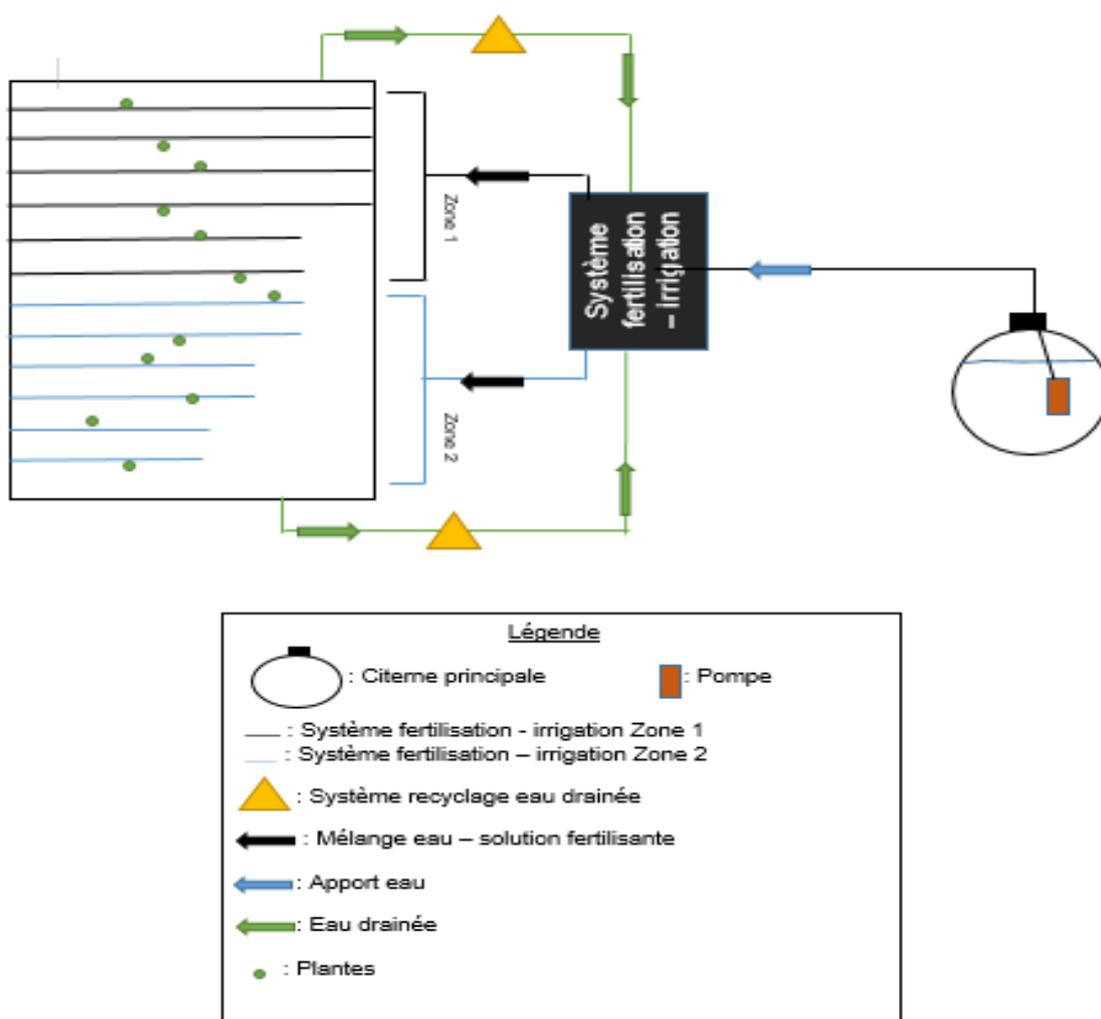


Figure 33 : Schéma descriptif du nouveau système d'irrigation – fertilisation VERTICAL

Le modèle figure 34 présente 2 cuves d'environ 100L contenant les fertilisants, séparés pour éviter qu'ils ne précipitent et deviennent indisponibles pour les plantes. (CERVANTES, 2011) Le système comprendrait également une cuve avec de l'acide phosphorique mélangé à de l'eau. En effet, les phases de tests ayant révélé une alcalisation importante de l'eau,

l'intégration d'acide dans le modèle s'avère obligatoire pour maintenir le pH optimal pour la croissance des plantes. Le système de contrôle commanderait des doseurs type dosatron pour une injection de chaque solution dans une pré-cuve de dimension plus importante (entre 150 et 200L). Le dosatron permet une maîtrise de la quantité d'eau et des apports nécessaires. Il fonctionne sans électricité (hydraulique), permet un dosage précis en toute simplicité et avec une grande souplesse de mise en œuvre. (DOSATRON, 2017)

De plus, la phase fertilisation serait couplée à un système de recyclage de la solution nutritive (figure 34).

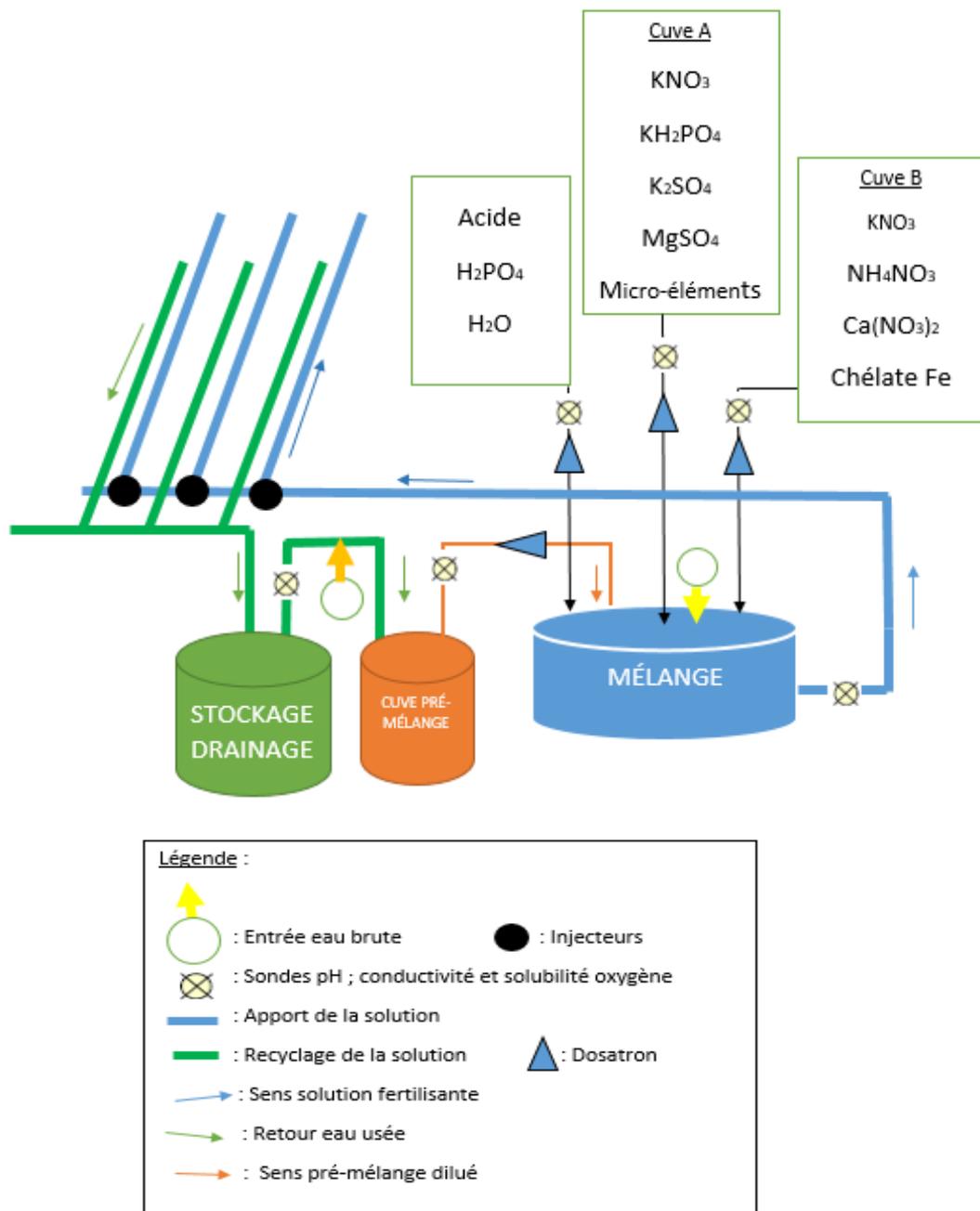


Figure 34 : Plan d'ensemble schématique du système de fertilisation avec recyclage

Le recyclage est toujours partiel, de l'ordre de 10 à 15 % pour la culture de fraises. Cet intervalle varie en fonction de la conductivité initiale, plus elle est importante moins le pourcentage de drainage recyclé sera grand. (BERTONI, 2017a)

La mise en place d'un système de recyclage pour une surface de 500 m² nécessite un bac de stockage de 3-4 m³. Ainsi la solution drainée pourra être stockée plusieurs jours. (LE QUILLEC, 2002) Une seconde cuve de prémélange permettrait de diluer la solution drainée avec l'eau pour obtenir un pH et une conductivité plus malléable pour la conduite de la fertilisation.

En effet, on peut choisir un pourcentage de réutilisation de la solution de drainage fixé pour une période donnée. Dans ces conditions, la conductivité du mélange drainage – eau brute peut varier et le réajustement en engrais n'est pas constant. (BERTONI, 2017a)

La consigne de conductivité du pré-mélange fixe la proportion du drainage et de l'eau brute à l'entrée du bac de mélange de la solution fille. Ainsi, en prenant les valeurs estimées pour la culture de la fraise figure 35, on peut réaliser une solution de prémélange à réinjecter dans le système de 0.6 Ms. Cette solution pourra être complétée par un apport d'engrais efficace de 0.8 mS dans cet exemple.

La présence de sondes pH et CE à différentes positions sur le système permettra un contrôle des solutions et facilitera la conduite du prototype.

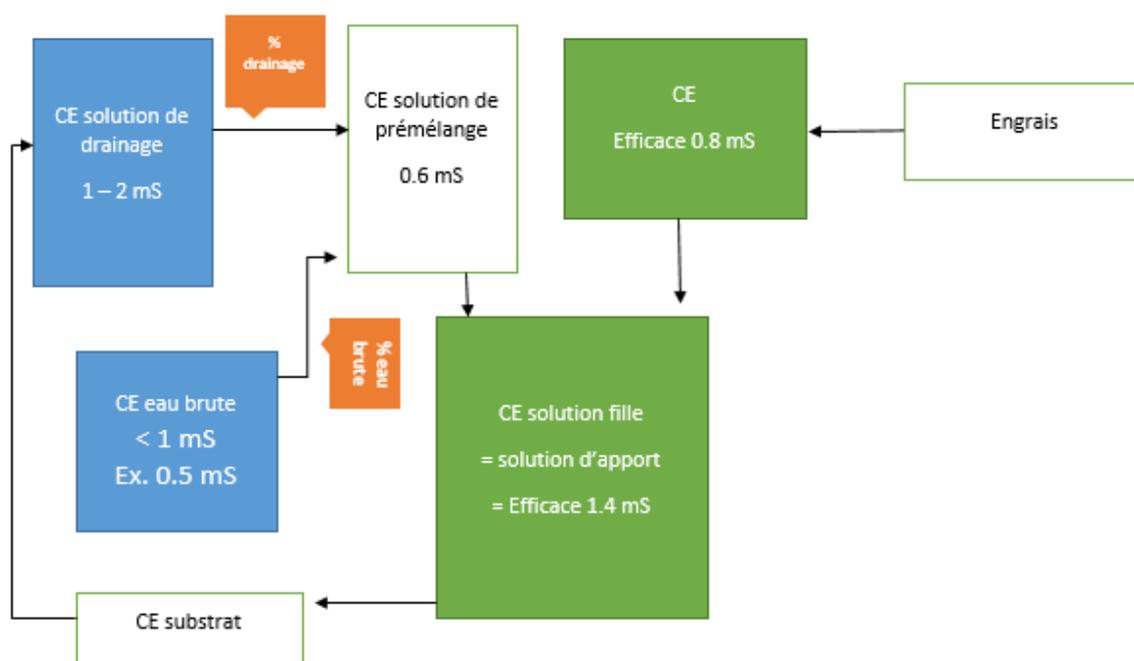


Figure 35 : Mise en œuvre de l'EC de pré-mélange

Le prémélange réalisé sera constitué d'eau brute et de la solution drainée. Les volumes sont calculés en fonction des pourcentages de drainages et d'eau brute et leur conductivité. En prenant les valeurs de la figure 35, on obtiendrait un mélange de 90% de la solution drainée avec 10% d'eau brute (tableau 10).

Tableau 10 : Détermination des volumes du prémélange (BERTONI, 2017a)

% drainage	CE drainage	% Eau brute	CE eau brute	CE mélange
X	1.5 +	y	0.5	= 1.4
X	1.5 +	(1-x)	0.5	= 1.4
		X	1	= 0.9
			X	= 0.9

Ces multiples acquisitions de données ne permettent pas de définir la composition des solutions drainées et réinjectées. Or des éléments comme le sodium, le manganèse et le soufre sont peu absorbés par les plantes. Un excès de ces minéraux pourrait être nuisible pour le système. (CERVANTES, 2011)

Il serait donc intéressant de contrôler régulièrement l'état des plants mais également de réaliser des analyses complètes de l'eau drainée tous les 20 jours. (BERTONI, 2017a) Des éléments comme le bore et le molybdène n'auront pas besoin d'être contrôlé ce qui limitera le coût de l'opération. Selon la grille de prix du laboratoire Agro-Enviro-Lab, le coût de ces analyses pourrait s'estimer à près de 250 dollars canadiens l'analyse soit environ 1250 \$ sur la période de culture.

Le coût des récupérateurs d'eau s'évaluerait à environ 2283 CAD/système soit près de 4570 dollars canadiens pour le projet VERTICAL. Le calcul précédent inclut l'achat de sondes automatiques de calcul du pH et de la CE pour faciliter le travail de l'employé.

2 Analyse du développement végétal sur le système VERTICAL

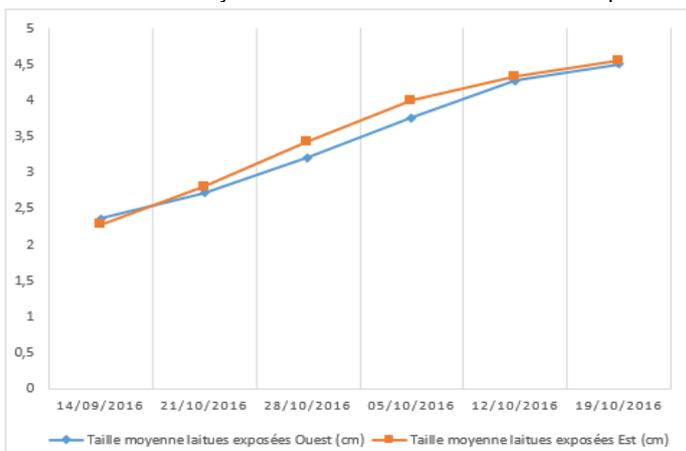
2.1 Mesure de la croissance primaire

Les mesures ont été effectuées hebdomadairement du 14 septembre au 19 octobre sur certains plants. Selon chaque exposition, une section de chaque sorte de toile a été sélectionnée. Puis parmi ces sections, 2 plantes aléatoires étudiées selon les deux types de substrat.

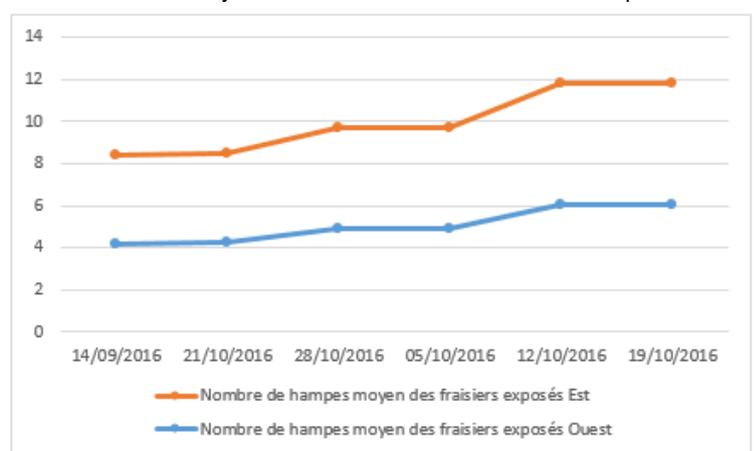
Les mesures se sont arrêtées après une dégradation des conditions climatiques rendant la conduite du projet impossible.

2.1.1 Analyse de l'influence de l'exposition sur la croissance des végétaux

Croissance moyenne des laitues en fonction de l'exposition



Croissance moyenne des fraisiers en fonction de l'exposition



Croissance moyenne des basilics en fonction de l'exposition

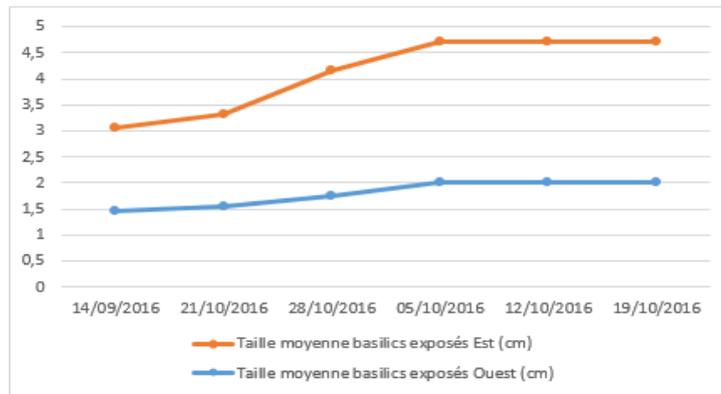


Figure 36 : Schémas récapitulatif de l'évolution de la croissance moyenne des plantes étudiées en fonction de l'exposition

On a observé une croissance supérieure sur la moitié Est par rapport à la moitié Ouest pour les cas des fraisiers et du basilic tout au long de cette période d'étude de 42 jours. Cependant pour la salade, l'exposition ne semble pas avoir d'influence sur le développement de la plante dont la taille a plus que doublé (croissance moyenne de 2.20 cm).

On peut aussi remarquer que les courbes ont une inclinaison similaire, la vitesse de croissance est donc relativement proche. En effet, le gain de taille du basilic à l'Ouest est de 0.55 cm contre 1.11 cm pour les plants à l'Est (figure 36).

2.1.2 Interprétation et analyse des observations faites

Ces tests en conditions réelles ont été réalisés durant une période où l'ensoleillement varié de 140h à 170h avec un ensoleillement plus long pour les plantes situées à l'Est. (METEO MEDIA, 2016) Or la lumière est un facteur pouvant être limitant si la photopériode (durées respectives du jour et de la nuit) est insuffisante pour combler les besoins des plantes. Pour la phase végétative, 18-20 h/jour de soleil répond aux exigences des végétaux. (CERVANTES, 2011)

Durant la période Mai – Août, la durée totale d'ensoleillement moyenne est d'environ 250 heures. (METEO MEDIA, 2016) Ce facteur ne devrait donc pas être un facteur limitant durant cette période de fonctionnement.

Dans une situation de manque d'ensoleillement, les plantes devront compenser par un développement racinaire en captant plus d'oxygène. (BERTONI, 2017b)

Il serait donc intéressant d'installer un système à haute oxygénation. En effet, ce dernier assurera un apport régulier d'oxygène dissous.

Il existe d'autres solutions pour optimiser la gestion d'un système hydroponique tel que la mise en place d'un biofiltre qui permettrait d'oxygéner l'eau par l'action d'un biofilm microbien. (KEHDI, 2016)

Au même titre que la mesure du pH et de la conductivité, la solubilité de l'oxygène est un élément à contrôler quotidiennement. Des testeurs électroniques utilisés dans les métiers de l'environnement (gestion station d'épuration pourraient être associés aux capteurs des autres paramètres. (HYDROBOX, 2014)

2.2 Le développement végétal sur le projet VERTical

2.2.1 Croissance moyenne des plants au cours du temps

Une mesure hebdomadaire de la croissance des plantes sélectionnées pour l'expérimentation fut réalisée. La base de donnée est en annexe 20. Les graphiques suivant présentent les courbes de croissance avec les mesures moyennes chaque semaine.

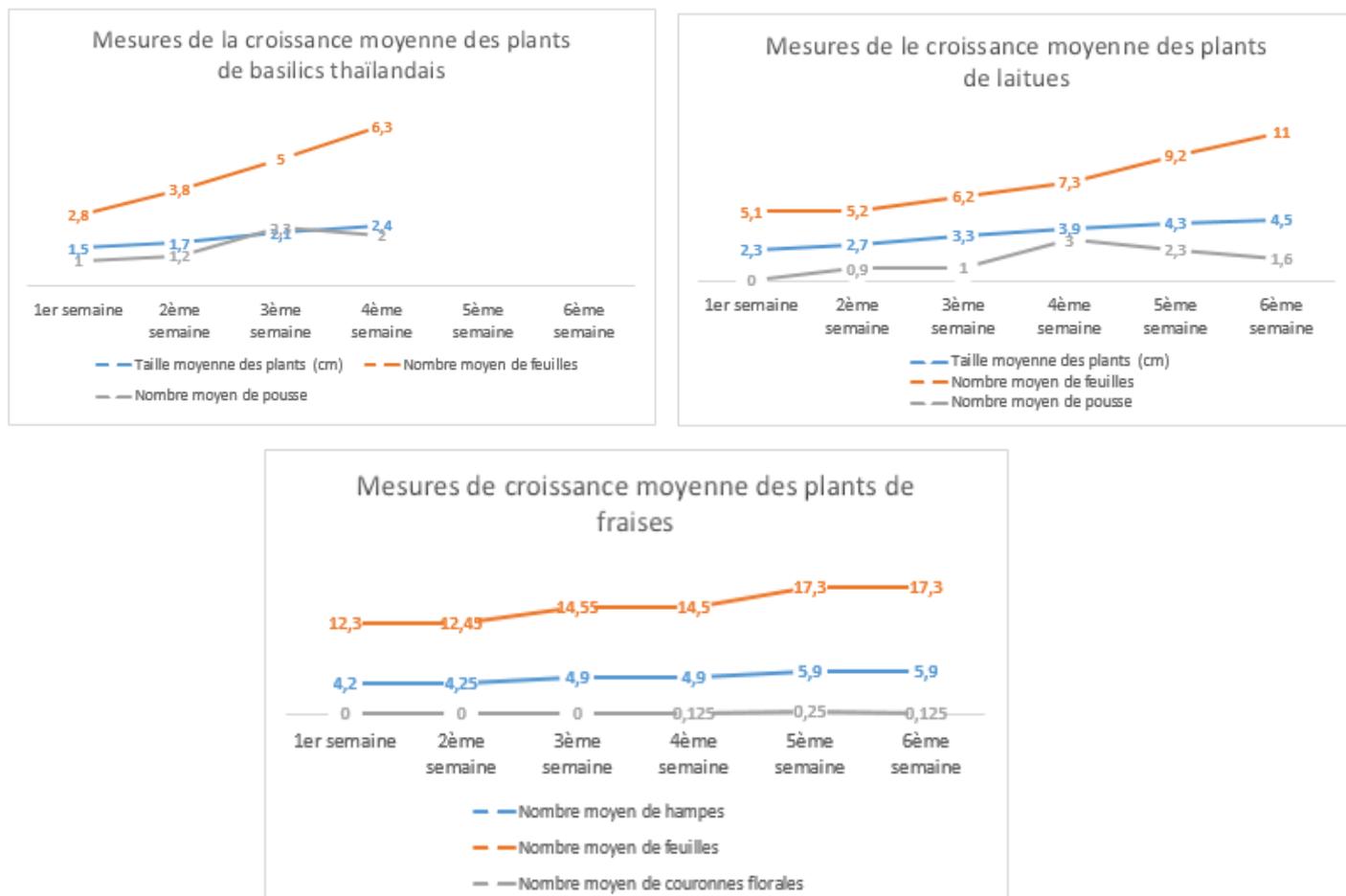


Figure 37 : Courbes de croissance des plantes étudiées

Pour le cas de la fraise on constate que les plants n'ont pas une croissance aussi importante qu'on aurait pu l'espérer, +30% de matière organique (figure 37).

Cela peut s'expliquer par le temps nécessaire pour que les plants s'implantent dans la structure et développent un système racinaire assez dense pour capter les nutriments.

De plus, les températures à partir d'octobre ont chuté la nuit sous le seuil des 8-10 degrés Celsius, température ambiante minimale requise pour une bonne croissance des plants. (COQUELET, 2003)

De même, la température du substrat qui doit osciller entre 12–17 degrés Celsius pour une croissance optimale n'était peut-être pas à la température requise puisque le fait que le système soit à flux continu ne permettait pas un ressuyage du substrat ce qui a pu impacter le développement des plantes. (COQUELET, 2003 ; TEXIER, 2013)

La culture du basilic en hydroponie nécessite une exposition importante à la lumière et des températures chaudes (18-30 °C). (HARLAUT, 2017) Il semble que le principal frein à la croissance des plants fut les conditions météorologiques. Cependant, il est possible que la

fertilisation n'ait pas été assez précise et adaptée pour que les fraises poussent et produisent des fruits.

Au cours du temps, les plantes dont principalement les salades ont développé un système racinaire dense qui a dans un premier temps traversé le pochon et ensuite s'est développé dans la toile (figure 38). La plupart des plants de laitue ont même traversé la toile avec leurs racines. Cela représente un risque pour ces dernières. En effet, durant les périodes à forte températures, en cas de mauvaise humification des toiles, il y a une grande probabilité que les racines brûlent. Ce sera un paramètre à contrôler pour la suite des expériences. Cependant, le développement du système racinaire sur la toile signifie que les plantes vont chercher les nutriments hors de la poche. Cela permet ainsi aux végétaux d'être plus résistantes aux manques de nutriments dans la zone de la poche. Il serait intéressant pour les années à venir d'analyser des parties de toiles pour savoir les proportions de nutriments captés par la toile et leur biodisponibilité pour les plantes.



Figure 38 : Plants de salades dans un pochon avec terreau G9 (gauche) et un autre dans un pochon avec vermiculite (droite) après 4 semaines de croissance

L'analyse du comportement des plantes a inclus le recensement des pertes selon les divers matériaux de culture afin d'apporter des informations supplémentaires sur le projet VERTIcal.

2.2.2 La mortalité

Un recensement hebdomadaire de la mortalité a été réalisé. La figure 39 présente la répartition des pertes selon le type de toile.

La culture la plus impactée fut la laitue avec un décompte de près de 38 individus morts au cours de la phase d'expérimentation soit 7% de l'effectif total (486 plants).

La moitié des pertes, près de 47%, est dénombrée sur la toile Novatex, pratiquement autant que sur les deux autres toiles réunies.

Plusieurs explications peuvent expliquer ces pertes. Dans un premier temps, les températures durant le mois de septembre et octobre ont été relativement élevées avec des pics pouvant atteindre jusqu'à 30.1 degrés Celsius, ressentie 35. Or en hydroponie, la température affecte la solubilité des engrais et la capacité d'absorption des racines. (TREJO-TÉLLEZ et GOMEZ-MERINO, 2012)

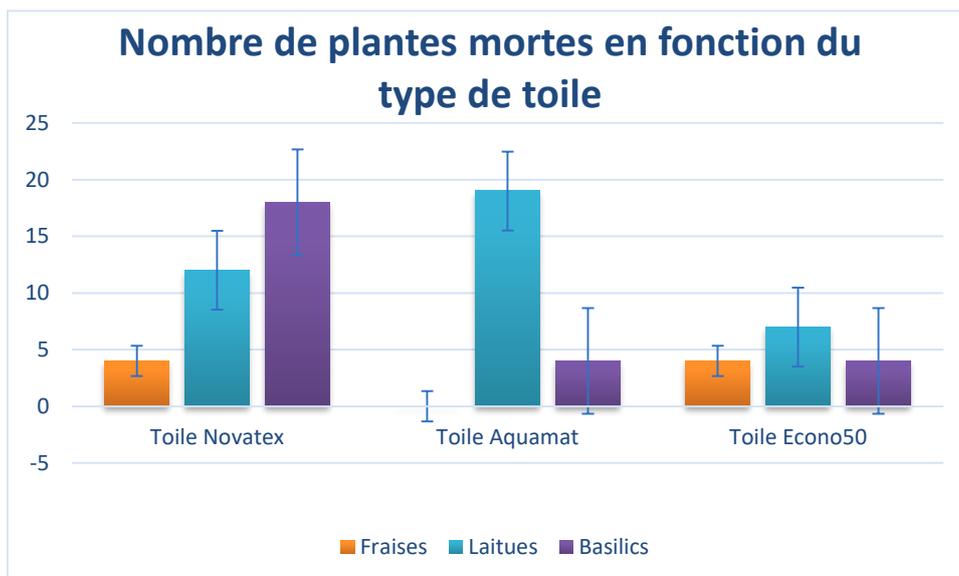


Figure 39 : Recensement des plantes retrouvées mortes sur le projet en fonction des toiles de culture

Les toiles noires Novatex emmagasinent plus la chaleur - néfaste pour le système racinaire - et retiennent mal l'eau. Ces particularités peuvent expliquer ce taux de perte. La gestion des cycles d'irrigation est donc un paramètre important dans la conduite des murs comestibles avec les toiles Novatex.

De plus, il serait intéressant d'installer un système de refroidissement pour équilibrer les variations de températures. Le pack VENTIL ECO 125 mm confectionné par l'entreprise GREEN FILTER est intéressant pour son coût limité (145 CAD) et par ses capacités à renouveler et brasser l'air ainsi qu'homogénéiser le CO₂. La présence dans le pack de 2 extracteurs de gaine winflex VKO permet de brasser 370 m³ d'air/heures et le thermo-hygromètre permettrait le contrôle de la température et de l'humidité du milieu de culture. (CULTURE INDOOR, 2017) Un pack par zone de culture représente un coût total d'environ 290 CAD.

De plus, les complications par rapport à l'équilibre de la régie de fertilisation ont provoqué des périodes de stress hydriques qui peuvent être nuisibles pour les plantes. REFAAT et SALEH (1997) rapportent que ce type de stress réduit la croissance du basilic et DZOTSI *et al.* (2004) font état de l'influence variable du climat et de la variété cultivée sur la croissance du basilic dans le temps et dans l'espace.

Le choix du substrat est une étape importante car la gestion de la culture et la réussite de l'ensemble dépendent de ses propriétés physiques.

Pour la phase de test, deux substrats ont été sélectionnés, un organique (AGRO MIX G9) et un autre non-organique (Vermiculite).

D'après les observations réalisées, le nombre de pertes a été corrélé avec le type de substrat utilisé. On constate que 73% des individus morts étaient associés avec la vermiculite (figure 40).

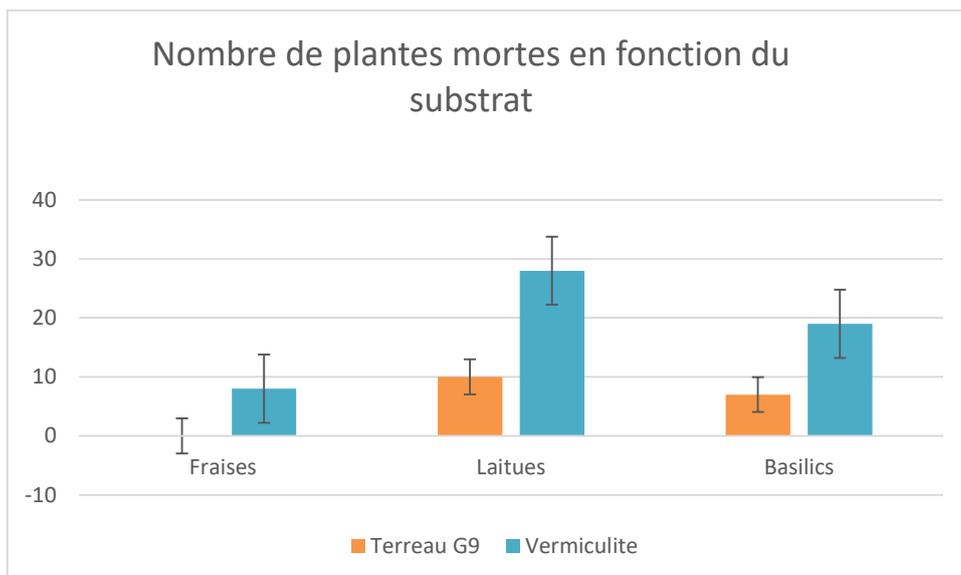


Figure 40 : Recensement des plantes retrouvées mortes sur le projet en fonction des toiles de culture

Le substrat doit satisfaire des exigences telle que la texture propice à une bonne pénétration des racines, une rétention en eau intéressante et un bon drainage.

Le mélange agro mix G9 et la vermiculite présentent tous les deux les avantages pour favoriser le développement racinaire, un pouvoir de rétention en eau intéressant et possèdent des propriétés contre les bactéries, les larves d'insectes et les champignons. (FAFARD, 2014)

Le compactage est aussi un paramètre à prendre en compte dans le choix. Cet indicateur permet de fournir des informations sur la densité apparente. Cette dernière correspond à la masse sèche d'un sol par rapport à son volume. (MUSY, 1991)

Quelques masses volumiques de divers substrats sont présentées au tableau 11.

Tableau 11 : Masses volumiques des substrats de culture (VERDONCK, 1983)

Substrat	Masse volumique (g·cm ⁻³)
Tourbe blonde	0,077
Tourbe brune	0,107
Écorce	0,272
Poussière de fibre de coco	0,066

Le terreau G9 qui est un mélange de tourbe blonde associée avec de la fibre de coco présente l'avantage, comparé à la vermiculite, d'être moins compacte pour permettre aux racines de bien respirer pour un meilleur développement de la plante.

Par contre, les deux substrats ont un pouvoir de rétention élevé. Pour des systèmes comme VERTIcal, il faut un support de culture absorbant et qui reste humide pour les racines. Cependant comme la solution nutritive circule de manière active un substrat avec un pouvoir drainant intéressant est nécessaire. (CERVANTES, 2011 ; FAFARD, 2014)

La porosité, rapport entre la phase solide du matériau et de l'espace des vides, est un autre paramètre important à prendre en compte puisque de celui-ci découle en partie la disponibilité en eau.

Les substrats sélectionnés présentent des porosités totales intéressantes (Tableau 12).

Tableau 12 : La porosité totale d'un support de culture (LEMARIE *et al.*, 1989)

Produit	Porosité totale Pt = Vv/Ve	Indice des vides (1/(1/Pt)-1))
Perlite	0.964	26.78
Vermiculite	0.954	20.74
Laine de roche	0.95	19.00
Tourbe blonde	0.92	11.50
Tourbe noire	0.88	7.33
Ecorce	0.85	5.67
Sable grossier	0.88	0.61
pouzzolane	0.70	0.43
Terre argileuse	0.45	0.82
Gravier	0.42	0.72

Sur les propriétés physiques, il est donc compliqué d'expliquer le taux de mortalité sachant que d'autres paramètres rentrent en compte dans la croissance des plantes.

Cependant, les propriétés chimiques de ces substrats peuvent jouer un rôle dans la croissance des plantes.

En effet, la capacité d'échange cationique (CEC) est un indice de la capacité que possède un substrat d'échanger des cations en solution avec des cations adsorbés. En hydroponie cette valeur permet donc d'évaluer la rétention en minéraux essentiels des supports de culture, tableau 13. (LEMAIRE, 1993)

Tableau 13 : CEC et pH de divers matériaux de substrats (BERTONI, 2017)

Type de matériaux	CEC (eq/m ³)	pH à l'eau
Matériaux organiques		
Tourbe brune française	200 à 400	5,0
Compost d'écorce de bois dur	184	7,5
Compost de déchets	158	6,5
Tourbe blanche	115	4,5
Écorce de pin fraîchement moulue	95	5,1
Fibres de bois	10	4,5
Matériaux minéraux		
Vermiculite grossière	27	7,5
Perlite grossière	6	6,9
Vermiculite fine	<2	8,7
Laine de roche	0	7,5
Sable	0	6 à 8
Zéolite	1-1,2	-

On constate que la vermiculite a une CEC faible (tableau 12) et un pH élevé pouvant influencer la disponibilité d'absorption de certains éléments. (MORARD, 2007) Cela peut jouer un rôle dans la croissance des plantes et expliquer ce taux de mortalité. L'analyse de la croissance des plantes permettra d'apporter des informations supplémentaires sur les matériaux de culture.

2.2.3 Analyses de l'évolution de la croissance des plantes

Dans un premier temps, la réalisation de tests de la normalité ont mis en évidence que les mesures suivent bien une loi normale. On peut donc traiter les valeurs en analysant les influences de paramètres sur la croissance des plants.

Tableau 14 : Résultat de l'Anova pour la croissance des plants selon le substrat

Périodes de tests	Taille moyenne des plants de laitues	Nombre moyen de hampes de fraisiers	Taille moyenne des plants de basilics
1er semaine	NS	NS	NS
2ème semaine	NS	NS	S**
3ème semaine	NS	NS	NS
4ème semaine	NS	NS	NS
5ème semaine	NS	NS	/
6ème semaine	NS	NS	/

* Significatif à 0,05 de niveau de probabilité

** Significatif à 0,01 de niveau de probabilité

NS : Non significatif à 0,05 de niveau de probabilité

Dans cette première étude statistique (tableau 14), on constate que seulement les mesures du basilic durant la seconde semaine présentent des différences significatives selon le type de substrat (taux de probabilité de 99%).

La présence d'une seule valeur significative peut s'expliquer par les températures qui ont été satisfaisantes pour le basilic cette semaine mais qui se sont dégradées au cours des jours qui ont suivi pour atteindre des valeurs trop basses pour que les plants puissent convenablement pousser. (WEATHER FINDER, 2017)

Il n'est pas possible pour cette première année de test de déterminer le pouvoir explicatif du type de substrat sur la croissance des plantes et donc de définir le substrat le plus intéressant pour la culture.

Une nouvelle année de test semble nécessaire à une période plus favorable pour obtenir des résultats plus concluants. Le laboratoire Agro-Enviro-Lab réalise des tests de substrats pour une somme avoisinant les 80 CAD et inclut les tests du pH, la conductivité, l'azote ammoniacal (NH₄), l'ion nitrate (NO₃), les métaux extrait à l'eau (P, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn).

Tableau 15 : Résultat de l'Anova pour la croissance des plants selon le type de toile

Périodes de tests	Taille moyenne des plants de laitues	Nombre moyen de hampes de fraisiers	Taille moyenne des plants de basilics
1er semaine	NS	NS	NS
2ème semaine	S**	NS	NS
3ème semaine	S**	NS	NS
4ème semaine	S**	NS	NS
5ème semaine	S**	NS	/
6ème semaine	S**	NS	/

* Significatif à 0,05 de niveau de probabilité

** Significatif à 0,01 de niveau de probabilité

NS : Non significatif à 0,05 de niveau de probabilité

Pour l'analyse de variance réalisée pour évaluer le pouvoir explicatif du type de toile sur la croissance des plantes, on observe une signification au niveau de la laitue (tableau 15). La première semaine fut l'installation des plants sur les toiles, cela semble donc logique de ne pas avoir de signification pour la taille moyenne des plants. Pour le reste de l'étude, il a été possible de réaliser une analyse statistique qui a identifié une paire significativement différente, l'Econo50 et l'Aquamat (Annexe 21).

Pour déterminer la toile présentant le meilleur taux de croissance pour la laitue, une étude de la croissance moyenne des plants sur ces 2 types de toiles a été réalisée (figure 41).

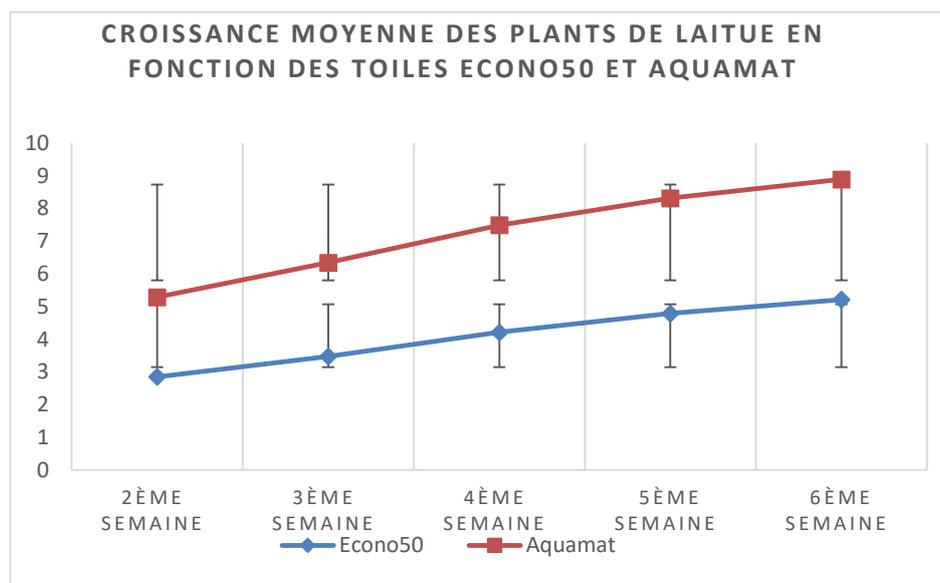


Figure 41 : Croissance moyenne des plants de laitue sur les toiles Econo50 et Aquamat en fonction du temps

On constate que les plants ayant poussés sur la toile Econo50 présentent un meilleur taux de croissance, + 43% en comparaison avec ceux sur la toile Aquamat ayant un taux de +32%. De même, la toile en matière recyclée présente un écart type d'environ 0,76 à la différence de la toile blanche en polyéthylène avec un écart type de 0,40. Pour la culture de laitue il semble que la toile Econo50 présente des caractéristiques plus intéressantes pour la croissance de laitue.

Cependant, les résultats de cette première année d'expérience ne permettent pas de conclure sur le type de toile la plus intéressante pour ce système.

Il faut continuer les expériences l'année suivante pour réaliser des tests durant la période optimale de croissance (Mai à Septembre).

De même, pour les prochaines années, la croissance des plants de basilic et laitue pourront être mesurés par l'étude des paramètres suivants : poids de la matière fraîche de l'ensemble de la plante, le poids de la matière sèche des plantes après dessiccation à 80 °C pendant 48 h, hauteur de la partie aérienne, longueur des racines et nombre de nodules par plante.

Enfin, le tableau 16 présente les résultats de l'analyse de variance effectuée afin d'étudier le pouvoir explicatif de la localisation du plant sur la toile (haut/bas).

Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA pour la croissance des plants selon la position sur la toile

Périodes de tests	Taille moyenne des plants de laitues	Nombre moyen de hampes de fraisiers	Taille moyenne des plants de basilics
1er semaine	NS	NS	NS
2ème semaine	NS	NS	NS
3ème semaine	NS	NS	NS
4ème semaine	NS	NS	NS
5ème semaine	NS	NS	/
6ème semaine	NS	NS	/

* Significatif à 0,05 de niveau de probabilité
 ** Significatif à 0,01 de niveau de probabilité
 NS : Non significatif à 0,05 de niveau de probabilité

Au vu des résultats, on peut en déduire dans le cadre de notre expérience que la position des plants sur la toile n'est pas significative pour la croissance des plants. Dans le même cas que les expériences précédentes, il sera intéressant de réaliser ces tests à nouveau suivant le protocole précédemment défini et durant une période plus adéquate pour la croissance des plantes. Effectivement, étant donné que l'eau ruisselle et coule le long de la toile, il y a une plus grande agglomération d'eau au bas de la toile. Il est possible de se demander si les éléments nutritifs ne seraient pas concentrés en plus grande proportion dans la partie inférieure de la toile. De même, des analyses de la composition du substrat et des analyses foliaires mensuelles permettraient d'apporter des renseignements sur la fertilisation à adopter en fonction des carences décelées ou des éléments présents en trop grande quantité.

2.2.4 Les interactions entre les différents paramètres

Les analyses statistiques réalisées en faisant interagir les paramètres de culture (toile, substrat, position sur la toile). Les résultats ont révélé une signification pour la culture de la laitue. Les résultats des deux autres cultures ne sont pas exploitables étant donné les conditions de culture non réunies pour leur croissance.

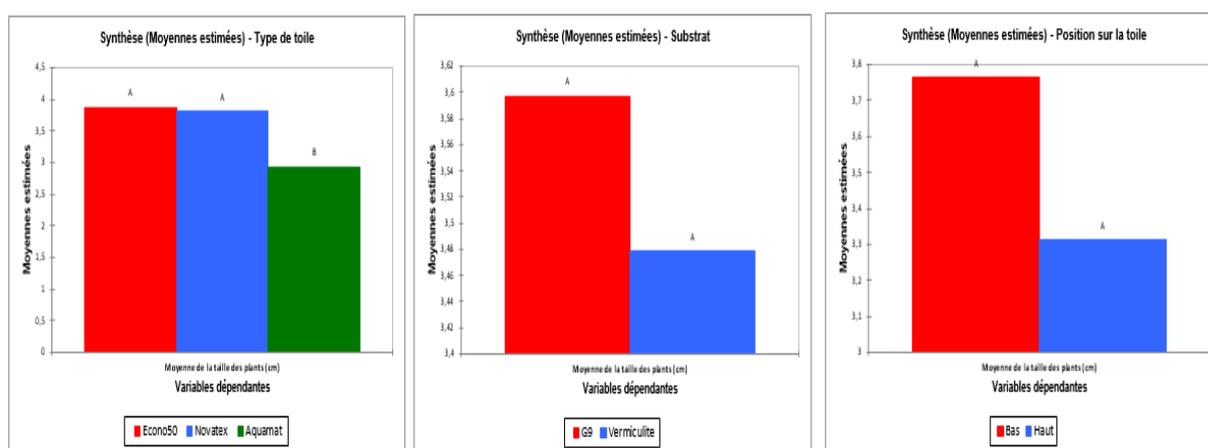


Figure 42 : Synthèse des moyennes estimées de la croissance des plants de laitue selon les éléments utilisés pour la culture

La culture de laitue sur « murs comestibles » en extérieur semble plus propice avec les conditions de culture réalisées durant le stage avec les toiles Econo50 et Aquamat (figure

42). De même, le G9 semble être le substrat le plus intéressant avec ses caractéristiques pour cette plante, comme la position sur le bas de la toile.

Pour cette dernière remarque, cela peut s'expliquer par un taux d'humidité plus important dans le bas des toiles en comparaison avec la partie supérieure des toiles.

Ainsi la culture de laitue verticale nécessite une humidité importante avec un terreau avec une bonne rétention pour maintenir le système racinaire humide et dans des températures adaptées pour le développement des plants.

3 Le prototype vertical en serre

3.1 La croissance des plants de laitue

Après avoir finalisé la conception du système, le lancement des tests a été réalisé à partir du 1^{er} Décembre avec de nouveau semis de plants de laitue.

Les techniques d'hydroponie conventionnelles (NFT) permettent d'obtenir des salades en 5 semaines. (SARLÉ, 2017) Ainsi les tests de croissance en serre ont porté sur la même durée de temps (figure 43) avec une base de donnée en annexe 22.

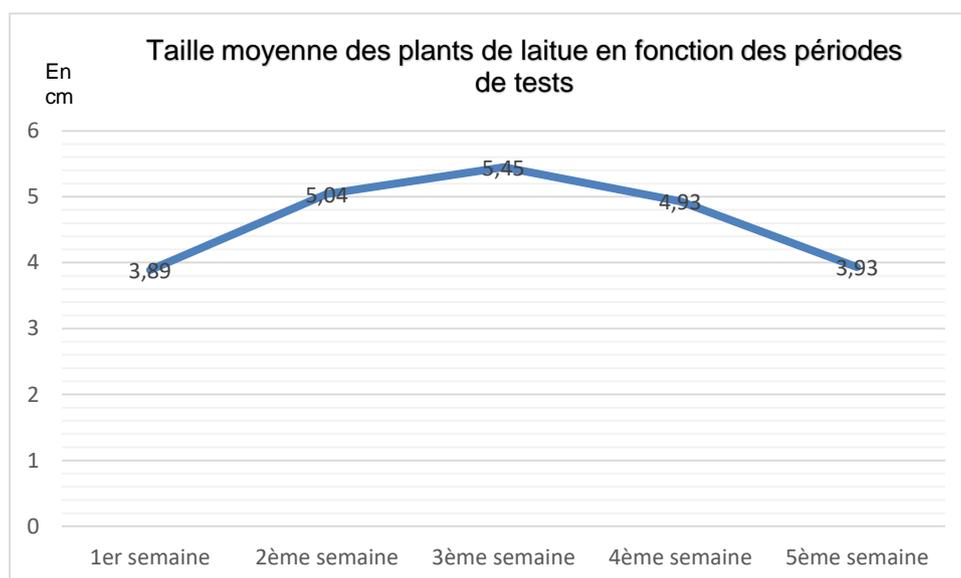


Figure 43 : Courbe de croissance des plants de salades (en cm) en fonction des périodes de tests

On remarque une baisse de la taille moyenne à partir de la 3^{ème} semaine d'expérimentation. Cela peut s'expliquer par l'apparition sur les plants de thrips et de pucerons. Le développement de ces ravageurs non présents sur le système monté sur le toit du PCM a nécessité un suivi plus poussé des plants.

Le thrips est un insecte râpeur qui provoque des mouchetures ou des stries blanches, décolorées à brunes. Une infestation importante limite la croissance végétale. De même, les pucerons de la laitue causent des dégâts importants dans les cultures. Les organismes infectés se ratatinent et leurs feuilles se décolorent ou frisent. Ils sont également vecteurs de la mosaïque de la laitue. Il s'agit d'un virus qui influe sur la taille et le développement des plants. (CLA, 2006)

Lors des tests réalisés en serre, une partie de la culture a été perdue et retirée des toiles pour limiter la propagation des ravageurs présentant un risque pour la suite des tests. Étant donné que la réglementation en ville interdit l'utilisation d'insecticides, une lutte biologique a été adoptée pour réduire les populations d'insectes. Dans un premier temps, des acariens prédateurs *Neosegelulus cucumeris* ont été introduits dans la culture (mode

d'emploi annexe 23). Puis dans un second temps, des traitements de BioCeres WP ont été réalisés (mode d'emploi annexe 24). Il s'agit d'un insecticide biologique à base de champignon entomopathogène *Beauveria bassiana* qui s'attaque à plusieurs espèces d'invertébrés dont les thrips et les pucerons. (ANATIS BIOPROTECTION, 2017a ; ANATIS BIOPROTECTION, 2017d)

L'application de ces éléments sur le système de culture a permis de contrôler les populations de ravageurs cependant les pertes ont été importantes et il a fallu arracher plusieurs feuilles pour limiter la propagation. Ainsi, les plants n'ont pas poussé comme espéré avec les conditions optimales de la serre.

De plus, un développement anarchique d'algues vertes a été observé sur la surface des toiles (figure 44).

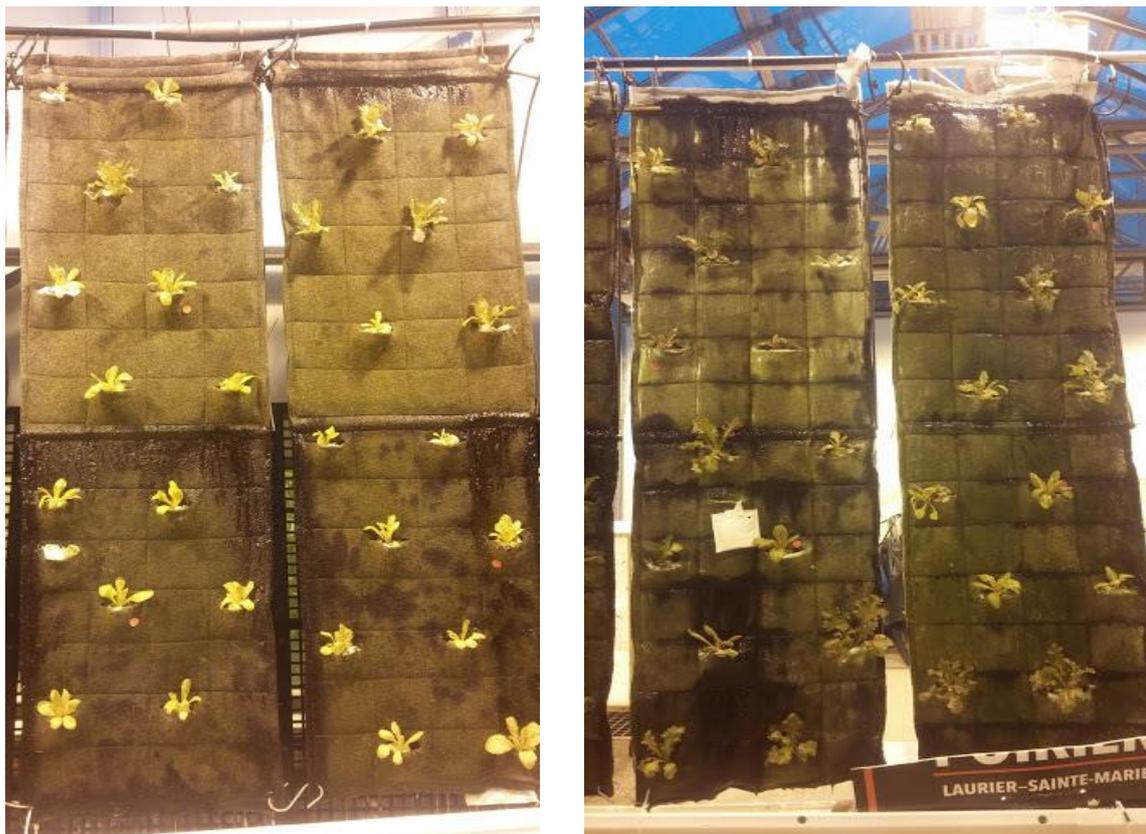


Figure 44 : Développement d'algues sur les toiles au niveau de la zone d'irrigation et sur le bas des toiles

L'algue verte est un eucaryote qui a besoin de nutriments, de lumière ainsi qu'une surface humide pour se développer. Le prototype de murs comestibles développé présente les caractéristiques pour la propagation de ce type d'algue.

Techniquement, elle ne cause pas de dégâts particuliers cependant elle attire les mouches du terreau et autres créatures qui s'attaquent aux racines. Or une fois que les racines sont touchées, les maladies cryptogamiques peuvent se développer. (CERVANTES, 2016)

Il fut observé un début de développement d'algues sur le système du PCM. Pour les années à venir, le seul moyen de prévention contre cet eucaryote serait l'utilisation d'algicides. Cependant ces derniers sont nocifs pour la faune aquatique en contribuant à la libération massive de toxines présentes dans les cyanobactéries. (RIVARD-SIROIS, 2005)

Le prototype « Paris sous les fraises » présenterait un développement similaire d'algues sur la surface de culture. Or cela n'empêche pas le système d'être productif.

On peut donc en déduire qu'un équilibre doit pouvoir se trouver pour ne pas impacter la croissance des plantes. Des contrôles fréquents des plants sera nécessaire pour identifier ou non la présence de carences ainsi que des analyses régulières de l'eau du système.

Pour tester l'effet du développement des algues sur la conduite du système des tests RAPITESTS ont été réalisés.

Les résultats obtenus (annexe 25) ont permis de mettre en évidence un surplus de potassium et des carences en phosphore. L'excès du premier élément cité conduit à des antagonismes cationiques puisque le potassium réduit l'absorption du calcium et du magnésium.

L'assimilation des oligo-éléments, comme le fer et le zinc, peut être également freiné. (MORARD, 2007)

Pour le cas du phosphore, la carence s'est manifestée par un brunissement des limbes prenant une couleur vert foncé. Elle entraîne une diminution de la formation des graines. (MORARD, 2007)

Lors d'un second test RAPITEST, une concentration trop élevée en azote a été remarquée. On peut se demander si ces algues ne font pas de la concurrence aux plantes cultivées en captant les nutriments qui leur sont dédiés et en empêchant un développement convenable du système racinaire des laitues.

Après la période d'étude, les plants ont continué à être cultivés. Or la croissance bien que non mesurée a été ralentie et les plants ont végété.

3.2 Les interactions toile - substrat

Les analyses statistiques montreraient une influence de l'association toile – substrat sur la croissance des laitues.

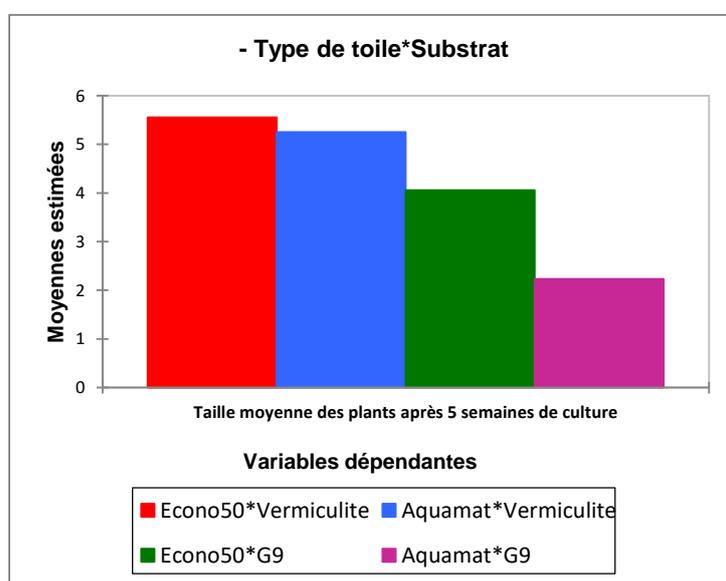


Figure 45 : Synthèse des moyennes de croissance des laitues estimées en fonction du type de toile et du substrat associé

On constate que l'association Econo50 – vermiculite présente les résultats les plus intéressants pour la croissance des plants de laitue.

De même, le couple Aquamat – Vermiculite a une moyenne estimée proche du couple précédent. Ainsi on peut supposer que pour la conduite du système VERTICAL en serre avec

la culture de laitue, les toiles Econo50 et Aquamat associées avec de la vermiculite présenteraient les résultats les plus concluants.

3.3 Discussion et proposition sur les tests réalisés sur l'expérimentation du système VERTICAL en serre

Pour les années à venir, il sera important de contrôler l'évolution de ces algues et voir leur influence dans la conduite du système, d'où l'intérêt de réaliser régulièrement des analyses de l'eau pour établir avec précision l'influence de ces algues. Les tests RAPITESTS ont été intéressants pour donner un ordre d'idée de l'état du système mais ils ne donnent pas les concentrations exactes des éléments présents dans l'eau comme une analyse.

Le développement des algues sur les toiles pourrait colmater les tuyaux et augmenter le pH. De plus, elles produisent des substances toxiques en se décomposant impactant la croissance des plantes. (CERVANTES, 2011) Il faudra donc un système de filtration avant de réutiliser l'eau.

Il a également été noté dans la gestion du système que de multiples goutteurs étaient obstrués par de la vermiculite. Ces obstructions ont empêché une conduite normale du système et ont favorisé l'assèchement de section sur les toiles et la mort de plusieurs plants. Il est donc recommandé pour les années à venir de vérifier régulièrement l'état de la tuyauterie pour ne pas provoquer de stress hydrique des plantes.

Ainsi avec les différents problèmes rencontrés, il n'est pas possible de comparer les rendements en serre avec ceux réalisés sur le toit du PCM.

Pour la lutte biologique intégrée, l'implantation d'acariens prédateurs semble avoir été compliquée. Il est possible que le milieu trop humide soit néfaste pour son développement. L'hémérobe (*Micromus variegatus*) est un prédateur généraliste s'attaquant aux pucerons, thrips, aleurodes et autres insectes à corps mou. Cet insecte tolère les températures fraîches et se disperse facilement dans toute la zone à traiter. Il peut être utilisé en curatif ou préventif. (ANATIS BIOPROTECTION, 2017b)

De même, l'*Orius insidiosus*, punaise prédatrice de thrips et autres insectes est un auxiliaire très intéressant. Elle se nourrit de divers ravageurs et est très agressive en tuant plus de proie qu'elle n'en consomme. (ANATIS BIOPROTECTION, 2017c)

Ainsi, ces deux espèces semblent intéressantes à installer sur le toit du PCM en mesure préventive contre de futur potentiel ravageurs de culture.

4 Conclusion préliminaire

Les propositions présentées tout au long de ce mémoire sont plus ou moins réalisables mais présentent toutes des avantages indéniables pour l'amélioration de la conduite du système et le respect de l'environnement. Les propositions présentées incluent des packs d'oxygénation - toiles pare-soleil ; des récupérateurs d'eau de pluie ; le salaire d'un employé chargé de l'entretien du projet ; un système de fertilisation avec recycleur de solution drainée et la réalisation d'analyses régulières de l'eau recyclée.

La réalisation des différentes améliorations représenterait un montant total de 33 260 Dollars canadiens soit 23 540 Euros (tableau 17).

Avec un chiffre d'affaire comme estimé dans la partie une des résultats, il faudrait en moyenne 2 ans pour amortir ces coûts d'investissements.

Tableau 17 : Récapitulatif des coûts des différentes propositions

Propositions	Coût estimé
Pack oxygénation eau (x2) et toiles pare-soleil	5595 CAD
Système récupération eau de pluie	12900 CAD
Employé (45h/semaine)	13500 CAD
Amélioration système irrigation - fertilisation	750 CAD
Analyse de l'eau drainée sur une saison	1250 CAD
Système de récupération eau drainée (x2)	4570 CAD

Conclusion générale

Sur le toit du Palais des Congrès de Montréal, l'AU/Lab a souhaité développer une nouvelle technologie hydroponique verticale pour répondre au défi de l'augmentation démographique urbain.

Le développement de projets tel que VERTIcal permet l'évolution des relations entre le développement urbain et la biodiversité, la régulation des microclimats urbains, la diminution des émissions de gaz à effet de serre, la captation des eaux de pluie.

D'après les études réalisées et présentées dans ce mémoire, du point de vue technique, le projet VERTIcal nécessite une consommation d'eau importante et des améliorations dans l'organisation et la gestion du système.

Les observations permettent d'émettre des recommandations notamment par rapport aux laitues. Effectivement leur production, pour le prototype sur toit, peut être effectuée avec les toiles Econo50 ou Novatex et le substrat G9.

Cependant, si le prototype est développé en serre, avec un contrôle des différents paramètres de cultures (humidité, lumière, température), la toile Econo50 avec de la vermiculite seraient les plus adaptés pour ce type de salade.

Pour le reste des plantes testées, fraises et basilics, de nouveaux tests durant la prochaine période estivale sont nécessaires pour définir les matériaux les plus avantageux pour leur culture et leur capacité d'adaptation sur les toiles.

En ce qui concerne la fertilisation, la fabrication des mélanges pour solutions nutritives ainsi que des contrôles réguliers semblent intéressants pour pérenniser le système et simplifier sa conduite.

De même, d'autres expériences devront être réalisées afin de définir les facteurs les plus intéressants pour la croissance et la fructification des plantes. En effet, l'ensoleillement, les températures journalières, l'irrigation sont des paramètres influençant la qualité et le goût des produits (SARRAF, 2011)

Il a été relevé que les systèmes hydroponiques ont besoin d'en moyenne 6 mois pour trouver leur équilibre et fonctionner convenablement. Ainsi il est possible que la 1^{ère} année ne soit pas rentable et à la hauteur des espérances de productivité. Il faudra affiner au fur et à mesure du temps les paramètres tels que la conductivité, le pH, les cycles de fertilisation et la gestion de l'eau.

Pour terminer, les différentes améliorations précitées vont réclamer de nouvelles sources d'énergie électrique. Il serait possible de rendre le système plus autonome et auto-suffisant en installant des panneaux solaires photovoltaïques sur le toit du Palais des Congrès. En effet, les recherches réalisées ont démontré que pour une consommation moyenne de 5000 Wh (consommation estimées avec les améliorations), seulement 138 m² de panneaux solaires pourraient répondre aux besoins énergétiques du projet sur la période Mai - Septembre. (ECO-ENERGIE, 2013 ; ECOINFOS, 2017)

Références bibliographiques

ADAM, K. L. 2003. Organic Greenhouse Herb Production. Horticulture Production Guide (en ligne).
Disponible sur www.attra.ncat.org/attra-pub/gh-herbhold.html (Consulté le 08/08/2016)

AGRALIS, 2017. <https://www.capteurs-et-mesures-agralis.com/mesure-humidite-sol/>
(Consulté le 08/08/2016)

AGRICOOOL, 2016. De l'agriculture à Bercy, le paradis des fraises (en ligne).
Disponible sur : <http://paris.agricool.co/> (Consulté le 22/08/2016)

ANATIS BIOPROTECTION, 2017a. BioCeres WP, fiche descriptive (en ligne).
Disponible sur : <http://anatisbioprotection.com/produits-lutte-biologique/insecticide-biologique-bioceres.html> (Consulté le 21/02/2017)

ANATIS BIOPROTECTION, 2017b. Fiche technique Hémerobe (en ligne).
Disponible sur : <http://anatisbioprotection.com/assets/docs/fr/micromus-variegatus.pdf>
(Consulté le 21/02/2017)

ANATIS BIOPROTECTION, 2017c. Fiche technique Orius insidiosus (en ligne).
Disponible sur : <http://anatisbioprotection.com/assets/docs/fr/orius-insidiosus-anatisbioprotection.pdf> (Consulté le 21/02/2017)

ANATIS BIOPROTECTION, 2017d. Fiche technique Neoseiulus Cucumeris (en ligne).
Disponible sur : <http://anatisbioprotection.com/assets/docs/fr/neoseiulus-cucumeris-sachet-anatisbioprotection.pdf> (Consulté le 21/02/2017)

AQUAMAT, 2017. Composants produits AQUAMAT (en ligne).
Disponible sur : <http://www.aquamatsystem.com/produits/aquamats/composantes/>
(Consulté le 09/07/2016)

ARCHITECTEO, 2017. Pente et surcharge de la toiture, la toiture végétalisée (en ligne).
Disponible sur : <http://toiture-vegetalisee.architecteo.com/pente-surcharge-toiture.html>
(Consulté le 20/02/2017)

ARTE, 2014. L'extrême vulnérabilité du système agro-industriel (en ligne). 2p.
Disponible sur : <http://www.arte.tv/sites/fr/robin/files/agriculture-industrielle.pdf> (Consulté le 05/01/2017)

ASCHER D., 2008. Règlementation végétalisation de toiture, Actu-environnement (en ligne).
Disponible sur : http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/vegetalisation_toiture/reglementation_toit_vegetalise.php
(Consulté le 08/08/2016)

AUBRY C., BEL N., 2013. Cultiver sur les toits ? De l'utopie à la conduite technique. Communication orale aux 5ème rencontres du Végétal, Angers, 14-15/01/2013.
http://rencontres-du-vegetal.agrocampus-ouest.fr/infoglueDeliverLive/digitalAssets/75732_AUBRY-BEL.pdf (Consulté le 08/08/2016)

AUBRY C., POURIAS J., 2013. L'agriculture urbaine fait déjà partie du métabolisme urbain., Nature et agriculture pour la ville, Le Demeter Editeur, 135 - 15

AU/Lab, 2011. Historique récent de l'agriculture urbaine à Montréal (en ligne).

Disponible sur : <http://agriculturemontreal.com/historique-recent-agriculture-urbaine-montreal> (Consulté le 08/08/2016)

BERTONI, 2017a. Communiqué cours : Culture hors-sol. Formation agriculture et développement durable. 132 p.

BERTRAND L., THÉRIEN F., CLOUTIER M.S., 2008. Measuring and mapping disparities in access to fresh fruits and vegetables in Montréal. Canadian Journal of Public Health, vol. 99, n° 1, p 6-11.

BLANC D., 1987. Les cultures hors sol. INRA, Éditions Paris, p 16-22.

BORREL ESTUPINA V., 2011. L'évapotranspiration. Université Montpellier 2 – Sciences et Technologies. 23p.

BROUWERS T., 2010. La disparition des terres agricoles canadiennes. Le réseau du savoir biologique, Centre d'Agriculture Biologique du Canada (en ligne).

Disponible sur :

http://www.organicagcentre.ca/NewspaperArticles/na_disappearing_farmland_tb_f.asp (Consulté le 05/01/2017)

CAPITALE MEDIAS, 2016. Le prix des fruits et légumes, le dollar et la météo en cause. La Presse, Capital Médias (en ligne).

Disponible sur : <http://www.lapresse.ca/la-tribune/actualites/201601/19/01-4941338-prix-des-fruits-et-legumes-le-dollar-et-la-meteo-en-cause.php> (Consulté le 05/01/2017)

CAUCHY D., 2009. Notes de conférence : Une assiette pour notre santé, celle de la planète et celle de tous ses habitants. Nouvelles alternatives, 7p.

CENTRE DE LUTTE ANTIPARASITAIRE, 2006. Profil de la culture de la laitue de serre au Canada, Programme de réduction des risques liés aux pesticides, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 38p.

CERVANTES, 2011 : La culture en intérieur : la bible du jardinage indoor. MAMA Editions 387p.

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA MARTINIQUE, 2007. Fiche technique laitue sous abri hors sol. 2p.

CHARLEBOIS S., TAPON F., VON MASSOW M., VAN DUREN E., UYS P., FRASER E., KAMALABYANEH L., SUMMAN A., 2016. Rapport sur les prix alimentaires à la consommation. The food institute of the University of GUELPH, note économique (en ligne). Disponible sur : <http://foodinstitute.ca/wp-content/uploads/2016/08/Food-Price-Report-2016-French-Final.pdf> (Consulté le 14/02/2017)

CHEF'S GARDEN, 2016. CHEF'S GARDEN PRODUCTS (en ligne).

Disponible sur : <https://www.chefs-garden.com/> (consulté le 04/04/2017)

CIRAME AGROMÉTÉO, 2016. Les coefficients culturaux. Irrigation, les relations climat agriculture en région PACA (en ligne).

Disponible sur : <http://www.agrometeo.fr/irrigation.asp> (Consulté le 10/03/2017)

CLA, 2006. Profil de la culture de la laitue de serre au Canada. Programme de réduction des risques liés aux pesticides, Centre pour la lutte antiparasitaire. Agriculture et Agroalimentaire Canada. 38p.

CLIMAT QUEBEC, 2016. Normales en tableau, station Montréal – Pierre Elliot (en ligne). Disponible sur : http://www.climat-quebec.qc.ca/home.php?id=norm_entab&mpn=stati_clim&slt_nomStations=30&slt_idStations=7025250&slt_variable=10&slt_periode=2&sub=Afficher (Consulté le 08/08/2016)

COLLA G., ROUPHAEL Y., CANAGUIER R., SVECOVA E., CARDARELLI M., 2014. Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Frontiers in Plant Science*. 6p.

COQUELET, C., IZARD D., NAVATEL J.C., PONCET M., TAUSSIG C., 2003. La fraise en culture suspendue. APREL – SEFRA. (En ligne) Disponible sur : http://www.aprel.fr/pdfClasse/0Fiche_fraise_hors-sol_2004.pdf (consulté le 10/02/2017)

CORNEAU M.-J., 2015. Aménagement éphémère et animation pour la place Emilie-Gamelin. Communiqué de presse, quartier des spectacles Montréal (en ligne). Disponible sur : http://www.quartierdesspectacles.com/fr/medias/emilie-gamelin_amenagement (Consulté le 10/02/2016)

COTÉ L., COURTEMANCHE R., CARON B., DAVELUY C., ROBITAILLE C., BARALDI R., BORDELEAU M., 2005. Enquête de santé dans les collectivités canadiennes, Impact du changement apporté à la répartition de l'échantillon selon la base de sondage. Institut de la statistique Québec, Statistique Canada, 71 p.

COURTNEY A., et al, 2012. Urban Cultivation, A Guidebook to: Educate, Empower, Engage. As part of a Thesis titled Cultivating the Social Field: Strategically moving Urban Agricultural Projects towards Sustainability Submitted for completion of Master of Strategic Leadership towards sustainability, Blekinge Institute of Technology, Sweden, 28p.

COUTURE I., 2004. Analyse d'eau pour fin d'irrigation. MAPAQ Montérégie-Est, AGRIVISION, p 3-5.

CHAHINE G., 2015. Mémoire du SAM (système alimentaire montréalais (en ligne), 22 p. Disponible sur : http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/COMMISSIONS_PERM_V2_FR/MEDIA/DOCUMENTS/MEM_SAM_20151008_1.PDF (Consulté le 08/08/2016)

CULTURE INDOOR, 2017. Fiche description pacl ventil-eco 125 mm, Ventilation - climat (en ligne). Disponible sur : <https://www.cultureindoor.com/5430-pack-ventil-eco-125mm.html> (Consulté le 12/04/2017)

DANIEL A.C., 2013. Aperçu de l'agriculture urbaine en Europe et en Amérique du Nord, AgroParisTech, 79p.

DANIELSSON N., FOSS J., QUESNEL A., 2011. Sustainable rooftop agriculture, A strategic guide for city implementation. Blekinge Institute of Technology, Sweden.

DDM, 2006. Dispensaire diététique de Montréal : Étude sur le coût du panier à provisions nutritif dans les divers quartiers de Montréal, Québec– Rapport synthèse, 4p.

DDM, 2015. Dispensaire diététique de Montréal, Coût du panier à provisions nutritif, 2p.

DESPOMMIER D, 2004. The Vertical Farm, feeding the world in the 21st Century (en ligne)

Disponible sur : http://www.verticalfarm.com/?page_id=36 (Consulté le 05/03/2017)

DIC, 2016. Accords multilatéraux sur l'environnement Dictionnaire du commerce international (en ligne).

Disponible sur : <http://www.glossaire-international.com/pages/tous-les-termes/accords-multilateraux-sur-l-environnement-ame.html>. (Consulté le 08/08/2016)

DOSATRON, 2017. Document de gamme WATER LINE, 2p.

DSP, 2015. Sols contaminés, environnement urbain Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud de l'île de Montréal, Québec (en ligne).

Disponible sur :

www.dsp.santemontreal.qc.ca/dossiers_thematiques/environnement_urbain/thematiques/sols_contamines/problemati que.html. (Consulté le 08/08/2016)

DUCHEMIN E., 2008. Agriculture urbaine : aménager et nourrir la ville. Collectif VertigoO, AU/Lab, p 97-107.

DUMORTIER F., 2010. Maîtriser l'irrigation fertilisante en culture hors-sol, Chambre d'Agriculture d Le Syndicat Agricole (en ligne)

Disponible sur : <http://www.syndicat-agricole.com/actualites/fraises-maitriser-l-irrigation-fertilisante-en-culture-hors-sol:310X7RU8.html> (Consulté le 08/08/2016)

DUPRÉ MINERALS, 2017. Vermiculite horticole, applications et entretien (en ligne).

Disponible sur : <http://www.dupreminerals.com/fr/vermiculite/applications/horticulture> (Consulté le 14/09/2016)

DURANET, 2017. Toiles pare-soleil, high performance nets and textiles (en ligne).

Disponible sur : <https://www.duranet.com/fr/jardin-agriculture/loisirs-et-bricolage/toiles-pare-soleil> (Consulté le 08/03/2017)

DZOTSI, A. K., M. C. S. WOPEREIS, A. TAMELOKPO ET K. KOUDJEGA. 2004. Rapport final du Projet Gestion intégrée de la fertilité des sols pour le basilic en production péri-urbaine à Lomé. IFDC-Division Afrique/Darégal Equatorial. Lomé. 56 p.

ECKERT M., 2012. Guide de la récupération d'eau de pluie. Ooreka, Fine Media, 74 p.

ECODESIGN RESOURCE SOCIETY, 2013. The Urban Farming Guidebook, planning for the Business of Growing Food in BC's Towns & Cities. HB Lanarc, Golder, 60p.

ECOENERGIE, 2013. Panneaux solaires photovoltaïques : production en temps réel de mon installation, Montréal (en ligne).

Disponible sur : <https://eco-energie-montreal.com/panneaux-solaires-photovoltaïques-production-temps-reel-montreal-quebec/> (Consulté le 05/04/2017)

ECOINFOS, 2017. Coût et rentabilité d'une installation de panneaux solaires photovoltaïques en 2017, Eco Infos, énergies renouvelables (en ligne).

Disponible sur : <http://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaïque/cout-et-rentabilite-dune-installation-de-panneaux-solaires-photovoltaïque/> (Consulté le 05/04/2017)

ESRF, 2017. Eagle Street Rooftop Farm, a rooftop farm in Greenpoint Brooklyn (en ligne).

Disponible sur : <http://rooftopfarms.org/> (Consulté le 08/08/2016)

FAFARD, 2014. Substrats de culture haute performance pour professionnels (en ligne).

Disponible sur : http://www.fafard.ca/wp-content/uploads/2014/10/CATPRO-F_2014_LR.pdf. (Consulté le 12/09/2016)

FAO, 1999 : Rapport agriculture urbaine et périurbaine, 15ème session du Comité de l'Agriculture de la FAO (en ligne).

Disponible sur : <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/9901sp2.htm> (Consulté le 08/08/2016)

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. Save and Grow: A Policy Maker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production (en ligne). Disponible sur : www.fao.org/ag/save-and-grow/ (Consulté le 16/02/2017)

FAO, 2016. La biodiversité au service de l'humanité. Archives de documents de la FAO (en ligne).

Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/004/v1430f/V1430F04.htm> (Consulté le 12/02/2016)

FRONTY L., 1982. Hydroculture et hydroponie : les cultures sans sol, Dargaud éd, Paris, 77p.

GOOGLE MAPS, 2016. Vue satellite du Palais des Congrès de Montréal.

HALWEIL B. et NIERENBERG D., 2007: « Farming the cities », State of the world: Our urban future, Ed. The World watch institute, p 49.

HARLAUT P. Guide de culture pour 12 plantes communes en aquaponie. Aquaponie, retour aux sources (en ligne).

Disponible sur : <http://www.aquaponie.biz/guide-de-culture-plantes-communes-aquaponie/> (Consulté le 01/03/2017)

HERBILLON J-M., 2012. Les incroyables comestibles poussent, Chroniques (en ligne).

Disponible sur : <http://lesincroyablescomestibles.fr/bonjour-tout-le-monde/> (Consulté le 08/08/2016)

HUFFINGTON POST, 2013. FarmedHere, Nation's largest indoor vertical farm, opens in Chicago area. Edition US (en ligne).

Disponible sur : http://www.huffingtonpost.com/2013/03/22/farmedhere-nations-largest-vertical-farm_n_2933739.html (Consulté le 10/02/2016)

HYDROBOX, 2013. La culture hydroponique : définition et histoire. Hydroponie.fr – culture hydro (en ligne).

Disponible sur : <http://hydroponie.fr/culture-hydroponique-definition-histoire/> (Consulté le 04/07/2016)

HYDROBOX, 2014. Mesure de l'oxygène dissous – Hydroponie.fr – culture hydro (en ligne).

Disponible sur : <http://hydroponie.fr/mesure-de-loxygene-dissous/> (Consulté le 08/08/2016)

INNOVEX, 2016. Fiche technique Novatex B120. GCTTG 3001-06, Québec, 1p.

INSEE, 2016. Définition développement durable, data-gouv.fr (en ligne).

Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1644> (Consulté le 10/02/2016)

KEHDI N, 2016. L'hydroponie en été – GHE (en ligne).

Disponible sur : http://www.eurohydro.com/pdf/articles/fr_hydro-ete.pdf (Consulté le 04/03/2016)

KEHDI N., 2017. Micro ferme hydroponique : durabilité qualité, simplicité et innovation (en ligne). GHE Eurohydro.
Disponible sur : <http://www.hydroponicmicrofarm.com/sites/default/files/files/complet.pdf>
(Consulté le 09/04/2016)

LADRANGE B., et al., 2012. La fraise remontante de plein champ « Mara des bois ». OIER SUAMME, Chambre d'agriculture Languedoc-Roussillon. 2p.

LAGNEAU., 2016. Agriculture urbaine : vers une réconciliation ville-nature. Ed. Le passager clandestine.

LEAHY K., 2011. Brooklyn grange is the world's largest Rooftop Farm. INHABITAT NEW YORK CITY (en ligne)
Disponible sur : <http://inhabitat.com/nyc/brooklyn-grange-worlds-largest-rooftop-farm-kicks-off-second-growing-season/> (Consulté le 02/02/2017)

LEBEDEVA J., 2008. Climate change adaptation and mitigation through urban agriculture: A Montréal case study. Master of Urban Planning, School of Urban Planning McGill University, 114p.

LEMAIRE F., 1993 Emploi des matières organiques comme substrat dans les cultures hors-sol, Revue PHM, 336, p 10-17.

LE MONDE, 2012. L'agriculture urbaine : l'avenir est sur les toits (en ligne).
Disponible sur : http://www.lemonde.fr/vous/video/2012/07/16/agriculture-urbaine-l-avenir-est-sur-les-toits_1734402_3238.html (Consulté le 04/03/2017)

LE MONDE, 2016. Vers un nouveau territorial : les chiffres de l'agriculture urbaine et périurbaine (en ligne).
Disponible sur : <http://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/glossaire/t/tukey-hsd.html>.
(Consulté le 08/08/2016)

LE QUILLEC S., BRAJEUL E., SÉDILOT C., RAYNAL C., LETARD M., GRASSELY D., 2002. La gestion des effluents des cultures légumières sur substrat. Hortipratic, Éditions CTIFL, 197 p.

LUCINI L., ROUPAHEL Y., CARDARELLI M., CANAGUIER R., KUMAR P., COLLA G., 2015. The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions. Scientia Horticulturae, ELSEVIER, 10p.

LUFA FARM, 2017. Section "NOS FERMES" (en ligne).
Disponible sur : <https://montreal.lufa.com/fr/nos-fermes> (Consulté le 02/02/2017)

MARION F., 2014. L'appétit croissant pour l'agriculture urbaine (en ligne). Magazine up.
Disponible sur : <http://www.up-magazine.info/index.php/planete/securite-alimentaire/5778-l-appetit-croissant-pour-l-agriculture-urbaine>. (Consulté le 05/02/2016)

MEF, 1998. Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 124 p.
Disponible sur : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/index.htm> (Consulté le 12/08/2016)

METEO MEDIA, 2016. Statistiques : Montréal, Québec (en ligne).

Disponible sur :

<http://legacyweb.meteoedia.com/statistics/temperature/cl7025250/caqc0363> (Consulté le 08/08/2016)

MF, 2017. Fiches descriptives membranes MultiFeutre (en ligne).

Disponible sur : <http://www.multifeutre.com/fr/industrialfelt.html> (Consulté le 09/06/2016)

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE QUÉBEC, 2003 : Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (en ligne). Loi Q-2 et r.18.1.01.

Disponible sur : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/loireg.htm>. (Consulté le 08/08/2016)

MITCHELL C-A., 1994. Bioregenerative life-support systems, NASA Specialized Center of Research and Training, Purdue University, West Lafayette, p 820-824.

MORGAN L., 1999. Hydroponic Lettuce production, A Comprehensive, Practical and Scientific Guide to Commercial Hydroponic Lettuce Production, publication Casper, Australia, p 111.

MOUGEOT L.J.A., 2006 : Cultiver de meilleures villes : agriculture urbaine et développement durable. Un focus, Centre de recherches pour le développement international, 137p.

ONU DAES, 2014. Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes, New York, Centre d'actualités de l'ONU (en ligne).

Disponible sur : <http://www.un.org/fr/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects.html> (Consulté le 15/08/2016)

PADILLA M., NASR J., 2004. Interfaces : agricultures et villes à l'Est et au Sud de la Méditerranée. Beyrouth. Ed. Delta ; Institut français du Proche-Orient, 429 p.

PARENT L.-E., GAGNÉ G., 2011. Guide de référence en fertilisation. CRAAQ, 2^{ème} édition actualisée, p 459.

PCM, 2012. Culti-Vert : c'est parti pour un autre été d'agriculture urbaine ! Communiqué de presse (en ligne).

Disponible sur : <http://congresmtl.com/2012/06/culti-vert-cest-parti-pour-un-autre-ete-dagriculture-urbaine/> (Consulté le 08/08/2016)

PEREIRA A.R., VILLA NOVA N.A., PEREIRA A.S., BARBIERI V., 1995. A model for the class A pan coefficient. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v.76, p 75-82.

PERRIER A., 1975. Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III - Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux, p 229-243.

PLANT PRODUCTS, 2017. Mélange d'oligoéléments chélatés Plant-Prod (en ligne).

Disponible sur : <http://www.plantproducts.com/fr/viewproduct.php?pid=1250> (Consulté le 08/08/2016)

POULIOT N., BERTRAND L., 2009. La santé est-elle au menu des Montréalais ? Portrait de la consommation alimentaire des Montréalais pour la période 2002-2007. Agence de la santé et des services sociaux de Montréal. Direction de santé publique. Montréal, 23 p.

PROMIX, 2016. Comment calibrer les injecteurs d'engrais. Zone du savoir – Service horticole – Premier Tech (en ligne).

Disponible sur : <http://www.pthorticulture.com/fr/zone-du-savoir/comment-calibrer-les-injecteurs-dengrais/> (consulté le 12/10/2016)

REFAAT A.M., SALEH M.M., 1997. The combined effect of irrigation intervals and foliar nutrition on sweet basil plants. Faculty of Agriculture, University of Cairo, p 515-527.

RIPPY J., PEET M., LOUWS F., NELSON P., ORR D., SORENSEN K., 2004. Plant development and harvest yields of greenhouse tomatoes in six organic growing systems. North Carolina State University, Raleigh, NC 27695 (en ligne).

Disponible sur :

https://www.researchgate.net/publication/242294003_Plant_Development_and_Harvest_Yields_of_Greenhouse_Tomatoes_in_Six_Organic_Growing_Systems (Consulté le 08/08/2016)

RIVARD-SIROIS C., 2005. Les algues sont-elles des nuisances ? Fiche technique n°11, Environnement Canada.

ROBITAILLE R., DUVAL J., 1996. Le point sur la fertilisation en production biologique de la tomate de serre (en ligne). Québec, 16p.

Disponible sur :

https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/Documents/point_fertilisation_culture_biologique.pdf (Consulté le 12/03/2017)

SAMPAIO S., 2011. Chaque seconde, 26m² de terres agricoles disparaissent en France. La tribune (en ligne).

Disponible sur :

<http://www.latribune.fr/actualites/economie/france/20111221trib000672707/chaque-seconde-26m-de-terres-agricoles-disparaissent-en-france.html> (Consulté le 05/02/2017)

SANYÉ-MENGUAL E., CERON-PALMA I., OLIVER-SOLA J., MONTERO J.-I., RIERADEVALL J., 2012. Environmental analysis of the logistics of agricultural products from roof top greenhouses in Mediterranean urban areas. Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals - Universitat Autònoma de Barcelona, 10p.

SARRAF C., 2011. Optimisation de la fertilisation des fraisiers remontants cultivés hors sol. Département de phytologie, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, p 64-65.

SCHADEK U., STRAUSS B., BIEDERMANN R., KLEYER M., 2008. Plant species richness, vegetation structure and soil resources of urban brownfield sites linked to successional age. Springer Science, 126p.

SCHMIDT A., HIRSCHBERGER C., 2013. Food and the city – Urban Farming for the late summer traveling foodie. The Huffington post, edition US (en ligne).

Disponible sur : http://www.huffingtonpost.com/arne-schmidt-and-claudia-hirschberger/food-and-the-city-a-photo_b_3778792.html?utm_hp_ref=tw (Consulté le 15/03/2016)

SHIELDS A., 2013. Des terres agricoles sacrifiées au nom du développement. Actualités sur l'environnement, Le Devoir (en ligne).

Disponible sur : <http://www.ledevoir.com/environnement/actualites-sur-l-environnement/390391/des-terres-agricoles-sacrifiees-au-nom-du-developpement> (Consulté le 08/08/2016)

SMITH O.B., MOUSTIER P., FALL A.S., 2004. Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone : enjeux, concepts et méthodes. Montpellier, CIRAD, p. 23-43.

STATISTIQUE CANADA, 2016. Echantillonnage probabiliste, Méthodes d'échantillonnage (en ligne).

Disponible sur : <http://www.statcan.gc.ca/edu/power-pouvoir/ch13/prob/5214899-fra.htm> (Consulté le 05/07/2016)

TABARLY S., 2011. Agricultures sous tension, terres agricoles en extension : des transactions sans frontières. ENS Lyon / Dgesco (en ligne).

Disponible sur : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/articles/agricultures-sous-tension-terres-agricoles-en-extension-des-transactions-sans-frontieres>. (07/02/2017)

TESI, R., CHISCI G., NENCINI A., TALLARICO R., 1995. Growth response to fertilization of Sweet Basil (*Ocinum basilicum*). Acta Hort, p 93-96.

TEXIER W., 2013. L'hydroponie pour tous. Hydroscope. Éditions MAMA EDITIONS, 285p.

TEXEL, 2017. Série Tex, la gamme des produits pour les professionnels de l'aménagement paysager, fiche produit (en ligne). Disponible sur :

http://texel.ca/fileadmin/medias/documents/fr/geosynthetiques/fiches-produits/geotextiles/Textel-fiche-produit-SERIE-TEX-WEB_01.pdf (Consulté le 07/07/2016)

TREJO-TÉLLEZ L.I. et GOMEZ-MERINO F.C., 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. Colegio de postgraduados, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico, 23p.

URBAN L., 2010. Gestion de la fertilisation dans les serres. Tome 2 (2nd Éd), 569 p, Éditions Lavoisier.

VERNAT J.-M., 2016. Découvrez « Paris sous les fraises ». Agir pour l'environnement, COP 21 (en ligne).

Disponible sur : <http://www.paris.fr/actualites/decouvrez-paris-sous-les-fraises-3052> (Consulté le 22/08/2016)

VITRE A., 2003. Fondements théoriques de la fertilisation en hors-sol. Agri-réseau, CRAAQ. 10p (en ligne).

<https://www.agrireseau.net/legumesdeserre/Documents/FONDEMENTS%20THEORIQUE%20DU%20HORS%20SOL.pdf> (Consulté le 15/08/2016)

WEATHER FINDER, 2017. Fiche descriptive des conditions climatiques journalières Montréal, Canada (en ligne).

Disponible sur : <http://weather-finder.com/Canada/Montreal/2016-08-18/?language=French> (Consulté le 08/08/2016)

WITIER P., PLATRET G., HUYNH H.T., FARCAS F., BOUTEILLER V., ANDRÉ D., MOUTON Y., ANTOINE J.M., 1999. Analyse et caractérisation de matériaux de construction, Techniques de l'Ingénieur (en ligne).

Disponible sur : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/analyses-de-surface-et-de-materiaux-42383210/analyse-et-caracterisation-de-materiaux-de-construction-p3660/> (Consulté le 08/08/2016)

ZIMMER L., 2012. The world's first commercial Vertical Farm Opens in Singapore (en ligne). Inhabitat – urban farming.
Disponible sur : <http://inhabitat.com/the-worlds-first-commercial-vertical-farm-opens-in-singapore/singapore-commercial-vertical-farm2> (Consulté le 02/02/2017)

Autres documents

BERTONI G., 2017b. Entrevue, système fertilisation en culture hors sol, Annexe 2.

DULUCQ V., DAURES J.F., 2013 : Quand le végétal investit la ville. BFM Business (en ligne).
Disponible sur : <http://www.bfmtv.com/grille/bfmbusiness/podcast-radio/11118/> (Consulté le 08/08/2016)

GAGNÉ M.-L., 2016. Entrevue, détermination de paramètres pour la conduite du système VERTICAL, Annexe 2 & 18.

SARLÉ M., 2017. Entrevue – Les sourciers, régie fertilisation, Annexe 3.

Table des figures

Figure 1 : Domaine de définition de l'agriculture urbaine (LE CARO et NAHMIA, 2012) .	8
Figure 2 : Variables caractérisant les projets d'agriculture urbaine (DANIEL, 2013).....	9
Figure 3 : Multifonctionnalité de l'agriculture urbaine (d'après DUCHEMIN et al., 2008) ..	11
Figure 4 : Les poids des tomates par plant/semaine de récolte (RIPPY <i>et al.</i> , 2004)	13
Figure 5 : Qualité gustative de tomates produites selon différents modes de culture ((RIPPY <i>et al.</i> , 2004).....	15
Figure 6 : Prototype Agricool Paris.....	16
Figure 7 : Farmed Here Chicago.....	17
Figure 8 : Photos de la ferme Sky Green (ZIMMER, 2012)	18
Figure 9 : Brooklyn Grange et la ferme Lufa Farm (LEAHY, 2011 ; LUFA FARM, 2017)..	20
Figure 10 : Schéma méthodologique du projet VERTIcal.....	27
Figure 11 : Schéma récapitulatif des variables et des analyses du stage.....	29
Figure 12 : Surface d'accueil du projet VERTIcal et photographie aérienne du PCM avec localisation de la zone d'accueil du projet VERTIcal (GOOGLE MAPS, 2016)	30
Figure 13 : structure principale - 49 cadres de 1,98m x 3,05m x 3,05m	30
Figure 14 : Structures stabilisante du système - 196 croisillons 3,05m x 1,22m & 40 tubes aluminium de 2,13 m.....	31
Figure 15 : Structure portante des toiles - 76 tubes aluminium de 3,05m.....	31
Figure 16 : Schéma de la répartition des membranes et des plantes sur les échafaudages	32
Figure 17 : Panneau de contrôle du système d'irrigation – fertilisation.....	34
Figure 18 : Système d'injection de la solution nutritive	35
Figure 19 : Réseau de tuyauterie pour l'irrigation - fertilisation.....	35
Figure 20 : Dispositif d'irrigation des toiles	37
Figure 21 : Schéma descriptif des toiles de culture	38
Figure 22 : Représentation schématique aérienne du prototype en serre	41
Figure 23 : Dispositif expérimental des tests de rétention des toiles en condition réelles .	42
Figure 24 : Formule de calcul de l'évapotranspiration (BORRELL ESTUPINA, 2011)	43
Figure 25 : Récapitulatif des immobilisations du projet VERTIcal pour l'année 2016	51
Figure 26 : Estimation de la productivité et du chiffre d'affaire selon différentes dimensions du système de production.....	52
Figure 27 : Évolution du poids en eau des toiles dans le temps	53
Figure 28 : Schémas récapitulatifs des régressions linéaires des poids en eau des toiles en fonction du temps à différents moments.....	54
Figure 29 : Box-plots des moyennes d'électroconductivité et de pH selon les 3 types de toiles étudiées.....	61
Figure 30 : Schéma d'assimilabilité des éléments nutritifs par les végétaux en fonction du pH (CERVANTES, 2011)	62
Figure 31 : Box-plots des moyennes d'électroconductivité et de pH selon les 3 types de toiles étudiées.....	63
Figure 32 : Dispositif expérimental pour déterminer le volume de drainage des toiles.....	65
Figure 33 : Schéma descriptif du nouveau système d'irrigation – fertilisation VERTIcal ...	66
Figure 34 : Plan d'ensemble schématique du système de fertilisation avec recyclage	67
Figure 35 : Mise en œuvre de l'EC de pré-mélange.....	68

Figure 36 : Schémas récapitulatif de l'évolution de la croissance moyenne des plantes étudiées en fonction de l'exposition	70
Figure 37 : Courbes de croissance des plantes étudiées	71
Figure 38 : Plants de salades dans un pochon avec terreau G9 (gauche) et un autre dans un pochon avec vermiculite (droite) après 4 semaines de croissance	72
Figure 39 : Recensement des plantes retrouvées mortes sur le projet en fonction des toiles de culture.....	73
Figure 40 : Recensement des plantes retrouvées mortes sur le projet en fonction des toiles de culture.....	74
Figure 41 : Croissance moyenne des plants de laitue sur les toiles Econo50 et Aquamat en fonction du temps.	77
Figure 42 : Synthèse des moyennes estimés de la croissance des plants de laitue selon les éléments utilisés pour la culture	78
Figure 43 : Courbe de croissance des plants de salades (en cm) en fonction des périodes de tests	79
Figure 44 : Développement d'algues sur les toiles au niveau de la zone d'irrigation et sur le bas des toiles.....	80
Figure 45 : Synthèse des moyennes de croissance des laitues estimées en fonction du type de toile et du substrat associé.....	81

Table des tableaux

Tableau 1: Prévisions pour 2016 du prix du panier d'épicier moyen au Canada (CHARLEBOIS, 2016)	7
Tableau 2 : Récapitulatif de la répartition des substrats et plantes par types de membrane	33
Tableau 3 : Composition de la fertilisation.....	36
Tableau 4 : Composition des engrais pour la fertilisation des murs.....	40
Tableau 5 : Récapitulatif des besoins mensuels en eau (ETM).....	55
Tableau 6 : Composition des éléments en ppm de l'eau de distribution	58
Tableau 7 : Valeurs en ppm des éléments pour la fabrication d'une solution fertilisante pour laitue hors-sol	60
Tableau 8 : Solution fertilisante pour la culture de fraises suspendues préconisée par le CTIFL (2003)	60
Tableau 9 : Récapitulatif du pH et de la conductivité pour la culture de fraises hors-sol (COQUELET, 2003).....	64
Tableau 10 : Détermination des volumes du prémélange (BERTONI, 2017).....	69
Tableau 11 : Masses volumiques des substrats de culture (VERDONCK, 1983)	74
Tableau 12 : La porosité totale d'un support de culture (LEMARIE <i>et al.</i> , 1989).....	75
Tableau 13 : CEC et pH de divers matériaux de substrats (BERTONI, 2017)	75
Tableau 14 : Résultat de l'Anova pour la croissance des plants selon le substrat.....	76
Tableau 15 : Résultat de l'Anova pour la croissance des plants selon le type de toile.....	76
Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA pour la croissance des plants selon la position sur la toile.....	78
Tableau 17 : Récapitulatif des coûts des différentes propositions	83

Table des matières

Remerciements.....	V
SOMMAIRE.....	VII
Sigles et abréviations	IX
Introduction générale.....	1
PARTIE 1 : Contexte.....	3
1. L'évolution de l'agriculture et sa gestion des ressources hydriques.....	5
1.1. Croissance de la population urbaine et artificialisation des sols.....	5
1.2. Un nouvel enjeu : le développement durable	6
1.3. Cas particulier : les nouvelles priorités alimentaires de Montréal	6
2. Qu'est-ce que l'agriculture urbaine ?	7
2.1. Principe général	7
2.1.1. Les chiffres et l'évolution de l'agriculture urbaine	8
2.2. Les fonctions de l'agriculture urbaine.....	10
2.2.1. Les différents types d'agriculture urbaine	10
2.2.2. La multifonctionnalité de l'agriculture urbaine	10
2.2.3. La fonction environnementale de l'agriculture urbaine	11
2.2.4. La fonction spécifique de l'agriculture urbaine à Montréal et ses contraintes	12
2.3. La culture hors-sol – l'hydroponie.....	13
2.3.1. Définition et principes de l'hydroponie.....	13
2.3.2. Les avantages de l'hydroponie.....	14
2.3.3. Les enjeux de l'hydroponie	14
2.4. Les différents types de culture urbaine sur toit	15
3. L'agriculture urbaine verticale	16
3.1. Aperçu de l'agriculture verticale	16
3.2. Des exemples d'agriculture urbaine verticale	16
4. Présentation du projet VERTIcal.....	18
4.1. Le laboratoire d'agriculture urbaine de Montréal, AU/Lab	18
4.2. La multifonctionnalité de l'AU/Lab.....	18
4.3. L'entreprise partenaire du projet.....	19
4.4. Les caractéristiques du projet VERTIcal	19
4.4.1. Le concept de « murs comestibles »	19
4.4.2. Les avantages du concept	20
4.5. Enjeux et problématique	21
4.6. Les objectifs et les hypothèses.....	21
PARTIE 2 : Matériel et méthodologie	25
.....	27
1 Matériel et méthodes	28
1.1 Recherches bibliographiques et entretiens	28
1.2 Organisation expérimentale.....	29
2 Dispositif expérimental du toit du Palais des Congrès	29
2.1 Description des compartiments de la structure autoportante	29
2.2 Organisation expérimentale du projet sur le toit du Palais des Congrès	32
2.3 Le dispositif irrigation – fertilisation.....	34
2.4 Description du mode de fonctionnement de l'irrigation des toiles	36
3 Le projet VERTIcal en serre	39
3.1 Lieu d'expérimentation.....	39
3.2 Description du dispositif expérimental	39
4 Mesures	42
4.1 Estimation des rendements	42
4.2 Estimation besoins en eau.....	42
➤ Première phase d'expérimentation pour l'analyse de la rétention en eau des toiles	42
➤ Le calcul de l'évapotranspiration sur le toit du Palais des Congrès puis des	
besoins en eau des plantes	43
4.3 Estimation de la fertilisation	44
4.4 La croissance des plantes	45
4.5 Les tests de pH et de conductivité.....	45

4.6	Le prototype en serre	45
5	Traitement statistique	45
5.1	Box-plots.....	45
5.2	Régression linéaire.....	46
5.3	Analyse de la variance à mesures répétées (ANOVA)	46
PARTIE 3 : Résultats et discussion		48
1	Caractéristiques techniques du projet VERTIcal	50
1.1	Chiffrage du système VERTIcal.....	50
1.1.1	Estimation des rendements.....	50
1.1.2	Discussion et proposition pour le choix des cultures.....	50
1.1.3	Rentabilité	51
1.2	Estimation consommation en eau.....	53
1.2.1	Tests de rétention des toiles	53
1.2.2	L'évapotranspiration sur le toit du Palais des Congrès et de la consommation en eau 55	
1.2.3	Discussion et proposition selon le comportement des toiles	56
1.3	La fertilisation du système VERTIcal	57
1.3.1	Les cycles d'irrigation - fertilisation	57
1.3.2	Les besoins en fertilisation	58
1.3.3	Les tests pH et conductivité selon le type de toile	61
1.4	Conception d'un système de fertilisation adapté aux contraintes rencontrées	65
2	Analyse du développement végétal sur le système VERTIcal.....	69
2.1	Mesure de la croissance primaire	69
2.1.1	Analyse de l'influence de l'exposition sur la croissance des végétaux	69
2.1.2	Interprétation et analyse des observations faites	70
2.2	Le développement végétal sur le projet VERTIcal.....	71
2.2.1	Croissance moyenne des plants au cours du temps	71
2.2.2	La mortalité	72
2.2.3	Analyses de l'évolution de la croissance des plantes.....	76
2.2.4	Les interactions entre les différents paramètres	78
3	Le prototype vertical en serre	79
3.1	La croissance des plants de laitue.....	79
3.2	Les interactions toile - substrat.....	81
3.3	Discussion et proposition sur les tests réalisés sur l'expérimentation du système VERTIcal en serre.....	82
4	Conclusion préliminaire.....	82
Conclusion générale		84
Références bibliographiques		85
Table des figures		95
Autres documents		94
Table des tableaux		97
Table des matières		98
Table des annexes		130

ANNEXES

Annexe 1 : Entretien avec Marie-Line GAGNÉ, 2016

- Quelles sont vos recommandations pour le système de fertilisation ?

Pour ma part pour éviter toute possibilité, ce serait d'utiliser un système d'injecteur avec sol A B-C et D séparée et l'utilisation d'un possible système d'irrigation à plus gros débit que des goutteurs intégrer

Il semble que les valeurs sont en dessous des concentrations maximales permises pour la culture de légumes. Cependant, il me manque les valeurs de P, Cl et de SO₄ pour déterminer la fertilisation sur la fine pointe ainsi que le type d'acide à mettre. Ceci dit, ces valeurs sont correctes, manque à trouver les données manquantes. Il existe aussi des bases de données de fertilisation selon les produits dont celle sur laquelle j'ai travaillé (annexe 18).

- Quelles sont vos recommandations par rapport aux besoins en eau et à l'évaporation potentielle dans ce type de système ?

Une fois les panneaux installés, il faudra vérifier le système d'irrigation à nu. C'est-à-dire le faire fonctionner, sans les plantes, et évaluer la fréquence et la durée des cycles d'irrigation pour bien imbiber les membranes et faire face à l'évaporation par le vent et l'assèchement par le soleil. Il se peut que nous remarquions que la membrane retient assez bien l'eau, ou au contraire, que le taux d'évaporation est trop grand et qu'il sera nécessaire de faire fonctionner le système en continu comme une culture NFT. Si les besoins en eau des toiles sont plus importants il faudra peut-être prévoir plusieurs pompes ou un système de contrôle à cycle variable selon les sections de panneaux. Il est important de comprendre que la fertigation est une technique ayant un très faible pouvoir-tampon et doit donc être constamment sous-surveillance pour s'ajuster au climat et aux besoins des plantes. Mon inquiétude face à un volume de substrat faible est que le jeu (ou tampon) est pratiquement inexistant. Si le système s'arrête pour cause de panne de courant ou mal ajustement de la part d'un employé, les plantes peuvent s'assécher. Le surplus d'eau est une problématique mineure qui peut facilement être corrigée et donc les conséquences sont moindres (champignons) qu'un manque d'eau.

- Pour le choix du substrat, quel est le produit que vous recommandez ?

Il est possible d'utiliser de la fibre de coco. Selon les experts de Fafard, le terreau G9 a l'avantage d'avoir une composition en grande partie en fibre de coco, une fertilisation à libération lente assuré pour le long terme. (4 ans) avec rootshield inclus dedans. Il pourrait convenir à la culture verticale surtout si on réutilise le terreau et que l'on souhaite avoir une fertilisation de base longue durée. L'avantage du G9 est qu'il est possible de semer dedans, ou d'y planter des transplants à racines nues, sans danger que les racines ne brûlent par la salinité élevée.

De même, selon l'experte Eloise GAGNON, le terreau 06 serait le plus convenable pour la culture verticale, étant donné sa formulation avec compost. Ceci permettrait non seulement de retenir un maximum d'eau, mais permettrait aussi de fournir une fertilisation sur un peu plus long terme que le terreau G9. (2 mois en production hors-sol)

- Y-a-t-il une variété intéressante à cultiver ?

Les variétés Albion et Monterey sont intéressantes pour la culture hors-sol grâce à leurs qualités (résistance, tolérance chaleur, productivité et qualité gustative). Albion offre un bon calibre et s'adapte bien. Monterey résiste bien à la chaleur, mais les fruits se ramollissent rapidement ce qui peut réduire la mise en marché des produits.

Les producteurs déconseillent la variété la Seascape car elle n'a aucune résistance au blanc, champignon qui aime la chaleur et le temps sec. La seule autre variété ayant eu du

potentiel, mais qui reste à développer la formule pour combler ses besoins est la St-Andréas.

Annexe 2 : Entretien avec Georges BERTONI, 2017

- Quelle est la fréquence de fertilisation en hydroponie pour la culture de la fraise et de la salade ? Existe-t-il des référentiels ?

Votre question porte sur des aspects peu publiés à mon avis et pour lesquels je n'ai pas de réponse sûre. Techniquement dans un système recyclé la fréquence d'irrigation peut être élevée car on recycle la solution : il n'y a pas de surconsommation d'eau et d'intrants minéraux. Par contre, la consommation d'électricité et l'usure des pompes peuvent être des éléments à prendre en considération.

Exemple la pompe vendue pour x milliers d'heures, comment peut-on l'amortir et sur combien d'années.

Un deuxième point à prendre en compte est la disponibilité en eau du support de culture. Il ne faut pas que le système racinaire puisse se dessécher entre deux apports. J'ai sous la main quelques valeurs pour une irrigation sur support de culture organique en sac qui peuvent vous donner un ordre de grandeur : Fraisier Darselect 6 plants par sac de 12 L sur tourbe : par temps couvert 6 apports de 150 ml / sac soit 900 ml / sac aux heures suivantes 9h 10h30 12h 14h 15h 17 h. Par temps ensoleillé 12 apports de 150 ml/sac soit 1800 ml / sac aux heures suivantes : 9,10,11,12, 13,13h30,14,14h30, 15h 15h30, 16h, 17h00 (Source La culture du fraisier sur substrat CTIFL Lavoisier éditions)

Cela fait donc 12 irrigations de 4 minutes 30 par heure avec une dose de 150 ml. C'est faisable parce qu'il y a 2 litre de substrat par plant de fraisier, ce qui fait une grosse réserve en eau. Si le volume de support et la réserve en eau sont plus faibles dans votre substrat, il faut probablement adapter ces irrigations en diminuant la dose 50 ml par plante par exemple mais en l'apportant toutes les 20 minutes ou toutes les 10 minutes en période chaude.

Avec très peu de support ou en absence de support, il faudra probablement prévoir quelques apports la nuit (en évitant surtout de noyer et asphyxier les racines) pour éviter qu'elles se dessèchent. Je pense à vue de nez qu'un apport de 50 ml par plant toutes les 1/2 heures pourrait peut-être suffire si le système racinaire est étalé bien à plat. (Sinon il en faut plus). Tout cela va varier en fonction du volume de support, de l'organisation des racines et de son caractère plus ou moins drainant.

Dans ce genre de calcul il faut aussi faire attention à la qualité du système d'irrigation. Si vous partez sur des doses de 50 ml avec des goutteurs à 2L/heure vous êtes sur une durée de fonctionnement de 1 minute 30. Il faut donc que le système d'irrigation soit relativement étanche et toujours en charge car si la pompe doit le remplir parce qu'il s'est vidé entre deux irrigations vous allez beaucoup modifier le volume distribué.

A l'autre extrême je dispose d'un ordre de grandeur pour les cultures aéroniques sans substrat: brumisation continue pendant un quart d'heure puis arrêt pendant quelques minutes (2 - 3minutes) à évaluer selon la température, la transpiration et l'étanchéité du système.

Dans un système circulant on peut tout à fait aller dans ce sens : faire circuler 15 minutes, laisser drainer 5 minutes pour vider le système et aérer les racines, et recommencer.

Annexe 3 : Entretien avec Marion SARLÉ, Les sourciers, 2017

- Quels sont vos rendements en salade ?

Pour la variété Salanova, ils obtiennent une salade en 5 semaines.

Chaque année, un vide sanitaire est réalisé pour nettoyer le système dans sa globalité et éviter l'implantation de maladies ou de ravageurs.

On récupère les graines produites car elles sont plus adaptées au mode de culture.

- Quelles sont les dimensions du système de fertilisation ? Sur quelles valeurs vous êtes basées pour définir votre système de fertilisations ?

Sur notre système (aeroflo de GHE) nous avons 3 unités de production de 150m² chacune avec un nombre et des plantes différentes, donc avec des besoins nutritifs différents.

Nous n'avons pas de ratio de base donc nous étions partis du des cuves de 2m³ pour chaque unité de production.

Comme notre système fonctionne sur timer les cuves ne peuvent jamais être complètement pleines car lorsque le système s'arrête il faut de l'espace pour recevoir l'eau qui était en circulation dans le système. Ces réservoirs fonctionnent mais ne sont pas suffisant, aucun tampon en été lorsque le niveau baisse rapidement (surtout sur les tomates).

Nous avons donc agrandi nos cuves cet hiver afin de passer à 3,5m³ par unité de production. Cela représente un peu plus de 20L/m² de culture. L'eau du système a été au préalable stérilisée.

Concernant la fertilisation, nous faisons les ajouts de nutriments dans les réservoirs et mesurons avec des instruments la consommation quotidienne des plantes, nous n'utilisons pas de doseur automatique.

Je ne connais pas de biblio à ce sujet, nous avons surtout fait des test erreurs et améliorations En plus j'imagine que les données changent énormément d'un type de système à un autre.

5-12-26 Hydroponic

Annexe 4 : Fiche technique solution nutritive pour le système sur le toit du PCM (2016)

GUARANTEED ANALYSIS		F-1313
Total nitrogen (N)	5.00% nitrate nitrogen	5% ⁺
Available phosphate (P ₂ O ₅)	12% ⁺	
Soluble potash (K ₂ O)	26% ⁺	
Magnesium (Mg)	6.3200% ⁺	
Sulfur (S)	8.21% combined sulfur (S)	8.21%
Boron (B)	0.0150% chelated copper (Cu)	0.0300%
Copper (Cu)	0.0150% chelated iron (Fe)	0.0150%
Iron (Fe)	0.3000% chelated iron (Fe)	0.3000%
Manganese (Mn)	0.0500% chelated manganese (Mn)	0.0500%
Molybdenum (Mo)	0.0100%	0.0100%
Zinc (Zn)	0.0150% chelated zinc (Zn)	0.0150%

Derived from: monopotassium phosphate, potassium nitrate, magnesium sulfate, boric acid, iron EDTA, manganese EDTA, zinc EDTA, copper EDTA, ammonium molybdate

Potential Basicity: 211 lbs. Calcium carbonate equivalent per ton.

Information regarding the contents and levels of metals in this product is available on the internet at <http://www.aadpo.org/metals.html>

WARNING: This product contains Molybdenum (Mo) and may be harmful to ruminant animals, or grazing on grass where applications have been made.

Follow these steps to obtain a precipitate free solution

1. Dissolve 130 ounces of 5-12-26 Hydroponic in 1000 gallons of final feed solution. You will obtain the following elemental PPM concentrations:

Element	N	P	K	Mg	SO ₄	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
PPM	50	52	215	63	246	3	.50	.15	.15	.50	.10

2. Dissolve any additional Epsom Salts desired into the above 1000 gallon solution before proceeding. For most crops 50 PPM Magnesium is an adequate level in solution. To increase your Magnesium levels, dissolve 10 ounces of Epsom Salts in 1000 gallons of final feed solution to obtain 7.5 PPM additional Magnesium.
3. Dissolve ounces of Calcium Nitrate into the above 1000 gallon solution to obtain a total calcium concentration of 150 PPM Nitrogen and 116 PPM Calcium.

E.C at 100 ppm N = 2.10 Limit of Solubility = 3 lb/gal

Annexe 5 : Mode d'emploi d'acide dans un système hydroponique

Conditions idéales

pH	Idéal : 5.5 Intervalle toléré : entre 5,4 et 6,5
EC	Idéal : 1500 μ S Intervalle toléré : entre 1400 μ S et 1600 μ S
Température de l'eau	Idéale : 18°C Intervalle toléré : entre 18°C et 22°C (>22°C \Downarrow importante de l'oxygène soluble)

Ajustement du pH (pour 85L d'eau)

Lecture du pH	Pour lire le pH, utilisez <i>Hanna combo</i> . Bien rincer les électrodes entre chaque lecture avec de l'eau distillée ou osmosée et toujours s'assurer qu'il y a un peu de solution de stockage dans le couvercle pour ne pas abîmer l'électrode.
pH -	Pour diminuer le pH, diluer 1ml de H ₂ PO ₄ (acide phosphorique % inconnu) dans environ 100ml d'eau et ajouter cette dilution dans le réservoir et brasser.
pH +	Pour augmenter le pH, diluer 1ml de KOH (hydroxyde de potassium 17%) dans environ 100ml d'eau et ajouter cette dilution dans le réservoir et brasser.

***** Portez des gants pour manipuler le peroxyde, l'acide et la base*****

Annexe 6 : Fiche technique de la toile Econo50



Multifebre Du Québec Ltée

1299 Montée Léger, Les Cèdres, Qué. J7T 1E9
Tél: (450) 452-1103 · Fax: (450) 452-1170
www.multifebre.com services@multifebre.com

TECHNICAL DATA SHEET

SAE SPECIFICATION:	F – 26
ASTM	8R5
BRAND FELT STYLE NO:	12526
COLOUR:	GREY
COMPOSITION:	50% WOOL MIN.
DENSITY:	0.14 – 0.17
WIDTH:	72" WIDE
DENSITY, LBS/SQ. YD.:	.90 lb/yd ²
THICKNESS:	1/8" Th.
FINISHING TREATMENT:	NONE
REINFORCEMENT;	NONE

Annexe 7 : Fiche technique du feutre Novatex

FICHE TECHNIQUE  GCTTG 3001-06	GÉOTEXTILE NON-TISSÉ NOVATEX B120
---	--

	TESTS	UNITÉS	VALEURS
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES			
Polymère			100 % Polypropylène
Procédé de fabrication			Non tissé aiguilleté
Épaisseur	ASTM D5199	mm	2,1
Masse surfacique	ASTM D5261	g/m ²	235
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES			
Résistance à la traction (SP/ST)	ONGC 148.1-7.3	N	800 / 800
Élongation à la rupture	ONGC 148.1-7.3	%	45-110%
Résistance à la perforation CBR	ASTM D6241	N	2020
Résistance à la déchirure	ONGC 4.2-12.2	N	360
Résistance à l'éclatement ¹	ONGC 4.2-11.1	kPa	2275
Résistance à la perforation ²	ASTM D4833	N	465
PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES			
Perméabilité	ONGC 148.1-4	sec. ⁻¹	1,5
Perméabilité	ONGC 148.1-4	cm/sec	0,25
Ouverture des pores (FOS)	ONGC 148.1-10	µm	70-150
AUTRES PROPRIÉTÉS			
Résistance aux UV (500 heures)	ASTM D4355-02	%	70
Dimensions des rouleaux		m	3,81 x 109,7 4,57 x 91,44

SP : sans production
ST : sans tracers

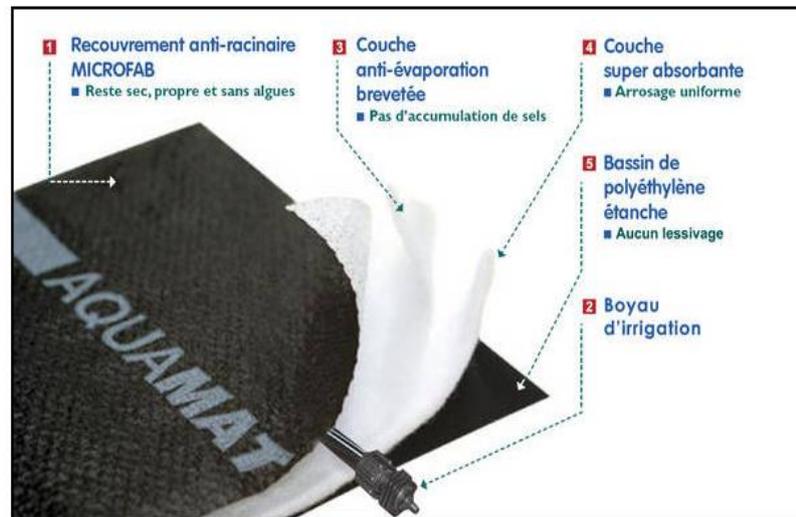
Les valeurs ci-dessus indiquent les propriétés minimum moyennes enregistrées en laboratoire lors des essais effectués selon la norme canadienne ou américaine, selon les cas. Ces valeurs sont calculées dans la direction la plus faible en prenant la valeur moyenne moins 2 fois l'écart type (MARV).

Annexe 8 : Fiche technique feutre Aquamat (AQUAMAT, 2016)

Composantes

Le système breveté AQUAMAT® est constitué de différentes couches jouant chacune un rôle spécifique. Ensemble, ces éléments allient des caractéristiques ultraperformantes pour faire d'AQUAMAT® un système d'irrigation et de conservation de l'eau, sans équivalent sur le marché.

1. Revêtement anti-racinaire
2. Boyaux d'irrigation
3. Couche anti-évaporation brevetée
4. Textile réservoir
5. Film étanche de polyéthylène



AGRO MIX® G9

L'AGRO MIX® G9, un terreau AVEC FIBRE DE NOIX DE COCO, facilite le mouillage et offre une diffusion des gaz tout à fait unique en raison de sa composition poreuse et ses fibres à la fois grossières et uniformes.

L'uniformité des fibres et les espaces entre ces dernières permettent à l'oxygène d'atteindre rapidement les racines. La qualité des racines se constate par leur grosseur et leur abondance ainsi que par la présence accrue de radicelles. La robustesse de la plante, quant à elle, se constate par des entre-nœuds courts, des tiges plus grosses et des feuilles plus épaisses.

L'AGRO MIX® G9 contient de la fibre de noix de coco qui retient les minéraux tout en améliorant le mouillage et la structure physique (porosité et stabilité dans le temps) du terreau. Tel des aimants, les minéraux chargés positivement s'accrochent aux fibres de noix de coco ce qui augmente la fertilité du terreau. Fafard a testé l'efficacité de plusieurs agents mouillants. Les résultats ont démontré que la fibre de noix de coco est plus efficace pour un mouillage à long terme en plus d'être une excellente source de potassium.

BÉNÉFICES

- Avec fibre de noix de coco (facilite le mouillage)
- Facilite le développement racinaire (grosseur et abondance)
- Favorise une croissance foliaire vigoureuse (robustesse)
- Réduit les risques de maladies racinaires
- Structure plus stable à moyen terme

CULTURE EN JOURS COURTS (automne-hiver)

L'arrosage est moins fréquent lorsque la période d'ensoleillement est courte (octobre à février). Un déficit minéral peut alors survenir si un ajustement n'est pas apporté à la fertilisation.

Pour le faire, augmenter la charge fertilisante pour maintenir la nutrition de la culture au niveau requis pour une croissance maximale. Augmentez la fertilisation de chaque arrosage de façon à ce que la quantité d'engrais totale utilisée pour la culture soit presque identique en période de jours courts comparativement aux périodes de jours longs.

INGRÉDIENTS:

Tourbe AGRO MIX®, fibre de noix de coco, chaux, charge nutritive équilibrée avec suppléments d'éléments mineurs, gypse, agent mouillant

USAGES:

TRÈS RECOMMANDÉS:

- Serres
 - Paniers suspendus
- Chrysanthèmes d'automne

RECOMMANDÉS:

- Serres
 - Légumes
 - Vivaces
 - Culture printanière (annuelles)
 - Potées fleuries (Poinsettia, Lys de Pâques, Gerbera, Impatiens Nouvelle Guinée, Hydrangea)
- Subirrigation

Fafard et Frères 771 rue Principale, Saint-Bonaventure (Québec) J0C 1C0
T 819.396.2293 | SF/TF 1.800.561.5204 | F 819.396.2136 | www.fafard.ca



01-03-2016

MODE D'EMPLOI - SPÉCIFIQUE À CE TERREAU

1. Humecter le terreau avant son utilisation. L'humidité de ce terreau est d'environ 50% (poids). L'humidité du terreau doit toujours être optimale. L'arrosage demeure un facteur important dans la production des cultures. Il assure ainsi une meilleure croissance. Nous vous suggérons d'amener le taux d'humidité à 60-70% pour une expansion maximale de la fibre.

2. Tasser légèrement le terreau afin d'éviter qu'il s'affaisse lors des premiers arrosages. Les terreaux constitués de fibres grossières ont tendance à s'affaisser davantage si le pot n'est pas suffisamment rempli à l'empotage. Nous vous suggérons de comparer le nombre de pots remplis avec la charte de remplissage (www.fafard.ca/producteurs/charte-dempotage/) pour déterminer si la compaction est adéquate.

3. Procéder au remplissage des pots.

4. Arroser. La tourbe blonde de Fafard, conserve sa couleur pâle même après l'arrosage. On ne peut donc pas se fier à la couleur. Il est également possible d'observer un léger verdoyement sur la surface des fibres. Heureusement, il ne constitue pas un problème pour la croissance des végétaux. Notre service technique est à votre disposition afin de vous aider à adapter votre irrigation de façon optimale en fonction de votre régime de culture.

5. Effectuer les analyses nécessaires en cours de production : pH, conductivité électrique, analyse chimique complète, feuillage si nécessaire etc. Respecter les recommandations habituelles relatives à la température de la serre, aux arrosages, à la fertilisation et au pH.

OBSERVATION:

La grande circulation d'air favorisera le développement actif des racines à l'intérieur de la motte. Un délai sera donc observé avant que les racines secondaires latérales apparaissent sur le pourtour du pot.

FORMATS DISPONIBLES:



PARAMÈTRES CHIMIQUES:

Standard d'analyse mixé

Légère variation possible d'une production à l'autre

pH	5,8
Conductivité électrique (µmhos/cm)	0,9
N-NO ₃ (ppm)	50
P (ppm)	10
NH ₄ ⁺ (ppm)	<10
K (ppm)	75
Ca (ppm)	100
Mg (ppm)	10
Cl ⁻ (ppm)	<20
B (ppm)	0,05
Cu (ppm)	0,05
Fe (ppm)	1
Mn (ppm)	0,5
Mo (ppm)	0,04
Zn (ppm)	0,5
SO ₄ (ppm)	<300
Na (ppm)	<25
A) ^{1,2}	0,5

PARAMÈTRES PHYSIQUES:

échelle de 1 à 10 (10 = Performance optimale)

Drainage: 9

Aération: 9

Rétention en eau: 7

Diffusion des gaz: 9

Densité: 125-165 g/l

DÉFINITIONS:

Drainage

(Conductivité hydraulique - kaat)

Indique la facilité avec laquelle s'effectue le passage de l'eau à travers un terreau. Plus la conductivité est élevée, plus l'eau atteindra rapidement les racines.

Aération

(Porosité d'air - PA)

Volume d'air compris dans le terreau une fois les macropores complètement drainés.

Rétention en eau

(Réserve en eau facilement utilisable - REU)

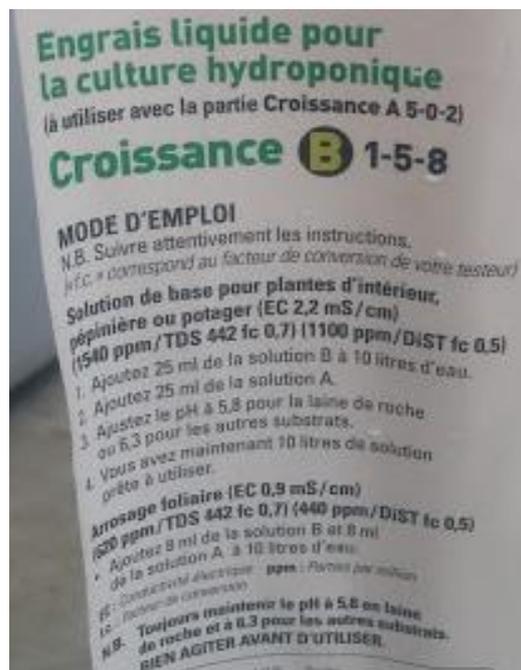
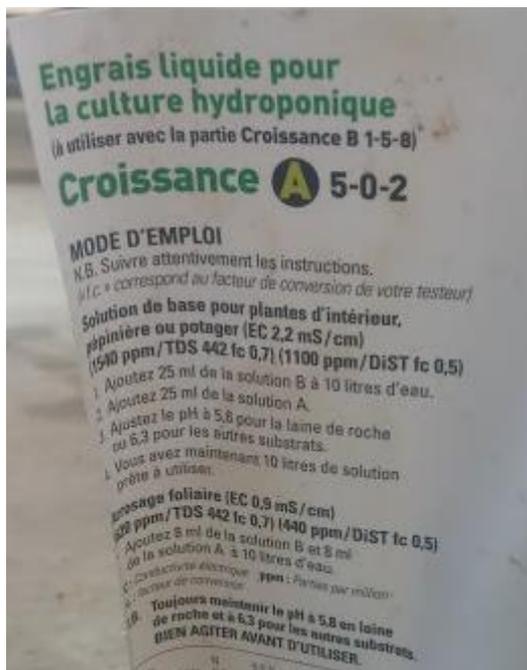
Volume d'eau retenu par les micropores (pores de grosseur moyenne). Les végétaux peuvent puiser parmi cette eau sans dépenser trop d'énergie ce qui est très productif.

Diffusion des gaz

Vitesse des échanges gazeux. Plus la diffusion est élevée, plus l'oxygène atteindra rapidement les racines.



Annexe 10 : Fertilisation adoptée pour le prototype VERTical en serre (HYDROCULTURE GUY DIONNE, 2016)



Annexe 11 : Bases de données pour le calcul de l'évapotranspiration (BORRELL ESTUPINA, 2011 ; METEO MEDIA, 2016)

Température (°C)



Evapotranspiration		Valeurs d'Iga	
Formule de Turc (1961)			
Formule Mensuelle/Journalière			
R_g : radiation solaire globale moyenne, en cal/cm ² /jour (1W/m ² = 2.065 cal/cm ² /jour)			
$R_g = I_{ga} * (0.18 + 0.62 * h / H)$			
I_{ga} : radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (cal/cm ² /jour)			
h/H : durée réelle d'insolation maximale possible (varie entre 0.1 et 1)			
		40°	50°
	janvier	364	222
	février	495	360
	mars	673	562
	avril	833	764
	mai	944	920
	juin	985	983
	juillet	958	938
	août	858	800
	septembre	710	607
	octobre	536	404
	novembre	390	246
	décembre	323	180

Annexe 12 : Base de données pour calcul besoins en eau des plantes (PERRIER, 1975)

Valeurs pour le calcul de k_c'

Mois	u	h	θ
Mai	3,2	2	63,6
Juin	3,2	2	67,5
Juillet	3,02	2	69,1
Août	2,83	2	72,2
Septembre	2,83	2	74,4

Stade croissance	k_c salade
plantation - début croissance active	0,4
Début croissance active - récolte	0,7

Stade croissance	k_c fraisier
Départ végétation - début floraison	0,4
Début floraison - floraison	0,6
Floraison - grossissement fruits	0,9
Grossissements fruits - récolte	0,7

Annexe 13 : Mode d'emploi pour calibrage pH-mètre

Au pH-mètre

Cet appareil, s'il est de bonne qualité et bien étalonné, permet une **mesure précise** du pH, mais son **utilisation est plus contraignante** que celle du papier pH.

Voici le protocole à respecter pour une mesure de pH au pH-mètre :

- **Rincez** la sonde du pH-mètre à l'**eau distillée** puis l'**essuyer** avec du papier absorbant.
- **Versez** la solution à tester dans un bécher : remplissez environ la moitié du récipient.
- **Trempez la sonde** dans la solution. Inclinez si nécessaire le bécher afin de bien immerger la cellule de mesure (petite ampoule de verre).
- Après **stabilisation** de l'afficheur, **relevez le pH**.

Procédure générale

Si votre électrode de pH est neuve ou n'a pas été utilisée depuis un certain temps, vous devez la reconditionner avant de l'utiliser. (Entreposer toute une nuit dans la solution d'entreposage HI 70300L).

Plonger l'électrode de pH dans la solution de pH 7.01 (HI 7007L). Quand la lecture est stable, ajuster le pH-mètre pour lire 7.01 sur l'afficheur.

Rincer l'électrode de pH dans l'eau distillée ou l'eau du robinet.

Tremper l'électrode de pH dans la solution pH 4.01 (HI 7004L) ou pH 10.01 (HI 7010L) et attendre que la lecture se stabilise. Ajuster la lecture en conséquence. L'étalonnage est terminé, votre pH-mètre est maintenant prêt à être utilisé.

Note: Toujours commencer l'étalonnage avec le pH 7 et ensuite avec le pH 4 ou le pH 10. Le choix de votre deuxième tampon dépend de votre application: si vos valeurs de lecture se situent sous le pH 7, utiliser le pH 4 comme deuxième tampon. Si vos valeurs de lecture sont au-dessus du pH 7, utiliser le pH 10 comme deuxième tampon. Quelques-uns de nos pH-mètres doivent être étalonnés en 3 points, penser à toujours commencer l'étalonnage avec le pH 7 et ensuite avec les autres pH.

Annexe 14 : Calibrage Conductimètre

Avant la première utilisation

Tremper le capteur 2 minutes dans l'alcool pour enlever les impuretés/graisse. Rincer à l'eau claire.

Mesures

1. Oter le capuchon et appuyer sur  pour allumer le Tester.
2. Plonger entièrement le capteur dans la solution à mesurer.
3. Agiter une fois et laisser la lecture se stabiliser. Noter la valeur mesurée.
4. Pour figer la lecture, presser . **HO** clignote une fois à l'écran, le clignotement de l'unité (μS / mS / ppm / ppt) indique que le Tester est en mode figé. Presser de nouveau  pour annuler (**HC**).
5. Appuyer sur  pour éteindre le Tester.

Note: Le Tester s'éteint automatiquement après 8,5 minutes de non-utilisation pour économiser les piles.

Réglage du facteur de TDS (modèles TDS seulement)

1. Appuyer sur  pour éteindre le Tester.
2. Appuyer et tenir  puis appuyer sur  pour allumer le Tester. L'écran affiche **tdS**.
3. Appuyer sur  pour faire défiler jusqu'à la valeur du facteur de TDS.
4. Relâcher  et attendre l'auto confirmation.
5. Pour interrompre le réglage du facteur de TDS, appuyer sur  (**ESC**).

Calibrage Le Tester est calibré en usine. Néanmoins, pour une meilleure précision, une calibration régulière est recommandée.

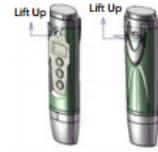
1. Tremper le capteur 10 minutes dans l'alcool pour enlever les impuretés/graisse. Rincer à l'eau claire et sécher.
2. Appuyer sur  pour allumer le Tester.
3. Plonger entièrement le capteur dans la solution étalon et attendre que la valeur se stabilise.
4. Appuyer sur  pour entrer dans la séquence d'étalonnage. **CAL** va clignoter momentanément, puis une valeur par défaut va s'afficher.
5. Appuyer sur  pour faire défiler jusqu'à la valeur de la solution étalon.
6. Relâcher  et attendre l'auto confirmation.
7. Pour interrompre la calibration, appuyer sur  (**ESC**).
8. L'appareil a été calibré avec succès.

Entretien

Nettoyer régulièrement le capteur en inox par trempage dans de l'alcool pendant 10-15 minutes. Rincer à l'eau claire après chaque utilisation.

Changement des piles

Déclipser le cache du compartiment des piles à l'aide des deux clips. Retirer les vieilles piles et les remplacer par des neuves en prenant soin de respecter les polarité, comme indiqué dans le compartiment des piles. Vous n'avez pas besoin de re-calibrer



Messages d'erreurs

1. **Er** – La calibration a été effectuée avec un étalon de valeur 5% inférieure à la pleine échelle. Utiliser un étalon de valeur supérieure. Défaut de la sonde de température.
2. **Or** – Signal hors plage pour des valeurs supérieures à la pleine échelle.

Option reset Cette option permet de restaurer les paramètres usine, par défaut

1. Appuyer sur  pour éteindre le Tester.
2. Appuyer et tenir  puis appuyer sur  pour allumer le Tester. L'écran affiche **rSt** (reset).
3. Appuyer une nouvelle fois sur  pour confirmer le reset (**Ent**) ou appuyer sur  pour annuler (**ESC**).

Garantie

Le testeur est garanti, contre les défauts de fabrication, pendant un an à compter de la date d'achat.

INSTRUCTIONS POUR ANALYSES DE SOL RAPITEST

ANALYSEUR DE SOL MODE D'EMPLOI

Pourquoi une analyse de sol ?

Il faut aux plantes le bon degré d'acidité (ph). Il est donc essentiel de déterminer la quantité de chaux contenue dans le sol afin de décider quelles plantes ont le plus de chances de bien se développer, celles qui méritent une tentative et celles qu'il faut complètement éviter. Pour se développer saine, les plantes ont besoin de nourriture (éléments nutritifs). Il est donc logique de chercher quels sont les éléments nutritifs contenus dans le sol et dans quelle quantité.

LE PH. On dit que les sols sont alcalins ou acides. Un ph de valeur 7 indique que le sol est neutre, supérieur à 7 que le sol est alcalin et inférieur à 7 qu'il est acide. Une liste des ph recommandés est fournie avec le coffret d'analyse et indique le ph idéal pour plus de 400 plantes.

Si vous voulez cultiver des plantes qui ne sont pas adaptées au ph de votre sol, vous pouvez modifier le ph. Le ph influe sur la présence de nourriture-azote, phosphore, potasse- et sur la diffusion des maladies qui apparaissent dans le sol : il faut donc le vérifier régulièrement (au moins deux fois par an), car la nature penche plutôt vers le côté acide.

LA NOURRITURE. Il y a principalement trois aliments essentiels pour la croissance des plantes : l'azote (N), le phosphore (P), et la potasse (K). On les appelle souvent NPK. L'azote donne aux plantes leur couleur vert foncé et facilite la croissance des feuilles et des tiges. Le phosphore favorise la floraison et la formation des graines. La potasse stimule la floraison et donne plus de goût aux fruits. L'analyse de votre sol doit être réalisée systématiquement au moment de la préparation des planches (en automne), avant la plantation (au printemps) et à intervalles réguliers au cours de la période de croissance. Il est également essentiel, si vous venez de déménager dans un nouveau jardin, de connaître son potentiel de productivité. De plus, si vous trouvez que vos plantes ne poussent pas aussi bien qu'elles devraient, une analyse de terrain peut être utile. Une analyse du sol peut également vous aider à utiliser les engrais plus efficacement.

PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS DE SOL. Prélever l'échantillon entre 5 et 7.5cm sous la surface. Un déplantoir ou une cuillère sont parfaits pour prélever les échantillons. Éviter de toucher les échantillons. Placer la terre dans un conteneur propre. Écraser l'échantillon avec une cuillère et laisser sécher la terre naturellement. Cette opération n'est pas indispensable mais l'échantillon sera plus facile à manipuler. Enlever les petits cailloux, les matières organiques et les particules dures de chaux. Émietter l'échantillon et bien le mélanger. Il est conseillé d'analyser plusieurs zones du jardin car le sol peut être différent, par exemple du fait de la précédente culture, des différences de couches de terrain ou de circonstances localisées. Ne pas oublier d'identifier chaque échantillon. Éviter de contaminer les échantillons. Ne pas fumer ni manger pendant le prélèvement des échantillons.

ÉQUIPEMENT. L'Analyseur de Sol est livré avec quatre analyseurs spécialement étudiés, numérotés de 1 à 4 (un pour chaque analyse : le ph, l'azote, le phosphore et la potasse). Chaque analyseur comprend une grille des couleurs amovible et des couvercles codés par couleur. Des capsules codées par couleur sont utilisées pour chaque analyse. La correspondance des couleurs est la suivante : vert pour le ph, mauve pour l'azote, bleu pour le phosphore et orange pour la potasse. Une pipette de dosage est également fournie.

COMMENT EFFECTUER VOS ANALYSES DE SOL

1^{er} étape : 1. Mettre 1 volume de terre pour 5 volumes d'eau du robinet dans un pot à confiture ou tout autre récipient. Prélever un échantillon aussi important que le permet le récipient. On peut utiliser comme mesure un coquetier ou le bouchon d'une bombe aérosol. On peut également graduer le pot à confiture.

2. Agiter bien ou brasser la terre et l'eau pendant au moins une minute puis laisser reposer le mélange pendant au moins 10 minutes et plus si possible. Le temps nécessaire pour que le mélange se repose varie selon le type de sol. Il faudra beaucoup plus longtemps pour un sol argileux fin que pour un sol sablonneux grossier. La clarté de l'extrait peut varier également, d'une solution pratiquement claire à une solution assez trouble. Le plus clair, le mieux. Mais cela n'affecte pas la précision de l'analyse car le compartiment de référence fait que la suspension crée un effet de fond sur la grille des couleurs.

2^e étape : 1. Sélectionner l'analyseur approprié selon l'analyse qui va être faite (voir le code des couleurs). Enlever le couvercle et sortir les capsules qui sont également codées avec la couleur appropriée. S'assurer que la grille des couleurs est en place. Éviter d'interchanger les grilles de couleurs entre les appareils.

2. Remplir les compartiments d'analyse et de référence avec l'extrait liquide du pot à confiture jusqu'à la graduation indiquée sur la grille des couleurs. Utiliser la pipette pour transférer la solution. Prélever la solution dans les deux centimètres du dessus de l'échantillon. Éviter de remuer le sédiment.

3. Prélever une des capsules de la boîte et en la tenant verticalement avec le bout pointé vers le haut, l'ouvrir soigneusement en séparant doucement les deux parties par torsion. Verser la poudre dans le compartiment d'analyse. 4. Fixer le couvercle sur l'analyseur en prenant soin de placer correctement les joints individuels. Bien agiter jusqu'à dissolution complète de la poudre. 5. Laisser la couleur se développer dans le compartiment d'analyse pendant quelques minutes.

6. Comparer la couleur de la solution dans le compartiment d'analyse avec la grille des couleurs sur le côté. Examiner les couleurs sur un fond blanc et à la lumière naturelle du jour. Éviter la lumière directe du soleil.

Annexe 16 : Base de données des valeurs de rétention en eau des toiles

Tests réalisés avant la phase d'assemblage du système. Toiles ont été trempées dans un bac d'une contenance de 18L d'eau au préalable

23/07/2016 23 °C - 67% humidité - rafales 13 kmph

Type de toile	Poids à sec (kg)
Toile Aquamat	0,5
Toile Econo50	1
Toile Novatex	0,5

Type de toile	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Toile Aquamat	7,4	2,9	1,7	0,8	0,6	0,6	0,6
Toile Econo50	6,8	2,6	2,1	1,6	1,2	1,2	1,2
Toile Novatex	3,1	1,4	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7

A 20 min, la majorité de la toile est sèche, seulement les bordures sont encore humides d'où des résultats faussés

Tests réalisés après que le système soit monté avec le mode d'irrigation définitif

19/09/2016

système de balance 26°C - 42% humidité - rafales 18 kmph

Type de toile	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min	70 min	75 min	80 min	85 min	90 min
Toile Aquamat	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Toile Econo50	1,9	2,2	2,8	2,9	2,9	2,9	3	3	3	3,1	3,1	3	2,2	1,9	1,8	1,6	1,6	1,5
Toile Novatex	2,8	2,9	3	2,9	2,9	2,9	2,9	3	2,9	2,9	2,9	2,9	1,9	1,3	1,1	1,1	1	0,8

La blanche libère beaucoup d'eau dans les bacs de récupération d'eau, 2 fois plus que les autres.
Poids constant à partir de 30 min.

DETERMINATION SATURATION DE LA TOILE Irrigation en continu des toiles Mesure de la saturation des toiles

21/08/2016 Toiles non mouillées au préalable Temps ensoleillé, 27°C - 42% d'humidité - rafales 43 kmph

Type de toile	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min	70 min	75 min	80 min	85 min	90 min
Toile Aquamat	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Toile Econo50	1,3	1,5	1,8	1,8	2	2	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,1	1,9	1,6	1,4	1,4	1,4
Toile Novatex	0,6	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7

A ce stade de l'expérimentation, les toiles sont sèches, seulement les bandes maintenant la structure en place est humide.

La toile grise présente ainsi la meilleure rétention dans ces conditions de culture, après 40 min elle était à 3,2kg

24/08/2016	Temps ensoleillé - 26 degrés - 42% humidité - rafales 4 kmph																	
Type de toile	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min	70 min	75 min	80 min	85 min	90 min
Toile Aquamat	1,2	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,3	0,9	0,9	0,7	0,7
Toile Econo50	2,5	2,7	2,9	3,3	3,6	3,9	3,9	4,1	4,4	4,5	4,5	4,5	4,6	4,2	4	3,8	3,6	3,4
Toile Novatex	1,4	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1	1	0,8	0,7	0,7

Annexe 17 : Méthode de calcul du ratio d'injection réel (PROMIX, 2016)

Méthode de calcul du ratio d'injection réel

- Placez le tube de succion de l'injecteur dans une tasse à mesurer ou un bécher et remplissez de solution jusqu'à un certain niveau.
- Ouvrez le système d'irrigation et recueillez la solution d'engrais dans le seau de 20 L.
- Fermez le système d'irrigation lorsque le seau est plein.
- Calculez la quantité de solution de base prise dans la tasse à mesurer et le volume de solution d'engrais dans le seau de 20 L.

Annexe 18 : Feuille de fertilisation élaborée à l'ITA pour laitue et fine herbe (GAGNÉ, 2016)

Institut
de technologie
agroalimentaire
de Saint-Hyacinthe

Québec

PRÉPARATION DES TRANSPLANTS

par: Guy Raymond

Laitues et Fines herbes

Solution A		# Litres:	60	Concentr:	100	# de gramme
Nitrate de Calcium	Nitrate:	14,5 %	Calcium:	19 %	64,5	3868 g.
	Ammonium:	1 %				
Nitrate de Potassium	Nitrate:	13 %	Potassium:	38,3 %	13,6	814 g.
Chelate de Fer	Fer:	13,3 %			2,18	131 g.
Nitrate d'Ammonium	Nitrate:	17 %	Ammonium:	17 %	4,1	246 g.

Solution B		# Litres:	60	Concentr:	100	# de gramme
Nitrate de Potassium	Nitrate:	13 %	Potassium:	38,3 %	13,6	814 g.
Monopotassium Phosphate	Phosphore:	22,7 %	Potassium:	28,3 %	16,9	963 g.
Sulfate de Potassium	Sulfate:	18 %	Potassium:	44,2 %	—	0 g.
Nitrate de Magnésium.	Nitrate:	11 %	Magnesium:	9,3 %	—	0 g.
Sulfate Magnésium	sulfate:	13 %	Magnesium:	9,9 %	25,9	1515 g.
Introduire:		0,6 Litres de solution C				

Solution C		# Litres:	4	Concentr:	10000	# de gramme
Cuivre:	25	0,02	0,87			3,2 g.
Manganese:	13					461,5 g.
Zinc:	35					33,1 g.
Molybdate:	46					4,3 g.
Bore:	17,5					136,0 g.

Solution D	# Litres:	0,00	Acide Nitrique	67%
	# Litres:	0,18	Acide phosphorique	85%

Annexe 19 : Résultats des Anovas réalisées du pH et de la CE selon le substrat et le type de toile

Résultat de l'ANOVA pour les tests sur les plants de basilics

Périodes de tests	pH selon le type de substrat	Conductivité selon le substrat	pH selon le substrat	Conductivité selon type de toile
14/09/2016	NS	NS	NS	NS
17/09/2016	NS	NS	NS	NS
20/09/2018	NS	S**	NS	NS
23/09/2016	NS	NS	NS	NS
26/09/2016	NS	NS	NS	NS
29/09/2016	NS	S**	NS	NS
03/10/2016	NS	S**	NS	NS
06/10/2016	NS	NS	NS	NS
09/10/2016	NS	NS	NS	NS
12/10/2016	NS	NS	NS	NS
15/10/2016	NS	NS	NS	NS
18/10/2016	NS	NS	NS	NS

* Significatif à 0,05 de niveau de probabilité

** Significatif à 0,01 de niveau de probabilité

NS : Non significatif à 0,05 de niveau de probabilité

Test TUKEY	Pas possible d'identifier un substrat plus intéressant qu'une autre	Pas possible d'identifier une toile meilleure qu'une autre	Pas possible d'identifier un substrat plus intéressant qu'une autre	Pas possible d'identifier une toile meilleure qu'une autre
------------	---	--	---	--

Résultat de l'ANOVA pour les tests sur les laitues

Périodes de tests	pH selon le type de substrat	Conductivité selon le substrat	pH selon le substrat	Conductivité selon type de toile
14/09/2016	NS	NS	NS	NS
17/09/2016	NS	NS	NS	NS
20/09/2018	NS	NS	NS	NS
23/09/2016	NS	NS	NS	NS
26/09/2016	NS	NS	NS	NS
29/09/2016	NS	NS	NS	NS
03/10/2016	NS	NS	NS	NS
06/10/2016	NS	NS	NS	NS
09/10/2016	NS	NS	NS	NS
12/10/2016	NS	NS	NS	NS
15/10/2016	NS	NS	NS	NS
18/10/2016	NS	NS	NS	NS

* Significatif à 0,05 de niveau de probabilité

** Significatif à 0,01 de niveau de probabilité

NS : Non significatif à 0,05 de niveau de probabilité

Test TUKEY	Pas possible d'identifier un substrat plus intéressant qu'une autre	Pas possible d'identifier une toile meilleure qu'une autre	Pas possible d'identifier un substrat plus intéressant qu'une autre	Pas possible d'identifier une toile meilleure qu'une autre
------------	---	--	---	--

Résultat de l'ANOVA pour les tests sur les fraisiers

Périodes de tests	pH selon le type de substrat	Conductivité selon le substrat	pH selon le substrat	Conductivité selon type de toile
14/09/2016	NS	NS	NS	NS
17/09/2016	NS	NS	NS	NS
20/09/2018	NS	NS	NS	NS
23/09/2016	NS	NS	NS	NS
26/09/2016	NS	NS	NS	NS
29/09/2016	NS	NS	NS	NS
03/10/2016	NS	NS	NS	NS
06/10/2016	NS	NS	NS	NS
09/10/2016	NS	NS	NS	NS
12/10/2016	NS	NS	NS	NS
15/10/2016	NS	NS	NS	NS
18/10/2016	NS	NS	NS	NS

* Significatif à 0,05 de niveau de probabilité

** Significatif à 0,01 de niveau de probabilité

NS : Non significatif à 0,05 de niveau de probabilité

Test TUKEY	Pas possible d'identifier un substrat plus intéressant qu'une autre	Pas possible d'identifier une toile meilleure qu'une autre	Pas possible d'identifier un substrat plus intéressant qu'une autre	Pas possible d'identifier une toile meilleure qu'une autre
------------	---	--	---	--

Annexe 20 : Fiche technique de la solution nutritive pour la fertilisation de l'engrais pour laitue en serre

BASILIC THAÏLANDAIS

N° toile	Type de toile	Substrat	Localisation	Position sur la toile	14/09/2016			21/09/2016			28/09/2016			05/10/2016			12/10/2016		
					Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses
Toile 1	Aquamat	G9	Ouest	Bas	2,5	2	0	2,55	4	3	2,7	6	8	3,2	8	7	Arrêt des mesures car croissance au ralenti. Les plants ne poussent plus à cause de la chute des températures		
Toile 2	Aquamat	G9	Ouest	Haut	1	4	2	1	4	2	1,2	4	2	1,3	6	1			
Toile 3	Aquamat	Vermiculite	Ouest	Haut	1,4	2	2	1,7	3	1	1,9	4	2	2,1	4	2			
Toile 4	Aquamat	Vermiculite	Ouest	Bas	1,4	2	2	1,8	4	0	2	4	2	2,3	4	2			
Toile 5	Novatex	G9	Ouest	Bas	1,7	2	2	1,7	4	2	1,7	5	1	1,9	7	2			
Toile 6	Novatex	G9	Ouest	Haut	0,9	4	2	0,9	4	2	1	4	2	1,2	6	1			
Toile 7	Novatex	Vermiculite	Ouest	Bas	1,7	2	1	1,7	3	1	2	4	2	2,4	6	2			
Toile 8	Novatex	Vermiculite	Ouest	Bas	2,1	3	1	2,1	4	0	2,3	4	2	2,7	6	2			
Toile 9	Econo50	Vermiculite	Ouest	Haut	1,2	2	1	1,2	4	1	1,2	4	2	1,3	4	2			
Toile 10	Econo50	Vermiculite	Ouest	Bas	1,1	2	0	1,1	2	1	1,1	4	2	1,4	4	2			
Toile 11	Econo50	G9	Ouest	Haut	1	4	0	1,4	4	1	1,6	6	2	2	8	1			
Toile 12	Econo50	G9	Ouest	Bas	1,6	2	1	1,6	4	0	2,2	4	2	2,4	4	2			
Toile 13	Econo50	G9	Est	Haut	1,8	2	3	2,1	4	2	2,9	6	4	3,3	10	3			
Toile 14	Econo50	G9	Est	Bas	1	3	1	1	4	2	1,7	6	0	2,1	8	2			
Toile 15	Econo50	Vermiculite	Est	Haut	2,5	4	0	2,5	4	1	2,7	6	2	2,8	6	2			
Toile 16	Econo50	Vermiculite	Est	Bas	2,1	5	1	2,1	5	1	3,2	7	4	3,6	11	3			
Toile 17	Aquamat	G9	Est	Haut	1,5	2	1	1,5	2	1	1,8	4	0	2,2	4	1			
Toile 18	Aquamat	G9	Est	Haut	1,6	4	1	1,6	4	1	2,3	4	2	2,5	4	2			
Toile 19	Aquamat	Vermiculite	Est	Haut	0,8	2	1	1,3	4	2	1,8	6	3	1,9	8	2			
Toile 20	Aquamat	Vermiculite	Est	Bas	1,1	4	0	1,7	4	1	2,2	6	2	2,6	8	2			
Toile 21	Novatex	Vermiculite	Est	Haut	2	4	0	2	4	1	2,2	4	2	2,4	4	2			
Toile 22	Novatex	G9	Est	Bas	0,8	2	1	0,8	4	1	2,4	6	2	2,8	7	1			
Toile 23	Novatex	Vermiculite	Est	Bas	2	2	0	2,2	4	1	2,6	4	2	3	6	1			
Toile 24	Novatex	G9	Est	Haut	2,1	3	1	2,5	5	1	3,3	7	2	3,4	9	1			

LAITUES

N° toile	Type de toile	Substrat	Localisation	Position sur la toile	14/09/2016			21/09/2016			28/09/2016			05/10/2016			12/10/2016			19/10/2016		
					Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses
Toile 1	Econo50	G9	Ouest	Haut	2,2	7	0	2,7	7	1	3,5	7	3	4,3	9	2	5,1	10	1	5,6	11	2
Toile 2	Econo50	G9	Ouest	Bas	2,7	5	0	3,1	5	0	3,4	5	1	4,4	6	3	5,3	7	2	5,9	9	1
Toile 3	Econo50	Vermiculite	Ouest	Bas	2,2	3	0	2,8	3	1	3,7	4	1	4,5	5	4	5,2	8	2	6	9	2
Toile 4	Econo50	Vermiculite	Ouest	Haut	3,2	5	0	3,2	5	1	3,5	5	1	4,1	6	3	4,7	8	2	5	8	2
Toile 5	Novatex	G9	Ouest	Bas	2,6	7	0	3,2	7	1	3,8	9	1	4,6	11	5	5,5	14	3	6,2	16	2
Toile 6	Novatex	G9	Ouest	Haut	2	5	0	2,6	5	2	3	7	1	3,3	8	3	3,7	9	3	4	11	1
Toile 7	Novatex	Vermiculite	Ouest	Haut	3	6	0	3,5	6	1	4,4	7	1	5,1	8	5	5,7	11	3	4,2	14	3
Toile 8	Novatex	Vermiculite	Ouest	Haut	2,3	4	0	2,7	4	1	3,1	5	1	3,5	6	2	4,1	9	4	4,5	13	2
Toile 9	Aquamat	G9	Ouest	Haut	1,4	6	0	1,8	6	0	2,2	6	1	2,5	7	2	2,6	8	2	2,7	9	0
Toile 10	Aquamat	G9	Ouest	Bas	2	5	0	2,3	5	1	2,8	7	1	3,2	8	3	3,4	9	3	3,6	11	2
Toile 11	Aquamat	Vermiculite	Ouest	Bas	3	6	0	3,1	6	1	3,3	8	1	3,4	9	1	3,7	10	2	3,8	10	2
Toile 12	Aquamat	Vermiculite	Ouest	Haut	1,7	3	0	1,7	3	2	1,9	5	1	2,2	6	2	2,3	7	3	2,4	10	0
Toile 13	Econo50	G9	Est	Haut	2,6	6	0	2,9	6	0	3,1	6	1	3,4	7	2	3,5	9	3	3,7	12	1
Toile 14	Econo50	G9	Est	Bas	2,5	5	0	3,1	5	0	3,9	5	1	5	6	4	5,6	8	3	5,9	10	3
Toile 15	Econo50	Vermiculite	Est	Haut	2	7	0	2,6	7	0	3,6	7	0	4,3	7	5	4,8	9	2	5,2	11	1
Toile 16	Econo50	Vermiculite	Est	Haut	1,6	6	0	2,4	6	0	3,1	6	0	3,7	6	3	4,1	7	3	4,4	9	2
Toile 17	Novatex	G9	Est	Haut	2,4	4	0	3,3	4	2	4,7	7	1	5,4	9	3	5,8	11	2	6,1	13	2
Toile 18	Novatex	G9	Est	Bas	2,6	4	0	3,4	4	1	3,8	6	1	4,2	7	2	4,4	8	2	4,5	10	2
Toile 19	Novatex	Vermiculite	Est	Haut	2,5	5	0	2,8	5	2	3,2	8	1	3,7	9	3	4	10	3	4,2	11	2
Toile 20	Novatex	Vermiculite	Est	Bas	2,1	4	0	2,5	4	2	3,1	7	1	3,4	8	2	3,6	10	1	3,7	10	1
Toile 21	Aquamat	G9	Est	Bas	3	6	0	3,2	6	1	3,5	7	1	4	8	5	4,3	11	2	4,6	13	2
Toile 22	Aquamat	G9	Est	Bas	2	6	0	2,6	6	0	3,3	6	1	3,9	7	2	4,2	9	1	4,1	10	1
Toile 23	Aquamat	Vermiculite	Est	Haut	1,8	4	0	2,4	4	1	2,9	6	1	3,4	7	3	3,7	9	2	4	11	1
Toile 24	Aquamat	Vermiculite	Est	Bas	2,3	5	0	2,4	5	0	3	5	1	3,6	7	3	4	10	2	4,2	12	2

FRAISES

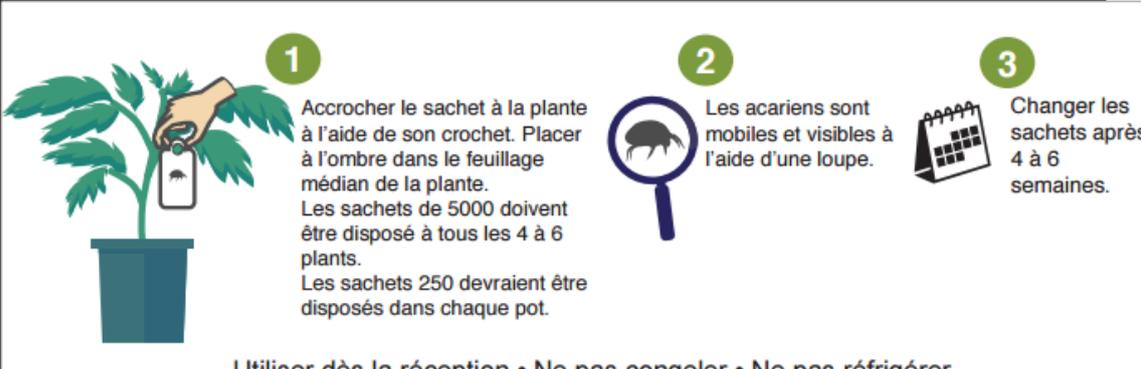
N toile	Type de toile	Substrat	Localisation	Position sur la toile	14/09/2016			21/09/2016			28/09/2016			05/10/2016			12/10/2016			19/10/2016 Arrêt des tests		
					Nombre de feuilles	Nombre de hampes	Nombre de couronne	Nombre de feuilles	Nombre de hampes	Nombre de couronne	Nombre de feuilles	Nombre de hampes	Nombre de couronne	Nombre de feuilles	Nombre de hampes	Nombre de couronne	Nombre de feuilles	Nombre de hampes	Nombre de couronne	Nombre de feuilles	Nombre de hampes	Nombre de couronne
Toile 1	Aquamat	Vermiculite	Ouest	Haut	12	4	0	15	4	0	15	5	0	15	5	0	18	6	0	18	6	0
Toile 2	Aquamat	Vermiculite	Ouest	Bas	20	7	0	20	8	0	23	9	0	23	9	0	27	10	0	27	10	0
Toile 3	Aquamat	G9	Ouest	Haut	12	4	0	12	4	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0
Toile 4	Aquamat	G9	Ouest	Haut	15	5	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0	21	7	0	21	7	0
Toile 5	Econo50	Vermiculite	Ouest	Haut	9	3	0	9	3	0	12	4	0	12	4	0	18	6	0	18	6	0
Toile 6	Econo50	Vermiculite	Ouest	Bas	9	3	0	9	3	0	15	4	0	15	4	0	21	7	0	21	7	0
Toile 7	Econo50	G9	Ouest	Bas	12	4	0	12	4	0	12	4	0	12	4	0	17	7	0	17	7	0
Toile 8	Econo50	G9	Ouest	Bas	12	4	0	12	4	0	12	4	0	12	4	0	12	4	0	12	4	0
Toile 9	Novatek	Vermiculite	Ouest	Bas	15	5	0	15	5	0	18	6	0	18	6	0	18	6	0	18	6	0
Toile 10	Novatek	Vermiculite	Ouest	Haut	9	3	0	9	3	0	9	3	0	9	3	0	12	4	0	12	4	0
Toile 11	Novatek	G9	Ouest	Bas	12	4	0	12	4	0	18	6	0	18	6	0	21	7	0	21	7	0
Toile 12	Novatek	G9	Ouest	Haut	11	4	0	11	4	0	11	4	0	11	4	0	11	4	0	11	4	0
Toile 13	Aquamat	G9	Est	Bas	18	6	0	18	6	0	24	8	0	24	8	0	27	9	0	27	9	0
Toile 14	Aquamat	G9	Est	Haut	14	5	0	14	5	0	18	6	0	18	6	0	21	7	1	21	7	1
Toile 15	Aquamat	Vermiculite	Est	Haut	12	4	0	12	4	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0
Toile 16	Aquamat	Vermiculite	Est	Bas	6	2	0	6	2	0	9	3	0	9	3	0	6	2	0	6	2	0
Toile 17	Econo50	G9	Est	Bas	15	5	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0	15	5	0
Toile 18	Econo50	G9	Est	Haut	12	5	0	12	5	0	18	6	0	18	6	0	21	7	2	21	7	2
Toile 19	Econo50	Vermiculite	Est	Haut	9	3	0	9	3	0	12	4	0	12	4	1	17	6	1	17	6	1
Toile 20	Econo50	Vermiculite	Est	Bas	17	6	0	17	6	0	18	6	0	18	6	0	27	9	0	27	9	0
Toile 21	Novatek	G9	Est	Bas	9	3	0	9	3	0	9	3	0	9	3	0	9	3	0	9	3	0
Toile 22	Novatek	G9	Est	Haut	18	6	0	18	6	0	21	7	0	21	7	1	27	9	1	27	9	1
Toile 23	Novatek	Vermiculite	Est	Bas	9	3	0	9	3	0	9	3	0	9	3	1	18	6	1	18	6	1
Toile 24	Novatek	Vermiculite	Est	Haut	9	3	0	9	3	0	6	2	0	6	2	0	3	1	0	3	1	0

Annexe 21 : Anova à mesure répétée de la culture de laitue selon le type de toile sur le prototype sur toit

Modalité	Moyenne	Groupes	
Type de toile-Econo50	5,213	A	
Type de toile-Novatex	4,675	A	B
Type de toile-Aquamat	3,675		B

Annexe 22 : Base de données des croissances des plants de laitues dans la serre

Numero toile	Type de toile	Substrat sur la toile	Position sur la toile	01/12/2016			08/12/2016			15/12/2016			22/12/2016			29/12/2016			
				Taille moyenne de feuilles (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne de feuilles (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne de feuilles (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne de feuilles (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	Taille moyenne de feuilles (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de pousses	
Toile 1	Econoflo	Vermiculite	Haut	4,3	3	1	5,2	4	1	6,4	5	3	6,8	9	2	5,1	6	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 1	Econoflo	Vermiculite	Bas	4,2	4	1	5,5	5	1	5,6	5	2	5,9	7	2	4,7	4	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 2	Econoflo	Vermiculite	Haut	5,9	4	0	8,6	4	1	9,1	5	2	4,2	4	1	3,3	3	0	Feuilles arrachées car infectées
Toile 2	Econoflo	Vermiculite	Bas	4,1	3	1	5,4	3	1	5,4	4	2	5,5	5	1	5,9	6	1	
Toile 3	Econoflo	GR	Haut	3,2	3	0	4,2	3	1	5,7	5	3	6,9	8	2	7	7	1	
Toile 3	Econoflo	GR	Bas	4,1	5	0	5,9	5	1	6,3	6	1	6,8	7	1	7,1	9	1	
Toile 4	Econoflo	GR	Haut	3,5	3	1	4,8	5	1	5,5	6	1	5,9	7	1	4,7	5	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 4	Econoflo	GR	Bas	3,9	4	0	4,3	4	1	4,9	6	2	5,8	8	1	4,9	7	0	Feuilles arrachées car infectées
Toile 5	Econoflo	GR	Haut	2,9	3	1	4,5	4	1	4,8	5	2	5,2	7	2	3,9	4	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 5	Econoflo	GR	Bas	3,9	3	2	4,5	5	1	4,6	6	2	5,1	8	1	3,8	4	2	Feuilles arrachées car infectées
Toile 6	Aquamat	Vermiculite	Haut	3,4	3	0	4,9	4	1	5,4	5	1	6,1	6	1	6,8	8	2	
Toile 6	Aquamat	Vermiculite	Bas	4,5	5	0	4,7	4	1	5,6	5	3	6,3	9	2	5,5	6	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 7	Aquamat	Vermiculite	Haut	2,7	3	3	4,7	4	1	5,3	5	2	6	7	2	5,7	5	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 7	Aquamat	Vermiculite	Bas	4,8	3	1	5,4	4	1	5,7	5	1	6,2	7	2	5,3	6	2	Feuilles arrachées car infectées
Toile 8	Aquamat	GR	Haut	4,7	3	2	5,4	4	1	5,9	5	2	5,3	3	2	2,5	2	0	Feuilles arrachées car infectées
Toile 8	Aquamat	GR	Bas	4,8	3	3	5,1	4	2	5,3	4	2	7	1	7	7	1		
Toile 9	Aquamat	GR	Haut	1,7	4	4	3,4	5	2	3,9	6	1	5	6	1	5,2	7	1	Plante morte
Toile 9	Aquamat	GR	Bas	5,1	3	3	5,4	6	1	4,8	4	1	7	7	7	7	7	7	Plante morte
Toile 10	Aquamat	GR	Haut	3,2	3	2	5,4	4	1	5,5	5	2	5,7	7	2	4,2	5	1	Feuilles arrachées car infectées
Toile 10	Aquamat	GR	Bas	2,9	2	0	3,5	6	1	3,2	4	0	7	7	7	7	7	7	Plante morte



1 Accrocher le sachet à la plante à l'aide de son crochet. Placer à l'ombre dans le feuillage médian de la plante. Les sachets de 5000 doivent être disposés à tous les 4 à 6 plants. Les sachets 250 devraient être disposés dans chaque pot.

2 Les acariens sont mobiles et visibles à l'aide d'une loupe.

3 Changer les sachets après 4 à 6 semaines.

Utiliser dès la réception • Ne pas congeler • Ne pas réfrigérer

Annexe 24 : Mode d'emploi BioCeres WP (ANATIS, BIOPROTECTION, 2017a)

Mode d'emploi recommandé pour préparer 100 L de BioCeres WP*

Appliquer en fin de journée

1. Pré-mélanger 400 g BioCeres WP dans un contenant refermable avec 2 L d'eau;
2. Mélanger vigoureusement durant 45 secondes;
3. Ajouter le pré-mélange dans le réservoir de pulvérisation avec 98 L d'eau;
4. Rincer 3 fois le contenant de pré-mélange avec de l'eau et ajouter l'eau des rinçages dans le réservoir de pulvérisation;
5. Gardez une agitation constante dans le réservoir.

* Ajuster proportionnellement pour préparer des suspensions de BioCeres WP plus grande ou plus petite.

Annexe 25 : Résultats des tests RAPITESTS



Table des annexes

Annexe 1 : Entretien avec Georges BERTONI, 2017	101
Annexe 2 : Entretien avec Marion SARLÉ, Les sourciers, 2017	104
Annexe 3 : Entretien avec Marie-Line GAGNÉ, 2016.....	101
Annexe 4 : Fiche technique solution nutritive pour le système sur le toit du PCM (2016)	105
Annexe 5 : Mode d'emploi d'acide dans un système hydroponique	106
Annexe 6 : Fiche technique de la toile Econo50.....	107
Annexe 7 : Fiche technique du feutre Novatex.....	108
Annexe 8 : Fiche technique feutre Aquamat (AQUAMAT, 2016).....	109
Annexe 9 : Fiche technique substrat G9 (FAFARD, 2014)	110
Annexe 10 : Fertilisation adoptée pour le prototype VERTIcal en serre (HYDROCULTURE GUY DIONNE, 2016).....	112
Annexe 11 : Bases de données pour le calcul de l'évapotranspiration (BORRELL ESTUPINA, 2011 ; METEO MEDIA, 2016)	113
Annexe 12 : Base de données pour calcul besoins en eau des plantes (PERRIER, 1975)	114
Annexe 13 : Mode d'emploi pour calibrage pH-mètre.....	115
Annexe 14 : Calibrage Conductimètre	116
Annexe 15 : Mode d'emploi tests RAPITEST	117
Annexe 16 : Base de données des valeurs de rétention en eau des toiles.....	118
Annexe 17 : Méthode de calcul du ratio d'injection réel (PROMIX, 2016).....	119
Annexe 18 : Feuille de fertilisation élaborée à l'ITA pour laitue et fine herbe (GAGNÉ, 2016)	120
Annexe 19 : Résultats des Anovas réalisées du pH et de la CE selon le substrat et le type de toile.....	121
Annexe 20 : Fiche technique de la solution nutritive pour la fertilisation de l'engrais pour laitue en serre.....	123
Annexe 21 : Anova à mesure répété de la culture de laitue selon le type de toile sur le prototype sur toit.....	125
Annexe 22 : Base de données des croissances des plants de laitues dans la serre	126
Annexe 23 : Mode d'emploi <i>Neoseiulus cucumeris</i> (ANATIS BIOPROTECTION, 2017d).	127
Annexe 24 : Mode d'emploi BioCeres WP (ANATIS BIOPROTECTION, 2017a)	128
Annexe 25 : Résultats des tests RAPITESTS	129