

L'hydroponie : une alternative à l'agriculture conventionnelle ?

Projet synthèse présenté à
Pierre-Jean Thibault
dans le cadre du cours
101-EYF-03 Projet en biologie
Groupe 1

TABLE DES MATIÈRES

Abstract.....	1
Résumé	2
Introduction	3
Hydroponie	4
Méthode Kratky, un système hydroponique non-circulant	4
Système hydroponique à débit continu.....	5
Solution nutritive et rôle des molécules dans la croissance végétale	6
Croissance végétale	8
Photosynthèse	10
Portrait de la plante – Le haricot nain.....	10
Développement.....	11
Partie I : Rendement	11
Partie II : Utilisation d’eau	12
Partie III : Utilisation d’énergie.....	14
Partie expérimentale	17
But	17
Matériel.....	17
Méthode	17
Résultats	19
Discussion.....	22
Conclusion.....	26
Annexe I - Matériels utilisés pour la réalisation de la partie expérimentale	27
Annexe II - Montage expérimental.....	28
Annexe III – Résultats : photographie des plantes	29
Bibliographie	30

ABSTRACT

Nowadays, finding a more efficient agriculture method becomes important since conventional agriculture practices may cause negative impacts on the environment because of their high and inefficient use of water, and large land requirements. (Barbosa *et al.*, 2015) The main objectives of this research were to understand how different hydroponic systems function and what equipment they require, to acknowledge this technique's limits and advantages, to explore the role played by nutrients in plants' growth, and ultimately, to determine if hydroponics can be an alternative to conventional agriculture. Three aspects of this technology were analyzed: yield, water usage and energy usage. Methods included collecting data from statistics, websites, literature, and video materials related to hydroponics as well as conducting an experiment to test hydroponics' efficiency. In this experiment, three samples of *Phaseolus vulgaris* var. *nana* were planted in three different environments (nutritious solution, plain water, and soil), and the results were to be compared to theoretical data obtained from research.

Overall, the data have shown that higher yield is achievable by using hydroponics. Water usage of hydroponic systems was approximately 91% lower than conventional agriculture and the energy demand of a hydroponic system was overall higher than conventional agriculture. Nevertheless, hydroponics' energy demand and yield may vary from case to case, depending on the production choices of the owner. Experimental evidence has shown that hydroponic method yielded four times higher than conventional agriculture with less water usage. It has been confirmed that nutrients have an essential role to play in a plant's growth since the crop planted in plain water demonstrated signs of malnutrition and an absence of fructification. In sum, a bigger yield and lower water usage made hydroponics a potential alternative to conventional agriculture; however, this research also identified energy availability as a major factor in assessing the feasibility of a hydroponic installation.

RÉSUMÉ

De nos jours, il est important de trouver une méthode alternative à l'agriculture traditionnelle, car les pratiques agricoles traditionnelles présentent une utilisation inefficace d'eau et une demande accrue en terre cultivable. (Barbosa *et al.*, 2015) Le but de cette recherche est ainsi de vérifier si cette méthode de culture peut bel et bien remplacer l'agriculture traditionnelle. Pour ce faire, quelques études sur des cultures hydroponiques ont été analysées. Lors du traitement des données, trois aspects de comparaison ont été examinés : le rendement des plantes, l'utilisation d'eau et de l'utilisation d'énergie des systèmes de culture.

D'abord, il est possible de constater que le rendement des cultures en milieu hydroponique est plus grand qu'en milieu traditionnel. De plus, l'hydroponie permet une économie d'eau de 91% par rapport à l'agriculture traditionnelle. Néanmoins, c'est l'agriculture traditionnelle qui permet une plus petite utilisation d'énergie. Cependant, il est à noter que le rendement et l'utilisation d'énergie de cette méthode peuvent varier selon les intentions de production du cultivateur. Des preuves expérimentales ont montré qu'une plante ayant poussé en milieu hydroponique a produit quatre fois plus de fruits que la plante ayant grandi dans la terre. D'ailleurs, cette expérience a également démontré l'importance des nutriments, puisqu'une troisième plante, placée dans de l'eau plate, a été observée. Cette dernière s'est peu développée et ne présente pas de signe de fructification. Bref, il est possible de constater que l'hydroponie pourrait être une alternative à l'agriculture traditionnelle, puisqu'elle permet une meilleure croissance des plantes et une utilisation moindre d'eau, et ce, bien que la quantité d'énergie utilisée soit plus importante.

INTRODUCTION

La population mondiale, qui ne cesse de croître et qui devrait atteindre 9,8 milliards d'habitants en 2050, présente des besoins alimentaires de plus en plus importants. (The United Nation, 2017) De plus, les pratiques agricoles traditionnelles présentent une utilisation inefficace d'eau et une demande accrue en terre cultivable. (Barbosa *et al.*, 2015) Les agro-industries doivent trouver un moyen d'augmenter l'efficacité des méthodes de culture actuelles. Pour ce faire, il serait intéressant de déterminer s'il existe une alternative à l'agriculture traditionnelle. L'hydroponie constitue une option intéressante. Le but de cette recherche est ainsi de vérifier si la culture hydroponique peut bel et bien remplacer l'agriculture traditionnelle.

En théorie, l'hydroponie devrait être plus efficace que l'agriculture conventionnelle. En effet, pour ce qui est du rendement, celui d'une culture en milieu hydroponique devrait être supérieur à celui d'une culture en milieu traditionnel. Cela est dû au fait que l'hydroponie permet aux plantes une plus grande vitesse de croissance grâce à la distribution quasi permanente d'engrais par le biais d'un système d'irrigation. L'hydroponie procure également aux cultures des conditions de croissances idéales, puisque ces dernières sont contrôlées. Ainsi, le développement des végétaux se voit amélioré. De surcroît, l'hydroponie devrait nécessiter beaucoup moins d'eau (jusqu'à 90 %), puisque l'eau, qui est constamment recyclée, est utilisée de manière optimale. Au niveau de l'utilisation d'énergie, l'hydroponie devrait présenter une plus grande consommation parce qu'elle est dépendante des systèmes de climatisation et de l'éclairage artificiel.

Cette recherche, qui vise à valider l'hypothèse posée ci-dessus, est divisée en deux parties. Dans le développement, notre analyse porte sur trois aspects de comparaison : le rendement, l'utilisation de l'eau et de l'utilisation d'énergie. Pour ce faire, des données théoriques tirées des articles web, des études publiées sur Google Scholar et des vidéos YouTube seront examinées. Dans la section *PARTIE II : UTILISATION D'EAU*, de différentes données sur l'eau économisée par le système hydroponique ont été obtenues à partir des sites internet et des littératures et exprimées en pourcentage. Puis, une moyenne de ces données a été calculée. Finalement, la donnée sur l'utilisation d'eau par l'étude de Barbosa *et al.* est convertie en pourcentage à l'aide de la formule suivante (figure 1) :

$$V_{\%} = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \times 100$$

Où :

$V_{\%}$ = Le pourcentage de variation

V_1 = Valeur initiale

V_2 = Valeur finale

Figure 1 : Calcul de variation en pourcentage (Wikihow, s.d.)

Ainsi, un pourcentage négatif signifie une diminution alors qu'un pourcentage positif signifie une augmentation. (Wikihow, s.d.)

Dans la partie expérimentale, la croissance de 3 plantes dans 3 milieux de culture différents (terre, solution nutritive et eau) sera comparée.

HYDROPONIE

L'hydroponie est définie comme étant la culture de plantes réalisée dans une solution nutritive renouvelée. La terre naturelle est donc remplacée par un substrat neutre et inerte.

MÉTHODE KRATKY, UN SYSTÈME HYDROPONIQUE NON-CIRCULANT

D'après B.A. Kratky, le concepteur de la méthode Kratky, les systèmes hydroponiques non-circulants, c'est-à-dire ceux dont la solution nutritive est statique (aucun mouvement), doivent respecter les règles suivantes :

- La partie supérieure du système racinaire doit être exposée à l'air humide.
- Les racines ne doivent pas se dessécher.
- La partie inférieure du système racinaire doit être plongée dans la solution nutritive.
- Le niveau de la solution nutritive doit rester le même ou s'abaisser dans le temps, mais il ne peut pas être élevé au risque de «noyer» les racines.

La méthode Kratky est un système de culture hydroponique simple et non-circulant. Grâce à cette méthode, il est possible d'omettre l'utilisation de pompe et d'électricité pour faire de l'hydroponie.

La méthode Kratky est la plus simple de toutes. Le montage à réaliser est présent dans la figure 2.

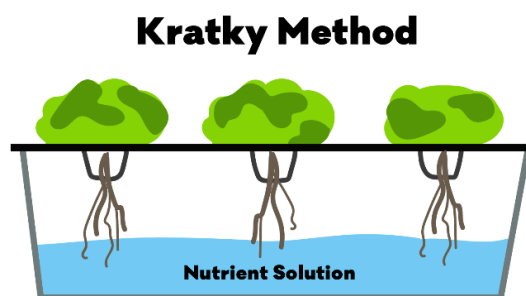


Figure 2 : Montage d'un système hydroponique utilisant la méthode Kratky (hydrotechhydroponic, 2020)

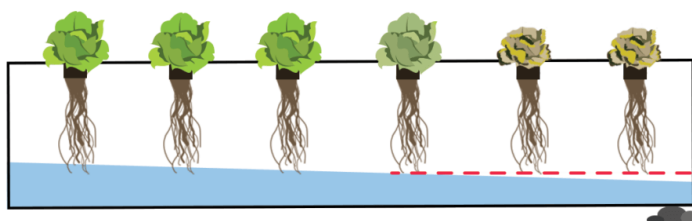


Figure 3 : Évolution du niveau de la solution nutritive au fil du temps (Youst, 2019)

Il s'agit de placer une plante dans un panier hydroponique, qui est introduit dans un réservoir de solution nutritive. Lors du montage, les racines sont plongées dans le liquide nutritif. Puis, au fur et à mesure que la plante grandit, le niveau de la solution, qui est

consommée par la plante, va diminuer (Voir figure 3).

L'espace libre qui va se créer entre la solution et la plante est essentiel, car il permet à cette dernière de recevoir l'oxygène nécessaire à sa croissance (voir figure 4). En effet, lorsque la solution nutritive s'abaisse, les racines aériennes s'épaississent et se ramifient afin de capturer plus d'oxygène. Pour cette raison, il est important de ne pas trop élever le niveau de la solution. Autrement, le liquide noierait les racines aériennes

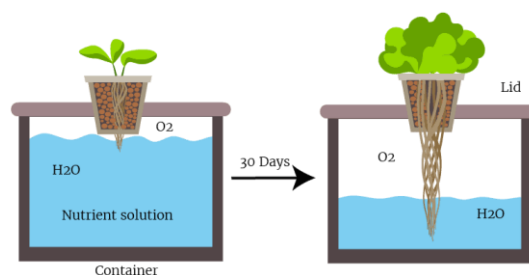


Figure 4 : Croissance de la plante et évolution de la quantité d'éléments (eau et air) en milieu hydroponique (Trees, 2021)

SYSTÈME HYDROPONIQUE À DÉBIT CONTINU

Un système hydroponique à débit continu a pour effet de faire circuler une eau riche en éléments nutritifs autour des racines des plantes. Ces systèmes permettent de recycler l'eau et de la réutiliser, ce qui permet une meilleure efficacité quant à l'irrigation des cultures.

Un des systèmes le plus représentatif de cette catégorie est la technique du film nutritif (NFT). Celle-ci est une méthode hydroponique qui repose sur un faible débit d'eau qui circule d'un réservoir hydroponique vers un bac de culture incliné en hydratant le bas du système racinaire des plantes lors de son passage. La majeure partie de la racine des plantes est exposée à l'air, car cela permet à la plante de s'oxygéner. Cet effet peut être atteint dans d'autres systèmes hydroponiques à l'aide d'une pompe à air. En général, le ratio de l'inclinaison du bac de croissance est compris entre 1 :30 et 1 :40, ce qui permet l'écoulement de la solution nutritive. (Voir figure 5) (Royal Queen Seed, 2019)

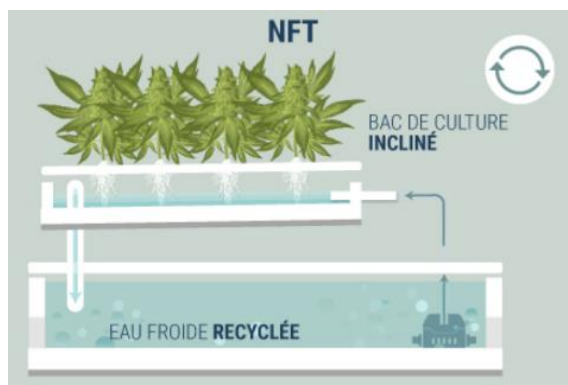


Figure 5 : Composantes d'un système utilisant la technique NFT (Royal Queen Seed, 2019)

À un niveau industriel, il est possible de combiner les systèmes hydroponiques à débit continu avec les fermes verticales afin d'utiliser l'espace de façon plus efficace, ce qui permet d'augmenter le rendement par unité d'espace. Les fermes verticales regroupent l'ensemble des pratiques qui consistent à cultiver des quantités significatives de produits alimentaires dans des tours, des parois ou des structures verticales. (Voir figure 6 et 7) Cette idée d'agriculture verticale a été développée en 1999 par Dickson Despommier, un professeur en microbiologie et santé environnementale à l'université Columbia à New York. Cette technologie vise principalement à :

- Apporter une solution aux problèmes de famine dans le monde en fournissant également de l'emploi et des produits à la population locale.
- Résoudre le problème de diminution de terres arables et les problèmes connexes comme la désertification et la détérioration des terres arables.
- Diminuer les impacts environnementaux causés par l'agriculture traditionnelle
- Contribuer à protéger la biodiversité par diminution de zone d'activité humaine de la surface terrestre (Wikipédia, 2021)



Figure 6 : Types de design possibles pour des fermes verticales (Wikipédia, 2021)



Figure 7 : L'intérieur d'une ferme verticale (Chamalet, 2020)

SOLUTION NUTRITIVE ET RÔLE DES MOLÉCULES DANS LA CROISSANCE VÉGÉTALE

La solution nutritive est un élément essentiel à la culture hydroponique : elle fournit les nutriments nécessaires à la croissance et au développement de la culture. La solution nutritive est composée notamment d'eau, de sels minéraux et d'oligo-éléments.

Il existe 16 éléments nutritifs essentiels à la vie et au développement des plantes. Ces derniers peuvent être répartis en trois catégories : les éléments primaires (requis en quantité importante), les éléments secondaires (requis en quantité moins importante) et les éléments mineurs/oligo-éléments (requis en petite quantité).

Le tableau 1 résume le rôle de chaque élément nutritif essentiel.

Tableau 1 : Rôles des nutriments nutritifs essentiels dans la croissance végétale (modifié de Jardinier autrement, 2021)

Catégorie	Élément	Rôle
Éléments primaires	Carbone (C)	Constituant majeur des plantes. Présent dans le squelette de nombreuses biomolécules comme l'amidon ou la cellulose.
	Oxygène (O)	Nécessaire à la respiration cellulaire.
	Hydrogène (H)	Nécessaire à la construction de sucres de la croissance végétale.
	Azote (N)	Constituant fondamental des protéines et de la chlorophylle. Joue un rôle important dans la croissance des plantes.
	Phosphore (P)	Joue un rôle important dans la croissance des racines, l'implantation des jeunes plants, la floraison, la production et le mûrissement des fruits, la photosynthèse, la respiration et la croissance générale de la plante.
	Potassium (K)	Assure le transport des sucres, la turgescence et la rigidité des tiges. Augmente la résistance de la plante (froid, maladies, insectes, etc.).
Éléments secondaires	Calcium (Ca)	Joue un rôle capital dans la structure des végétaux. Participe au développement racinaire et à la maturation des fruits et des graines.
	Magnésium (Mg)	Élément central de la chlorophylle. Contribue à la maturation des fruits et à la germination des graines. Renforce les parois cellulaires et favorise l'absorption du phosphore, de l'azote et du soufre par la plante.
	Soufre (S)	Entre dans la composition de plusieurs protéines, enzymes et vitamines. Intervient dans la formation de la chlorophylle. Favorise le transport du potassium, du calcium et du magnésium dans la plante.
Éléments mineurs/Oligo-éléments	Fer (Fe)	Élément indispensable à la formation de la chlorophylle. Participe à la constitution de certaines enzymes et acides aminés.
	Bore (B)	Élément nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble de la plante et à la croissance des tissus. Favorise la formation des fruits et participe à l'absorption de l'eau.
	Manganèse (Mn)	Favorise la germination des semences et accélère la maturation des plants. Joue un rôle important dans la photosynthèse en participant à la formation de la chlorophylle. Est nécessaire au métabolisme de l'azote et à la formation des protéines.
	Molybdène (Mo)	Élément indispensable à l'assimilation de l'azote par les plantes et les bactéries fixatrices d'azote. Est nécessaire à la production des protéines dont l'élément de base est l'azote.
	Chlore (Cl)	Stimule la photosynthèse.
	Cuivre (Cu)	Activateur de plusieurs enzymes. Joue un rôle dans la formation de la chlorophylle.
	Zinc (Zn)	Joue un rôle important dans la synthèse des protéines, des enzymes et des hormones de croissance.

Alors que le carbone, l'oxygène et l'hydrogène sont des éléments extraits de l'eau et de l'air, les 13 autres éléments nutritifs doivent être tirés de la solution nutritive. Dans le sac de nutriments *Jiffy Hydro Nutrients*, les éléments nutritifs sont présents sous les formes présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Formes disponibles des nutriments pour les plantes (en pourcentage) dans le fertilisant de Jiffy Hydro Nutrients (Jiffy Hydro Nutrients, s.d.)

Formes disponibles pour les plantes	Pourcentages
Azote total (N)	10%
Azote ammoniacal	0,10%
Azote nitrique	3,50%
Azote uréique	6,40%
Phosphore assimilable (P ₂ O ₅)	5%
Potasse soluble (K ₂ O)	10%
Calcium (Ca)	5,0%
Magnésium (Mg)	4,0%
Soufre (S) combiné	8,3%
Bore (B)	0,0200%
Cuivre (Cu) – 0,0500%	0,0500%
Cuivre chélaté (Cu)	0,0500%
Fer (Fe)	0,7500%
Fer chélaté (Fe)	0,7500%
Manganèse (Mn)	0,1500%
Manganèse chélaté (Mn)	0,1500%
Molybdène (Mo)	0,0050%
Zinc (Zn)	0,1500%
Zinc chélaté (Zn)	0,1500%

CROISSANCE VÉGÉTALE

La croissance d'une plante se fait en trois étapes : la germination de la graine, le développement de la plantule et la croissance du jeune plant en plant adulte.

Germination de la graine

Bien que l'hydroponie est une méthode de culture sans terre, la germination de la graine doit se faire dans un substrat consistant, afin que les premières racines soient bien fixées. Habituellement, des cubes de LDR (laine de roche) sont utilisés, puisqu'il s'agit d'un substrat inerte, stérile, poreux et non dégradables qui fournissent un support solide pour les racines. Néanmoins, ce substrat est souvent basique en raison de la nature des roches dont il est issu. Il est donc important de redescendre le pH des laines de roches en les plongeant dans une solution à pH acide pendant quelques jours, jusqu'à ce que le pH se stabilise (pH de 5,5 à 6). À la suite de cela, il suffirait d'humidifier les cubes de LDR et d'y laisser germer les plantes.

Une alternative aux cubes de laine de roche est d'utiliser simplement de la terre ou de la tourbe. L'avantage à utiliser ces deux milieux est qu'il n'est pas requis de tamponner le substrat. Ainsi, il suffit d'enterrer la graine dans la terre ou dans la tourbe humide et de la laisser germer.

Pour que la germination s'effectue, des conditions particulières sont nécessaires. D'abord, la température ambiante doit être suffisante (elle ne doit surtout pas être trop faible) afin de garantir une bonne germination. De plus, l'humidité est un facteur important, car la graine a besoin d'une quantité d'eau suffisante pour se développer. Le substrat doit donc être bien humide. Ce dernier doit également présenter une bonne teneur en sels minéraux (fer, calcium, soufre, magnésium, etc.). Lors de la germination, la lumière n'est pas nécessaire. L'éclairage est donc peu important.

Développement de la plantule

Lorsque la germination est complète, c'est-à-dire que les racines et au moins deux feuilles sont visibles, la plantule est prête à se développer. Si la germination s'est déroulée dans un cube LDR, il n'est pas nécessaire de sortir la plantule du cube : il suffit de placer le petit bloc dans le panier hydroponique en s'assurant que les racines dépassent du panier et touchent la solution nutritive. Si la germination s'est effectuée dans de la terre, alors il faut rincer le semi de façon qu'il n'y ait plus aucune trace de terre, puis le placer dans le panier hydroponique. Dans les deux cas, il est nécessaire de placer des billes d'argile dans le panier, afin de permettre à la plantule de rester droite (les billes d'argiles ne servent que de support).

Pour que la plante se développe, certains éléments sont indispensables. D'abord, les nutriments présents dans la solution nutritive qui sont cités précédemment sont essentiels au développement d'une plante (voir la section *solution nutritive et rôle des molécules dans la croissance végétale*). De plus, les plantes ont besoin d'oxygène pour procéder à la respiration. Les hormones de croissance secrétées par la plante sont également requises, puisque sans elles, le développement du végétal est perturbé. Finalement, l'eau, la lumière et le dioxyde de carbone (CO₂) sont une nécessité absolue, notamment pour que la photosynthèse puisse être réalisée.

Croissance du jeune plant en plant adulte

Lorsque la plante continue à croître, cette dernière fleurit et produit des fruits. Pour ce qui est de la plante « Haricot nain », le fruit qu'elle produit est le haricot nain.

PHOTOSYNTHESE

La majorité des Végétaux, tels que les haricots, sont autotrophes. En effet, les seuls éléments dont ils ont besoin sont le dioxyde de carbone contenu dans l'air, l'eau ainsi que les nutriments que l'on retrouve normalement dans le sol. Plus précisément, ces Végétaux sont photoautotrophes : ils utilisent la lumière comme source d'énergie pour synthétiser les matières organiques. (Voir figure 8) Pour y parvenir, ils ont recours à la photosynthèse, une réaction chimique qui a lieu dans les chloroplastes des cellules végétales.

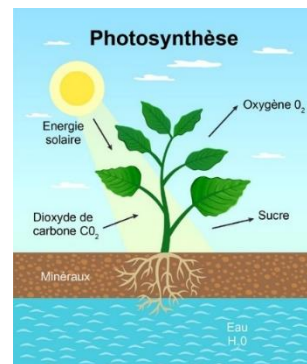


Figure 8: Processus de la photosynthèse (Blog Oleo-Marc, 2020)

L'équation chimique de la photosynthèse est la suivante :



PORTRAIT DE LA PLANTE – LE HARICOT NAIN

Famille : Fabaceae

Genre et espèce : *Phaseolus vulgaris* var. *nana*

Taille moyenne : 60 cm

Le haricot nain se distingue de la plante grimpante (*Phaseolus vulgaris*) par sa petite taille.

Intervalle de croissance pour atteindre la maturité : 53 jours

DÉVELOPPEMENT

PARTIE I : RENDEMENT

Au niveau du rendement, une étude qui a été réalisée par Barbosa *et al.* ont montré que le rendement des laitues iceberg (*Lactuca sativa* var. *capitata*) en milieu hydroponique (technique NFT) est supérieur qu'en milieu traditionnel. En effet, selon les résultats de cette étude ayant lieu en Arizona, la production de laitues iceberg en milieu hydroponique a été de $41 \pm 6,1$ kilogrammes de laitues par mètre carré par an, alors que celle en milieu de culture traditionnel a été de $3,9 \pm 0,21$ kilogrammes de laitues par mètre carré par an. (Barbosa *et al.* 2015) Par conséquent, au niveau du rendement, le rendement des milieux hydroponiques est environ 10,51 fois plus grand qu'en milieu de culture traditionnelle. (Voir figure 9)

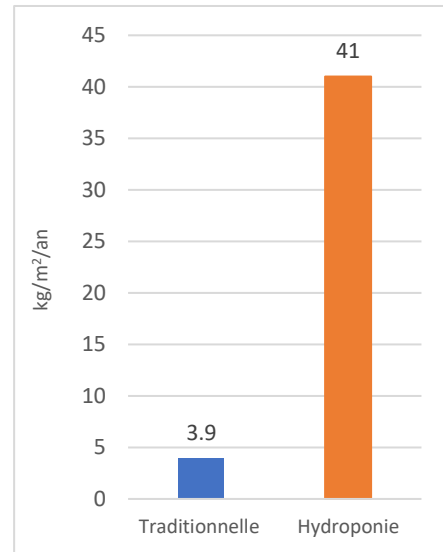


Figure 9 : Le rendement des deux méthodes de production
(Modifiée de Barbosa *et al.*, 2015)

Le rendement élevé de l'hydroponie s'explique par une optimisation des conditions de croissance (température, nutriments, ensoleillement, etc.) pour les plantes par un environnement contrôlé, car les conditions de croissance de ces plantes sont maintenues idéales tout au long de l'année. Ainsi, les récoltes ne sont plus à la merci de la météo, ce qui permet d'obtenir des récoltes de meilleure qualité. Les conditions maintenues idéales pour la croissance des laitues permettent également de réduire l'intervalle de croissance. (Barbosa *et al.* 2015) En effet, une semence de laitue iceberg en milieu hydroponique prend environ 35 jours pour atteindre sa maturité, ce qui est environ la moitié de l'intervalle de croissance d'une laitue cultivée en environnement traditionnel. (HGTV, 2019) De plus, cette caractéristique permet d'avoir des cultures de laitues tout au long de l'année alors que, en général, la culture de laitue ne s'effectue qu'une fois par an en agriculture traditionnelle. (Barbosa *et al.* 2015)

Une récolte de laitues iceberg de grandeur médium ayant comme masse moyenne de 539 grammes (Hannaone, s.d.) peut être obtenue tous les 35 jours. (HGTV, 2019) Par conséquent, à l'aide d'estimation (365 jours divisés par l'intervalle de croissance), il est possible d'arriver à environ 10,4 récoltes par an, ce qui explique en partie le rapport entre le rendement de l'hydroponie et le rendement de l'agriculture conventionnelle qui a été d'environ 10,5. Or, Barbosa *et al.*, n'ont pas tenu compte de la combinaison possible entre l'hydroponie et la technique de ferme verticale, qui permet de multiplier le rendement. Par exemple, l'institut Macrothink de l'Allemagne a conduit une étude sur l'efficacité de production d'un bâtiment conçu pour maintenir le fonctionnement d'une ferme à environnement contrôlé de 37 étages.

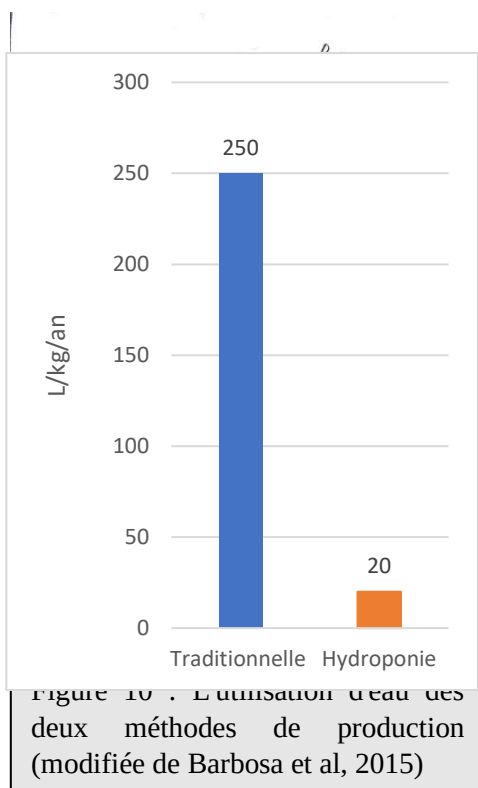
Cette ferme utilise notamment la technique d'hydroponie, d'aéroponie et d'aquaponie. L'espace réservé à ce bâtiment a été de 0,25 hectare et le rendement a été de 3500 tonnes de fruits et de légumes, ce qui correspond à 516 fois la production moyenne d'une ferme traditionnelle de mêmes dimensions en Allemagne. (Banerjee, 2014) Cependant, dans son essai *The Vertical Farm Essay I*, Dickson Despommiers stipule que le rendement des cultures en milieu dans une ferme verticale peut être de 4 à 5 fois plus élevé qu'en milieu traditionnel jusqu'à 30 fois plus élevé pour certaines cultures comme celle des fraises. (2009) Cependant, ni la raison pour laquelle il y a une si grande variation entre les augmentations de rendement ni les preuves qui appuient cette affirmation n'ont été fournies. Malgré une absence de clarté, cette information montre qu'il existe une variation au niveau du rendement selon les types de cultures, ce qui est logique. En effet, les dimensions de chaque type de culture varient et la hauteur des cultures est particulièrement importante quant à l'installation d'une ferme verticale, car elle affecte de nombreux paramètres tels que la distance entre deux cultures, la distance entre deux bacs de croissance et le nombre de bacs de croissance par colonne. Par conséquent, le rendement se voit affecté.

Cependant, il faut prendre quelques aspects en considération. D'abord, il existe des cultures qui ne performant plus ou moins bien en milieu hydroponique. C'est le cas des plantes qui occupent une grande espace et des plantes qui nécessitent un support. Par exemple, selon *Rural Living Gardening* (s.d.) et *Maximum Yield* (2017), le maïs n'est pas une culture conseillée pour être cultivé en milieu hydroponique parce qu'il a tendance à nécessiter une grande espace et le potentiel économique de cette plante n'est pas élevé. Les arbres à fruit prennent également beaucoup d'espace et demandent une très grande quantité d'eau (il faut donc un très grand réservoir). De plus, leurs racines peuvent atteindre de grande profondeur, l'économie d'eau par la méthode hydroponique est donc moins intéressante. Quant aux plantes qui nécessitent un support (melon d'eau et citrouille), la gestion et l'installation des supports sont également plus difficiles à gérer. (Living Gardening, s.d.)

Bref, les informations recueillies ont montré que le rendement des cultures en milieu hydroponique est supérieur que celui en milieu traditionnel, ce qui permet de dire que l'hypothèse de départ a été valide. Cependant, il est à noter que le rendement des cultures en milieu hydroponique peut être affecté par le type de culture.

PARTIE II : UTILISATION D'EAU

Au niveau de l'utilisation d'eau, l'étude menée par *Barbosa et al.* a montré que l'agriculture traditionnelle nécessite environ 250 ± 25 litres d'eau par kg de laitues produites par an tandis que l'hydroponie emploie $20 \pm 3,8$ litres d'eau par kg de laitue produite par an (2015), ce qui implique que l'agriculture traditionnelle utilise 12,5 fois plus d'eau que l'agriculture en milieu hydroponique. Autrement dit, l'hydroponie utilise 92% moins d'eau que l'agriculture conventionnelle. (Voir figure 10)



Une plus petite mesure obtenue en hydroponie signifie que les milieux de culture hydroponiques utilisent l'eau de façon plus efficace par rapport aux milieux traditionnels même si la consommation d'eau d'une plante de laitue en milieu hydroponique est la même qu'une culture placée dans le sol. En effet, l'agriculture traditionnelle pratiquée en Arizona utilise la méthode d'irrigation à la raie qui consiste à amener l'eau aux cultures par une série plus ou moins dense de petits fossés à ciel ouvert à pente faible, mais régulière. (Namane, 2009) Or, cette méthode entraîne l'évaporation de l'eau et sa percolation qui est le passage de l'eau à travers un milieu plus ou moins perméable. En agriculture traditionnelle, ce phénomène cause le mouvement descendant de l'eau dans le sol. Quand l'eau dépasse la portée des racines des cultures, elle ne peut plus être absorbée. L'Agence internationale de l'énergie atomique estime que l'efficacité de l'utilisation d'eau en

agriculture traditionnelle dans de nombreux pays est inférieure à 50 % (s.d.), ce qui explique en partie l'écart entre les données obtenues en hydroponie et en agriculture traditionnelle. Une irrigation plus efficace et cernée peut donc potentiellement faire abaisser l'utilisation d'eau par la méthode traditionnelle. Concernant les milieux hydroponiques, l'eau est acheminée directement à la racine des laitues, ce qui évite une telle perte d'eau. Enfin, les données des sites internet, des littératures et des vidéos YouTube ont permis d'établir une économie d'eau moyenne de 91%. (Voir tableau 3)

Selon *Arizona Department of Water Resources (ADWR)*, l'état d'Arizona utilise en moyenne 7,1 millions acre-pieds (1 acre-pied=1233.48m³) d'eau et 69% de cette consommation d'eau est utilisée en agriculture (Barbosa et al., 2015), ce qui correspond à 4,9 millions acre-pied d'eau. Selon la moyenne obtenue dans le tableau 3, 4,5 millions acre-pied d'eau pourrait être économisée chaque année en Arizona si l'hydroponie remplaçait la méthode traditionnelle et que la méthode traditionnelle était la seule méthode pratiquée avant ce remplacement. Or, il faut savoir que les méthodes agricoles pratiquées par l'état d'Arizona ne se limitent probablement pas qu'à l'agriculture traditionnelle et que d'autres techniques agricoles peuvent aussi contribuer à réduire l'utilisation d'eau. Ainsi, il vaut mieux recenser les méthodes agricoles employées par l'état d'Arizona afin de calculer l'économie exacte en eau par l'hydroponie par rapport à l'agriculture traditionnelle.

Bref, l'hypothèse de départ (90%) a été assez proche comparativement aux résultats obtenus dans cette recherche (91%), ce qui permet de dire que l'hydroponie est plus efficace que l'agriculture traditionnelle en termes de l'utilisation d'eau.

Tableau 3 : Économie d'eau en pourcentage par l'hydroponie selon les sources

Source	Barbosa <i>et al.</i> (2015)	Camille Boyan (2020)	USA TODAY life (2019)	Université de Nevada (2015)
Économie d'eau (en pourcentage)	92%	90%	90%	90%
Moyenne : 91%				

PARTIE III : UTILISATION D'ÉNERGIE

Quant à l'utilisation d'énergie, pour un total de $90\,000 \pm 11\,000$ kilojoules par kilogramme de laitues produites par an, l'énergie utilisée en hydroponie est employée dans trois systèmes principaux : le système de climatisation ($74\,000 \pm 10\,000$ kJ/kg/an), le système d'éclairage artificiel ($15\,000 \pm 2100$ kJ/kg/an) et le système de pompe qui permet à la circulation d'éléments nutritifs (640 ± 120 kJ/kg/an). Le total de l'énergie utilisée en agriculture traditionnelle est de 1100 ± 75 kJ/kg/an duquel 330 ± 20 kJ/kg/an est lié à l'utilisation d'énergie fossile et 760 ± 74 kJ/kg/an est lié à l'énergie utilisée pour pomper l'eau souterraine. (Barbosa *et al.* 2015) (Voir figure 11) Ainsi, l'utilisation d'énergie en hydroponie a été de 82 fois plus élevée qu'en agriculture traditionnelle.

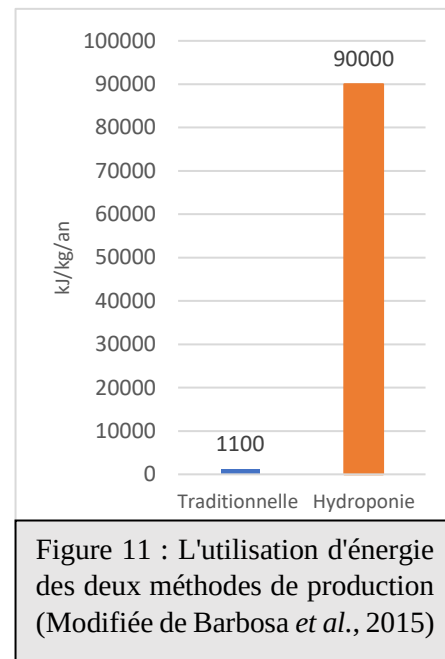


Figure 11 : L'utilisation d'énergie des deux méthodes de production (Modifiée de Barbosa *et al.*, 2015)

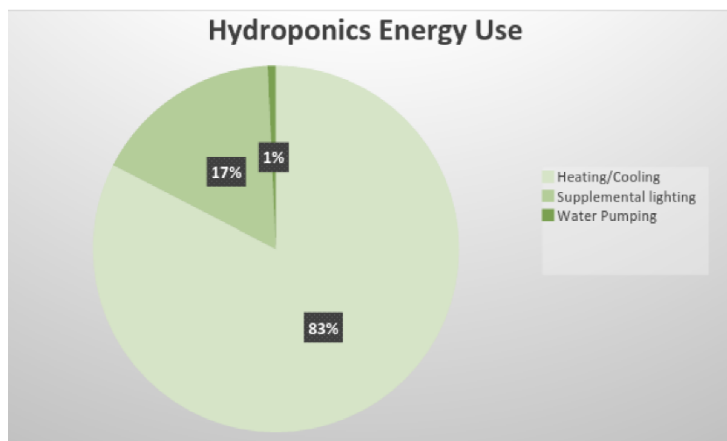


Figure 12 : Utilisation d'énergie en pourcentage par trois composantes d'une installation hydroponique par rapport à l'énergie totale utilisée (Modifiée de Duston, 2015)

L'utilisation d'énergie en hydroponie est plus grande qu'en milieu de culture traditionnel. D'abord, selon la figure 12, la plus grande partie de l'utilisation d'énergie provient du système de climatisation qui doit assurer une température idéale pour la croissance des laitues iceberg. Cela est dû à la température extérieure de l'emplacement de la serre. En effet, le lieu expérimental choisi par Barbosa *et al.* se situe dans la région de Yuma, en Arizona, qui a une température moyenne de 34,7 °C en été et 14,1°C en hiver. (Barbosa *et al.*, 2016)

Tableau 4 : Utilisation d'énergie (en %) selon la température moyenne (en °C) mensuelle en Arizona (Barbosa *et al.*, 2016)

Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Average Temperature (°C)	14.8	16.6	19.6	22.8	27.4	31.7	34.7	34.6	31.7	25.3	18.7	14.1
Percent Energy Demand	12%	8%	6%	1%	5%	10%	14%	14%	10%	2%	6%	13%

Dans le tableau 4, il est possible de constater que le pourcentage d'énergie totale utilisée augmente quand la température extérieure s'éloigne de 23,9°C (température idéale pour la croissance des laitues). Ainsi, il est possible de dire qu'une serre consommerait moins d'énergie si elle était située dans une région où la température locale est plus proche de la température requise pour les cultures qui se trouvent dans la serre. En effet, pour certains lieux dont le climat est doux, il n'est pas nécessaire d'avoir recours au système de climatisation, qui pourrait plutôt être remplacé par un système de ventilation, ce qui permet de réduire la quantité d'énergie consommée. (Barbosa, 2016) Il est donc aussi possible de remarquer que la faisabilité d'une culture hydroponique dépend du climat local.

La seconde plus grande demande en énergie est celle provenant d'éclairage artificiel. Il a pour but de maximiser la production de laitues tout au long de l'année. Quelques systèmes hydroponiques utilisent l'éclairage artificiel pour créer une photopériode de 24h (Barbosa *et al.*, 2016) alors que d'autres n'utilisent l'éclairage artificiel que pendant quelques heures. Dans le cadre de l'étude menée par Barbosa *et al.*, il a été supposé qu'un rendement maximal est voulu et qu'aucun compromis au niveau d'énergie n'a été effectué même si une partie du besoin énergétique de la plante est fournie par l'éclairage naturel. (Barbosa *et al.*, 2016) De plus, il y a certains systèmes hydroponiques qui ne visent pas un rendement maximal. C'est le cas des systèmes hydroponiques non-circulant et des systèmes hydroponiques présents dans des serres de petite échelle. Pour ces pratiques, la consommation d'énergie due à l'éclairage artificiel peut même être omise du bilan énergétique (Barbosa *et al.*, 2016), car la lumière du soleil ou l'éclairage domestique (éclairage destiné au maintien de l'activité humaine) suffit pour faire croître les cultures. Par exemple, dans le cadre de la partie expérimentale exposée plus loin, aucun éclairage artificiel destiné uniquement à la croissance des plantes n'a été fourni aux cultures de haricot nain et les seules sources d'énergie sont la lumière naturelle et l'éclairage domestique.

Bref, il est possible de conclure que les systèmes hydroponiques utilisent généralement plus d'énergie que les pratiques traditionnelles, mais cette utilisation dépend des choix de production du cultivateur tels que : l'espèce de plante cultivée, le choix d'équipements (éclairage et chauffage) et de la localisation du projet hydroponique.

Le tableau 5 présente la performance des deux méthodes de productions au niveau des trois aspects comparés.

Tableau 5 : Performance des deux méthodes de productions au niveau des trois aspects comparés

Paramètres de production Méthodes de production	Rendement (kg/m ² /ans)	Utilisation d'eau (L/kg/ans)	Utilisation d'énergie (kJ/kg/ans)
Agriculture traditionnelle	3,9±0,21	250±25	1100±75
Hydroponie (NFT)	41±6,1	20±3,8	90 000±11 000

(Modifié de Barbosa *et al.*, 2015)

Le nombre après le signe « ± » présente l'écart type

PARTIE EXPÉRIMENTALE

BUT

- Démontrer l'importance des nutriments dans le milieu de culture d'une plante en comparant la croissance d'une plante cultivée dans une solution nutritive (plante A) à celle d'une plante cultivée dans de l'eau plate, sans nutriments (plante B).
- Comparer la croissance d'une plante cultivée en milieu hydroponique (plante A) à celle d'une plante cultivée dans la terre (plante C).

MATÉRIEL

- 2 réservoirs de 2 L
- 2 paniers hydroponiques
- 1 pot à fleur en plastique de 1 L
- 3 pastilles de tourbe
- Sac de graines d'haricot nains *Mckenzie*
- Sac de nutriments *Jiffy Hydro*
- Eau
- 1 galon en plastique de 4 L
- 1 bac transparent avec couvercle
- Sac de terre
- Sac de billes d'argile
- Règle

MÉTHODE

Germination de la plante

Les 3 pastilles de tourbe ont été déposées dans le bac transparent. Les pastilles ont ensuite été arrosées avec de l'eau jusqu'à ce qu'elles en soient bien imbibées. Après quelques minutes de repos, de petits trous au centre de chaque pastille de tourbe ont été creusés. Dans chaque trou, 2 graines d'haricot ont été déposées. Les trous ont ensuite été refermés avec de la tourbe provenant des pastilles. Le bac a été refermé grâce à son couvercle et il a été placé dans un endroit humide, peu ensoleillé et chaud (au-dessus d'une source de chaleur).

Préparation de la solution nutritive hydroponique

4L d'eau ont été insérés dans le galon. Puis, 6mL de nutriments *Jiffy Hydro* (l'équivalent d'une cuillère à thé) y ont été ajoutés. Le contenu a ensuite été bien mélangé.

Plantation de la première plante dans un système hydroponique (1^{ère} pastille de tourbe)

Un panier hydroponique a été placé dans l'ouverture d'un réservoir. Le réservoir a ensuite été rempli de solution nutritive de façon à ce que la solution touche à peine l'extrémité du panier hydroponique. La quantité d'eau (solution) utilisée a été notée dans le tableau 6 des résultats. Une fois que les graines de la 1^{ère} pastille de tourbe ont germées, les plantules qui s'y trouvaient ont été retirées, puis, une seule d'entre elles a été rincée, mesurée (les mesures de la longueur de la tige et de celle des racines ont été notées dans les tableaux 7 et 9 des résultats) et placée dans le panier hydroponique de manière que les racines dépassent du panier et touchent la solution nutritive. Afin de permettre à la plantule de rester en place, le panier hydroponique a été rempli de billes d'argiles. Puis, le semi a été déposé dans un milieu ensoleillé afin de s'y développer pendant quelques jours. Grâce à une surveillance quotidienne, le niveau de la solution nutritive dans le réservoir a été réajusté toutes les fois que celui-ci était trop bas (il fallait faire attention à ce que ce niveau ne soit ni trop bas, ni trop haut). À chaque semaine, la longueur de la tige a été mesurée et notée dans le tableau 7 des résultats. Puis, à la 6^e semaine, les mesures finales ont été prises.

Plantation de la deuxième plante dans l'eau (2^e pastille de tourbe)

Un panier hydroponique a été placé dans l'ouverture d'un réservoir. Le réservoir a ensuite été rempli d'eau de façon qu'elle touche à peine l'extrémité du panier hydroponique. La quantité d'eau utilisée a été notée dans le tableau 6 des résultats. Une fois que les graines de la 2^{ème} pastille de tourbe ont germées, les plantules qui s'y trouvaient ont été retirées, puis, une seule d'entre elles a été rincée, mesurée (les mesures de la longueur de la tige et de celle des racines ont été notées dans les tableaux 7 et 9 des résultats) et placée dans le panier hydroponique de manière que les racines dépassent du panier et touchent l'eau. Afin de permettre à la plantule de rester en place, le panier hydroponique a été rempli de billes d'argiles. Puis, le semi a été déposé dans un milieu ensoleillé afin de s'y développer pendant quelques jours. Grâce à une surveillance quotidienne, le niveau de l'eau dans le réservoir a été réajusté toutes les fois que celui-ci était trop bas (il fallait faire attention à ce que ce niveau ne soit jamais ni trop bas, ni trop haut). À chaque semaine, la longueur de la tige a été mesurée et notée dans le tableau 7 des résultats. Puis, à la 6^e semaine, les mesures finales ont été prises.

Plantation de la troisième plante dans la terre (3^e pastille de tourbe)

Une fois que les graines de la 3^{ème} pastille de tourbe ont germées, les plantules qui s'y trouvaient ont été retirées, puis, une seule d'entre elles a été rincée, mesurée (les mesures de la longueur de la tige et de celle des racines ont été notées dans les tableaux 7 et 9 des résultats) et placée dans un pot à fleur en plastique. Le pot a ensuite été rempli de terre et de restants de tourbe avant d'être placé dans un milieu ensoleillé. La plantule a été arrosée avec de l'eau tous les 7 jours (la quantité d'eau utilisée à chaque semaine a été notée dans le tableau 6 des résultats) et la longueur de sa tige a été mesurée et notée dans le tableau 7 des résultats à chaque semaine. Puis, à la 6^e semaine, les mesures finales ont été prises.

Mesures finales

Pour effectuer les mesures finales, chaque plante a été retirée de son milieu (terre, solution nutritive et eau). Elles ont été rincées de façon à ce qu'il ne reste aucun résidu. Puis, leur tige et leur racine ont été mesurées et notées dans les tableaux 7 et 9 des résultats. Le nombre de fruit contenu sur chaque plante ainsi que les observations ont également été notés.

RÉSULTATS

Tableau 6 : Utilisation d'eau (en L) selon le milieu de culture

Eau utilisée (L)			
Plante Semaine	Plante A (Milieu hydroponique)	Plante B (Milieu en eau plate)	Plante C (Milieu traditionnel)
1	1	1	0,15
2			0,15
3			0,15
4			0,15
5			0,15
6			0,15

Tableau 7 : Longueur de la tige des plantes A, B et C (en mm) en fonction du nombre de semaines écoulées depuis la germination

Longueur de la tige (mm)			
Plante Semaine	Plante A (Milieu hydroponique)	Plante B (Milieu en eau plate)	Plante C (Milieu traditionnel)
1	300	350	370
2	315	360	385
3	340	377	400
4	360	385	440
5	390	395	465
6	410	413	480

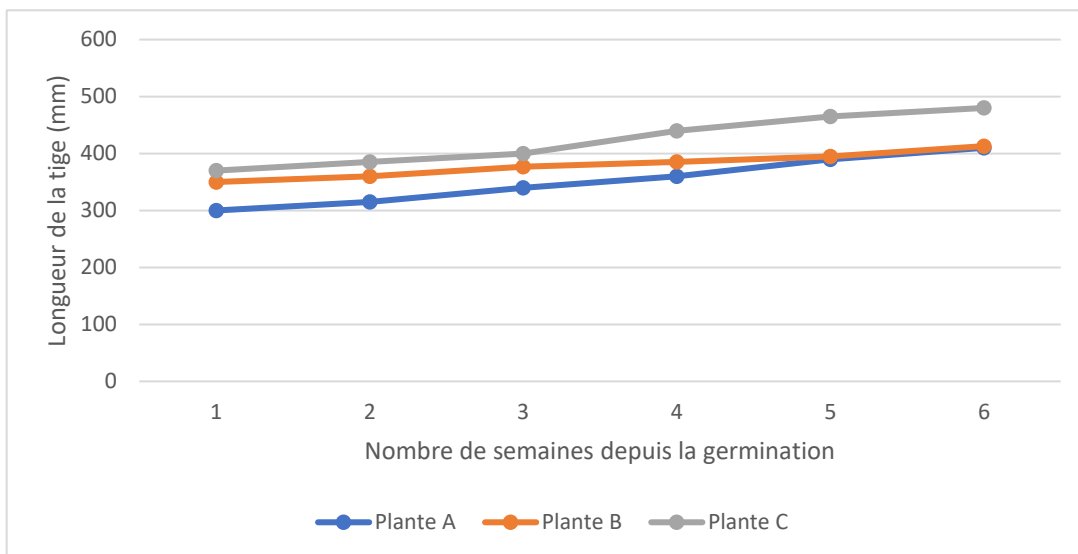


Figure 13 : Longueur de la tige des plantes A, B et C (mm) en fonction du nombre de semaines écoulées depuis la germination

Tableau 8 : Variation de la longueur de la tige (mm) des plantes A, B et C en 6 semaines

Variation de la longueur de Δl la tige (mm)			
	Plante A	Plante B	Plante C
Δl	110	63	110

Tableau 9 : Longueur des racines des plantes A, B et C (en mm) en fonction du nombre de semaines écoulées depuis la germination

Longueur des racines (mm)			
Plante \ Semaine	Plante A (Milieu hydroponique)	Plante B (Milieu en eau plate)	Plante C (Milieu traditionnel)
1	70	100	95
6	224	250	245

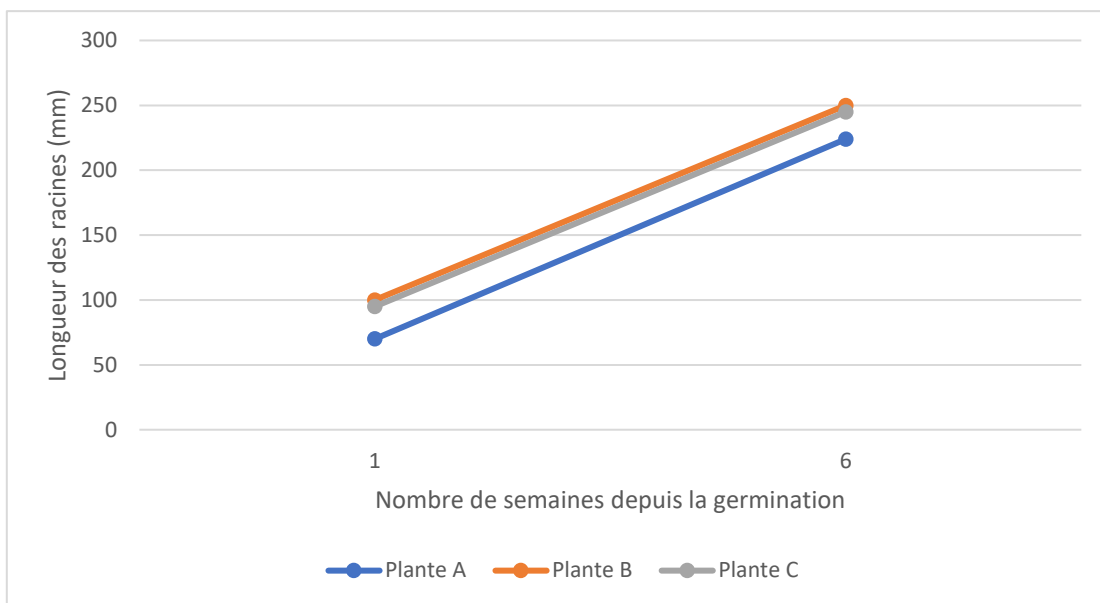


Figure 14 : Longueur des racines des plantes A, B et C (mm) en fonction du nombre de semaines écoulées depuis la germination

Tableau 10 : Variation de la longueur de la tige (mm) des plantes A, B et C en 6 semaines

	Variation de la longueur de (Δl) des racines (mm)		
	Plante A	Plante B	Plante C
Δl	154	150	150

Observations :

Plante A :

- Les feuilles sont très grandes et vertes.
- Quatre fruits (haricots nains) ont poussé.
- Le poids des haricots a fait courber la plante
- Au bout de six semaines, la plante a absorbé environ un quart de de la solution nutritive versée initialement dans le récipient

Plante B :

- Les feuilles sont peu nombreuses, très petites, jaunâtres et fades.
- Il n'y a aucun fruit.
- Les racines sont raides.

Plante C :

- Les feuilles de sont de taille moyenne et vertes.
- Un fruit (haricot nain) a poussé.
- La tige est courbée

DISCUSSION

Selon les résultats de cette expérience, en six semaines, la plante A (celle qui a poussé en milieu hydroponique) a grandi de 11 cm, la plante B (celle qui a poussé dans l'eau plate) a grandi de 6,3 cm et la plante C (celle qui a poussé dans la terre) a grandi de 12 cm. Ainsi, les plantes A et C ont eu une croissance assez similaire, tandis que la plante B a peu poussé. La croissance retardée de la plante B est expliquée par le manque de nutriments dans son milieu. En effet, comme décrit précédemment, les nutriments sont essentiels au développement végétal. Or, l'eau plate ne contenant pas nutriments, le milieu n'a pu combler les besoins nutritionnels de la plante B, ce qui fait que cette dernière n'a pas pu croître correctement. D'ailleurs les observations sur l'allure de la plante reflètent bien la carence nutritionnelle qu'elle a subi. Effectivement, le fait que les feuilles sont petites, peu nombreuses, fades et jaunes sont des signes de carence en azote. Cet élément est fondamental pour le développement végétal. Il est le principal constituant de la chlorophylle et des protéines, et il stimule la croissance des plantes. Ainsi, le manque d'azote explique le petit format et la couleur jaunâtre des feuilles de la plante B ainsi que sa croissance retardée. De plus, le fait que la plante B ne porte aucun fruit est une conséquence de la carence en phosphore, puisque cet élément favorise le développement et la maturation des fruits. Son manque explique donc l'absence d'haricots. Pour ce qui est des racines de la plante B, leur taille semble normale (alors que la plante A a des racines de 22,4 cm, celles de la plante B sont de 25,0 cm). Néanmoins, sachant que le milieu de croissance de cette plante est très pauvre en nutriment, la taille racinaire peut être expliquée par le fait que la plante est «à la recherche» de nutriments dans l'eau et que, pour ce faire, elle a besoin d'étendre ses racines afin qu'elles

aient une plus grande surface de contact et donc de plus grandes chances d'atteindre des nutriments. Bref, en raison du manque de nutriments dans le milieu de culture de la plante B, cette dernière a eu une mauvaise croissance. Cela vient ainsi démontrer l'importance de la présence des nutriments dans le milieu de culture d'un végétal.

En comparant la plante A et la plante C, on s'aperçoit que la tige ainsi que les racines de chacune des deux plantes ont poussé approximativement de la même longueur. En effet, les deux tiges ont poussé de 11cm. De plus, les racines de la plante A ont poussé de 15,4 cm tandis que celles de la plante C, 15,0 cm, ce qui fait une différence de seulement 0,4 cm (il s'agit d'une différence négligeable compte tenu de l'incertitude de l'instrument qui sera discuté plus loin). Ainsi, il est difficile de déterminer laquelle des deux plantes a une plus grande croissance. L'analyse des observations de chacune des plantes est donc requise. D'abord, alors que la plante A possède des feuilles vertes de très grande taille, celles de la plante C sont également vertes, mais de taille moyenne. Cette couleur verte qui caractérise les feuilles des plantes montre que chacune d'elle est en présence d'une bonne quantité de nutriments, dont l'azote (contrairement à la plante B). La différence entre les tailles des feuilles montre que la plante A a eu croissance meilleure que la plante C. Cela peut être expliqué par le fait que la quantité de nutriments présents dans la solution nutritive est plus appropriée que celle dans la terre, ce qui est logique puisque cette quantité a été déterminée et décidée de façon à ce qu'elle convienne aux plantes par la compagnie *Jiffy Hydro*. De surcroît, en six semaines, la plante A a produit quatre fruits, alors que la plante C en a produit seulement un. Cela constitue un rendement quatre fois supérieur pour la plante A. Bref, le milieu hydroponique serait plus efficace que le milieu de culture traditionnel (terre).

Pour ce qui est de l'utilisation d'eau, la plante A en a nécessité 1L durant les six semaines, alors que la plante C en a nécessité 0,15/semaine, ce qui fait un total de 0,9L pour six semaines (0,1L de moins que la plante A). Cependant, au cours de cette période, le montage hydroponique n'a pas eu besoin de remplissage, car la quantité de solution nutritive consommée par la plante, lors de ces six semaines, n'a été que d'environ le quart du volume initial, c'est-à-dire 0,25L (il reste ainsi environ 0,75L de solution dans le récipient). Sachant que le remplissage sera nécessaire lorsque le niveau de la solution atteindra 0,25 L, il faudra donc attendre encore environ 12 semaines avant que le récipient nécessite un remplissage. Selon cette estimation, il faudra faire un remplissage du système hydroponique au minimum à la 18^e semaine suivant la germination des plantes. Il ne faut pas oublier que lors d'un remplissage, le niveau de la solution ne doit pas dépasser la moitié du volume initiale afin d'éviter de noyer les racines aériennes nouvellement développées. La quantité d'eau nécessaire à un remplissage peut donc être estimée à 0,25 L toutes les 6 semaines. Quant à la plante C, celle-ci nécessite un arrosage d'eau régulier de 0,15 L par semaine. Ainsi, au bout de la 7^e semaine, la quantité d'eau utilisée pour la plante C sera supérieur à celle qui a été versée initialement pour la plante A. Selon les prévisions, à long terme, la plante A consommera beaucoup moins d'eau que la plante C.

Voici donc l'extrapolation des données recueillies par rapport à la consommation d'eau des plantes A et C :

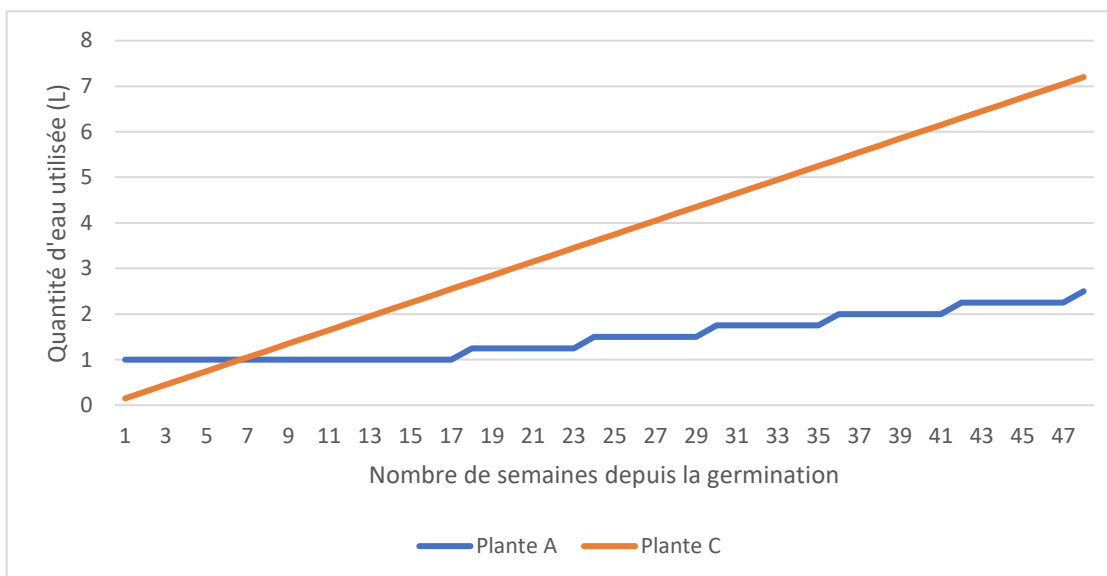


Figure 15 : Quantité d'eau utilisée (L) en fonction du nombre de semaines écoulées depuis la germination

Ainsi, les résultats de cette expérience correspondent à l'hypothèse et aux données théoriques : l'hydroponie serait une méthode de culture plus efficace (par rapport au rendement et à l'utilisation d'eau) que la méthode conventionnelle de culture en terre. Néanmoins, bien que ces résultats semblent justes, quelques sources d'erreurs sont à considérer. D'abord, l'instrument utilisé pour effectuer les mesures, soit une règle de 30 cm, possède une incertitude de $\pm 0,05$ cm ($\pm 0,5$ mm) dont il faut tenir compte. En raison de cela, les mesures ne sont pas exactes, puisqu'elles renferment une marge d'incertitude non négligeable. En outre, ces dernières sont assez approximatives, puisque les surfaces à mesurer (tiges et racines) ne sont pas droites, lisses et régulières. Les tiges de la plante A et C sont en effet tordues et courbées à cause du poids des haricots qui tend à faire pencher la plante vers le bas. Il était donc difficile de mesurer la longueur réelle de la tige. Les longueurs des racines sont également approximatives, car toutes les racines ont une taille différente. Il fallait donc mesurer la taille moyenne de toutes les racines. Or, certaines d'entre elles avaient une longueur aberrante par rapport aux autres (souvent, une racine était plus grande que la moyenne). Par conséquent, la longueur moyenne des racines a été mesurée de manière imprécise. Bien que les mesures quantitatives ne soient pas exactes, elles représentent bien les longueurs approximatives des plantes, ce qui est suffisant pour comparer leur croissance. D'ailleurs, l'étude des résultats qualitatifs, c'est-à-dire des observations, constitue un autre moyen de comparer la croissance végétale. Ce moyen est très fiable puisque qu'il ne présente

aucune source d'erreur. Ainsi, malgré l'incertitude des mesures quantitatives, on peut se fier sur les résultats qualitatifs.

Une autre source d'erreur réside dans le fait les graines utilisées dans le cadre de l'expérience peuvent avoir subi des mutations génétiques. Effectivement, il est tout à fait possible que les résultats obtenus ne soient que le reflet du bagage génétique de la graine, qui serait différente des autres. Par exemple, si la plante A a produit plus de haricots que les autres plantes, c'est peut-être en raison d'une mutation qui a fait en sorte que la plante soit portée à produire des fruits plus facilement que la normal et non pas en raison du milieu dans lequel elle se trouve. Ainsi, pour pouvoir repérer et éviter les erreurs dues aux aberrations génétiques, il aurait fallu produire des réplicas, c'est-à-dire planter plusieurs plantes par milieu. Dans ce cas, il serait facile de repérer une plante anormale. Les résultats seraient également plus fiables, puisqu'il s'agirait d'une moyenne des résultats de chaque plante.

Finalement, le temps d'observation (six semaines) constitue une autre source d'erreur, puisqu'il s'agit d'un temps relativement court. Il est possible que ce laps de temps ne soit pas suffisant pour observer certains événements. Par exemple, peut-être que la plante C produira des fruits rapidement lors des prochaines semaines et que la quantité de haricots sur cette plante dépassera celle sur la plante A. Il aurait donc été préférable d'allonger la période d'observation à au moins 53 jours, ce qui représente le temps estimé pour que les plantes de haricot atteignent leur maturité et produisent leurs fruits.

CONCLUSION

Finalement, la composante théorique de ce projet permet de conclure que l'hydroponie peut permettre un rendement supérieur à celui de l'agriculture traditionnelle (jusqu'à 91% plus de récolte) ainsi qu'une utilisation moindre d'eau (jusqu'à 92% moins d'eau). Pour ce qui est de l'utilisation d'énergie, bien qu'elle soit très variable, cette dernière est généralement plus élevée lorsqu'on pratique l'hydroponie (jusqu'à 99% plus d'énergie qu'en méthode traditionnelle). La composante expérimentale de ce projet a également permis de démontrer que le rendement d'une culture hydroponique est supérieur à celui d'une culture mise en terre, alors que sa consommation d'eau est inférieure à celle de la culture en milieu conventionnel. L'hypothèse a donc été vérifiée, puisque, comme prédis, le rendement et la consommation énergétique d'un système hydroponique sont supérieurs à ceux d'un système traditionnel alors que sa consommation d'eau en est inférieure. Les résultats théoriques et expérimentaux de ce projet permettent donc de répondre à son but : l'hydroponie pourrait bel et bien constituer une alternative à l'agriculture traditionnelle. Malgré une haute demande énergétique, cette méthode de culture sans terre permet une plus grande production agricole tout en utilisant une quantité d'eau moindre, ce qui fait de l'hydroponie une technique de culture plus efficace. Bref, étant donné qu'il existe une variabilité au niveau du rendement et de l'utilisation d'énergie, l'évaluation de la faisabilité d'un système hydroponique peut également différer d'un site à un autre. Une recherche dans le domaine de l'énergie renouvelable peut rendre les pratiques hydriques plus accessible et durable.

ANNEXE I - MATÉRIELS UTILISÉS POUR LA RÉALISATION DE LA PARTIE EXPÉRIMENTALE



Figure 16 : Sac de haricots
McKenzie



Figure 17 : Sac de nutriments
Jiffy Hydro Nutrients

ANNEXE II - MONTAGE EXPÉRIMENTAL



Figure 18 : Montage réalisé pour les plantes A et B (milieux hydroponiques)



Figure 19 : Montage réalisé pour la plante C (milieu traditionnel en terre)

ANNEXE III – RÉSULTATS : PHOTOGRAPHIE DES PLANTES



Figure 20 – Photographies de la plante A à la 6^e semaine



Figure 21 – Photographies de la plante B à la 6^e semaine



Figure 22 – Photographies de la plante C à la 6^e semaine

BIBLIOGRAPHIE

- Alloprof. (s.d.). «La croissance des végétaux», En ligne, consulté le 15 avril 2021. [<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-croissance-des-vegetaux-s1225>]
- Banerjee, C. (2013). Up, Up and Away! The economics of vertical farming. *Journal of Agricultural Studies*, 2, 40-60.
- Benton Jones Jr., J. *Hydroponics A Practical Guide for The Soilless Grower*. (s.d.). «Nutrient solutions Hydroponic systems Soilless culture systems Hydroponic Cropping», En ligne, consulté le 21 avril 2021. [[file:///C:/Users/lisab/Downloads/Hydroponics-A-Practical-Guide-for-the-Soilless-Grower-PDFDrive-%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/lisab/Downloads/Hydroponics-A-Practical-Guide-for-the-Soilless-Grower-PDFDrive-%20(1).pdf)]
- Blog Oleo-Mac. (s.d.). «La photosynthèse : sujet d'étude pour l'avenir», En ligne, consulté le 12 avril 2021. [<https://blog.oleomac.fr/la-photosynthese/>]
- Boylan, C. PSCI. (9 novembre 2020). «The future of farming : Hydroponics», En ligne, consulté le 15 avril 2021. [<https://psci.princeton.edu/tips/2020/11/9/the-future-of-farming-hydroponics>]
- Camirand, J., Gingras, C. et Chagnon, M.-C.. (2011). LA PART DU SECTEUR AGRICOLE DANS LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE. En ligne, consulté le 20 février 2021. [https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Fi11-05_GESagricoles.pdf]
- Cannaweed. (6 janvier 2011). «L'hydroponie pour les débutants!», En ligne, consulté le 15 avril 2021. [<https://www.cannaweed.com/guides/avant-la-cultu/hydroponie/lhydroponie-pour-les-d%C3%A9butants-r92/>]
- Chalamet, M. LeParisien. (20 février 2020). «Dans la plus grande ferme urbaine indoor du monde à New York», En ligne, consulté le 15 avril 2021. [<https://www.leparisien.fr/economie/dans-la-plus-grande-ferme-urbaine-indoor-du-monde-a-new-york-20-02-2020-8263491.php>]
- Cultivateurenherbe. (2018). «Culture hydroponique», En ligne, consulté le 5 mars 2021. [<https://cultivateur-en-herbe.com/culture-hydroponique/>]
- Despommier, D. (2013). Farming up the city: the rise of urban vertical farms. *Forum: Science and Society*, 31, 388-389
- Duston, J.(2017). «Assessing the Potential Environmental Impacts of Controlled Environment Agriculture in Detroit and the Future of This Industry Based on Local Food Trends», En ligne, consulté le 21 avril 2021. [<https://dash.harvard.edu/handle/1/33826456>]
- Fondation Louis Bonduelle. (15 février 2018). «Hydroponie: une culture hors-sol à l'assaut des villes», En ligne, consulté le 22 mars 2021. [<https://www.fondation->]

louisbonduelle.org/2018/02/15/hydroponie-culture-hors-sol-ville/#:~:text=L'hydroponie%20entra%C3%A9ne%20une%20augmentation,aux%20cultures%20en%20pleine%20terre.&text=Elle%20consomme%20aussi%20des%20%C3%A9nergies,pour%20faire%20fonctionner%20la%20culture]

Geaseeds. (s.d.). «Comment monter une culture hydroponique, guide complet étape par étape», En ligne, consulté le 21 avril 2021. [<https://geaseeds.com/blog/fr/monter-culture-hydroponique/>]

HGTV. (9 juillet 2019). «How Long Does It Take to Grow Hydroponic Vegetables?», En ligne, consulté le 15 avril 2021. [<https://www.hgtv.com/outdoors/gardens/planting-and-maintenance/how-long-does-it-take-to-grow-hydroponic-vegetables>]

Hydrotech Hydroponics. (21 août 2020). «An introduction to indoor growing and hydroponics systems », En ligne, consulté le 12 avril 2021. [<https://hydrotechhydroponics.com/blogs/home-gardeners/an-introduction-to-indoor-growing-and-hydroponics-systems>]

IAEA. (s.d.). «Gestion de l'eau en agriculture», En ligne, consulté le 23 mars 2021. [<https://www.iaea.org/fr/themes/gestion-de-leau-en-agriculture>]

Isabelle, C. Gerbeaud. (1^{er} août 2018). «Identifier et corriger les carences en azote, phosphore, potassium», En ligne, consulté le 21 avril 2021. [<https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/carences-plantes-azote-phosphore-potassium,1543.html#:~:text=Signes%20visibles%20de%20carence%20en,Les%20tiges%20peuvent%20parfois%20rougir.>]

Jardinfute. (17 septembre 2019). «Qu'est-ce que la méthode Kratky ?», En ligne, consulté le 2 avril 2021. [<https://jardinfute.com/methode-kratky/#:~:text=La%20m%C3%A9thode%20Kratky%20est%20une,permis%20d'%C3%A9laborer%20cette%20m%C3%A9thode>]

Jardinier Autrement. (5 mars 2021.). «Les éléments nutritifs des plantes», En ligne, consulté le 25 avril 2021. [<https://www.jardiner-autrement.fr/elements-nutritifs-plantes/>]

Larousse. (s.d.). Larousse. En ligne, consulté le 8 mars 2021. [<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hydroponique/40879>]

Max. Trees. (1^{er} février 2021). «The Kratky method – Grow food the passive hydroponic way (step by step guide)», En ligne, consulté le 12 avril 2021. [<https://www.trees.com/gardening-and-landscaping/the-gratky-method>]

Mémoireonline. (2009). «Suivi des irrigations dans une exploitation agricole de la mitidja ouest commune de mouzaia», En ligne, consulté le 8 mars 2021. [https://www.memoireonline.com/10/09/2774/m_Suivi-des-irrigations-dans-une-exploitation-agricole-de-la-mitidja-ouest-commune-de-mouzaia3.html]

Omaye, S. University of Nevada Reno. (2015). «Hydroponics : A brief guide to growing food without soil», En ligne, consulté le 2 avril 2021.

[<https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=2756>]

Ramadan, M. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. (s.d.). «La culture en serre : plein sol ou hors sol?», En ligne, consulté le 16 avril 2021.

[https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/articles/production/Pages/Culture_e_n_serre_plein_sol_ou_hors_sol.aspx]

ResearchGate. (s.d.). «Dynamic simulation of supplemental lighting for greenhouse hydroponic lettuce production», En ligne, consulté le 15 avril 2021.

[https://www.researchgate.net/publication/334468975_DYNAMIC_SIMULATION_OF_SUPPLEMENTAL_LIGHTING_FOR_GREENHOUSE_HYDROPONIC_LETTUCE_PRODUCTION]

Royal Queen Seeds. (11 juillet 2019). «Comment un système hydroponique à débit continu peut vous aider?», En ligne, consulté le 22 avril 2021.

[<https://www.royalqueenseeds.fr/blog-comment-un-systeme-hydroponique-a-debit-continu-peut-vous-aider--n1215#:~:text=Un%20syst%C3%A8me%20hydroponique%20%C3%A0%20d%C3%A9bit%20continu%20fait%20circuler%20de%20l,les%20m%C3%A9thodes%20de%20culture%20traditionnelles>]

Rurallivingtoday. (s.d.). «Rural Living Gardening, Hydroponics, Generators», En ligne, consulté le 15 avril 2021.

[<https://rurallivingtoday.com/hydroponics/what-cannot-be-grown-hydroponically/>]

The United Nation. (21 juin 2017). «World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100 », En ligne, consulté le 19 février 2021.

[<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html>]

WikiHow. (s.d.). «Comment calculer un pourcentage de variation», En ligne, consulté le 22 avril 2021.

[<https://fr.wikihow.com/calculer-un-pourcentage-de-variation>]

Wikipédia. (18 avril 2021). «Vertical farming», En ligne, consulté le 16 avril 2021.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_farming]

Wikipédia. (18 septembre 2020). « Agriculture intensive », En ligne, consulté le 8 mars 2021.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Agriculture_intensive]

Wikipédia. (4 février 2021). «Ferme verticale», En ligne, consulté le 16 avril 2021.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Ferme_verticale]

Wikipédia. (8 septembre 2020). «Percolation», En ligne, consulté le 16 avril 2021.
[<https://fr.wikipedia.org/wiki/Percolation>]

Youst, B. Upstart University. (6 mars 2019). «How to start growing with the Kratky method», En ligne, consulté le 12 avril 2021.
[<https://university.upstartfarmers.com/blog/kratky-method>]