

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجيلالي بونعامة - خميس مليانة
Université Djillali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre
Département des Sciences Agronomiques
Spécialité : Aménagement hydro-agricole

MEMOIRE

de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme de *Master*

Thème

Optimisation du pilotage de la fertigation dans une culture hydroponique. Cas de la fraise, la laitue et la tomate

Présenté par :

FEURTAS Chaimâa

KHITER Chaima

Soumis pour évaluation le 09/11/2020, devant le jury composé de :

Mme MATENE Chahrazed Naziha	MAB	Présidente	UDB- Khemis Miliana
Mr TOUIL Sami	MCB	Promoteur	UDB- Khemis Miliana
Mme KARAHACANE Hafsa	MAA	Examinatrice	UDB- Khemis Miliana

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions infiniment Dieu le plus Grand Puissant qui nous a aidées mettre une empreinte de réussite dans la vie, et d'être aujourd'hui devant le corps professoral de l'université.

Nous remercions vivement monsieur TOUIL Sami notre encadreur pour sa confiance manifeste, ses précieux conseils, sa foi dans l'action, son soutien intellectuel, et son aide dans la rédaction de notre sujet de mémoire. Et qui nous à guider durant nos années d'étude avec vaste cœur Inchallah on sera l'exemple idéal.

En tenons aussi notre gratitude aux membres du jury composé de Melle. MATEN Naziha en tant que présidente et Melle KARAHACANE Hafsa en tant qu'examinatrice. Qui ont honoré avec leurs présences chaleureuses, pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre mémoire en acceptant d'examiner notre travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Sans oublier, tout personne de près ou de loin d'avoir donné un coup de main à la réalisation de ce travail, on leurs souhaite la réussite dans tous les domaines de la vie et que dieu les protègent.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que t'avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je te remercie pour tous le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse dieu, le très haut, t'accorder santé, bonheur et longue vie.

A la mémoire de mon père

Ce travail est dédié à mon père, décédé voilà dix ans. Puisse Dieu, le Tout Puissant, l'avoir en Sa sainte miséricorde et lui garde dans Son vaste paradis.

A mes chers frères

Pour leur soutien moral et l'encouragement. Puisse dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

A ma chère petite fille

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur , **Elena** que j'adore, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès. Et que Dieu te protège.*

A ma famille et toutes les personnes que j'aime.

Feurtas Chaimàa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers, je cite :

Ma très chère mère ma source de vivre et de bonheur pour tout son amour, son dévouement, et son aide, que Dieu la protège.

Mon frère Belkacem et sa femme Amel pour leurs encouragements indéfectibles.

Mes adorables sœurs Soumia et son mari Abdelkader, Hadjer et son mari Nassim, Asma et son mari Abdelbaki pour leur soutien moral.

Mon frère Abdelmalek Taki el din je lui souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.

Mes chers petits neveux et nièces Malak, Maram, Maria, Ghofrane, Abdrahmane, Wassim et Abdelalim puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

Mon binôme Chaima qui a contribué à la rédaction de ce mémoire.

Khiter

Résumé

Notre étude porte sur la gestion de la fertigation et son impact sur les paramètres agronomiques de la croissance et de la production chez les cultures de la fraise, la laitue et la tomate conduites en hydroponie. L'expérimentation été programmée au niveau de la serre de la station expérimental de l'université Djilali Bounaama- Khemis Miliana.

La fertigation est influencée par la CE, pH et les conditions climatiques (température) qui dépendent du type de culture et son cycle de développement. Nous avons, également abordé dans ce mémoire quelques résultats des travaux de recherche récents sur l'hydroponie pour renforcer notre méthodologie de travail.

Mots clés : Hydroponie, Fertigation, Solution nutritive, Substrat, Culture hors sol.

Abstract

Our study focuses on fertigation management and its impact on the agronomic parameters of growth and production in strawberry, lettuce and tomato crops grown in hydroponics. The experiment has been programmed in the greenhouse of the experimental station of the University Djilali Bounaama - Khemis Miliana.

Fertigation is influenced by EC, pH and climatic conditions (temperature) which depend on the type of crop and its development cycle. We have also discussed in this paper some results of recent research work on hydroponics to strengthen our working methodology.

Key words: Hydroponics, Fertigation, Nutrient solution, Substrate, Soil-less culture.

ملخص

تتمحور دراستنا حول تسيير التسميد وتأثيره على المعايير الزراعية للنمو والإنتاج في محاصيل الفراولة والخس والطماطم المزروعة في الزراعة المائية. تم تحديد موعد التجربة في دفينة المحطة التجريبية لجامعة جيلالي بونعاما - خميس مليانة .

يتأثر التسميد بالتوصيل الكهربائي ودرجة الحموضة والظروف المناخية (درجة الحرارة) التي تعتمد على نوع المحصول ودورة تطوره لقد ناقشنا أيضاً في هذه الأطروحة بعض نتائج الأعمال البحثية الحديثة في الزراعة المائية لتقوية منهجية عملنا.

الكلمات المفتاحية : الزراعة المائية، التسميد، المحلول المغذي، معوضات التربة، تقنية الزراعة خارج التربة.

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
1. Définition de la culture hydroponique	02
2. Historique de la culture hydroponique	02
3. Importance de la culture hydroponique en agriculture	03
3.1 Dans le monde	03
3.2 En Algérie	04
4. L'enjeu de l'agriculture hors sol dans le développement de l'agriculture algérienne	04
5. Espèce cultivé en hydroponie	04
a. Cultures légumières sous serres	04
b. Les cultures florales	04
6. Détail des effets induits par la mise en œuvre de la technique hydroponique	04
7. Différentes modalités des systèmes de culture hydroponique	07
7.1 Types d'installations existantes	07
7.2 Système hydroponique avec et son substrat	07
A. Système hydroponique son substrat	07
1. Technique du film nutritif (N.F.T.)	07
2. Aéroponie	08
3. Aquaculture	08
4. Ultraponie	08
B. Système hydroponique avec substrat	09
1) Système goutte à goutte	09
2) Système à flux continu	10
3) Système de table à marées (Flux-reflux)	10
8. Substrats	11
8.1 Propriétés	12
8.2 Matériaux	13
8.2.1 Matériaux organiques naturels	13
8.2.2 Matériaux minéraux naturels	14
8.2.3 Matériaux minéraux artificiels ou traités	14
9. Fertigation	15
9.1 Intérêt de la fertigation	15
9.2 Composants de la fertigation	15
9.2.1 Solution nutritive	15
9.2.2 Engrais utilisés	16
9.2.3 Composition de la solution nutritive	16
a) Eléments nutritifs	16
b) Préparation de la solution mère	18
9.3 Contrôle de la solution nutritive	20

9.4	Impact de la fertigation sur l'environnement	23
10.	Irrigation	23
10.1	L'eau et la plante	24
10.2	Irrigation de précision	24
10.3	Pilotage de l'irrigation	25
II.	Production de la culture de tomate, laitue et fraisier en hydroponie	26
1.	Le cycle de développement	26
1.1	Tomate	26
1.2	La fraise	27
1.3	La laitue	28
2.	Condition de germination	29
3.	Les étapes principales de l'agriculture hors sol des cultures maraîchères et fruitière	30
3.1	Choix d'un terrain ou d'un espace	30
3.2	La préparation du terrain	31
3.3	Le semis et la pépinière	31
3.4	Le repiquage et la plantation	31
3.5	La conduite de la culture (entretien de la plantation)	32
3.6	La récolte	32
	Chapitre II : Milieu physique	
II.	Présentation générale de la zone d'étude	33
1.	Situation géographique	33
2.	Analyse du milieu physique	33
2.1.	Reliefs	34
2.2.	Hydrographie	34
2.3.	Contexte pédologique	34
2.4.	Bioclimatologie	35
3.	Paramètres climatiques	35
3.1	Précipitations	35
A.	Précipitations intra-annuelles	36
B.	Précipitations saisonnières	36
C.	Précipitations interannuelles	37
3.2	Température	38
3.3	Evaporation	39
3.4	Vent	40
3.5	Humidité relative	41
3.6	Insolation	42
4.	Synthèses bioclimatique	43
4.1	Indice d'aridité de Martonne (1926)	45
4.2	Quotient pluviométrique d'Emberger	46
4.3	Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	46
	Chapitre III : Matériel et méthode	
	Site expérimental	47
1.	Situation géographique	47

2.	Description et de la serre d'étude	47
3.	Climat dans la serre	48
3.1.	Luminosité	48
3.2.	Température	48
3.3.	Humidité	49
4.	Matériel utilisé	49
a.	Matériel végétatif	49
5.	Calcul du bilan hydrique	49
6.	Fertirrigation	51
6.1	Composants et fonctionnement du système	51
6.2	Système d'irrigation	52
A.	Calcul du réseau d'irrigation goutte à goutte (substrat)	52
7.	Besoin en eau des cultures	53
7.1	Calcul des besoins brut	53
8.	Calcul du débit spécifique et débit caractéristique	56
8.1.	Calcul du débit spécifique	56
8.2.	Evaluation du débit caractéristique	56
v	Interprétation	59
	Chapitre IV : Résultats et discussion	
	Travaux de recherche sur la culture hydroponique	61
	Conclusion générale	69
	Références bibliographiques	

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique.

CEC : Capacité d'échange cationique.

ET₀ : Evapotranspiration potentiel.

ETM: Evapotranspiration maximale.

ENSA : Ecole nationale supérieure agronomique.

FOA : Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).

INRA : Institut National de la Recherche Agricole.

INSA : Institut National des Sciences Appliquées.

ITCMI : Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielle.

K_c : Coefficient culturale.

Mo : Molybdène.

NFT : Nutrient Film Technique (technique du film nutritif).

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

pH : Potentiel hydrogène.

Ppm : Partie par million.

Ppb : Part par billion (partie par milliard).

RFU : Réserve Facilement Utilisable.

RU : Réserve Utile.

Ψ : Potentiel hydrique.

Liste des figures

<i>Figure</i>	<i>Page</i>
Figure 01: Système NFT	08
Figure 02 : Exemple de système aquaculture	09
Figure 03 : Système goutte à goutte	10
Figure 04 : Fonctionnement d'une table à marée	11
Figure 05 : Schéma d'un procédé de dessalement par osmose inverse pour la préparation de solutions nutritives destinées aux cultures hydroponiques	21
Figure06 : Graphique montrant la disponibilité des éléments nutritifs à différents niveaux de pH	23
Figure07 : Cycle d'une irrigation	26
Figure 08 : Cycle de développement de la laitue	30
Figure 09 : Carte administrative de la commune de Khemis Miliana	33
Figure 10 : Réseau hydrographique de la Plaine du Haut Cheliff	34
Figure 11 : Variations des précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau de la station de Khemis Miliana. (1981-2018	36
Figure 12 : Variations des totaux pluviométriques annuels enregistrées au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018	37
Figure 13: Variation thermométrique moyenne mensuelles de la station de Khemis Miliana (1981-2018	38
Figure 14 : Variation de l'évaporation moyenne mensuelle au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018	40
Figure 15 : Variation de vitesse moyenne mensuelle du vent au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018	41
Figure 16 : Variation de la durée de l'insolation au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018	42
Figure 17 : Position de la station de Khemis Miliana sur le climagramme pluviométrique d'Emberger	44
Figure 18 : Diagramme Ombrothermique (P=2T) de la station de Khemis Miliana (1981-2018)	45
Figure °19 : Localisation de la station expérimentale	46
Figure 20 : Dimensionnement de la serre pédagogique	47
Figure 21 : Schématisation de la méthode de calcul du bilan hydrique en fonction des éléments du système	49
Figure 22 : Schéma d'une type installation pour une production hors-sol en circuit ouvert ou fermé (Pardossi et al., 2011).	51
Figure 23 : Récapitulatif des besoins en eau des cultures sous serre	57
Figure 24 : Besoin en eau de la tomate	58
Figure 25: Besoin en eau de la laitue	58
Figure 26: Besoin en eau de la fraise	59
Figure 27 : La variation de la conductivité électrique chez les trois espèces dans les deux essais.	63

Liste des tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Page</i>
Tableau 01 : Effets positifs et négatifs induits par le système hydroponique	04
Tableau 02 : Composition chimique des plants : teneurs et rôles des principaux éléments nutritifs, symptômes de carence	16
Tableau 03 : Analyse physique des sols	16
Tableau 04 : Situation de la station météorologique de Khemis Miliana	35
Tableau 05 : Précipitations moyennes mensuelles, station de Khemis Miliana. (1981-2018	36
Tableau 06 : Répartition saisonnière des précipitations, station de Khemis Miliana (1981-2018	37
Tableau 07 : Répartition des températures moyennes mensuelles minimales et maximales au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018	38
Tableau 08 : Evaporation moyenne mensuelle (mm), station de Khemis Miliana (1981-2018	39
Tableau 09 : Moyennes mensuelles des vitesses de vent (m/s), station de Khemis Miliana (1981-2018)	40
Tableau 10 : Moyennes mensuelles du taux d'humidité relative, station de Khemis Miliana (1981-2018)	41
Tableau 11 : Insolation moyenne mensuelle, station de Khemis Miliana (1981-2018)	41
Tableau 12 : Limite des climats, l'indice climatique De Martonne	43
Tableau 13 : Précipitations et températures moyennes mensuelles (1981-2018).de la station de Khemis Miliana	44
Tableau 14 : Correspondance entre un milliéquivalent (meq) et une masse d'ion ou d'élément minéral (mg)	52
Tableau 15 : Calcul du réseau goutte à goutte	52
Tableau 16 : Besoins en eau d'irrigation de la fraise	54
Tableau 17 : Besoins en eau d'irrigation de la Laitue	54
Tableau 18 : Besoins en eau d'irrigation de la Tomate	55
Tableau 19 : Récapitulatif des besoins en eau pour la serre	55
Tableau 20 : Estimation des volumes d'irrigation	57
Tableau 21 : composition de la solution nutritive des cultures sur un substrat inerte en mmol/l et en ppm.	60
Tableau 22 : Travaux de recherche sur l'hydroponie	61

Introduction
Générale

Introduction générale

La culture de plantes hors sol est l'une des technologies modernes utilisées aujourd'hui en horticulture a également été réalisée par la culture en eau sans l'utilisation des substrats solides. Ce type de production sans sol est fréquemment appelé "hydroponie". Bien que le terme ait été inventé par Gericke (1937) pour désigner la culture de l'eau sans utiliser de substrat, actuellement le terme est utilisé pour signifier diverses choses à diverses personnes. Beaucoup utilisent le terme pour désigner des systèmes qui comprennent une sorte de substrat pour ancrer ou stabiliser la plante et pour fournir une matrice pour retenir l'eau.

La culture hydroponique est une culture dont les racines des plantes reposent dans un milieu reconstitué, détaché du sol. Le substrat, minéral ou organique, est neutre et inerte comme du sable, de l'argile ou de la laine de roche par exemple. Ce substrat peut être également d'origine industrielle. Ce milieu de culture est irrigué de façon régulière par des solutions nutritives adéquates à la plante cultivée.

La culture hors sol a remplacé progressivement la culture traditionnelle d'un certain nombre de légumes dans le monde. Dans les pays ensoleillés.

L'idée de cultiver hors sol apparaît au cours de recherches sur le rôle de l'eau, de l'air et de chacun des constituants du sol dans la fertilisation des plantes.

C'est l'unique solution lorsque le sol naturel souffre de contraintes incorrigibles (terrain rocailleux, hydromorphes, salés).

L'intérêt de la culture hydroponique est de conserver de l'eau, éviter la fatigue du sol, moins d'utilisation de produits phytosanitaires, qualité identique, croissance rapide (cycle de production végétatif courte), maximisé le rendement et disponibilité toute l'année, maîtrise de la fertigation (le contrôle de la solution nutritive).

Ce mémoire portera dans un premier temps, une synthèse bibliographique pour la description du système hydroponique. Une deuxième partie consacrée au milieu physique (Khemis Miliana), et la troisième partie est pour la description du matériel de mesure et des méthodes d'analyse utilisé dans cette étude. La dernière partie permettra d'analyser et discuter quelques résultats des travaux de recherche sur l'hydroponie, étant donné qu'il ne nous a pas été possible de procéder aux travaux de terrain en raison de la pandémie de COVID19.

Chapitre I:
Synthèse bibliographique
sur la culture
hydroponique

L'agriculture est une activité pratiquée par l'homme, depuis des milliers d'années, pour répondre à ses besoins alimentaires. Elle utilise le sol comme milieu ou substrat contenant les éléments nécessaires pour la croissance des plantes. Avec la maîtrise de cette activité grâce au progrès scientifique et technologique qu'a connu le secteur agricole, il est devenu possible de mener cette activité en utilisant autres substrats, voir sans substrats. Ainsi est née la culture hydroponique. Ce type de culture regroupe plusieurs techniques innovantes qui se différencient par le mode d'apport des éléments nutritifs dont les plantes ont besoin pour leur croissance.

1. Définition de la culture hydroponique

La culture hydroponique est une technique de production hors-sol, cela signifie que les racines des plantes cultivées ne plongent pas dans leur environnement naturel (le sol), mais dans un liquide nutritif (Morard, 1995). L'origine du mot « hydroponie » vient du grec « hydro », l'eau et de « ponos », le travail. Cette technique apparaît donc comme « le travail des racines dans l'eau » (Blanc, 1987).

Concrètement, l'alimentation minérale de la plante est assurée par une solution nutritive administrée aux racines, fournissant les éléments essentiels pour la croissance de toute plante de l'eau, l'oxygène dissous, et les éléments minéraux sont contenus dans l'eau et les engrais (sels).

Les substrats utilisés en hydroponie n'ont aucun rôle dans la nutrition des plantes (puisque'ils sont en théorie inerte). Ils ne jouent qu'un rôle de support de culture, de point d'ancrage à une plante.

Dans certaines techniques de culture le substrat est totalement absent. (cf. aéroponie, techniques définies plus loin) (Urban, 2010).

2. Historique de la culture hydroponique

Dans l'histoire de l'humanité, il y a des preuves qui montrent que l'hydroponie fut adaptée de façon différente selon les régions du monde et les peuples. La première trace d'utilisation de cette technique est le chadouf qui date de -1500 avant J.C, il apparaît en Mésopotamie mais a été amélioré et développé en Egypte. A cette époque les pluies se raréfient à cause de changements climatiques, il fallait donc s'adapter afin de

continuer à irriguer les champs. Les égyptiens bloquaient la crue du Nil, et grâce à ces chadoufs ils pouvaient irriguer leurs champs.

D'autres traces de la culture hors-sol apparaissent avec les jardins suspendus de Babylone. Les peuples vivant au bord de lacs de hautes montagnes du Pérou comme le Titicaca, cultivaient leur potager à la surface de l'eau. Les racines des plantes plongeaient dans l'eau des lacs : sans le savoir, ils étaient précurseurs d'une espèce d'aquaculture primitive.

La culture hors-sol que l'on connaît à nos jours est née au XIXe siècle en Allemagne. Elle fut découverte dans le cadre de recherches réalisées afin de découvrir de quoi se nourrissaient les plantes. Ce n'est qu'en 1930 que Gericke produisit le premier système hydroponique commercial aux Etats-Unis.

La technique du hors sol a été introduite en Europe dans les années 70 ; appliqués à quelques cultures maraichères et florales sous serres, elle s'est ensuite développée à un rythme rapide (Thiault, 2004).

En Algérie l'initiation à la culture hydroponique sur deux solanacées fruits (tomate, poivron) a pu mettre en évidence par les travaux de Djoudi et Snoussi en 1979 et 1980 respectivement (Snoussi, 1980).

3. Importance de la culture hydroponique en agriculture

3.1 Dans le monde

Les cultures hors sol se sont d'abord développées en Europe du Nord. Aux Pays-Bas en premier lieu, mais aussi en Grande-Bretagne, en Belgique et dans une moindre mesure, en Scandinavie et en Allemagne. Le développement des surfaces de culture hors sol a été plus lent dans les pays de l'Europe du sud et en Suisse. Mais ces pays commencent à combler leur retard. Fernandes (2005) évolue la surface cultivée hors sol en Europe à 13000 hectares.

Dans les autres pays, les surfaces les plus importantes sont recensées au Japon, en Israël, en Afrique du Sud et aux États-Unis, et enfin en Italie, en Espagne et en Grèce.

En particulier dans le bassin méditerranéen, et plus généralement dans les régions pénalisées par le manque d'eau ou par des défauts de qualité de l'eau (Urban, 1997).

3.2 En Algérie

La situation des cultures hydroponiques en Algérie reste peu développée malgré le grand potentiel que nous possédons pour les cultures hors sol. Qu'elle reste au stade expérimental dominé par quelques travaux de recherche. La première expérience de culture hors sol a été la mise en place d'un système hydroponique à Beni-Abbes, au Sahara. Le but de ces travaux portait exclusivement sur l'étude de substrats sableux locaux (Chouard et Renoud, 1961).

Il existe quelques travaux de recherche aux niveaux d l'INRA, l'ENSA et L'ITCMI, mais ces travaux ne sont pas exploités sur le terrain.

4. L'enjeu de l'agriculture hors sol dans le développement de l'agriculture algérienne

L'enjeu fondamental de cette agriculture est de réduire la pauvreté en milieu rural et urbain. La culture hors sol constitue une innovation en Afrique, qui lève une importante contrainte pour la diffusion de l'agriculture de précision devant occasionner la révolution verte. Cette issue augure d'une bonne perspective pour la réalisation de la sécurité alimentaire et nutritionnelle. L'agriculture hors-sol serait l'une des solutions à massivement mettre en place pour résoudre les problèmes actuels et à venir du manque d'eau, de malnutrition, de pauvreté en Afrique. Pour une agriculture saine, rentable et respectueuse de l'environnement (Snoussi, 1980).

5. Espèces cultivées en hydroponie

a. Cultures légumières sous serres

Pratiquement, toutes les plantes peuvent être conduites en culture hors sol, mais sont principalement concernés les cultures légumières et les petits fruits. L'espèce majeure est la tomate suivie de la fraise qui a connu un très fort développement, du concombre, du poivron et de l'aubergine. Aussi le melon, la courgette et la framboise (Vitre, 2013).

b. Les cultures florales

Les premiers essais remontent au début des années 80, d'abord sur œillets (à cause des fusarioses) en sacs de tourbe puis en laine de roche, puis sur gerberas et roses. Aux Pays-Bas d'abord, puis ailleurs en Europe, l'hors-sol (laine de roche et coco) se sont développés sur ces trois cultures principalement (Vitre, 2013).

6. Détail des effets induits par la mise en œuvre de la technique hydroponique

Le tableau 01 résume les aspects positifs et négatifs induits par les systèmes hydroponiques.

Tableau 01 : Effets positifs et négatifs induits par le système hydroponique

	Effets positifs	Effets négatifs
Organisation de travail	/	<ul style="list-style-type: none"> -Rigueur sanitaire obligatoire. -Réactivité immédiate au moindre problème sanitaire ou de nutrition. -Prévoir du temps pour la préparation des solutions nutritives, la surveillance en cours de culture et toutes les opérations nécessaires à la fin du cycle cultural (manipulation des substrats et du réseau de distribution de la solution nutritive). -Technicité requise importante
Économie	<ul style="list-style-type: none"> -Moins d'utilisation de produits phytosanitaires. -Pas de perte d'intrants si la solution nutritive est recyclée en hors-sol ou sur des cultures de pleine terre. -conservation de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> -Investissements variables selon le mode d'élaboration des solutions nutritives et la gestion de l'irrigation. -Investissements pour les bâtiments : exemples : 20 à 30 €/m² pour une serre en couverture plastique sans travaux ni équipement et 75 à 100 €/m² pour une serre chapelle «anticyclonique». -Risques élevés de problèmes survenant soit en cas d'erreur du planteur soit en cas de défaillance du matériel.
Agronomie	<ul style="list-style-type: none"> -Potentiel de rendement élevé. -Diminution du risque de contamination des cultures par les bio agresseurs. -Maîtrise de l'irrigation et de la fertilisation (contrôle de la nutrition) -l'accès aux racines (vérifier la santé des racines -conservation des engrais. -La culture hydroponique permet également une automatisation de la culture température, éclairage, 	/

	Contrôle du pH et de la concentration en éléments Nutritifs du liquide, ventilation. -cycle de production végétatif courte.	
Qualité des produits	-Meilleur aspect visuel dû à la « propreté » des produits récoltés. -Moins de résidus de pesticides. -À variété identique qualité gustative souvent comparable à celle des cultures de pleins champs.	/
Environnement	-Traitements phytosanitaires réduits et ciblés. -Faible mobilisation de surface dans un contexte de pression foncière.	-Consommation élevée de matériaux issus de ressources non recyclables (plastiques) et production de nombreux déchets (substrats). -Pollution par les solutions nutritives si elles ne sont pas recyclées.
Consommation d'énergie	-Pas de travail du sol.	-Consommation d'énergie électrique par les pompes de distribution.

Source : Simon et Minatchy, 2009

7. Différentes modalités des systèmes de culture hydroponique

7.1.Types d'installations existantes

Dans le futur, l'irrigation de déficit, la réutilisation des eaux usées et l'irrigation de précision seront des éléments-clés pour les systèmes d'irrigation. En culture hydroponique, la gestion précise de l'irrigation revêt une importance capitale, compte tenu du faible volume de substrat disponible pour la rétention d'eau et du fait que la culture est à l'abri de la pluie. Pour tous types d'installations nous trouvons ; circuit ouvert ou fermé :

Les installations à « solution perdue » ou en « circuit ouvert » : la solution nutritive en excédent est éliminée par drainage puis rejetée en dehors du système de culture. Mais cette solution peut être recyclée sur des cultures de pleine terre.

Les installations à « solution recyclée » ou « en circuit fermé » : la solution nutritive est récupérée, recyclée (désinfectée, analysée et reconstituée) et renvoyée aux plantes (Simon et Minatchy, 2009).

7.2. Système hydroponique avec et son substrat

A. Système hydroponique son substrat

Cette technique se rapproche le plus de ce qui se passe dans le sol pour une culture traditionnelle, par l'alternance irrigation/drainage. Dans la plupart de ces systèmes, la solution nutritive est réutilisée. En outre, le substrat assure aussi une réserve d'eau et d'éléments nutritifs, contrairement aux techniques sans substrat. Elle fait appel à un support solide qui contribue à l'oxygénation. Plusieurs systèmes de culture avec substrat sont utilisés tels que (Van Os et al., 2019).

1. Technique du film nutritif (N.F.T.)

C'est une des techniques sans substrat les plus utilisées en horticulture. Comme il est très difficile d'aérer un liquide stagnant, le milieu nutritif circule sur une faible épaisseur (une fine pellicule d'eau) sous les racines, ce qui apporte une forte oxygénation du liquide nutritif. La solution nutritive qui est envoyée dans les rigoles par une pompe située dans un réservoir s'enrichit en oxygène au niveau de la surface du film liquide grâce à son déplacement continu. L'arrosage s'effectue par ruissellement sous les racines des plantes, qui sont disposées dans une sorte de buse ou gouttière légèrement inclinée, de façon que le liquide retourne dans le réservoir après avoir été en contact avec les racines (Van Os et al., 2019).

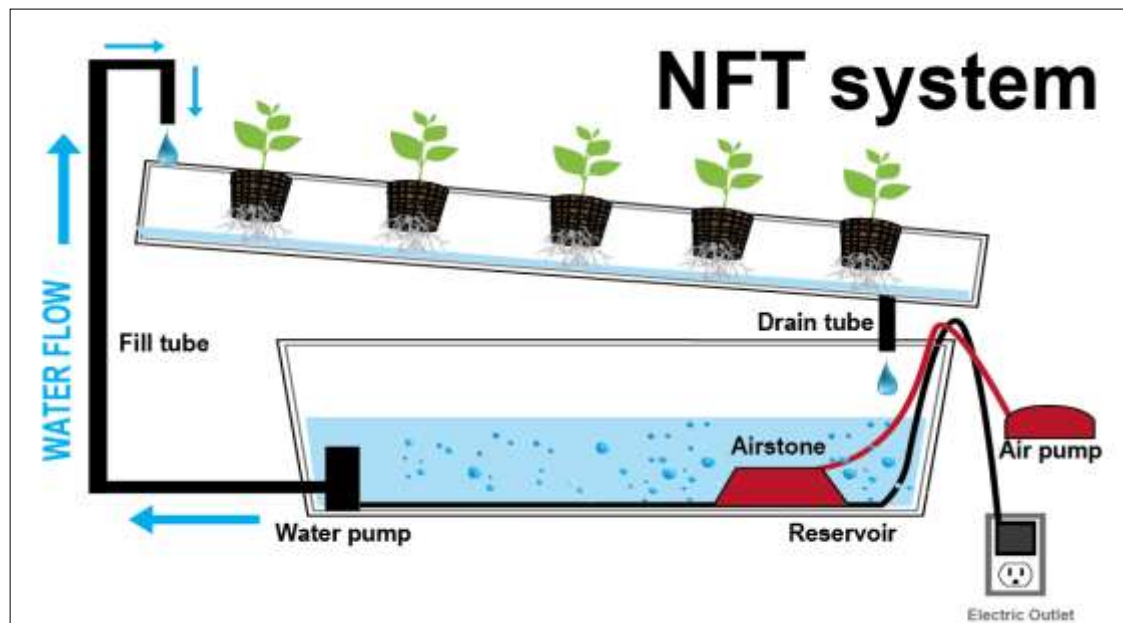


Figure 01 : Système NFT (Gilberto, 2013)

2. Aéroponie

Ces systèmes ont été développés par Jensen en Arizona pour la laitue, les épinards, même les tomates. L'aéroponie est un système qui optimise la croissance des plantes en créant l'équilibre idéal entre la circulation de la solution nutritive et la quantité d'oxygène qui y est dissoute. La solution est récupérée puis réutilisée : le système fonctionne en circuit fermé, ce qui limite l'évaporation de l'eau. L'atmosphère du milieu de culture où se trouvent les racines est saturée par un brouillard nutritif qui se dépose sur les racines puis ruisselle sur ces dernières en assurant leur alimentation minérale (Texier, 2013).

3. Aquaculture

Dans l'aquaculture ou culture en eau profonde, la solution nutritive est contenue dans un bac. Elle demande une oxygénation complémentaire de la solution nutritive pour éviter l'asphyxie des racines, via l'utilisation d'un procédé technique complexe. L'aquaculture reste de ce fait un système destiné à la recherche et peu développé dans la pratique. Cependant, des productions horticoles se rapprochent de cette technique de culture : la production de salades (surtout en Chine), le forçage de l'endive, et dans de plus rares cas la culture de fraises (Texier, 2013).

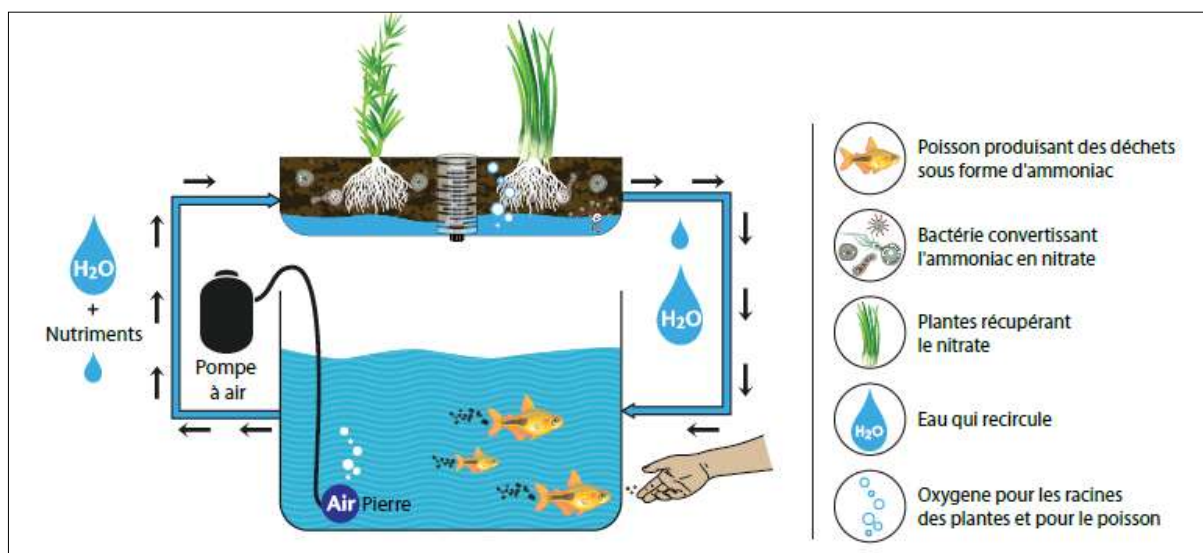


Figure 02: exemple de système aquaculture (Hydrobox Team)

4. Ultrafonie

L'ultrafonie est une amélioration de l'aéropnie. Le brouillard nutritif est créé grâce à des brumisateurs à ultrasons puis dirigé vers les racines. Il est fait de très fines gouttelettes formant un milieu composé d'eau et d'oxygène directement assimilable par les pores des racines (Texier, 2013).

B. Système hydroponique avec substrat

1. Système goutte à goutte

Ces systèmes utilisent une pompe qui amène l'eau au-dessus du substrat via un goutte-à-goutte. L'eau s'infiltré à travers le substrat, redescend dans le réservoir et est prête à être réinjectée. Les systèmes goutte-à-goutte sont faciles à installer. L'eau est pompée dans un réservoir, généralement situé sous l'espace planté, jusqu'aux goutte-à-goutte, un pour chaque plant. Les plants eux-mêmes peuvent être installés dans les pots individuels ou sur un plateau commun. L'eau circule à travers les pots et revient dans le réservoir.

Grâce à ce système, on peut arroser les plantes directement aux racines. Ce système est l'un des plus répandus actuellement (les systèmes de plus en plus sont munis de récupérateur de solution nutritive, un bac contenant la ou les plante(s) et un autre qui contient la solution en dessous qui lui-même est percé pour y laisser passer le surplus.) De plus si les solutions sont récupérées, il ne peut, en principe, y avoir contamination des sols (Van Os et al., 2019).

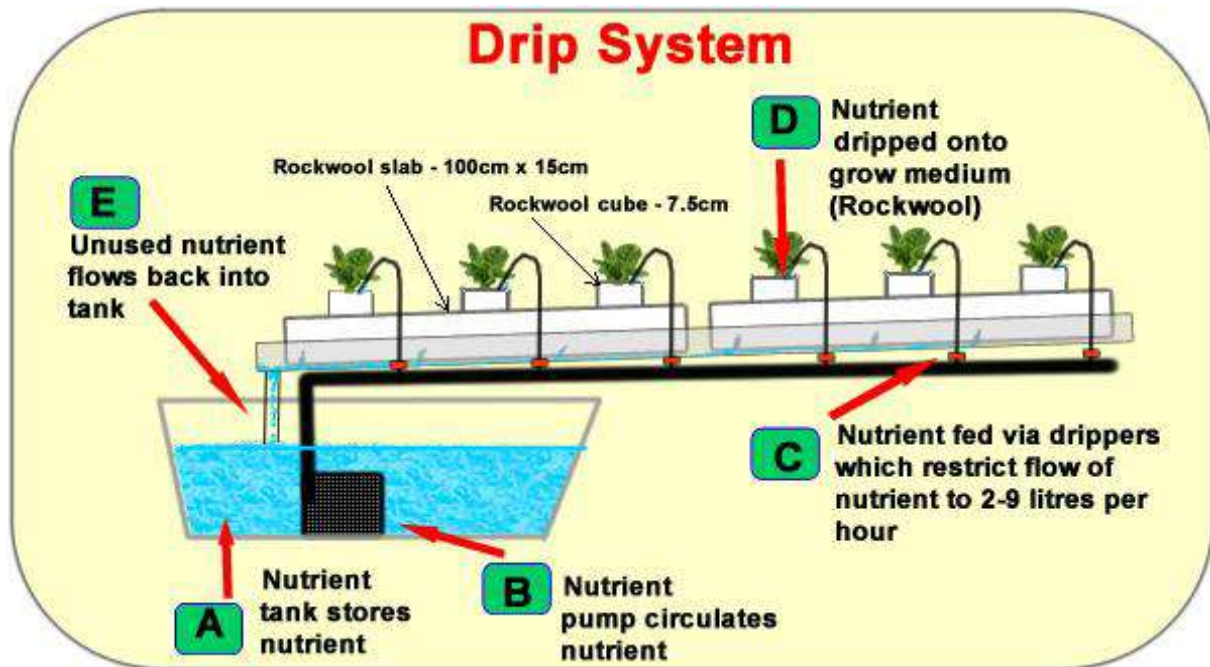


Figure 03: système goutte à goutte (Wikipédia)

2. Système à flux continu

Ce système est généralement de petite taille et constitué de plusieurs petites unités. Ce système a des applications multiples. Il est surtout utilisé pour la culture de plantes mères (plantes sur lesquelles on prélève des boutures), pour des plantes culinaires ou aromatiques.

Cette technique permet aux plantes de s'épanouir pleinement. Les plantes poussent dans des bacs opaques remplis le plus souvent de billes d'argile, car ce substrat n'engendre pas de déchets et donc n'encrasse pas le réservoir qui est placé au-dessous. Pour éviter que les racines ne soient abîmées par la pompe, ici, c'est une autre technique qui est utilisée. Une pompe à air envoie la solution dans une colonne de pompage, puis la répartit par un anneau de distribution. L'eau ruisselle à travers les billes d'argiles puis retombe dans le réservoir. Le mouvement continu du flux de la solution fait se gorger d'oxygène et humidifie constamment les racines ; celles-ci y puisent la nourriture plus facilement (Texier, 2013).

3. Système de table à marées (Flux-reflux)

Cette technique consiste à faire pousser des végétaux sur du substrat placé dans des conteneurs étanches de matière plastique appelés tables à marée. Ils sont appelés ainsi car ils ressemblent à de grandes tables possédant un rebord d'une hauteur pouvant varier de dix à une vingtaine de centimètres. Il existe plusieurs possibilités de cultures avec ce système : soit

on peut placer des billes d'argiles, soit des enveloppes ou différents substrats directement dans la table, ou dans des pots pour l'enracinement des plantes en horticulture.

Parfois appelés « inondation-drainage », ils se composent d'une table étanche à rebords. La table est périodiquement inondée grâce à l'eau d'un réservoir. Dès que la table est pleine, le substrat est irrigué, la pompe s'arrête automatiquement, ce qui permet à l'eau de s'écouler (Van Os et al., 2019).

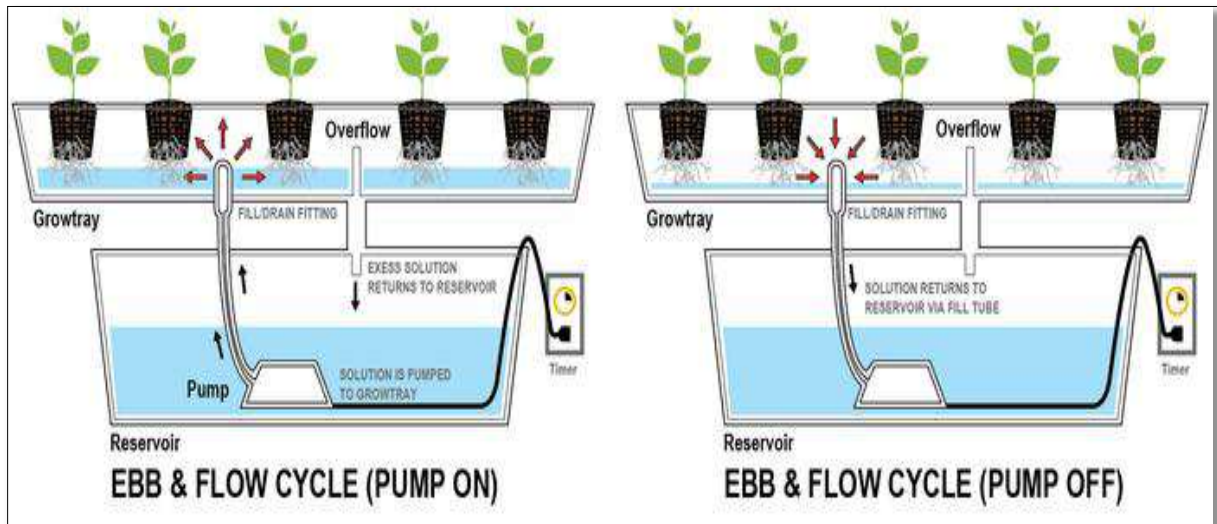


Figure 04: Fonctionnement d'une table à marée

8. Substrats

Dans les cultures classiques, le sol est reconnu pour être un réservoir en eau et en éléments minéraux pour les plantes, mais a également une fonction de support pour le système racinaire. La production hors sol doit regrouper toutes ces caractéristiques en se basant sur les particularités des différents matériaux organiques (tourbe, écorce compostée, fibre de coco...) ou inorganiques (laine de roche, perlite...) utilisables. Leurs coûts peuvent fortement varier d'un substrat à l'autre, ce qui en fait un critère de sélection supplémentaire pour les producteurs. De plus, les supports doivent posséder certaines propriétés chimiques, tout en répondant à des critères d'aération, et de capacité de rétention en eau différents selon les cultures mises en place. Ils doivent également être exempts de maladies, de graines d'adventices, de ravageurs pour les racines, ou de toutes autres substances toxiques, sans pour autant être stériles, et faciliter la nutrition des cultures (Pardossi et al., 2011).

Une mauvaise adaptation de ces caractères à la culture pourrait avoir des effets négativement significatifs sur la croissance végétative, la période de floraison et le rendement.

8.1 Propriétés

Comme écrit précédemment, les substrats se définissent par leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Le support de culture doit garantir la stabilité des plants, une forte porosité pour une bonne circulation de l'air et de l'eau, ainsi qu'un pH neutre ou approchant. Selon les composants, la densité apparente est également un critère de choix pour faciliter l'installation des sacs (Pardossi et al., 2011).

Les différents substrats ont été réalisés selon les éléments caractéristiques que sont la porosité totale, la disponibilité en air et en eau (analogue de la RFU dans un système sol), et la capacité de rétention. Généralement, une courbe de rétention d'eau permet de mesurer cette capacité de stockage. Elle donne des indications sur le potentiel matriciel du support, soit la tension que fournit le substrat afin de conserver l'eau.

Enfin, le **comportement physique** des substrats peut également être modifié par le développement racinaire des plants. Les racines ont tendance à se développer dans les interstices les plus larges, soit les macropores, et ce jusqu'à les obstruer partiellement ou complètement. L'air circule alors beaucoup moins bien dans le substrat et la capacité de rétention en eau augmente (Vitre, 2013).

➤ Les propriétés chimiques

Sont moins diverses et concernent les échanges cationiques, le taux de minéralisation de la matière organique, ou encore le taux de nitrification (Raviv et Lieth, 2008). Afin d'évaluer l'aptitude d'un substrat à retenir des éléments minéraux, il est intéressant d'utiliser sa valeur de capacité d'échange cationique (CEC). Il s'agit de l'indice de capacité du support à échanger des cations en solution avec des cations absorbés ; autrement dit, il donne des informations sur la capacité d'un sol à résister au changement de pH. Les valeurs sont en général plus élevées dans les substrats organiques, dit aussi "réactifs" à cause de leur aptitude à modifier la solution de fertilisation. La mesure de la conductivité électrique (CE) de la solution est ainsi le meilleur moyen d'évaluer la CEC d'un substrat.

➤ **Pour terminer, les propriétés biologiques** des substrats sont très peu mises en avant, et ne sont intéressantes que pour des supports organiques. Ils permettent le développement d'une activité biologique avec la présence de micro-organismes qui entrent dans les processus de minéralisation et d'humification. Afin de s'assurer de cette activité, il est possible de mesurer la biostabilité en évaluant le rapport C/N, ou bien le taux de respiration du substrat.

Des projets de mycorhization des sacs voient le jour et pourraient se développer dans les années à venir (Vitre, 2013).

8.2 Matériaux

Il existe actuellement une douzaine de matériaux qui sont utilisables comme substrats en cultures hors sol. Ils sont classés en fonction de :

- L'origine soit naturelle ou industrielle.
- La nature soit minérale ou organique

8.2.1 Matériaux organiques naturels

a) Les écorces

Pour leur utilisation comme substrat en culture hors sol, les écorces ne doivent pas être utilisées directement à l'état brut. En effet, elles peuvent être phytotoxiques du fait de la présence, au moment de l'écorçage, de résines, de tannins, de terpènes etc..... Il est fortement conseillé d'utiliser un matériau qui a subi une neutralisation à la chaux puis un compostage en tas à l'air libre pendant plusieurs mois (Hatzilazarou et al., 2004).

b) Les tourbes

Les tourbes proviennent de la décomposition incomplète de végétaux divers qui se sont développés en milieu aquatique ou marécageux, la tourbe blonde est celle qui présente le plus d'intérêt pour les cultures hors sol. Sa structure fibreuse, grossière, peu décomposée, lui confère une bonne rétention en eau associée à une structure souple et très aérée.

Les principaux inconvénients de la tourbe est le problème d'humectation par l'eau et surtout de réhumectation: le dessèchement d'un support de tourbe entraîne un important phénomène de retrait et des difficultés lors de sa réhydratation (Hatzilazarou et al., 2004).

c) La fibre de coco

C'est le nom donné à la matière fibreuse que constitue le mésocarpe. Ce matériau se trouve sous forme de pains ou sous forme brut à placer dans des bacs, ou des pots. La fibre de coco est fabriquée à partir de l'écorce de noix de coco râpée, puis traitée. Elle est de pH neutre, c'est un substrat inerte (Hatzilazarou et al., 2004).

8.2.2 Matériaux minéraux naturels

a) Le gravier

Le gravier est constitué de petits cailloux. Il facilite le drainage tout en conservant l'eau superficiellement et en assurant la circulation de l'air. Tous les graviers ne se valent pas. Faites bien attention d'utiliser un gravier non calcaire, inerte, et un pH neutre. Le gravier retient l'eau entre ses composants mais sans générer de capillarité. Le gravier fin (3 à 6 mm) est utilisable dans les mélanges de substrats, le gravier est le plus important, il peut être utilisé seul dans les systèmes de goutte-à-goutte, ou en immersion totale dans les systèmes de table à marée (Hatzilazarou et al., 2004).

a) Le sable

Il favorise le drainage et empêche les mélanges de s'agglomérer. Le sable est très lourd et il est le plus souvent remplacé par la perlite et la vermiculite. On peut toutefois en lester le fond des récipients s'il y a menacé de basculement. Le sable peut servir d'ingrédient minoritaire dans les systèmes à réservoir, à goutte-à-goutte, à mèche et à table à marée (Hatzilazarou et al., 2004).

8.2.3 Matériaux minéraux artificiels ou traités

a) La perlite

C'est un sable siliceux d'origine volcanique chauffé à plus de 1000°C qui fond et gonfle d'environ vingt fois son volume. Il en résulte des perles blanches vitreuses, légères, très poreuses, contenant 75% de silice initial (Blanc, 1987).

b) La laine de roche

C'est le substrat de culture inerte le plus employé en horticulture. Ce matériel est obtenu par la fusion d'un mélange de basalte, de calcaire et de coke, dégradé en fibres stables qui résistent à la biodégradation pendant une longue période (Morard, 1995).

c) La vermiculite

La vermiculite est une argile phylliteuse (en feuillet ou mica) qui contient de l'eau. Lorsqu'elle est traitée à une chaleur d'environ 1100°C, l'eau comprise entre les feuillets provoque un gonflement de 10 à 12 fois l'épaisseur initiale produisant des fragments de 1 à 6 mm (Morard, 1995).

d) L'argile expansée (Les billes d'argile)

L'argile expansée est très utilisée car facile à travailler et inerte. Sa forme ronde rend facile à pénétrer et les racines de la plante s'y installent donc aisément. Il a une durée de vie quasi infinie. On peut le nettoyer et même le stériliser. Les billes d'argile cuites absorbent l'eau par capillarité tout en laissant beaucoup d'air circuler entre les billes. On peut les utiliser dans n'importe quel système (Morard, 1995).

9. Fertirrigation

La fertirrigation est la conjugaison d'une alimentation hydrique et d'une nutrition minérale afin d'apporter une solution nutritive aux cultures lors de l'arrosage. Aussi appelée « fertigation » ou « irrigation fertilisante » (Texier, 2013).

La solution fertilisante est l'une des principales composantes de l'hydroponie, Le principe de l'irrigation fertilisante est que la solution doit satisfaire entièrement les besoins de la plante, tout au long du cycle de la culture.

9.1 Intérêt de la fertigation

➤ La fertigation, en fractionnant et en dosant les apports d'engrais, permet d'éviter les effets indésirables des apports massifs d'engrais ; excès de croissance végétative, salinité, toxicité (Yelle, 2006).

➤ Le maintien de l'eau et des éléments minéraux à un niveau optimal dans la rhizosphère nutritionnelle est important pour l'obtention des rendements élevés des cultures (Skiredj, 2005).

9.2 Composants de fertigation

9.2.1 Solution nutritive

Ce terme désigne les travaux de mise en solution des engrais, sous forme de solution concentrée dite « solution mère » qui sera au moment de son utilisation diluée pour obtenir la « solution fille » ou dite « solution standard ».

Globalement, la concentration en éléments minéraux d'une solution doit être calculée en tenant compte du climat, du substrat utilisé, du stade de la plante et de sa variété (Lieten, 2013).

Néanmoins, certains équilibres sont plus impactant que d'autres sur la qualité des fruits. Un déséquilibre de K/Ca ou K/Ca+Mg affecte l'acidité des fruits, leur brillance, et les rend plus fragiles à la récolte. Cela peut aussi entraîner une perte de rendement sur la deuxième phase de production pour les variétés remontantes.

9.2.2 Engrais utilisés

Dans les cultures sur substrat inerte arrosé fréquemment avec des solutions nutritives, Les apports fertilisants sont calculés et rythmés en fonction de trois facteurs : les besoins de la culture selon son développement, le climat et le substrat.

Il peut utiliser des engrais simples et binaires. (Nitrate de potasse, Nitrate de l'ammoniaque, Phosphate d'ammoniaque ...etc.) Par des mélanges adéquats. Il peut aussi préparer lui-même la solution mère il faut toutefois utiliser des engrais hautement solubles, en associant N-P2O5-K2O-MgO et en additionnant les oligo-éléments.

9.2.3 Composition de la solution nutritive

a) Eléments nutritifs

Comme pour tout amendement, les éléments nutritifs peuvent être classés en deux grandes catégories :

- les macroéléments (azote, potassium, phosphore, calcium, magnésium et soufre)
- les microéléments (cuivre, fer, zinc, molybdène, manganèse, chlore et bore). Tous ont des fonctions spécifiques dans le développement des plants de fraisiers, laitue et tomate à plus ou moins grande échelle (Sonneveld et Voogt, 2009).

Tableau 02 : Composition chimique des plants : teneurs et rôles des principaux éléments nutritifs, symptômes de carence (Simon et Minatchy, 2009).

Eléments nutritives	Mode d'absorption, mobilité entre les organes	Rôles	Symptômes de carence (ils débutent généralement par les feuilles de la base)
Azote (N)	Absorbé et utilisé principalement sous forme de nitrate (NO ₃ ⁻), en moindre quantité sous forme d'ammonium (NH ₄ ⁺), et de façon négligeable sous forme nitrite (NO ₂ ⁻) Peu mobile à l'intérieur de la plante	Premier constituant des protéines Synthèse d'acides Aminés Croissance	Plante peu vigoureuse Folioles petites et vert pâle avec des nervures parfois violacées Petits fruits
Phosphore (P)	Absorbé par la plante sous forme d'ions H ₂ PO ₄ ⁻ Mobile à l'intérieur de la plante Consommé en petite quantité	Facteur de précocité Enracinement Floraison (redistribution du phosphore des organes jeunes vers les inflorescences)	Plante rabougrie Tiges très fines, coloration violette Folioles vert sombre, coloration violette de leur face inférieure (surtout les nervures) Folioles courbées vers le dessous Fruits creux et mal colorés Plante entière affectée par la suite.

		Fructification (réserve dans les graines) Qualité des bouquets.	
Potassium (K)	Absorbé et utilisé sous forme d'un cation monovalent K ⁺ Facilement absorbé Très mobile à l'intérieur de la Plante C'est un des éléments les plus abondants dans la plante. Besoins de la plante augmentent à partir de la floraison du troisième bouquet.	Maintien de la Pression osmotique Favorise le grossissement et la coloration du fruit.	Les plantes réutilisent K par migration des tissus âgés vers les tissus jeunes : les symptômes visuels de déficience sont surtout visibles sur les feuilles les plus âgées Folioles : jaunissement internervaire en tache et dessèchement de leur partie périphérique Ramollissement des fruits.
Calcium (Ca)	Absorbé et utilisé sous forme d'ion Ca ²⁺ Peu mobile Besoins en calcium plus élevés en début de culture : de la plantation à la floraison du deuxième bouquet.	Élément important pour la croissance Constituant des parois cellulaires.	Peu mobile dans les tissus des végétaux : les jeunes organes sont très sensibles aux carences Sur une même plante, on peut trouver des feuilles âgées ayant accumulé du calcium et des feuilles jeunes déficientes Nécrose apicale des fruits (<i>Blossom end rot</i>) due à un mauvaise alimentation des fruits Folioles vert sombre, plus pâles à jaunes en bordure du limbe. Brunissement et nécrose du bourgeon terminal.
Magnésium (Mg)	Absorbé et utilisé sous forme d'ions Mg ²⁺ Très mobile, surtout localisé dans les feuilles (très peu dans les racines) : en cas de déficience, Mg migre des feuilles âgées vers les tissus jeunes.	Photosynthèse Synthèse des protéines, sucres et lipides Perméabilité cellulaire.	Surtout sur les vieilles feuilles : apparition de chlorose, l'ensemble du limbe pâlit à l'exception d'une zone autour des nervures. Baisse de la nouaison des fruits Petits fruits.
Soufre (S)	Absorbé sous forme de sulfates(SO ₄ ⁻) Peu redistribué à l'intérieur de la plante Une partie du soufre contenu	Constituant des acides aminés Métabolisme des vitamines.	Surtout sur les jeunes organes Coloration violette des tiges Léger jaunissement des folioles avec taches violettes et

	dans la plante peut rester sous forme SO_4^- .		nécrotiques, coloration violette des nervures et des pétioles Plante entière affectée par la suite.
Oligoéléments Fe, fer Zn, zinc Mn, manganèse B, bore Cu, cuivre Mo, molybdène Cl, chlore...	Indispensables en quantités très faibles.	Fe : chlorophylle, respiration Zn : croissance, développement du fruit Mn : chlorophylle, métabolisme (azote) B : pollen, parois cellulaires, synthèse des protéines, métabolisme des glucides Cu : croissance, parois cellulaires Mo : métabolisme de l'azote.	Fe : jaunissement (allant jusqu'au blanchiment) internervaire des folioles, sauf le long des nervures qui restent vertes. Zn : plante rabougrie, folioles plus petites et enroulées avec jaunissement internervaire en petites taches pouvant se nécroser Mn : jaunissement internervaire des folioles débutant près des nervures, déformation et enroulement des folioles. B : léger jaunissement. internervaire des folioles qui restent de petite taille et s'enroulent, plante entière affectée par la suite. Cu : plante rabougrie, enroulement des folioles, pétioles courbés vers le bas. Mo : léger jaunissement internervaire des folioles qui enroulent, éclaircissement des plus fines nervures.

b) Préparation de la solution mère

La préparation de la solution nutritive se déroule en deux grandes étapes : la préparation de la solution mère puis la dilution pour obtenir la solution fille. Cette solution fille est communément désignée sous le nom de solution nutritive. Pour chacune d'elles, des techniques de contrôle doivent aussi être appliquées (Sonneveld et Voogt, 2009).

La préparation d'une solution nutritive elle est résumée par les étapes suivantes :

Analyse chimique de l'eau utilisée

La qualité de l'eau d'irrigation, particulièrement importante dans les systèmes hydroponiques, influe sur les besoins de composition des solutions nutritives, dans les systèmes hydroponiques où la croissance des racines est limitée par les dimensions du

substrat, et souffriront donc immédiatement lorsque les solutions nutritives ne sont pas adaptées à la qualité de l'eau. L'eau d'irrigation qui sera utilisée pour la préparation des solutions nutritives peut contenir des minéraux et/ou des sels résiduels, avoir pH élevé ou contenir une teneur élevée en sodium. Lors du calcul des besoins en solution nutritive, il faut soustraire la quantité de nutriments déjà présents dans l'eau d'irrigation pour s'assurer que les concentrations de nutriments ne dépassent pas les niveaux désirés.

L'utilisation de l'eau de pluie, qui est généralement d'excellente qualité et sans fer, est fortement recommandée pour les systèmes hydroponiques. Le ruissellement des toits des serres est un moyen facile de recueillir l'eau de pluie (Sonneveld et Voogt, 2009).

Choix d'une formulation adaptée à la culture envisagée

Il faut noter qu'une formule ne constitue habituellement que le point de départ du programme de fertilisation. Elle est souvent destinée à être modifiée en cours de culture en fonction des analyses effectuées dans les eaux de drainage, à proximité des racines ou sur les plantes (Sonneveld et Voogt, 2009).

Calcul des quantités d'engrais apportés dans les bacs de solution-mère

Le calcul des quantités d'engrais à apporter dans les bacs de solution-mère doit tenir compte de la disponibilité et du coût des engrais utilisables, des résultats de l'analyse de l'eau de départ et de la concentration recherchée dans les bacs de solution-mère (Morard, 1995).

Préparation des bacs de solution-mère :

- Un bac contenant de la solution commerciale concertée prête à l'emploi, plus un bac d'acide.
- Deux bacs d'engrais, bacs A et B, un système a été développé par Verwer, 1978 avec un réservoir central pour l'irrigation, la solution créée en combinant de l'eau avec deux solutions mères, appelées solutions A et B.

Ce type de système est encore largement utilisé aujourd'hui. Les deux solutions mères sont préparées à des concentrations 100 ou 200 fois plus élevées que la concentration moyenne de la solution à fournir aux usines. Le réservoir A contient tous les composés de calcium. Dans le réservoir B, tous les sulfates et les phosphates sont dissous. Si les engrais des deux solutions mères devaient être mélangés à ces concentrations élevées, des précipitations se produiraient dans les tuyaux, les vannes et les émetteurs, avec résultats désastreux. Pour éviter les précipitations, les solutés des cuves A et B sont dilués avec de l'eau douce dans la cuve de mélange pour obtenir la bonne concentration et le niveau CE approprié de la solution

nutritive (solution fille). Une quantité supplémentaire d'un soluté acide ou basique peut être utilisée pour contrôler le pH du lot de solution nutritive dans la cuve de mélange. La recette des mélanges A et B est choisie en fonction des besoins de la culture à et est basée sur une analyse de laboratoire effectuée deux fois par mois. Les engrais sont généralement ajoutés à la main aux chars A et B (van Os et al., 2019).

L'augmentation de la salinité pourrait être comparée en traitant l'eau recyclée avec des systèmes osmotiques appropriés, y compris l'osmose avant et arrière. Au cours des dernières années, une attention particulière a été accordée aux technologies d'osmose inverse, dans le but également de réutiliser les eaux usées pour la fertirrigation. En ce sens, ont proposé l'utilisation de solution nutritive concentrée comme solutions d'extraction dans les systèmes d'osmose inverse. Cette application peut être intéressante pour les cultures hydroponiques en particulier lorsque l'eau d'alimentation est de mauvaise qualité, comme une solution nutritive épuisée ou des eaux usées. La solution nutritive concentrée est utilisée pour prélever l'eau pure (figure05). De cette façon, l'eau recyclée et enrichie en éléments nutritifs qui ont été perdus par l'absorption par les plantes ou d'autres processus chimiques (p.ex. précipitations, complication, absorption) (Sambo et al., 2019).

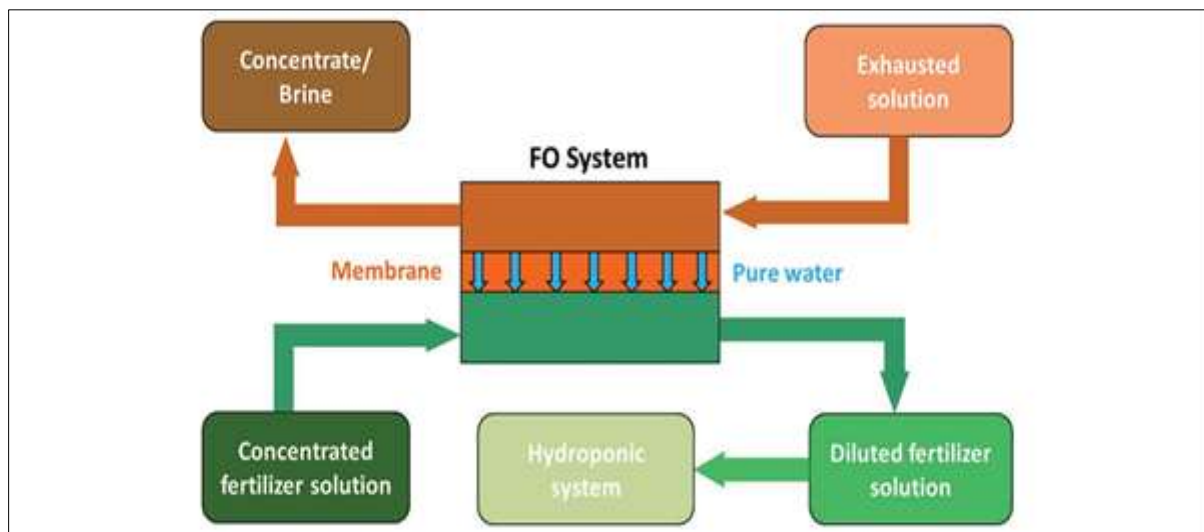


Figure 05 : Schéma d'un procédé de dessalement par osmose inverse pour la préparation de solutions nutritives destinées aux cultures hydroponiques (Sambo et al., 2019).

9.3 Contrôle de la solution nutritive

Les paramètres de la solution nutritive doivent être régulièrement contrôlés :

- ❖ **Le volume quotidien d'apport de solution nutritive.**

Un ou deux capillaires supplémentaires sont branchés sur le réseau de fertigation et plongés dans un seau posé à proximité de ce point de prélèvement (Simon et Minatchy, 2009).

❖ **Le volume quotidien des eaux de drainage.**

Ce contrôle est effectué sur 3 à 6 plantes. C'est faisable dans le cas d'un substrat organique conditionné en sacs ou dans le cas de scorie placée dans des pots ou dans de petites gouttières : l'inclinaison des contenants est inversée à l'aide d'un support étanche placé au-dessous et complété par une gouttière collectant le drainage vers un seau enterré dans l'allée. Il faut bien choisir les plantes qui vont être contrôlées : elles doivent être situées au centre de la serre et être représentatives de la moyenne des individus de la serre. De plus, il faut être très soigneux lors des pratiques culturales sur ces plantes : par exemple, la cassure de l'extrémité de la tige ou la chute d'un fruit entraîne une diminution de l'absorption d'éléments minéraux et d'eau, qui se traduit par une augmentation artificielle du drainage (Simon et Minatchy, 2009).

❖ **pH et Conductivité électrique**

Les mesures de CE et de pH sont des mesures simples et rapides à effectuer chaque matin sur des échantillons de solution apportée et de la solution drainée, collectes dans des contenants munis d'un col étroit pour limiter les pertes d'eau par évaporation, et opaques pour éviter le développement d'algues (Sonneveld et Voogt, 2009).

pH: est un paramètre qui mesure l'acidité ou l'alcalinité d'une solution. Cette valeur indique la relation entre la concentration des ions libres H^+ et OH^- présents dans une solution, le pH optimal dans les systèmes de culture hydroponique est de 5,5-6,5. Lorsque le pH du milieu de culture ne correspond pas au niveau souhaité, l'absorption de certains nutriments peut être limitée (figure 05). Un pH élevé peut limiter l'absorption du phosphate et de la plupart des micronutriments (sauf le molybdène Mo). Un apport continu de solutions nutritives à pH élevé entraînera un jaunissement sévère des plantes (symptômes de carence en micronutriments). Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour éviter les niveaux de pH trop élevés dans le milieu de culture. Tout d'abord, vérifier si le pH de l'eau d'irrigation est réglé au niveau correct en vérifiant le réglage du pH de l'unité de fertilisation, et surveillez les quantités d'acides effectivement ajoutées dans le réservoir de mélange. La deuxième méthode consiste à contrôler le pH en augmentant le niveau d'ammonium. Pour ce faire, on ajoute des quantités accrues d'ammonium à une solution nutritive lorsque le pH dans la zone racinaire augmente, ce qui se produit habituellement en raison des taux élevés de croissance végétative des cultures. Dans les systèmes de culture hydroponique, la proportion de cations d'ammonium doit être limitée à 5-15% de l'azote total dans la solution. Un maximum de 1-

1,5 mmol/l (14-21ppm N) de NH_4^+ dans la solution nutritive est acceptable, si elle est supérieure, le pH chutera trop. La quantité exacte peut cependant varier de 0 à 1,5 mmol/l (0 à 21ppm N) en fonction des conditions de croissance réelles et de la sensibilité de la culture à un faible pH. Lorsque le pH est trop bas, réduire l'apport d'ammonium à 0-0,5 mmol/l (0-7ppm N). Le pH doit être vérifié quotidiennement (Senneveld et Vooget, 2009).

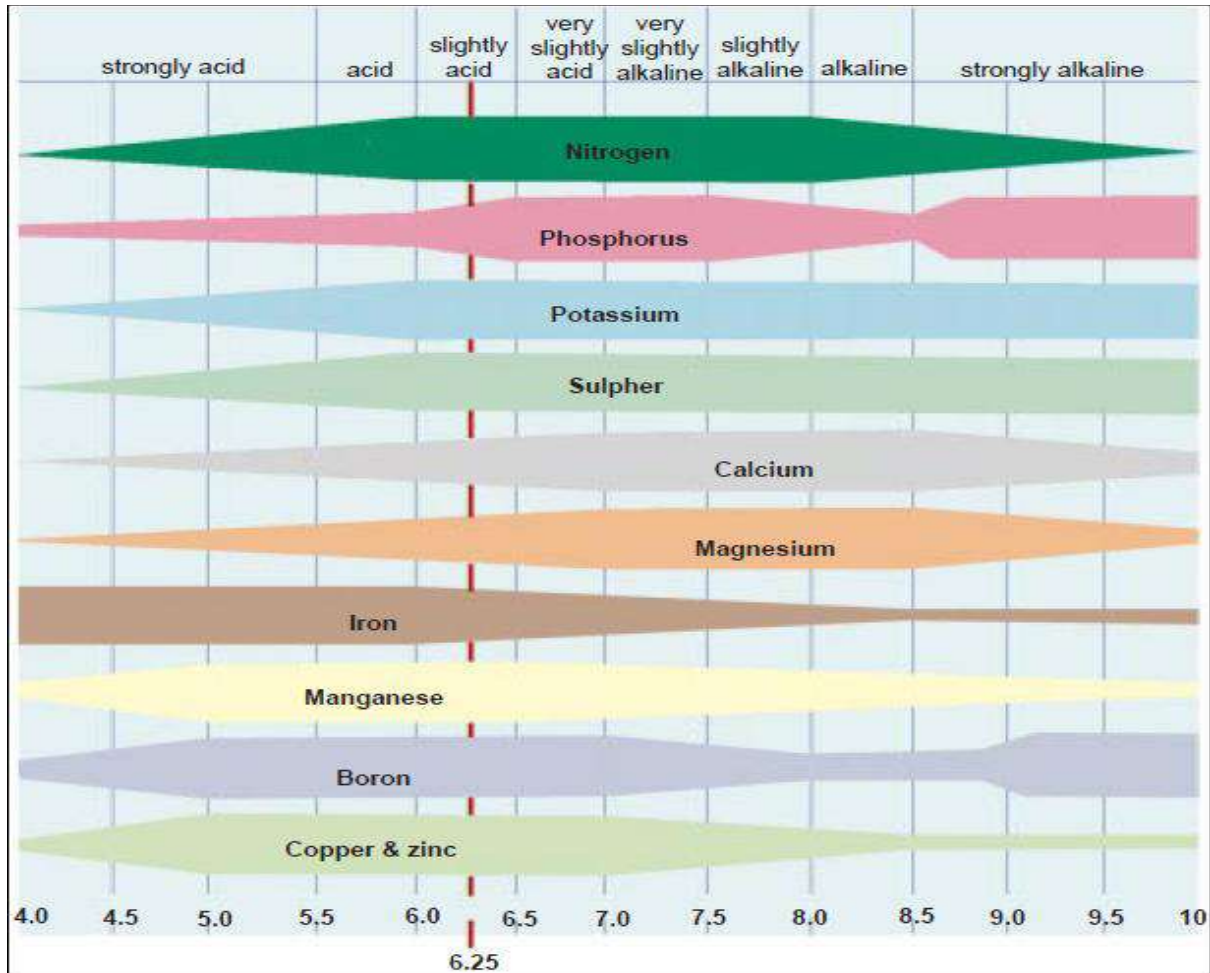


Figure06 : Graphique montrant la disponibilité des éléments nutritifs à différents niveaux de pH (source : Hydrobox Team, 2013).

❖ Conductivité électrique

La conductivité électrique est l'une des paramètres les plus importants permettant de surveiller l'état des cultures des systèmes hydroponiques. Mesuré à l'aide d'un conductimètre.

L'unité de mesure de CE est le dS/m. Une limitation de CE n'indique que la concentration totale de la solution et non celle de chaque élément des composants nutritifs. CE idéale est spécifique à chaque culture et dépend des conditions environnementales. Toutefois, les valeurs de la CE pour les systèmes hydroponiques sont de 1,5 à 2,5 ds m⁻¹. Une CE supérieure empêche l'absorption des nutriments en augmentant la pression osmotique, alors qu'une CE inférieure peut gravement affecter la santé des plantes et le rendement. La

diminution dans l'absorption d'eau est fortement corolaire à la CE. En revanche, les diminutions excessives CE indiquent qu'il faut augmenter les apports d'engrais. Une augmentation de CE dans le drainage indique bien que les apports minéraux sont en excès, il faut alors les diminuer (Sonneveld et Voogt, 2009).

❖ **Température**

La température de la solution nutritive présente une relation directe avec la quantité d'oxygène consommée par les plantes, et une relation inverse de l'oxygène dissous en elle. La température affecte également la solubilité des engrais et de la capacité de l'absorption des racines. Il est évidemment important de contrôler cette variable en particulier dans un climat extrême. Chaque espèce végétale a une température minimale et maximale pour la croissance, ce qui nécessite l'installation des systèmes de chauffage ou de refroidissement pour équilibrer la température de la solution nutritive. Les rendements diminuent lorsque la température de la solution nutritive augmente pendant les périodes chaudes. Au cours de la circulation d'eau la chaleur peut s'échanger entre la solution nutritive et l'eau stockée dans la conduite d'eau souterraine. En outre, cette circulation peut chauffer la solution nutritive qui devenue trop froide dans les nuits froides de l'hiver (Manuel- booklet,2016).

9.4 Impact de la fertigation sur l'environnement

L'une des interrogations majeures du système de fertigation avec solution perdue est son impact sur l'environnement, concerne surtout l'azote et le phosphore qui sont mis à m'index en cas d'excès. Le préjudice porté à l'environnement est lié à la dégradation de la quantité d'eau. Si celle-ci est destinée à un usage domestique ou en subissant le phénomène d'eutrophisation aboutissant à la formation de marée vertes, d'eaux colorée, voire même à la dégradation du milieu aquatique par prolifération d'algue, désoxygénation et production de toxines (Aît Houssa et al., 2005).

10. Irrigation

Comme son nom l'indique, la production hors-sol s'est affranchie du support de culture originel, et s'est ainsi rendue dépendante de nombreuses interventions. L'eau et les minéraux sont les éléments essentiels au bon développement des plantes, c'est pourquoi il est indispensable de savoir les apporter en quantité suffisante et aux moments opportuns. Pour cela, le comportement des plantes vis-à-vis de l'eau mérite une attention toute particulière, avant de se pencher sur ce qui est appelé "irrigation de précision. Si la température est la

même le jour que la nuit, vos plantes tenteront de produire de l'énergie alors qu'elles devraient plutôt assimiler celle produite durant la journée (Voogt et Bar-Yosef, 2019).

1.1 L'eau et la plante

D'après (Lieth et Lorence, 2019). Les processus d'absorption de l'eau par les plantes sont connus et communs à quasiment toutes les espèces végétales. En effet, l'eau est absorbée par la plante par l'intermédiaire des racines et des poils absorbants qui les recouvrent. Ce processus est rendu possible grâce à la différence de potentiel hydrique (Ψ) entre le sol et la plante ($\Psi_{\text{plante}} < \Psi_{\text{sol}}$). Le potentiel observé dans les racines est lié à la force de succion exercée par la pression osmotique des vacuoles des cellules, et au potentiel de turgescence. Celui du sol est dû à diverses activités physiques, chimiques et biologiques ; et lorsqu'il dépasse 16 bars, la plante ne peut plus absorber le peu d'eau qu'il contient dans ses pores : on parle alors du point de flétrissement.

Le transport de l'eau à travers la plante serait impossible sans le phénomène de transpiration, moteur de la montée de sève et des échanges gazeux. Les stomates sont le siège de cette activité ; leurs mouvements d'ouverture/fermeture sont contrôlés par la présence de l'élément K^+ responsable du phénomène de turgescence cellulaire.

Les stomates sont ainsi les premiers à répondre physiologiquement à un stress hydrique.

Leur fermeture agit comme une protection à une trop forte perte d'eau, mais réduit également l'absorption de CO_2 nécessaire aux différentes activités métaboliques de la plante. Cependant, toutes les espèces et variétés ont des tolérances au stress différentes, ce qui leur permet de s'adapter plus ou moins rapidement. Certaines espèces vont jusqu'à réduire leur consommation d'eau lorsque la ressource est faiblement disponible, ce qui implique des changements d'ordre physiologique et biochimique.

1.2 Irrigation de précision

Une irrigation de précision vise à évaluer précisément les quantités d'eau requises d'une culture, et le moment précis de son application en combinaison avec un système hydraulique efficace, et une distribution uniforme de l'eau.

L'intérêt de la micro-irrigation prend alors tout son sens, puisqu'elle permet d'apporter une humidité optimale uniquement dans la zone racinaire du plant. Cependant, il est nécessaire de bien la maîtriser (apports fréquents mais peu conséquents) afin de couvrir les besoins, sans tomber dans l'excès et risquer des pertes racinaires, un gaspillage de la ressource, ou encore un lessivage des éléments. Il faut également prendre en compte l'évolution du système racinaire dans la zone irriguée au cours de la culture, et vérifier le potentiel hydrique du substrat qui peut varier en fonction du développement du plant et de sa

variété. Le seuil optimal a été fixé à environ -15 kilo pascal (kPa), malgré un manque de données, considérant que le substrat n'avait pas encore subi de dommage irréversible, et qu'il avait perdu 50 % de l'eau disponible pour la plante. Ce seuil s'accompagne des quatre phases d'irrigation des substrats : ré-humectation, active, ressuyage, nocturne, qui permet de mieux adapter les apports et leur quantité.

Bien que les besoins varient aussi en fonction de la variété, du stade végétatif et des conditions climatiques (Lieth et Lorence, 2019).

1.3 Pilotage de l'irrigation

Les racines ont toujours tendance à se localiser dans les zones où l'air circule facilement. Lorsque le substrat est asphyxiant, les racines se développent dans la partie supérieure du contenant, qui est la moins humide et la plus aérée, ou à la périphérie, pour rechercher l'interface air - eau. Pour un bon fonctionnement de la plante, il faut donc respecter les étapes du cycle d'irrigation décrites dans la figure 08 : chaque nouvelle irrigation est déclenchée après l'assèchement partiel du substrat, sans attendre toutefois que la réserve facilement utilisable en eau soit vide (Simon et Minatchy, 2009).

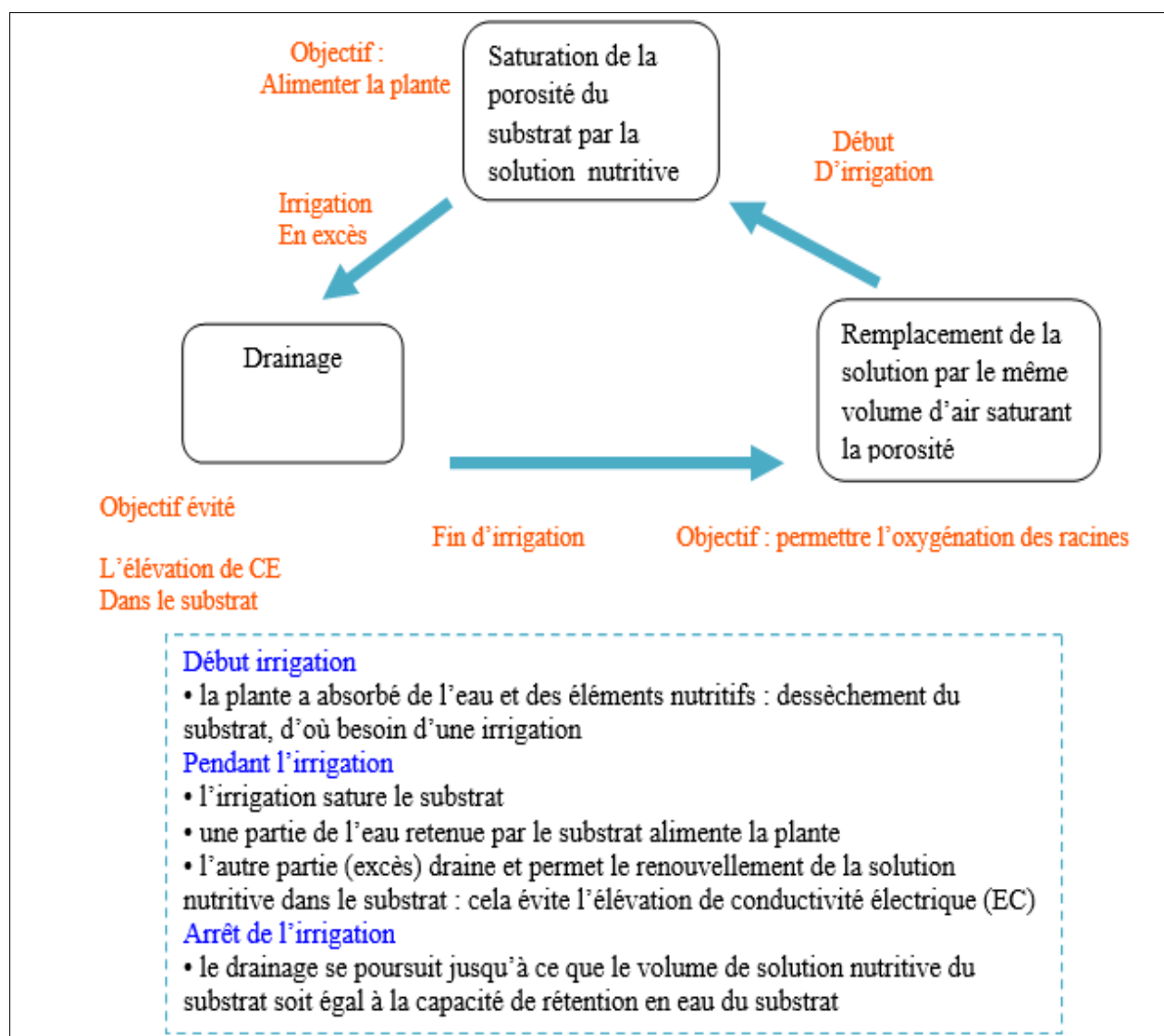


Figure07 : Cycle d'une irrigation.

II. Production de la culture de tomate, laitue et fraiser en hydroponie.

Cette technique, via la mise en germination de fruits et de légumes en conditions de culture hydroponique. Les aliments le plus produit en culture hydroponique sont la tomate, la laitue et fraiser : celle de production industrielle est généralement cultivée hors-sol dans de vastes serres ou tunnels de plusieurs hectares, dans les régions méridionales françaises, en Bretagne et dans des pays septentrionaux comme les Pays-Bas et la Belgique (Shankara et al., 2013).

Leur développement est entièrement programmé, avec notamment une alimentation, totalement artificielle, par un mélange d'eau et d'engrais. La solution nutritive utilisée est apportée par un goutte à goutte continu, ou à fréquences rapprochées, pour combler le peu de réservoir du substrat. Cette solution est entièrement adaptée aux besoins de la plante.

La production de fruits et de légumes cultivés sur substrat nécessite des installations particulières, un suivi journalier des cultures et de bonnes connaissances techniques, notamment pour le calcul des solutions nutritives (Gilberto, 2013).

Il y a une procédure précise avec des phases de développement à respecter :

1. Le cycle de développement

1.1 Culture de la tomate

a. Germination

C'est le passage de la graine de la vie ralentie à la vie active qui se traduit par la sortie des racines séminales et la coléoptile qui émerge en surface pour se développer en pré feuilles simple (Aures, 2010).

Avec de l'eau à pH de 5 à 5,5, température (25°C) et humide (80 %) (Shankara et al., 2013).

b. Croissance

La croissance dure de la levée jusqu'au stade 6 feuilles, où la plante assure la formation de racines fonctionnelles qui vont assurer l'alimentation à la plante en eau et éléments nutritifs. (Aures, 2010)

La solution nutritive, faiblement minéralisée au début (CE=0,5 à 0,7 mS/cm) doit être augmenté jusqu'à 2 mS.cm au fur et à mesure de la croissance ; le pH compris entre 5,5 et 6,2. L'éclairage par lampe au Sodium pendant 16 heures (Shankara et al., 2013).

c. Floraison et fructification

La floraison dépend de la photopériode, de la température et des besoins en éléments nutritifs de la plante

La fructification dépend de la variété (précoce ou tardive), de la conduite de la culture par une bonne alimentation en eau et en éléments nutritifs (Aures, 2010).

Avec pH de 5 et Conductivité électrique du liquide nutritif peut encore être augmenté jusqu'à 3,5 en été et 5 en hiver

Les besoins en phosphore et potassium assurent un bon développement des bouquets de fleurs et le grossissement des fruits. L'éclairage doit être intense équivalent à 12 heures par

jour pour une bonne production l'humidité est maintenu à 50% et la température à 22°C (Shankara et al., 2013).

d. Maturité

Les fruits augmentent de calibre, de poids, et au fur et à mesure du grossissement de fruit, la couleur change de vert au rouge qui représente le stade de maturité (Aures, 2010).

1.2 Culture de la fraise

a. Germination

La germination de la semence dans des conditions favorable de température de l'humidité a lieu en dix ou douze jours (Aures, 2010).

b. Croissance

Le centre de développement devient le rhizome d'où partent feuilles inflorescences, stolons les réserves présentes dans le rhizome et recommence à croître à une température moyenne supérieure à 6°C avec quelques différences selon la variété cultivé

c. Floraison et fructification

Pour les variétés les plus répandues, la différenciation florale a lieu en automne, lorsque les jours sont courts

D'autres par exemple Redgauntlet, peuvent différencier les branches à fleurs même au printemps, lorsque les journées sont encore courtes, mais où la température est suffisamment élevée.

Pendant la fructification commence le grossissement du réceptacle qui aboutit à la formation du fruit (Aures, 2010).

d. Maturité

Après avoir fructifié, La plante commence sa phase de production de stolons (Aures, 2010).

1.3 Culture de la laitue

A. Phase végétative

Au cours de cette phase, la plante forme d'abord une rosette de feuilles entières. Puis survient la période de pomaison, au cours de laquelle se différencient les types de laitue. La laitue beurre à feuilles assez tendres, et les laitues batavia à feuilles plus craquantes.

Il existe des gammes de variétés de différentes couleurs, allant du blond au vert foncé

a. Levée

Cette période est caractérisée par le nombre de feuilles de la jeune plante et leur stade de développement. Il existe des gammes de variétés de différentes couleurs, allant du blond au vert foncé

b. Croissance

La croissance dure de la levée jusqu'au stade 6 feuilles, où la plante assure la formation de racines fonctionnelles qui vont assurer l'alimentation à la plante en eau et éléments nutritifs. Puis survient la période de pomaison, au cours de laquelle se différencient les types de culture (Aures, 2010).

B. Phase reproductrice

Après la phase végétative, la tige s'allonge et la hampe florale ramifiée en corymbe se développe.

a. Montaison

Est plus ou moins rapide selon les conditions climatiques et les génotypes. Elle est favorisée par des jours longs et de hautes températures. C'est pour cette raison que les sélectionneurs ont créé, pour les cultures d'été, des variétés résistantes à la montaison.

b. Floraison

La fleur, de couleur jaune avec un léger anthocyane chez certains génotypes, est en réalité un ensemble de 12-15 fleurons regroupés en capitules (caractéristique des astéracées). L'anatomie et l'évolution des fleurs favorisent fortement l'autogamie (Maisonneuve, 2013).

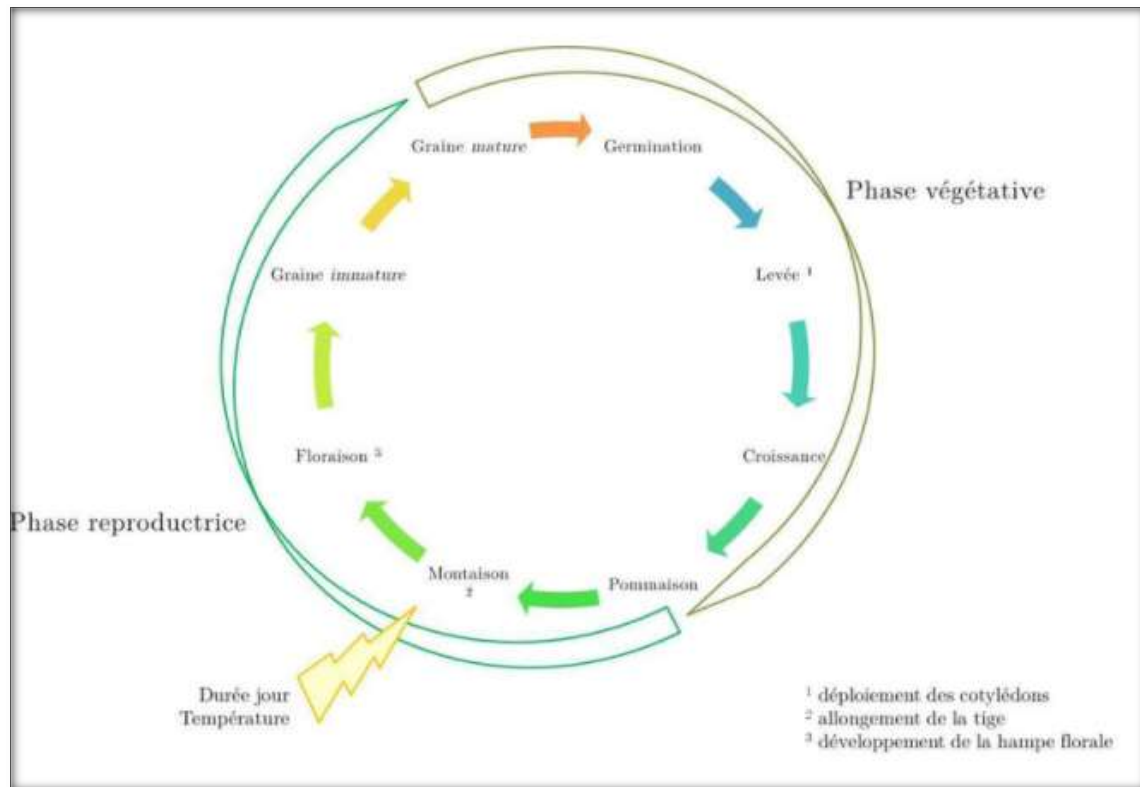


Figure 08 : Cycle de développement de la laitue.

2. Condition de germination

La germination ne peut avoir lieu que si l'eau, la température, l'oxygène et l'humidité sont assurées.

Eau : est évidemment indispensable et doit être disponible dans le milieu extérieur en quantité suffisante. L'absorption de l'eau par la semence s'effectue par osmose, au travers de tégument qui lui-même plus au moins cellulosique, en retient des quantités importantes.

Oxygène : seul l'oxygène dissous dans l'eau d'imbibition est utilisé par l'embryon pour ces besoins métaboliques. Ce gaz étant très peu soluble dans l'eau.

La température : il existe pour chaque plante et chaque phase de végétation des températures : minima, optima et maximum ; quand la température s'élève, la vitesse de germination croit (Urban et Urban, 2010).

L'humidité de l'air qui doit être comprise entre 60 et 70%, ce fourchet favorise le développement des pousses. Le renouvellement et le brassage de l'air est essentiel pour maîtriser le taux d'humidité et maintenir le taux de CO₂ dans l'air. Un air confiné va favoriser le développement de moisissures.

3. Etapes principales de l'agriculture hors sol des cultures maraîchères et fruitière.**1. Choix d'un terrain ou d'un espace.**

- Un terrain avec un point d'eau (puits ou rivière etc.) à proximité pour irriguer vos plantes
- Assurez-vous de choisir un espace bien plat et bien à niveau (éviter surtout les terrains dénivelés)
- La qualité de la terre ou du sol n'a aucune importance en agriculture hors sol puisque nous ne cultivons pas en terre.

2. Préparation du terrain.

- Le terrain doit être désherbé et mis à niveau (surface plate sans dénivellement)
- Couverture du terrain avec une bâche pour isoler les sacs de culture du sol et empêcher la pousse des herbes.
- Mise en place des tuteurs pour chaque pied de culture
- Mise en place du système d'irrigation ou arrosage.
- Réserver un petit espace sur le terrain pour construire une ombrière ou un abri pour vos pépinières.
- Elle peut être réalisée soit en plein air ou sous abris ou sous serre.

3. Semis et la pépinière.

- Etape la plus importante de l'agriculture hors sol
- La réussite de votre plantation passe par la qualité de vos pépinières.
- Elle dure environ 3 à 4 semaines avant le repiquage
- Nécessite un bon suivi

4. Repiquage et la plantation

- Le repiquage est le passage de la pépinière à la plantation proprement dite
- Il peut se faire soit dans des sachets de culture ou des pots ou des bacs contenant du Coco SOL plantation
- Remplir les sachets de culture ou pots avec du Coco SOL plantation
- Transplanter délicatement les plantules issues de la pépinière dans les sachets de culture ou autres
- Etape nécessitant de la délicatesse pour éviter le stress des racines ou la cassure des tiges. Mise en place des tuteurs pour chaque plante si nécessaire

5. Conduite de la culture (entretien de la plantation).

- Irrigation quotidienne des plantes soit à l'arrosoir ou à l'aide d'un système goutte à goutte

- Application régulière d'engrais depuis la pépinière pour assurer la bonne croissance des plantes.
- Application régulière et par alternance des produits phytosanitaires depuis la pépinière pour lutter contre les maladies
- La taille, l'ébourgeonnage et l'étêtage des plantes.

6. Récolte

- La formation des fruits passe par l'étape de la floraison et la pollinisation.
- Le cycle des cultures maraichères est en général de 3 mois maxi avant le début de la récolte. Certains insectes tels les abeilles sont de bons pollinisateurs favorisant la fécondation et l'apparition rapide des fruits de tomate.
- La maturité des premiers légumes ou fruits annonce le début de la récolte.

Chapitre II :
Présentation de la
zone d'étude

II. Présentation générale de la zone d'étude

1. Situation géographique

La commune de Khemis Miliana est limitée au Nord par la commune de Miliana et Ben Allal et celle d'Ain Turki. Au Sud par la commune de Bir Oued Khelifa. A l'ouest par la commune de Sidi Lakhdar. Et à l'est par la commune d'Ain Sultane. (PDAU, 2007). Elle est composée de 12 secteurs urbains qui sont : secteur Salam , Souffay , Dardara Est , Dardara Ouest , Sidi Maamer, Oued Raihane , Communal , Rue Bouamrani , Centre-Ville , Houriya, Cadatte , Souamaa .



Figure 09 : Carte administrative de la commune de Khemis Miliana (**Source :** Schéma directeur de la gestion et traitement des DMA de Khemis Miliana, 2008).

2. Analyse du milieu physique

L'analyse du milieu physique est élaborée sur la base de l'exploitation de la documentation bibliographique et cartographique existante et des données statistiques disponibles couvrant la zone d'étude, l'ensemble étant conditionné pour consolidation par des travaux de terrain. Elle portera sur les aspects les plus significatifs, à savoir le relief, le climat, les ressources en eaux, les ressources en sols, l'érosion éventuellement et l'occupation du sol.

Il s'agit de réunir toutes les informations relatives aux conditions naturelles du milieu physique et de déterminer les extrêmes conditionnant les mises en culture.

2.1 Reliefs

Le territoire de la commune de Khemis Miliana est situé entre les piémonts du Zaccar au nord et les piémonts de l'Ouarsenis plus au sud avec une vaste plaine du Haut Chélif dans sa partie orientale. La largeur de la plaine varie d'une dizaine à une vingtaine de kilomètres. Elle est située à une altitude qui va de 275 m à l'Ouest et atteint 390 m au nord de la commune.

2.2 Hydrographie

Le territoire de la commune est traversé par un réseau hydrographique constitué d'oueds plus ou moins importants et de chaabets surtout sur les parties montagneuses. Les principaux oueds sont :

- **Oued Chélif** : C'est le plus important oued du pays. Il traverse notre périmètre sur sa partie septentrionale d'est en ouest. Son débit est irrégulier à cause de l'irrégularité des pluies.
- **Oued Souffay** : A l'inverse du Chélif, cet oued descend des monts du Zaccar et passe à l'est de l'agglomération de Khemis Miliana.
- **Oued Raihane** : Venant du bassin occidental de Miliana, il traverse la ville de Khemis Miliana et se jette dans l'Oued Chélif.
- **Oued Boutane** : Il longe la partie méridionale de la commune.

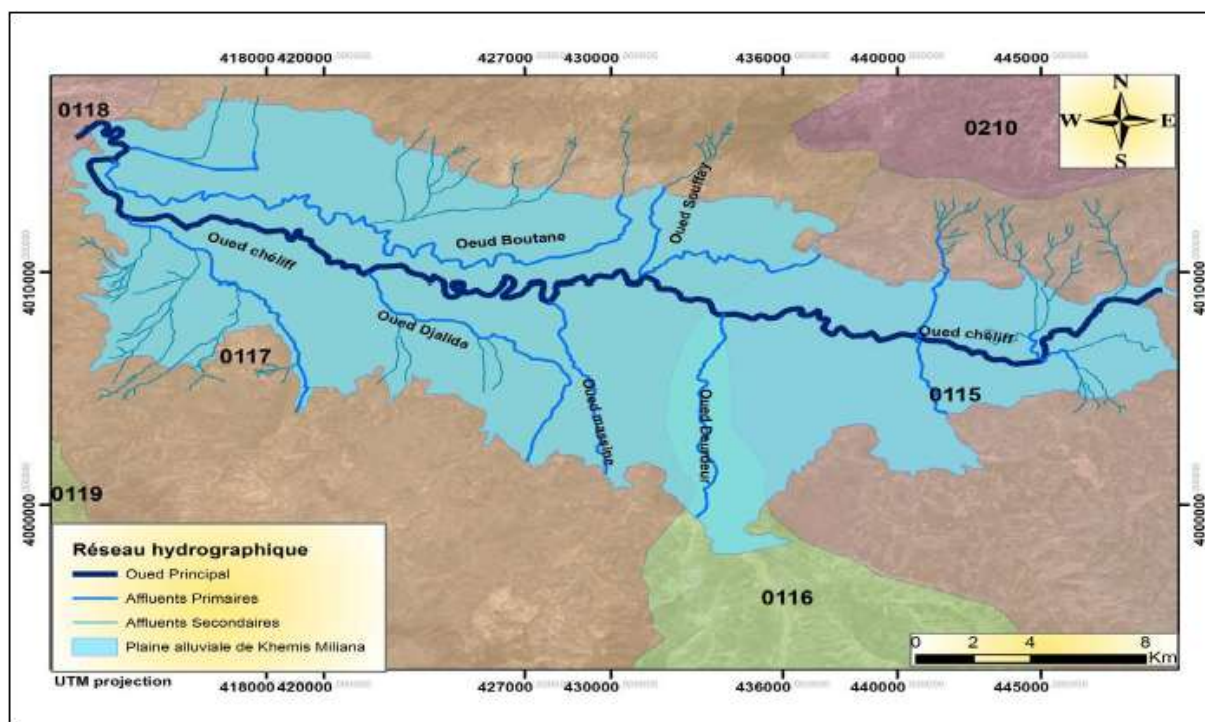


Figure 10 : Réseau hydrographique de la Plaine du Haut Cheliff.

2.3 Contexte pédologique

Les sols du haut Cheliff, qui se situe dans la wilaya d’Ain Defla sont caractérisées par la prédominance d’éléments fins donc c’est la catégorie des terres fortes, la plupart des sols ont un fort pourcentage de calcaire actif supérieur à 10%, les sols ne sont pas salés et de type argileux limoneux. (Legouple, 1974)

Analyse physique des sols

Le tableau ci-dessous représente les propriétés physiques des sols dans la wilaya d’Ain-Defla.

Tableau 03 : Analyse physique des sols (ITGC Khemis Miliana, 2007)

Profondeur (cm)	Charge (%)	Granulométrie (%)					Classe texturale
		A	L.F	L.G	S.F	S.G	
0-40	27,65	32	30	19,6	10,7	7,7	L.A
40-70	10,02	40	15	17,3	19,1	8,6	A
70-100	23,02	50	15	17,3	17,7	10,3	A
> 100	31,40	50	10	04	13,6	17,2	A

A : Argileux

L.F : limon fin

S.F : Sable Fin

L.A : Limoneux Argileux

L.G : Limon Grossier

S.G : Sable Grossier

2.4. Bioclimatologie

Le climat est l'ensemble des facteurs de l'atmosphère (pression, température, humidité, précipitations, ensoleillement, vent, etc.) d'une région donnée intégré dans le long terme (Mohamed et al., 2017). En effet, le climat aura un impact significatif sur les cultures dans leurs cycles végétatifs et sur leurs besoins en eau (Cogeca, 2015). Nous présentons ici, une analyse bioclimatique sera présentée dans le but de suivre l'évolution des paramètres climatiques de la zone d'étude.

La région de Khemis Miliana est caractérisée par un climat méditerranéen avec une saison sèche et chaude en été et une autre pluvieuse et froide en hiver. Les précipitations annuelles présentent une variabilité interannuelle importante, caractéristique d'un régime pluviométrique irrégulier. Les précipitations sont concentrées sur une partie de l'année (Octobre à Avril), et quant aux mois de Juin, Juillet et Août elles sont absentes ou faibles. Dans cette étude, les données climatologiques nous ont été fournies par (NOAA) (**Tableau 04**).

Tableau 04 : Situation de la station météorologique de Khemis Miliana.

code	Longitude ouest	Latitude nord	Altitude(m)
0011717	36.27	2.19	357

3. Paramètres climatiques

3.1 Précipitations

Ce sont des précipitations surtout liquides qui constituent le facteur essentiel. Leur quantité moyenne mensuelle, saisonnière et annuelle est l'un des paramètres qui permet de caractériser le climat. La pluviosité est le facteur primordial qui permet de déterminer le type du climat (Djebaili, 1978 ; Godard et Tabeaud, 2004).

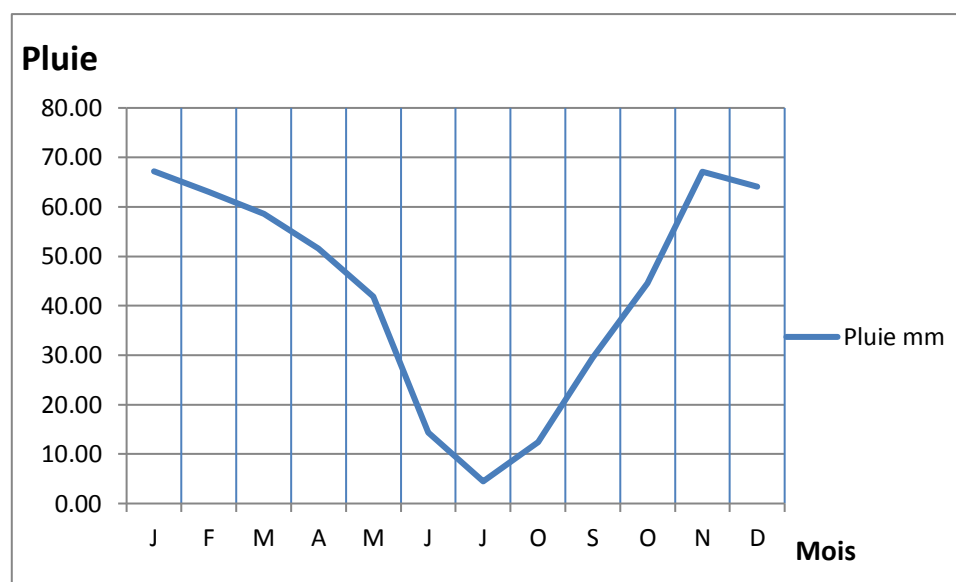
A. Précipitations intra-annuelles

Sur une période de 37 ans (1981-2018), les variations mensuelles des précipitations, illustrées par la figure 11 et représentées dans le tableau 05 ci-après, révèlent un maximum en Janvier et en Novembre. Le minimum correspond aux mois de Juin, Juillet et Août avec des moyennes mensuelles respectives de 4.1 mm et 4.3 mm.

Tableau 05 : Précipitations moyennes mensuelles, station de Khemis Miliana. (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moyenne
Pluie (mm)	67,18	62,98	58,62	51,57	41,85	14,32	4,48	12,41	29,44	44,60	67,05	64,06	518,56

Source : NOAA, 2018

**Figure 11** : Variations des précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Khemis Miliana. (1981-2018).

B. Précipitations saisonnières

Le régime pluviométrique permet de voir la forme de répartition saisonnière des précipitations, cette répartition entraîne naturellement d'importantes conséquences écologiques et agronomiques. Un climat ne peut être méditerranéen seulement si le module pluviométrique estival est le plus faible des autres modules saisonniers (Daget et David, 1982). On peut déduire du tableau 06, que le régime pluviométrique est un régime Automnal-Hivernale, durant la période 1981-2018 avec deux périodes bien distinctes, une pluvieuse avec deux saisons successives (automne et hiver) et l'autre moins arrosée, voire sèche, avec deux saison successives (printemps et été).

Tableau 06 : Répartition saisonnière des précipitations, station de Khemis Miliana (1981-2018).

Stations	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O
P(mm)	29.4	44.6	67.1	64.1	64.1	63.0	58.6	51.6	41.9	14.3	4.5	12.4
	141,09			194,22			152,04			31,21		
%	27.20			37.45			29.31			6.01		

Source : NOAA, 2018

C. Précipitations interannuelles

Durant la période d'étude (1981-2018), la station météorologique de Khemis Miliana enregistre une moyenne annuelle de 518.6 mm. Cependant, l'analyse quantitative des totaux pluviométriques annuels révèlent une évolution irrégulière des précipitations d'une année à une autre, avec un minimum de 252,87 mm enregistré en 1983 et un maximum de 790 mm en 2018. Cette évolution met en relief une variation régressive dans son ensemble avec le temps (Figure 12).

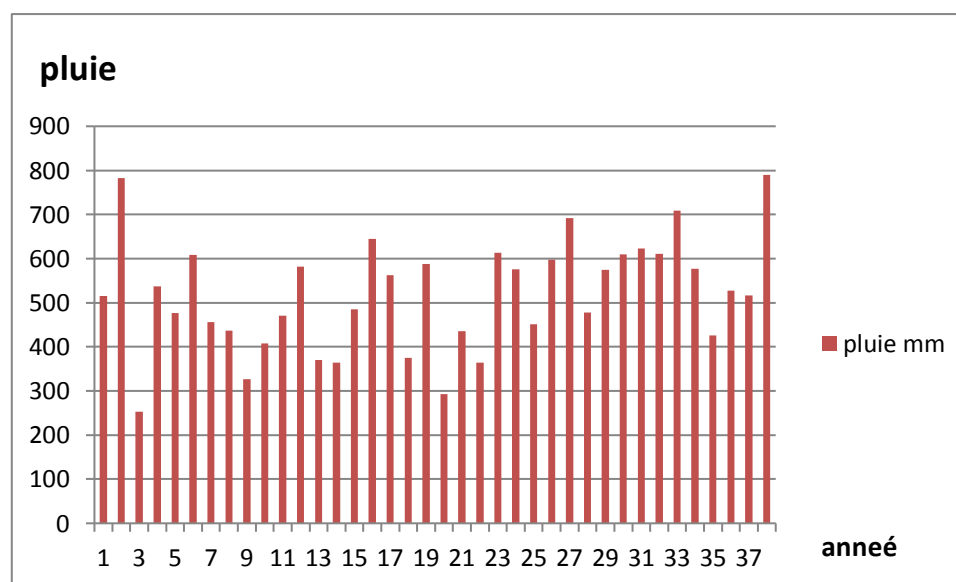


Figure 12 : Variations des totaux pluviométriques annuels enregistrées au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

3.2 Température

Les températures moyennes enregistrent durant la période (1981-2018).un maximum de 26.82°C au mois d'Août, qui reste le mois le plus chaud de l'année et un minimum des

températures moyennes 8.56°C au mois de Janvier. La température moyenne annuelle est de 6.93 °C.

Quant aux températures extrêmes, le minimum des moyennes mensuelles des températures minimales est enregistré en Janvier avec une valeur de 4.92°C. Le maximum des moyennes mensuelles des températures maximales est de 33.38°C, valeur enregistrée en Août (Tableau 07, Figure 13).

Tableau 07 : Répartition des températures moyennes mensuelles minimales et maximales au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moy
T _{MIN} (°C)	4,92	5,20	7,05	9,15	12,66	16,79	20,21	20,92	17,84	14,00	9,34	6,37	12,08
T _{MAX} (°C)	13,38	14,28	17,17	19,95	24,07	29,29	33,33	33,38	28,95	24,13	18,10	14,46	22,59
T _{MOY} (°C)	8,56	9,24	11,70	14,29	18,18	22,92	26,62	26,82	22,92	18,46	13,12	9,79	16,93

Source : NOAA,2018

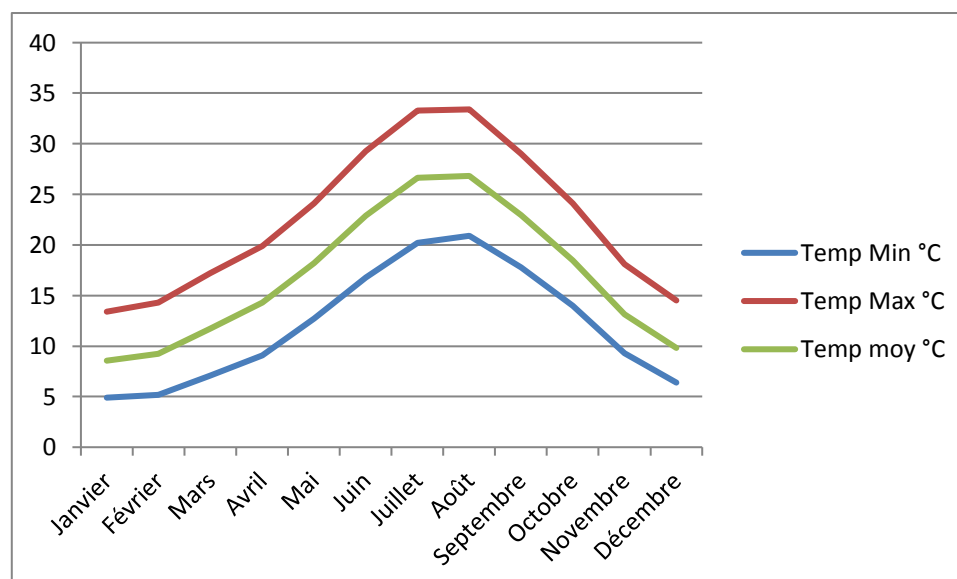


Figure 13: Variation thermométrique moyenne mensuelles de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

- **Amplitude thermique moyenne, indice de continentalité**

Cet indice proposé par Debrach (1953) est basé sur l'amplitude moyenne extrême calculée par la différence des extrêmes thermiques (M-m), il permet d'établir une classification des méso climats. La classification proposée est la suivante :

- Climat insulaire : $M-m < 5$;
- Climat littoral : $15 < M-m > 25$;
- Climat semi continental : $25 < M-m > 3$;
- Climat continental : $35 < M-m$.

Avec ;

M : Moyenne mensuelle des maximas du mois le plus chaud ;

m : Moyenne mensuelle des minima du mois le plus froid.

En fait, d'après le résultat de calcul ($M-m = 28.46^{\circ}\text{C}$), on peut conclure que notre zone d'étude appartient à un climat littoral

3.3 Evaporation

L'évaporation est un phénomène physique qui permet d'apprécier les conditions climatiques d'une région. Elle résulte de la superposition des échanges entre l'eau et le pouvoir absorbant de l'atmosphère. Les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation (mm) sont représentées dans le tableau 08 et la figure 14.

On note que la station de Khemis Miliana enregistre des valeurs maximales durant la période estivale Juillet (6.49mm / jour) et Octobre (6.11mm / jour). Par contre, la quantité d'eau évaporée baisse de Février jusqu'à Avril.

Tableau 08 : Evaporation moyenne mensuelle (mm), station de Khemis Miliana (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Evaporation	1.31	1.72	2.58	3.52	4.45	5.72	6.49	6.11	4.59	3.08	1.90	1.30

Source : NOAA, 2018

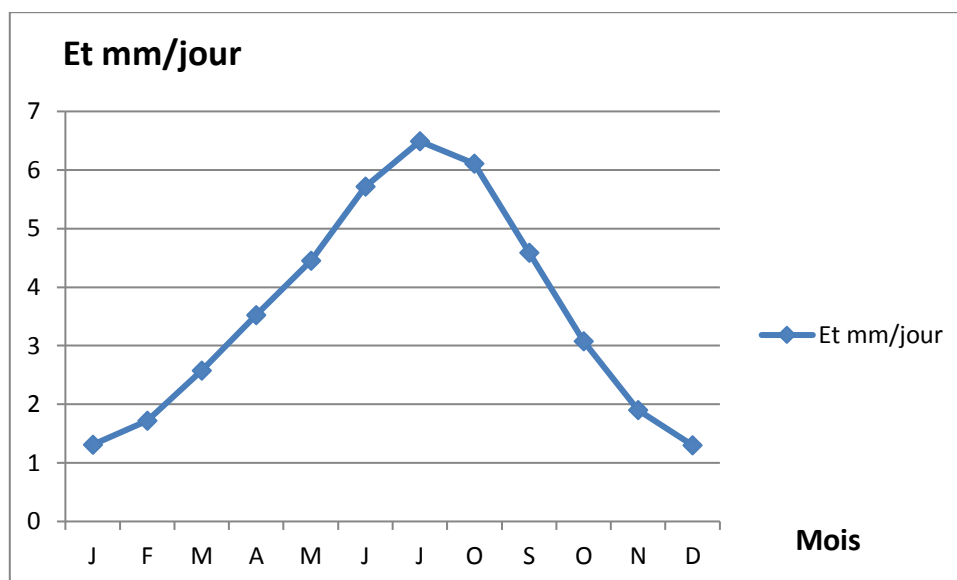


Figure 14 : Variation de l'évaporation moyenne mensuelle au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

3.4 Vent

Les vents soufflent fréquemment dans des directions instables et à différentes intensités en fonction des saisons. Mesurer à la station de Khemis Miliana par l'anémogirouette, la variation de la vitesse de vent (m/s) au cours de l'année est représentée dans le tableau 09 et illustrée par la figure 15.

Les vents dominants, surtout à partir de 1000 m d'altitude, sont les vents d'Ouest (Evydal., 2012). Les données enregistrées au niveau de la station montrent que les vents prédominants sont d'une vitesse moyenne qui varie de 1.87 à 2.24 m/s pour une moyenne annuelle de 2.06 m/s.

Tableau 09 : Moyennes mensuelles des vitesses de vent (m/s), station de Khemis Miliana (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Moyenne mensuelles de (m /s)	2,22	2,24	2,16	2,15	1,95	1,87	1,88	1,91	1,97	1,96	2,21	2,23

Source : NOAA, 2018

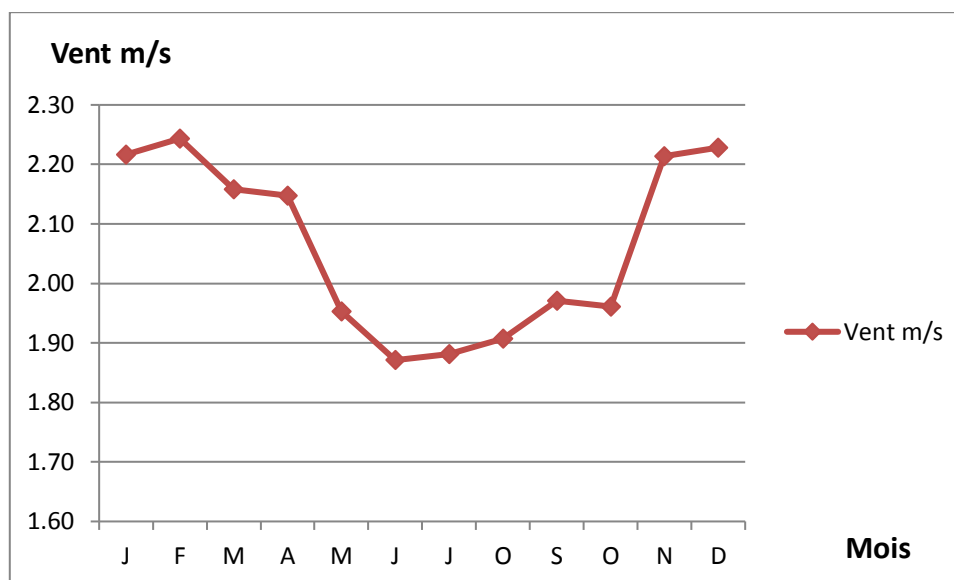


Figure 15 : Variation de vitesse moyenne mensuelle du vent au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

3.5 Humidité relative

L'humidité est supérieure à 63,13% sur toute l'année. Le maximum est enregistré au mois de Décembre avec 76,46% alors que le minimum 45,35%, est observé au mois de Juillet (Tableau 10).

Tableau 10 : Moyennes mensuelles du taux d'humidité relative, station de Khemis Miliana (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Humidité Relative %	76,19	74,32	69,71	65,19	61,10	52,78	45,35	46,86	56,36	63,05	70,87	76,46

Source: NOAA, 2018

3.6 Insolation

D'après la figure 16 et le tableau 11, l'insolation mensuelle est considérable d'une moyenne de 7,97 h avec un minimum de 4,73 h enregistré en Décembre et un maximum 11,37 h enregistré en Juillet.

Tableau 11 : Insolation moyenne mensuelle, station de Khemis Miliana (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Insolation (h)	5,25	6,22	7,62	8,48	9,30	11,10	11,37	10,43	8,73	7,09	5,33	4,73

Source : NOAA, 2018



Figure 16 : Variation de la durée de l’insolation au niveau de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

4 Synthèses bioclimatique

La synthèse des données climatiques permet de classer le climat afin de mieux se rendre compte sur la répartition et le comportement des différentes associations végétales et animales (Bernoussi, 2013). Cette synthèse fait appel à plusieurs indices dont nous retenons particulièrement :

- La situation bioclimatique de cette région d’après l’indice d’aridité De Martonne (1926) et le quotient pluviométrique d’Emberger (1955) ;
- La durée de la période sèche d’après le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953).

4.1 Indice d’aridité de Martonne (1926)

L’indice d’aridité, noté I, est un indicateur quantitatif du degré d’aridité d’une région. Pour le calculer, on utilise la relation suivante :

$$I= P/(T+10) \dots\dots\dots(II.1)$$

Avec:

- I: indice de Martonne ;
- P: Précipitation moyenne annuelle (mm) ;
- T: Température moyenne annuelle (°C)

Au niveau mondial., de Martonne a proposé six grands types de macroclimats allant des zones désertiques ou hyperarides ($I < 5$) aux zones humides à forêt prépondérante ($I > 30$) (Tableau 12).

Tableau 12 : Limite des climats, l'indice climatique De Martonne (He et al., 2009).

Valeur de I_A	Type de climat	Irrigation
$I_A \leq 5$	Désertique	Indispensable
$5 < I_A \leq 10$	Très sec	Indispensable
$10 < I_A \leq 20$	Sec	Souvent indispensable
$20 < I_A \leq 30$	Relativement humide	Parfois utile
$I_A > 30$	Humide	Inutile

Sur une période de 37 ans (1981-2018), l'indice De Martonne donne une valeur de 19.25 ($P= 518.6$ mm et $T= 16.93^\circ\text{C}$). Suite à ce résultat, on peut conclure que la zone d'étude est caractérisée par un climat sec où l'irrigation est souvent indispensable.

4.2 Quotient pluviométrique d'Emberger

Parmi les indices bioclimatiques utilisés en Méditerranée, on distingue l'indice bioclimatique d'Emberger « Q ». Il exprime la sécheresse globale d'un climat en comparant la dépense en eau (évaporation et transpiration) au gain (précipitation) par le rapport (PE/λ) dans la quel l'évaporation est exprimée par une fonction de la température. L'équation (II.2) définitive du quotient Q est comme suite (Babaousmail et Bayahmed, 2011):

$$Q=2000 \times P/(M2-m2) \dots \dots \dots (II.2)$$

Avec :

Q: Coefficient pluviométrique d'Emberger.

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Moyenne des températures maxima du mois le plus chaud ($^\circ\text{C}$).

m : moyenne des températures minima du mois le plus froid ($^\circ\text{C}$).

Dans notre cas : $P= 518.6$ mm $^\circ\text{C}$, $M = 33.38+273 =306.6$ $^\circ\text{C}$,
 $m=4.92+273=277.9^\circ\text{C} \Rightarrow Q= 61.87$

D'après le diagramme bioclimatique d'Emberger (Figure 17), notre zone d'étude est située dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver doux.

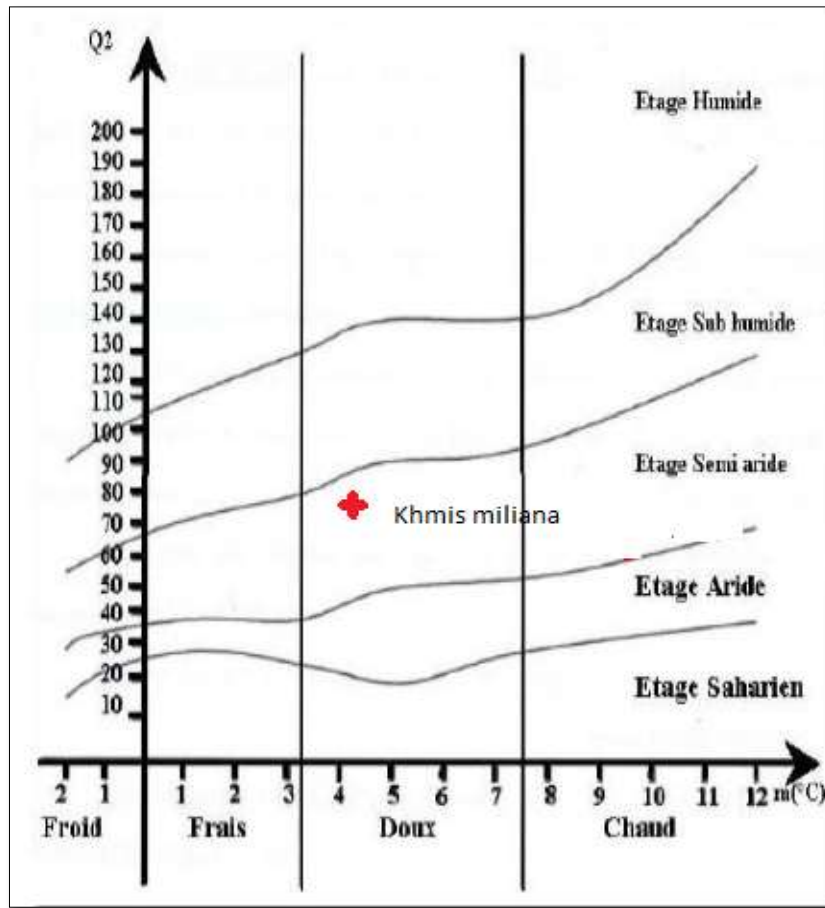


Figure 17 : Position de la station de Khemis Miliana sur le climagramme pluviométrique d'Emberger.

4.3 Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Une combinaison des données pluviométriques et des températures est très intéressante pour caractériser l'influence du climat sur la région. On doit à Bagnouls et Gausсен (1953) une méthode simple et efficace de discrimination entre la saison sèche et la saison pluvieuse : le critère $P = 2T$

Ce diagramme (Figure 13, Tableau 18) permet de fixer le début et la fin d'une période sèche. Ainsi, pour la zone d'étude, la durée de la période sèche est de 6 mois environ par an, soit un indice xérothermique de Gausсен de 182 j/an.

Tableau 13 : Précipitations et températures moyennes mensuelles de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moyenne
Pluie (mm)	67,18	62,98	58,62	51,57	41,85	14,32	4,48	12,41	29,44	44,60	67,05	64,06	518,56
T (°C)	8,56	9,24	11,70	14,29	18,18	22,92	26,62	26,82	22,92	18,46	13,12	9,79	16,93

Source : ANRH, 2018

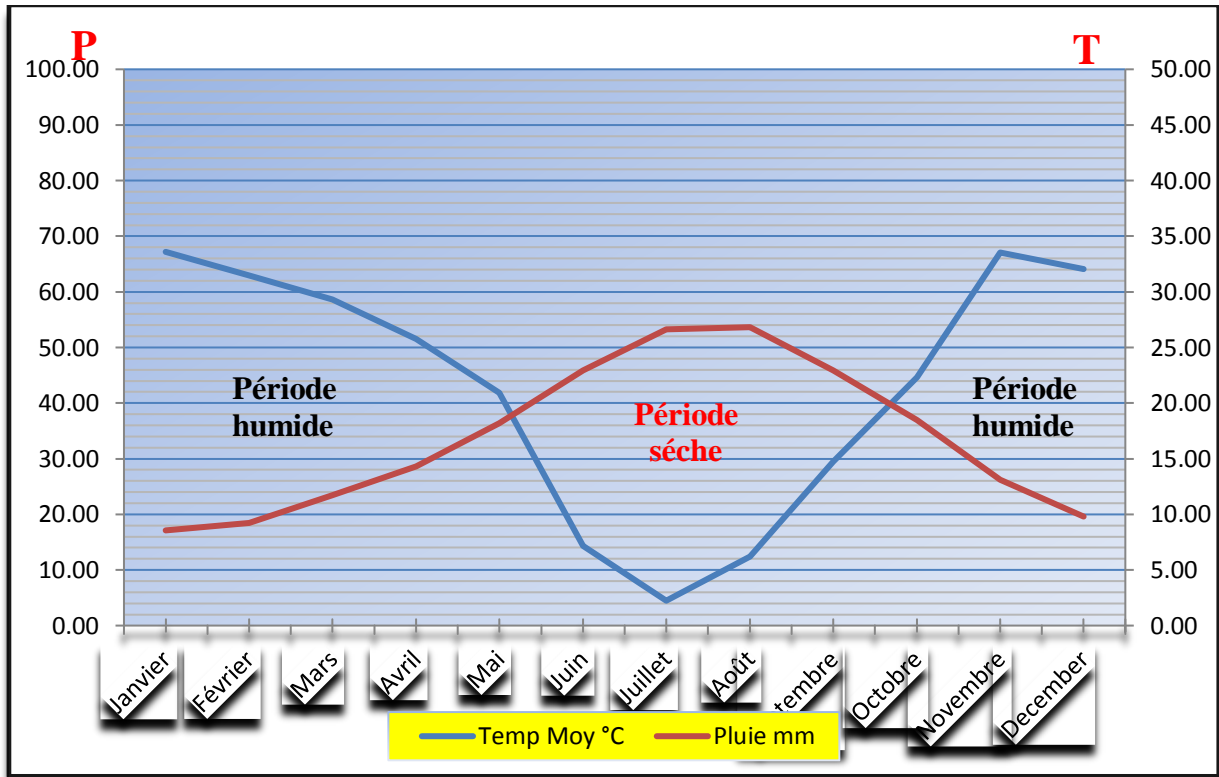


Figure 18 : Diagramme Ombrothermique (P=2T) de la station de Khemis Miliana (1981-2018).

Chapitre III :
Matériel et méthodes

Site expérimental

1. Situation géographique

L'expérimentation a été programmée au niveau de la serre de la station expérimentale de l'université Djillali Bounaama (Khemis Miliana) durant l'année universitaire 2019/2020. Cette station se trouve sur une altitude de 289 mètres.

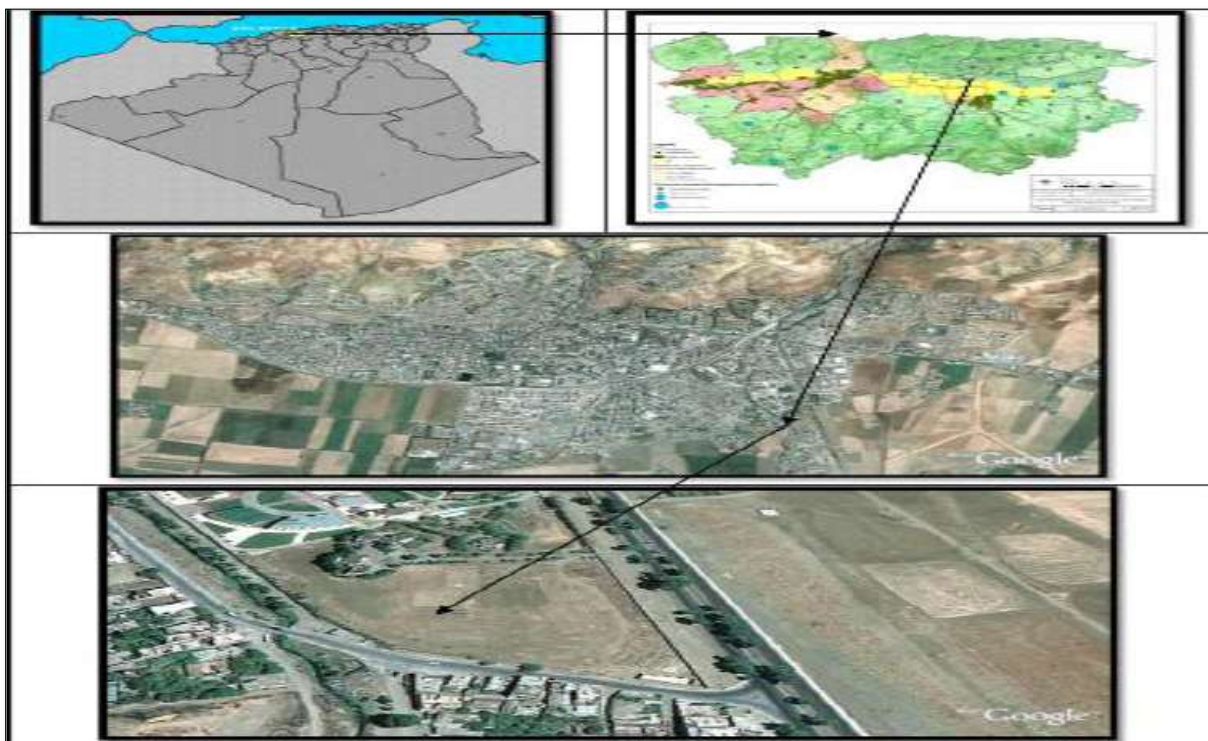


Figure 19 : Localisation de la station expérimentale. (Source : Google earth, 2020)

2. Description et de la serre d'étude

Notre expérience a été réalisée dans une serre chapelle composée par secteur contient l'expérience des cultures hors sol de la fraise, laitue et tomate.

- Superficie de la serre 52.08 m².
- Nombre d'ouvertures verticales : 04.
- Nombre d'ouvertures latérales pour humidifier la serre : 01.
- Hauteur 2.90 m.
- Citerne de hauteur 2.50 m.
- Système d'aération (1 ventilateur).

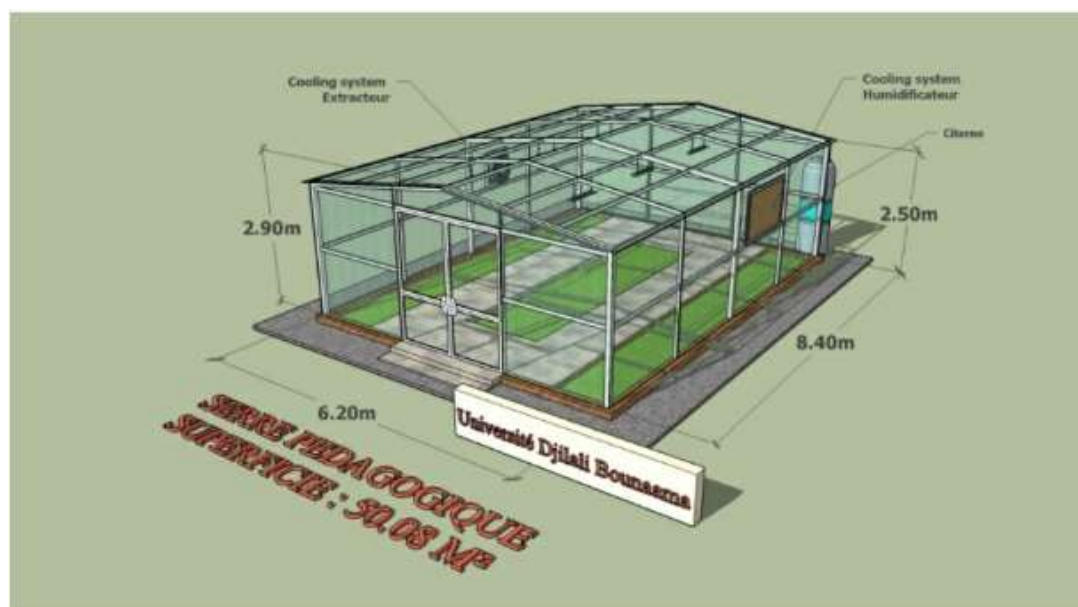


Figure 20 : Dimensionnement de la serre pédagogique

3. Climat dans la serre

Le climat spontané à l'intérieur de la serre dépend essentiellement du climat extérieur, des caractéristiques physiques de l'air intérieur, de la forme de la serre, du volume de l'abri, son orientation et des qualités physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisée.

Les principaux facteurs du milieu interne d'une serre, qui sont modifiés par rapport à l'extérieure sont : la lumière, la température, l'humidité et les concentrations des gaz (CO_2 , O_2)

3.1. Luminosité

Les conditions d'éclairage à l'intérieure de la serre sont sous l'étroite dépendance du climat lumineux naturel, la meilleure utilisation de ce climat naturel sera liée au choix des matériaux de couverture ainsi que les conditions de leur mise en œuvre (structure, forme et orientation des serres) ont une grande influence sur l'utilisation raisonnable de ce climat nature (Adam & Adam, 2018).

3.2. Température

La température de l'air est prise comme résultante du bilan d'énergie s'établissant sous serre.

- Pendant la nuit, l'atténuation de déperdition d'énergie par rayonnement infrarouge limite le refroidissement nocturne ; dans le cas des nuits particulière et en absence de turbulence à l'intérieur de la serre ce phénomène peut entrainer des températures plus marquées ; on parle alors de l'inversement de température.
- Pendant la journée, l'effet conjugué de piégeage des apports radiatifs solaire et de

Réduction des échanges convectifs conduisent à une élévation de température excessive. Il est donc nécessaire d'intervenir en augmentant la vitesse de renouvellement de l'air soit par aération statique soit par ventilation dynamique (Youcef, 2001).

3.3 Humidité

La vapeur d'eau produite lors du phénomène évaporatoire sous serre peut être soit évacuée par le renouvellement de l'air, soit condensée sur les parois ou sur la végétation lorsque la température de ces surfaces est inférieure à la température du point de rosée de l'air de la serre. En résumé, pendant la nuit, la serre étant fermée, l'humidité relative de l'air y est élevée, des condensations se produisent sur les parois et peuvent tomber sur la végétation créant ainsi une condition favorable au développement des maladies cryptogamiques (bactéries végétative vivant en milieu humide), l'élévation de la température de l'air peut déterminer un abaissement exagéré de l'humidité relative et provoque un véritable stress hydrique au niveau de la végétation (Youcef, 2001).

4 Matériel utilisé

a) Matériel végétatif

Le matériel végétal choisi pour notre expérience est la tomate (*solanum Lycopersicum* MILL.), la laitue (*lactuca Sativa*) et le fraisier (*Fragaria ananassa* Duch)

5 Calcul du bilan hydrique

Pour comprendre réellement comment les besoins des plantes évoluent, une estimation du bilan hydrique semble être la solution la plus accessible. Il s'appuie sur les informations liées à l'offre en eau (réserve utile), à la demande par la culture (conditions climatiques, évapotranspiration et coefficient culturaux), aux apports (irrigation) et aux pertes (drainage) (Chambre Régionale d'Agriculture PACA, 2012). Le bilan s'écrit ainsi :

$$RU = I - (ETM - D)$$

Avec **RU (mm)**, la variation de réserve utile entre 2 dates, **I (mm)** l'irrigation, **ETM (mm)** l'évapotranspiration maximale, et **D (mm)** le drainage. L'évapotranspiration maximale (**ETM**) correspond à l'évapotranspiration d'une espèce en conditions hydriques non limitant :

$$ETM = ET_0 * Kc$$

Avec **ETM (mm)**, **ET₀ (mm)** est l'évapotranspiration potentielle, et **K_c** le coefficient cultural. L'**ET₀** est couramment calculée à partir de l'équation de Penman-Monteith, qui tous les paramètres qui concernent les échanges d'énergie correspondant à l'évapotranspiration (**ET₀**) (Lage et El Mourid, 1996).

$$(2) ET_0 = \frac{\Delta(Rn-G) + \rho_a C_p (\delta_e) g_a}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_s}\right)\right) L_v}$$

- Δ = taux de variation de l'humidité spécifique
- R_n = irradiance nette (W/m^2)
- G = flux de chaleur du sol (W/m^2)
- ρ_a = densité de l'air à pression constante (kg/m^3)
- C_p = capacité thermique spécifique de l'air ($J/kg/K$)
- δ_e = humidité spécifique (Pa)
- g_a = conductance atmosphérique (m/s)
- g_s = conductance de surface (m/s)
- γ = constante psychrométrique
- L_v = chaleur latente volumétrique de vaporisation (MJ/m^3)

L'ET₀ est donc modifiée par des facteurs abiotiques, mais également des facteurs biotiques que l'on retrouve, en partie grâce aux coefficients culturaux propres à chaque culture (Calanca, 2010). La difficulté de la méthode de calcul du bilan hydrique reste que les résultats ne prennent pas forcément en compte tous les facteurs culturaux et environnementaux. C'est pour cela qu'il est intéressant de procéder à un suivi de la culture par le biais de l'état hydrique du sol, mesuré à l'aide de tensiomètres (Monteny, 1972).

Les informations qu'ils apportent sur le potentiel matriciel d'un sol ont ainsi permis de déterminer des seuils d'irrigation pour un rendement optimal (No & Academic, 1991).

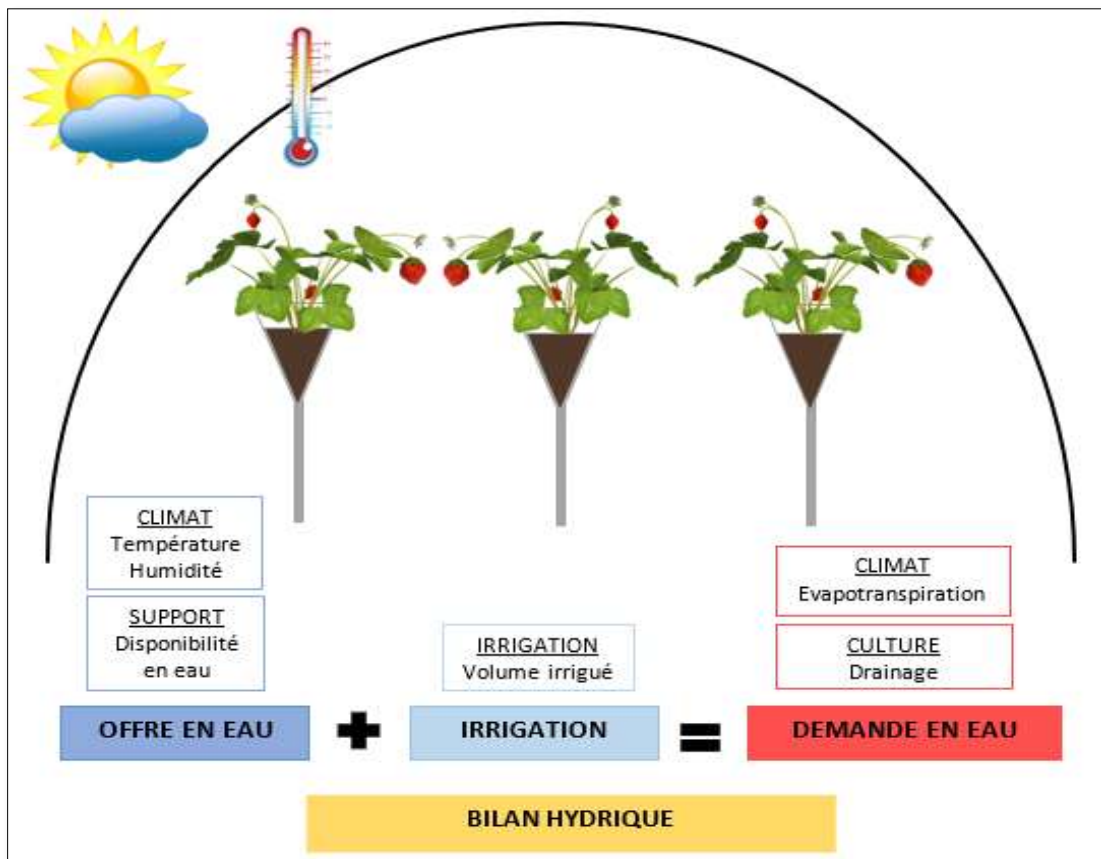


Figure 21 : Schématisation de la méthode de calcul du bilan hydrique en fonction des éléments du système.

6. Fertirrigation

2.4 Composants et fonctionnement du système

Le système de fertirrigation doit être en adéquation avec les besoins directs de la plante. (Lieten, 2013).

- Un ou plusieurs réservoirs d'eau filtrée et mise sous pression (elle peut également être désinfectée lorsqu'il s'agit d'un recyclage d'eau de drainage).
- Des bacs dans lesquels sont préparées les solutions mères.
- Une machine de dosage pour l'injection des solutions et l'ajustement du pH.
- Des sondes pour contrôler le pH et la conductivité (CE) dans les bacs.
- Un ou plusieurs compteurs d'eau pour contrôler les injections.
- Des composants hydrauliques permettant l'acheminement de l'eau jusqu'aux cultures (pompes, vannes, goutteurs, tuyaux...).
- Un système de filtrage et recyclage des effluents (radiations UV et filtre à sable) lorsque le système fonctionne en circuit fermé (Lieten, 2013).

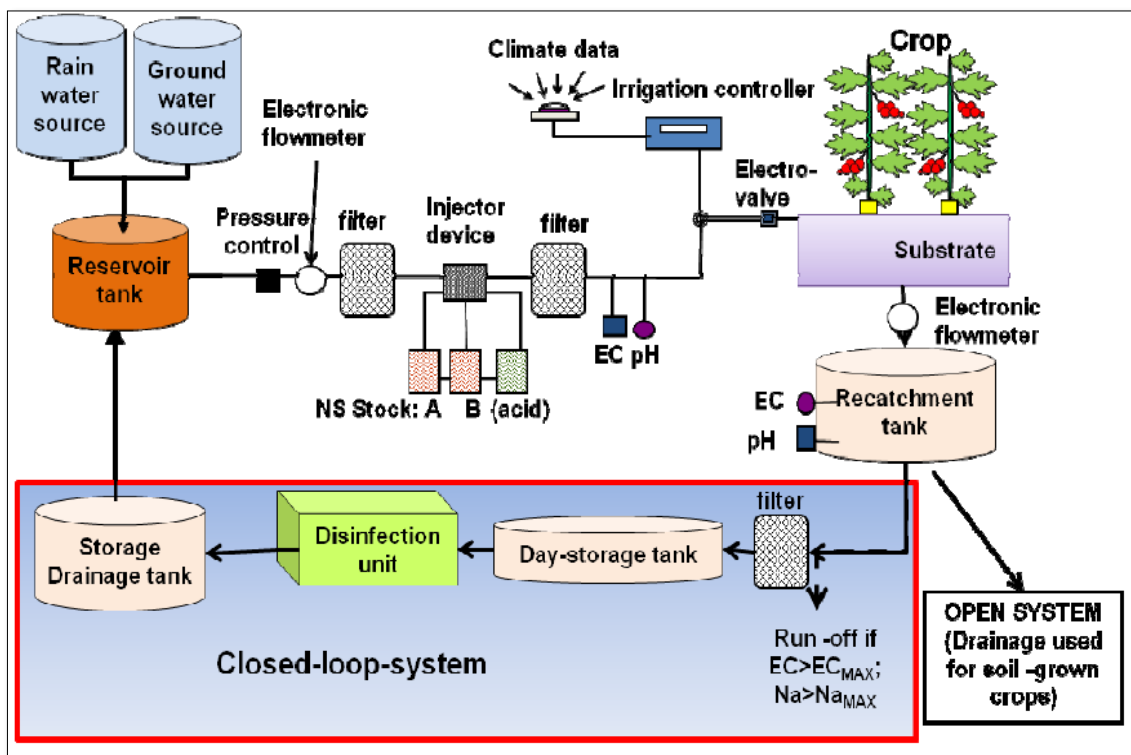


Figure 22 : Schéma d'une type installation pour une production hors-sol en circuit ouvert ou fermé (Pardossi et al., 2011).

La quantité de ces engrais doit être adaptée à la composition de l'eau de départ, et leur répartition dans les bacs, selon leur risque d'interactions (précipitations de certains éléments en présence de sulfates). La solution mère ne doit pas excéder une concentration de

10 kg d'engrais pour 100 l d'eau, c'est pourquoi il est important de connaître les équivalences des éléments présentés dans le tableau 14.

Tableau 14 : Correspondance entre un milliéquivalent (meq) et une masse d'ion ou d'élément minéral (mg)

Milliéquivalents	en milligrammes d'ions	en milligrammes d'éléments
1 meq NH_4^+	18 mg NH_4^+	14 mg N
1 meq NO_3^-	62 mg NO_3^-	14 mg N
1 meq H_2PO_4^-	97 mg H_2PO_4^-	71 mg P_2O_5
1 meq HPO_4^{2-}	48 mg HPO_4^{2-}	35,5 mg P_2O_5
1 meq SO_4^{2-}	48 mg SO_4^{2-}	16 mg S
1 meq K^+	39 mg K^+	47 mg K_2O
1 meq Ca^{2+}	20 mg Ca^{2+}	28 mg CaO
1 meq Mg^{2+}	12 mg Mg^{2+}	20 mg MgO

Le suivi de la culture doit être précis et doit tenir compte de l'ETP°, du transport, de l'absorption de l'eau et des ions, de la répartition des ions entre la solution et le support de culture, de la croissance et de l'extension des racines (Raviv&Lieth, 2008). Tous ces éléments sont surveillés en relevant régulièrement la CE de la solution et CE dans les eaux de drainage. Lorsque l'écart entre les deux dépasse les 0,3 mS/cm pendant plusieurs jours, il est conseillé d'ajuster la quantité de solution mère injectée, voire de changer complètement son équilibre.

6.2 Système d'irrigation

Le système d'irrigation utilisé est le goutte à goutte.

A. Calcul du réseau d'irrigation goutte à goutte (substrat)

Tableau 15 : Calcul du réseau goutte à goutte

Indice	Valeur
Besoins en eau mensuel (plus haut)	B =161 .52mm
P : humidité du sol	P =11%
Fr : la fréquence d'irrigation	Fr =1jours
D_p : dose net	Dp =78.40mm
Dose réel	Dr =112.54mm
Dose brut	Db =138.94mm
Temps d'arrosage quotidien	Dj =1h /jour
Le nombre de plants par rampe	N plantes =14
Le nombre de plants par rampe	Ng =28 goutteurs
Le nombre de rampe	Nr =11 rampes
Ecoulement de la rampe	Qr =56 l/h
Diamètre de la rampe	Dn =6 mm
Ecoulement de porte_ rampe	Qpr =168 l/h
Diamètre de porte rampe	Dn = 8 mm

7. Besoin en eau des cultures

Les besoins en eau varient selon les conditions climatiques eux aussi au cours de la période de production. La période la plus importante commence dès la floraison pour s'étirer sur toute la durée de mûrissement des fruits. En culture hors-sol, la réserve utile des sols (substrat) est très amoindrie par le faible volume des sacs alors que la physiologie et les besoins des cultures restent inchangés. Du fait de son système racinaire superficiel, de son importante surface foliaire, et de la forte teneur en eau dans ses fruits ; est surtout le fraisier est rapidement sensible au manque d'eau.

7.1 Calcul des besoins brut

C'est le volume d'eau d'irrigation exprimé en mm/j, nécessaire en pratique (compris les pertes et les besoins de lessivage mais à l'exclusion de la contribution des autres ressources).

La formule employée est :

$$B_{brut} = B_{net} \times E_f$$

Avec : E_f : l'efficacité du réseau.

L'estimation de l'efficacité d'un réseau d'irrigation dépend de l'efficacité du réseau, du transport et de l'uniformité de distribution. Dans notre cas, nous avons considéré une efficacité globale de 0,75.

Tableau 16 : Besoins en eau d'irrigation de la fraise

Fraise									
mois	Peff(mm)	ETP(mm/mois)	Z(m)	RFU_THEO	RFU_REEL	KC	ETM	B(mm)	Bbrut
Septembre	14,59	151,14	0,45	58,80	0,00	0,40	60,46	45,87	48,28
Octobre	21,84	91,76	0,35	45,73	19,60	0,40	36,70	0,00	0,00
Novembre	37,14	49,50	0,35	45,73	15,24	0,40	19,80	0,00	0,00
Décembre	35,31	35,03	0,45	58,80	15,24	0,50	17,52	0,00	0,00
Janvier	42,41	46,81	0,45	58,80	19,60	0,50	23,41	0,00	0,00
Février	34,86	55,16	0,45	58,80	19,60	0,50	27,58	0,00	0,00
Mars	32,21	84,94	0,45	58,80	19,60	0,70	59,46	7,64	8,05
Avril	23,96	114,00	0,45	58,80	19,60	0,70	79,80	36,24	38,15
Mai	15,72	157,17	0,45	58,80	19,60	0,90	141,45	106,13	111,72
Juin	6,06	176,67	0,45	58,80	19,60	0,80	141,34	115,68	121,76
Juillet	1,11	212,35	0,45	58,80	19,60	0,60	127,41	106,70	112,32
Août	3,42	209,16	0,45	58,80	19,60	0,40	83,66	60,64	63,83

Tableau 17 : Besoins en eau d'irrigation de la Laitue

Laitue									
mois	Peff(mm)	ETP(mm/mois)	Z (m)	RFU_THEO	RFU_REEL	KC	ETM	B(mm)	Bbrut(mm)
Septembre	14,59	151,14	0,20	26,13	4,36	1,05	158,70	139,76	147,11
Octobre	21,84	91,76	0,25	32,67	8,71	1,00	91,76	61,21	64,43
Novembre	37,14	49,50	0,00	0,00	10,89	0,00	0,00	0,00	0,00
Décembre	35,31	35,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Janvier	42,41	46,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Février	34,86	55,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	32,21	84,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Avril	23,96	114,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	15,72	157,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Juin	6,06	176,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Juillet	1,11	212,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Août	3,42	209,16	0,10	13,07	0,00	0,75	156,87	153,45	161,52

Tableau 18 : Besoins en eau d'irrigation de la Tomate

Tomate									
Mois	Peff(mm)	ETP(mm/mois)	Z(m)	RFU_THEO	RFU_REEL	KC	ETM	B(mm)	Bbrut(mm)
Septembre	13,41	151,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Octobre	23,83	91,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Novembre	35,27	49,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Décembre	36,68	35,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Janvier	40,26	46,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Février	36,43	55,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	34,09	84,94	0,70	91,47	0,00	0,50	42,47	8,38	8,83
Avril	24,15	114,00	0,90	117,60	30,49	0,85	96,90	42,26	44,49
Mai	16,99	157,17	1,20	156,80	39,20	0,55	86,44	30,25	31,84
Juin	6,85	176,67	1,20	156,80	52,27	1,15	203,17	144,06	151,64
Juillet	1,885973	341,93	0,00	0,00	52,27	0,90	307,74	0,00	0
Août	3,630882	322,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

Tableau 19 : Récapitulatif des besoins en eau pour la serre

	Fraise	Laitue	Tomate	MAX	TOTAL
Septembre	48,28	147,11	0,00	147,11	195,40
Octobre	0,00	64,43	0,00	64,43	64,43
Novembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Décembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Janvier	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Février	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	8,05	0,00	8,83	8,83	16,87
Avril	38,15	0,00	44,49	44,49	82,64
Mai	111,72	0,00	31,84	111,72	143,56
Juin	121,76	0,00	151,64	151,64	273,40
Juillet	112,32	0,00	0,00	112,32	112,32
Aout	63,83	161,52	0,00	161,52	225,36

Après l'analyse et la comparaison entre les besoins en eau totaux pour chaque cas, on prend le débit spécifique de la somme des cultures.

On déduit alors que le mois de pointe pour les cultures sous serre est de 273,40 mm au mois de juin.

8. Calcul du débit spécifique et débit caractéristique

8.1 Calcul du débit spécifique

Les débits spécifiques sont définis d'après les besoins en eau de chaque culture évaluée précédemment à partir de la répartition culturale. La dose d'arrosage de la consommation de pointe est donnée sous forme de débit permanent fourni 24 heures sur 24 afin d'assurer les besoins de la consommation mensuelle.

$$q = \frac{B_{net} \cdot 10 \cdot 1000}{N \times T \times 3600 \times K} \text{ (l/s/ha)}$$

B_{net} : besoin net du mois de pointe en mm/mois.

T : nombre des heures d'irrigation=24h

N : nombre de jours du mois de pointe =30 jours

K : Coefficient d'efficience globale du système d'irrigation≈ 0.75

8.2 Evaluation du débit caractéristique

Le calcul des débits caractéristiques permet de définir le débit maximum que le système de desserte aura à fournir pour l'irrigation de chaque parcelle, déterminé en multipliant le débit de pointe par la surface agricole utile, voir la formule suivante :

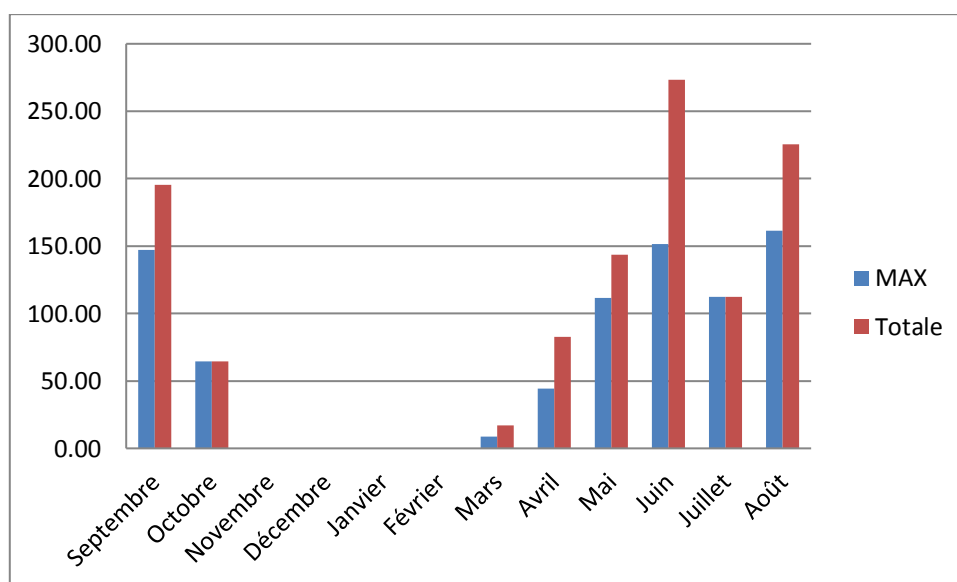
$$Q_{car} = q_s \cdot S$$

q_s : débit spécifique de mois de pointe en (l/s/ha).

S : la superficie nette à irriguer.

Tableau 20 : Estimation des volumes d'irrigation

Culture	Cultures sous serre
Surface occupée (m ²)	50,08
Besoin mensuel (mm)	273,40
Besoin brute (mm)	161,52
Q spécifique (l/s/ha)	1.05
Q caractéristique (l/s)	0.0064
Volume (m ³)	8,1
Volume (l)	8089,1
Volume (l/j)	260,9
Fréquence de remplissage des citernes (j)	7
Volume (l/7j)	1826,6
Citerne 2000l	1

**Figure 23** : Récapitulatif des besoins en eau des cultures sous serre

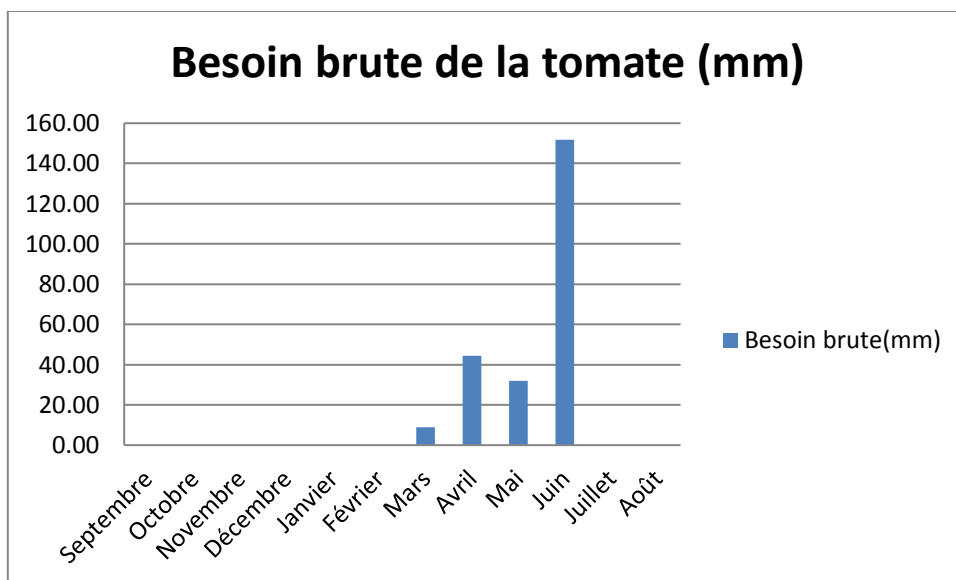


Figure 24 : Besoin en eau de la tomate

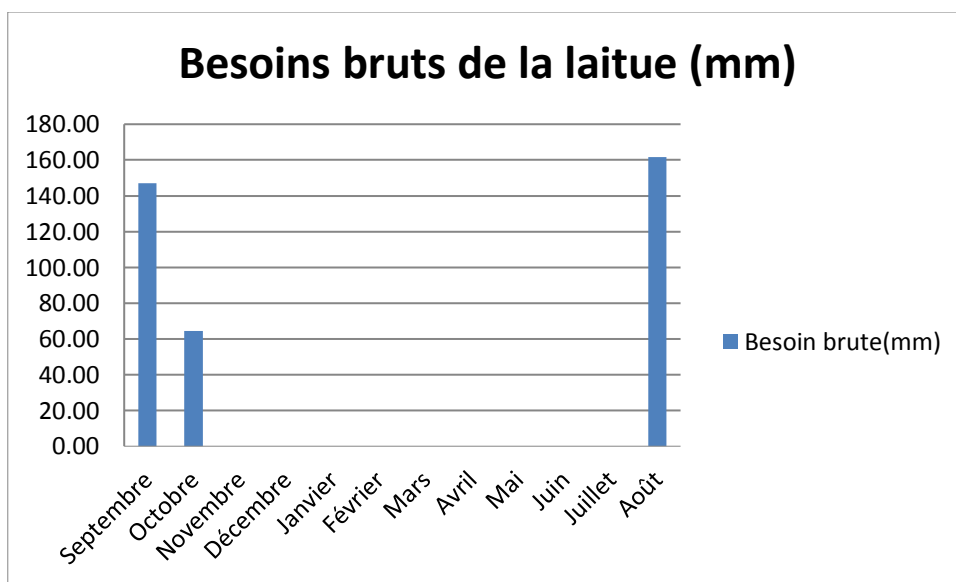


Figure 25: Besoin en eau de la laitue

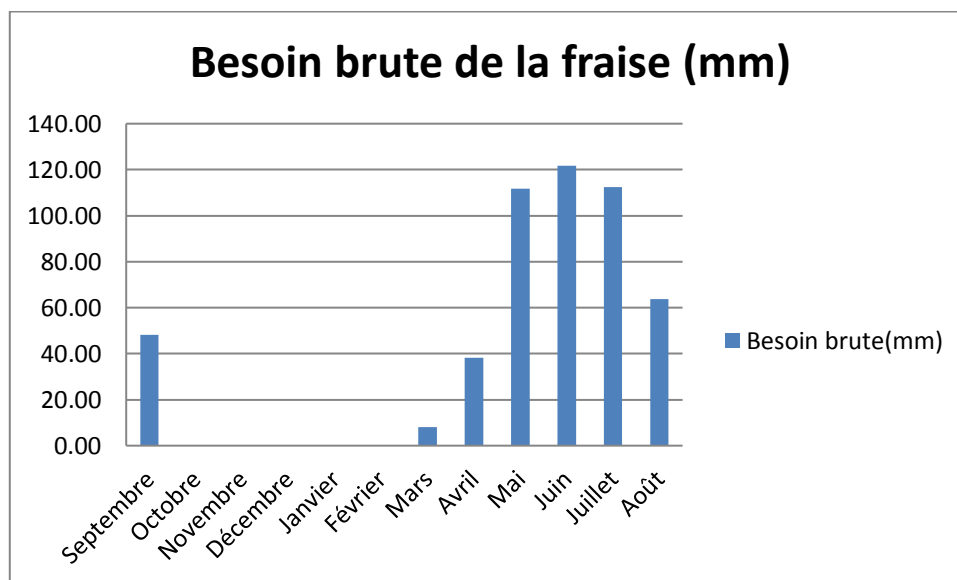


Figure 26: Besoin en eau de la fraise

❖ **Interprétation**

On observe que les besoins en eau des cultures varient selon les conditions climatiques eux aussi aux cours de la période de production, la demande en eau de la tomate et fraisier la plus élevée est de 151,64 mm, et 121,76 mm respectivement au mois de Juin.

Par contre le mois de pointe de la laitue est Août avec une valeur de 161,52 mm.

9. Nutrition des cultures : Fraise –Laitue –Tomate

Composition des solutions nutritives

N.B La composition de la solution nutritive d'une culture, variée selon le matériel utilisé (substrat) et leur cycle de développement, et dépend les conditions climatiques.

Tableau 21 : composition de la solution nutritive des cultures sur un substrat inerte en mmol/l et en ppm.

		Tomate	Laitue	Fraise		Tomate	Laitue	Fraise
pH		5.5-6.0	5.5	5.5-6.0		5.5-6.6	5.5	5.5-6.0
EC	mS/cm	2.6	2.2	1.6	mS/cm	2.6	2.6	1.6
Na	mmol/l	<8	<6	<4	ppm	<184	<138	<184
Cl		<8	<6	<4		<284	<213	<284
HCO ₃		<0.05	<0.5	<0.5		<6	<6	<6
N-NH ₄	mmol/l	1.2	1	1	ppm	17	14	14
K		9.5	9.5	4.8		371	371	188
Ca		5.4	1	3.6		216	180	144
Mg		2.4		1.5		58	24	36
N-NO ₃	mmol/l	15	16	12	ppm	210	224	168
S		4.4	2	1.5		141	64	48
P		1.5	1.5	1		47	47	31
Fe	μmol/l	15	40	30	ppb	840	2240	1680
Mn		10	7	10		550	385	550
Zn		5	7	7		327	458	458
B		30	40	10		324	432	108
Cu		0.75	1	0.75		48	64	48
Mo		0.5	1	0.5		48	96	48

Chapitre IV :
Résultats et
discussions

En raison de la crise sanitaire liée à la pandémie de COVID19, il ne nous a pas été possible de procéder aux expérimentations nécessaires à l'aboutissement. C'est pourquoi nous présenterons dans ce chapitre une synthèse bibliographique de quelques travaux sur l'hydroponie dans le monde et en Algérie. Ces travaux ont été sélectionnés pour leur pertinence, leur récence ainsi que leur diversité (Tableau 22).

Tableaux 22 : Travaux de recherche sur l'hydroponie

Auteur	Lieu de recherche	Superficie	But de la recherche	Titre de l'article	Année
Hannachi A, Bourefis S, Zerkout M.	Laboratoire de l'analyse du sol de l'université 20 aout 1955 à Skikda	Non précisée	Etude de la valorisation des eaux usées et leur effet sur la croissance et le développement d'une culture hydroponique de la tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Essai de valorisation des eaux usées traitées en culture hydroponique	02 juin 2016
Centre de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine (CRETAU) et le Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB)	Toit du Palais des congrès de Montréal (5e étage) aux coordonnées GPS : 45.504615, - 73.560791.	Parcelle de fraises de 50 m ²	Produire des fruits sur une longue période, trois plantations (trayplants) ont été réalisées au cours de la saison 2018.	Essai de deux systèmes de production de la fraise sur toit en milieu urbain	Mars 2019
Tamanna A.,Atsushi Y.,Takahiro H., Munetaka H.	Laboratoire de floriculture, ministère de l'agriculture, Kindai Université de Nara, Japon	Non précisée	Comparer la croissance de la laitue (<i>Lactuca sativa</i> 'Sunny laitue') plantes cultivées en hydroponie à l'aide de PFS ou de laine de roche avec une solution nutritive au goutte-à-goutte la fertirrigation et la	Drip fertigation enhances the growth of hydroponic lettuce (<i>Lactuca sativa</i>) using polyester fiber substrate	12 juillet 2020

			fertirrigation de fond		
Walas Permanhane Sturiao, Herminia Emilia Prieto Martinez, Leonardo Araujo Oliveira, Caroline Nery Jezler, Luana de Jesus Pereira, Marília Contin Ventrella, Carla do Carmo Milagres	Serre du département d'agronomie de l'université fédérale de Vicosa, au Brésil	Superficie Non précisée situé à 20°45', 01400 S ; 42°52'05.500 W, 648 m	Evaluer les effets des doses de Ca sur l'anatomie, la biométrie et l'état nutritionnel de l'hybride de tomate cerise BRS Iracema cultivé dans un système hydroponique	Deficiency of calcium affects anatomical., biometry and nutritional status of cherry tomato	15 Mai 2020
Laura Chekli, Jung Eun Kim, Ibrahim El Saliby, Youngjin Kim, Sherub Phuntsho, Sheng Li, Noredine Ghaffour, TorOve Leiknes, Ho Kyong Shon		Non précisée	Réutilisation durable des eaux usées en utilisant des engrais tirés Osmose (FDFO) par dilution osmotique d'une solution nutritive commerciale pour L'hydroponie, une technique largement utilisée pour la culture de plantes sans terre	Fertilizer drawn forward osmosis process for sustainable water reuse to grow hydroponic lettuce using commercial nutrient solution	9 Mars 2017

Résultats et discussion

Les résultats des essais menés sur les cultures hydroponiques du petit pois, le haricot et la tomate au cours de la germination et la croissance pour la conductivité électrique montre que les plantes plongées dans l'eau distillé donnent une conductivité électrique faible (absence des sels), les plantes plongées dans l'eau usée traitée, la conductivité électrique supérieure par rapport au premier essai à cause la présence des sels à quantité faible. Les

plantes plongées dans l'eau usée traitée permettent une hauteur de tige plus importante par rapport aux plantes plongées dans l'eau distillée à cause de la présence d'une quantité importante des sels minéraux. Le malheur de l'hydroponie est de rassembler sous un même terme des techniques économes en eau qui donnent des produits savoureux à haute valeur nutritive, et des pratiques tout à fait désastreuses pour l'environnement, qui nécessitent beaucoup trop d'eau pour obtenir des produits totalement dépourvus d'intérêt, tant du point de vue nutritionnel que de celui de la saveur.

Les plantes poussent toujours bien quand elles ont exactement ce dont elles ont besoin, quand elles en ont besoin et dans les quantités précises dont elles ont besoin (Hannachi et al, 2016).

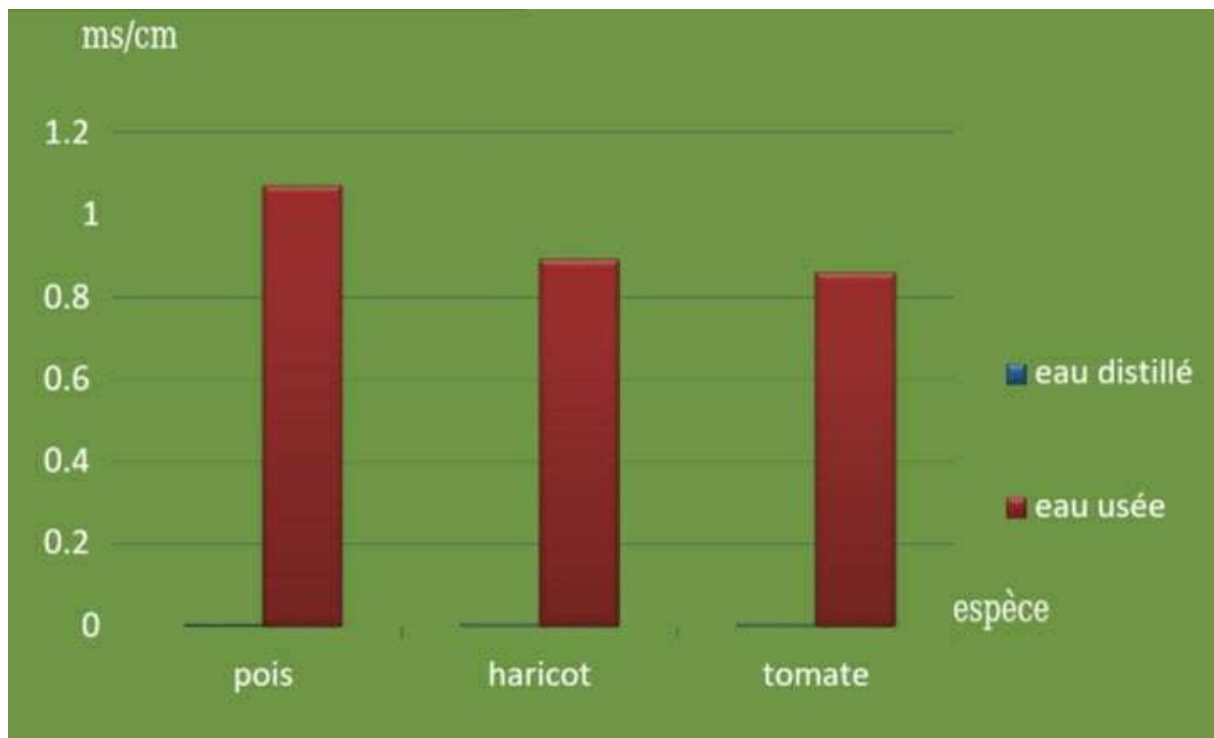


Figure 27 : La variation de la conductivité électrique chez les trois espèces dans les deux essais.

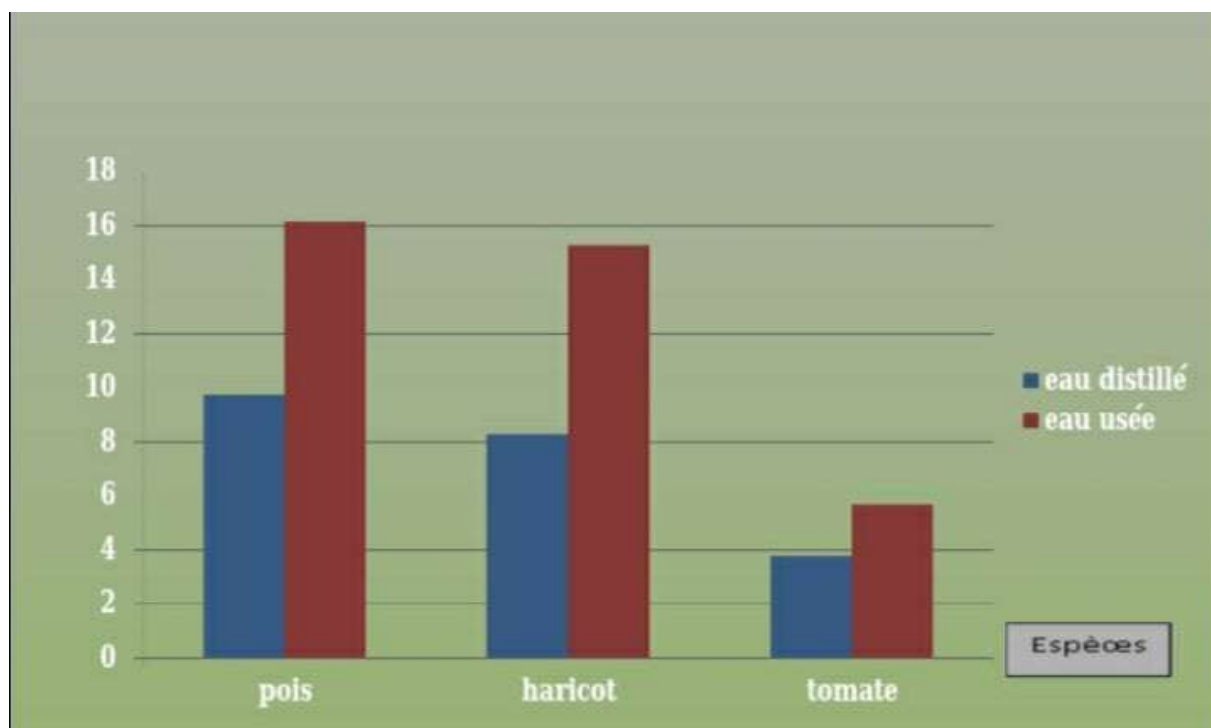


Figure 28 : La variation de la hauteur de tige chez les trois espèces dans les deux essais

Le facteur éolien a également influencé le mouvement de la solution nutritive du système hydroponique ; notamment, la présence constante du vent a fait obstacle à la circulation permanente de l'eau, une caractéristique essentielle du système NFT.

La circulation de la solution nutritive a donc été effectuée de façon manuelle, entre trois à cinq fois par jour. Des plants a été la température élevée. La chaleur excessive ainsi que la faible vitesse du vent ont favorisé la transpiration excessive des plants se traduisant par une forte mortalité des fraisiers.

Les récoltes ont débuté en moyenne 30,7 jours après la plantation et la maturation des fruits a été la plus rapide (27 jours) à la deuxième récolte. Cette précocité est probablement due aux températures élevées du mois de juillet. Le nombre de jours de récolte a varié entre 21 et 30 jours, et la période la plus longue (30 jours) a été à la troisième livraison

Pour l'ensemble de la saison, le système avec terreau a produit davantage de fruits que le système hydroponique, respectivement 57,23 kg et 32,18 kg. Pour les deux systèmes de production (CRETEAU,2019).

Discussion :

Ce projet a démontré que la culture de fraises en milieu urbain est envisageable, mais seulement à certaines périodes de l'année. Les récoltes de la première rendement (kg/m²) de la fraise au m² selon différents essais troisième livraison représentaient plus de 84% du rendement total de la saison puisque les températures très élevées enregistré : es aux mois de juillet et d'août ont freiné la croissance et la fructification des plants. Malgré une irrigation soutenue, le taux de mortalité élevé causé par la chaleur a entraîné une baisse substantielle de rendement pour les plants de la deuxième plantation.

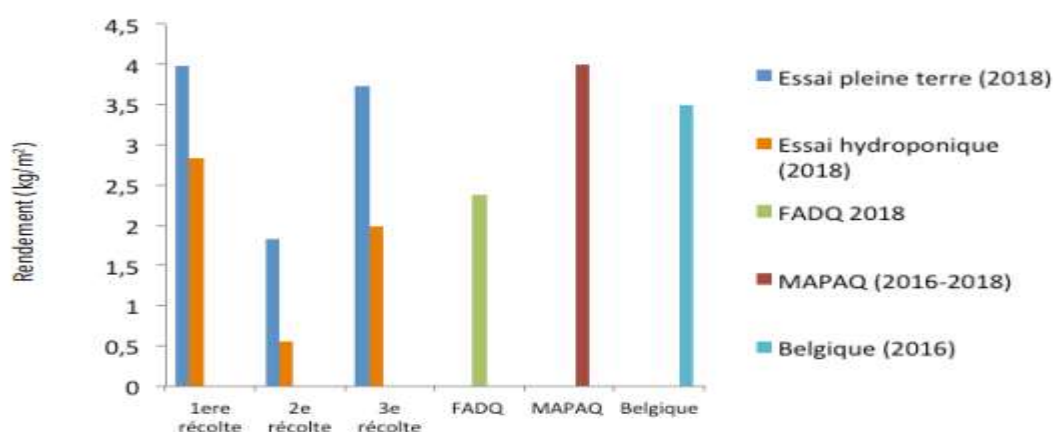


Figure 29 : Rendement (kg) de la fraise au m² selon différents essais

Tamanna et al (2020) ont montré dans leur expérience que la fertigation au goutte-à-goutte a augmenté la croissance visible de la laitue et a considérablement augmenté le poids frais des pousses et le nombre de feuilles par rapport aux deux autres traitements pour le premier et le troisième essai ($p \leq 0.01$). Les résultats du deuxième essai donnent du poids dans le goutte-à-goutte et la fertigation de fond n'étaient pas significativement différentes mais dans la fertigation au goutte-à-goutte, le poids des pousses fraîches a augmenté par rapport à la fertigation de fond. Parmi les deux autres traitements, le contrôle avec apport d'air a entraîné des niveaux de croissance plus faibles que le témoin.

La différence n'était pas significative. Le volume visible de la racine et le poids et le volume à la récolte étaient également plus élevés avec la fertigation au goutte-à-goutte.

Bien que le poids des pousses fraîches n'ait pas été significativement différent entre de la fertilité, elle a eu tendance à augmenter lorsque la fertigation au goutte-à-goutte a été effectuée en utilisant la laine de roche comme milieu inerte.

Le taux moyen d'absorption d'eau par plante et par jour dû à la évapotranspiration était significativement plus élevé avec la fertigation au goutte-à-goutte.

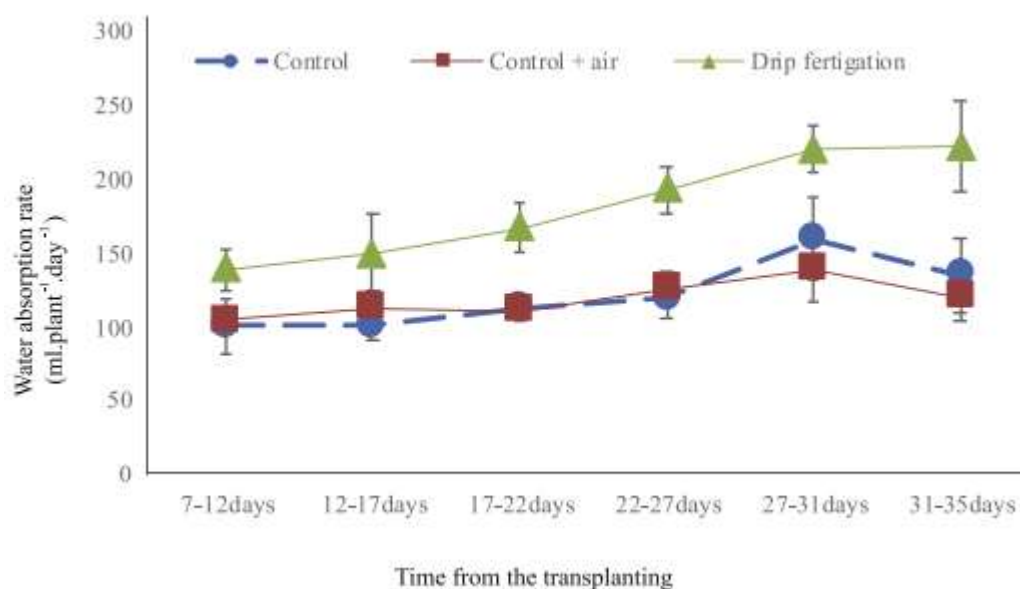


Figure 30: Analyse du taux d'absorption d'eau par plante et par jour pour la troisième réplique. Toutes les données représentées sous forme de moyennes et d'écart types ($n = 5$) pendant 5 ou 4 jours. La collecte de données a commencé à partir de 7 jours après la transplantation.

D'après Walas et al., (2020), les plantes de tomates cultivées avec une restriction de calcium (Ca) dans la solution nutritive, c'est-à-dire des traitements avec des concentrations de 0,5 et 1,5 mmol/L1 Ca pour les stades végétatif et reproductif respectivement, ont montré les symptômes de la carence en Ca qui sont devenus plus évidents dès le stade de la floraison.

Visuellement, les premiers symptômes observés chez les plantes sous les traitements étaient la couleur brune des racines, la réduction du volume des racines et réduction de la quantité de racines fines par rapport aux plantes cultivés sous les autres traitements.

En outre, les plantes déficientes en Ca, notamment celles de moins de 0,5 mmol/L1 Ca, présentait des symptômes visuels de carence caractérisés par développement réduit, bourgeons latéraux plus petits, avortement floral plus important, plus grand nombre de fruits avec une maturation précoce, plus des feuilles fragiles d'aspect cassant et des occurrences de mort les viroles des grappes, les bourgeons latéraux et les feuilles supérieures.

Ces caractéristiques font que les plantes sont moins productives et ont un cycle plus court (moins de 10 jours) que ceux cultivés avec les autres (3, 6 et 10 mmol/L Ca), qui ont montré un meilleur développement, sans manifestation de carence en Ca ni symptômes de toxicité, sous traitement de 6 mmol/L Ca.

Les résultats des enquêtes de Chekriet et al. (2017) à l'échelle pilote sont rassemblés dans la figure 31. Les figures 31a et 31b indiquent le flux d'eau, la pression osmotique de l'engrais commercial et le volume accumulé pendant les trois différentes étapes de l'opération pilote. Au cours de la phase 1 (c'est-à-dire que la diminution progressive du flux d'eau est liée à la dilution continue des engrais commerciaux puisque le flux d'eau et la pression osmotique DS suivent tous deux la même tendance. À la fin de la première étape, la pression osmotique de la solution hydroponique commerciale est tombée à 5,5 bars (correspondant à une conductivité de 8,6mS/cm) tandis que le flux d'eau a diminué à 5,9 LMH. La pression supplémentaire de 2 bars appliquée pendant la phase 2 de l'opération FO a augmenté le flux d'eau initial de 57%. Il est intéressant de noter qu'au début de l'étape 3, une légère augmentation du flux d'eau (c'est-à-dire 18 %) a été observée, bien que la force motrice ait été similaire à celle de la fin de l'étape 2.

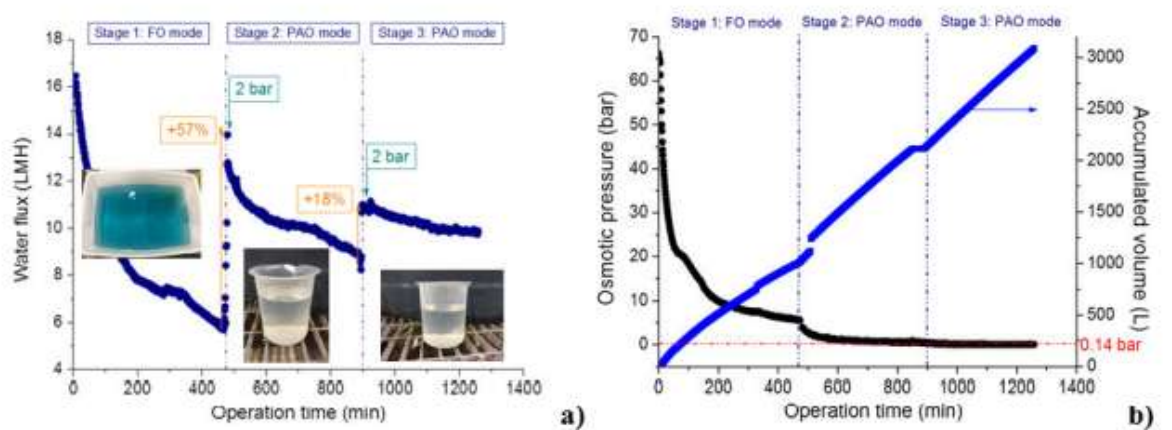


Figure 31 : Figure a et b le flux d'eau, la pression osmotique de l'engrais commercial et le volume accumulé pendant les trois différentes étapes de l'opération pilote.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but principal de cette étude est la mise en valeur de l'agriculture par la proposition de création d'un système hydroponique sans négliger tous les facteurs essentiels intervenant dans le choix du mode d'irrigation et fertigation, tel que les données climatiques hydrologique.

Dans ce mémoire, nous avons mis en évidence une marge de progression en termes de pilotage de l'irrigation et de la fertilisation. Les producteurs attendent en effet des conseils afin de piloter leur fertirrigation au plus près des besoins réels de leurs fraisiers. Cela passe donc par un suivi sérieux des quantités d'eau apportées en fonction de la période de production, mais également des besoins réels des plants sur la journée. Pour l'instant, il n'existe aucune restriction officielle à l'usage de l'eau pour l'irrigation. Toutes les parcelles de fraises sont irriguées grâce à des eaux de forages, ce qui n'implique aucun coût supplémentaire pour les producteurs sur la saison. La diminution de leurs apports, du point de vue de l'eau n'est donc pas leur priorité, même si certains experts ont montré que la consommation d'eau pour la fraise hors-sol est supérieure à celle d'un maïs irrigué sur la saison de production.

En revanche, les apports d'engrais et/ou de traitements qui sont liés à l'irrigation les interpellent de plus en plus. La législation sur l'emploi de produits phytosanitaires supprime des substances actives d'une année sur l'autre, et ne propose pas toujours de solutions alternatives. Si certains produits ou méthodes peuvent être remplacés par d'autres substances et des techniques moins nocives, elles seront plus coûteuses pour les producteurs. Il semble donc indispensable d'approfondir les connaissances sur la physiologie des plants (besoins réels), et le comportement des substrats (capacités de rétention), pour transmettre ces informations afin de mieux sensibiliser les professionnels.

Plus globalement, d'un point de vue environnemental, très peu de producteurs se sont lancés dans la récupération de leurs eaux de drainage, et encore moins dans leur recyclage. Si l'impact économique ne paraît pour l'instant pas être le principal levier d'action, une étude sur l'impact environnemental pourrait sans doute les amener à des conclusions plus convaincantes. Toutefois, n'oublions pas que cet état des lieux et les préconisations formulés dans ce rapport, ne sont que les prémices d'une étude plus approfondie, qui devra mettre en relation divers protagonistes.

*Références
bibliographiques*

Reference bibliographique

- Aures A, 2010. Généralité sur la tomate, production végétale production céréalière et fourragère, 2-3 p-p.
- Adam, Adam A. 2018. La production. In *Vino Vertias*, 135-136. <https://doi.org/10.4000/books.pum.7888>.
- Blanc D, 1987. Les cultures hors sol. ED. INRA. Paris. 409p
- Chouard P, Renaud V, 1961. Mise au point de cultures hydroponiques au Sahara : premiers résultats obtenus CR. Acad. Agr. Fr. 47p.
- Calanca P, Smith P, Holzhamper A, Ammann C, 2010. L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie- Recherche agronomique Suisse 2,4 (Brutsaert 1982), 176-183.
- Chekli L, Eun Kim J, El Saliby I, Youngjin K, Sherub P, Sheng Li, Ghaffour N, TorOve L et Ho Kyong S, 2017. Fertilizer drawn forward osmosis process for sustainable water reuse to grow hydroponic lettuce using commercial nutrient solution, 38P.
- Chambre Régionale d'Agriculture PACA, 2012. Référentiel des besoins en eau d'irrigation des productions agricoles de Provence-Alpes-Côte d'azur- pdf. Retrieved from : <http://docplayer.fr/28509630-refertiel-des-besoins-en-eau-d-irrigation-des-productions-agricoles-de-provence-alpes-cote-d-azur.html>.
- Djebaili S, 1978. Recherches phytoécologiques sur la végétation des hauts plaines steppiques de l'Atlas Saharien. Thèse de Doctorat, Languedoc, Montpellier, pp 299.
- Daget P, David P, 1982. Essai de comparaison de diverses approches climatiques de la méditerranéité, *Ecolog, méditer*. VIII (1-2), pp 33-48.
- Evhdal Y, 2012. Etude d'un système de refoulement des eaux usées de Sidi Benadda 2012 vers la STEP d'Ain Temouchent, Phase I, pp 13-15.
- Hannachi A, Bourefis S, et Zerkout M, 2016. Essai de volarisation des eaux usées traitées en culture hydroponique, 1p.
- He Y, Wetterhall F, Cloke H, Pappenberger F, Wilson M et Freer J, 2009. Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand meteorological applications, 101 (february), 91-101. <https://doi.org/10.1002/met>.
- Hatzilazarou S, Charizopoulos M, Papadopoulou-mourkidou E, Economou A, 2004. Le Carrefour de recherche d'expertise de transfert en agriculture urbaine (CRETAU) et le Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB), 2019. Essai de deux systèmes de production de la fraise sur toit en milieu urbain, 18 p.

- Lieten, 2013. Advances in strawberry substrate culture during the last twenty years in the Netherlands and Belgium. In: International Journal of Fruit Science. janvier 2013. Vol.13,84-90p. DOI 10.1080/15538362.2012.697024.
- Lieth J.H, Lorence R.O, 2019. Soilless culture: Chap 9: Irrigation soilless production, Second edition, Department of plant sciences,University of Californian,Davis,CA,United states,Elsevier B.V,40p.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00009-8>
- Lemay, Caron, Dorais et Pepin, 2012. Defining irrigation set points based on substrate properties for variable irrigation and constant matric potential devices in greenhouse tomato,Vol. 47, 12p.
- Large M, El mourid M, 1996. Besoins en eau quelques méthodes de gestion de l'irrigation au niveau de la parcelle du riz (oryza L) irriguésatavia (revue bibliographique) résumé requirements abstract : water practices for lowland Satavia.
- Merioua S.A, 2014. Phyto-écologie et éléments de cartographie de la couverture végétale cas : littoral d'AinTémouchent. Thèse de Doctorat Université de Tlemcen, p17.
- Mohamed K, Tarik H, Faiza H et Cheliff H, 2017. Impact de changement climatique sur ressources en eau dans la plaine de Khemis Kiliana (bassin versant du haut Cheliff) 01, 40-48.
- Montey B.A, 1972. Evapotranspiration de différents couverts végétaux en région méditerranéenne semi-aride, agricultural meteorology, 19-38p.
[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(72\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0002-1571(72)90005-2).
- Morard P, 1995. Les cultures végétales hors sol Ed. Lavoisier, 208p.
- Manual nutrient solution (Booklet),2016. Initiative of Akznobel,Eurofins,NMI, SOM. ; Yara.
- Noe P et Academic K, 1991. Evaporation, 91p.
- Odet,Musard, Wacquant, Puel et Alegot, 1989. Mémento fertilisation des cultures légumières.CTIFL. S.l. : s.n. ISBN 2-901002-65-X.
- Pardossi, Carmassi, Diara, Incrocci, Maggini et Massa,2011. Fertigation and substrate management in closed soilless culture [en ligne]. S.l. Università di Pisa. [Consulté le 14 mars 2020]. Disponible à l'adresse :https://www.wur.nl/upload_mm/8/c/0/aa4b4486-a9db429f8b03f19d4cec3ee6_Fertigation%20and%20Substrate%20Management%20in%20Closed%20Soilss%20Culture.pdf.
- Pesticide dissipation in the green house environmentduringhydroponiccultivation of gerbera ISHS acta horticulture : XXVI international horticultural congressexpandingroles for horticulture in improvinghumanwell-being and life quality, 639p.

Reference bibliographique

- Raviv, Lieth, 2008. *Soilless culture: theory and practice - Chap 9 : Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses*, First edition. Amsterdam Boston Heidelberg : Elsevier. ISBN 978-0-444-52975-6, p-p387-404.
- Simon S, Minatchy J, 2009. *Guide de la tomate hors-sol à La Réunion*, 186.
- Skiredj A, 2005. *La fertilisation de la tomate en hors sol : transfert des technologies en agriculture*, N° 125 A, APPT4-AGADIR.
- Snoussi S, 1980. *Caractérisation de quelques substrats disponibles dans la région d'Alger en vue de leurs utilisations en cultures hydroponiques*, Thèse Ing Agro INA, Alger, 67p.
- Silber A. et Bar-tal A, 2008. *Nutrition of Substrates-Grown plants*. In: M. Raviv and J.H. Lieth (eds) 'soilless Culture: Theory and Practice, Elsevier, 291-339p.
- Shankara N, Vanlidt de Jeude J, De gouffau M, Hilmi M et Vandam B, 2013. *culture hydroponique de la tomate pour les amateurs*, PROTA – fondation agromisa et CTA, wageningen, 2p.
- Sonneveld C, Voogt W, 2009. *Plant Nutrition of Greenhouse – Chap 13: Nutrition Management in Substrat Systemes*, Springer Science+ Business Media. B.V, p-p278-304. DOI :<https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6-13>
- Texier W, 2013. *L'hydroponie pour tous*, Mama Editions, 7 rue Pétion, 75011 Paris (France), 235p.
- Thiault J.F ; 2004. *La maîtrise de la culture hors sol*. Bulletin Détail, n° 215, ED.CTIFL, ISSN 0758-4334.
- Tamanna A, Atsushi Y, Takahiro H et Munetaka H, 2020. *Drip fertigation enhances the growth of hydroponic lettuce (Lactuca sativa) using polyester fiber substrate*, 7P.
- Urban L, 2010. *La production sous serre tome 2 l'irrigation fertilisante en culture hors sol*, Paris, 233p.
- Urban L, Urban I, 2010. *la production sous serre, Tome 1 : la gestion du climat deuxième édition*, TEC&DOC, 11, rue Lavoisier 75008 Paris, 25-41p.
- Urban L, 1997. *Introduction à la production sous serre (L'irrigation fertilisante en culture hors sol)*, ED. Lavoisier Tec & Doc, Paris, 210 p.
- Van Os E, Gieling T.H, Lieth J.H, 2008. *Technical equipment in soilless production systems*. In: Raviv, M, Lieth, J.H. Eds, *soilless Culture: theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, 157-207p.
- Vitre A, 2013. *Fondements & principes du hors-sol*, Doc v 3.1 hrs 12 inda. 10 p.

Reference bibliographique

Yelle P.E, 2006. Essais et pratique de la fertigation au Québec : l'eau source de quantité et de rendement, Ministère de l'agriculture des pêcheries et alimentation, direction générale de Montérégie, secteurs ouest,7p.

Youcef B,2001. Exploitation de l'énergie géothermique pour le chauffage des serre agricole, mémoire de magistère ; centre universitaire de Ouargl,65-70p

WalasPermanhane S, Herminia Emilia Prieto M, Leonardo Araujo O, NeryJezler C, Luana de Jesus P, ContinVentrella M et CarmoMilagres C, 2020. Deficiency of calcium affects anatomical., biometry and nutritionalstatus of cherry tomato, 9P.

Site web

<http://www.culture-hydroponique.com/culture-hydroponique.htm>.

<http://www.futura-science.com/planete/questions-reponses/eau-fonctionne-culture-hydroponique-4828/>.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/hydroponie>