

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES
N° : 20/DSA/2022



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES
OPTION : SCIENCE DU SOL

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

par: MESSAOUDI Fatna

Intitulé

Contribution à l'étude de la Conduite d'un système d'irrigation
par humidimètre capacitif (Cas d'irrigation localisée sous serre)

Soutenu devant le jury composé de:

M. GUERMAH Hocine	MCA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Président
M. GUENDOUZEN Omar	MAA	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Rapporteur
M. BENCHIKH Nadir	MAA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

المخلص

تمثل رطوبة التربة عامل هام لدى البلدان التي تعاني من الجفاف , حيث تعكس كمية المياه الموجودة في الأرض , وأيضاً تساعد على معرفة الري أي كمية الماء اللازم ة للتربة , لتكون قادرة على تلبية احتياجات النبات حسب الظروف المناخية و الزراعية و غيرها من الظروف التي تناسب أنظمة الري المختارة في البيوت البلاستيكية .
و من اجل ذلك قمنا في هذه الدراسة بكيفية قياس الرطوبة و كذلك لدراسة استجابة هذه البيوت البلاستيكية لتقنيات الري المطبقة عليها .
الكلمات المفتاحية : رطوبة التربة , الري , البيوت البلاستيكية .

Résumé

L'humidité du sol est un facteur important dans les pays qui souffrent de sécheresse, pour Déterminer le rendement car il reflète la quantité d'eau dans le sol, Ce qui permet également de connaître la quantité d'eau d'irrigation nécessaire quelle que soit la qualité du sol, afin de pouvoir répondre aux besoins de la plante en fonction des conditions climatique, agricoles et autre qui conviennent aux systèmes d'irrigation choisie dans les serres .
Et pour cela, nous avons montré dans cette étude comment mesurer l'humidité et ainsi la réponse de ces serres aux techniques d'irrigation qui leur sont appliquées.

Mots clés : L'Humidité du sol, L'irrigation, Les serres.

Abstract

Soil moisture is an important factor in countries suffering from drought, to determine the yield because it reflects the amount of water in the soil, which also allows to know the amount of water needed for irrigation regardless of the quality of the soil, in order to be able to meet the needs of the plant according to the climatic, agricultural and other conditions that are suitable for the chosen irrigation systems. in greenhouses .

And to do this, we have shown in this study how to measure humidity and thus the response of these greenhouses to the irrigation techniques applied to them.

Key words: Soil moisture , Irrigation , Greenhouses .

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions ALLAH qui nous a donné le courage, la patience, la santé et la volonté pour terminer de ce modeste travail.

Tout D'abord je remercie mon encadrant

Mr. GUENDOUZEN O. d'avoir accepté de m'encadrer. Merci pour votre disponibilité et vos conseils utiles. Merci pour ta patience, ton aide et ton sérieux

Nous exprimons nos respectueux remerciements à Monsieur GUERMAH H. (Docteur à l'université Mohamed Boudiaf M'sila) pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury.

Nous adressons notre profonde reconnaissance à M. BENCHIKH N. (Enseignant à l'université Mohamed Boudiaf M'sila) pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'examiner notre travail.

Nous profitons de cette occasion pour remercier l'ensemble des enseignants du département d'agronomie qui ont contribué à notre formation.

Enfin, mes sincères remerciements à tous ceux et celles qui ont contribué, de près ou loin à la réalisation de ce modeste travail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail le fruit de plusieurs années d'études :

En tout premier lieu, je remercie la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences, à mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celle qui s'est toujours sacrifiée pour me voir réussir. A toi **ma chère maman**.

A l'homme de ma vie, mon précieux offre du dieu, merci pour ton soutenu et ton encouragement durant ces années d'études **mon cher papa**.

A mon adorable sœur **Rokia**, qui n'a jamais cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu te protège et t'offre la chance et le bonheur.

A mes chers frères **LAKHDAR, OMAR, BRAHIM**, et mes sœurs **FAIZA, OM ALAA, BOUCHRA**. Que ce travail, soit pour vous, un faible témoignage de ma profonde affection et tendresse.

A mes amies au sens large et surtout **SOUMIA, NARIMEN**, je vous souhaite le bonheur du monde, et à tout mon entourage.

Fatna

Liste des tableaux

*	Titre	page
1	Tableau 1 : l'estimation de W_{pf} en fonction de W_{CR}	14
2	Répartition spatiale des eaux de surface de l'Algérie	32
3	Répartition spatiale des eaux souterraines du Nord de l'Algérie	33

Liste des figures

*	Titre	page
1	Différents état de l'eau dans le sol	4
2	Le cycle de l'eau	6
3	Réserve en eau du sol	10
4	Estimation de la réserve utile (RU) en mm	11
5	Schéma type de la méthode thermogravimétrique.	23
6	Schéma d'un dispositif d'un humidimètre à	24
7	Schéma d'une canne tensiométrique	26
8	Schéma d'une sonde TDR et du signale théorique obtenu.	28
9	présente irrigation gravitaire traditionnelle	33
10	présente irrigation par bassin	34
11	présente à la raie	35
12	présente irrigation par planches	35
13	présente l'irrigation par aspersion	36
14	présente irrigation localisée	39
15	arrosage sous serre	42
16	Mauvais arrosage sous serre	43

Table des matières

Introduction générale	1
1 Comportement de l'eau dans le sol	2
1.1 L'eau dans le sol.....	2
1.2 Différents états de l'eau dans le sol.....	2
1.2.1 L'eau de constitution :	3
1.2.2 L'eau liée :	3
1.2.3 L'eau libre :	3
1.2.3.1 L'eau capillaire:	3
1.2.3.2 L'eau libre:.....	3
1.2.4 Le cycle de l'eau dans le sol	4
1.2.5 Relation entre eau - sol – plante.....	6
1.2.5.1 Les réserves en eau du sol.....	6
1.2.5.2 Rôle de l'eau dans le sol et dans la plante:.....	7
1.2.6 Le réservoir sol	7
1.2.6.1 Profondeur utile.....	7
1.2.6.2 Réserve utiles RU.....	9
1.2.6.3 Réserve facilement utilisable	10
1.3 Teneur en eau du sol.....	11
1.3.1 Expressions de la teneur en eau	11
1.3.2 Mesure de la teneur en eau.....	12
1.3.2.1 Teneur en eau à la capacité de rétention Θ_{CR}	12
1.3.2.2 Teneur en eau au point de flétrissement Θ_{pf}	13
1.3.3 Comment déterminer les besoins en eau.....	14
1.3.3.1 Connaître l'influence du climat.....	14
1.3.3.2 Connaître les besoins de la plante	14
1.3.3.3 Connaître les besoins de la culture.....	15
2 Différentes méthodes de mesure de l'humidité du sol.....	16
2.1 Humidité du sol	16
2.1.1 Humidité à saturation	17
2.1.2 Humidité à la capacité au champ	17
2.1.3 Point de flétrissement.....	17
2.1.4 Humidité résiduelle	17
2.2 Les enjeux d'une connaissance de l'humidité du sol :	18

2.3	Facteurs influençant l'humidité de l'eau dans le sol	19
2.3.1	Evaporation de l'eau de sol	19
2.3.2	Transpiration	20
2.3.3	Pertes par interception.....	20
2.3.4	Infiltration	21
2.4	Différentes techniques de mesures de l'humidité du sol :.....	22
2.4.1	Méthode gravimétrique	22
2.4.2	Mesures par les sondes neutroniques	23
2.4.3	Méthode par Tensiomètre	24
2.4.4	Méthode capacimétrique	26
2.4.5	Méthode TDR	27
3	Effet des paramètres du milieu sur le pilotage des irrigations	29
3.1	Définition de l'irrigation	29
3.1.1	Pilotage de l'irrigation	29
3.1.1.1	Quand irriguer?	29
3.1.1.2	Combien irriguer ?	30
3.1.1.3	Comment irriguer ?	30
3.2	Les avantages et les inconvénients de l'irrigation.....	31
3.2.1	Les avantages	31
3.2.2	Les inconvénients de l'irrigation	31
3.3	Les ressources d'eau en Algérie	32
3.3.1	Les ressources en eau de surface	32
3.3.2	Les ressources en eau souterraine	32
3.4	Différentes techniques pour arroser des cultures	33
3.4.1	Irrigation gravitaire	33
3.4.2	Irrigation par bassins	34
3.4.3	Irrigation par sillons/a la raie	34
3.4.4	Irrigation par planches	35
3.5	Irrigation par aspersion.....	36
3.5.1	Eléments constitutifs d'un réseau d'irrigation par aspersion	36
3.5.2	Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par aspersion	37
3.5.2.1	Avantages	37
3.5.2.2	Inconvénients	38
3.6	Irrigation localisée (Goutte à Goutte).....	38
3.6.1	Irrigation goutte-à-goutte basse pression	39
3.6.2	Irrigation goutte-à-goutte haute pression	39

3.6.3	Type de cultures adaptées à l'irrigation goutte à goutte	39
3.6.4	Avantages et inconvénients de l'irrigation par goutte à goutte.....	40
3.6.4.1	Les avantages l'irrigation par goutte-à-goutte	40
3.6.4.2	Les inconvénients de l'irrigation par goutte-à-goutte	41
3.7	Maîtriser l'irrigation sous serre	41
3.7.1	Intérêts de l'irrigation sous serre.....	41
3.7.2	Conséquences d'une mauvaise irrigation.....	42
3.7.3	Facteurs influencent l'irrigation sous serre.....	44
3.7.4	Comment gérer l'irrigation sous serre ?.....	45
3.7.5	Différents systèmes d'irrigations sous serre	46
3.7.5.1	Goutte à goutte	47
3.7.5.2	Aspersion.....	47
	Conclusion	48

Introduction générale

L'irrigation est la technique qui consiste à apporter de l'eau aux cultures en complément de celle trouvée dans leur environnement. Cela pose le problème de savoir comment s'y prendre et combien on apporte et quelle systèmes d'irrigations pour optimiser l'eau d'irrigation pour chaque espace de plante. En un mot, il s'agit de savoir sur quelles bases on va piloter les irrigations.

L'humidité du sol est une mesure importante pour la détermination du potentiel de production d'une culture dans des pays souvent menacés de sécheresse. Elle est aussi importante dans la modélisation des bassins de drainage où l'humidité dans le sol reflète la quantité d'eau présente dans les deux premiers mètres du sol.

L'humidimètre est l'instrument qui mesure l'évolution de teneur en eau dans le sol, c'est-à-dire le taux de l'eau dans un volume de sol, massique ou pondérale. Cette technique d'aide au pilotage de l'irrigation, pour quelle donne pleine satisfaction, il faut au départ, préciser ce que l'on recherche à travers l'irrigation et connaître les contraintes du système que l'on devra mettre en œuvre.

La serre agricole est une structure généralement en verre ou film plastique, conçue pour protéger et contrôler l'environnement afin de cultiver des plantes hors saison. Les cultures sous serres sollicitent une surveillance permanente, ce qui rend la technique proposée importante dans ce domaine.

L'objet de cette étude et pour y parvenir nous avons construit ce travail comme suit :

Le premier chapitre traite le comportement de l'eau dans le sol

Le deuxième chapitre traite Les différentes méthodes de mesure de l'humidité du sol

Le troisième chapitre traite les effets des paramètres du milieu sur le pilotage des irrigations.

1 Comportement de l'eau dans le sol

1.1 L'eau dans le sol

Les espaces poreux existants entre les particules solides sont occupés par de l'eau et de l'air. La réserve en eau du sol se définit comme le volume d'eau contenu dans le sol à un instant donné. Ce volume, ou stock d'eau, est généralement exprimé en épaisseur de lame d'eau (en mm), pour être facilement comparé aux pluies et à l'évapotranspiration. C'est une grandeur dynamique qui évolue au cours du temps, sous l'action conjointe des précipitations et de l'évapotranspiration. Cependant toute l'eau du sol n'est pas utilisable par la végétation, soit parce que les racines ne colonisent pas tout le volume de sol, soit parce que l'eau est trop fortement retenue par le sol pour être extraite par les racines (**Brédan et al, 2007**).

La conduite judicieuse des arrosages nécessite que l'on puisse contrôler l'évolution de l'état hydrique du sol. Les concepts d'ordre stratégique font appel à des hypothèses qu'il est indispensable de vérifier, notamment quant à l'aptitude du sol à stocker et à restituer de l'eau

L'état hydrique du sol s'apprécie à l'aide de deux caractéristiques :

- La teneur en eau, très utilisée depuis longtemps pour le bilan hydrique .
- Les forces de liaison entre l'eau et le sol (exprimées par le potentiel matriciel).

Les mouvements de l'eau dans le sol, régis par le potentiel hydrique, ont lieu selon une vitesse d'infiltration d'exterminée notamment par la conductivité hydraulique du sol et gouvernée par la loi de Darcy établie à partir de mesures en condition de sols saturés (**Darcy 1856**).

La conductivité hydraulique d'un sol est maximale lorsqu'il est saturé car d'une part la force gravitaire est importante et la force de rétention faible, d'autre part la tortuosité est minimale en condition de sol saturé. L'écoulement de l'eau s'effectue jusqu'à rejoindre la zone de saturation permanente appelée nappe. Les mouvements de l'eau se font alors par percolation

1.2 Différents états de l'eau dans le sol

L'eau contenue dans un sol ou une roche est présente sous différentes formes y compris sous forme vapeur. En dehors de cette dernière forme, on distingue traditionnellement l'eau de constitution, l'eau liée et l'eau libre.

1.2.1 L'eau de constitution :

Correspond à des molécules d'eau inextricables de la constitution chimique des masses minérales du sol.

1.2.2 L'eau liée :

Fixer à la surface des grains du sol par des forces d'attraction moléculaire. Elle comprend une eau dite "hygroscopique" ou aussi "eau adsorbée", adhérant directement au grain et ne pouvant être extraite que par dessiccation ou un vide poussé, et une eau dite "pelliculaire" adhérant à l'eau hygroscopique qui peut se déplacer à la surface des grains et peut être extraite par centrifugation. L'eau liée ne peut se déplacer sous l'effet de la gravité et ne transmet pas les pressions hydrostatiques. On considère généralement que les forces d'attraction moléculaire qui maintiennent les molécules d'eau liées deviennent négligeables au-delà de 0,4 μ

1.2.3 L'eau libre :

Également qualifiée d'interstitielle occupe la porosité du sol ou de la roche et comprend :

1.2.3.1 L'eau capillaire :

est soumise aux forces de tension se développant au contact de l'eau et de l'air et à l'action de la gravité. Sous l'action de ces deux forces, elle s'élève au-dessus de la surface d'une nappe libre pour former une frange capillaire, qui contient une zone saturée et une zone de saturation croissante. L'épaisseur de la frange capillaire varie en raison inverse de la granulométrie, de quelques centimètres dans les graviers à plusieurs mètres dans les limons. Elle peut être partiellement extraite par gravité et transmet les pressions.

1.2.3.2 L'eau libre :

est soumise uniquement à la gravité et s'écoule librement dans le substratum sous l'action de champs de pesanteur ou de différences de pression.

L'eau joue un rôle capital dans les problématiques associées à tout projet d'infrastructure linéaire, les terrassements, la stabilité des ouvrages et plus largement l'intégration du projet dans son Environnement.(**Amroune A.,2020**)

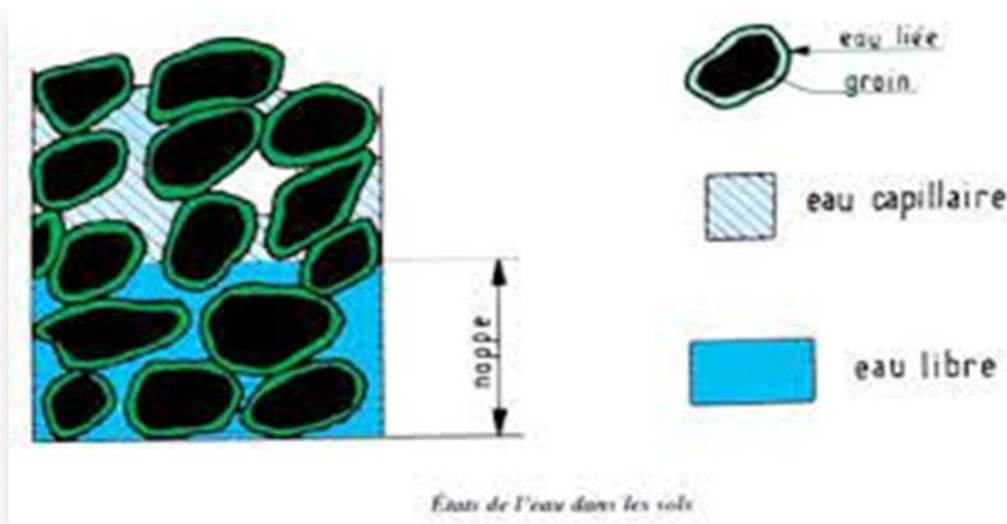


Figure 1 : Différents état de l'eau dans le sol

1.2.4 Le cycle de l'eau dans le sol

Le sol joue un rôle important dans le cycle de l'eau et dans l'émission d'éléments chimiques dans l'eau. Il joue un rôle dans le partage entre infiltration et ruissellement. Il joue le rôle de réserve d'eau pour les plantes et de milieu pour les êtres vivants présents dans le sol. Elle est au cœur des transferts d'eau entre l'atmosphère, les eaux souterraines et les cours d'eau. Le sol stocke et transforme de nombreux produits éparpillés sur le sol, qu'ils soient solides ou liquides, minéraux ou organiques, d'origine agricole, industrielle ou urbaine. Les sols des zones humides, saturés d'eau en hiver, ont une fonction tampon du point de vue hydrologique, permettant l'extension latérale de l'aquifère, et hydro-chimique, favorisant les transformations biogéochimiques en relation avec le brassage de l'aquifère.

Les propriétés pédologiques importantes sont :

- la sensibilité à la battance des sols (sensibilité des sols à la fermeture de la porosité en surface), à la formation d'une croûte de battance, réduisant l'infiltrabilité du sol.
- la réserve utile en eau fonction de la texture, de la teneur en éléments grossiers, de la profondeur, notamment vis-à-vis de l'alimentation en eau des plantes
- l'excès d'eau, la teneur en matière organique, l'activité biologique, favorisant la rétention ou le biotransformation des éléments chimiques.

L'eau présente à la surface de la Terre est répartie de manière non uniforme dans l'atmosphère, les surfaces continentales, les océans et les calottes polaires. Le principal rassemblant tous les océans, contient 97,41% du volume d'eau total disponible sur Terre (**De Marsily 1995**).

Les glaciers et calottes glaciaires en stockent 1,984% (soit 70% de l'eau douce de la planète). L'humidité contenue dans le sol correspond à 0,00505% de l'eau sur Terre, situant ce réservoir entre les lacs et l'atmosphère en termes de volume d'eau stockée.

Le cycle de l'eau décrit l'ensemble des échanges et mouvements d'eau qui s'effectuent de manière incessante entre les réservoirs (Figure 2). C'est une composante à part entière du système climatique de notre planète dont le moteur est le rayonnement solaire. L'énergie reçue à la surface terrestre provoque l'évaporation des particules liquides des océans et des surfaces continentales.

A l'état gazeux, l'eau est stockée dans l'atmosphère ou elle se déplace avec la circulation des masses d'air. Le temps de résidence moyen de l'eau dans l'atmosphère est d'environ 8 jours. C'est la durée moyenne qui s'écoule avant que les molécules gazeuses ne se condensent et que le poids de leur agglomération n'entraîne leur chute. L'eau rejoint à nouveau les océans et les surfaces continentales qui peuvent être sous forme de précipitations de pluie, de neige ou de glace.

L'eau tombant sur les surfaces continentales va transiter à travers les différents réservoirs continentaux. Le temps passé dans chacun d'entre eux est défini par le ratio entre le volume du réservoir et les flux. Ainsi, les particules d'eau tombant sur un glacier y resteront plus de mille ans avant de fondre et rejoindre les réservoirs que sont l'humidité du sol, les eaux souterraines, les fleuves et rivières ou encore les lacs (**De Marsily 1995**).

Les mouvements et masses d'eau entre les réservoirs sont relativement constants d'une année à une autre. La Figure 2 indique les volumes d'eau échangés entre les principaux réservoirs avec pour référence les précipitations ayant lieu sur les surfaces continentales.

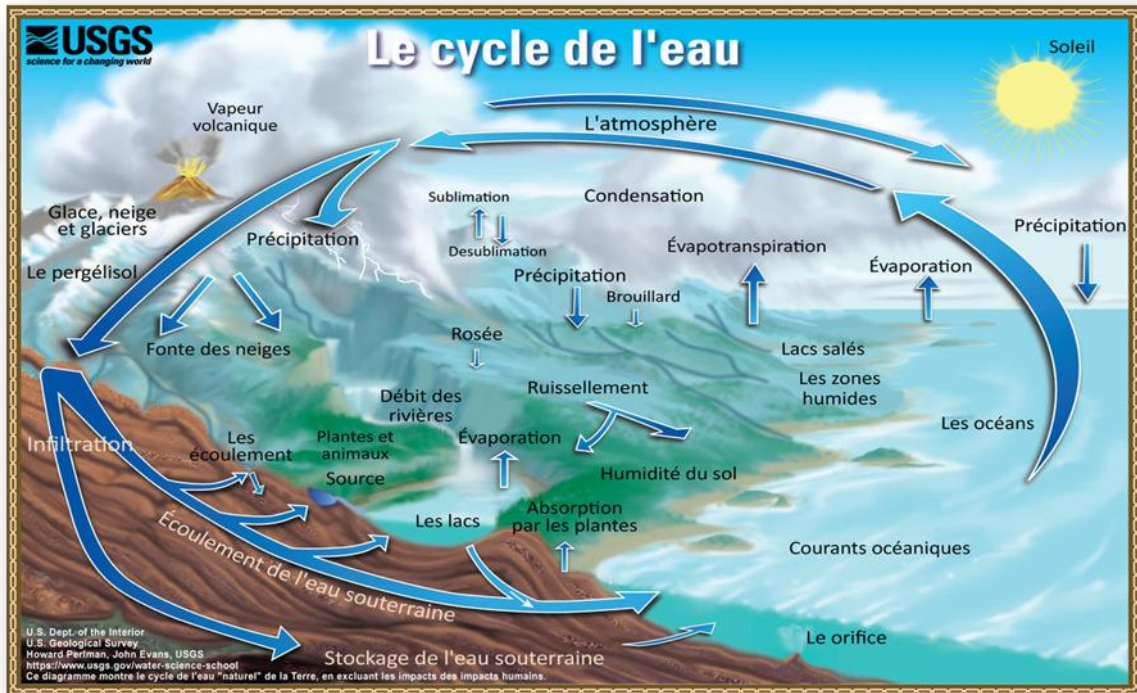


Figure 2 : Le cycle de l'eau

1.2.5 Relation entre eau - sol - plante

1.2.5.1 Les réserves en eau du sol

La plante puise l'eau dont elle a besoin dans le sol qui fonctionne comme un réservoir :

- Une borne haute : dite « Capacité au Champ ».....CC
mesurée in situ. Le sol est « théoriquement plein » sans être cependant engorgé (rempli ou saturé).
- Une borne basse : dite « Point de Flétrissement permanent ».....PFP
mesurée en laboratoire, (l'eau restant dans le sol n'est pas accessible à la plante).
- La différence entre les deux bornes représente la réserve utile.....RU
Elle varie selon les sols. Elle se situe souvent entre 1 et 2mm/cm de sol.
- Une fraction de la RU est dite Réserve Facilement Utilisable.....RFU
c'est la quantité d'eau accessible sans difficulté pour la plante.

L'utilisation des réserves dépend de l'enracinement, qui progresse avec la croissance des plantes. (Amroun, 2020)

1.2.5.2 Rôle de l'eau dans le sol et dans la plante:

- L'eau qui se trouve dans le sol provient naturellement des pluies, elle joue un rôle très important soit pour le sol lui-même soit pour les plantes qu'il porte.
- L'eau est un facteur fondamental de la genèse des sols et de leur évolution.
- L'eau est un élément constitutif de la plante où la matière végétale contient 60 à 95 % d'eau.
- L'eau apporte à la plante les éléments minéraux essentiels pour sa nourriture.
- L'eau constitue donc par l'intermédiaire de la solution du sol, la base essentielle de l'alimentation des plantes puisque sans eau il n'y a pas de végétation possible.
- En revanche l'eau en excès est nuisible car elle asphyxie les plantes.
- Il en faut donc ni trop peu ni trop (**LASNIER et LACHAISE, 1973**).

1.2.6 Le réservoir sol

1.2.6.1 Profondeur utile

La profondeur dite utile correspond à la profondeur d'enracinement de la culture, limitée elle-même par la profondeur du sol (et éventuellement du sous-sol)

La profondeur du sol ne peut être connue que par des sondages à la tarière sur les différents types de sol du périmètre irrigué, ou grâce à la carte pédologique, si elle existe. Il faut cependant faire attention à certains points :

Dans un sous sol meuble, il est possible que des racines de plantes à enracinement profond puissent se développer. Par ailleurs, il peut y avoir continuité hydrique entre sol et sous-sol. C'est le cas général en sous-sol poreux.

Dans un sol profond, des accidents structuraux (semelle de labour, etc.) ou texturaux (couches de sol très argileux maintenant une nappe suspendue, et une mauvaise aération du sol, etc.) peuvent au contraire empêcher une pénétration des racines en dessous de cette zone.

Parfois une couche de sol grossier ou aux caractéristiques particulières ex : tourbe peut constituer une barrière infranchissable pour l'eau, après rupture de lien capillaire avec l'eau profonde suite à un dessèchement trop intense.

La structure du sol dans son ensemble est dans tous les cas très importante ; on regardera en particulier l'existence ou non de macroporosité en profondeur , et l'absence de zone asphyxiante (**Tron et al .,2013**)

Par conséquent, il peut être souhaitable de creuser un certain nombre de tranchées d'observation du profil cultural sur le périmètre, et d'en étudier particulièrement les caractéristiques en relation avec l'enracinement des cultures en places. Des sondages à la tarière permettent de compléter ces données en vérifiant sur le terrain, l'extension des divers types de sol. Bien sûr, la première approche d'étude du terrain, en l'absence de carte pédologique, sera la carte géologique. (**Tron et al .,2013**)

Par ailleurs, les plantes ont des comportements d'enracinements différents. Certain se limitent, quel que soit le sol, à 60 cm, d'autre peuvent atteindre 10m ou plus.

La profondeur d'enracinement peut varier dans les larges limites, en fonction de la nature du sous-sol, de l'existence d'un plan d'eau, etc. Avec une terre franche, les profondeurs indiquées ci-dessus sont les plus courantes. Il faut aussi noter que l'activité du chevelu n'est pas égale sur toute cette profondeur

Cependant, d'autres éléments doivent être pris en considération :

D'une part la zone d'enracinement proche de la surface et très importantes pour la plante : c'est là qu'elle utilise le moins énergie pour absorber l'eau. Ainsi une humidification fréquente de la zone d'enracinement de surface peut permettre à la plante, si elle a conjointement des racines profondes, de maintenir une vigueur végétative facilitant le pompage de l'eau en profondeur.

D'autre part, en début de végétation, il peut être souhaitable de ne pas humidifier uniquement les zones superficielles, afin que les racines se développent en profondeur pour puiser de l'eau ; cela permet ensuite une meilleure utilisation par la culture de la réserve du sol et accroît l'efficience de l'eau d'irrigation

Enfin, il faut bien sur distinguer cultures pérennes et annuelles : alors que l'on considérera en général comme constante la profondeur d'enracinement pour les cultures pérennes établies, il faut faire varier celle des cultures annuelles au cours de l'année, en fonction de leur développement (**Tron et al .,2013**)

1.2.6.2 Réserve utiles RU

La réserve en eau du sol se définit comme le volume d'eau contenu dans le sol à un instant donné. Ce volume, ou stock d'eau, est généralement exprimé en épaisseur de lame d'eau (en mm), pour être facilement comparé aux pluies et à l'évapotranspiration. C'est une grandeur dynamique qui évolue au cours du temps, sous l'action conjointe des précipitations et de l'évapotranspiration. Cependant toute l'eau contenue dans le sol n'est pas utilisable par la végétation, soit parce que les racines ne colonisent pas tout le volume de sol, soit parce que l'eau est trop fortement retenue par le sol pour être extraite par les racines. **(Tron et al .,2013)**

La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, c'est-à-dire la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion. Elle est exprimée en millimètres. C'est une variable d'état, qui dépend des propriétés physico-chimiques du sol, de sa composition granulométrique, de l'arrangement des particules de sol et de la distribution de la porosité. L'eau utilisable par les plantes est égale au volume d'eau emmagasiné par la tranche de sol explorée par les racines entre deux états hydriques caractéristiques : la capacité au champ (l'eau que peut retenir le sol après écoulement de l'eau gravitaire, ou ressuyage) et le point de flétrissement permanent (au-delà duquel le végétal ne peut plus extraire l'eau). Cette quantité d'eau disponible à la plante est déterminée rigoureusement au laboratoire par l'établissement de courbes de rétention en eau (dites aussi courbes pF-humidité) sur des échantillons de sols non remaniés prélevés dans chaque horizon (cylindres ou mottes). Cette méthode est recommandée pour une évaluation de réserve utile précise sur un sol donné. A défaut, il existe des tables de coefficients (cf. table ci-dessous) ou des fonctions permettant d'estimer l'humidité massique du sol à ces états caractéristiques à partir de propriétés plus ou moins complexes (texture, teneur en carbone, densité, capacité d'échange cationique ...). Attention, il existe assez peu de telles fonctions calibrées spécifiquement pour les sols forestiers. L'utilisation de fonctions de pédotransfert construites sur des sols agricoles peut conduire à des biais. **(Badeau V, Bréda N (2008) Modélisation du bilan hydrique)**

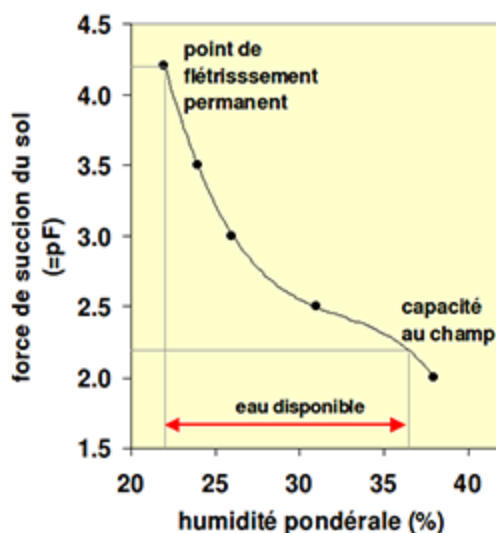


Figure 3 : Réserve en eau du sol

Un exemple de courbe de rétention d'un horizon argilo-limoneux (appelée aussi courbe pF-humidité). Les fortes valeurs de pF correspondent aux faibles humidités des sols.

1.2.6.3 Réserve facilement utilisable

La plante commence à souffrir de la sécheresse et sa fermer ses organes de transpiration, les stomates avant que ne soit atteint le seuil du point de flétrissement permanent. On a donc été amené à définir une RFU, réserve facilement utilisable qui, tant qu'elle n'est pas épuisée, permet à la plante, en théorie, de pomper de l'eau du sol sans restriction. Le terme de RFD, réserve facilement disponible, est également employé et désigne l'eau utilisable à chaque période végétative de la culture, en fonction de la profondeur d'enracinement alors atteinte (Tron et al., 2013).

Souvent on prend : $RFU = 50 \text{ à } 60 \% RU$

On considère que la différence $RU - RFU$ ne peut servir qu'à la survie du végétal, non sa croissance ou à son développement. C'est pourquoi on l'appelle réserve de survie (RS).

En fait, le rapport RFU / RU est très variable ; il dépend, entre autres :

Du volume occupé par les racines et de la densité de l'enracinement ;

De la résistance de la plante au dessèchement

De la vitesse de dessiccation du volume de sol utilisé par les racines ; quand cette vitesse augmente, le rapport RFU / RU diminue (par rupture de liaisons capillaires)

Pour calcul, en l'absence de précisions spécifiques, on prendra en général :

RFU = 1/2 RU si la RU est faible et la consommation d'eau par la plante forte ;
 jusqu'à RFU = 2/3 RU, si la RU est forte, et la consommation faible.

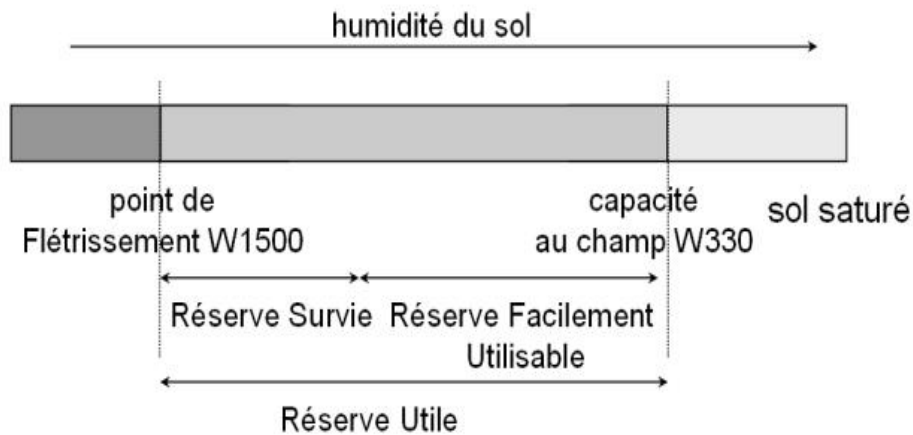


Figure 4: Estimation de la réserve utile (RU) en mm

1.3 Teneur en eau du sol

1.3.1 Expressions de la teneur en eau

La teneur en eau être exprimée en teneur en eau pondéral (w), poids d'eau ramené au poids du sol sec après séchage à l'étuve d'un échantillon, ou en teneur en eau volumique (Θ) :

$$w = \frac{pH - P_{sec}}{P_{sec}} \cdot 100 \text{ avec } pH = \text{poids du sol humide}$$

P_{sec} = Poids du sol après séchage à l'étuve

$$\Theta = D_s \cdot w \quad \text{avec } D_s : \text{densité sèche (sans unité ou en } g/cm^3)$$

Ces deux variables, w et Θ , sont exprimées en pourcentages. On exprime aussi souvent la teneur en eau volumique Θ en hauteur de la lame d'eau équivalente

Pour une couche de sol donnée, exprimée en millimètre : 1% = 1mm d'eau/10cm de sol.

Cette unité présente un intérêt pratique en agronomie, car elle peut aussi être utilisée, sans référence à la surface envisagée, pour définir les doses d'irrigation, comme les pluviométries.

Il est utile de manier avec aisance les unités équivalentes utilisées dans la pratique pour définir les doses d'arrosage aussi bien que la pluviométrie ou la réserve en eau du sol . (Tron et al .,2013)

$$1\text{mm} = 10 \quad = 1 \text{ l/}$$

1.3.2 Mesure de la teneur en eau

On distingue les méthodes basées sur le prélèvement ponctuel d'échantillons , avec mesure par pesée et passage à l'étuve , et celles où les mesures sont réalisées dans le sol en place , à l'aide d'une sonde à neutrons de profondeur , ou par la technique TDR , time Domain Reflectometry , réflectométrie dans le domaine temporel

Notons que les méthodes par prélèvement, outre l'importance charge de travail qu'elles représentent, perturbent les sites de mesure et sont donc moins bien adaptées à des suivis prolongés au cours du temps .

En outre, les mesures dans le sol en place sont susceptibles de fournir des teneurs en eau volumiques, celles qui sont intéressantes dans le cas de l'irrigation, alors que les mesures basées sur le prélèvement d'échantillons ne fournissent que la teneur pondérale. Il faut alors connaître par ailleurs la densité sèche, au risque de faire des erreurs allant jusqu'à 40% erreurs liées à la variabilité de la densité selon les types de sol. (Tron et al .,2013).

1.3.2.1 Teneur en eau à la capacité de rétention Θ_{CR}

Lorsqu'un sol est fortement humidifié (grosse pluie, irrigation importante),

Il se ressuie d'abord assez vite, jusqu'au moment où sa macroporosité (les pores les plus gros) est à nouveau remplie d'air . Puis il se dessèche plus lentement. La teneur en eau à la capacité de rétention correspond, en général, à la teneur en eau du sol à la fin de la cinétique rapide de ressuyage.

L'allure de cette cinétique varie évidemment en fonction du sol et de la répartition de ses classes de porosité. La courbe présentée n'est donc qu'un exemple. Selon le type de courbe , plus ou moins anguleux , la valeurs de la teneur en eau à la capacité de rétention apparaîtra plus ou moins nettement.

Il existe deux types de méthodes de mesure de cette donnée : sur échantillons en laboratoire, et dans le sol en place. Pour diverses raisons, il a été constaté un écart important entre elles, On préférera donc, chaque fois que cela s'avérera possible, les méthodes qui s'attachent à faire une mesure ou une estimation in situ, pour laquelle est utilisé fréquemment le terme de teneur en eau à la capacité a champs Θ_{cc} , à la place de celui de Θ_{CR}

Les profils de fin d'hiver (48 h environ après la dernière pluie) constituent une bonne base d'estimation pour la teneur en eau à la capacité au champ, qui peut être affinée au cours des années.

La teneur en eau à la capacité de rétention peut aussi servir lors d'un essai de détermination de la tension approximative à la capacité au champ (**Tron et al .,2013**)

1.3.2.2 Teneur en eau au point de flétrissement Θ_{pf}

L'eau est retenue par les micropores du sol. Les racines peuvent l'extraire tant que les forces de liaison terre-eau correspondent à une pression inférieure à 15 atmosphères ou pf 4,2 .En fait, cette limite varie de 10 à 40 atmosphères selon les sols et les types de plantes : 15 atmosphères est une convention moyenne.

w_{pf} est mesuré au laboratoire à partir d'échantillons de sol. Dans ce cas , la mesure est moins critiquable que pour la mesure de teneur en eau à la capacité de rétention , puisque c'est ici la porosité la plus fine du sol qui est en jeu : le fait que les échantillons soient remaniés a peu de conséquences sur la mesure .

A défaut de cette mesure, on peut estimer w_{pf} en fonction de w_{CR} ou w_{CC} grâce à un coefficient caractérisant les différents types de sols (tableau suivant).

Il faut noter que, contrairement à ce qui se passe pour w_{CR} (ou w_{CC}), la matière organique joue peu sur la teneur en eau au point de flétrissement.

Enfin, comme pour w_{CR} , on peut également effectuer des mesures directement sur le terrain, en fin de saison, sous culture et avant le retour des pluies, par exemples par prélèvement à la tarière. Les estimations peuvent être améliorées avec plusieurs années de références, et notamment des années sèches. Si l'on n'a pas, par cette méthode, une équivalence stricte de la teneur en eau au point de flétrissement définie primitivement, on obtient cependant une référence représentative de l'état possible d'épuisement en eau du sol avec la culture considérée. Cette référence, obtenue à partir d'une situation réelle, est donc tout à fait pertinente. (**Tron et al .,2013**)

Type de sol	$q = w_{pf} / w_{CR}$
Sables fins (100 à 300 μ) purs ou peu argileux (10% d'argile)	1/5,5 à 1/6
Sables limoneux contenant 10 à 25% d'argile, suivant limons)	1/3 à 1/4
Sables moyens (500 à 800) μ assez argileux (20 à 25 % d'argile)	= 1/2
Argiles sableuses ou plastiques(sous-sol) (40 à 80 % d'argile)	= 1/1,7 à 1/1,5

Source : Périgaud, 1963.

Tableau1 : l'estimation de w_{pf} en fonction de w_{CR}

1.3.3 Comment déterminer les besoins en eau

1.3.3.1 Connaitre l'influence du climat

Les plantes extraient l'eau du sol par leurs racines. La plus grande partie de cette eau ne reste pas dans la plante, mais est restituée dans l'atmosphère par les feuilles et les tiges. C'est le processus de la transpiration.

Le sol sous l'effet de la chaleur évapore l'eau qu'il contient. C'est l'évaporation.

L'évapotranspiration d'une culture est l'ensemble de l'eau utilisée par la plante pour la transpiration et par le sol pour l'évaporation.

Le climat est à l'origine d'une demande en eau potentielle, appelée évapotranspiration potentielle (ETP), exprimée en mm.

Cette ETP varie selon les conditions climatiques ; elle sera différente selon la saison (été ou hiver), la localisation (Ouest ou Est) et l'altitude (littorale ou montagne).

Station	Altitude	ETP /jour
1	790	1.5
2	150	2.5

Plus la plante est située dans une zone où l'ETP est important, plus elle devra restituer de l'eau à l'atmosphère. (Amroun A. ,2020)

1.3.3.2 Connaitre les besoins de la plante

La consommation en eau de la plante dépend principalement de son âge (stade végétatif) et de sa variété. Ces paramètres définissent pour chaque plante un coefficient cultural (K_c) ou rythme de consommation d'eau de cette culture. Ce coefficient caractérise la croissance de la plante au cours de son cycle végétatif. Il est de 0.2 en début de culture pour la canne à sucre par

exemple et évolue quotidiennement pour atteindre la valeur maximale de 1. Il varie différemment selon l'altitude et la date de début de culture. **.(Amroun A. ,2020)**

1.3.3.3 Connaitre les besoins de la culture

La quantité d'eau maximale dont la culture a besoin pour une croissance optimale est définie par le produit : **$ETM = Kc * ETP$**

La plante ne dispose pas toujours suffisamment d'eau pour face à ses besoins. Dans ce cas, la plante est incapable de fournir toute l'eau qui lui demandée. Elle diminue alors son activité et de ce fait, sa croissance. L'activité de transpiration de la plante est alors limitée à ce que l'on appelle ***l'Evapotranspiration réelle (ETR)***, exprimée en mm. **.(Amroun .,2020)**

2 Différentes méthodes de mesure de l'humidité du sol

2.1 Humidité du sol

L'humidité du sol (ou la teneur en eau du sol) détermine essentiellement la variation des caractéristiques des différents matériaux ou sols. La teneur en humidité d'un sol particulier déterminera les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces caractéristiques font référence à la fois aux apports solides et liquides qui vont pénétrer dans le sol.

L'humidité du sol est une mesure importante pour déterminer le potentiel de production d'une culture dans les pays souvent menacés par la sécheresse. Il est également important dans la modélisation des bassins versants où l'humidité du sol reflète la quantité d'eau présente dans les deux premiers mètres du sol. La végétation puise l'eau du sol par ses racines et la rejette dans l'atmosphère par ses stomates. Par conséquent, la transpiration des plantes est déterminée par l'eau disponible pour la végétation dans toute la zone racinaire. De plus, sur une grande partie du globe, la disponibilité en eau est le facteur limitant pour la croissance des plantes et donc pour l'agriculture. Par conséquent, la connaissance de l'humidité du sol est très précieuse pour détecter les périodes de stress hydrique. (**Escorihuela, 2007**)

L'humidité de la surface du sol détermine les échanges avec l'atmosphère à travers le bilan énergétique à la surface du sol (très différent sur une surface sèche ou sur une surface humide), elle est importante pour son impact sur l'évaporation et la transpiration du sol. Qu'est-ce qui détermine le transfert de masse et de chaleur entre la terre et l'atmosphère ? (**Koster, 2004**).

Par conséquent, la connaissance de l'humidité du sol est très utile dans la modélisation des prévisions météorologiques à travers les modèles de circulation atmosphérique. Enfin, une surveillance continue à grande échelle et à long terme de l'humidité du sol peut fournir des informations sur les changements possibles du climat. Cependant, l'humidité du sol est un terme très vague et il est important de le définir. La définition la plus courante du terme est la quantité totale d'eau présente dans la zone non saturée. Pour des raisons pratiques, cette humidité est généralement divisée en deux parties, l'humidité de la couche arable, correspondant au premier centimètre (typiquement 5 cm), et l'humidité de la zone racinaire du sol. (**Hillel, 1988**).

2.1.1 Humidité à saturation

L'humidité du sol θ_s à saturation représente le rapport volume/volume maximal d'eau. Lorsque le sol est saturé, tout l'espace poreux du sol est occupé par l'eau et l'air est absent.

Lorsque l'apport d'eau en surface est supérieur à la capacité d'infiltration du sol, ce dernier ne peut plus entrer dans l'eau, et de l'eau stagnante va se former en surface. S'il y a une pente, cela crée un écoulement latéral appelé ruissellement

2.1.2 Humidité à la capacité au champ

Dans un sol saturé, les molécules d'eau pénètrent sous l'effet de la gravité jusqu'à ce que la capacité de champ θ_c soit atteinte. Appelée aussi capacité de rétention, elle correspond à la quantité d'eau que les particules solides du sol peuvent retenir par capillarité et adsorption. C'est la teneur en eau que le sol acquiert après avoir été drainé sous l'effet de la gravité. Les molécules d'eau retenues par le sol sont affectées par des forces matricielles comparables à la gravité (**Kerr & Cabot 2009**).

2.1.3 Point de flétrissement

Le point de flétrissement θ_f est la teneur en humidité du sol en dessous de laquelle les plantes ne peuvent plus extraire l'eau du sol. Cela se produit lorsque la succion des racines des plantes est inférieure à celle des particules solides du sol. L'énergie nécessaire pour extraire les molécules d'eau de l'attraction des particules est devenue trop importante pour les plantes. Chapitre 1 : Système sol-plante-atmosphère Le point de flétrissement dépend de la succion que peut exercer la plante. Elle est spécifique à chaque plante sur un sol donné. Deux points de brûlure peuvent être distingués : permanent et temporaire. Le premier fait référence au flétrissement irréversible des plantes. Dans le second cas, le flétrissement moins intense sera réversible et la plante est en stress hydrique

2.1.4 Humidité résiduelle

En dessous du point de flétrissement, la quantité d'eau dans le sol peut continuer à diminuer par évaporation. Ce changement d'état peut se produire lorsque les molécules d'eau remontent à la surface par capillarité au contact de l'atmosphère, ou passent de liquide à gaz dans les pores du sol. L'humidité résiduelle θ_r ou le point d'hygroscopicité est atteint lorsque l'eau présente dans les deux phases (liquide et gaz) du sol est en équilibre. Même après une sécheresse

prolongée, le sol contient encore une partie de l'eau liée à la matrice du sol par adsorption. L'assèchement complet du sol ne peut être obtenu que dans le cadre d'expérimentations en laboratoire (Musy & Soutter 1991)

2.2 Les enjeux d'une connaissance de l'humidité du sol :

Il existe plusieurs facteurs qui ont pour rôle d'influencer et de diminuer l'eau dans le sol :

L'humidité du sol joue un rôle majeur dans le cycle de l'eau. Elle est une variable fondamentale dans plusieurs disciplines des sciences de l'environnement, telles que l'agronomie, l'hydrologie, la météorologie et l'hydrogéologie. La connaissance précise de l'humidité du sol et de son évolution spatio-temporelle constitue un élément clé :

Pour surveiller la croissance de la végétation et prédire la production agricole, améliorer la gestion des ressources en eau et mieux comprendre les processus de transferts d'eau et de chaleur dans l'interaction entre surfaces continentales et l'atmosphère, et enfin d'améliorer les prévisions météorologiques.

L'humidité du sol est un facteur important qui influence le processus de germination des semences, d'émergence ainsi que la croissance végétale.

Elle est aussi un paramètre d'alerte dans la détection rapide d'états d'assèchement afin d'optimiser l'irrigation ce qui permet d'améliorer la production d'une culture, de faire compromettre les cultures, mais il peut indiquer le début des sécheresses de manière à détecter rapidement des risques et permettre de prévenir des producteurs agricoles ayant des planifications plus tôt pour contribuer à baisser les souffrances des récoltes.

Dans la zone racinaire, c'est l'interface entre la végétation et le système hydrologique qui joue un rôle prépondérant : la valeur de l'humidité de la zone racinaire conditionne l'assimilation de CO₂ à travers les stomates et les dégâts possibles de l'appareillage photosynthétique. ainsi, la détermination de l'humidité du sol dans la zone racinaire est un objectif important pour l'observation de la croissance des plantes, à court et moyen terme, ainsi que pour produire des indices de sécheresse des sols, et des cartes de rendement agricole en vue de contrôler, surveiller et faire des prévisions de production d'une culture.

La connaissance précise de l'humidité de surface est aussi importante pour la reconstruction des champs de précipitation, de l'évaporation, des infiltrations et pouvoir améliorer la prévision de ruissellement et des risques d'inondation en effet, l'humidité du sol est un volume d'eau stocké dans le sol, que ce soit en surface (environs 5 cm) ou à des niveaux plus

profonds. Elle peut contrôler la répartition des eaux de ruissellement et d'infiltration efficace des précipitations dont tout ou une partie peut contribuer à recharger les nappes aquifères. L'humidité du sol permet de faire la prévision d'inondation sur la base des sols saturés qui n'absorbent plus de pluie et d'eau de ruissellement, et toute précipitation se transforme en inondation.

Les flux d'eau et d'énergie à l'interface terre /atmosphère sont fortement dépendants de l'humidité de surface. Elle affecte non seulement l'évapotranspiration mais aussi l'aptitude des sols à stocker la chaleur, leur conductivité thermique, et la partition de l'énergie entre flux de chaleur latent et sensible. C'est donc une variable clé, qui conditionne le transfert de l'eau et de la chaleur à l'interface sol/atmosphère. -L'humidité du sol est enfin une variable clé pour les simulations numériques en météorologie ainsi que pour les modèles climatiques. On montre que la prédictibilité des précipitations sur les terres émergées augmente par la connaissance de l'humidité du sol et notamment en zones sensibles comme le sahel (**Escorihuela, 2006**).

2.3 Facteurs influençant l'humidité de l'eau dans le sol

Il existe plusieurs facteurs qui ont pour rôle d'influencer et de diminuer l'eau dans le sol.

2.3.1 *Evaporation de l'eau de sol*

L'eau disponible dans le sol pouvant être évaporée directement du sol. Cette évaporation est conditionnée par le taux d'humidité présent en surface. Cette teneur en eau résulte des précipitations, des prélèvements par la végétation et de la capillarité. Le type de sol détermine la capacité de rétention et la capillarité qui entraîne la remontée en surface de l'humidité présente plus en profondeur, ce qui permet d'alimenter la surface du sol.

L'albédo du sol a une incidence sur la quantité d'énergie qui sera absorbée. La nature du sol, sa rugosité ou encore sa couleur détermine la valeur de l'albédo. Plus il est élevé, plus la quantité d'énergie réfléchie est importante. La quantité d'énergie pouvant être utilisée (énergie absorbée) est égale à l'énergie incidente moins l'énergie réfléchie.

Enfin, la rugosité de la surface facilite les échanges évaporatifs en augmentant la surface en contact avec l'atmosphère, mais elle induit, a contrario, une réduction de la vitesse du vent et ainsi de son efficacité.

2.3.2 Transpiration

La transpiration de la végétation est le processus d'évaporation dans l'atmosphère de molécules d'eau contenues par les végétaux. Les transferts d'eau entre les feuilles et l'atmosphère sont conditionnés par l'ouverture des stomates et alimentés par un flux de sève dans la plante. La perte en eau de la plante est compensée par les molécules d'eau extraites du sol essentiellement par les racines selon un différentiel de potentiel hydrique entre le sol et la plante (**Cruziat et al., 1995**).

Les mêmes facteurs météorologiques que pour l'évaporation vont influencer la transpiration, bien que leurs impacts sur les organismes vivants que sont les végétaux soient beaucoup plus complexes.

La surface foliaire est un facteur ayant une forte influence sur la capacité évaporatoire des végétaux. Elle définit la quantité d'eau qui peut être transpirée. Plus la surface foliaire n'est importante, plus la surface et le nombre de stomates en contact avec l'atmosphère sont importants. De plus, la rugosité de la canopée, la structure verticale et l'envergure de la plante déterminent l'influence du flux d'air à la surface foliaire. L'âge et l'espèce de la plante ont aussi une influence sur la force de succion qui peut être mise en œuvre, ce qui détermine son point flétrissement.

La profondeur du profil de sol atteint par les racines est également variable d'une espèce à une autre.

L'épaisseur de sol qui contribue à la majeure partie des interactions sol-végétation-atmosphère est appelée zone racinaire. Il s'agit de l'épaisseur de sol à partir de laquelle la végétation prélevée de l'eau. Son épaisseur est très variable selon le type de couvert et les espèces et il est très délicat d'accéder à cette information à l'échelle globale. En modélisation des processus de surface, la zone racinaire est généralement fixée aux deux premiers mètres de sol, bien qu'il s'agisse d'une prise en compte très simplifiée.

2.3.3 Pertes par interception

Lors d'une précipitation au-dessus d'un couvert végétal, une fraction de la pluie incidente est interceptée par le feuillage et la partie ligneuse. Ce stockage d'eau constitue un réservoir à part entière, bien qu'il ne soit pas pris en compte dans les bilans annuels en raison de sa très courte échelle temporelle. Lorsque ce réservoir est plein, les molécules d'eau vont rejoindre le

sol par écoulement le long des feuilles et des branches. L'eau interceptée est ensuite évaporée sans transiter par un autre réservoir.

Il est difficile d'estimer la quantité d'eau perdue par interception. Elle est généralement approximé proportionnellement à la surface foliaire, puisque plus la surface foliaire est élevée, plus la quantité d'eau stockée est importante. Cette eau n'est pas exposée aux mêmes conditions climatiques selon la structure verticale de la plante et sa position au sein de la houpe. L'eau interceptée dans le bas de la houpe n'est pas exposée au même rayonnement qu'au sommet de celle-ci, qui par ailleurs, a une influence sur la résistance aérodynamique de la plante.

2.3.4 Infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion.

L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir : -Le régime d'infiltration $i(t)$, nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.

L'infiltration cumulative, notée $I(t)$, est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration

La conductivité hydraulique à saturation K_s est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.

La capacité d'infiltration ou capacité d'absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.

La percolation désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus

suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines (**Musy & Soutter, 1991**)

2.4 Différentes techniques de mesures de l'humidité du sol :

Il existe différentes techniques de mesure de l'humidité d'un sol (ou autres substrats équivalents), certaines sont analysées au laboratoire, d'autres donnent l'état du sol in situ.

2.4.1 Méthode gravimétrique

C'est une méthode classique pour mesurer l'humidité d'un échantillon de sol, elle consiste à prélever de manière très minutieuse à l'aide d'une tarière un échantillon de sol dans un cylindre dont le volume et le poids sont connus. Le poids de l'échantillon est mesuré avant et après passage dans une étuve afin d'en déduire l'humidité massique de l'échantillon (maintenir l'échantillon à 105°C, jusqu'à ce que le poids soit constant, généralement autour de 48 heures). La connaissance de la densité donne la teneur en eau volumique du système. C'est la méthode la plus précise de mesure de l'humidité du sol, elle est indispensable pour calibrer les autres méthodes de mesures, en particulier la méthode neutronique (**Hillel, 1988**).

Elle présente néanmoins de nombreux inconvénients : -Longue à mettre en place, la méthode est très fastidieuse pour de grands périmètres ; -Pour de nombreux échantillons, la méthode est souvent qualifiée de destructrice pour le sol, car elle exige bon nombre d'échantillons, surtout si l'on envisage de réaliser un profil d'humidité sur plusieurs centimètres de sol (**Walker et al, 2004**).

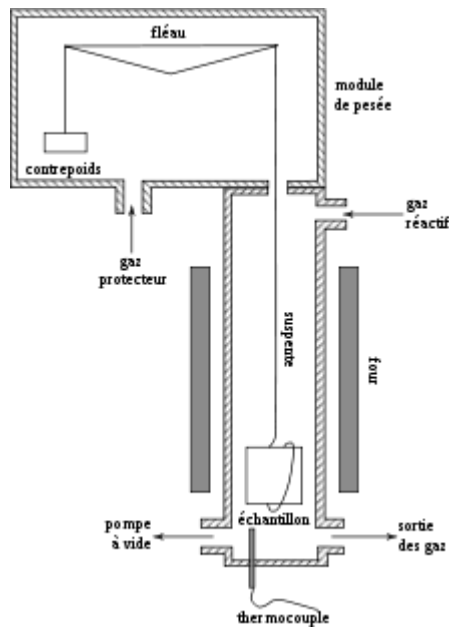


Figure 5 : Schéma type de la méthode thermogravimétrique.

2.4.2 Mesures par les sondes neutroniques

Cette méthode reste particulièrement efficace mais chère et désormais beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareil) pour être utilisée simplement par un opérateur.

Le principe de l'humidimètre neutronique s'appuie sur l'utilisation d'une faible source radioactive qui émet en continu des neutrons rapides. Ces neutrons perdent leur énergie lorsqu'ils percutent des atomes d'hydrogène, devenant lents. Ainsi, le nombre de neutrons lents retournant à la source est lié à la quantité d'atomes d'hydrogène entourant la source. Si l'on admet que la majeure partie de l'hydrogène appartient aux molécules d'eau, ce nombre estime la quantité d'eau autour de la source. Cette hypothèse constitue la base de la mesure d'humidité des sols avec la sonde à neutrons. Lorsque la source est placée dans le sol selon le dispositif, celle-ci permet d'y estimer la quantité d'eau environnante. L'émission des neutrons étant sphérique, la sonde « explore » l'eau contenue dans le volume sphérique d'environ 40 cm de rayon (**Dandet and Vachaud, 1977**).

De façon pratique, la sonde à neutrons est posée sur un tube d'accès en aluminium placé dans le sol, à l'intérieur duquel la source est guidée. Ce tube, installé une fois pour toute sur un site donné, un détecteur placé près de la source compte le nombre N de neutrons lents qui reviennent à la source.

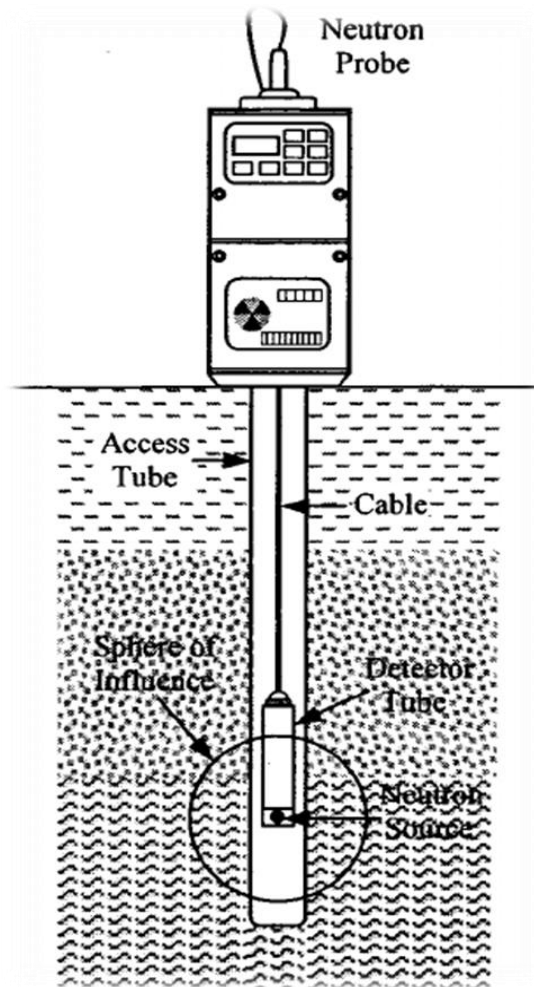


Figure 6 : Schéma d'un dispositif d'un humidimètre à sonde neutronique

La difficulté majeure de cette méthode repose sur l'installation d'un tube d'accès neutronique de quelques centimètres jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres, rendue difficile à cause des hétérogénéités du sol. De plus pour obtenir la teneur en eau il est nécessaire de réaliser une calibration en fonction du type de sol étudié. De plus elle présente un autre inconvénient d'ordre technique, puisque la méthode est très influencée par le rayonnement superficiel

2.4.3 Méthode par Tensiomètre

La canne tensiométrique se présente comme un tube obturé à l'une de ses extrémités par un bouchon auto-cicatrisant. L'autre extrémité est constituée d'une céramique poreuse qui assure la circulation de l'eau et donc de la solution du sol à l'intérieur du tensiomètre et pour créer ainsi un équilibre physico-chimique entre l'eau du tube et celle du sol (Figure.3).

Le tensiomètre, dont on a au préalable saturé la céramique poreuse, est placé sur le site à l'aide d'une tarière. Dans notre cas, chaque site est équipé de quatre tensiomètres qui nous indiqueront la tension aux profondeurs 25, 50, 75 et 100 cm.

Le tensiomètre doit être rempli d'eau jusqu'à 5 mm du bord supérieur du tube. Le tube est alors fermé à l'aide du bouchon auto cicatrisant. Le déficit en eau du sol entraîne une diminution du niveau dans le tube et crée ainsi une tension qui sera mesurée à l'aide d'un tensiomètre électronique à aiguille hypodermique de type « SMS 2500S ».

La mesure tensiométrique va nous permettre d'évaluer la succion que crée le déficit en eau du sol à l'intérieur des tubes. Les « Tensionics » ont également la propriété de posséder des capillaires qui permettent de collecter les échantillons d'eau contenus dans la céramique poreuse. En effet, après 8 à 10 jours, la diffusion des ions à travers la céramique permet d'obtenir un équilibre chimique entre la solution contenue dans la céramique et la solution du sol.

Bien que l'eau contenue dans la céramique soit en équilibre avec l'eau du sol, il n'en va pas de même avec l'eau contenue dans les capillaires ce qui entraîne une dilution des ions dans l'échantillon. Il faut donc appliquer une correction des concentrations mesurées dans ces échantillons.

Enfin, l'utilisation de cet appareil présente des difficultés lorsque les conditions climatiques sont sèches. En effet, lorsque le déficit en eau du sol est trop important, la diminution du niveau dans le tube est telle que celui-ci fini par se vider. Il est alors impossible de mesurer la succion ou de prélever un échantillon.

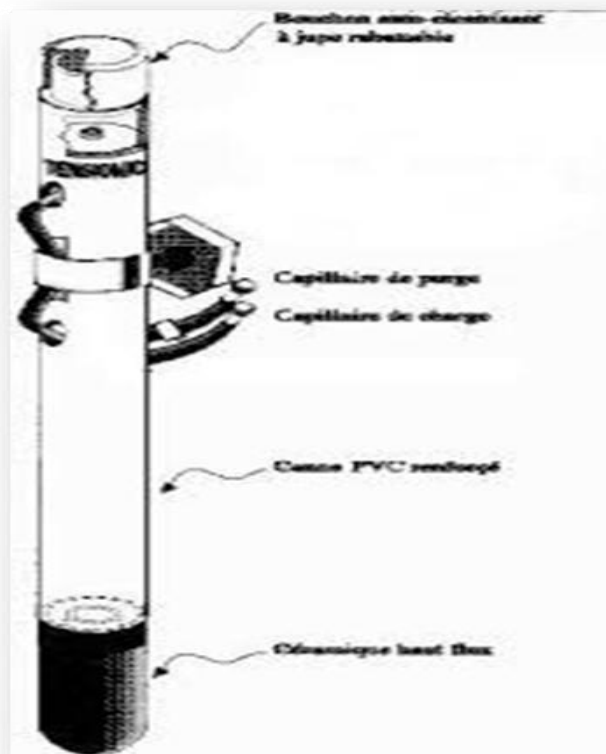


Figure 7 : Schéma d'une canne tensiométrique

2.4.4 Méthode capacimétrique

Méthode électromagnétique (mesure de la permittivité diélectrique) économique, mais au volume d'influence limité (1 à 2 cm autour des pointes du capteur) et influencée par le type de sol, la température et la salinité. Les humidimètres capacitifs gagnent en popularité maintenant qu'ils sont offerts sur le marché, car ils fournissent des lectures continues. Il reste qu'en raison de leur coût, ces appareils servent principalement dans des essais. Les sondes capacitives actuelles sont conçues pour être installées en un lieu fixe dans le champ, pour toute la saison de croissance.

Elles sont compatibles avec des niveaux élevés d'automatisation et/ou de télémétrie. Des contraintes de coût limitent souvent le nombre de sondes capacitives utilisées. L'emplacement de l'instrument est primordial pour assurer une information représentative du champ surveillé. Pour son utilisation Dans l'estimation de l'humidité du sol, on installe une conduite d'accès imperméable à l'eau dans laquelle on insère la sonde (les conduites d'accès sont généralement installées en permanence et ne bougent pas d'une année à l'autre). De nombreux points de mesure

d'humidité peuvent être fixés le long de la sonde pour obtenir des lectures à différentes profondeurs, selon la profondeur d'enracinement des cultures.

2.4.5 Méthode TDR

Née dans les années 1980, la méthode TDR (réflectométrie temporelle) se place comme une méthode incontournable tant par la qualité que par la convivialité de ses mesures. Le principe de cette mesure est basé sur la détermination du temps de propagation d'un pulse électromagnétique le long d'une électrode introduite dans le sol. Le temps de propagation de ce pulse dépend étroitement de l'humidité du sol (mesure de permittivité diélectrique).

Son volume d'influence est supérieur à celui des techniques capacitives. La mesure est par ailleurs faiblement influencée par la température, la salinité et le type de sol. Cette technologie permet des mesures précises à un tarif maintenant abordable.

Les sondes TDR cherchent aussi à mesurer la permittivité relative du sol mais cette mesure s'effectue grâce à un générateur-enregistreur d'ondes électromagnétiques. Une onde est créée par la sonde et se propage le long d'un guide d'ondes (tige métallique parallèle) puis arrivant au bout de ce guide, se réfléchit et est enregistrée par la sonde (figure .4).

Le temps d'aller-retour de l'onde permet de calculer sa vitesse (V) qui est liée aux parties réelles et imaginaires de la permittivité relative

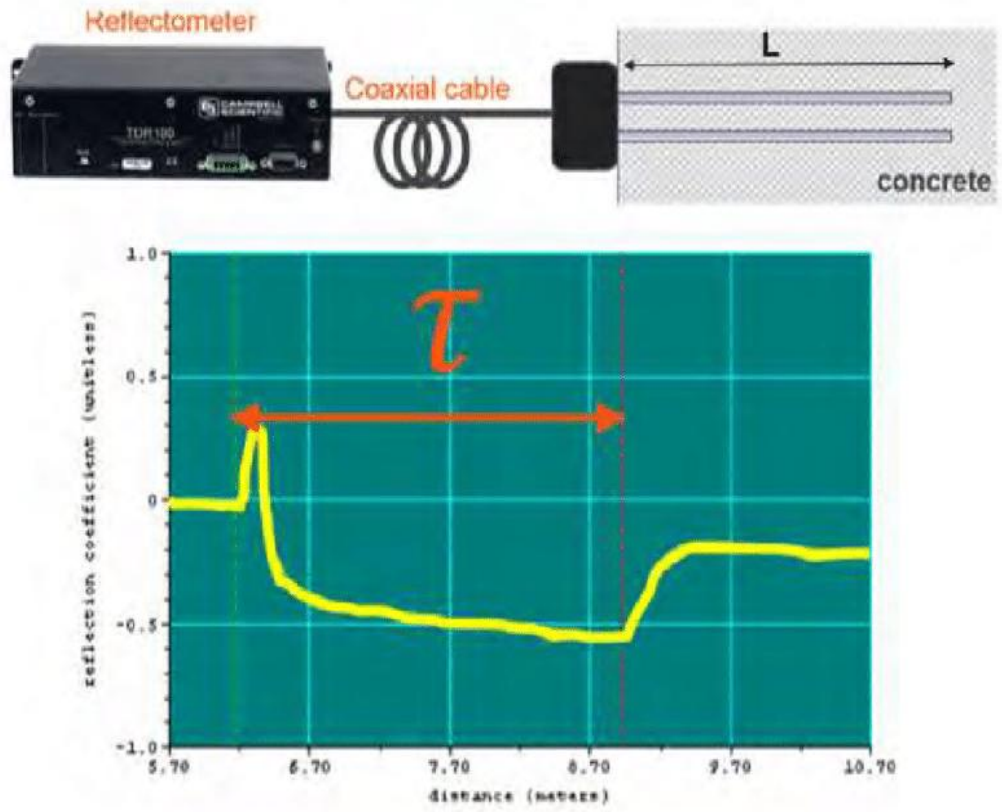


Figure 8 : Schéma d'une sonde TDR et du signal théorique obtenu.

3 Effet des paramètres du milieu sur le pilotage des irrigations

3.1 Définition de l'irrigation

Selon **El Asslouj et al**, (2007), l'irrigation est une opération à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal en cas de déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe en particulier dans les zones arides et semis –arides. Aussi on peut définir l'irrigation :

L'irrigation est un processus humain, qui oblige l'agriculteur à apporter de l'eau aux cultures agricoles en cas de pénurie d'eau. A cet égard, l'agriculteur doit utiliser rationnellement l'eau suivant les besoins en eau de chaque culture irriguée. Toutefois, une définition large de l'irrigation ; c'est l'application de l'eau au sol pour plusieurs objectifs:

- Ajouter de l'eau au sol pour assurer l'humidité essentielle au développement de la plante.
- Rafraichir le sol et l'atmosphère, de cette façon on assure un environnement favorable au développement de la plante.
- Réduire le risque de la gelée.
- Faciliter le labour du sol.

Remettre la formation des bourgeons par évaporation rafraichissante

3.1.1 Pilotage de l'irrigation

Quel que soit le contexte, le pilotage des irrigations se définit comme le raisonnement permettant de trouver une réponse à la triple question :

- Quand irriguer ?
- Combien irriguer ?
- Comment irriguer ? (Tron et al .,2013)

3.1.1.1 Quand irriguer?

Cette question concerne la position des apports dans le temps : à quelle date, à quelle heure irrigué une parcelle ? Au cours de la saison d'irrigation, l'agriculteur se pose ces questions qui prennent des formes différentes :

- Quand dois-je réaliser le premier apport ? c'est la question du démarrage des irrigations.

- Quand dois-je renouveler un apport ? C'est la question de la fréquence des irrigations. Les réponses données seront différentes selon que cette fréquence est fixée ou non
- Quand dois-je arrêter les apports ? C'est la question de la date d'arrêt des irrigations. À partir de quel critère je décide de cesser d'irriguer une parcelle ?

3.1.1.2 Combien irriguer ?

Cette question concerne les quantités d'eau à appliquer sur une parcelle, et donc la dose totale annuelle et les doses unitaires à chaque apport. La dose totale annuelle se rapporte au volume de la ressource que nous avons abordé précédemment. Les doses unitaires concernent la quantité d'eau à apporter à chaque irrigation. (Tron et al., 2013)

Répondre à la question Combien, c'est répondre à la question : De quels volumes d'eau dois-je disposer ou quelle est la somme des quantités nécessaires à chaque parcelle ?

Les réponses aux questions quand, et combien, se combinent et trouvent leurs solutions dans le choix du couple dose-fréquence (Tron et al., 2013)

3.1.1.3 Comment irriguer ?

Cette question concerne la manière de réaliser des apports. Les réponses seront différentes selon le type de matériel et le mode d'irrigation. Quelques exemples illustrent cela :

- En aspersion, le comment correspond au calcul de la pluviométrie de l'installation, et au choix de la disposition des asperseurs.
- En irrigation localisée, le comment, c'est la détermination des temps minimum et maximum d'un apport, la densité, le type et la position des goutteurs.
- En système gravitaire, le comment passe par la détermination du débit pour chaque raie et du temps d'application (Tron et al., 2013)

Quand on s'attarde sur ces trois questions quand, combien et comment, on s'aperçoit qu'elles ne sont pas indépendantes les unes des autres et qu'elles s'appliquent dans tous les cas de figures, quels que soient le mode d'irrigation et le type de culture. Ces deux aspects interdépendance des questions entre elles et indépendance par rapport au type d'irrigation, illustrent la pertinence et la complexité de cette manière de poser le problème. (Tron et al., 2013)

L'interdépendance de ces questions exclut qu'on puisse espérer le développement d'un raisonnement logique aboutissant, la meilleure solution. Elle conduit à plusieurs solutions qui se situent au centre de l'ensemble des paramètres. Chaque agriculteur, en fonction de ses conditions

et des ces objectifs, apporte la réponse qui lui semble être la meilleure. Cette interdépendance permet de poser le problème de plusieurs manière et, selon l'entrée privilégiée, on n'arrive pas forcément aux mêmes résultats. Elle limite la liberté qu'on imagine avoir car quelques points de passage obligés influencent l'ensemble du système .Ainsi, la réponse à trois questions simples exige de combiner et multitude de facteurs. De ce faire, répondre à ces questions est plus complexe qu'il n'y paraît. Par contre, cette façon de poser le problème est applicable dans toutes les situations, aussi bien pour une jardinière de fleurs sur un balcon que pour l'ensemble d'une exploitation. (Tron et al., 2013)

Pour décider de la façon de conduire les irrigations, on doit combiner plusieurs éléments. Selon les choix retenus, on obtient des réponses différentes

Il n'y a donc pas de réponse toute faite pour décider de la conduite des irrigations.

3.2 Les avantages et les inconvénients de l'irrigation

3.2.1 Les avantages

Selon **Plauchu, (2004)**, l'irrigation augmente les rendements et les régularise dans bien des régions du monde. Elle n'est pas uniquement un apport d'eau sur une terre cultivée en vue de compenser l'insuffisance des précipitations et de permettre le plein développement des cultures. Elle est considérée plutôt comme un ensemble d'actions de développement intégré des milieux agricole et rural qui doit se traduire non seulement par l'augmentation de la production et l'amélioration du niveau de vie de l'agriculteur, mais aussi se traduire également par la préservation du milieu, notamment des terres agricoles, et par une économie de l'eau d'irrigation qui elle-même se traduit par une économie dans l'utilisation de l'énergie.

3.2.2 Les inconvénients de l'irrigation

Selon (**Bouarouj S., 2011**) l'irrigation est une grande consommatrice d'eau et peut accélérer la désertification de certaines régions, elle absorbe plus 85% de l'eau maîtrisée par l'homme. L'agriculture irriguée rencontre de nos jours de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation qui peut être apprécié par la conductivité électrique (CE) et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière, due aux échanges ioniques, concerne surtout : (le sodium, le calcium et le magnésium). Il y a d'autres inconvénients aussi bien sur le sol (destruction de structure, diminution de la stabilité structurale ...) que sur les végétaux. (Tron et al., 2013)

3.3 Les ressources d'eau en Algérie

Le pays est divisé en cinq grands bassins hydrographiques regroupant les 17 bassins versent. Les ressources en eau ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature (eaux surface au eaux souterraines) (ANRH, 2003).

3.3.1 Les ressources en eau de surface

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents. Elles proviennent soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit des eaux de ruissellement (fleuves, rivières, barrages, mares)

D'après CNES, (2000), la répartition des eaux de surface en Algérie est résumée dans le tableau n°2

Bassin Hydrographique	Oranie Chott Chergui	Chéllif Zahrez	Algérois Soumam Hodna	Constantinois Seybous Mellègue	Sahara	totale
Ressources potentielle (Hm3 /an)	1025	1840	4380	4500	600	12345
Pourcentages (%)	8.30	14.90	35.48	36.45	4.86	99.99

Source: CNES,2000

Tableau2 : Répartition spatiale des eaux de surface de l'Algérie.

3.3.2 Les ressources en eau souterraine

On entend par « eau souterraine », l'eau qui se trouve sous le niveau du sol et qui remplit soit les fractures du socle rocheux, soit les pores présents dans les milieux granulaires tels que les sables et les graviers. Contrairement à l'eau de surface, l'eau souterraine n'est pas rassemblée comme un ruisseau ou une rivière, mais elle circule en profondeur dans les formations géologiques qui constituent l'espace souterrain (Myrand, 2008).

Le niveau de l'eau souterraine, au-dessous duquel les roches ou sédiments sont saturés, est appelé nappe phréatique. On trouve aussi de l'eau au-dessus de la nappe phréatique, dans la zone non saturée, par exemple sous forme d'eau du sol, mais cette eau n'est normalement pas exploitée par l'homme et on ne pas la considérée comme une eau souterraine.

Au nord d'Alger, les eaux souterraines sont réparties comme montre au tableau 3

Bassin Hydrographique	Oranie Chott Chergui	Chellif Zahrez	Algérois Soumam Hodna	Constantinois Seybous Mellègue	Totale
Ressources potentielles (Hm ³ /an)	375	231	745	28.9	1379.9
Pourcentages (%)	27.17	16.74	54	2.09	100

Source: CNES, 2000

Tableau 3 : Répartition spatiale des eaux souterraines du Nord de l'Algérie

3.4 Différentes techniques pour arroser des cultures

3.4.1 Irrigation gravitaire

L'irrigation gravitaire regroupe l'ensemble des techniques d'irrigation dans lesquelles la distribution de l'eau à la parcelle se fait entièrement à l'air libre par simple écoulement à la surface du sol. La répartition de l'eau est assurée grâce à la topographie du terrain, et aux propriétés hydriques du sol (ruissèlement, infiltration, et capillarité)

En irrigation de surface, la distinction entre les différentes techniques est essentiellement fondée sur la méthode d'application de l'eau : ruissèlement et submersion et infiltration latérale ou de haut en bas (**Robert Tiercelin et Vidal, 2006**).

L'irrigation de surface consiste à amener l'eau au point le plus haut du terrain et à la laisser s'écouler par gravité. L'eau est ensuite distribuée au champ, soit par submersion (irrigation par bassins), soit dans des sillons en terre (irrigation par sillons) ou bien par ruissèlement à la surface d'une planche d'arrosage (irrigation par planches). (**FAO ,1990**).



Figure 9: présente irrigation gravitaire traditionnelle

3.4.2 *Irrigation par bassins*

Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur ou levées. Ces levées sont conçues pour empêcher le passage de l'eau aux champs adjacents. Cette technique est utilisée, d'une façon générale, pour l'irrigation des rizières sur terrain plat, ou des terrasses à flanc de coteau (voir figure 1a). La méthode par bassins est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres fruitiers ; dans ce cas une petite cuvette (bassin) est aménagée autour de chaque arbre. En général, cette technique d'irrigation s'applique à toutes les cultures qui peuvent tolérer la submersion par les eaux pour une longue durée (ex. 12-24 heures).



Figure 10: présente irrigation par bassin

3.4.3 *Irrigation par sillons/a la raie*

Les sillons sont des petites rigoles en terre, aménagées dans le sens de la pente du terrain, pour transporter l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltré dans le sol, principalement par les côtés du sillon. Tout le long de son trajet dans le sens de la pente du terrain. Généralement, les plantes sont cultivées sur les billons séparant les sillons (voir figure 3). Cette technique est valable pour l'irrigation de toutes les cultures en lignes et pour toutes les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux de leur feuillage ou de leur collet pour une longue durée (ex. 12-24 heures). Les sillons sont alimentés par des prises d'eau aménagées sur les berges du canal d'amenée. Ces ouvrages de prise peuvent être soit de simples ouvertures aménagées sur les berges du canal d'amenée, soit des siphons, ou bien des tuyaux d'alimentation passant à travers la berge du canal d'amenée.



Figure 11: présente à la raie

3.4.4 Irrigation par planches

Les planches sont des bandes de terrain, aménagées en pente douce et séparées par des diguettes. Elles sont aussi appelées calant ou planches d'arrosage.

L'alimentation en eau des planches est faite de plusieurs façons: soit à l'aide de prises d'eau aménagées sur le canal d'amenée et équipées d'une vannette, soit par des siphons, ou bien par des tuyaux d'alimentation passant à travers les berges du canal d'amenée. La lame d'eau introduite ruisselle en descendant la pente de la planche, guidée par les diguettes des deux côtés de celle-ci (voir figure 6). (FAO, 1990)



Figure 12: présente irrigation par planches

3.5 Irrigation par aspersion

Irrigation qui projette l'eau en l'air pour tomber à la surface du sol sous forme de fines gouttelettes). C'est un réseau de conduites sous pression pulvérisant de l'eau sous forme de fine gouttes à la surface du sol. (FAO, 2008).



Figure 13: présente l'irrigation par aspersion

3.5.1 *Eléments constitutifs d'un réseau d'irrigation par aspersion*

Les techniques d'arrosage appliquées en irrigation par aspersion découlent directement du matériel utilisé. Elles se divisent en deux grandes catégories:

- L'aspersion fixe ou simple (rampes perforées, canons).
- L'aspersion mobile ou les machines à irriguer (rampes frontales, pivots, enrouleurs...).

En irrigation par aspersion, l'eau parvient aux cultures d'une façon qui imite la chute naturelle de la pluie, grâce à l'utilisation de divers appareils de projection alimentés sous pression, choisis et disposés de façon à obtenir la répartition la plus uniforme possible de la pluviométrie

Bien que l'aspersion soit théoriquement créditée d'une excellente efficacité, les chiffres observés dans la pratique se situent entre 55 % et 85 % essentiellement en fonction de la maîtrise technique des irrigants. (Cyrille ,2014)

Les éléments d'une couverture d'asperseurs sont les suivant :

- L'unité de pompage.
- La conduite principale.
- L'antenne ou porte-rampes, aussi dénommée secondaire.
- La rampe qui porte les organes d'aspersion, aussi dénommée tertiaire.
- Les asperseurs La distribution de l'eau se fait par aspersion (sous forme de pluies) aux plants (GADELLE, 2002).

3.5.2 Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par aspersion

3.5.2.1 Avantages

- Besoins en main-d'œuvre généralement faibles (mais très variables selon le degré d'automatisation).
- Absence de nivellement préalable. Cependant, la pente générale du sol ne doit pas en principe dépassé 10 %.
- Possibilité d'arroser tous les types de sol. On peut obtenir la même efficacité d'arrosage sur les sols les plus sableux que sur les sols les plus argileux, grâce à la large gamme des intensités pluviométriques offertes par les différents matériels.
- Possibilité de contrôle précis des doses appliquées, ce qui permet un bon rendement des arrosages (à condition que la technique soit bien maîtrisée par les irrigants).
- Bon rendement des réseaux de canalisation qui, avec une bonne efficacité d'arrosage à la parcelle, réduit les consommations en eau par rapport à l'irrigation de surface
- Automatisation très poussée permise par le réseau sous pression.
- Possibilité de réaliser des arrosages à faible dose et à cadence rapide (levée de semis en l'absence de pluie : cultures de contre-saison, céréaliculture en zone désertique).
- Facilité de mesure des consommations d'eau, permettant la facturation au volume,
- Possibilité de mélanger, facilement, des engrais et pesticides à l'eau d'irrigation,
- Suppression des surfaces perdues en emprises de canaux et rigoles (LOUQMAN, 2011)

3.5.2.2 *Inconvénients*

- Coût supplémentaire d'énergie en raison de la création de la pression d'eau.
- Sensible au vent.
- Perte en eau par évaporation de la surface du sol et du couvert végétal.
- Induction de maladies foliaires en cas d'irrigation par le dessus.
- Danger d'accumulation de sel sur un feuillage humide
- Risque de brûlure des feuilles et de lessivage des pesticides.
- Interférence de l'irrigation avec diverses activités agricoles telles que labour, Récolte, pulvérisation, etc.
- Danger de formation de croûte à la surface du sol et d'accroissement du ruissellement.
- Perte en eau en marge des parcelles (**Elimelech, 2002**).

3.6 Irrigation localisée (Goutte à Goutte)

L'irrigation localisée est une méthode d'arrosage qui fournit l'eau aux cultures en faible quantité et à une fréquence élevée. L'arrosage se fait en surface ou en profondeur directement dans la zone racinaire s'il s'agit de l'irrigation souterraine. L'irrigation localisée repose sur le concept de fourniture optimum de l'eau aux cultures par humidification continue du volume de sol exploité par le système racinaire. Il est en effet possible de pratiquer simultanément l'irrigation et les opérations d'entretien et de récolte de la culture. Les systèmes d'irrigation localisée sont conçus pour fonctionner journalièrement pendant presque 24 heures et pour humidifier seulement le volume de sol exploité par les racines (**Bouzar, 2012**).



Figure 14: présente irrigation localisée

3.6.1 Irrigation goutte-à-goutte basse pression

Adapté aux terrains de petite superficie (20-1000 m²), l'irrigation goutte à goutte à basse pression a été développée pour les petits producteurs, il fonctionne à une pression d'eau de 0.5-1bar fournie par un réservoir placé en hauteur variable de 1à 6 m et alimentant par gravité la parcelle à irriguer (Ayana et al, 2006) .

Ce système d'irrigation se divise en deux groupes : le système à seau d'une capacité de 20 à 30 litres placé à environ 0,5 à 1m du sol, assure l'irrigation d'une planche de 10 à 20 m² (Sijali, 2001) et, le système à fût d'une capacité de 200 à 1000L. Fonctionne sous une pression de 1 à 5 m de hauteur et couvre une superficie de 80 à 1000 m²

3.6.2 Irrigation goutte-à-goutte haute pression

Dans ce cas, une source de pression est située en amont du réseau d'irrigation. La pression fournie dépend de la source. La source peut être une force humaine, une motopompe, un groupe électrogène. Ce type d'irrigation est utilisé pour de grandes superficies (Meda, 2011).

3.6.3 Type de cultures adaptées à l'irrigation goutte à goutte

Les cultures jugées convenables pour le système d'irrigation goutte à goutte sont

- Les arbres fruitiers.

- Les cultures légumières de plein champ.
- Les cultures maraîchères et florales sous serres.
- La vigne, la canne à sucre, le coton, les fraises.

L'irrigation améliore l'établissement des arbres, l'utilisation des éléments nutritifs, la surface du feuillage et la santé des arbres. Il améliore également la taille et la qualité du fruit.

L'irrigation goutte-à-goutte est fondée sur le concept de la prévention plutôt que le soulagement du stress hydrique. (AOUATA ,2015).

3.6.4 Avantages et inconvénients de l'irrigation par goutte à goutte

3.6.4.1 Les avantages l'irrigation par goutte -à-goutte

La technique du goutte-à-goutte possède de nombreux avantages sur les autres systèmes d'irrigation. La micro-aspersion augmente de façon significative l'efficacité de l'utilisation de l'eau et améliore les conditions de développement des cultures irriguées.

Précision de l'apport en eau : l'eau est déposée avec précision à un volume de sol restreint, correspondant à la configuration du système racinaire. Une gestion adéquate de l'eau peut réduire au minimum les pertes en eau et en éléments nutritifs au-dessous de la zone racinaire

Réduction des pertes par évaporation : la réduction de la surface extérieure humectée diminue les pertes par évaporation directe de la surface du sol.

Diminution des mauvaises herbes : la réduction de la zone arrosée diminue le développement des mauvaises herbes

Automatisation : les systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte sont facilement gérables par des contrôleurs automatiques

Adaptation aux conditions topographiques et aux sols difficiles : le goutte-à-goutte fonctionne avec succès sur des terrains en pente raide, sur des sols peu profonds et compacts à faible taux d'infiltration et sur des sols sableux à faible capacité de rétention d'eau.

Insensibilité au vent : l'irrigation au goutte-à-goutte n'est pas affectée par les vents, contrairement au système de l'aspersion. Elle peut donc se pratiquer même par fort vent.

Diminution du fungus des feuilles et les maladies des fruits : le goutte-à-goutte ne mouille pas le feuillage de la plante, diminuant ainsi la fréquence des maladies des feuilles et des fruits (Moshé, 2007).

3.6.4.2 Les inconvénients de l'irrigation par goutte-à-goutte

Risques d'obstruction : les étroits passages des émetteurs sont susceptibles d'être obstrués par des particules solides, des matériaux organiques en suspension ou la précipitation de sels chimiques contenus dans l'eau. L'obstruction peut encore être occasionnée par la succion de particules de sol et l'intrusion de racines dans le goutteur.

Coût initiaux élevés : en raison du grand nombre de conduits latéraux et d'émetteurs, il est généralement difficile de déplacer le système au cours de la saison agricole. La plupart des installations sont fixes, d'où un coût d'équipement élevé par zone irriguée.

Exposition des canalisations latérales en surface et des goutteurs aux dégâts causés par les animaux : les canalisations latérales, en particuliers les tuyaux à paroi mince et les goutteurs minuscules sont sujets aux dommages causés par les rongeurs, les rats, les taupes, les sangliers et les piveris. Les canalisations latérales et les goutteurs souterrains peuvent également être endommagés par les rondes.

Limitation du volume des racines : l'application répétée de l'eau à un volume de sol limité conduit au développement de systèmes radiculaires restreints et parfois peu profonds. Par conséquent, la récolte dépend de la fréquence des arrosages et devient plus sensible à la tension d'humidité par temps particulièrement chaud. Les grands arbres aux systèmes radiculaires peu profonds sont susceptibles d'être déracinés par des vents rapides. (Moshé, 2007).

3.7 Maîtriser l'irrigation sous serre

3.7.1 Intérêts de l'irrigation sous serre

L'arrosage est un critère contrôlable, et le facteur de pousse qui déterminera le plus la qualité de vos cultures sous serre. À la différence des plantes de votre potager extérieur, vos plantations sous abri ne sont pas soumises aux précipitations. Vous seul devrez subvenir à leurs besoins en eau. En d'autres termes, si vous les arrosez mal, vos fruits et légumes ne donneront pas le meilleur d'eux-mêmes. Et si vous ne les arrosez pas, vos plantes mourront inévitablement.

Mais l'arrosage dans une serre de jardin est moins facile qu'il n'y paraît. Comme en plein air, les plantes sous abri sont elles aussi soumises à des conditions variables. Selon la saison, l'heure et l'ensoleillement, la température mais aussi le taux d'humidité variera. Vous devrez donc composer avec ces fluctuations pour arroser au plus juste.



Figure 15: arrosage sous serre

3.7.2 Conséquences d'une mauvaise irrigation

1) Croissance Limitée Des Racines

Un déficit d'eau entraîne toujours un mauvais développement des racines. Celles-ci souffriront également d'une plus grande faiblesse qu'une plante bien arrosée.

2) Pousse inégale des plants

Un bon arrosage passe par un arrosage régulier. S'il faut tenir compte des variétés, il est aussi important d'assurer le même apport en eau à l'ensemble des plantes.

3) Jaunissement ou perte de feuilles

Une plante qui perd ses feuilles ou qui présente un jaunissement du feuillage est souvent le signe d'un manque d'eau.

4) Développement de maladies

Trop d'eau ou un arrosage inadapté peuvent entraîner le développement de maladies cryptogamiques (mildiou, oïdium...).

5) Salinisation du sol

Un arrosage trop superficiel augmentera la salinité de votre terre. La plus forte évaporation sous abri engendre en effet la remontée des sels contenus en profondeur du sol vers la surface.

Ce phénomène de salinisation sous serre est un problème méconnu des jardiniers, et pourtant redoutable pour vos rendements et pour la santé de vos plantations.

6) Mauvais aspect

Très fréquemment observé sur les tomates, un sous-arrosage ou un sur-arrosage peuvent entraîner un aspect inhabituel des fruits, voire leur éclatement complet.

7) Mauvais rendements

Le manque d'eau ne permet pas à la plante d'alimenter ses fruits suffisamment, entraînant un développement réduit, anormal, voire rachitique. Certains jardiniers novices auront alors tendance à augmenter la dose d'engrais quand il faudrait simplement accroître l'apport en eau.

8) Manque de goût

Certaines variétés de fruits ou légumes peuvent devenir totalement insipides en cas de trop grande irrigation. D'autres développeront à l'inverse une amertume désagréable en cas de manque d'eau (concombre par exemple).

9) Montée en graine précoce

Le manque d'eau, appelé stress hydrique, entraîne très souvent une montée en graines. C'est un phénomène fréquent sur les cultures de salades, qui les rend malheureusement immangeables.



Figure 16: Mauvais arrosage sous serre

3.7.3 Facteurs influencent l'irrigation sous serre

a) Tenir compte de la saison et du climat

En hiver comme en automne, les températures modérées vous permettront d'espacer l'arrosage de vos cultures. Une irrigation tous les deux jours voire quelques jours par semaine suffira. En revanche, pensez à bien aérer votre serre afin de maintenir un taux d'humidité pas trop important.

À l'inverse, en cas de forte chaleur, souvent dès le printemps et durant tout l'été, adaptez logiquement le besoin en eau de vos plantations. Un arrosage quotidien sera nécessaire, voire deux en cas de chaleur durable

b) Tenir compte de la perméabilité du sol

La nature du sol agira sur sa capacité à retenir l'eau. Une terre sablonneuse ou contenant des cailloux aura une moins bonne rétention. Elle sera plus perméable et aura tendance à sécher plus rapidement. Malheureusement, le sol sera aussi moins riche en nutriments puisque sa texture ne permettra pas de les maintenir. Ils seront comme lessivés à chaque arrosage.

À contrario, une terre argileuse agira un peu comme une éponge. Vous aurez donc moins fréquemment besoin d'arroser vos plantes si la terre de votre serre a tendance à conserver l'eau que vous y versez.

c) Tenir compte des variétés de plantes

Chaque type de plante de votre serre aura des besoins différents. Certaines espèces sont plus gourmandes en eau comme la plupart des variétés possédant de grandes feuilles. Sauf exceptions (chou de Bruxelles, artichaut...), les espèces qui possèdent une large surface foliaire ont naturellement une plus grande évapotranspiration.

De même, certaines plantes possèdent des racines superficielles qui ne leur permettent pas d'aller chercher l'eau en profondeur. Ce sont aussi ces plantes qui ont besoin d'être irriguées plus souvent. Privilégiez donc un arrosage fréquent mais pas trop en abondance.

À l'inverse, pour les espèces possédant des racines profondes, arrosez moins souvent mais de façon plus abondante. Ces variétés auront la capacité d'aller puiser l'eau en profondeur et seront donc moins dépendantes de l'arrosage que vous leur fournirez.

d) Tenir compte du stade de développement

L'irrigation doit s'adapter aux besoins spécifiques des plantes selon leur stade de développement. Aussitôt après le semis, évitez d'arroser en trop grande abondance. Vous éviterez de déterrer les jeunes plants involontairement. À cet effet, privilégiez l'arrosage doux par aspersion, avec un arrosoir à pomme ou autre.

Même chose les 15 à 20 premiers jours : limitez l'irrigation excessive de façon à laisser les racines se développer. En les forçant à aller en profondeur, vous favorisez un enracinement fort, essentiel à une bonne croissance (cas des tomates).

Au stade de jeunes pousses, continuer à arroser sans excès de manière à éviter de noyer les racines. Vous éviterez aussi de lessiver un sol sans racines assez puissantes pour le retenir

3.7.4 Comment gérer l'irrigation sous serre ?

Maintenant que vous savez à quel moment arroser vos plantations, encore faut-il le faire correctement. Irriguer avec précautions évitera de nombreux problèmes

- Arroser le pied des plantes

De nombreuses variétés ne supportent pas l'arrosage des feuilles. Elles risquent de développer des maladies cryptogamiques (oïdium, mildiou...) si le feuillage reste mouillé. Privilégiez toujours un arrosage au pied des plantes, qui permettra d'irriguer davantage le sol en profondeur.

- Arroser avec une eau tempérée

Un choc thermique n'est jamais bon pour une plante. Privilégiez une eau tempérée, ni trop froide ni trop chaude. Vos plantations vous diront merci, tout comme leurs précieux alliés biologiques (vers de terre...).

- Apporter la bonne quantité d'eau

Comme vu précédemment, chaque variété a besoin de plus ou moins d'eau. Pour les variétés de pleine terre, inspectez la terre pour savoir quand arroser. Pour les plantes en pot, verser en eau l'équivalent d'environ 10% du volume du pot. Par exemple un pot de 10 litres nécessitera 1 litre.

1. UTILISER LE PAILLAGE

En cas de forte chaleur, le meilleur moyen de limiter l'évaporation excessive consiste à pailler vos plantations. Le paillage permet ainsi d'espacer les arrosages, sans compter tous les

autres bénéfiques qui l'accompagnent : régulation de la température, lutte contre les mauvaises herbes...

2. UTILISEZ DE L'EAU DE PLUIE

En dehors du fait que l'eau est un bien précieux, utiliser l'eau de pluie de récupération n'offre que des avantages :

- Economies (plus ou moins importantes selon la taille de la serre)
- Moins forte « dureté » de l'eau du robinet, plus riche en calcaire. Cela évitera de boucher vos systèmes d'irrigation de type goutte à goutte
- Température d'irrigation tempérée de façon à éviter les chocs thermiques

La seule dépense liée à l'utilisation d'eau de pluie se limitera à l'achat d'un système de récupération. Les plus bricoleurs pourront bien sûr fabriquer eux-mêmes leur récupérateur d'eau artisanal.

3.7.5 Différents systèmes d'irrigations sous serre

1. ARROSAGE MANUEL

L'arrosage manuel est le plus simple mais aussi le plus long. Un simple arrosoir suffira, alimenté par un tuyau d'arrosage pour éviter les allers et retours fastidieux. Gardez un œil sur le tuyau d'arrivée d'eau afin d'éviter d'endommager certains plants.

Très économique pour les petites serres tunnel, l'arrosage manuel est par contre plus fatiguant, voire inenvisageable si vous possédez une serre professionnelle de grande dimension.

Dernier risque lié à l'arrosage manuel : la tendance à arroser plus qu'il ne faut. Pensez à bien aérer dès que vous constatez de la buée sur les parois de votre serre. Vous empêcherez ainsi de nombreux problèmes engendrés par l'humidité.

2. ARROSAGE AUTOMATIQUE

Le matériel d'irrigation automatique offre de nombreux atouts. Plus économe en eau, il offre un gain de temps considérable passée la phase d'installation. Surtout, il répond au plus juste aux besoins en eau de vos plantations en éliminant le risque de sur-arroser ou de sous-arroser. Dernier atout de l'arrosage automatique : il peut même être utilisé en cas d'absence prolongée.

Ci-dessous les principaux équipements d'irrigation automatiques.

3.7.5.1 Goutte à goutte

Ce mode d'arrosage très ciblé, au pied des plantes, permettra d'abreuver précisément vos plantations sans risquer de mouiller leurs feuillages. Constitué de tuyaux micro-perforés ou équipés de capillaires, ce système fournira la même quantité d'eau à vos différentes plantes. Vous pourrez bien sûr augmenter ou diminuer l'apport au cas par cas. C'est le mode d'irrigation parfait pour la culture des tomates!

Seule précaution de l'arrosage au goutte à goutte : évitez d'arroser toujours le même côté de vos plantes. En apportant plus d'eau aux racines d'un côté, vous risquez de sous-alimenter l'autre partie des racines en nutriments. Pour palier à ce risque de déséquilibre, changez simplement le tuyau de place de temps en temps. Mieux encore : installez deux lignes de goutteurs de part et d'autre de vos plants.

Les systèmes goutte à goutte sont fréquemment couplés avec un minuteur de façon à réguler l'arrosage. Le fonctionnement se fait au moyen d'une pompe à énergie solaire.

Enfin, les buses d'arrivée d'eau doivent être inspectées régulièrement afin de s'assurer qu'aucune ne soit obstruée par du calcaire ou des particules de terre.

3.7.5.2 Aspersion

Plus répandus dans les serres professionnelles que dans les serres pour particuliers, les systèmes d'aspersion impliquent davantage d'investissements.

C'est un mode d'arrosage par le haut, très doux, qui d'une certaine manière reproduit les précipitations naturelles. Il ne présente aucun risque de lessivage ni de perturbation des racines. Il est plutôt réservé aux cultures nécessitant un taux d'humidité important. Vous le rencontrerez sur les cultures de semis et systématiquement à l'intérieur des serres tropicales. En résumé, sur toutes les plantes ayant de gros besoins en eau, qui ne craignent pas les maladies fongiques dues au feuillage mouillé.

Conclusion

Après des efforts, des études et des recherches personnelles, j'ai réalisé ce travail modeste dans le but d'étudier l'eau, l'humidité et l'irrigation de précise l'irrigation sous serre

Tout D'abord, L'eau est un facteur essentiel de l'agriculture .Ingrédients des plantes. Il transporte également toutes les substances dont la plante a besoin. A l'inverse, si les plantes ne reçoivent pas assez d'eau, leur taille et leur rendement sont limités.

D'une part, l'humidité du sol joue un rôle important dans l'étude du cycle de l'eau. C'est une variable fondamentale dans les organismes du cycle de l'eau tels que l'agronomie, climatologie ou l'hydrologie.

L'objectif principal de ce mémoire est de contribuer à une meilleure étude et compréhension de l'estimation de l'humidité du sol et de sa mesure. Cette étude aborde différentes manières d'accéder à ces valeurs à partir des données de terrain et par différentes méthodes.

Enfin , L'irrigation est fort utile, mais elle exige en contrepartie une excellente régie : il faut appliquer les bonnes quantités d'eau au bon moment, pour éviter des excès, des stress hydriques indésirables et des pertes d'eau et de fertilisants dans l'environnement.

Pour assurer une bonne régie de l'eau, il est d'abord indispensable de connaître les besoins de la culture et la variation de ceux-ci en fonction du stade de développement. Aussi, il est impératif de mesurer régulièrement la teneur en eau du sol. Cette information permettra de préciser le moment propice à l'irrigation et surtout si les quantités appliquées sont insuffisantes ou en excès par rapport au type de sol et au besoin de la culture, et pour choisir une méthode d'irrigations, l'agriculteur doit connaitre les avantage et les inconvénients des différentes méthodes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **BREDAN et al, 2007**. cité par **ZEROUATI F 2015-2016**, (massif du Hodna). Bureau d'Ingénierie et d'études Techniques 22,555–572.
2. **A.N.R.H., 2005**- Etude pédologique du Hodna (wilaya de M'sila). Rapport année 2004-2005. *advances in water resources*,24.631-650. Alger, 41p.
3. **AMROUNE A.,2020 Cours d'irrigation et drainage 2p**
4. **AOUATA I**, mémoire de fin d'étude « Étude et Développement de l'irrigation souterraine en Algérie» application à la détermination du bilan hydrique.*Ann.Agron.*28(5).pp.503-519.
5. **BOUAROUI S., 2011**-Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation. Mémoire Magistère,
6. **CEMAGREF, CEP FRANCE AGRICOLE (1992).Irrigation. 2èmeEdition**
7. **CYRILLE L ., 2014**. Conception participative d'un projet de modernisation du système d'irrigation par aspersion dans le casier Z1 (Zemamra).
8. **D., 2008**- Guide technique : captage d'eau souterraine pour des résidences isolées,
9. **DANDET and VACHAUD 1977**, la mesure neutronique du stock d'eau du sol et ses variation
10. **DARCY, H., 1856** : Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont Paris.
11. **De MARSILY, G., 1995** : L'eau. Dominos, Flammarion, d'émission à flamme .NA 1653, ISO 9964-3. Ed. INAPI. Edition et diffusion. Alger,4p. des eaux usées. Afrique SCIENCE 03(1), Pp : 109- 122.
12. **EL ASSLOUJ J., E KHOLTEI S., EL AMRANI N et HILALI A., 2007**- Analyse de la
13. **El-Amrani, N., El-Asslouj, J., Hilali, A. et Kholtei, S. (2007)**. Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées. *Afrique science* ; vol 03(1) : 109-122P.
14. **El-Amrani, N., El-Asslouj, J., Hilali, A. et Kholtei, S. (2007)**. Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées. *Afrique science* ; vol 03(1) : 109-122P.
15. **Elimelech S ., et Moshe S .,LIRRIGATION PAR ASPERSION.2002.93 P.**
16. **Escorihuela, M.-J., Y. Kerr, P. de Rosnay, J.-P. Wigneron, J.-C. Calvet, and F.**

17. **EURL (T.A.D : Territoire. Aménagement. Développement), Juin 2008-** Etude relative à
18. **FAO, (2003).** L'Irrigation avec des eaux usées traitées : manuel d'utilisation ; 68P.
19. **FAO., 1990-** Qualité de l'eau. Dosage du sodium et du potassium. Méthode par spectromètre
20. **FAO., 1990.** Gestion des eaux en irrigation. Manuel de formation n°5. Méthode d'irrigation *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 65P.*
21. **FAO., 1994-** Qualité de l'eau. Dosage Des nitrates. Méthode par spectromètre d'absorption
22. **Hillel, A., 1988 :** L'Eau et le Sol Principes et processus Physiques. pedasup-Université catholique de Louvain
23. **Kerr and Cabot 2009,** la mission SMOS et son impact sur les prévisions des changements planétaires in l.é. SMOS(Ed).
24. **Kerr and Cabot 2009,** la mission SMOS et son impact sur les prévisions des changements
25. **Koster, R. D., P. Dirmeyer, Z. Guo, G. Bonan, P. Cox, C. Gordon, S. Kanae, E.**
26. **Kowalczyk, D. Lawrence, P. Liu, C. Lu, S. Malyshev, B. McAvaney, K. Mitchell, D.** l'Environnement, Press Polytechniques et Universitaires Romandes.

la caractérisation et à la délimitation des zones de montagne et des massifs montagneux
land surface parameters in african tropical deforestation experiments. *Climate Dynamics,*
Lemaître, 2006 : A simple model of the bare soil microwave emission at l-band. *IEEE*
Lemaître, 2006 : A simple model of the bare soil microwave emission at l-band.
IEEETrans. Geosc. Remote Sens., 45(7) ,1978–1987
27. **Maynard, K., and J. Royer, 2004 :** Sensitivity of a general circulation model to
28. **Mocko, T. Oki, K. Oleson, A. Pitman, Y. Sud, C. Taylor, D. Verseghy, R. Vasic, Y. Xue,**and T. Yamada, 2004 : Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation.*Sciences, 305(5687),1138–1140.*
29. moléculaires. NA 165è, ISO 6777. Ed. INAPI. Edition et diffusion. Alger,4p.
30. **Moshe S .,** l'irrigation au goutte a goutte .2eme édition .2007.Pp6 _8.
31. **Musy, A., and M. Soutter, 1991 :** Physique du sol. Collection G'erer
32. planétaires in l.é. SMOS(Ed).

33. **Plauchu., 2004-** Economie de l'environnement. Polytechniques et Universitaires Romandes. qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage Québec, P04. retrieval by assimilation of near-surface observations a comparaison of retrieval algorithms Trans. Geosc. Remote Sens., 45(7),1978–1987.
34. **Tron G., Isbérie C. et Chol P.2013** . la tensiométrie pour piloter les irrigations . Ed.Educagri.240p.
35. **Walker et al 2004**.j.p, willgoose G,R,et Kalm ,JD :one-dimensional soil moisture profile Université Costantine.P3.