

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministry of Higher Education And Scientific Research

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

Higher School of Agriculture

Mostaganem

Martyr Mohamed el Amjed Ben
Abdelmalek



المدرسة العليا للفلاحة

بمستغانم

الشهيد محمد الأجد بن عبد المالك

École Supérieure d'Agronomie – Mostaganem

Département du Second cycle - Agronomie

Support de cours Agrométéorologie

Rédigé par Dr KOURAT.T

Maitre de Conférences classe B à l'ESAM.



Ce cours est destiné aux étudiants de 4^{ème} Ingénieur et Master Agronomie de l'École Supérieure d'Agronomie de Mostaganem

Spécialités :

Production végétale.

Protection des végétaux.

Année universitaire 2023/2024

Avant-propos

Ce cours est destiné aux étudiants agronomes, des deux spécialités : Production végétale et protection des végétaux, de l'ESAM.

Le premier objectif de ce cours est de rappeler des notions de base sur le climat ; l'atmosphère, l'eau et le sol. Le deuxième objectif de cours, est de faire connaissance aux étudiants, des appareils de mesures (pluviomètres, thermomètres, anémomètres....etc) des paramètres climatiques (pluies, température, vent....etc), pour aboutir à des enregistrements fiables des observations météorologiques. Ainsi, les étudiants puissent arriver à la compréhension de la relation temps-pratiques agricole et production agricole.

Ce cours initiera les étudiants à la lutte contre les aléas climatiques surtout la lutte antigel et les préparer à une meilleure utilisation de l'eau dans la parcelle à travers la maîtrise de calcul des besoins en eau des plantes et le calcul de bilan hydrique de sol.

Un très fort remerciement s'adresse aux deux professeurs :

- **Benkhelifa Mohammed**, Professeur au Département d'Agronomie, Science du Sol et Environnement de l'Université Abdelhamid. Benbadis Mostaganem (UMAB).
- **Madani Azzeddine**, Professeur à la Faculté des sciences sociales et humaines de l'Université Djilali Bounaama Khemis Miliana.

Pour leur expertise et leur contribution à l'amélioration de contenu de ce support pédagogique.

Sommaire

Avant-propos	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités	1
1. Définitions des divers concepts relatifs à la météorologie et à la climatologie	1
1.1 Climatologie	1
1.2 Définition de la météorologie	1
1.3 Définition de la bioclimatologie	1
1.4 Définition de l'agroclimatologie	1
2. Climat et ses composantes	2
2.1 Définition de climat	2
3. Les observations météorologiques	2
3.1 Les objectifs de mesure météorologiques pour l'agriculture	3
3.2 Les appareils de mesure	3
3.2.1 Mesure des températures	3
3.2.2 Mesure des pluies	4
3.2.3 Mesure de vent	5
3.2.4 Mesure de l'insolation	6
3.2.5 Mesure de l'humidité	7
a. L'humidité absolue	7
Nombre de grammes de vapeur d'eau contenus dans un mètre cube d'air	7
b. L'humidité relative	7
Rapport de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale.	7
3.2.6. Mesure de l'évaporation	8
3.2.6.1 Méthodes directes de mesure de l'évaporation	9
a. Bac d'évaporation	9
b. Les évaporomètres	10

b. 1 Corps en porcelaine poreuse.....	10
b.2 Évaporomètre Piche	10
3.2.6.2 Méthodes empiriques.....	11
3.2.6.3 Méthode analytique	12
a. Méthode du bilan hydrique	12
3.2.7 Mesure de la pression atmosphérique.....	12
3.2.8 L’abri météorologique	13
3.2.9 Les stations météorologiques	14
3.2.9.2 Stations climatologiques ordinaires:.....	15
3.2.9.3 Stations synoptiques principales).	15
3.2.9.4 Stations agro-météorologiques.....	15
3.2.9.5. Les différents types de stations météo agricoles	15
c. Les stations météo connectées	16
Chapitre II : Le rayonnement et le bilan radiatif	19
1. Qu’est-ce que le transfert thermique ?	19
1.1 Divers types de transfert de l’énergie ou de chaleur	19
1.1.1 La conduction	19
1.1.2 La Convection.....	19
2.1 Le rayonnement ionisant	19
2.2 Le rayonnement non ionisant.....	20
3. Flux énergétique	20
4. Densité de flux énergétique	20
5. Le spectre des longueurs d’onde.....	20
6. Les lois relatives au rayonnement.....	21
6.1 Loi de Stefan Boltzman	21
6.2 Loi de Kirchoff	21
6.3 Loi de Wien	21
7. Le rayonnement solaire ou de courtes longueurs d’onde	22

7.1 Le soleil : source d'énergie.....	22
7.2 Rayonnement incident, diffus et global.....	23
7.3 Le rayonnement réfléchi et l'albédo.....	24
7.4 Les bilans courtes ondes et longues ondes	24
8. Équilibre radiatif de la terre et effet de serre	25
Chapitre III. Étude de l'atmosphère	27
1. Présentation de l'atmosphère.....	27
2. Différentes strates de l'atmosphère.....	27
a-Troposphère.....	27
b. Stratosphère	28
c. Mésosphère.....	28
d. Thermosphère	28
e. Exosphère	29
3. Rappel de la loi des gaz parfaits	29
4. Caractéristiques de l'air ambiant	30
4.1. La pression de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.....	30
4.1.1. Pression saturante.....	30
4.1.2. Pression effective	30
4.2. La température au point de rosée	31
4.3. Expression des humidités dans l'air	31
4.3.1. Humidité relative.....	31
4.3.2. Humidité absolue ou concentration de la vapeur d'eau dans l'air.....	31
4.3.3. Humidité spécifique	31
4.3.4. Le rapport de mélange	32
Chapitre IV : Évapotranspiration.....	33
1. Définition de l'évapotranspiration	33
2. Les facteurs affectant l'évapotranspiration	33
3. Les différents concepts d'évapotranspiration	33

3.1 Évapotranspiration de référence ET_0 (ou ETP).....	33
3.2 Évapotranspiration maximale (ETM).....	34
3.2.1 Le coefficient cultural (K_c)	34
3.3 Évapotranspiration réelle (ETR)	35
Chapitre V : Température et production végétales	37
1. Les différentes notions de température	37
1.1 Température maximale (T_{max})	37
1.2 Température minimale (T_{min}).....	37
1.3 Température moyenne (T_{moy})	37
2. Action des températures sur les cultures	37
2.1 Zéro de végétation.....	38
2.2 Températures létales.....	38
2.3 Degré jour de croissance (D_j)	39
2.4 Somme de températures	39
2.4.1 Exemple de somme de températures des stades végétatifs du blé	39
3. Les gelées	39
3.2 Type de gelées	39
3.2.1 Les gelées blanches	40
3.2.2. Les gelées noires	40
3.2.3 Le gel d'advection.....	40
3.2.4 Le gel par radiation	41
3.2.5. Le gel par évaporation	41
3.3 Périodes d'apparition des gelées	41
3.3.1 Les gelées de printemps.....	41
3.3.2 Les gelées automnales	41
3.3.3 Les gelées hivernales.....	42
3.4. Lutttes contre les gelées.....	42
3.4.1 Les méthodes indirectes (passives)	42

a. Le choix du terrain	42
b. S'informer sur la météorologie de site	42
d. Le déboisement	43
e. Les pratiques culturales	43
f. Éviter les périodes de gels	43
g. Augmenter la résistance des plantes face au gèle (endurcissement)	43
h. Les pratiques agronomiques	43
i. Choisir le type de sol et améliorer sa résistance face au gel	44
j. Bien gérer les paillis	44
3.4.2 Les méthodes directes de protection contre le gel.....	44
a. Le recouvrement des cultures	45
b. La formation de fumée ou de brouillard.....	45
d. L'aspersion d'eau	46
e. Le recours à l'irrigation.....	46
f. Le chauffage.....	46
4. Phénomène d'échaudage	47
Chapitre VI : Utilisation de l'eau en agriculture.....	48
1. Le problème de l'eau dans le monde.....	48
2. Répartition de l'usage de l'eau dans le monde	48
3. Disponibilité de l'eau douce dans le monde	49
4. Disponibilités de l'eau en Algérie.....	Error! Bookmark not defined.
5. Les états de l'eau dans le sol	51
5.1 L'eau hygroscopique	51
5.2 L'eau capillaire.....	51
5.3 Eau gravitaire.....	51
6. Quelques définitions	53
6.1 Capacité de rétention.....	Error! Bookmark not defined.
6.2 Point de flétrissement permanent.....	Error! Bookmark not defined.

6.3 Eau disponible	Error! Bookmark not defined.
6.4 La capacité au champ	Error! Bookmark not defined.
6.5 La réserve utile (RU).....	53
6.6 La réserve facilement utilisable (RFU)	53
7. Estimation des besoins en eau des cultures	54
7.1 Exemple d'estimation des besoins en eau de la laitue.....	54
7.2 Estimation des besoins en eau des cultures avec la méthode de bilan hydrique	55
7.2.1 Récapitulatif des étapes pour établir le bilan hydrique.....	55
Conclusion générale	57
Bibliographie	58

Introduction générale

La météorologie est aussi ancienne que l'agriculture. En effet, depuis que l'homme a commencé à cultiver, il a toujours observé le temps. Les observations et l'enregistrement des données météorologiques étaient la base principale derrière l'introduction de nouvelles variétés de cultures, ainsi que l'utilisation de périodes climatiques plus favorables pour augmenter les rendements. C'est ainsi que les agriculteurs ont pris conscience qu'il fallait à la fois observer et enregistrer les caractéristiques du temps, pour mieux tirer profit des conditions météorologiques favorables et atténuer ou éviter les effets défavorables pour les pratiques agricoles. Cependant, avec le temps, ils se sont rendu compte que les données météorologiques seules avaient une application limitée et ne suffisaient plus à satisfaire les besoins croissants de l'agriculture. En effet, il est très difficile, voire impossible, de déterminer les effets du temps sur l'agriculture uniquement en se basant sur son observation. Face à ces difficultés, une nouvelle discipline combinant les observations météorologiques d'une part et agricoles, d'autre part, verra le jour qui a pris le nom de l'agrométéorologie. Cette dernière permet d'appréhender de façon objective et réaliste l'impact des différents éléments du temps sur l'agriculture. C'est dans cet objectif et pour compléter leurs observations que les agrométéorologistes ont commencé à observer les plantes, les animaux domestiques, l'apparition des parasites et des maladies, etc.

Ainsi, ce cours est un support pédagogique pour les étudiants agronomes, des deux spécialités : production végétale et protection des végétaux, pour les initier à l'agrometeorologie. Ce cours est entamé par des rappels et sur les paramètres climatiques et leur mesure. Ensuite, un chapitre sur le rayonnement global est abordé. Le prochain chapitre sera consacré à l'étude de l'atmosphère. Le chapitre qui suit est dédié à l'étude d'un phénomène important pour les végétaux, il s'agit, bien évidemment de l'évapotranspiration. Un autre chapitre sera consacré à la compréhension de l'action des températures sur les végétaux. Avec ce chapitre, le problème de gelée auquel font face les agriculteurs sera étudié, en proposant une variété de méthodes de lutte antigel. Le dernier chapitre ce cours est consacré à l'utilisation de l'eau en agriculture, ainsi l'étudiant comprendra que l'eau est de plus en rare dans le monde surtout avec les effets de changement climatiques. L'étudiant sera initié à valoriser l'eau agricole à travers le calcul des besoins en eau des cultures et l'établissement de bilan hydrique de sol.

En résumé, ce cours sera un futur guide pour les futurs ingénieurs agronomes dans la compréhension de l'impact de climat sur l'agriculture, ce qui les aidera à entreprendre des stratégies de lutte contre tous aléas climatiques.

Chapitre I : Généralités

1. Définitions des divers concepts relatifs à la météorologie et à la climatologie

1.1 Climatologie

Est la science dans laquelle on cherche à apercevoir les régularités des phénomènes atmosphériques observés et à mettre les lois qui les expliquent, tout en acceptant que la variabilité reste un aspect essentiel du climat. Le climat change, et a changé et changera. La climatologie s'attache ainsi, également, à comprendre les mécanismes climatiques du passé, et tente, à partir de données collectées et de modèles, de décrire les évolutions futures (Heymann, 2010).

1.2 Définition de la météorologie

Le mot vient du grec ancien *meteōros* (« qui est au-dessus de la terre »), qui désigne les particules en suspension dans l'atmosphère et *logia*, « discours » ou « connaissance ».

Selon le dictionnaire Larousse, la météorologie est la science qui étudie les phénomènes affectant la partie la plus basse de l'atmosphère terrestre (ou troposphère).

La météorologie est une science qui a pour objet l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les précipitations ou le vent dans le but de comprendre comment ils se forment et évoluent en fonction des paramètres mesurés tels que la pression, la température et l'humidité (Fierro, 1991).

1.3 Définition de la bioclimatologie

Selon le dictionnaire Larousse, la bioclimatologie est une branche de la biologie qui étudie les échanges de masse et d'énergie entre les êtres vivants et leur environnement climatique.

La bioclimatologie est l'étude des effets du climat et des microclimats sur le développement de tous les êtres vivants et par extension sur les écosystèmes (Lowry, 2013).

1.4 Définition de l'agrocimatologie

C'est la science qui décrit, explique, classe les climats et tire les conséquences pour l'agriculture. Il ne s'agit pas d'une description du point de vue de la géographie physique, mais plutôt des seuls facteurs climatiques ayant une influence sur le développement de l'agriculture (vent ; pluie ; végétation ; ensoleillement ; etc.). Cette science s'appuie sur les sciences physiques et biologiques fondamentales pour découvrir, définir et appliquer les connaissances météorologiques et climatiques à la production agricole (Takle, 2015).

Sur le plan agricole, il ne s'agira pas de biologie végétale. On se limitera à la compréhension des mécanismes du développement végétatif, afin que pour une plante donnée, sous un climat donné, on puisse quantifier les volumes d'eau dont elle a besoin pour sa production optimale. Ces quantités d'eau s'appellent besoin en eau des cultures. Pour arriver à cette quantification, nous allons étudier les facteurs qui agissent ou qui interagissent sur la plante au cours de son développement végétatif.

Nous allons donc étudier, sous un climat donné, les relations eau- sol- plante pour aboutir à la détermination des besoins en eau de la plante considérée. L'agrométéorologie donc, s'occupe des questions météorologiques, hydrologiques, pédologiques et les facteurs biologiques qui affectent la production agricole ainsi que les interactions entre agriculture et environnement.

2. Climat et ses composantes

2.1 Définition de climat

Le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans (défini par l'Organisation Météorologique Mondiale). Il est donc caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes(**IPCC, 2018**).

A l'échelle de la planète, le climat représente une machinerie complexe qui est le produit, dans l'espace et dans le temps, de toute une série d'interactions entre les éléments qui composent les différents compartiments : l'atmosphère, la lithosphère (la croûte terrestre), l'hydrosphère (l'ensemble des mers, des océans, des lacs et des cours d'eau de la planète), la cryosphère (les glaces du monde entier) et la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation) (**Houghton, 2001**).

3. Les observations météorologiques

Les observations météorologiques portent sur les éléments du climat ou facteurs climatiques qui sont la température, l'humidité de l'air sous abri, les précipitations et le vent (vitesse et direction). À ces mesures, peuvent s'ajouter des paramètres supplémentaires comme l'insolation, l'humidité (l'hygrométrie), la nébulosité, l'évaporation, la radiation, la pression atmosphérique, et l'ensoleillement global par exemple. Ces observations sont généralement opérées par une station locale de mesures. Les mesures sont réalisées sur des temps courts de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes. Les pas de temps d'enregistrement des données mesurées sont généralement horaires et journaliers.

3.1 Les objectifs de mesure météorologiques pour l'agriculture

Selon **Makin et al. (2002)**, une relative connaissance des facteurs climatiques, enregistrés par l'agriculture lui-même ou par des spécialistes, doit aider l'agriculteur dans les décisions qu'il devra prendre :

Des décisions à long terme d'abord, que l'on peut qualifier de stratégique et qui tiennent compte du climat local connu par les enregistrements météorologique des années passées :

- Le choix des cultures à entreprendre, l'élimination de celles que le climat rend trop aléatoire
- Les investissements en matériel : matériel d'irrigation par exemple, matériel de récolte, puissance des tracteurs en fonction du sol et des jours disponibles de travail
- L'engagement de personnel, permanent ou temporaire

Des décisions à court terme, qualifiées de tactiques, qui tiennent compte des prévisions météorologiques à court terme ou des enregistrements récents. La plupart des décisions à prendre par l'agriculteur au matin de chaque journée, ou pour les 2 ou 3 jours, qui viennent, dépendent du temps qu'il fait, qu'il a fait, ou qu'il va faire :

- Les travaux culturaux comme la prise au sol au bon degré d'humidité, les binages et sarclages, la récolte des céréales ;
- Le déclenchement des moyens de lutte contre les intempéries : irrigation, aspersion...etc ;
- La conduite de la lutte antiparasitaire et herbicide : du temps écoulé ou qui s'annonce dépend l'évolution des parasites et la possibilité ou non de traiter sans danger pour la culture traitée ni pour les cultures voisines (température, vent...)

3.2 Les appareils de mesure

3.2.1 Mesure des températures

La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre (Figure.1) qui utilise le plus souvent la dilatation d'un corps (alcool généralement) placé dans un tube fin (qui amplifie l'effet de dilatation). L'unité utilisée dans le système international est le degré Celsius (°C).

Dans ce système, la différence entre le niveau du liquide au point de congélation (physique) de l'eau et au point d'ébullition de l'eau est de 100 °C (pour une pression atmosphérique standard). L'échelle Fahrenheit est elle aussi utilisée (0 °C = 32 °F et 100 °C = 212 °F). D'autres types de thermomètres existent, comme le thermomètre à résistance électrique, le thermomètre à bilame... Le thermomètre à alcool peut être aussi à minima, à maxima ou à minima-maxima. (**WMO, 2008**).

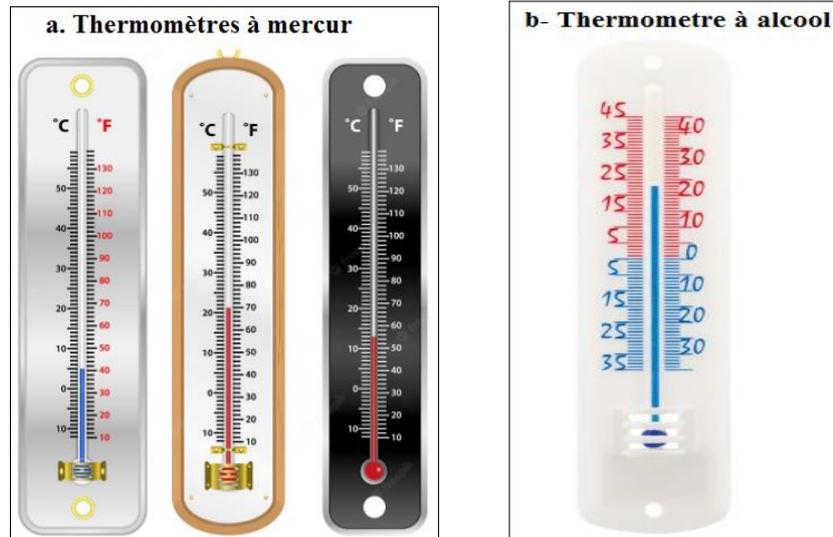


Figure.1 Thermomètres (Source : Figure.a https://www.freepik.com/premium-vector/realistic-mercury-thermometer-isolated-illustration-room-temperature_16517599.htm et Figure.b: source: <https://www.ehandikids.shop/thermom%E3%A8tre-alcool-c-6708/thermometre-alcool-195x42mm-p-6455430>)

3.2.2 Mesure des pluies

Les données de volume des pluies sont obtenues à l'aide de pluviomètres (Figure.2) : ils mesurent la hauteur de pluie tombée. Les radars météorologiques sont une autre source d'information : ils localisent les précipitations en temps réel et renseignent sur leur intensité. Les précipitations se mesurent en hauteur d'eau tombée au sol rapportée à une unité de surface. L'unité utilisée est le millimètre de précipitation par mètre carré. En supposant une répartition homogène des précipitations sur cette surface, 1 millimètre de pluie représente 1 litre d'eau par mètre carré. Les pays anglo-saxons utilisent parfois l'inch (le pouce). 1 inch correspond à 25,4 mm de précipitations et la résolution la plus courante est le centième de inch (0,254mm) (WMO, 2008).

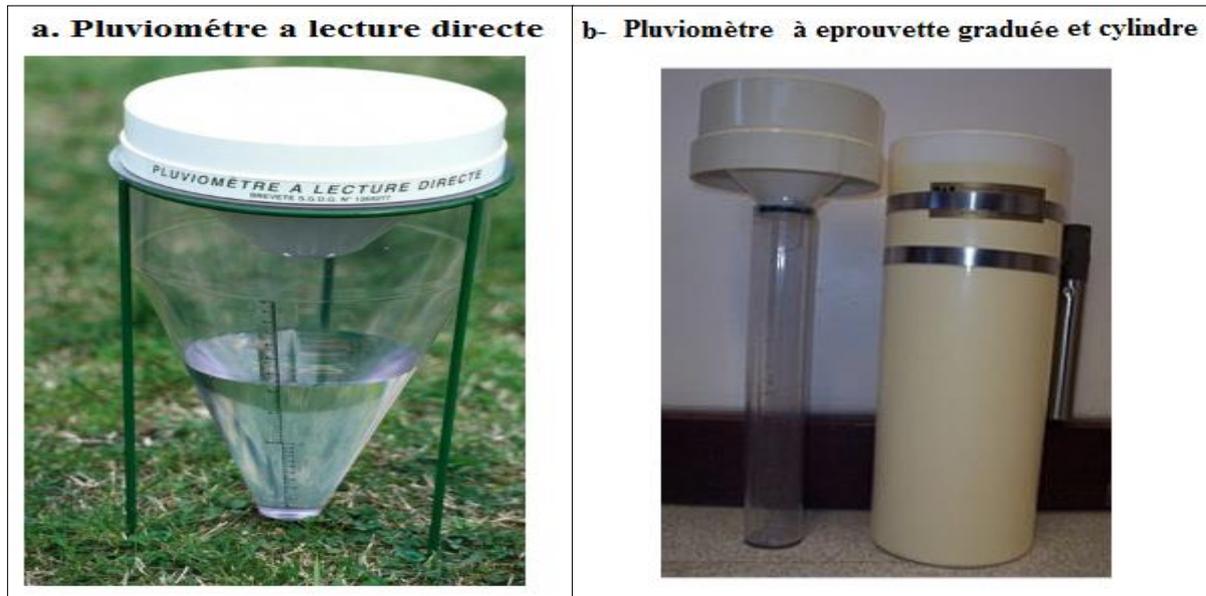


Figure. 2 Pluviomètres (Source :Figure.2.a : <https://www.naturabuy.fr/PLUVIOMETRE-SPIEA-NEUF-item-11518289.html> et source Figure2.b : <https://www.naturabuy.fr/PLUVIOMETRE-SPIEA-NEUF-item-11518289.html>)

3.2.3 Mesure de vent

Le vent est un mouvement horizontal de l'air sur la surface de la Terre. Il naît d'une différence de pression, et se propage perpendiculairement aux isobares, des pressions hautes vers les basses, de façon à réduire les écarts de pression. Le vent peut être défini par sa direction (le plus souvent son origine) et par sa vitesse (en Beaufort, kilomètre par heure, mètre par seconde...). On utilise pour mesurer la direction du vent une girouette (Figure.3.a) et pour la vitesse un anémomètre (Figure.3.b).

La girouette est une plaque de forme variable, mobile autour d'un axe vertical et placée au sommet d'un toit. Sous l'effet du vent, la girouette se place dans le sens du vent (la plaque du côté opposé à l'origine du vent). La lecture de la position angulaire de la girouette, à l'œil ou de manière électronique, donne la direction du vent. L'anémomètre est un instrument qui sert, de manière générale, à mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide gazeux. Il peut être constitué d'une simple hélice munie d'un capteur de vitesse (qu'il faut orienter alors dans le sens du vent) ou d'un rotor supportant trois demi-sphères placées à 120° l'une de l'autre et muni d'un capteur de fréquence (WMO, 2008).

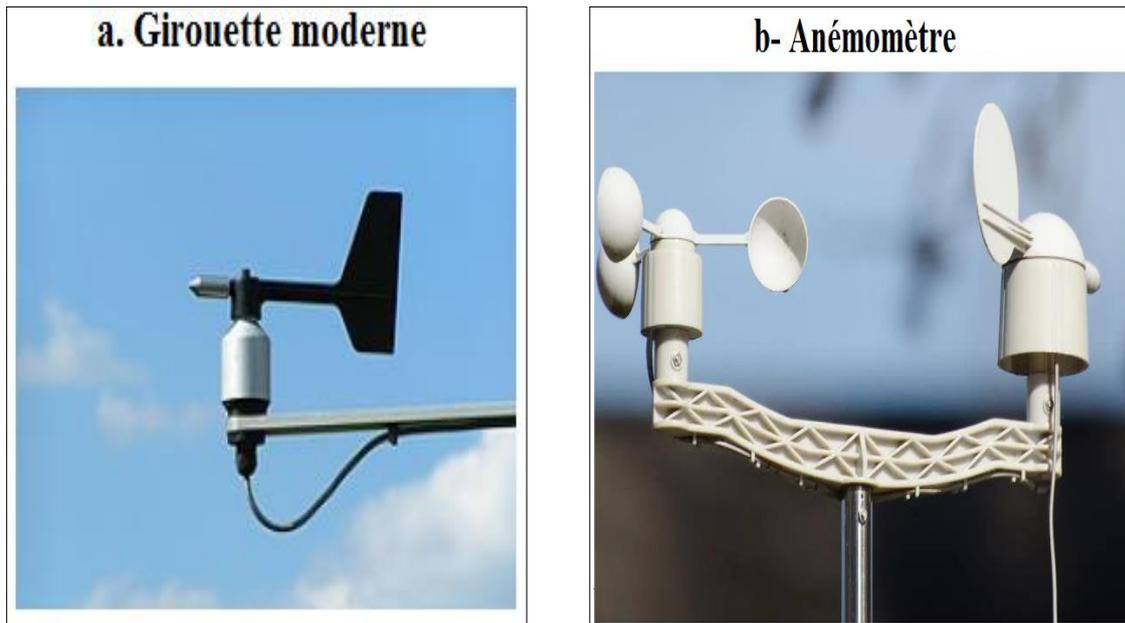


Figure. 3 Appareils de mesure de la direction de vent et de sa vitesse (source Figure 3.a :<https://fr.wikipedia.org/wiki/Girouette> et source Figure.3.b <https://fr.wikipedia.org/wiki/Girouette>)

3.2.4 Mesure de l'insolation

La densité de la couverture nuageuse est importante pour le climat local et son évolution. Elle est aussi appelée « nébulosité » et est mesurée en octet : un ciel à 8/8 est complètement couvert et un ciel à 4/8 est à moitié couvert. L'instrument utilisé pour mesurer la nébulosité est l'héliographe (Figure.4.a), instrument qui indique la durée de l'ensoleillement du lever au coucher du soleil. Il est constitué d'une boule de verre (Figure.4.b) qui, en agissant comme une loupe, concentre les rayons solaires sur une bande de papier où ils brûlent localement la surface. Cette bande de papier est graduée en heure et son étude permet de connaître, à chaque instant de la journée si les rayons solaires franchissaient ou non la couverture nuageuse. Il est aussi possible de recourir aux cellules photovoltaïques pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire (WMO, 2008).

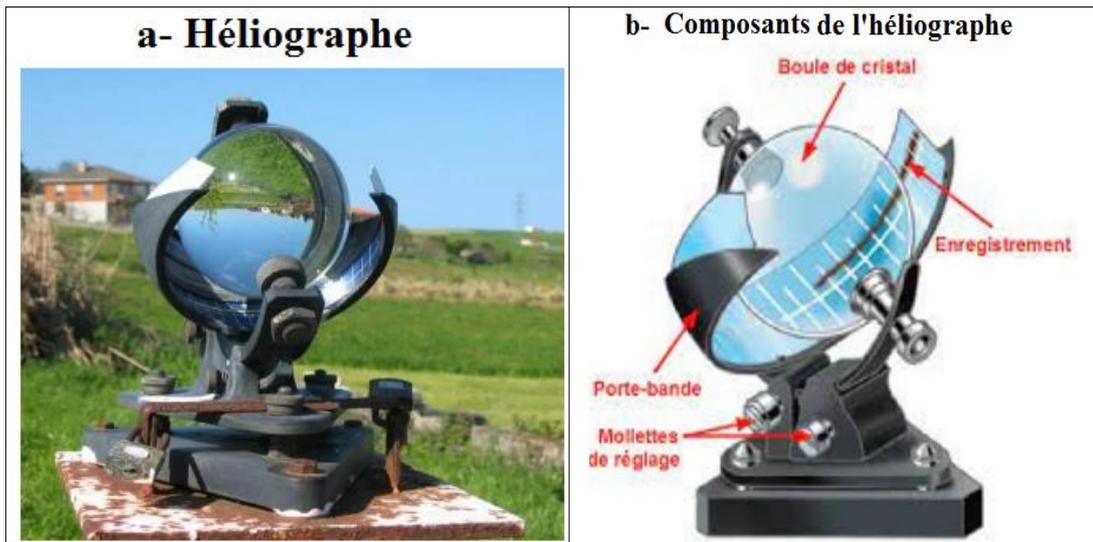


Figure. 4 L'héliographe et ses composants.

(source :<https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9liographe>)

3.2.5 Mesure de l'humidité

Il existe deux définitions de l'humidité :

a. L'humidité absolue

Nombre de grammes de vapeur d'eau contenus dans un mètre cube d'air.

b. L'humidité relative

Rapport de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale.

C'est cette seconde définition qui intéresse le météorologue. L'humidité relative, exprimée en pourcentage (%), indique la teneur en vapeur d'eau de l'air. Schématiquement, à 0 %, l'air est absolument sec. À 100 %, l'air est saturé en eau : il ne peut en contenir plus et la formation de gouttelettes d'eau est imminente. Un des premiers appareils permettant de mesurer deux grandeurs fondamentales de l'air humide est le Psychromètre (Figure.5.a).

En effet, cet appareil, constitué de deux thermomètres, permet de mesurer : la température sèche qui définit le "degré d'agitation moléculaire de l'air". La température humide de l'air obtenue par la mesure, à l'aide d'un bout de tissu enveloppé sur l'élément de mesure (bulbe), imbibé d'eau et ventilé pour provoquer l'évaporation de cette eau. Cette température est par la nature même de l'échange thermodynamique eau/air (évaporation) inférieure à la température sèche de cet air.

Ces deux mesures permettent de définir de façon relativement précise les caractéristiques de l'air humide. Une règle, livrée avec l'appareil, donne la valeur de l'humidité relative de l'air.

Les hygromètres à absorption (Figure.5.b) utilisent la propriété du cheveu humain qui s'allonge lorsqu'il devient humide. L'hygromètre de condensation mesure le point de condensation (physique) de l'humidité de l'air par le refroidissement d'une surface métallique (WMO, 2008).

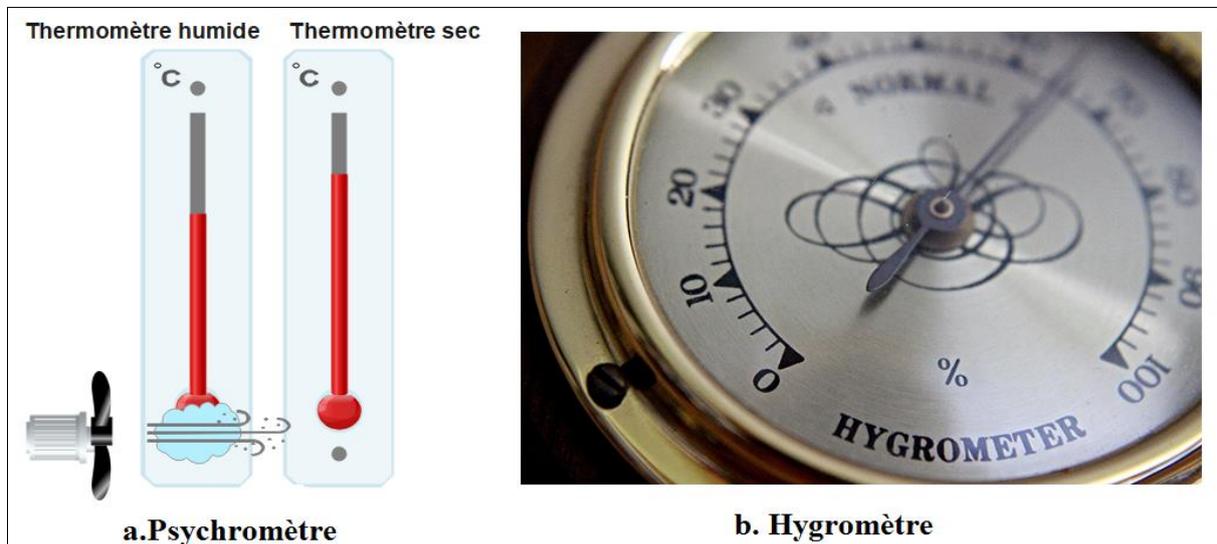


Figure.5 Appareils de mesure de l'humidité (source : Figure.5.a <https://www.abcclim.net/psychrometrie.html> et Figure5.b source : <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-3608-utiliser-hygrometre.html>)

3.2.6. Mesure de l'évaporation

L'évaporation est le processus physique au cours duquel un liquide se transforme en vapeur. La transformation en vapeur d'un solide tel que la neige ou la glace, sans passer par l'état liquide, s'appelle la sublimation.

De grandes quantités d'eau sont évaporées par le processus de la transpiration des plantes qui, par leurs racines, vont puiser dans la profondeur du sol l'eau nécessaire à leur développement et à leur vie; cette évaporation biologique est appelée transpiration.

On groupe sous le nom d'évapotranspiration, l'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration. La hauteur de lame d'eau ainsi évapotranspirée sur un bassin versant pendant une période déterminée, correspond à toute l'eau évaporée par les plans d'eau, les sols etc. et transpirée par le couvert végétal au cours de cette période.

Parmi les facteurs influençant l'évaporation et son intensité, on peut citer:

Les facteurs climatiques: la radiation solaire, la température de l'air; l'humidité de l'air; la pression atmosphérique, la vitesse des vents, les facteurs du milieu, la température de l'eau, les caractéristiques du bassin versant (densité de réseau hydrographique et de couvert végétal, ...etc) et la qualité de l'eau etc (WMO, 2008).

Selon **Pare, (2006)**, il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre. Ces méthodes peuvent être divisées en trois grandes catégories:

3.2.6.1 Méthodes directes de mesure de l'évaporation

En certains sites de mesures. L'extrapolation de ces mesures ponctuelles à une région se fait, en général, par des coefficients d'ajustements.

a. Bac d'évaporation

La mesure directe de l'évaporation se fait généralement au moyen du bac d'évaporation (Figure.6) qui est un contenant de section cylindrique ou carrée dont les variations du niveau d'eau, mesurées à des intervalles de temps fixes (jour, semaine, décade), sont un reflet de l'intensité de l'évaporation. L'avantage principal des bacs est leur économie et leur facilité d'installation; leur inconvénient est la difficulté d'évaluer les effets du rayonnement direct et le transfert de chaleur à travers les parois. L'utilisation de ce bac est recommandée en raison du grand nombre d'appareils du même type déjà installés et pour lesquels on possède de longues séries d'observations sous divers climats. Il présente l'avantage de la facilité d'installation, et les mesures ne sont pas faussées par le rejaillissement des gouttes de pluie sur le terrain environnant lors de fortes averses; par contre il est très sensible aux variations de la température de l'air et aux effets de l'insolation (**Vachala, 2008**).



Figure.6 Bac d'évaporation (classe A) (Source : https://nanopdf.com/download/medida-de-la-evapotranspiracion_pdf).

b. Les évaporomètres

b.1 Corps en porcelaine poreuse.

Pour mesurer les variations relatives du pouvoir évaporant de l'atmosphère, les météorologistes et les agronomes utilisent souvent des sphères, des cylindres ou des plaques de porcelaine blanche poreuse saturée d'eau (Figure.7); le taux d'évaporation d'un tel système est parfois considéré comme voisin de celui des plantes (**Pare, 2006**).

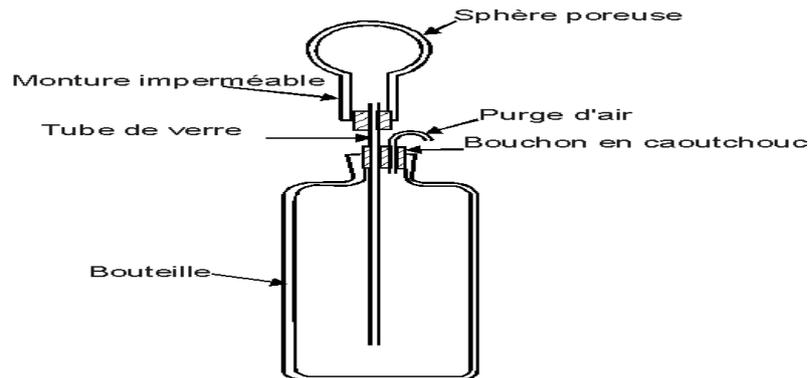


Figure.7Évaporomètre à sphère poreuse type Livingstone (**Carlier et Réméniéras. 1972**).

b.2Évaporomètre Piche (Figure.8) Il est constitué par un tube cylindrique en verre de 25 cm de long et 1.5 cm de diamètre. Ce tube gradué est fermé à sa partie supérieure, tandis que son ouverture inférieure est obturée par une feuille circulaire de papier filtre normalisé de 30 mm de diamètre, maintenue par un ressort. L'appareil ayant été rempli d'eau distillée, celle-ci est évaporée progressivement par la feuille de papier filtre; la diminution du niveau de l'eau dans le tube permet de calculer le taux d'évaporation (en mm par 24 heures par exemple), le processus d'évaporation est ici lié essentiellement au déficit hygrométrique de l'air, et l'appareil ne prend peut être pas assez en compte l'insolection (**Vachala, 2008**).

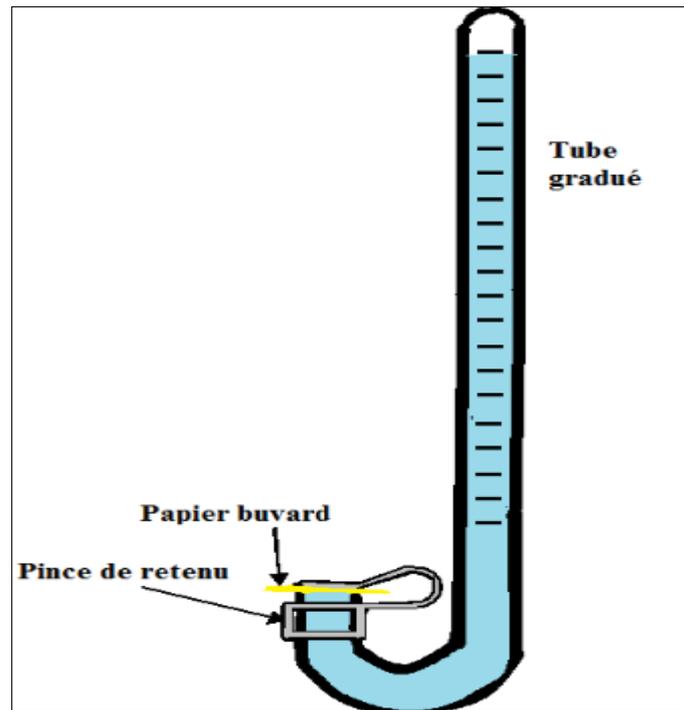


Figure.8 Evaporomètre de Piche

(source :https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Atmeter_Evaporametre_Piche.png)

3.2.6.2 Méthodes empiriques

Ces méthodes sont le résultat d'un traitement statistique des observations disponibles concernant certains éléments physiques ou atmosphériques facilement mesurables, qui expliquent l'évaporation. Des analyses de corrélation conduisent à développer des relations mathématiques entre ces éléments et l'intensité et la variabilité de l'évaporation.

La plupart des méthodes empiriques reposent sur les relations existant entre l'intensité de l'évaporation à un endroit donné et les facteurs atmosphériques responsables du phénomène.

La grande majorité de ces relations empiriques sont établies à partir de l'équation de Dalton:

$$E = C (P_w - P_a)$$

Où:

- E : taux d'évaporation (mm/j);
- P_w : pression moyenne de vapeur d'eau à la température de l'eau en surface (K);
- P_a : pression moyenne de l'air sur la surface liquide (K);
- C : coefficient de proportionnalité (**Pare, 2008**).

3.2.6.3 Méthode analytique

a. Méthode du bilan hydrique : L'équation du bilan hydrique d'un réservoir, pendant un intervalle de temps dt est donnée par l'expression:

$$P - (R + I + E + ET) = DS$$

Avec:

P : Précipitation;

R : Écoulement;

I : Infiltration;

E : Évaporation;

ET : Évapotranspiration;

DS : Variation du Stock dans l'intervalle de temps dt .

L'évaporation s'exprime ainsi en fonction des autres termes:

$$E = P - (R + I + ET) - DS.$$

b. Méthode du bilan énergétique

Cette méthode, complexe à mettre en œuvre, elle est destinée aux physiciens.

3.2.7 Mesure de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique peut être associée à la pression qu'exerce l'air sur un point donné.

A un endroit précis, la pression atmosphérique est donc le poids exercé par une colonne d'air partant du sol et s'étirant jusqu'au sommet de l'atmosphère. La pression se mesure à l'aide d'un baromètre et s'exprime en hectopascal (hPa). 1 hectopascal équivaut à 100 Pascals (Pa) ou encore à 1 millibar et un 1 pascal = 1 Newton/m². Au niveau de la mer, la pression moyenne est de 1 013.25 hPa. Météorologiquement parlant, dès lors que la pression descend en dessous de 1 010 hPa, il s'agit de basses pressions (dit aussi : « conditions dépressionnaires »). Le vent est plutôt fort et le temps est mauvais avec un ciel souvent fort encombré et des précipitations fréquentes.

A contrario, lorsque la pression dépasse 1 015 hPa, on parle alors de hautes pressions (dit aussi : « conditions anticycloniques »). Le vent est faible et le temps est beau avec un ciel souvent bien dégagé (Vachala, 2008).

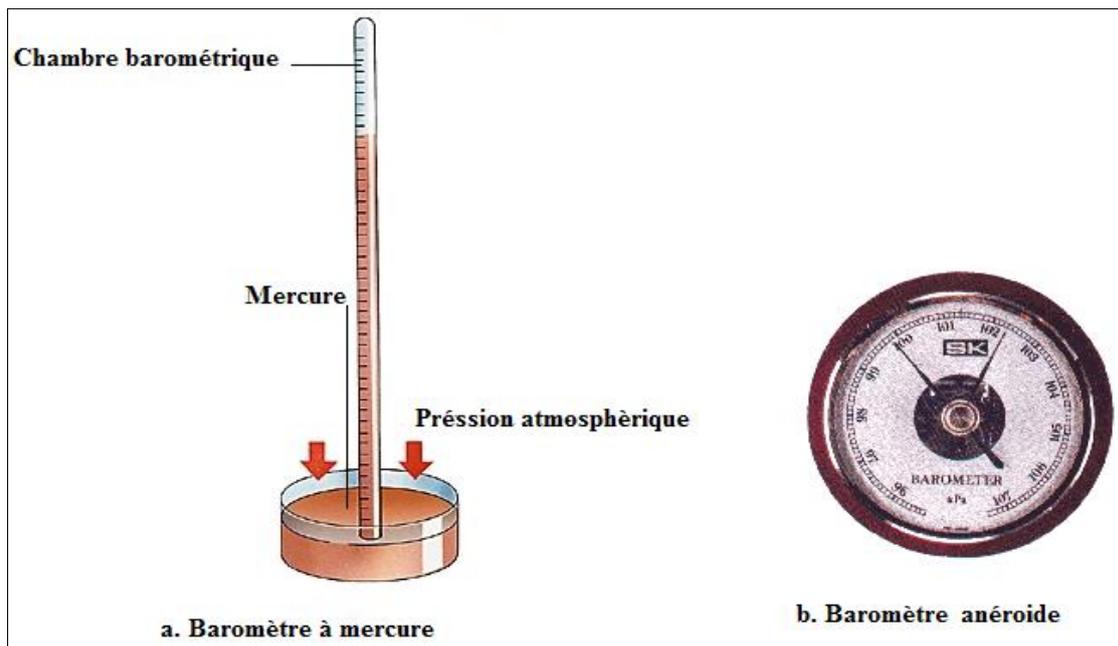


Figure.9 Les baromètres (source Figure 9.a : https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Barom%C3%A8tre_%C3%A0_mercure/1003205 et Source Figure 9.b : https://meteocentre.com/intermet/instrument/barometre_ane.htm).

3.2.8 L'abri météorologique

Un abri météorologique, ou abri météo, également appelé abri Stevenson (Figure.10) désigne un boîtier utilisé en météorologie pour protéger les instruments de mesure contre les précipitations ainsi que les radiations (émissions) directes de chaleur de sources extérieures, tout en continuant à permettre la libre circulation de l'air autour de ces instruments de mesure. Conçus pour accueillir divers instruments de mesure (thermomètres, hygromètre, baromètre, psychromètre, thermographe) (Figure.10.a), l'abri permet de créer, autant que possible, un environnement uniforme en relation avec l'air extérieur (Javelle et al. 2000).

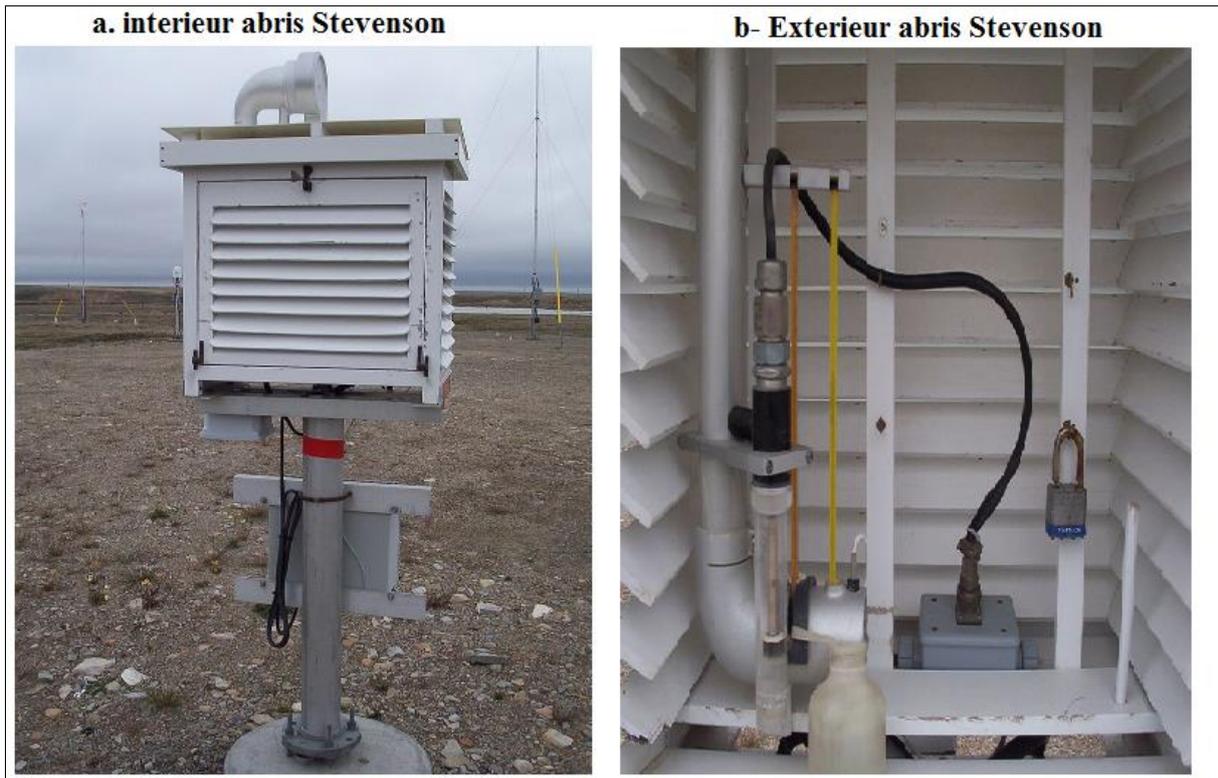


Figure.10 Intérieur et l'extérieur de l'abri météorologique (Abri Stevenson)(source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Abri_Steveson).

3.2.9 Les stations météorologiques

Sont des endroits où il est possible d'effectuer des mesures et des observations ponctuelles des différents paramètres météorologiques en utilisant les instruments adéquats pour pouvoir ainsi établir le comportement atmosphérique. Une station manuelle est celle où la prise de mesure se fait par un technicien en météorologie selon un horaire régulier alors qu'une station météorologique automatique est une station dont les capteurs rapportent à intervalles une série de données météorologiques sans intervention humaine.

Les stations au sol ne sont pas installées au hasard. En effet, afin de pouvoir permettre les comparaisons, des règles strictes sont à appliquer :

- la station doit être placée dans un endroit dégagé, dans un appartement en zone éloignée des bâtiments, des trottoirs et des arbres sur une herbe tondue rase.
- les instruments doivent être placés à l'ombre, à au moins 2 mètres du sol.
- l'air doit circuler librement à l'intérieur de la station.
- la station doit être peinte en blanc pour réduire l'absorption du rayonnement solaire.

- Le placement sous un arbre ou à proximité d'une structure pourrait modifier les mesures (UGA, 2015).

Une classification des caractéristiques les plus importantes de ces stations météorologiques, en suivant les normes techniques est établie **WMO. (2008)** comme suit:

3.2.9.1 Stations climatologiques principales

Ce sont les stations météorologiques qui sont dotées pour effectuer des observations du temps atmosphérique actuel, la quantité, la visibilité, les précipitations, la température de l'air, l'humidité, le vent, la radiation solaire, l'évaporation et autres phénomènes spéciaux. Normalement trois mesures sont effectuées par jour.

3.2.9.2 Stations climatologiques ordinaires: ces stations météorologiques doivent être obligatoirement dotées d'un psychromètre, un pluviomètre et d'un pluviographe, pour pouvoir ainsi mesurer les précipitations et la température de façon instantanée (**Murthy, 2019**).

3.2.9.3 Stations synoptiques principales: ce genre de stations météorologiques effectuent des observations des principaux éléments météorologiques aux heures convenues à échelle internationale. Les données se prélèvent par tranche horaire type et la hauteur des nuages, la visibilité, les phénomènes spéciaux, les caractéristiques d'humidité, les précipitations, les températures extrêmes, les couches significatives des nuages, le parcours du vent et la séquence des phénomènes atmosphériques. Cette information se codifie et s'échange à travers les centres mondiaux afin d'alimenter les modèles globaux et locaux de prévisions et pour le service de l'aviation (**Murthy, 2019**).

3.2.9.4 Stations agro-météorologiques: dans ces stations météorologiques des mesures et des observations météorologiques et biologiques sont effectuées, même phénologiques et d'autres types d'observations qui peuvent aider à la détermination des relations entre le temps et le climat, d'une part et la vie des plantes et des animaux d'autre part. Le même programme d'observations des stations climatologiques principales est inclus, ainsi que des registres de températures à plusieurs profondeurs (allant jusqu'à 1 mètre) et dans une couche proche du sol (0, 10 et 20 cm au dessus du niveau du sol). Les données météo mesurées par ces stations sont ensuite utilisées pour évaluer avec précision les besoins en eau des cultures et déterminer les moments les plus opportuns pour mettre en place des actions d'irrigation (**Murthy, 2019**).

3.2.9.5. Les différents types de stations météo agricoles

Il existe plusieurs types de stations météo adaptées aux besoins spécifiques des exploitations agricoles. Parmi les principaux modèles disponibles sur le marché, on peut citer :

a. Les stations météo filaires

Elles sont reliées par câble à un boîtier de commande situé à proximité du champ. Ce type de station offre généralement une grande fiabilité et une précision accrue dans la mesure des paramètres météorologiques.

b. Les stations météo sans fil

Elles fonctionnent grâce à des capteurs autonomes alimentés par batterie ou panneaux solaires, qui transmettent les données par radiofréquence à un récepteur situé à distance. Ces stations sont particulièrement adaptées pour les exploitations de grande taille ou les parcelles éloignées.

c. Les stations météo connectées

Elles sont équipées d'un système de communication permettant de transmettre les données directement sur un ordinateur, une tablette ou un smartphone. Ainsi, il est possible de consulter en temps réel les informations relatives à la météo et aux besoins en eau des cultures, et d'adapter rapidement les actions d'irrigation en conséquence (<https://www.station-meteo-agricole.com/besoins/irrigation-agricole>).

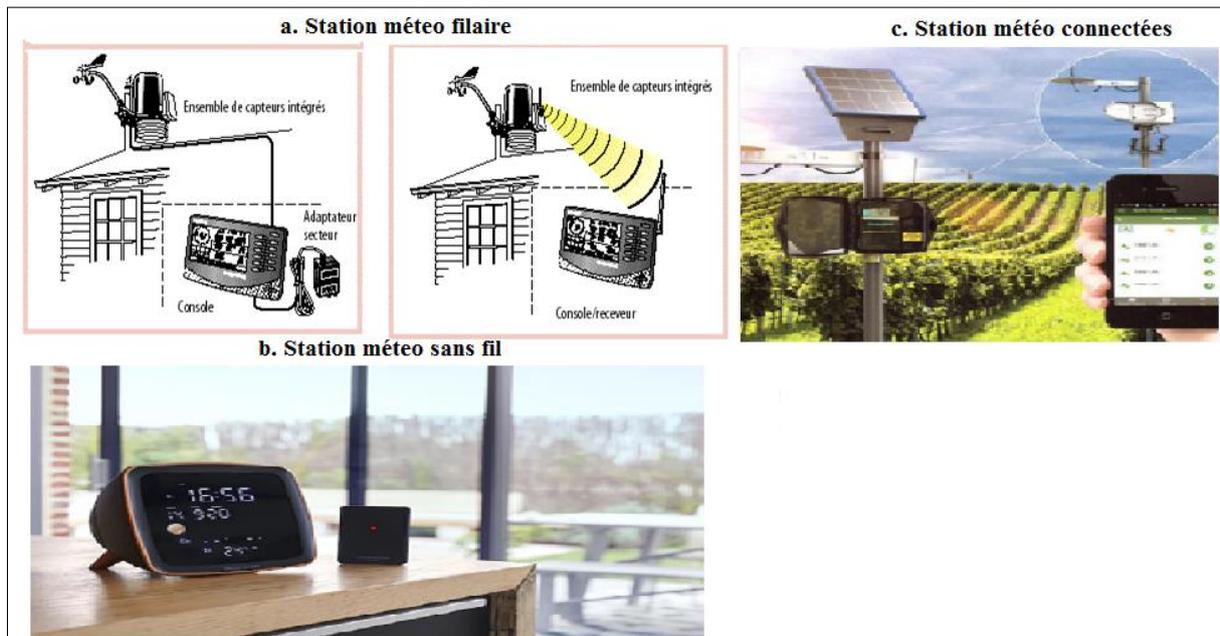


Figure.11 Les différents types de stations météo agricoles (sources :
 Figure a : <https://fr.scribd.com/document/381882693/Presentation-Station-Meteo-Davis>,
 Figure b : <https://irrigazette.com/fr/articles/galcon-gsi-vigne-systeme-dirrigation-intelligent>
 Figure c : https://www.mythomson.com/fr_fr/comment-choisir-et-utiliser-une-station-meteo)

3.2.10 Le réseau des stations météorologiques en Algérie

Météo Algérie est le service météorologique et climatologique national (Office National de la Météorologie) ou ONM. Il est placé sous la tutelle du Ministère des Transports. Météo Algérie est l'unique intervenant pour la mise en œuvre de la politique nationale et internationale en matière de météorologie. Il est implanté à travers tout le pays. Son organisation comporte des directions centrales et régionales. Il exploite un réseau d'observations composé de 80 stations d'observation en surface qui constituent le réseau national d'observation météorologique professionnel. Au niveau régional, il opère avec trois (3) directions météorologiques régionales (Ouest, Est, et Sud) et trois(03) départements météorologiques régionaux (Alger, Tamanrasset et Bechar)

Les stations météorologiques forment un réseau professionnel pour assurer une veille météorologique nationale. Les fonctions d'observations sont complétées par des fonctions de concentration, de contrôle et de diffusion permanente, assurées par les directions régionales.

Les structures techniques centrales sont chargées de coordonner toutes les activités météorologiques à l'échelle nationale et de fournir des prestations météorologiques dans les domaines de l'observation, la prévision, la climatologie et la maintenance instrumentale.

L'ONM positionne sa prestation technique comme un outil de prévention, de sécurité, de planification et d'aide à la décision. Ses domaines d'intervention sont les suivants : la prévision météorologique (aéronautique, marine, agro-météorologique, etc.), l'assistance à la navigation aérienne nationale et internationale conformément aux normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), l'assistance climatologique, l'observation en surface et en altitude et la maintenance et l'étalonnage des instruments et équipements spécifiques à la météorologie. Son intervention dans le domaine de la sécurité des transports est essentielle car elle permet de prévenir et de gérer les risques météorologiques. L'ONM a pour missions :

- L'acquisition, le traitement, l'exploitation et la diffusion des données météorologiques aux niveaux national et international ;
- L'installation, la gestion et la maintenance des différents réseaux nationaux d'observations météorologique et climatologique ainsi que le réseau des télécommunications météorologiques propre à l'Office ;
- L'analyse et la prévision météorologique sur le territoire national ainsi que le lancement des avis d'alerte auprès du public et des utilisateurs ;
- La conservation et l'exploitation des archives météorologiques et climatologiques ;
- La réalisation d'études climatologiques et d'assistance météorologique ;

- La surveillance des changements climatiques ;
- La fourniture des prestations de services techniques, d'étalonnage des instruments et équipements météorologique. (<https://www.meteo.dz/articles/Qui%20sommes%20nous%3F>).

Chapitre II : Le rayonnement et le bilan radiatif

1. Qu'est-ce que le transfert thermique ?

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques. Ils jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Deux corps ayant la même température sont dits en équilibre thermique. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a alors transfert de chaleur (**Marty, 2013**).

1.1 Divers types de transfert de l'énergie ou de chaleur

Il existe trois modes de transfert d'énergie thermique : la conduction, la convection et le rayonnement thermique (**Wisniewski, 2021**).

1.1.1 La conduction

Se produit lorsque les flux de chaleur passent d'un corps à un autre, par contact.

1.1.2 La Convection

On parle de convection lorsqu'un corps qui se déplace emmène avec lui, la chaleur qu'il contient. Ce mode de transfert implique un déplacement de matière dans le milieu. La matière est alors « advectée » par au moins un fluide

1.1.3 Le rayonnement – ou radiation

Correspond à l'ensemble des corps qui émettent de la lumière et sont eux-mêmes chauffés par la lumière qu'ils absorbent. C'est le cas des rayons du soleil.

2. Aperçu théorique du rayonnement

Le rayonnement est l'émission ou la transmission d'énergie en ligne droite (comme un « rayon » en géométrie). Cette ligne traverse l'espace ou un certain matériau, se dispersant de la source dans toutes les directions ou « rayonnant ». Le rayonnement peut également faire référence à l'énergie émise elle-même. Il existe plusieurs types de rayonnements qui peuvent inclure les rayonnements électromagnétiques, thermiques, acoustiques, corpusculaires (tel que les rayonnements alpha ou bêta d'une source radioactive) et ionisant (**Guenel et al. 2003**).

2.1 Le rayonnement ionisant

Est un type spécifique de rayonnement qui possède suffisamment d'énergie pour éjecter un électron d'un atome. Ce rayonnement comprend des particules ionisantes issues de la désintégration alpha ou bêta ainsi que des ondes électromagnétiques sous forme de rayonnement gamma. D'une manière générale, les énergies des particules de désintégration alpha et bêta et des photons de rayons gamma sont supérieures aux énergies d'ionisation des

atomes et molécules. Ces particules ionisent la matière et rompent les liaisons moléculaires, ce qui peut causer des dommages biologiques importants tels que les brûlures, les maladies de radiation et le cancer (**Giovanni, 2020**).

2.2 Le rayonnement non ionisant

Ce type de rayonnement n'enlève pas les électrons des atomes. Cela signifie qu'il est généralement moins nuisible que le rayonnement ionisant. La plupart des risques pour la santé causés par les rayonnements non ionisants proviennent de l'énergie thermique qui accompagne le rayonnement. Toutes les formes de rayonnement peuvent être divisées en rayonnements ionisants et non ionisants. (**Guenel et al. 2003**).

3. Flux énergétique

En radiométrie, le flux énergétique ou la puissance rayonnée est la mesure de la puissance totale d'un rayonnement électromagnétique (allant du rayonnement radioélectrique aux rayonnements de particules énergétiques) émise ou reçue par une surface réelle ou virtuelle. Cette quantité peut être relative à l'ensemble du spectre électromagnétique ou à un intervalle élémentaire de celui-ci. On parle alors de flux spectral ou spectrique. L'unité de mesure de flux énergétique est le watt (W) ou joule par seconde (J/s) (**Hattab, 2016**).

4. Densité de flux énergétique

En un point donné de l'espace, somme des énergies, à l'exclusion de l'énergie au repos, de toutes les particules ou photons tombant par unité de temps sur une petite sphère centrée en ce point, divisée par l'aire d'un grand cercle de cette sphère. Par définition, la densité de flux est un flux par unité de fréquence. Son unité est donc une puissance divisée par une surface et une fréquence. Dans le Système international d'unités, l'unité de densité de flux énergétique est donc le watt par mètre carré et par hertz ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}$) (**Wisniewski, 2021**).

5. Le spectre des longueurs d'onde

Le spectre électromagnétique est le classement des rayonnements électromagnétiques par fréquence et longueur d'onde dans le vide ou énergie photonique.

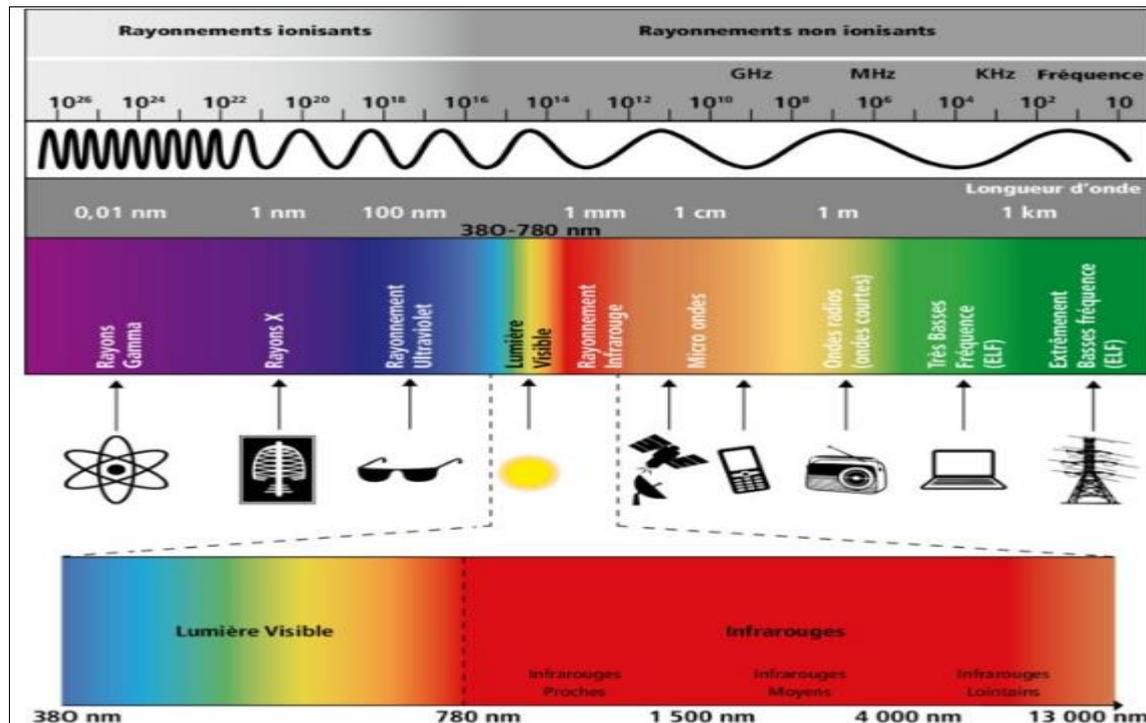


Figure.12 Spectre électromagnétique (Source : Stocklé et Cosson, 2014)

6. Les lois relatives au rayonnement

6.1 Loi de Stefan Boltzman

Selon **Hattab, (2016)**, pour un corps parfaitement absorbant (dis corps noir), de température T, la puissance rayonnante émise par unité de surface de corps s'écrit :

$$P_s = \sigma T^4$$

P_s : puissance surfacique émise en watt par mètre carré (W.m⁻²).

σ : Constante de Boltzman 5.67 x 10⁻⁸ W. m⁻². K⁻⁴.

T^4 : température du corps noir en Kelvin K.

6.2 Loi de Kirchoff

Selon cette loi, l'équilibre radiatif se réalise lorsque le flux incident, ce qui implique que le flux absorbé est égal flux émis (**Daniel, 2003**).

6.3 Loi de Wien

La loi de Wien décrit la relation entre la longueur d'onde du maximum d'émission (λ_{max}) et la température du corps noir. Elle stipule que la longueur d'onde du maximum d'émission est inversement proportionnelle à sa température. Plus la température du corps noir augmente,

plus le maximum d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde. Les lois relatives au rayonnement.

$$\lambda_x = \frac{hc}{4,9651 \cdot k \cdot T} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

Avec :

λ max : longueur d'onde du maximum d'émission, exprimée en mètre

c : vitesse de la lumière (3.108 m.s⁻¹)

h : constante de Planck (6,625.10⁻³⁴ J.s)

k : constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³ J.K⁻¹)

T : température du corps noir en Kelvins (**Daniel, 2003**).

7. Le rayonnement solaire ou de courtes longueurs d'onde

7.1 Le soleil : source d'énergie

Le Soleil est essentiellement constitué principalement d'atomes d'hydrogène (H) à 92.1%, d'hélium (He) à 7,8% et de deutérium (D), un isotope de l'hydrogène; c'est à dire différent par leur nombre de neutrons mais ayant le même nombre de protons et d'électrons, et possédant ainsi des propriétés chimiques différentes.

La fusion des noyaux de deutérium contribuent à la formation de d'hélium. Lors de cette réaction de l'énergie est produite due à la perte de masse. En effet, le noyau d'hélium est plus léger que la masse de la somme des deux noyaux de deutérium, selon la relation d'Einstein $E=m.c^2$ (masse x. vitesse de lumière dans le vides au carré connue sous le nom de loi de relativité). Cette énergie émise est à l'origine du rayonnement lumineux qui est de l'ordre de 4.1023 kW. Le soleil « brule » ainsi 500 millions de tonnes d'hydrogènes qui vont donner 495 millions de tonnes d'hélium ou gaz résiduel.

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à 63 500 kW/m²). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière. Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ 1 367 W/m². C'est ce qu'on appelle la constante solaire. La Terre, une petite boule comparée au Soleil,

intercepte une si faible partie de l'énergie radiante du soleil que les rayons du soleil ainsi stoppés paraissent constituer un faisceau parallèle.

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Le rayonnement solaire reçu au sol varie dans le temps, d'une part en fonction des variations de l'activité solaire, et d'autre part en fonction des saisons (selon inclinaison de la Terre) et au sein de chaque saison en fonction des variations naturelles et anthropiques de la nébulosité.

Avec sa température d'émission de 5 500°C, le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde).

Le rayonnement solaire que reçoit la Terre est composé d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est courte (inférieure à 4 µm et majoritairement située dans le domaine visible). Une partie (environ 30%) est réfléchi vers l'espace par l'atmosphère et par la surface. Le reste (environ 70%) est absorbé en partie par l'atmosphère (23%) et en partie par la surface (sol et océans) (47%) qui sont ainsi chauffés. Cette énergie absorbée est réémise sous forme d'un rayonnement électromagnétique de grande longueur d'onde (supérieure à 4 µm), c'est-à-dire dans l'infrarouge dit 'thermique'. En moyenne, la Terre est en équilibre thermique (elle ne se refroidit ni ne se réchauffe), elle émet donc, dans l'infrarouge thermique, vers l'espace une énergie égale à celle qu'elle a absorbée (**Lucien,2020**).

7.2 Rayonnement incident, diffus et global

Le rayonnement global est l'énergie rayonnante totale du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la Terre au cours d'une unité de temps précise. Au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la Terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui atteint la Terre est diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair). D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire. Le reste du rayonnement atteint directement la surface.

Ainsi, le rayonnement global s'obtient en ajoutant trois types de rayonnement : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi.

- Le rayonnement direct varie en fonction de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon.
- Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de l'ensemble de l'atmosphère et qui dépend de sa composition.
- Le rayonnement réfléchi par le sol dépend lui aussi de l'inclinaison du rayonnement.

7.3 Le rayonnement réfléchi et l'albédo

L'albédo est une grandeur physique sans unité. Compris entre 0 et 1, il caractérise l'aptitude d'une surface (solide, liquide ou gazeuse) à réfléchir le rayonnement qui lui parvient. Si l'on note P_1 la puissance lumineuse incidente (arrivant sur la surface) et P_r la puissance réfléchie (par la surface), l'albédo, noté α , est défini par $\alpha = P_1 / P_r$.

Une surface d'albédo égal à 0 absorbe l'intégralité de la puissance lumineuse qu'elle reçoit. À l'inverse, une surface d'albédo égal à 1 en réfléchit l'intégralité. Les rayons lumineux provenant du Soleil et interceptés par la Terre sont donc en partie réfléchis vers l'espace, du fait de son albédo non nul. L'albédo de la Terre peut se décomposer en deux parties :

- l'albédo de l'atmosphère et des nuages, égal à 0,25 en moyenne ;
- l'albédo de la surface terrestre, dont la valeur varie selon la surface (exemple : surface de lac = 0.02 à 0.04, forêt de conifère = 0.05 à 0.15, cultures = 0.15 à 0.25, nuage = 0.5 à 0.8 et neige tassée = 0.4 à 0.70).

7.4 Les bilans courtes ondes et longues ondes

La principale source d'énergie n'est autre que le rayonnement électromagnétique solaire (99,7 %, le reste étant produit à l'intérieur de la Terre), qui va de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible. Cependant, environ 30 % de celui-ci est réfléchi par notre planète, avant même de pouvoir être absorbé dans l'atmosphère, les sols ou les océans. Le reste du rayonnement solaire est donc converti en chaleur à la surface de la planète et dans l'atmosphère. Les spécialistes parlent du bilan global du rayonnement « ondes courtes », car les longueurs d'onde considérées sont comprises entre 0,4 et 0,9 μm .

Sans autre perte, notre planète ne cesserait de se réchauffer. Ainsi, pour maintenir un équilibre approximatif, la Terre doit évacuer l'équivalent de l'énergie d'origine solaire qu'elle a absorbée. Elle le fait en émettant vers l'espace un rayonnement thermique dans l'infrarouge moyen, dont les longueurs d'onde sont comprises entre 3 et 60 μm . Les gaz à effet de serre (GES) absorbent très bien les longues longueurs d'onde (IR thermiques) et se réchauffent. Les GES de l'atmosphère réémettent ensuite cette chaleur (IR) dans toutes les directions, de sorte

qu'une partie du rayonnement descend vers la surface de la terre et l'autre partie s'en va vers l'espace. Au bilan une partie de la chaleur n'a pas quitté la terre et celle-ci se réchauffe par «effet de serre». (voire Figure.13).

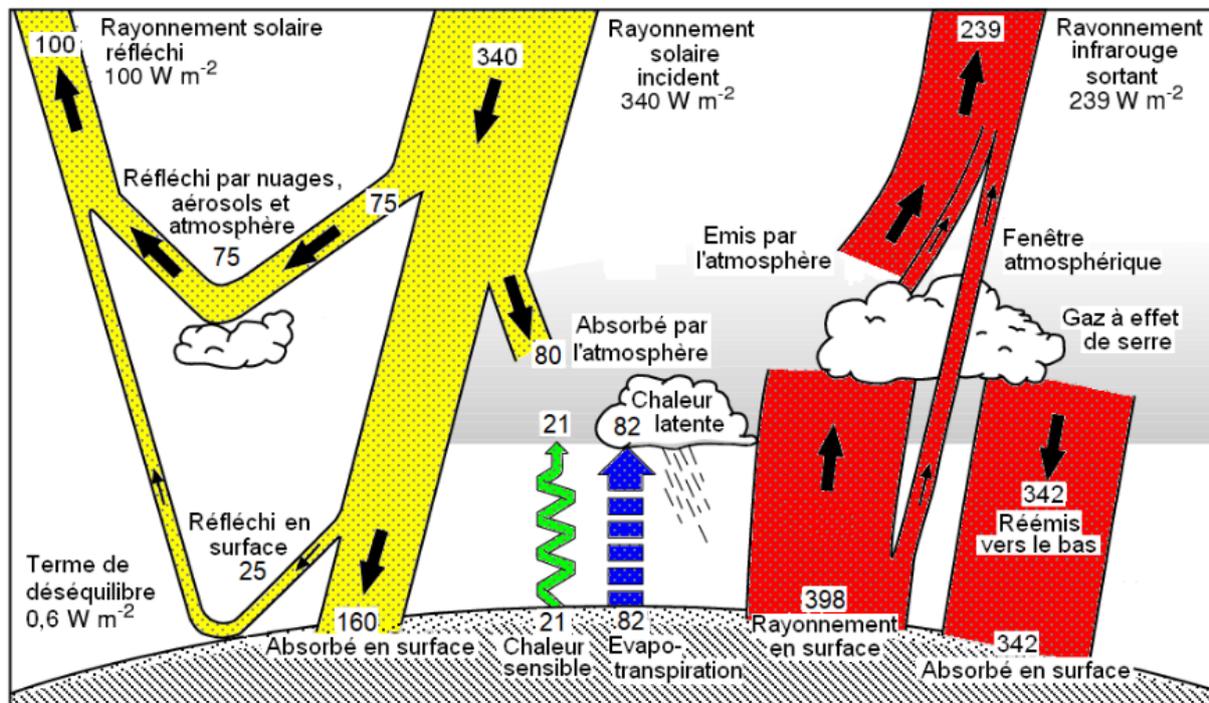


Figure. 13 Bilan radiatif de la Terre (source : Planton, 2020)

8. Équilibre radiatif de la terre et effet de serre

Un corps est dit en équilibre radiatif avec le rayonnement qu'il reçoit s'il ne perd ni ne gagne d'énergie. Ainsi, l'équilibre radiatif de la Terre implique que la puissance reçue par la surface terrestre soit égale à la puissance émise par celle-ci. Ainsi, la puissance totale reçue par le sol (c'est-à-dire la puissance solaire absorbée par le sol, ajoutée à celle du rayonnement infrarouge absorbé par l'atmosphère par effet de serre et réémis vers le sol) est égale à la puissance terrestre émise sous forme de rayonnement infrarouge. La température terrestre résulte de cet équilibre radiatif et elle est constante au cours du temps, tant que les caractéristiques de l'équilibre demeurent inchangées. Ainsi, la température terrestre actuelle est d'environ + 15 °C.

Cet équilibre radiatif de la Terre est un équilibre dynamique, c'est-à-dire que toute modification de la puissance reçue par la Terre entraîne une modification de la puissance émise par celle-ci (et inversement). L'établissement d'un nouvel équilibre radiatif s'accompagne d'une modification de la température terrestre. Actuellement, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, libérés par les activités humaines,

augmente l'intensité du rayonnement infrarouge absorbé par l'atmosphère et réémis vers le sol, ce qui modifie l'équilibre radiatif. La conséquence de la modification de cet équilibre radiatif est l'augmentation actuelle de la température terrestre(**Daniel, 2003**).

Chapitre III. Étude de l'atmosphère

1. Présentation de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse, entourant la Terre, que l'on appelle air. L'atmosphère protège la vie sur Terre en filtrant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant partiellement les écarts de température entre le jour et la nuit.

Les nuages, parfois liquides, parfois solides, ne sont pas considérés comme des constituants de l'atmosphère. En revanche, la vapeur d'eau contenue dans l'air humide représente, en moyenne, 0,25 % de la masse totale de l'atmosphère. La vapeur d'eau possède la particularité notable d'être le seul fluide de l'atmosphère terrestre susceptible de changer rapidement de phase (solide, liquide, gaz), essentiellement en fonction de la température, et dont la concentration est très variable dans le temps et dans l'espace. La chaleur a tendance à faire monter l'air et son humidité, alors que la pression atmosphérique et la température diminuent avec l'altitude. L'atmosphère se compose à 78,087 % de diazote N₂, à 20,95 % de dioxygène O₂, à 0,93 % d'argon Ar, à 0,041 % de dioxyde de carbone, et de traces d'autres gaz. (Balasubramanian, 2011).

2. Différentes strates de l'atmosphère

Selon, Prasa, (2011), l'atmosphère est divisée en plusieurs couches d'importance variable : leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude. Comme indiqué dans la Figure. 14, de bas en haut, l'atmosphère est composée des couches citées ci-dessous :

a-Troposphère

La plus basse couche de l'atmosphère s'appelle la troposphère. Elle s'élève entre 8 km aux pôles et 16 km au dessus de l'Équateur. La frontière entre la troposphère et la stratosphère est la tropopause, délimitée par des températures qui se stabilisent. La température diminue avec l'augmentation de l'altitude de 0,60°C toute les 100 m, en moyenne, par suite de la raréfaction de l'air et de l'éloignement progressif du substrat (sol). La troposphère est la plus dense des quatre couches de l'atmosphère et elle contient jusqu'à 75% de la masse de l'atmosphère. Elle se compose principalement d'azote (78%) et d'oxygène (21%) avec seulement de petites concentrations d'autre gaz en trace. Presque toute la vapeur d'eau ou humidité atmosphérique se trouve dans la troposphère.

b. Stratosphère

La stratosphère est la deuxième couche principale de l'atmosphère. Elle se trouve au-dessus de la troposphère. Elle occupe la région de l'atmosphère d'environ 12 à 50 kilomètres, bien que sa limite inférieure est plus haute à l'équateur et plus basse aux pôles. La stratosphère définit une couche dans laquelle les températures s'élève avec l'augmentation de l'altitude. En haut de la stratosphère l'air mince peut atteindre des températures près de 0°C. Cette élévation de la température est provoquée par l'absorption des rayons ultraviolets (UV) du Soleil par la couche d'ozone. Un tel profil de température crée des conditions atmosphériques très stables, et la stratosphère manque de la turbulence de l'air qui est si répandue dans la troposphère. En conséquence, la stratosphère est presque totalement exempte de nuages ou d'autres formes de temps. La stratosphère fournit quelques avantages pour le vol de longue distance parce qu'elle est au-dessus des temps orageux et a des vents forts, réguliers et horizontaux. La stratosphère est séparée de la mésosphère, qui se trouve au-dessus d'elle, par la stratopause.

c. Mésosphère

La mésosphère (littéralement sphère moyenne) est la troisième couche la plus élevée dans notre atmosphère, occupant la région de 50 kilomètres à 80 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre, au-dessus de la troposphère et de la stratosphère, et au-dessous de la thermosphère. Les températures dans la mésosphère chutent avec l'augmentation de l'altitude jusqu'à environ -100°C. La mésosphère est la plus froide des couches atmosphériques. En fait elle est plus froide que la plus basse des températures enregistrées en Antarctique. Il y fait assez froid pour geler de la vapeur d'eau en nuages de glace.

d. Thermosphère

La thermosphère commence à 90-100 km et va jusqu'à 1280 kilomètre l'altitude. La pression y devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares. L'ultraviolet solaire de très courtes longueurs d'onde est absorbé entre 100 et 150 kilomètres d'altitude par l'oxygène moléculaire. La température augmente avec l'altitude et se maintient jusqu'à un niveau appelé "thermopause" situé de 250 kilomètre à 500 kilomètres suivant l'activité solaire comme après cette thermopause la température oscille entre 300°C et 1600°C suivant l'énergie reçu par le Soleil. Les températures sont élevées, mais comme la densité de matière est extrêmement faible il ferait très froid pour nous puisque les quelques molécules d'air ne sont pas assez pour transférer une chaleur convenable pour nous. La thermosphère est la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes.

e. Exosphère

La dernière couche de l'atmosphère est l'exosphère. C'est la couche la plus éloignée de la surface de la terre et, en raison de sa hauteur, elle est la plus indéfinie et n'est donc pas considérée en soi comme une couche de l'atmosphère. Plus ou moins, il s'étend de 600 à 800 km de hauteur jusqu'à 9.000 10.000. Cette couche de l'atmosphère sépare la planète Terre de l'espace extra-atmosphérique et en elle les atomes s'échappent. Il est composé principalement d'hydrogène.

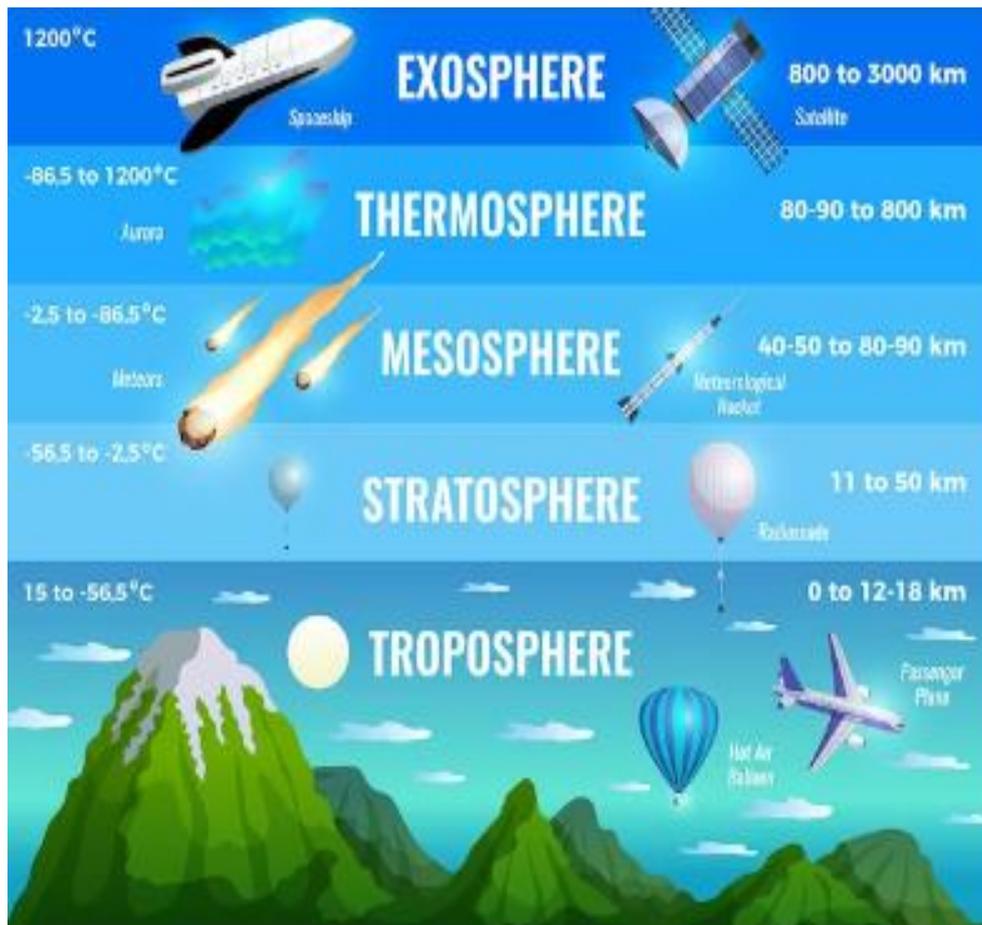


Figure.14 Les différentes couches de l'atmosphère (source : https://www.shutterstock.com/fr/search/troposph%C3%A8re?image_type=vector)

3. Rappel de la loi des gaz parfaits

La loi des gaz parfaits, ou équation des gaz parfaits, est l'équation d'état applicable aux gaz parfaits. Elle a été établie en 1834 par Émile Clapeyron par combinaison de plusieurs lois des gaz établies antérieurement.

Cette équation s'écrit : $PV = n R T$

Avec :

P : la pression (Pa) ;

V : le volume du gaz (m^3) ;

n : la quantité de matière (mol) ;

R : la constante universelle des gaz parfaits ($\approx 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ;

T la température absolue (K).

Sur les plans macroscopiques, on appelle gaz parfait, noté G.P., tout gaz vérifiant simultanément :

1. À température constante, le produit $p V$ de la pression p par le volume V est considéré comme constant lorsque la pression est faible
2. Tous les gaz ont le même volume molaire dans les mêmes conditions de pression et de température.
3. À pression constante, le volume est directement proportionnel à la température.
4. À volume constant, la pression est proportionnelle à la température.
5. La pression totale exercée par un mélange de gaz est égal à la somme des pressions que chaque gaz exercerait s'il était seul (**Cimbala, 2014**).

4. Caractéristiques de l'air ambiant

4.1. La pression de la vapeur d'eau dans l'atmosphère

4.1.1. Pression saturante

La pression de vapeur saturante ou tension de vapeur est la pression à laquelle la phase gazeuse de l'eau est en équilibre avec sa phase liquide ou solide. Elle dépend exclusivement de la température (**Stull, 2017**).

4.1.2. Pression effective

Sachant que la pression atmosphérique. Tout ce qui nous entoure (l'air et l'eau) a un poids et crée une pression. Au niveau de la mer, la pression moyenne est de 1 atm, ou 1,01325 bar. Plus l'altitude augmente, plus l'air devient léger, tout comme la pression atmosphérique. La pression atmosphérique varie également en fonction des conditions météorologiques.

Dans le cas de la pression relative. La référence zéro de la pression manométrique est la pression atmosphérique, ce qui signifie qu'une lecture de la pression manométrique n'indique que la pression supplémentaire au sein d'un système. Pour cette raison, la pression manométrique est aussi appelée surpression, car c'est la pression par rapport à la pression

atmosphérique. Contrairement à la pression absolue. La référence zéro en pression absolue est un vide parfait (vide absolu), qui n'a pas de pression atmosphérique. Ce zéro ne varie donc pas.

4.2. La température au point de rosée

Le point de rosée ou température de rosée est la température sous laquelle de la rosée se dépose naturellement. Plus techniquement, en dessous de cette température qui dépend de la pression et de l'humidité ambiante, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense sur les surfaces, par effet de saturation

4.3. Expression des humidités dans l'air

4.3.1. Humidité relative

L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, couramment notée ϕ , correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

4.3.2. Humidité absolue ou concentration de la vapeur d'eau dans l'air

En météorologie et en physique, on définit l'humidité absolue (ρ) comme la masse de vapeur d'eau m_{eau} par unité de volume V_{tot} à la pression et la température considérées. Elle a la dimension d'une masse volumique et se note souvent ρ (rho).

$$\rho = m_{\text{eau}} / V_{\text{tot}}$$

Elle est aussi égale au produit de l'humidité relative par l'humidité absolue de saturation ρ_{sat} .

$$\rho = \phi \cdot \rho_{\text{sat}}$$

4.3.3. Humidité spécifique

L'humidité spécifique (HS ou q), ou teneur en eau (Y), est le rapport de la masse d'eau dans l'air sur la masse d'air humide. Contrairement à l'humidité relative ou absolue, l'humidité spécifique se conserve lors d'un changement d'altitude ou de température de la masse d'air, tant qu'il n'y a ni condensation ni évaporation. La raison est qu'un kilogramme d'air ou de vapeur reste un kilogramme, indépendamment de la pression ou de la température de l'air.

4.3.4. Le rapport de mélange

Le rapport de mélange r d'un volume d'air désigne en météorologie le rapport de la masse de vapeur d'eau qu'il contient à la masse d'air sec. Ce nombre r est sans dimension et devrait donc être en kg/kg. Cependant, ses valeurs restant généralement très faibles, il est d'usage de les manipuler en les multipliant par 1 000, ce qui revient à l'exprimer en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec (g/kg).

Chapitre IV : Évapotranspiration

1. Définition de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est le processus biophysique de transfert d'une quantité d'eau vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

2. Les facteurs affectant l'évapotranspiration

- L'énergie disponible : il faut 600 calories pour vaporiser 1 gramme d'eau liquide. Plus l'énergie disponible augmente, plus l'ET augmente. Cette énergie correspond vient de rayonnement solaire. L'ET variera donc en fonction de l'heure de la journée, des saisons, de la latitude.
- Le gradient d'humidité : plus l'air sera sec, plus la quantité d'eau vaporisée dans l'atmosphère augmentera.
- Le vent : il augmente la vaporisation de l'eau
- La disponibilité en eau : en l'absence d'eau, il n'y a pas d'ET.
- Les facteurs spécifiques à la végétation considérée : croissance des plantes, hauteurs, surface des feuilles
- La résistance des stomates : les plantes régulent leur transpirations en ajustant leur ouverture.
- Les caractéristiques des sols : chimie, albédo.

3. Les différents concepts d'évapotranspiration

3.1 Évapotranspiration de référence ET_0 (ou ETP)

L'évapotranspiration de références ET_0 : est définie comme le niveau de l'évapotranspiration d'une surface importante d'un gazon de hauteur uniforme (entre 8 et 15 cm), en croissance active, recouvrant complètement le sol et alimenté en eau d'une façon non conditionnel. L' ET_0 a été introduit pour étudier la demande évaporative de l'atmosphère indépendamment du type de culture, du stade de développement de la culture et des pratiques de gestion. L' ET_0 n'est affectée que par les paramètres climatiques et est calculée à partir des données météorologiques. Les valeurs de l' ET_0 sont d'autant plus grandes que la température est élevée, le vent fort, l'air sec...etc. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a amélioré et mis à jour les méthodologies d'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET_0) en introduisant le concept de culture de référence

(herbe), décrit par l'équation FAO de Penman-Monteith. Cette approche a été testée sous différents climats et calculs de pas de temps et est actuellement adoptée dans le monde entier (Raes, 2009).

La formule de Penman-Monteith de calcul de l'ET₀ s'écrit comme suit :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \lambda \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \lambda (1 + 0.34 U_2)}$$

Où :

ET₀ : évapotranspiration de référence en mm/jour

R_n : rayonnement net à la surface de la culture en MJ m⁻² jour⁻¹

G : densité de flux thermique du sol MJ m⁻² jour⁻¹

T : température de l'air à 2 m hauteur en °C

U₂ : vitesse de vent à 2 m de hauteur ms⁻¹

e_s : pression de vapeur saturante en kPa

e_a : pression de vapeur réelle en kPa

e_s-e_a : déficit de pression de vapeur saturante en kPa

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur kPa °C⁻¹

Λ : constante psychrométrique kPa °C⁻¹

3.2 Évapotranspiration maximale (ETM)

Elle représente l'évapotranspiration d'une culture en bonnes conditions végétatives et sanitaires et ne souffrant d'aucune restriction en ce qui concerne son alimentation hydrique. Elle s'accroît avec la densité, la hauteur et la rugosité de la végétation. Elle correspond aux besoins en eau de la culture. Elle est liée à l'ET₀ par un coefficient appelé coefficient cultural (K_c) dont les valeurs dépendent de la culture considérée et, pour une même culture, du stade de croissance de celle-ci.

$$ETM = K_c \cdot ET_0 \text{ (en mm)}$$

3.2.1 Le coefficient cultural (K_c)

Permet de corriger l'ETP suivant une culture donnée et son stade de développement. Ainsi, plus la culture est développée d'un point de vue végétatif, plus le K_c approche de 1, et à ce moment là l'ETP (ou ET₀) équivaut à l'ETM. Le K_c est calculé suivant les cultures et leur cycle de développement, on trouve de nombreux abaques pour chaque culture.

Les facteurs qui influent sur la valeur de k_c sont : les caractéristiques de la culture, les dates de plantation ou de semis, le rythme de son développement et la durée de son cycle végétatif,

les conditions climatiques, en particulier au début de la croissance et la fréquence des pluies ou des irrigations.

La courbe de k_c sur l'ensemble de la période de croissance a été présentée initialement par Doorenbos et Pruitt (1975). Elle permet de distinguer les 3 valeurs de k_c (initial, mi-saison, et d'arrière saison). Les valeurs les plus élevées du k_c sont observées au printemps et en automne, lorsque le sol est encore humide. Les valeurs les plus basses sont notées en été (Allen et al. 1998).

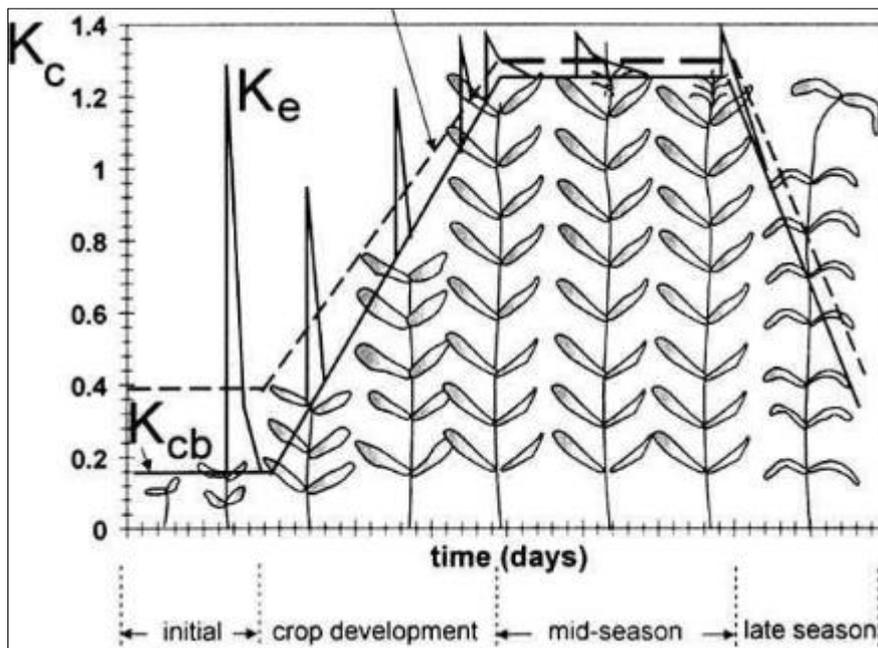


Figure.15 Courbe de coefficients culturaux et définition des phases (Doorenbos et Pruitt, 1975)

3.3 Évapotranspiration réelle (ETR)

Quant à l'ETR, elle désigne l'évapotranspiration d'une culture dans les conditions réelles, quel que soit son état (sanitaire, physiologique).

On a généralement : $ET_o \geq ET_M \geq ETR$

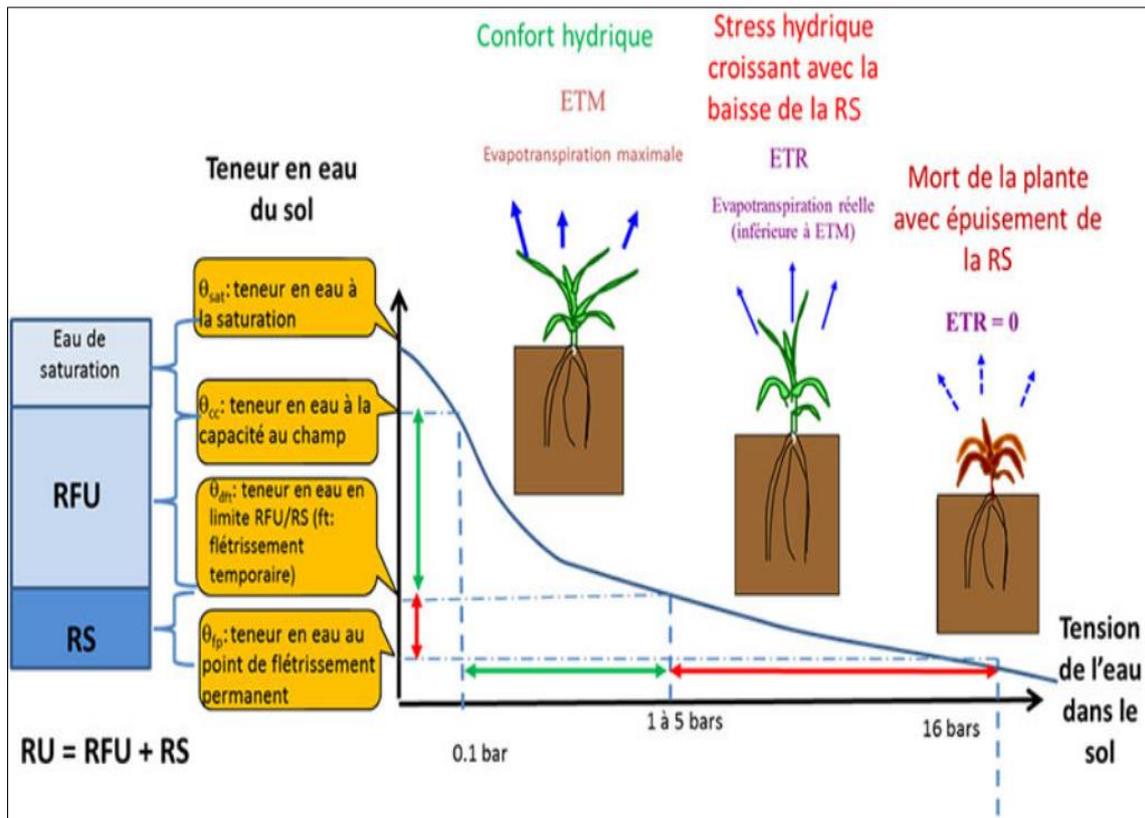


Figure. 16 Relation entre la teneur en eau de sol et l'évapotranspiration (source : <https://www.aspexit.com/gestion-de-leau-et-technologies-numeriques-en-agriculture>)

Chapitre V : Température et production végétales

1. Les différentes notions de température

1.1 Température maximale (Tmax)

La température maximale (abréviation TX) est la plus élevée observée au cours de la journée. Elle se produit le plus souvent en cours d'après-midi.

1.2 Température minimale (Tmin)

La température minimale (abréviation TN) est la plus basse observée au cours d'une journée de 24 heures. Elle se produit le plus souvent vers le lever du jour ou dans l'heure qui suit.

1.3 Température moyenne (Tmoy)

La température moyenne journalière, est la somme de la température maximale et minimale de la journée que l'on divise par 2.

$$T_{moyj} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Pour calculer la Tmoy mensuelle (Tmoym), on additionne les Tmoyj enregistrées durant le mois considéré, on les divise par le nombre de jours du mois.

Pour calculer la Tmoy annuelle (Tmoya), on additionne les Tmoym calculées pour chaque mois de l'année considérée, on les divise par le nombre de mois de l'année (12).

2. Action des températures sur les cultures

La hausse des températures est aussi responsable d'un changement dans la temporalité des cycles de vie. Beaucoup d'espèces fleurissent alors précocement, ce qui peut être délétère pour la reproduction car cela diminue la possibilité d'accumuler des ressources nécessaires pour le développement reproductif. Le décalage temporel peut également être à l'origine d'un problème de synchronisation avec les autres facteurs abiotiques ou biotiques (comme les pollinisateurs) intervenant dans la reproduction. L'avancement du début de la floraison peut être dû à un effet direct de la température sur la vitesse du développement et sur la vernalisation. En particulier, le réchauffement climatique en cours fait craindre une réduction importante des zones géographiques présentant des conditions hivernales suffisamment froides pour assurer la vernalisation, qui est pourtant un préalable indispensable à la floraison des arbres fruitiers par exemple (**Zhaoxia et Juren, 2022**)

Le stress thermique affecte plus fortement le développement reproductif et provoque notamment une inhibition de l'ouverture des anthères, de la germination du pollen et de la croissance du tube pollinique (**Erwin, 1993**).

La température affecte fortement le métabolisme. Si une augmentation de température en dessous de l'optimum est favorable à la respiration et à la photosynthèse, lors d'un stress thermique l'activité des enzymes mitochondriales et chloroplastiques est diminuée. En particulier l'activité de la Rubisco décroît. En effet, d'une part l'activase de la Rubisco est inhibée par de fortes températures et d'autre part la spécificité de la Rubisco pour le CO₂ diminue à la faveur d'une plus grande assimilation de l'O₂. Ce phénomène entraîne une photorespiration plus importante, qui est encore accentuée par le fait que la diminution de la solubilité du CO₂ avec l'augmentation de température est plus forte que celle de l'O₂.

À l'échelle cellulaire, l'homéostasie cellulaire (c'est-à-dire la composition, les concentrations et la structure des différents composants et compartiments de la cellule) d'une plante soumise à une forte hausse de température (au-dessus de l'optimum) est fortement perturbée. Tout d'abord l'évapotranspiration augmente, ce qui conduit à une baisse du potentiel hydrique de la plante. De plus l'agitation thermique cause une augmentation de la fluidité des membranes et en conséquence une désorganisation du cytosquelette associé à celles-ci, ainsi qu'une perturbation des concentrations et des flux ioniques (en particulier calciques).

Par ailleurs de fortes températures peuvent être la cause de la dénaturation et de l'agrégation de protéines ainsi que de l'inhibition de leur synthèse. Des températures en hausse sont également à l'origine de l'augmentation du stress oxydatif, notamment via la production de dérivés réactifs de l'oxygène (molécules oxydantes très réactives) toxiques pour la cellule. (**Zhaoxia et Juren, 2022**).

2.1 Zéro de végétation

Le zéro de végétation, considéré comme la température de base, est la température minimale dont une plante a besoin pour se croître. En dessous de cette température, la plante ne développe pas. Cette température dépend de la plante. À titre d'exemple le zéro de végétation pour le blé = 0°C, Orge = 3°C, Sorgho et vigne = 10°C, pomme de terre, Colza = 6°C et Coton = 14°C (**Durand, 1967**).

2.2 Températures létales

Correspond au maximum de température possible au dessus duquel la plante meurt, comme elle correspond aussi au minimum de température au dessous duquel la plante périsse aussi.

Les végétaux ont colonisés des zones où les températures peuvent atteindre -60°C , à titre d'exemple le sapin peut vivre à des températures de -25°C .

2.3 Degré jour de croissance (Dj)

La valeur du nombre de degré jour est la moyenne entre la température maximale et minimale de la journée à laquelle on enlève la température de base (zéro de végétation).

$$Dj = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

2.4 Somme de températures

La somme de température est la quantité de chaleur dont une plante a besoin pour se développer. Cette somme permet d'estimer le stade phénologique des cultures en additionnant les degrés jour (DJ) pendant la période de croissance de la plante et grâce à une table des valeurs de DJ de la culture concernée. Plus la température journalière est élevée, plus la croissance de la plante sera rapide, et inversement.

2.4.1 Exemple de somme de températures des stades végétatifs du blé

Les sommes de températures des stades du blé sont telles que

Du semis à la levée : 180-200 DJ.

Du semis au début tallage : 550 DJ.

Du semis à épi 1 cm : 1100 DJ.

Du semis à 2 nœuds : 1300 DJ.

Du semis à épiaison : 2000 DJ.

Du semis à grain pâteux : 2800 DJ.

3. Les gelées

3.1 Définition des gelées

Selon **Rochard et al. (2019)**, les gelées c'est un abaissement de la température au-dessous du degré zéro qui provoque la congélation de l'eau.

3.2 Type de gelées

Selon **Kalma et al. (1992)**, dans les grandes lignes, on peut distinguer deux catégories de gelées en agriculture: les gelées blanches et les gelées noires.

3.2.1 Les gelées blanches

Ces gelées apparaissent lorsque qu'il-y-a un fort taux d'humidité dans l'air ambiant associé à un froid intense. Le givre se forme alors à la surface des plantations leur donnant cet aspect blanc. C'est pour cela qu'on les appelle des gelées blanches. Ce type de gelées n'est pas particulièrement dommageable en agriculture. On dit même qu'elles protègent la partie interne de la plante car curieusement, la glace peut agir comme une protection antigel.(Barclay,2008).

3.2.2. Les gelées noires

Contrairement aux gelées blanches, les gelées noires ont des effets très négatifs pour l'agriculture. Les gelées noires apparaissent lorsque l'air est sec. En effet, le faible taux d'humidité ambiant, ne permet pas à l'eau de se condenser sur la plante. La couche de glace protectrice ne peut donc pas se former et le froid sec s'insinue directement dans la structure moléculaire des plantes, détruisant les tissus internes. Ce phénomène donne à la plante cette couleur sombre tirant sur le noir, qui précède sa destruction totale (Barclay, 2008).



Figure.17 Les gelées blanches et noires (Source Figure.a : <http://images.4ever.eu/nature/herbe-gelee-241435>, Source Figure.b : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/lot-gel-tardif-abime-70-vignes-appellation-cahors-1667845.html>)

3.2.3 Le gel d'advection

Ce type de gel se forme lors de l'apparition soudaine de grandes masses d'air froid très épaisses pouvant atteindre jusqu'à 2 kilomètres. La particularité de ce gel est qu'il est issu d'une inversion thermique qui induit un réchauffement de l'air avec l'altitude. L'air froid est donc "coincé" dans les zones les plus basses. Ce type de gelée est redoutable pour

l'agriculture puisqu'il n'est pas facile de protéger les plantations des masses d'air froid qui se déplacent en permanence sur de très grandes étendes. De plus, ce type de gel entraîne généralement des vents d'une vitesse supérieure à 15 ou 20 km/h. (Kalma et al. 1992).

3.2.4 Le gel par radiation

Il trouve son origine dans un refroidissement du sol suite au transfert de sa chaleur vers l'atmosphère durant la nuit. C'est un processus connu sous le nom de radiation. Ce type de gel n'apparaît que dans certaines conditions. Il ne faut pas qu'il y ait de vent car celui-ci interromprait la radiation. Il faut également que la nuit ait été longue et que la température du jour précédent ait été très basse. Les fonds de vallées sont très propices à ce type de gel. Mais ce qui caractérise réellement le gel par radiation, c'est l'inversion thermique qui se produit.

Pour obtenir une méthode de protection contre les gels et lutter contre les gelées dans l'agriculture, il est très intéressant de connaître le point d'équilibre entre les variations de température et l'altitude qui est à l'origine de la stabilité et du retour à une situation normale (Kalma et al. 1992).

3.2.5. Le gel par évaporation

Dans les processus d'évaporation, la température des plantes baisse de façon notable lorsque l'eau qui les recouvre s'évapore. L'eau s'évapore principalement à l'aube lors de la rosée du matin produisant alors ce type de gelées (Kalma et al. 1992).

3.3 Périodes d'apparition des gelées

Selon la période à laquelle elles se produisent, les gelées peuvent être reparties en trois types cités ci-dessous (Saunier, 1978).

3.3.1 Les gelées de printemps

Elles sont fréquentes lorsqu'il y a une baisse de la température ambiante. Au cours du cycle annuel, elles affectent surtout les cultures dans la phase d'ouverture des bourgeons.

3.3.2 Les gelées automnales

Les gelées automnales sont parfois appelées gelées précoces et peuvent endommager les cultures. Elles peuvent en effet interrompre les processus de formation des fleurs et la phase de maturation des fruits. Elles influencent le volume de la production agricole pendant les mois suivant l'été.

3.3.3 Les gelées hivernales

Elles se produisent pendant l'hiver lorsque la température ambiante diminue beaucoup. Elles affectent surtout les arbres aux caractéristiques pérennes.

3.4. Lutttes contre les gelées

Les méthodes de lutttes contre les gelés sont de deux types : méthodes directes et méthodes :

3.4.1 Les méthodes indirectes (passives)

Les méthodes indirectes que l'on applique bien avant que le danger de gel soit imminent sont probablement les plus économiques et les plus efficaces (**Rochard et al. 2019**).

a. Le choix du terrain

Pour cultiver une espèce qui craint le gel, on doit choisir un terrain situé dans un endroit bénéficiant d'une période sans gel suffisamment longue. Pour les cultures très vulnérables, on évite les creux de terrain ou les fonds de vallon dans lesquels l'air froid s'amasse et stagne. Le long d'une pente, la présence de rideaux d'arbres compacts, de bandes boisées, de talus de route ou autres obstacles s'oppose à l'écoulement de l'air froid vers le bas et peut donc entraîner la formation de véritables lacs d'air froid. Le risque de gel au-dessus de ces obstacles s'en trouve donc accru. En revanche, dans les zones situées en-dessous, le risque de gel peut être moins élevé puisque l'écoulement de l'air froid du haut est partiellement contrarié. En implantant des brise-vent protecteurs aux bons endroits, on peut créer une zone bénéficiant d'un microclimat favorable à la maturité hâtive des cultures aimant la chaleur, et donc réduire le risque de dommages par le gel à l'automne. Les terrains situés en bordure de grandes masses d'eau sont habituellement moins gélifs car l'air ne s'y accumule pas aussi rapidement la nuit que sur la terre. En effet, les zones riveraines sont régulièrement sujettes, la nuit, à des brises de terre qui contribuent à éloigner le gel. Dans certaines régions, l'installation de vergers sur les pentes exposées au nord contribue à retarder la floraison jusqu'à ce que le danger de gel soit écarté (**Rochard et al. 2019**),

b. S'informer sur la météorologie de site

Les producteurs devraient connaître le risque de gel de printemps et d'automne dans leur région ainsi que les variations auxquelles ils doivent s'attendre chez eux. L'information donnée par la station climatique desservant la région peut souvent être utile pour déterminer le risque de gel, même si la situation de la station n'est pas toujours identique à celle de la ferme (**Jolivet, 2006**).

d. Le déboisement

Dans les terrains en pente, l'éclaircissage des haies ou des espaces boisés contribue parfois à réduire le risque de gel en facilitant l'écoulement de l'air froid vers le bas. Il est préférable de se renseigner auprès d'un professionnel avant d'éclaircir, car il arrive que cela accroisse le risque de gel en contrebas des espaces boisés ou de la haie. En forêt, le risque de gel est plus élevé dans les clairières de petite étendue et il continue d'augmenter jusqu'à ce que la clairière couvre environ un hectare. Toutefois, au-delà d'une étendue de quelques hectares, le risque de gel diminue en général car la circulation de l'air est rétablie (**Jolivet, 2006**).

e. Les pratiques culturales

Choisir les espèces et les variétés de cultures qui auront le temps de mûrir à l'intérieur des limites de la période sans gel. Par exemple, quand on cultive du maïs-grain, il faut choisir des hybrides qui atteignent la maturité avant qu'une gelée meurtrière ne puisse survenir. On peut déjouer le risque de gel de printemps pendant la floraison des fraisiers en optant pour des variétés à floraison tardive ou en retardant l'enlèvement des paillis à base de paille. Les pommiers nains sont plus à risque d'être lésés par le gel que les variétés à haute tige étant donné que, pendant les nuits de gel, les couches d'air situées près du sol tendent à être plus froides que les couches supérieures. (**Rochard et al. 2019**).

f. Éviter les périodes de gels

Il faut semer et récolter les cultures sensibles au gel à l'intérieur des limites de la période sans gel dont bénéficie la parcelle. Le semis ou la plantation doit être réalisé suffisamment tôt pour que la culture mûrisse avant que n'arrive une gelée meurtrière à l'automne. Il faut connaître le risque de gel de printemps et d'automne dans le champ que l'on met en culture (**Jolivet, 2006**).

g. Augmenter la résistance des plantes face au gèle (endurcissement)

On peut durcir certaines plantes de manière qu'elles résistent au gel en exposant les semences ou les jeunes plantules à des conditions de température variables. Les plantes de serre sont souvent durcies par exposition aux conditions du dehors avant d'être repiquées dans le champ. Le traitement des semences avec certains produits chimiques augmentait la rusticité de certaines plantes. L'épandage des bonnes doses d'engrais peut aussi aider les plantes à maintenir leur résistance face au gel (**Rochard et al. 2019**).

h. Les pratiques agronomiques

L'état du sol influe sur le risque de dégâts causés par le gel sur les organes tant aériens que souterrains des plantes. Ainsi, les sols meubles tendent à être plus froids en surface que les

sols compactés parce que la conduction de la chaleur, pendant la nuit, y est plus faible. Il est donc conseillé de ne pas travailler le sol lorsque les bulletins météorologiques annoncent une gelée meurtrière, si les organes des plantes situés près du sol ont besoin de protection (**Jolivet, 2006**).

i. Choisir le type de sol et améliorer sa résistance face au gel

L'humidité du sol exerce des effets qui se vérifient. Les sols excessivement humides emmagasinent moins de chaleur pendant la journée étant donné que l'évaporation de l'eau accapare une grande part de l'énergie calorifique, ce qui peut réduire la quantité de chaleur qui sera restituée à la culture pendant la nuit. Par contre, des sols excessivement secs sont de médiocres conducteurs thermiques et n'ont pas la propriété d'emmagasiner autant de chaleur, d'où un risque accru de gel. Un sol tourbeux sec est un mauvais conducteur thermique qui possède une très faible capacité de rétention de la chaleur, de sorte que les températures nocturnes minimales à la surface de ce genre de sol peuvent être considérablement plus basses que sur les sols minéraux. On peut envisager d'améliorer les caractéristiques thermiques d'un sol tourbeux en lui incorporant de la terre minérale. (**Rochard et al. 2019**).

j. Bien gérer les paillis

Les paillis étalés sur le sol augmentent le risque de gel en se comportant comme des isolants. Ils gênent l'absorption de la chaleur pendant le jour, mais aussi sa dissipation pendant la nuit. Les paillis peuvent cependant aider à éviter les dommages causés par le gel, à condition qu'ils couvrent complètement les organes de la plante qui craignent le gel. Le fait de retarder l'enlèvement des paillis à base de paille au printemps dans les fraisières permet parfois de retarder le stade de la floraison jusqu'à ce que le danger de gel soit écarté. Par contre, la paille retarde aussi le réchauffement du sol et, si elle est encore sous les fleurs pendant un gel, le risque de dégâts augmente.

Une des façons de protéger les parties souterraines des plantes consiste à augmenter l'épaisseur de terre qui les recouvre.

Les méthodes indirectes de protection contre le gel dont il a été question ci-dessus valent la peine d'être prises car, la plupart des années, elles évitent le recours aux méthodes de protection directes, qui sont coûteuses et envisageables uniquement pour des cultures dont la valeur par unité de surface est très élevée (**Rochard et al. 2019**).

3.4.2 Les méthodes directes de protection contre le gel

La protection directe ou active est celle que l'on déploie juste avant et pendant la période de gel quand un avis de gel a été diffusé. Les méthodes directes sont généralement efficaces

seulement contre un gel de rayonnement, quand l'air est immobile ou presque, et elles conviennent le mieux aux terrains bas qui sont plus rapidement sujets au gel. Quant aux gels d'advection, il est rare que l'on puisse en éviter les dégâts (**Rochard et al. 2019**).

Une protection efficace exige que l'on dispose de bonnes prévisions concernant les températures minimales et les conditions des vents à la parcelle même. On doit connaître en outre les températures critiques qui causent des dégâts aux cultures. Chaque producteur doit connaître les variations de température nocturne qui se produisent sur ses champs et savoir quels champs sont les plus exposés à un gel, de façon à pouvoir y intervenir en priorité. La protection directe repose sur un concept très simple. Elle vise soit à réduire la perte de chaleur renvoyée par le sol en brassant l'air pour stopper l'inversion de température, soit à apporter de la chaleur pour maintenir la température au-dessus du seuil dangereux.

Pour déterminer s'il est rentable d'investir dans le matériel, les appareils et la main-d'œuvre nécessaires à la protection directe contre le gel, de multiples facteurs sont à prendre en considération. On peut citer le degré de risque de gel, la durée et l'intensité probables du gel, la valeur de la récolte et l'efficacité de la méthode à utiliser. Certaines des méthodes directes sont décrites ci-après (**Kalma et al. 1992**)

a. Le recouvrement des cultures

Cette méthode réduit la perte de chaleur de la surface du sol en utilisant des matériaux comme la paille, des boîtes, du plastique, etc. Le coût de ces matériaux et leur entreposage, le temps et la main-d'œuvre nécessaires pour les mettre en place sont les principaux inconvénients de cette méthode quand elle est appliquée à de grandes superficies. Les paillis à base de paille doivent couvrir entièrement les plantes, car le feuillage qui dépasse devient plus sensible aux dégâts dus au gel. Quant aux paillis étalés sous les plantes, ils empêchent la chaleur de s'échapper du sol pendant la nuit, d'où une température plus basse au niveau des plantes. Les matériaux de recouvrement doivent être retirés pendant le jour car l'air qu'ils enferment étant plus humide, le risque de certaines maladies des plantes augmenterait (**Rochard et al. 2019**).

b. La formation de fumée ou de brouillard

Les nuages et le brouillard sont bien connus pour leur faculté à limiter la perte de chaleur du sol par rayonnement, on fait brûler des déchets (branches d'arbres, paille...) pour produire de la fumée et on a vaporisé de l'eau en très fines gouttelettes pour former un brouillard. Ces méthodes ne sont pas très efficaces parce qu'il est difficile de maintenir la fumée sur la zone à protéger ou de produire des gouttelettes ayant la dimension optimale pour intercepter le rayonnement à grandes longueurs d'ondes (**Rochard et al. 2019**).

c. Le brassage de l'air

Pendant les gelées qui se produisent par nuits claires et calmes, la couche d'air située près du sol est plus froide que celle qui est au-dessus. C'est le phénomène de l'inversion de température. On utilise quelquefois des souffleuses à air chaud ou des hélicoptères pour brasser l'air et remplacer la couche d'air froid qui est au contact de la culture par la couche d'air plus chaud qui se trouve plus haut. Cette méthode peut fonctionner quand il y a de larges écarts de températures entre la couche d'air près de la surface et celles qui sont en hauteur. Le matériel et la mise en œuvre coûtent très cher. Le relèvement de la température est de l'ordre de 1 à 4 degrés Celsius (**Rochard et al. 2019**).

d. L'aspersion d'eau

La vaporisation d'eau, à raison d'un très faible débit, peut empêcher les dégâts du gel grâce à la chaleur libérée par les gouttelettes en refroidissant et en gelant. On a pu constater que l'on pouvait protéger ainsi contre les températures aussi froides que -6 °C des cultures basses de petits fruits et de cucurbitacées, moyennant l'aspersion de 1,5 à 2,5 mm d'eau à l'heure. (**Rochard et al. 2019**).

e. Le recours à l'irrigation

Comme méthode de protection des cultures avant la survenue d'une gelée. D'un côté, l'humidité accrue présente l'avantage d'augmenter la capacité du sol de stocker la chaleur et d'améliorer la conduction de la chaleur à la surface. Mais d'un autre côté, elle réduit le réchauffement du sol pendant le jour à cause de l'évaporation accrue qui absorbe l'énergie calorifique. L'humidité peut aussi élever la température critique à partir de laquelle les végétaux subissent les méfaits du gel. Ces effets contradictoires empêchent la formulation d'une recommandation générale de cette méthode. (**Rochard et al. 2019**).

f. Le chauffage

Cette méthode vise à réchauffer suffisamment la couche d'air qui est au contact de la culture, par un apport de chaleur radiative, pour maintenir la température au-dessus du point de congélation. Le chauffage le plus efficace est celui qui est procuré par de nombreuses petites chaufferettes régulièrement espacées dans l'ensemble du champ à protéger. La méthode du chauffage implique des coûts en combustible élevés - qu'il s'agisse de briquettes, de mazout ou de gaz propane - auxquels s'ajoutent les frais en capitaux et en main-d'œuvre. Elle ne peut donc être mise en œuvre que pour protéger des cultures ayant une valeur très élevée par unité de surface. La prévention des dégâts du gel par la méthode du chauffage est surtout efficace

pour les cultures hautes comme la vigne et les arbres fruitiers. Les meilleurs résultats s'observent quand l'immobilité de l'air favorise une inversion abrupte de la température. Cette méthode permet d'espérer une protection contre des gelées pouvant atteindre $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rochard et al. 2019).



Figure.18 Quelques méthodes de lutte contre les gelées (Sources : Figure.a : <https://www.sudouest.fr/vin/vignoble-du-cognac-79-tours-antigel-arriveront-en-decembre-2480291.php>, Figure.b, c, d : <https://lcjcapteurs.com/differentes-techniques-pour-lutter-contre-le-gel-en-agriculture>).

4. Phénomène d'échaudage

Accident physiologique des céréales, provoquant une mauvaise circulation des substances nutritives dans les plantes et se traduisant par la malformation des grains, qui restent de petite taille. Au stade laiteux, la taille des grains est réduite suite au stress thermique (forte chaleur), et donc le PMG (poids de mille grains) également. Ces symptômes sont accentués sur les sols superficiels à peu de réserve hydrique (stress hydrique) (Merouche, 2015).

Chapitre VI : Utilisation de l'eau en agriculture

1. Le problème de l'eau dans le monde

L'eau couvre environ 70% de la planète, c'est-à-dire environ 1.4 milliards de km³. C'est pour cela qu'on donne souvent à la Terre le nom de planète bleue. Dans toute cette eau, 97.2% est de l'eau salée et seulement 2.8% est de l'eau douce.

La majorité de l'eau douce est sous forme de glace polaire qui est inutilisable. Il ne reste donc que environ 1/4 de l'eau douce pour que tous les habitants de la planète bleue puissent assouvir leurs besoins, c'est donc très peu. Heureusement, cette eau se renouvelle assez rapidement : cela prend en moyenne 16 jours pour une rivière et 17 ans pour un lac. Cependant, il faut veiller à maintenir cette eau douce propre pour que la pollution ne détruise pas cette très petite partie d'eau utilisable par les hommes (FAO, 2022).

2. Répartition de l'usage de l'eau dans le monde

L'agriculture consomme énormément d'eau à cause de l'irrigation des cultures qu'elle doit assurer. Au cours du 20^{ème} siècle, l'irrigation des terres cultivées a été multipliée par 5. Depuis 1960, les agriculteurs ont augmenté de 60 % le prélèvement d'eau pour leurs terres.

L'irrigation est nécessaire pour avoir de bons rendements dans l'agriculture et pour pouvoir ainsi nourrir la population. Elle est évidemment plus importante dans les pays arides ou semi-arides où les précipitations sont peu abondantes, et malheureusement la plupart de ces pays sont en voie de développement et utilisent 90 % de leur eau douce pour irriguer leurs terres, alors que les pays industrialisés n'en utilisent que 40 %. De plus, ces pays en voie de développement subissent souvent une forte croissance démographique, ce qui entraîne une augmentation des superficies cultivées et donc de l'eau utilisée pour irriguer ces cultures (FAO, 2004).

Mais leurs systèmes d'irrigation ne donnent souvent pas les résultats escomptés car une grande partie de l'eau s'évapore au lieu d'alimenter les plantes, sans compter les fuites et d'autres pertes encore. De plus, les ressources en eau superficielles et souterraines peuvent être contaminées par l'eau de drainage infiltrées en dehors de la zone racinaire des cultures avec des volumes souvent importants en cas d'irrigation massive.

L'utilisation de techniques d'irrigation localisée intelligente (irrigation goutte à goutte et capteur d'humidité) représente un moyen d'arrosage des cultures économique qui devrait se

généraliser pour optimiser la gestion de l'eau et réduire les risques de contamination des nappes (FAO, 2004).

3. Disponibilité de l'eau douce dans le monde

Deux préoccupations essentielles apparaissent quant on analyse la répartition de la ressource en eau. D'une part, la plupart des pays les plus touchés par le manque d'eau sont des pays en voie de développement qui ne savent généralement pas faire face aux contraintes financières d'une gestion correcte de l'eau (de la production à l'assainissement). Pour certains pays, la pénurie d'eau constitue donc un frein au développement. D'autre part, les conflits sur l'eau risquent de se multiplier. Dans les pays où l'eau est une denrée rare, il faudra établir la répartition la plus judicieuse entre l'eau réservée à l'agriculture et celle utilisée par les habitants. Effectivement, avec le réchauffement climatique, il y a de moins en moins d'eau potable, ce qui crée de nouveaux conflits entre les pays qui ont accès directement à l'eau et ceux qui en ont un accès plus difficile. Des conflits pour l'eau à la frontière entre deux pays risquent également de devenir problématiques. L'ONU estime que 300 rivières transfrontalières peuvent constituer un enjeu conflictuel dans un avenir proche.

3. Disponibilités de l'eau en Algérie

L'accroissement démographique mondial et le développement du niveau de vie urbain ajoutés au phénomène de changement climatique entraînent une diminution sans cesse croissante des ressources en eau notamment pour les pays africains et asiatiques qui représente près des 2/3 de la population mondiale (Figure 19). Il est important de remarquer que l'Algérie est l'un des pays les plus touchés par la sécheresse puisqu'elle est passée de l'état de stress hydrique en 1950 à l'état de pénurie en 1995 (Unwater, 2020).

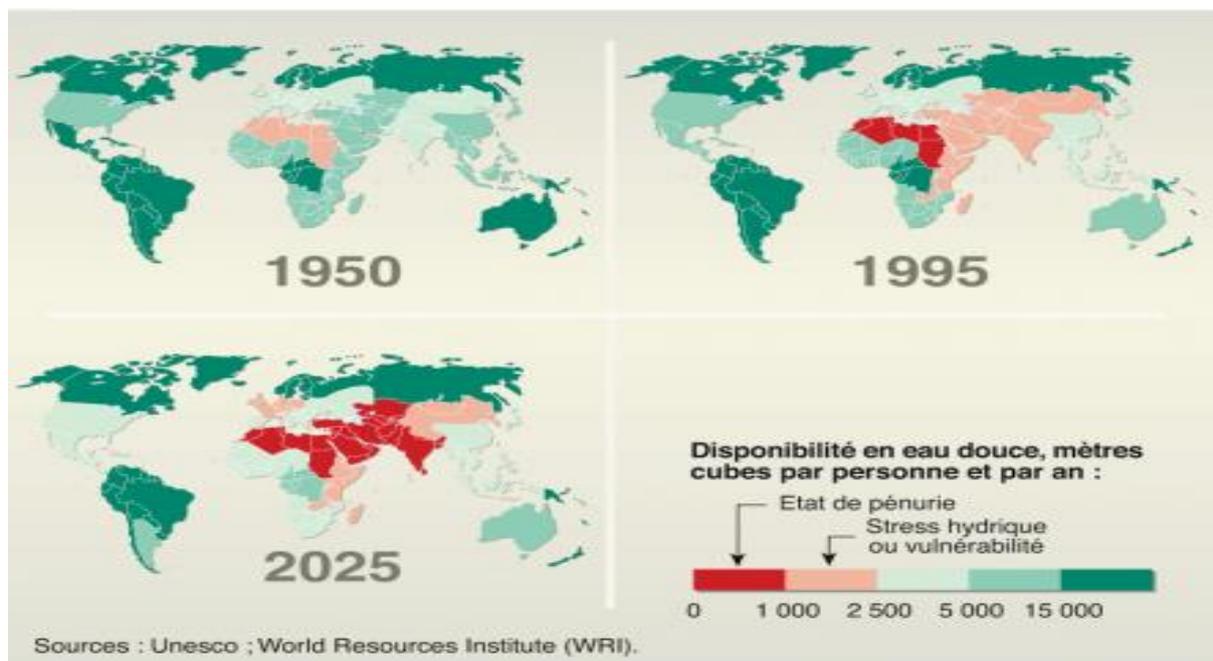


Figure.19Évolution et prévision de la disponibilité de l'eau douce dans le monde en 2025

(source : <https://histoire-geo-leygues.jimdofree.com/seconde-g2/>)

C'est pourquoi, l'Algérie est appelée plus que tout autre pays à optimiser la gestion de l'eau d'irrigation en utilisant les techniques de surveillance de l'eau dans le sol basées sur l'intelligence artificielle (pilotage intelligent de l'irrigation) mais aussi à développer non seulement la technologie de la désalinisation de l'eau de mer mais aussi à étendre l'utilisation réfléchie des eaux usées épurées pour les besoins de l'irrigation. De cette manière, l'Algérie pourra répondre aux défis de la sécurité alimentaire par la gestion adéquate des ressources hydriques avec les trois principes : gestion optimisée de l'irrigation par les techniques basées sur l'IA, extension des ressources en eau par la désalinisation de l'eau de mer et réutilisation méfiante des eaux usées épurées en irrigation.

Les potentialités globales de l'eau en Algérie sont évaluées à 19.4 milliards de m³/an dont seulement 12 milliards sont mobilisables :

-6.8 milliards au Nord (5 milliards de m³/an pour les eaux de surface, 1.8 milliards de m³/an pour les eaux souterraines)

-5.2 milliards dans les régions sahariennes.

Ces potentialités correspondent actuellement à un taux de 600 m³/hab/an qui passera à 400 m³/hab/an à l'horizon 2020.

De ce fait, l'Algérie se situe dans la catégorie des pays pauvres en ressources hydriques au regard du seuil de rareté fixé à 1000 m³/hab/an (**Bouchedja, 2012**).

4. Les états de l'eau dans le sol

Selon Nadun, (2020), il ya trois types d'eau dans le sol :

4.1 L'eau hygroscopique

Est une eau absorbée de l'atmosphère et retenue très étroitement par les particules du sol, de sorte qu'elle n'est pas absorbable par les plantes pour leur survie.

4.2 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 teneur en éléments granulométriques grossiers, de quelques centimètres dans les sables et graviers à plusieurs mètres dans les limons et argiles. Elle peut être partiellement extraite par gravité et transmet les pressions.

4.3 Eau gravitaire

Il s'agit de l'eau qui peut circuler librement dans les gros pores et qui se retrouve sous la limite supérieure de la nappe, dans la zone saturée. Elle constitue le volume d'eau drainaient profondeur.

On parle ainsi, d'eau gravitaire lorsque l'effet de la gravité est prépondérant(elle concerne la macroporosité), d'eau capillaire lorsque l'effet des forces de capillarité prédomine (elle concerne partiellement la méso et la microporosité), ou encore d'eau hygroscopique pour signaler la supériorité des forces d'adsorption qui retiennent fortement les molécules d'eau qui deviennent non absorbable par les plantes (Figure 20).

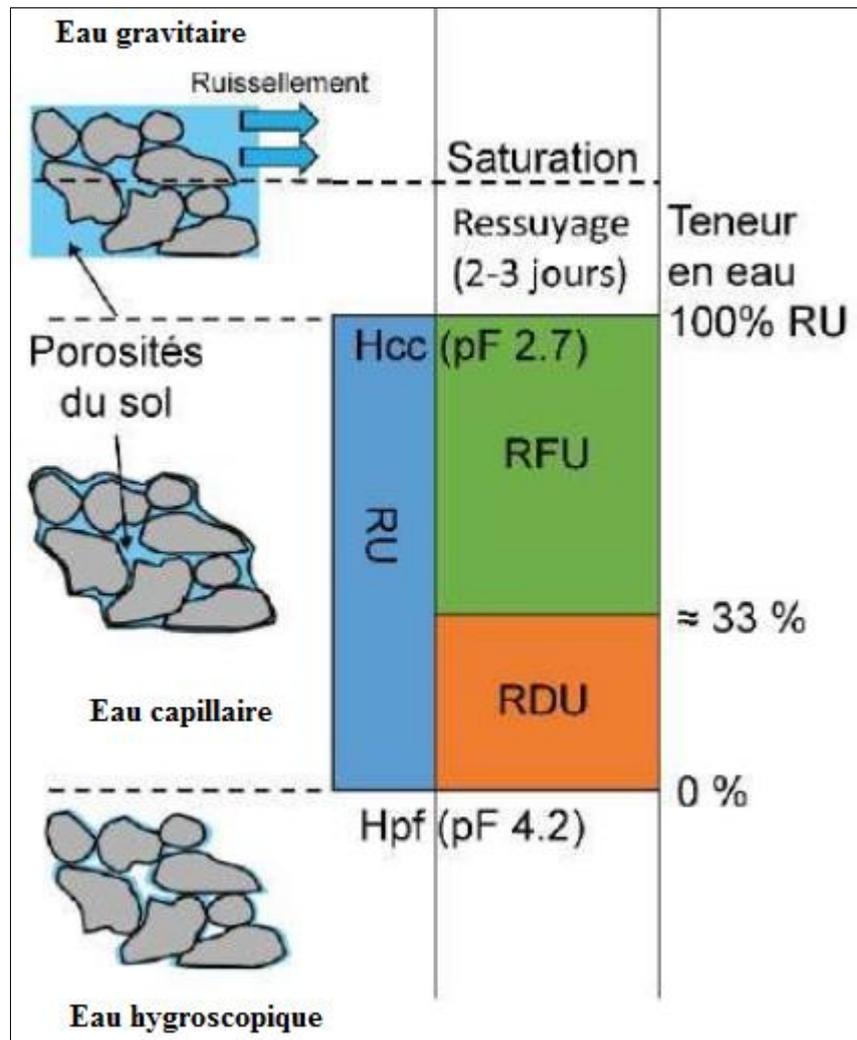


Figure.20 Les états de l'eau dans le sol (Source : https://www.researchgate.net/figure/Definition-de-la-reserve-utile-RU-selon-le-niveau-de-remplissage-en-eau-des-porosites_fig3_350749310)

5. Humidités de l'eau dans le sol

Selon **Nadun (2020)**, plusieurs niveaux d'humidité de l'eau dans le sol sont décrits de manière à comprendre comment l'eau est retenue dans le sol et accessible pour les plantes. Ces niveaux sont généralement catégorisés en quatre principales phases :

5.1 L'humidité de saturation : À ce niveau, les pores du sol sont complètement remplis d'eau. Il s'agit du point où le sol est totalement saturé, et l'eau ne peut plus être retenue par la capillarité, mais plutôt drainée en raison de la gravité.

5.2 L'humidité disponible ou capillaire : Ce type d'humidité est retenu par les forces capillaires et est disponible pour les plantes. Elle est présente entre le point de saturation et le point de champ.

5.3 L'humidité à la capacité au champ : Ce niveau désigne l'humidité qui reste dans le sol après que l'excédent d'eau ait été drainé. À ce stade, l'humidité est suffisante pour que les plantes puissent l'absorber.

5.4 L'humidité au point de flétrissement permanent : Il s'agit du point où l'humidité dans le sol est trop faible pour être disponible pour les plantes. À ce niveau, même les racines des plantes ne peuvent pas extraire suffisamment d'eau, ce qui conduit à un flétrissement irréversible.

Ces niveaux d'humidité sont essentiels pour comprendre le comportement de l'eau dans le sol et la gestion de l'irrigation en fonction des besoins des plantes

5.5 La réserve utile (RU)

La réserve utile est la quantité d'eau stockée dans le sol qui peut être absorbée par les racines des plantes (entre la capacité au champ et le point de flétrissement). En général, cette réserve utile pour les plantes dépend essentiellement de la granulométrie des sols et varie à l'inverse de la perméabilité: les sols argileux ont une réserve utile supérieure aux sols sableux, mais ils sont moins perméables. En l'absence de mesures précises, qu'il faut faire au laboratoire, on peut donner les ordres de grandeur suivants de cette réserve utile:

Exemples : sol sableux RU = 6 %, sol moyen RU = 12 % et Argileux : RU = 16% (**Bruand, 2006**) .

5.6 La réserve facilement utilisable (RFU)

C'est la quantité d'eau disponible par unité de surface calculé sur la profondeur maximale d'enracinement et comprise entre les deux limites de l'humidité de rupture du lien capillaire (ou humidité critique qui représente le début du stress hydrique de la plante) et l'humidité à la capacité au champ.

$$\mathbf{RFU = (1/2 \text{ ou } 2/3) RU}$$

$$\mathbf{RFU/RU = 2/3}$$

La RFU dépend essentiellement de :

1- La nature du sol et sa profondeur.

2- La nature des cultures (profondeur des racines).

En pratique, on déconseille d'attendre que le sol soit revenu au point de flétrissement avant de pratiquer une irrigation (il faut irriguer dès que l'eau atteint le point de l'humidité de rupture capillaire ou humidité critique), l'irrigation doit être déclenchée dès que la "réserve facilement utilisable" (RFU) est consommée.

En réalité le rapport RFU/RU n'est pas fixe, il dépend de la texture du sol et souvent on recommande les rapports suivants:

Sol argileux : RFU/RU = 0.5

Sols limoneux RFU/RU = 0.65.

Sols sableux RFU/RU = 0.75.

Il s'agit d'une estimation approximative pour les besoins pratique de la conduite de l'irrigation mais le rapport RFU/RU dépend aussi des cultures. Dans un même sol les cultures résistantes à la sécheresse disposent d'une RFU plus importante que les cultures sensibles. Il faut considérer que les cultures maraîchères disposent d'une RFU réduite par rapport aux céréales; elles doivent donc recevoir des doses d'irrigation plus petites mais plus fréquentes.

6. Estimation des besoins en eau des cultures

Pour une culture donnée, le besoin en eau maximal de référence est l'ETM (Évapotranspiration Maximale).

$$ETM = kc \times ET_0$$

L'ETM correspond à l'évapotranspiration d'une culture, selon son stade végétatif mais sans restriction d'eau. C'est un confort hydrique maximum. Ce besoin s'exprime en millimètre par jour (mm/j).

6.1 Exemple d'estimation des besoins en eau de la laitue

En période d'été, par un temps ensoleillé, clair et sans vent, comment arroser (dose, fréquence) une culture de laitue en plein champ sur un sol argileux-sableux qui comprend 30% de caillouteux ?

A cette date, la culture est en plein croissance active, avec $Kc = 0.7$.

Les données météo donnent $ET_0 = 5.5$ mm/j.

Les besoins de référence donc sont :

$$ETM = 5.5 \times 0.7 = 3.8 \text{ mm/j.}$$

La profondeur d'enracinement est de 40 cm.

La RU est de 120 mm/m pour un sol entièrement constitué de terre fine, mais compte tenu des 30 % de cailloux, la RU n'est que

$$120 - (30\% \times 120) = 84 \text{ mm/m.}$$

Sur les 40 cm de profondeur exploitée par la culture, la RU n'est plus que $(84 \text{ mm/m} \times 0.4 = 20 \text{ mm}$

La RFU = 1/2 à 2/3 RU = 20 mm.

Si l'on choisi d'arroser tous les quatre jours, la dose sera donc $3.8 \times 4 = 15 \text{ mm}$. Elle peut être apporter en une fois car n'a pas atteint la RFU = 20 mm.

Si la dose à apporter est supérieure à 20 mm ; il faudra fractionner les arrosages.

S'il pleut, l'irrigation sera décalée ou diminué.

En cas de ruissellement, on ne prend en compte qu'une partie estimée du volume lu dans le pluviomètre.

6.2 Estimation des besoins en eau des cultures avec la méthode de bilan hydrique

Le bilan hydrique permet de suivre, selon une méthode simple, l'état de la réserve en eau du sol en tenant compte des besoins en eau de la culture et des apports naturels par les pluies ou par irrigation. Il permet donc de vérifier :

- d'une part, que l'apport d'eau par irrigation est suffisant pour ne pas vider la RFU et donc provoquer un stress hydrique à la culture ;
- d'autre part, que l'apport d'eau par irrigation n'est pas trop important (pour éviter de saturer le sol et provoquer des pertes d'eau par ruissellement, et éviter des apports d'eau inutiles).

Le bilan hydrique est également un outil de gestion technique simple, qui permet d'analyser, en fin de saison, l'ensemble des besoins et des apports. Il permet de conserver la trace des périodes déficitaires et des périodes excédentaires tout au long de la campagne. Son analyse en fin de saison, une fois les rendements connus, peut expliquer le fonctionnement des parcelles et les réactions des cultures a ux divers événements climatiques.

6.2.1 Récapitulatif des étapes pour établir le bilan hydrique

Le bilan hydrique dans une parcelle agricole se calcul comme suit :

Quantité d'eau disponible = Stock (RFU) + Entrées (pluies + remontées capillaires + arrosage) – Sorties (consommation + ruissellement + drainage).

Données nécessaires

1. RFU : obtenu par mesure laboratoire ou données moyennes selon le type de sol.

2. Demande climatique (ETP) ou ET_0 : valeurs moyennes obtenus par les services météorologiques ou stations automatiques. Sachant que $ETP = Kc \text{ ETP}$. Elle correspond à la

consommation de l'eau par les cultures sur la parcelle. Dans certaines conditions, un coefficient de correction est appliqué à la consommation de l'eau en fonction de l'environnement de l'espace vert (zone abritée, zone ventilée). En pratique, les gestionnaires d'espaces verts appliquent d'eux-mêmes des corrections en se basant sur l'aspect visuel.

3. Coefficient cultural K_c : obtenu par bibliographie (exemple consulter le site FAO).

4. Précipitations locales : obtenues par des pluviomètres ou service météorologique.

5. Estimation de la capacité du réservoir RU :

5.1 Estimation pratique

On considère en moyenne qu'un sol peut fournir 1 litre/m²/cm de sol exploré par les racines, soit 1 mm/cm.

6. Arrosages : Enregistrés par le gestionnaire de la parcelle ou de l'espace vert, ils viennent compléter les apports naturels.

7. Consommation (ETR): elle est calculée à partir de la demande climatique ETP et du coefficient cultural K_c .

Consommation en eau (mm/j) = ETP (mm/j) x K_c

8. Ruissellement : c'est la perte d'eau en surface par écoulement (fonction de l'état de la surface du sol, de la pente du terrain et de l'intensité des apports d'eau). En pratique : pour prendre en compte le ruissellement, on applique un coefficient d'efficacité pour les pluies en fonction de leur intensité (caractère orageux).

8.1 Exemple :

- Pour une pluie fine de 30 mm, le coefficient est de 100% : on comptabilise 30 mm efficaces.
- Pour un orage de 30 mm, on estime un coefficient de 50% : on comptabilise 15 mm efficaces.

9. Drainage : c'est la perte d'eau en profondeur s'il y a trop d'eau dans le sol.

En pratique : le drainage est difficilement mesurable surtout en espace vert où les sols sont plutôt bien drainés. Ce paramètre est pris en compte dans le bilan en limitant la capacité du réservoir : les apports en excès sont considérés comme perdus.

En pratique le bilan peut se simplifier à :

Quantité d'eau disponible = Stock + Pluies + Arrosages – Consommation en eau (ETR) avec l'application d'un coefficient d'efficacité pour les pluies.

Conclusion générale

Les données météorologiques et climatologiques sont très cruciales dans la planification et la gestion des activités de l'homme dont une des principales activités vitales qui est l'agriculture. L'homme a en effet très vite commencé à observer le temps. Puis il a réalisé que l'observation du temps sans tenir compte de l'observation de son impact sur les plantes, ne suffisait pas à appréhender tous les problèmes posés à l'agriculture et à assurer son développement, mais que l'utilisation des informations provenant de l'observation du temps d'une part, et de l'observation des plantes et des animaux d'autre part, permettait de mieux affronter les problèmes de l'agriculture. L'agrométéorologie, née de cet impératif utilise des informations provenant des observations simultanées du milieu physique et des phénomènes agricoles. Elle permet de délimiter une région en différentes zones agro-pédoclimatiques spécifiques à telle ou telle spéculation agricole. Au niveau d'une zone agroclimatique déterminée, elle permet la planification, la gestion et le suivi des activités agricoles et la prise de décisions par les agriculteurs à court terme et long terme. Les études microclimatiques, enfin, permettent de définir et d'identifier différents types de relations et d'interactions entre les éléments physiques d'une part et biologiques, d'autre part. C'est là une base à partir de laquelle on peut penser, imaginer et trouver des solutions pour sauver l'agriculture dans certaines régions encore très hostiles.

Bibliographie

- Balasubramanian, A. (2011).** Atmosphere- Documentary.DOI: 10.13140/RG.2.2.28235.80161.
- Baldy, C. et Stigter, C.J. (2006)** Agrométéorologie des cultures multiples en régions chaudes.Edition INRA.
- Barclay,P. (2008).**Spring Cold Injury to Winegrapesand Protection Strategies and Methods. HortScience.Vol 43(6)
- Bouchedja, (2012).**la politique nationale de l'eau en Algérie. International Network of Basin Organizations – INBO. Istanbul. Turquie.
- Bruand, A. (2006).** Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO, 2006
- Cabeza, F. (2002).** Diagramme Psychrométrique. Ressources formatives, Froid et climatisation, AFP–DEAT.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A., Ammann, (C). (2011)** Recherche Agronomique Suisse 2 (4): 176–183, 2011
- Carlier, M préface. de Réméniéras, G. (1972).**Hydraulique générale et appliquée, Paris : Eyrolles ; 1 vol. 582 pages.
- Cimbala, J.M. (2014).**The Ideal Gas Constant.On line course of Penn State University.https://www.me.psu.edu/cimbala/Learning/General/Gas_constant.pdf.
- Conférence Internationale, Istanbul (Turquie), 17 au 19 Octobre 2012.
- Daniel, V. (2003)**Le bilan radiatif de la Terre. Plante terre. ENS Lyon.<https://planet-terre.ens-lyon.fr/pdf/bilan-radiatif-terre3.pdf>
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1975).**Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome.
- Durant, R. 1967.**Action de la température et du rayonnement sur la croissance. Ann. Physiol. Vég., 9 (1), 5-2.
- Erwin, (1993)** Temperature effects on plant growth.Minnesota Flower Growers Bulletin - March, 1991 Volume 40, Number 2.
- FAO, (2004).** L'eau,l'agriculture etl'alimentation. Une contribution auRapport mondial sur la miseen valeur des ressources en eau.

- FAO, (2022).** Forum mondial de l'Eau : le Président Macky Sall ouvre officiellement la 9ème édition. <https://www.fao.org/africa/news/detail-news/fr/c/1479938/>.
- Fierro, A. (1991).** Histoire de la météorologie, Éditions Denoël, 22 mars 1991, 320 p. (ISBN 978-2-207-23838-7), p. 18.
- Giovanni, A. (2020)** Les rayonnements ionisants et non ionisants et leurs effets: Effets des radiations Broché. Livre, 76 pages. Edition Notre Savoir.
- Guenel P, De Guire L, Gauvin, D., Rhainds, M. (2003).** Rayonnement non ionisant. In environnement et santé publique, fondements et pratique, pp 441-661.
- Hattab, Y. (2016)** Cours de rayonnement. Licence physique. Université des sciences et technologies Mohamed Boudiaf d'Oran.
- Heymann, M. (2010).** The evolution of climate ideas and knowledge. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 1(4), 581–597. doi:10.1002/wcc.10.1002/wcc.61
- IPCC. (2018)** Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>.
- Javelle, J., Rochas, M., Pastre, C., et al. (2000).** La météorologie : du baromètre au satellite. - Mesurer l'atmosphère et prévoir le temps. Paris : Edition Delachaux et Niestlé, coll. «La bibliothèque du naturaliste », 2000. 171 pages.
- Jolivet, Y. (2006).** Mille et une recettes de lutte contre le gel printanier. Conférences Journées AgroVisions. Québec. 9 p www.agrireseau.net;
- Kalma, J.D., Laughlin, G.P., Caprio, J.M., Hamer, P.J.C. (1992).** The Occurrence of Frost: Types, Distribution and Prediction. In: The Bioclimatology of Frost. Advances in Bioclimatology, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-58132-8_2
- Lucien, W. (2020).** Introduction au rayonnement solaire, Paris: Presses des mines, collection Sciences de la Terre et de l'environnement,
- Makin, D.J, Kouassi, K., Sewa, S. (2002).** Agrométéorologie. Climat et ses composantes eau et atmosphère. https://www.on-mali.org/pdf/on_dgemrh_016_agroclimatologie_juin_2002.pdf.

- Marty, F. (2013).** Cours de transferts thermiques. Conduction et rayonnement. Cours Licence génie des procédés. Université Joseph Fourier, Grenoble. 34 pages.
- Merouche, A. (2015).** Besoins en eau et maîtrise d'irrigation d'appoint de blé dur vallée de Chellif. Thèse doctorat. ENSA El Harach. 82 pages.
- Murthy, V.R.K. (2019).** Practical Manual on Agrometeorology. BS Publications. BSP Books 205 pages.
- Nadun, P. (2020).** Types of soil water. E-learning course Centurion University of Technology and management (cutm).
https://courseware.cutm.ac.in/wpcontent/uploads/2020/06/Types_of_Soil_Water.pdf.
- Pant, K.P., Sengtaheuanghong, O., Phothichanh, P., Petri, M. (2021).** Training manual agrometeorology for agriculture extension officers in the Lao People's Democratic Republic. Vientiane. FAO, MONRE and MAF. <https://doi.org/10.4060/cb7108en>
- Parcevaux, S. (1990).** Dictionnaire Encyclopédique d'Agrométéorologie. Edition INRA. 334 pages.
- Planton, S. (2020).** La température moyenne de la Terre, Encyclopédie de l'Environnement. Consulté le 24 mai 2024 [en ligne ISSN 2555-0950] url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/temperature-moyenne-terre-rechauffement-climatique>.
- Prasa S. (2011).** Composition, structure and importance of the atmosphere. advanced climatology .GEOG. 201
- Raes, D. (2009)** Evapotranspiration from a reference surface. Reference Manual. Version 3.1
- Rochard, J., Monamy, C., Pauthier, B., Rocque, A. (2019).** Stratégie et équipements de prévention vis-à-vis du gel de printemps et de la grêle. Perspectives en lien avec les changements climatiques, projet ADVICLIM. BIO Web of Conferences 12, 0101 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201012>.
- Saunier, (1978).** Sensibilité variétale aux gels chez les cerisiers, pruniers, pêchers et nectariniers. Lutte contre les gelées. Invuflec, 1978
- Stocklé, T., Cosson, M. (2014).** Guide technique n°6. Techniques d'imagerie au service de la conservation. Editions LIFE et Chiro Med. 40 pages.
- Stull, R. (2017).** Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science" -version 1.02b. Univ. of British Columbia. 940 pages. isbn 978-0-88865-283-6.
- Suchit, K., Rai, P.K., Ghosh, S.K., Jitendra, B.S (2014).** Research in Agrometeorology on Fodder Crops in Central India—An Overview. Indian Grassland and Fodder Research Institute, Jhansi, India. DOI: 10.4236/acs.2014.41011
- Take, E. S. (2015).** Agricultural Meteorology and Climatology. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 92–97. doi:10.1016/b978-0-12-382225-3.00009-8

- UGA. (2015).**UGA Cooperative Extension. What is a Weather Station and Can It Benefit Ornamental Growers?Bulletin n°475.https://ag.umass.edu/sites/ag.umass.edu/files/fact-sheets/pdf/b_1475_2.pdf.
- Unwater.(2020).**Rapport de synthèse 2018 sur l'objectif de développement durable relatif à l'eau et à l'assainissement?
- Vachala S. (2008)**Évaporation sur les retenues EDF du Sud de la France. These de Master. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.48 pages.
- Vincent D. (2003).**Le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/pdf/bilan-radiatif-terre1.pdf>.
- Vinet, F. (2000).** Le risque-grêle en agriculture, éditions ´technique et documentation.237 pages.
- Wisniewski, C. (2021).**Cours de Transfert de chaleur.UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques.
- WMO. (2008)** World Metrological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Publication N°8.
- Zhaoxia, Li.,Juren, Zhang. (2022)** Effects of Raised Ambient Temperature on the Local and Systemic Adaptions of Maize. *Plants (Basel)*. 2022 Mar; 11(6): 755. doi: 10.3390/plants11060755.

Sites web

- https://meteocentre.com/intermet/instrument/barometre_ane.htm.Consulté le 3 janvier 2024.
- <https://www.aspexit.com/gestion-de-leau-et-technologies-numeriques-en-agriculture/>. Consulté le 3 janvier 2024.
- <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/temperature-moyenne-terre-rechauffement-climatique/> Consulté le 5 janvier 2024.
- https://www.mythomson.com/fr_fr/comment-choisir-et-utiliser-une-station-meteo. Consulté le 5 janvier 2024.
- <https://www.station-meteo-agricole.com> Consulté le 5 janvier 2024.
- <https://www.meteo.dz/articles/Qui%20sommes%20nous%3F> consulté le 20 mai 2024.