

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20Aout 1955-Skikda

Faculté des sciences

Département des sciences de la nature et de la vie



Spécialité : Licence Ecologie et Environnement

Élaboré par : Dr HADJOU DJ Saida

Année universitaire 2020/2021

Sommaire

Chapitre 1 : Climatologie générale et classification biologique des climats.....	1
- Météorologie, climatologie, relations entre les deux sciences.....	1
- Le temps et les types de temps.....	2
Chapitre 2 : Les données climatologiques.....	8
Sources de données, exploitation des données, leurs applications, images satellite (Météosat).....	8
- Mesures en surface.....	11
* Pluviosité.....	12
* Températures.....	13
* Pression atmosphérique.....	14
* Humidité relative.....	15
* Ensoleillement.....	16
* Vent.....	18
- Mesures en altitude.....	21
* Pression atmosphérique.....	21
* Vent.....	21
* Température.....	21
Chapitre 3 : Mécanismes de la circulation générale des systèmes de vents : Alizés, vent d'Ouest, vents polaires.	24
Chapitre : 4 L'air et la structure et dynamique des couches : Troposphère, stratosphère et ionosphère.....	30
Chapitre 5 : Bilan thermique à la surface de la terre et utilisation des synthèses bioclimatiques à des problèmes d'écologie appliquée.....	32
Notion d'échelles.....	32
- Rayonnement net à la surface de la terre.....	32
- Problèmes particuliers relatifs au CO ₂ , effet de serre, ozone Atmosphérique	34

Chapitre 6 : L'Aridité.....	37
- Les différents indices d'aridité.....	37
- Les régions arides dans le Monde, en Afrique, au Maghreb.....	41
Chapitre 7 : Hydrologie.....	42
- Hydrologie de surface.....	42
- Hydrologie souterraine.....	45
- Bilans de l'eau.....	45
- Problèmes spécifiques aux forêts.....	47
- Problèmes spécifiques aux steppes.....	50
Chapitre 8 : Les bilans hydriques.....	53
- Evapotranspiration réelle.....	53
- Evapotranspiration potentielle.....	53
* Méthode de mesure.....	55
* Méthodes de calcul ETP, ETR.....	55
Chapitre 9 : Méthodes de caractérisation du climat méditerranéen et classification climatique physique.....	60
- Méthode d'EMBERGER.....	60
- Méthodes dérivées.....	60
Chapitre 10 : Relations végétation climat.....	67
Chapitre 11 : Cartographie climatique et bioclimatique.....	70

Introduction

La bioclimatologie est une branche de l'écologie qui peut se définir comme étant la science de l'étude des relations entre les êtres vivants et le milieu ambiant. Selon les êtres vivants considérés, l'écologie peut être végétale, animale, ou humaine, le milieu ambiant se caractérise par des facteurs physiques, chimiques, et biologiques. Les premiers sont pratiquement liés à des phénomènes énergétiques de nature climatique. Ces facteurs comprennent le rayonnement, la température, le vent et dans une certaine mesure l'eau qui intervient aussi sous l'angle chimique.

1.1. La météorologie

La météorologie (familièrement appelée météo) est l'étude de l'atmosphère, c'est-à-dire de ses mouvements (direction et vitesse des vents) et de ses propriétés (température, pression), ainsi que des précipitations qu'elle produit (pluie, neige). La météorologie permet donc de comprendre le temps qu'il fait, mais aussi de connaître le temps qu'il fera quelques jours plus tard. Les phénomènes météorologiques (formation des nuages, mouvements des masses d'air, etc.) ne se produisent que dans la première couche de l'atmosphère (la troposphère).

1.2. La climatologie

La climatologie est une étude très scientifique du climat dans une région particulière ; la climatologie entraîne des observations et des relevés d'un maximum de paramètres possibles comme la température, les précipitations ou la vitesse maximale du vent ; ces observations et ces relevés doivent avoir été faits sur 30 ans pour avoir une idée précise sur le climat du lieu ou on pratique les observations et les relevés.

1.3. Relation entre les deux sciences

La climatologie et la météorologie sont deux sciences complémentaires qui ont pour objectif, l'étude des phénomènes atmosphériques tels que : température, vents, précipitations,...et les lois qui les régissent. La différence entre les deux sciences est que la climatologie étudie les éléments du climat et les lois aux qu'elles ils sont soumis.

Alors que la météorologie a pour objectif supplémentaire l'application de ces lois pour la prévision du temps.

1.4. Le temps et leurs types

a). Le temps

Le temps est considéré comme l'état physique de l'atmosphère en un lieu donné et à un moment donné. Il se décrit en fonction de divers éléments météorologiques exprimés en valeurs instantanées (pression, température,..) ou en valeurs moyennes ou cumulées sur des courtes périodes (vent : moyenne du vent sur 10 minutes, durée d'insolation au cours d'une journée,...).

b). Les types de temps d'un climat méditerranéen

Les états successifs de l'atmosphère se rattachent toujours à un petit nombre de types de temps caractéristiques ; ainsi, on en distingue :

➤ Les beaux temps :

- Beau temps froid d'hiver, à ciel clair et basses températures
- Beau temps chaud d'été
- Très chaud quand le vent souffle du sud.
-

➤ Les mauvais temps

- Mauvais temps d'hiver, avec de la pluie et des températures clémentes
- Mauvais temps d'hiver, froid et neigeux
- Mauvais temps des saisons intermédiaires
- Temps « pourri » d'été, froid et pluvieux (inexistant en Algérie)
- Temps orageux d'été, généralement passager.
-

1.5. Le climat

Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M) définit le climat comme « un ensemble d'éléments météorologique pris sur une période donnée qui concourent à donner caractère et individualité météorologiques à un domaine spatial déterminé ».

Vers le début du XX^{ème} siècle, le climatologue **HANN** propose cette définition qui met, elle aussi, l'action principale sur les conditions atmosphériques « *le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un point quelconque de la terre.* »

L'expression « état moyen » désigne le fait que le climat oscille autour de sa moyenne, plutôt qu'il s'y tient ; D'autre part ces oscillations ne se produisent pas de manière quelconque mais présentent un caractère cyclique, d'où la définition proposée par **SORRE, M.** qui joint à l'idée de synthèse, celle de rythme « ***on appelle climat la série des états de l'atmosphère au dessus d'un lieu dans leur succession habituelle.*** »

THORNTHWAITE a défini le climat comme « ***l'intégration des facteurs météorologiques et climatiques qui concourent à donner à une région son caractère et son individualité.*** »

D'autres auteurs ont tenu à mettre nettement l'accent sur l'aspect biologique du climat ; c'est ainsi que **KÖPPEN** définit ce dernier comme « ***l'ensemble des conditions atmosphériques qui rendent un lieu de la surface terrestre plus ou moins habitable pour les hommes, les animaux et les plantes.***»

RUBMER comprend sous le nom de climat « ***toutes les influences sur la santé, déterminées par l'emplacement du lieu.*** »

Ce qui suppose qu'on connaisse tous les facteurs ou groupes des facteurs météorologiques qui agissent sur la santé et qu'on puisse en effectuer la mesure.

Le climat apparaît ainsi comme une notion synthétique complexe dont on a donné de nombreuses définitions, qui parfois sont un peu longues. Si l'on tient à rester concis, il semble qu'on puisse dire que « ***le climat est l'ensemble des éléments qui - dans leur succession habituelle, au cours d'une période déterminée- caractérisent l'atmosphère (atm) et concourent à donner à chaque point de la terre son individualité*** ».

Il reste toutefois bien entendu que le climat n'est pas une notion abstraite (contraire du concret) et que quelque soit la définition retenue, l'atmosphère terrestre est considérée comme un milieu naturel dans lequel nous devons vivre et nous adapter et dont les êtres vivants aussi bien que la matière organique subissent l'action.

1.6. Les éléments et les facteurs du climat

a). Les éléments du climat

Les éléments du climat sont des paramètres physiques et des observations visuelles qui caractérisent le climat : ils résultent :

- Soit directement de la lecture ou de l'enregistrement d'un appareil de mesure : thermomètre, pluviomètre,...
- Soit des observations visuelles codifiées directement par l'observateur : on peut citer par exemple la détermination de la couverture nuageuse ou de la morphologie du type du nuage.

b). Les facteurs du climat

Les facteurs du climat ce sont des facteurs qui agissent sur la variabilité des éléments du climat on distingue :

- **les facteurs astronomiques** : la rotation de la terre sur elle-même et autour de soleil, entraînant une variation de la quantité d'énergie solaire reçue au niveau de la surface terrestre au cours d'une journée et au cours de l'année.
- **les facteurs météorologiques** : qui tiennent compte de la circulation générale, de l'effet des masses d'air, etc.
- **les facteurs géographiques** : qui regroupent l'effet d'altitude, de la position par rapport à la mer, etc.
- **les facteurs anthropogénitiques** : parmi les quels le rejet de gaz carbonique dans l'atmosphère tient un rôle important.

1.7. Les différents types de climats

1.7.1. Climats chauds

a) Climat équatorial

Températures voisines d 25°C

Amplitude thermique annuelle d'environ 2°C

Précipitations abondantes de 2000 à 4000 mm par an et fréquentes

Les saisons son peu marquées

Végétation : forêt dense

Exemple des pays à climat équatorial : Amazonie, Congo, Indonésie.

b) Climat tropical humide

Températures élevées et contrastées

Amplitude thermique annuelle voisine de 10°C

Précipitations variables de 500 à 1500 mm par an

Deux saisons : été : saison fraîche et humide (environ 23°C), hiver : saison chaude et sèche (environ 35°C)

Végétation : forêt moyennement dense et savane selon l'humidité

Le climat tropical humide se retrouve de part et d'autre de la zone équatoriale

Exemple des pays à climat tropical humide : Brésil, Amérique centrale, Antilles-Guyenne, Venezuela.

c) Climat désertique

Températures très élevées (jusqu'à 46 °C)

Amplitude thermique annuelle forte 36°C et Amplitude thermique diurne également forte

Précipitations faible et irrégulières de 100 à 400 mm

Deux saisons : été de 36°C à 46°C: saison sèche, hiver d 10°C à 15°C : saison humide

Végétation : steppe

Exemple des pays à climat tropical sec : Afrique, Australie, Arabie.

d) Climat de mousson

Températures de 20 à 40°C

Amplitude thermique moyenne

Précipitations : on passe de la sécheresse à la pluie diluvienne. On peut aller jusqu'à trouver 12000 mm d'eau en quatre mois

Trois saisons : novembre à mars : températures douces (20°C) avril à juin : température très élevées (de 30 à 40°C) juillet à octobre ; température élevées (25°C) et pluies très abondantes

Végétation : forêt dense, savane

Exemple des pays à climat d mousson : Sud-est asiatique, Inde.

1.7.2. Climats tempérés

a) Climat méditerranéen

Températures contrastées

Amplitude thermique annuelle forte d'environ 15°C

Précipitations irrégulières ; il y a mois de 100 jours de pluie par an et elles tombent surtout sous forme d'averses brutale

Saisons : été chaud et sec, hiver doux- pluies violentes au printemps et en automne

Vents violents : tramontane, mistral

Végétation : forêt clairsemée, garrigue, maquis

Exemple des pays à climat méditerranéen : Afrique du Nord, Europe du Sud Chili central.

b) Climat océanique

Températures modérées et peu contrastées : elles s'écartent peu de la moyenne annuelle de 11°C

Amplitude thermique annuelle faible

Précipitations réparties tout long de l'année (entre de 800 et 1000 mm)

Saisons peu marquées : été frais, hiver doux- gel et neige rares

Vents violents : fréquents et de direction changeante

Végétation : forêt à feuilles caduques, lande prairie

Exemple des pays à climat océanique : cote Atlantique de l'Europe, cote pacifique de l'Amérique du Nord

c) Climat continental

Températures très contrastées voisines de -20°C en hiver à 30°C en été

Amplitude annuelle forte

Précipitations faibles : 400 mm par an. Elles tombent sous forme de neige en hiver et de pluie d'orage en été

Saisons : hiver long et très rigoureux (température inférieure à 0°C ; gel) ; été chaud et pluvieux
printemps très court : automne sec

Vents violents en hiver

Végétation : taïga, prairie, steppe

Exemple des pays à climat continental : Russie.

1.7.3. Climats froids

a) Climat polaire

Températures très souvent négatives. La moyenne mensuelle ne dépasse pas 10°C

Amplitude thermique annuelle très forte

Précipitations peu abondantes et elles tombent uniquement sous forme de neige

Saisons : été très court

Vent très fort : blizzard

Végétation : toundra

Exemple des pays à climat polaire : Alaska, nord de Canada, Groenland, Sibérie.

b) Climat de montagne

Températures diminues, les précipitations augmentent en fonction de l'altitude

La température moyenne d janvier est de -7°C et en juillet, elle est de 12 °C

La végétation est surtout composé de feuillus, de conifères, d'arbre nains, de mousses et de lichens.

Ce climat existe un peu partout dans le monde, là où l'on trouve les principales chaînes de montagnes telles que la cordillère des Andes, les Rocheuses, l'Himalaya ainsi que les Alpes.

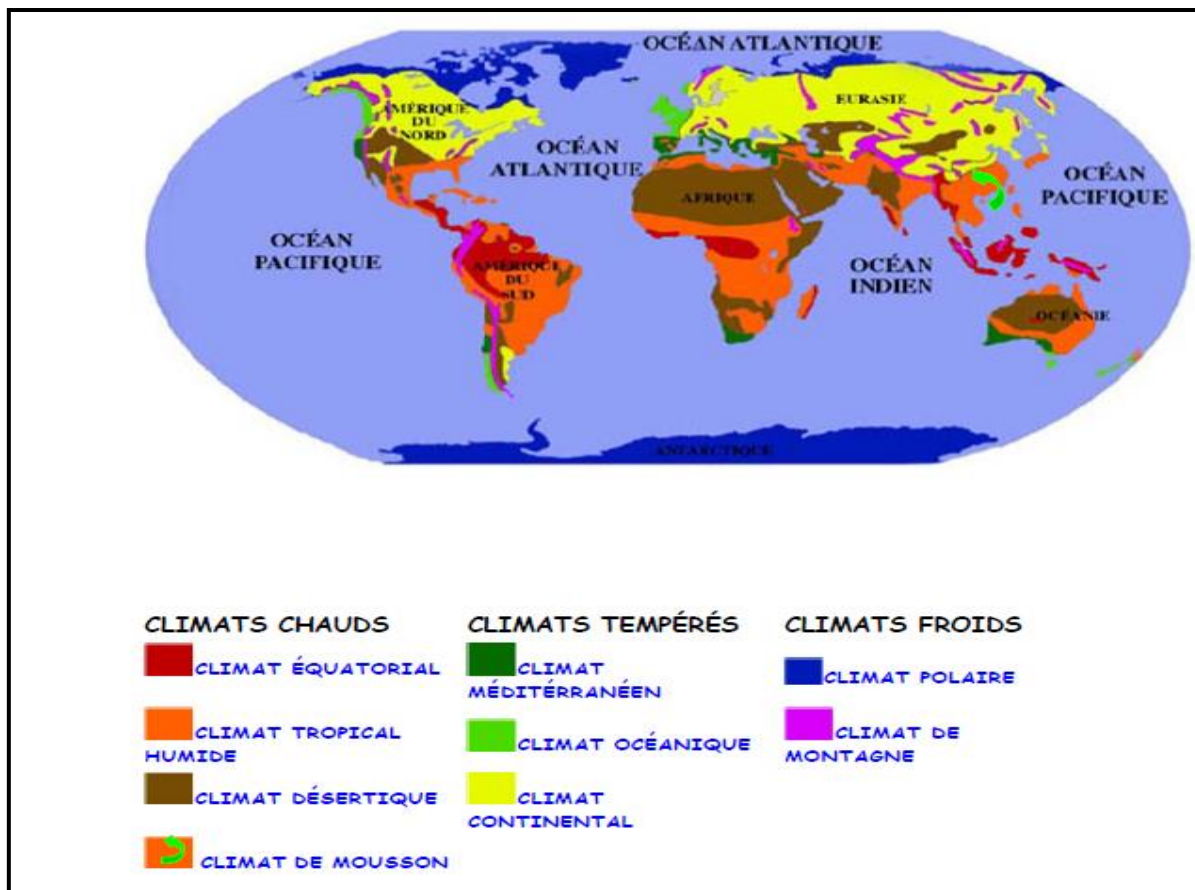


Figure1 : Les différents types de climat et leurs localisations dans le monde

2.1. Sources de données

L'analyse des différents éléments du temps repose sur les observations faites au sol ou en altitude. Les observations les plus anciennes consistent en des relevés de précipitations ou de températures, faits par des observateurs souvent bénévoles, et qui ne sont utilisés qu'à posteriori (plus tard) pour l'étude du climat. Les nécessités de la navigation aérienne, imposant la prévision à brève échéance, ont conduit à créer des stations météorologiques permanentes, très bien reliées les unes aux autres et constituent un réseau plus ou moins serré, géré suivant des règles fixes par l'organisation météorologique mondiale (O. M. M.) dont le siège administratif est à Genève.

Ces stations officielles, généralement hiérarchisées (stations d'observation, station de prévision, etc.) sont le plus souvent implantées sur les aéroports. Elles effectuent des observations nombreuses, suivant une périodicité horaire régulière, portant sur la pression atmosphérique et ses variations, les précipitations, la nébulosité (pourcentage de ciel couvert grâce à l'usage de la herse néphoscopique), la température, l'insolation, l'humidité de l'atmosphère, la vitesse et la direction du vent, etc.

Ces mesures sont faites à terre, dans des conditions en principe comparables (par exemple : la T°C est mesurée à 2 m du sol, sous abri, etc.).

Avec des moyens un peu plus complexes on peut mesurer ce qui se passe au dessus de la station d'observation. Déjà du sol avec des instruments optiques simples, il est possible d'apprécier l'altitude des nuages, leur développement vertical. En lâchant de petits ballons gonflés à l'hydrogène, on peut, en suivant leur ascension au théodolite (instrument de visée constitué d'une lunette mobile autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal et de deux cercles gradués perpendiculairement à ces axes, servant en topographie à effectuer des relevés, en astronautique à poursuivre les satellites) apprécier les mouvements verticaux de l'atmosphère de même que la direction et la vitesse du vent au - dessus de la station ; encore faut - il que la visibilité le permette. Des ballons plus volumineux emportant avec eux divers appareils de mesure et un petit émetteur transmettant au fur et à mesure les données enregistrées, donnent des informations précises de l'atmosphère terrestre. Mais ces radio - sondages reviennent chers, ne serait ce que parce que, sauf hasard, l'appareillage est très souvent perdu. Aussi ne sont - ils pratiqués que par quelques stations, et un petit nombre de fois dans la journée. L'utilisation de radars, la transmission des données ou des photographies recueillies par les satellites artificiels constituent des techniques encore plus pratiquées et le plus souvent onéreuses.

C'est cependant l'ensemble des données recueillies à un moment donné, aujourd'hui les plus traitées, au niveau des services nationaux, à l'ordinateur, transcrits automatiquement sur cartes, qui

permettent la prévision à court terme pour l'aviateur ou le marin, à moyen terme pour le touriste ou le paysan.

2.2. Principales stations d'observation en surface

Ces stations opèrent 24 heures sur 24 heures et communiquent entre elles en langage internationale codée. Les mesures sont effectuées simultanément à heures fixes (temps universel coordonné – TUC –, c'est-à-dire l'heure au méridien de Greenwich, on utilise plus couramment l'abréviation « TU »). Ces communications sont très rapides, il est donc possible pour le météorologue de l'Aigoual, par exemple, de connaître à 10 h 05 le temps relevé à 10 h par une très grande parties des stations mondiales.

On note que la densité de ces stations d'observation est très faible sur les océans et dans les zones désertiques (Sahara, Antarctique, Sibérie, etc.), qu'elle est par contre élevée sur les continents et notamment dans les pays riches (Europe, Etats - Unis).

En plus de ces stations météorologiques, il existe de très nombreux postes climatologiques tenus par des bénévoles, ainsi que des stations automatiques. Tous ces relevés sont très utiles pour affiner au maximum les prévisions et localiser avec précisions les phénomènes exceptionnels.

Sur la planète on dénombre : 10 214 statons d'observation en surface, 935 stations assurant des mesures en altitude, 6738 stations embarquées sur des navires, 120 bouées ancrées, 700 bouées dérivantes et de nombreux avions effectuent régulièrement des relevés.

Ces chiffres donnent une idée des moyens mis en œuvre par les pays membre de l'OMM pour surveiller l'atmosphère.

A toutes ces stations terrestres s'ajoutent 5 satellites géostationnaires et 2 satellites à défilement (se succèdent sans interruption), qui transmettent régulièrement des images et mesures diffusées dans les stations météorologiques.

2.3. Organisation météorologique mondiale (OMM)

Elle est créée en 1873 afin de coordonner et d'améliorer les services rendus par la météorologie dans le monde entier, cela au bénéfice des diverses activités humaines. Elle comprend plus de 130 membres (pays ou territoires).

L'OMM a diverses missions : se mettre au service de l'humanité en tentant de prévoir le mieux possible les catastrophes naturelles d'origine météorologique et de limiter de ce fait leurs effets ; exercer des actions de coordination internationale.

L'échange mondiale des observations météorologiques procure les renseignements indispensables pour la préparation de toutes sortes de prévisions : bulletins à destination de l'aviation, de l'agriculture, de la navigation maritime, du grand public. Aujourd'hui, cette collaboration est quotidienne, elle représente le fondement de la météorologie.

L'OMM participe aussi à la mise en valeur des terres arides en faisant des études climatiques dans les pays défavorisés ; elle intervient également avec d'autres organisations dans la lutte contre les divers fléaux naturels, tels que les nuages de sauterelles ou de moustiques, etc. de nombreuses études sur les phénomènes atmosphériques liés à la pollution sont menées sous l'égide de l'OMM.

L'OMM joue également un rôle dans la normalisation des instruments de mesures, vérifie leur fiabilité par des campagnes d'expérimentations.

La veille météorologique mondiale enfin, avec trois centres mondiaux (Melbourne, Moscou et Washington), est destinée à améliorer les échanges d'informations entre les services météorologiques du monde entier.

2.4. Valeurs des observations

L'observation est à l'origine de la météorologie. Sans observation, pas de prévision possible. Pour connaître avec exactitude le temps qu'il fait, le météorologiste dispose de moyens de mesure de l'atmosphère *en surface et en altitude* (ballons – sondes, capteurs divers) ainsi que de moyens puissants d'observation à distance (satellites, radars).

Pour être utilisables, tant par le météorologiste que le climatologue, les observations doivent être aussi exactes que possible et comparables les unes aux autres donc synchrones et faites dans les mêmes conditions. Néanmoins, on n'est pas à l'abri des erreurs :

- Les unes systématiques, tiennent aux défauts des appareils ou aux conditions de leur fonctionnement ; par exemple, plusieurs pluviomètres identiques, placés sur un même terrain, enregistrent des précipitations notablement différentes (+ ou – 10%).
- Les autres sont liées aux conditions dans lesquelles sont faites ou relevées les observations : appareil mal placé, erreurs de lecture ou de calcul, etc., ces erreurs sont aisément réparables dans les stations officielles.

Des données d'observation couvrant une courte période n'ont généralement aucune valeur démonstrative, sauf dans les régions équatoriales et dans certains déserts où les éléments du temps varient peu. La variabilité des éléments du temps est telle d'une saison ou d'une année à une autre, qu'il est nécessaire de disposer de séries d'observations prolongées pour pouvoir en tirer des

indications climatiques valables : au moins 10 ans pour les températures (T°C), de 20 à 30 ans pour les pluies. Cela est indispensable, non seulement pour connaître les traits moyens d'un climat, mais aussi pour apprécier les risques de renouvellement d'une situation donnée (par exemple, les probabilités de gelées printanières, les risques de longues périodes sèches ou humides, etc.).

2.5. Mesures en surface

L'observation en surface s'effectue à partir de stations météorologiques terrestres, de navires et de bouées marines. L'observateur relève tous les paramètres météorologiques qui caractérisent l'atmosphère. Il valide, et corrige parfois, les données enregistrées automatiquement par des instruments situés à l'extérieur de la station météorologique ; ces paramètres sont la T°C, l'humidité, la pression, la direction et la vitesse du vent, les précipitations, l'évaporation, le rayonnement solaire et enfin l'insolation.

Il détermine visuellement les nuages (altitude de leur base, genre, importance de la couverture nuageuse), la visibilité horizontale, ainsi que tous les phénomènes météorologiques se produisant sur la station : orage, neige, pluie, grêle, brouillard, etc.

Pour chaque paramètre, un instrument différent est utilisé. Pour uniformiser les mesures, afin de les rendre comparables sur l'ensemble des stations mondiales, les appareils doivent tous, et ce dans n'importe quel pays, être placés dans des conditions identiques : c'est pour cela que les anémomètres et girouettes (mesurant la vitesse et la direction du vent) sont tous situés à la même hauteur au-dessus du sol, à l'écart de tout obstacle ; que les thermomètres et hygromètres sont tous situés dans un abri météorologique (fig.2) permettant la circulation de l'air. Sans ces normes internationales, les mesures seraient inexploitables.

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

Partie intégrante d'une [station météo](#) standard, l'abri porte le nom de son concepteur, l'ingénieur [écossais Thomas Stevenson](#).



Figure 2: Abri météorologique

2.5.1. Les précipitations

Ce sont les formes variées sous lesquelles l'eau solide ou liquide contenue dans l'atmosphère se dépose à la surface du sol. Il s'agit aussi bien de la grêle, de la pluie, de la neige que de la rosée.

Les précipitations sont recueillies dans des **pluviomètres**. On mesure la hauteur d'eau tombée en millimètres (mm) et dixièmes de millimètres. Un mm de précipitation correspond à un volume de 1l d'eau par mètre carré (m^2), soit $10 m^3$ d'eau à l'hectare.

Actuellement, deux types de pluviomètres sont utilisés en station. Il s'agit du pluviomètre manuel, à lecture directe, constitué d'une éprouvette graduée translucide (Fig. 3). En cas de chute de neige, il faut faire fondre le volume de neige tombé afin de le transcrire en hauteur d'eau (en général 1 cm de neige correspond à 0,8 mm d'eau).

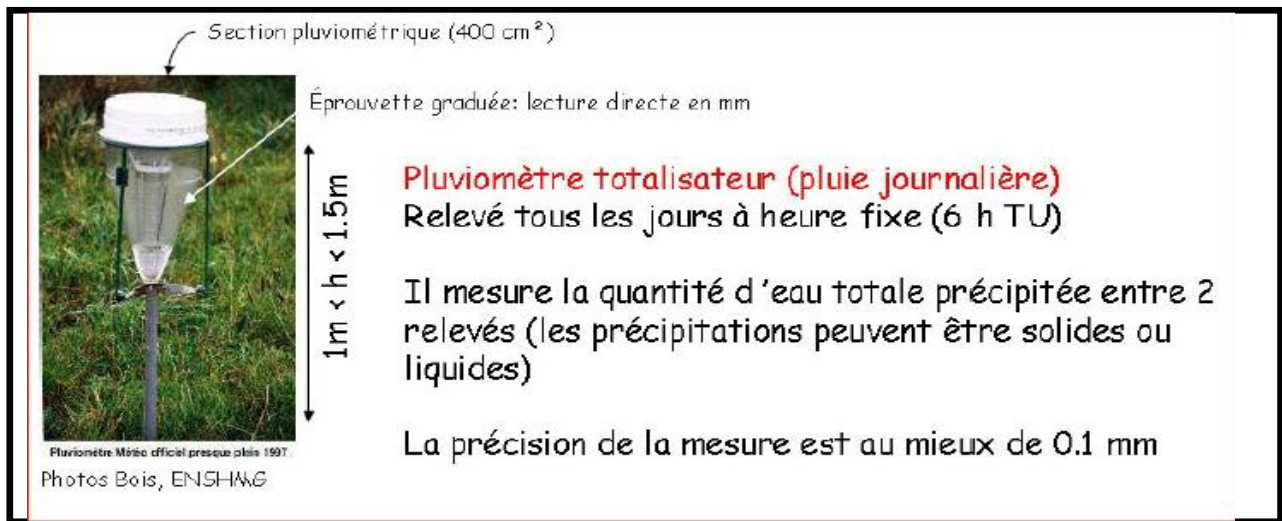


Figure 3 : pluviomètre manuel à lecture directe

Le second est un pluviomètre automatique à augets basculeurs (l'appareil comporte, en dessous de son entonnoir de collecte de l'eau, une pièce pivotante dont les deux compartiments peuvent recevoir l'eau tour à tour).

Les pluviographes à augets basculeurs sont les plus simples et les plus répandus des appareils enregistreurs. Ce sont des enregistreurs d'évènements qui sont bien adaptés pour la transmission des informations à distance. Deux augets basculent tour à tour lorsque tombe une quantité déterminée de pluie (0,2 mm). Lors du basculement, une impulsion est créée et transmise.

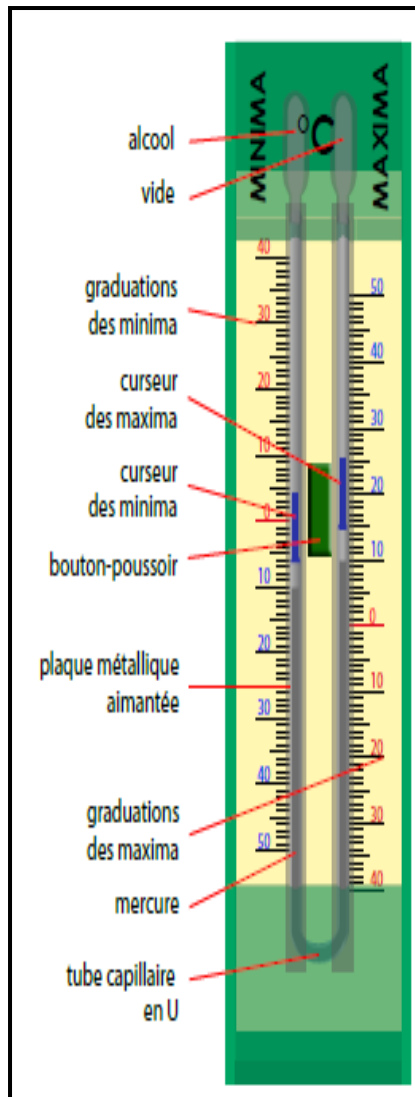
2.5.2. La température

C'est un paramètre fondamental en météo. Sa mesure à l'aide d'un **thermomètre** (ou une sonde de température), nécessite une grande précision.

La norme internationale impose que les thermomètres soient placés dans un abri blanc pour éviter l'échauffement au soleil, muni de persiennes qui laissent largement circuler l'air. Cet abri doit être placé à une hauteur de 1,50 m au dessus d'un sol dégagé des bâtiments, de la végétation et de tout obstacle (généralement près d'un aéroport).

Les températures minimales et maximales (mesurées par des **thermomètres à minima et à maxima**) sont relevées sous abri. Les températures sont généralement données en degrés Celsius, parfois en degrés Fahrenheit.

On trouve encore dans certains abris un thermographe (un thermographe est menu d'un cylindre et d'un stylet qui enregistrent mécaniquement les variations hebdomadaires de température) ainsi qu'un thermomètre mini et un thermomètre maxi pour continuer à obtenir, en cas de panne électrique ou de foudroiement, des relevés de température.



Le thermomètre à minimum et maximum : est un thermomètre permettant de mesurer les températures maximales et minimales atteintes pendant un intervalle de temps donné. Il a été inventé par James Six en 1782. C'est un instrument couramment utilisé pour les usages domestiques, mais également en météorologie et en horticulture.

Description

Il s'agit d'un seul et même thermomètre, dont le tube capillaire est plié en forme de "U", et porte deux graduations (ce qui fait qu'on a l'impression qu'il y a deux thermomètres). L'ampoule contient de l'alcool, et le tube capillaire contient du mercure.

Fonctionnement

Quand il fait chaud, l'alcool se dilate et repousse les limites côté vide, et quand il fait froid, le tout se contracte et repousse les limites du côté de l'ampoule (alcool). On met dans le tube capillaire deux petits curseurs (2 aiguilles de fer recouvertes de plastique). Ils sont repoussés par le mercure (parce que la tension superficielle du mercure ne lui permet pas d'être facilement pénétré), mais l'alcool (ou le vide) ne les entraîne pas. Quand la limite du mercure se déplace sur eux, ils sont poussés, et quand la limite les

Figure 4 : Thermomètres à minima et à maxima

2.5.3. La pression atmosphérique

La pression atmosphérique est le poids de la colonne d'air s'exerçant sur une surface déterminée. Au niveau de la mer, ce poids correspond à environ 1kg par cm². La pression en météorologie est exprimée en hectopascal (autrefois millibar). La valeur moyenne de la pression au niveau de la mer

est de 1013 hPa. Cette pression décroît rapidement avec l'altitude : elle perd 1 hPa tous les 8 ou 10 m entre 0 et 3000 m d'altitude, cette décroissance est plus faible par la suite. Cela s'explique par le fait que les couches les plus lourdes de l'atmosphère se situent à proximité du sol.

2.5.4. L'humidité de l'air

C'est la quantité d'eau sous forme gazeuse « vapeur d'eau » contenue dans l'air. L'humidité s'exprime en pourcentage (%).

Lorsque le taux d'humidité atteint 100%, l'air est saturé, on est dans le brouillard. L'eau sous forme de gaz s'est en partie transformée en eau liquide, il y a eu condensation. Les taux d'humidité très faibles (inférieur à 10%) se rencontrent généralement dans les régions désertiques, ou alors en montagne dans les régions tempérées, lorsque l'atmosphère est limpide.

Il est important de noter que, pour parvenir au phénomène de condensation, il faut un apport de vapeur d'eau dans l'air beaucoup plus important en été qu'en hiver (l'air chaud peut contenir en effet beaucoup plus d'eau sous forme gazeuse que l'air froid).

L'humidité est relevée par une **sonde** (fig.5), elle aussi installée dans l'abri météo. Cette sonde est constituée d'un capteur électronique traversé par un courant qui varie en fonction de l'humidité de l'air. On mesure donc les variations de l'intensité de ce courant.

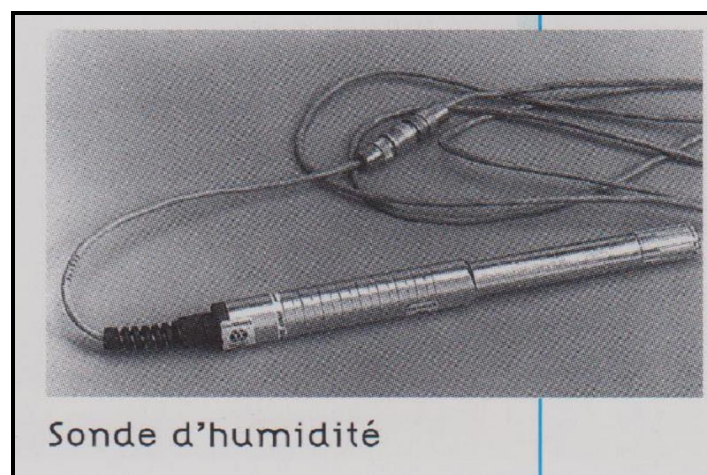


Figure 5 : Sonde d'humidité

Auparavant l'humidité de l'air était calculée à partir des indications fournies par un **psychromètre** (Fig.6). Ce dernier est un instrument constitué par deux thermomètres. Le premier appelé

thermomètre sec, mesure la température de l'air. Le second, appelé thermomètre mouillé, donne la température T'. Ce thermomètre mouillé a son réservoir entouré d'une mousseline imbibée d'eau. Cette eau s'évapore plus ou moins en fonction de l'humidité de l'air. Cette évaporation absorbe de la chaleur et refroidit ainsi le réservoir (c'est le même phénomène qui se produit lorsque l'on a une sensation de froid en sortant du bain). Plus l'air est sec, et plus l'évaporation est importante et plus la température T' est basse. La différence des deux températures permet de calculer l'humidité de l'air.

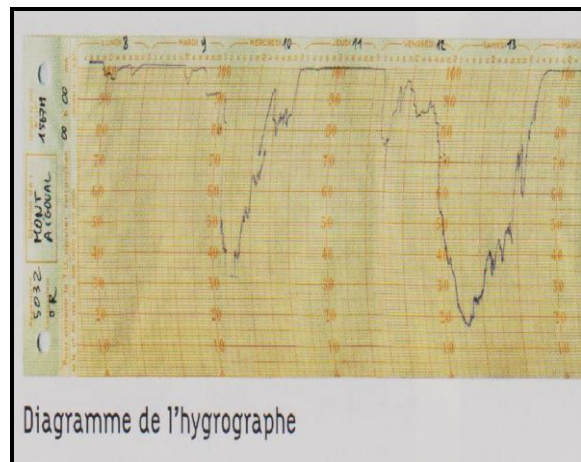
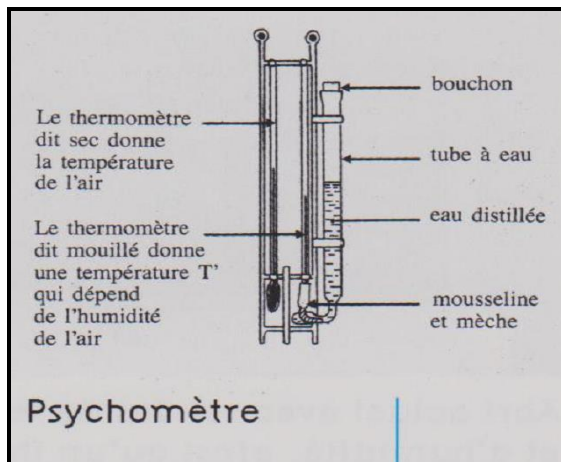


Figure 6 : Le psychromètre

Figure 7 : Le diagramme de l'hygrographe

À chaque température correspond une tension maximale de vapeur d'eau F. si f est la tension de vapeur à la température considérée, nous pouvons déterminer **l'humidité relative** (Hr). Cette dernière est donnée par le rapport en pourcentage (%) entre la tension (pression de la vapeur d'eau) de vapeur d'eau observée, f, et la tension maximale, F, à la même température.

$$Hr = f/F \%$$

2.5.5. L'insolation

C'est la durée d'ensoleillement au cours de la journée. Elle est mesurée avec un **héliographe à fibre optique** (Fig. 8). Cette fibre en rotation intercepte le rayonnement solaire et le dirige vers un détecteur. Ce dernier délivre tous les centièmes d'heure une impulsion. Si cette impulsion est supérieure à la référence, on considère qu'il y a insolation durant les 36 secondes précédentes.



Figure 8: héliographe à fibre optique

2.5.6. Le rayonnement solaire

C'est l'énergie que nous envoie le soleil. Une partie de cette énergie réchauffe la terre qui à son tour réchauffe l'atmosphère.

Ce rayonnement est mesuré avec un **pyranomètre** (Fig. 9). L'élément essentiel de cet appareil est une cellule photoélectrique qui produit d'autant plus de courant que le rayonnement solaire est important.



Figure 9 : Pyranomètre

2.5.7. Le vent

C'est le mouvement horizontal de l'air. Il est conforme à la répartition des pressions à la surface de la terre. Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour des zones de hautes pressions, et dans le sens contraire autour des zones de basses pressions. Cette règle s'inverse dans l'hémisphère Sud.

Le vent est mesuré par des capteurs situés sur un pylône (structure élevée, métallique ou en béton armé, servant de support à des câbles, des antennes, etc.) à 10 m de hauteur au-dessus du sol, dans une zone dégagée de tout obstacle proche (bâtiment, arbre...). Cela afin d'éviter les tourbillons ou les ralentissements du vent créés par tout relief.

Pour décrire le vent, on utilise deux instruments : **la girouette et l'anémomètre**.

La girouette indique **la direction** d'où vient le vent.

Les indications de direction du vent fournies par la girouette sont primordiales. En effet, certaines directions du vent sont propices à la présence de soleil (par exemple, le vent du nord sur le pourtour méditerranéen), d'autres sont au contraire annonciatrices de mauvais temps (le vent du sud sur le pourtour méditerranéen). Les variations de la direction du vent nous fournissent donc des indications sur le temps à venir.

L'anémomètre mesure la vitesse du vent (Fig.10). Cette dernière est exprimée en mètre par seconde (m/s), en kilomètre par heure (Km/h).



Figure 10 : Anémomètre



Figure 11 : Anémomètre en marche



Figure 12 : Anémomètre et girouette installés au sommet d'un mât

En fonction de sa vitesse et de ses effets, on classe le vent d'après l'échelle de *Beaufort*, créée en 1805 par l'amiral du même nom.

Tableau 1 : Echelle de *Beaufort*

L'ÉCHELLE DE BEAUFORT				
Degré	Vitesse (m/s)	Effets au sol	Effets sur l'eau	Hauteur des vagues (m)
0. Calme	<1	Pas de vent la fumée monte verticalement	Comme un miroir	0
1. Très légère brise	De 0,6 à 1,7	La fumée fléchit	Calme plat	0-0,2
2. Brise légère	De 1,8 à 3,3	Les feuilles bougent	Vaguelettes	0,2-0,6
3. Petite brise	De 3,4 à 5,2	Les feuilles s'agitent	Petites vagues courtes	0,6-1
4. Jolie brise	De 5,3 à 7,4	Les petites branches bougent	Vagues avec crête	1-2
5. Bonne brise	De 7,5 à 9,8	Les grosses branches bougent	Vagues moyennes, moutons, embruns éclaboussures	2-3
6. Vent frais	De 9,9 à 12,4	Les grosses branches s'agitent et on le sent dans les maisons	Grosses vagues avec écume	3-4
7. Vent fort ou grand frais	De 12,5 à 15,2	Il agite les branches et gêne la marche	Très grosses vagues avec écume	4-5,5
8. Bourrasque ou coup de vent	De 15,3 à 18,2	Il casse les branches et agite de gros arbres	Vagues hautes, embruns et visibilité réduite	5,5-7
9. Forte bourrasque ou fort coup de vent	De 18,3 à 21,5	Il arrache les tuiles des toits	Lames avec écume épaisse, visibilité critique	7-9
10. Tempête	De 21,6 à 25,1	Il arrache et abat les arbres	Grosses lames, mer blanchâtre, visibilité très réduite	9-11,5
11. Violente tempête	De 25,2 à 29	Il provoque des dégâts énormes	Très grosses lames, la mer est couverte d'écume, visibilité proche du zéro	11,5-14
12. Ouragan	Plus de 29	Destruction générale de tout ce qu'il rencontre	Mer totalement blanche, visibilité nulle, lames exceptionnellement hautes	Plus de 14

2.6. Les mesures en altitude

2.6.1. Les radiosondages

Elles sont effectuées par des **ballons–sondes**¹ permettant d'élaborer des radiosondages.

Le radiosondage est un procédé de télémétrie (mesure à distance) permettant de connaître la valeur de la pression, de l'humidité, de la température ainsi que de la vitesse et de la direction du vent en altitude.

C'est lors de l'ascension que sont effectuées les mesures. En effet, la sonde transmet toutes les deux secondes les valeurs de pression, d'humidité et de température de la masse d'air qu'elle traverse. Simultanément, les données de vitesse et de direction de vent sont calculées d'après la trajectoire du ballon.

2.6.2. Les moyens d'observation à distance

a. Les satellites météorologiques

Le premier satellite météorologique est lancé le 04/10/1957 par les soviétiques. Il s'agit de *Spoutnik*. Son altitude varie entre 300 et 900 km, il transmet des mesures de pression et de température.

Depuis, ces instruments de plus en plus précis et perfectionnés, ont pris une importance considérable en météorologie. Ils nous permettent de visualiser la couverture nuageuse, de connaître la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère ainsi que la température du sommet des nuages.

Pour obtenir la meilleure vision de l'atmosphère terrestre, les données de deux types de satellites sont utilisées :

☞ **les satellites à défilement** gravitent sur une orbite polaire quasi circulaire à une altitude de l'ordre de 850 km (satellite NOAA États–unis et METEOR, Russie). Ils effectuent une rotation en 100 minutes, ce qui entraîne un passage au–dessus d'un même point terrestre environ toutes les 12 heures.

☞ **les satellites géostationnaires** situés sur une orbite équatoriale à environ 36 000 km d'altitude. Huit satellites de ce type sont répartis au–dessus de l'équateur, permettant une vision en continu des zones tempérées et tropicales :

METEOSAT 7, satellite européen, 0° de longitude (au–dessus du golfe de Guinée).

METEOSAT 5, satellite européen, 63° de longitude est.

GOMS, satellite russe, 76° de longitude est.

INSAT, satellite indien, 93° de longitude.

FY2, satellite chinois, 105° de longitude est.

GMS, satellite japonais, 140° de longitude est.

¹ Le ballon sonde est un système formé d'un ballon gonflé à l'hélium (gaz plus léger que l'air) et d'une radiosonde.

GOES W, satellite américain, 135° de longitude ouest.

GOES E, satellite américain, 75° de longitude ouest.

-Météosat

Météosat est une famille de satellites météorologiques lancés par l'Agence spatiale européenne (ESA). Ce sont des satellites géostationnaires, c'est-à-dire qu'ils conservent toujours la même position par rapport à la terre et permettent donc l'observation en continu d'une zone précise du globe.

Les satellites météoat envoient régulièrement sur terre de nombreuses images et autres données qui permettent aux météorologues d'élaborer les bulletins météorologiques. Ces données sont également essentielles pour anticiper certains phénomènes météorologiques et pour le suivi de l'évolution du climat de la planète.

b. Images satellites les plus utilisées

☞ **Image vapeur d'eau** : donne la teneur en vapeur d'eau dans la partie supérieure de la troposphère.

☞ **Image infrarouge** : indique la température du sommet des nuages ou alors de la surface du sol (ou de la mer) lorsque le ciel est clair. Cette image permet de savoir jusqu'à quelle altitude monte les masses nuageuses.

☞ **image visible** : décrit la luminance des nuages. Les parties les plus blanches de l'image indiquent les zones nuageuses les plus épaisses ou les plus denses : ce sont elles qui réfléchissent le mieux les rayons du soleil. Problème de cette image : elle n'existe pas la nuit.

c. Le radar de précipitations

Il sert à localiser l'ensemble des zones de précipitations (bruine, neige, grêle, pluie) et à déterminer leur intensité.

C'est un outil de très grande utilité pour visualiser le déplacement des orages violents ou des passages pluvieux intenses.

2.7. Utilisation des données

Les caractéristiques climatiques d'une région peuvent être exprimées par une formule mathématique, soit par un graphique.

2.7.1. Expressions numériques : Températures et précipitations sont deux facteurs capitaux pour définir les climats tempérés. : Indice d'aridité, indice de sécheresse,

2.7.2. Expressions numériques : **3.2. Expressions graphiques** histogramme, courbes, ...

3.1. La circulation atmosphérique : Les vents planétaires liés à la circulation générale de l'atmosphère impliquent des masses d'air énormes qui se déplacent parfois à des milliers de kilomètres. Cette circulation est définie comme le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la [terre](#) qui redistribue la chaleur provenant du [soleil](#) en conjonction avec la [circulation océanique](#). En effet, comme la terre est un sphéroïde, la radiation solaire incidente au sol varie entre un maximum aux régions faisant face directement au soleil, situé selon les saisons plus ou moins loin de l'équateur, et un minimum à celles très inclinées par rapport à ce dernier proche des pôles. La radiation réémise par le sol est liée à la quantité d'énergie reçue. Il s'ensuit un réchauffement différentiel entre les deux régions. Ce déséquilibre thermique a pour conséquence la création d'un type particulier de cellules de convection près de l'équateur. Plus loin de celui-ci, la rotation de la terre influence le trajet de l'air selon des pressions et les toutes formes la circulation atmosphérique.

3.2. Les zones de circulation des vents

On distingue trois zones de circulation des vents entre l'équateur aux pôles

a). La première est celle de Hadley : est un type de cellule dite thermale directe.

Ces cellules transportent un excès de chaleur vers les régions ayant un déficit dans le but de minimiser les écarts horizontaux de température.

La particularité des cellules directes est que l'air chaud doit également monter en plus de se déplacer vers les régions plus froides. De façon similaire, la branche d'air froid doit être descendante. Ce transport s'accomplit selon un plan vertical.

La cellule de Hadley qui se situe entre l'équateur et 30 degrés N et S où l'on retrouve des vents réguliers soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud : **les alizés**.

b). La deuxième se situe aux latitudes moyennes et est caractérisée par des systèmes dépressionnaires transitoire sous une circulation d'altitude généralement d'ouest c'est la Cellule de Ferrel. La cellule intermédiaire entre la cellule de Hadley et la cellule polaire.

Elle n'est pas engendrée directement par un réchauffement différentiel, la preuve étant que l'air chaud des sous tropique descendent en se déplaçant vers le nord et l'air froid des latitudes moyennes monte en se déplaçant vers le sud. Ce transport s'accomplit dans le plan horizontal.

Dans les latitudes moyennes, on retrouve de l'air froid venant des Pôles par la cellule polaire et de l'air chaud venant de l'équateur par la cellule de Hadley avec une circulation généralement d'Ouest.

c). **La troisième, les Cellules polaires** : se retrouvent respectivement au nord et au sud des 60-ièmes parallèles nord et sud avec une circulation de surface généralement d'est. qui transporte le froid intense des pôles vers le sud grâce à des vents du **nord-est** en surface. La cellule polaire est système identique à la cellule de Hadley.

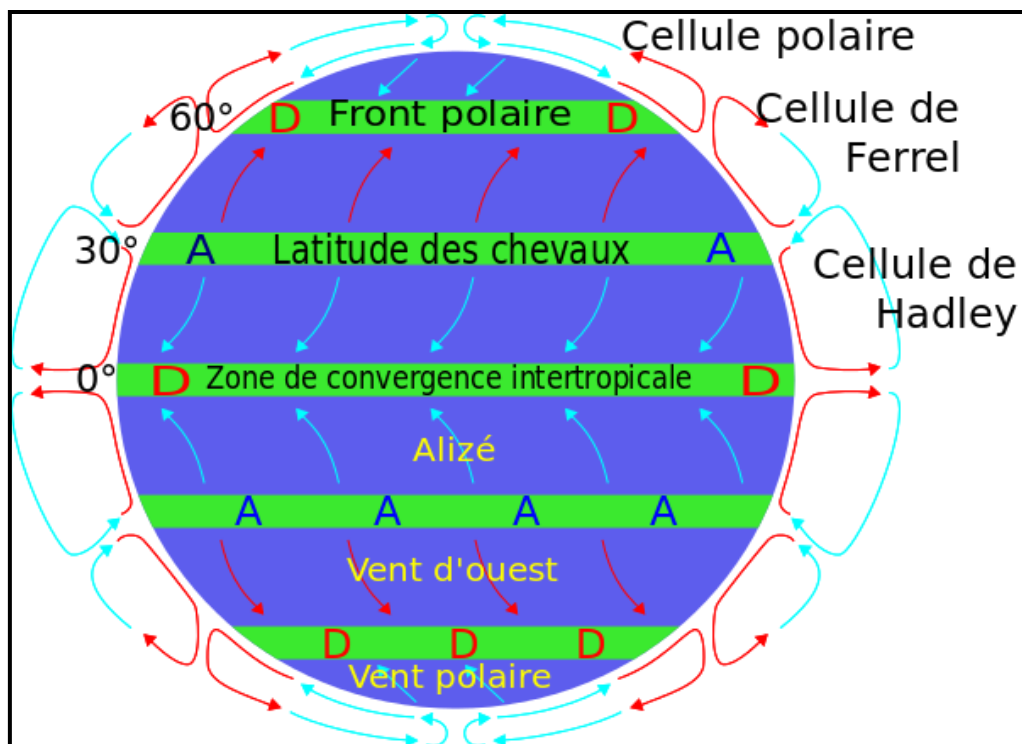


Figure 13 : Système de la circulation atmosphérique

3.3. Classifications des vents

On distingue trois familles d'identification

- Les vents planétaires avec mouvement à grande échelle
- Les perturbations cycloniques avec mouvement à moyenne échelle
- Les vents locaux avec mouvement à petite échelle

3.3.1. Les mouvements à grande échelle

L'ensemble des trois cellules convectives provoque une série de mouvements circulaires de l'air qui enveloppent toute la planète et produisent les vents planétaires. Par la suite, on a réparti les vents dits planétaires en deux grandes familles : les vents à basse altitude et les vents à haute altitude.

a. Les vents planétaires à basse altitude

Dans cette famille, on distingue trois grands groupes de vents constants :

- les alizés (ou vents d'est tropicaux)
- les vents d'ouest
- les vents d'est polaires

a.1. Les alizés : sont des [vents](#) régulier des régions intertropicales (entre 23°27 nord et 23°27 sud), Ils soufflent des zones subtropicales où se situent des pressions élevées, vers basse pression équatoriales. Ce sont des vents constants, car ils soufflent toute l'année avec la même intensité à une vitesse moyenne de 20 km/h. La région équatoriale où se rencontrent les alizés du Nord et du Sud est dite zone intertropicale de convergence. On distingue : **les alizés continentaux et les alizés océaniques**

a. 2. Les vents d'ouest

Ces vents font partie de la cellule tempérée et soufflent de hautes pressions tropicales vers les basses pressions péripolaires. Leur mouvement est opposé à celui des alizés dans l'hémisphère nord, ils soufflent ainsi du sud-ouest au nord-est et dans l'autre hémisphère, du nord-ouest au sud-est.

a.3. Les vents polaires

Ils appartiennent à la cellule polaire. Il souffle dans la même direction que les alizés et donc à l'opposé des vents d'ouest. La zone entre ces deux derniers types de fonds est dite 'front polaire'.

b. Les vents planétaires à haute altitude

A ces altitudes, on ne parle plus de vents, mais de courants. En effet, l'absence de frottements au sol fait en sorte que la vitesse de ces courants est puissante et régulière. Trois types de courants appartiennent à ce groupe :

- les courants occidentaux
- les courants orientaux
- les courants-jet

b.1. Les courants occidentaux : Ils se déplacent d'ouest en est et se situent à 5000 m d'altitude. Leur vitesse s'intensifie au fur et à mesure que l'altitude augmente. Elle est à son maximum dans la zone tempérée, mais elle diminue vers la zone équatoriale.

b. 2. Les courants orientaux : Ils soufflent d'est en ouest, dans une large zone comprise entre le tropique du cancer et celui du capricorne.

b.3. Les courants-jet : Les courants-jet sont les plus rapides et proviennent des courants occidentaux des zones tempérées. Situé à une altitude entre 6000 m et 12 000 m, ces mouvements d'air très rapides parcourent des milliers de kilomètres avec des pointes de vitesse pouvant atteindre les 500 km à l'heure.

Il y a deux principaux courants-jet sur le globe: le subtropical, entre 25 et 30°, provoqué par hautes pressions subtropicales et, le polaire, entre 45 et 60°.

Les courants-jet ne sont pas réguliers et ne suivent pas la même direction au cours de l'année. En été, ils ont tendance à se déplacer vers le pôle, et en hiver ils prennent la direction de l'Équateur.

3.3.2. Les mouvements à moyenne échelle

On nomme aussi ses mouvements "perturbations cycloniques". Ils sont occasionnés par les différences de réchauffement entre la terre et la mer. Ils mesurent aux alentours de 500 à 1200 km et leurs vents principaux sont les **moussons et les cyclones**.

a. Les moussons : Ce sont des vents saisonniers caractéristiques des régions asiatiques. Pendant l'été, il souffle de la mer vers les côtes, et le contraire en hiver. Dans tous les cas, ils apportent de fortes précipitations et ils sont souvent la cause de catastrophes naturelles dans les zones situées au sud de l'Asie

b. Les cyclones : Il s'agit de fortes perturbations atmosphériques créées par les fronts et la pression atmosphérique. On distingue deux catégories, les cyclones extra-tropicaux et les cyclones tropicaux.

3.3.3. Les mouvements à petite échelle

Ces mouvements, appelés aussi "vents locaux", couvrent des distances d'un minimum de 10 à un maximum de 500 km. Ils sont dus principalement à la topographie du territoire et des vents à grande ou moyenne échelle. Il s'agit donc de vents variables, dépendant des conditions barriques d'une zone déterminée. Les vents principaux de cette catégorie qui concernent la France sont les brises, la tramontane, le foehn, le mistral, le suroît, le vent d'autan et plus rarement le sirocco.

a. Les brises : Il s'agit de vents issus du contraste thermique entre des régions différentes de la surface terrestre. Pour mieux comprendre ce qu'est une brise, on peut citer celle qui se produit généralement sur les côtes : la terre se réchauffe plus que l'eau durant le jour, puis elle chauffe l'air qui se déplace vers le haut. Cela provoque alors une chute de pression qui rappelle l'air de la mer, c'est la brise marine.

La nuit, le phénomène s'inverse, la terre se refroidit plus vite que la mer et l'air présents au-dessus de l'eau devient plus chaud que celui qui se situe sur la terre. L'air chaud monte et la baisse de pression fait revenir l'air frais de la terre, c'est la brise de terre.

b. Le foehn : C'est un vent typique des Alpes, en particulier de la Suisse et du Tyrol. Mais le phénomène se manifeste également dans les Pyrénées par vent de sud. Fort, chaud et humide quand le vent monte vers les cimes, il provoque de fortes précipitations en attitude et libère tout son contenu en vapeur d'eau. Il survole ensuite les cimes des montagnes et se précipite vers la vallée où il devient un vent chaud et sec.

Au printemps, le foehn souffle du versant sud des Alpes vers leur versant nord, quand la situation barrique s'invertit, le vent change de direction et se manifeste des vallées alpines vers la plaine du Pô.

c. Le suroît : Il arrive du sud-ouest et influence le sud de la France en toutes saisons.

d. La tramontane : Vent violent de secteur nord à nord-ouest, il se dirige des monts vers la mer et

atteint particulièrement le Roussillon, après son passage au-dessus des régions accidentées.

e. Le mistral : C'est un vent du nord sec et violent, s'infiltrant dans la vallée du Rhône qui le pousse à accélérer sa vitesse, il se manifeste souvent après une précipitation. Il est particulièrement violent quand une dépression se forme dans le golfe de Gênes et qu'un anticyclone s'installe sur l'Espagne.

f. Le vent d'autan : Le vent d'autan est originaire du sud-est et souffle dans la vallée de la Garonne. L'autan noir est chaud et humide, il souffle quand une dépression prend racine dans le golfe de Gascogne. En revanche l'autan blanc, un vent beaucoup plus violent, n'apparaît qu'en présence d'un anticyclone sur l'Europe du Nord. Contrairement à l'autan noir, il est synonyme de beau temps.

g. Le sirocco : Il vient du sud-est, du Sahara et de l'Afrique du Nord, c'est donc un vent extrêmement chaud et sec quand il souffle sur l'Afrique, mais il peut également apporter de fortes précipitations, s'il se charge d'humidité en traversant la mer Méditerranée.

h. Les tornades : ce sont des cyclones terrestres de faible grandeur, mais d'une grande puissance destructrice, particulièrement fréquents aux Etats-Unis et en Australie.

4.1. L'atmosphère terrestre: est la fine couche gazeuse qui entoure notre planète, bien que très mince en comparaison au rayon terrestre. Son rôle est de filtrer du rayonnement solaire essentiel à la présence de la vie sur terre. Elle est composée à 78.09% d'azote, 20.95% d'oxygène et d'une variété de gaz en traces.

Suite à différents mécanismes d'échauffement et de refroidissement la température de l'atmosphère évolue en fonction de l'altitude. La figure ci dessous montre un profil type de température. Les minima et maxima définissent les limites entre les différentes régions de l'atmosphère.

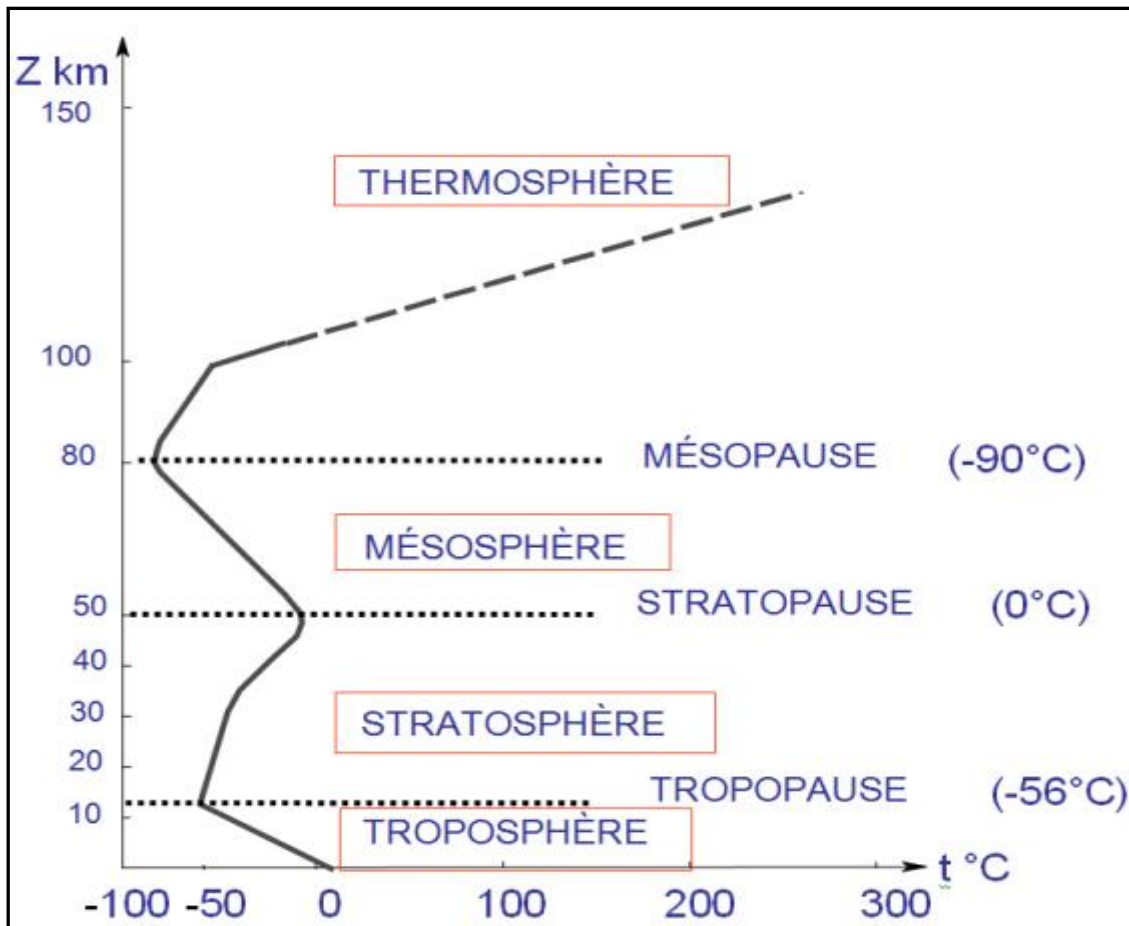


Figure 14: Structure verticale de l'atmosphère et variation de la température de l'air en fonction de l'altitude.

4.2. Les différentes couches de l'atmosphère

Les principales régions de l'atmosphère distinguent à l'aide des critères des variations thermiques en fonction de l'altitude.

4.2.1. La troposphère : c'est la première couche de l'atmosphère, s'étend depuis de niveau de la mer jusqu'à 12 Km d'altitude, elle contient environ 90% de la masse totale de l'atmosphère. La température y diminue avec l'altitude à un taux de $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$. C'est dans la troposphère que se produit la majorité des phénomènes météorologique.

4.2.2. La stratosphère : dans laquelle les températures augmentent en fonction de l'altitude à cause de l'absorption des UV par la couche d'ozone.

A la limite supérieure de la stratosphère, vers 50 km d'altitude, existe une autre zone de discontinuité thermique la stratopause, au delà de laquelle se rencontre une autre région la mésosphère.

4.2.3. La mésosphère : s'étend de 50 km à environ 80–85 km.

Les températures qui étaient de l'ordre de 0°C au niveau de la stratopause décroissent dans la mésosphère jusqu'à la mésopause, vers 80 Km d'altitude d'où elles descendent jusqu'à (-90 °C).

4.2.4. La thermosphère : au delà de la mésosphère, on entre dans la thermosphère dont les températures s'élèvent à nouveau jusqu'à plus de 1400°C vers 1000Km d'altitude.

Ce fait peut être mis en relation avec l'augmentation importante du flux de radiations ionisantes et de rayons UV par le soleil.

5.1. Bilan énergétique de la terre

C'est le facteur le plus important en matière de dynamique agro-climatique, Le rayonnement en provenance du Soleil pénètre dans l'atmosphère et va y subir des interactions avec les différentes sphères (hydrosphère, cryosphère, biosphère etc.). Une partie du rayonnement va être réfléchi sur et dans l'atmosphère et retourne dans l'espace sous rayonnement infrarouge. Une autre partie sera absorbée par les composants de l'atmosphère. Le reste qui atteint le sol sera aussi en partie absorbé et réfléchi.

La quantité d'énergie reçue par haute atmosphère sur une surface de 1 m² est de 342 ± 20 Watts. Cette valeur est nommée constante solaire. La Terre reçoit donc une certaine quantité d'énergie de la part du soleil. Cette énergie transportée par un rayonnement électromagnétique, est transformée en chaleur. Nous étalerons ci-dessous les phénomènes qui sont fondamentaux pour le fonctionnement du système climatique (Fig.1).

5.1.1. Absorption du rayonnement

Les rayonnements des différentes longueurs d'onde vont être soumis à une absorption sélective par les gaz constituant l'atmosphère, principalement l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'ozone et la vapeur d'eau. Au total, c'est 20 % de l'énergie incidente qui est

ainsi absorbée, dont environ 3 % par les nuages. Bien entendu, cette énergie n'est pas perdue : elle est transformée en chaleur et contribue à élever la température des différents gaz ayant absorbé ce rayonnement. En définitive, cette traversée de l'atmosphère aboutit, dans l'ensemble, à éliminer les rayonnements infrarouges et ultraviolets. Seule parvient au sol, presque intacte, la partie du rayonnement solaire dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,3 μm et 0,75 μm . C'est pratiquement la bande de rayonnement qui est pour nous visible, celle aussi dans laquelle la chlorophylle montre son maximum d'absorption : la vie s'est adaptée à ces conditions physiques. La présence d'ozone permet l'élimination de la plupart des rayons ultraviolets. Ces derniers, surtout de courte longueur d'onde, agissent sur les fragiles molécules des acides nucléiques. Une baisse de la concentration atmosphérique en ozone aurait donc des conséquences importantes, peut-être catastrophiques, sur le monde vivant.

5.1.2 Diffusion du rayonnement

Les gaz de l'atmosphère ne font pas qu'absorber les rayons solaires. Avec les poussières, ils les diffusent également, ce qui signifie qu'ils les renvoient, sans changement de longueur d'onde, dans toutes les directions. La plus grande partie est dirigée vers le sol (23 % du rayonnement incident). Une autre partie, retournée vers l'espace (environ 3 %), est perdue pour le système climatique.

5.1.3 Réflexion du rayonnement

D'autres obstacles se trouvent encore sur le chemin des rayons incidents : ils sont constitués par les nuages dont la surface supérieure, extrêmement réfléchissante, joue un rôle fondamental dans les climats puisqu'elle renvoie vers le ciel 19 % du rayonnement incident. On voit combien une variation de la nébulosité pourrait avoir d'influence sur le climat. En définitive, si l'on tient compte des chiffres ci-dessus, il ne parvient au sol que 58 % du rayonnement solaire incident. Encore doit-on tenir compte de la réflexion sur les surfaces

claires du globe (glaces polaires et zones désertiques), qui renvoient vers l'espace 9 % du rayonnement incident, ce qui n'en laisse effectivement que 49 % pour chauffer le sol.

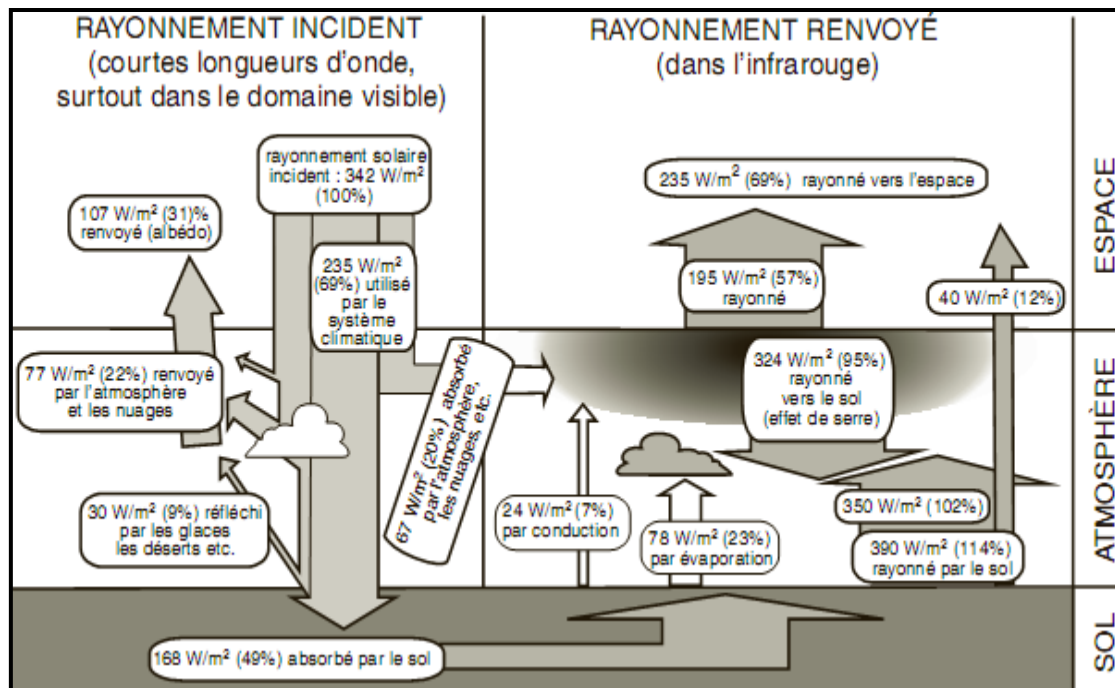


Figure 15 : Bilan énergétique terrestre

La partie gauche de la figure 15 : rayonnement incident reçu sur Terre. 31 % sont renvoyés directement vers l'espace (albédo), 49 % sont absorbés par le sol et le réchauffent, 20 % sont absorbés par l'atmosphère. La partie droite de la figure 1 (les pourcentages se réfèrent au rayonnement incident total) : le rayonnement restitué par la Terre et l'atmosphère vers l'espace, sous forme d'infrarouges, est égal à celui qu'elles ont reçu (69 %). Mais du fait de l'effet de serre, l'atmosphère reçoit l'équivalent de 164 % du rayonnement incident total (20 % par absorption, 7 % par conduction thermique, 23 % par évaporation puis condensation d'eau, 114 % par rayonnement infrarouge) et en renvoie au sol l'équivalent de 95 %.

5.2 Effet de serre

Les échanges d'énergie au sein de l'atmosphère sont grandement dépendants des propriétés d'absorption des gaz qui la composent, les scientifiques ont souligné l'importance de l'effet de serre par analogie à ce qui se passe dans ces constructions vitrées. Pour comprendre ce phénomène, prenons un exemple simple. Dans un premier cas, (Fig.16 A) le Soleil chauffe une certaine surface. Lorsque l'équilibre thermique est établi, cette surface est à la température

T_1 , et la puissance qu'elle émet est égale à celle qu'elle absorbe. Admettons, pour simplifier, que cette émission s'effectue uniquement par rayonnement infrarouge, la conduction thermique étant négligeable. Couvrant maintenant cette même surface par une serre en verre (Fig.16 B). L'équilibre

thermique sera rompu mais, au bout d'un certain temps, un autre s'établira et on aura encore autant de puissance sortante qu'entrante. Cependant, dans cette nouvelle situation, les parois de la serre renvoient vers l'intérieur une partie des infrarouges qui y sont émis. Admettons qu'elles ne laissent passer que les deux tiers du rayonnement infrarouge. Il faut alors obligatoirement conclure qu'elles reçoivent de l'intérieur 50 % de plus de rayonnement qu'elles n'en laissent sortir, soit 150 % du rayonnement incident. Cela est rendu possible par une élévation importante de la température à l'intérieur de la serre. L'énergie est en quelque sorte piégée dans la serre et l'équilibre thermique ne peut se rétablir que par une augmentation de température à l'intérieur de la serre, augmentation d'autant plus forte que les parois laissent plus difficilement passer les infrarouges.

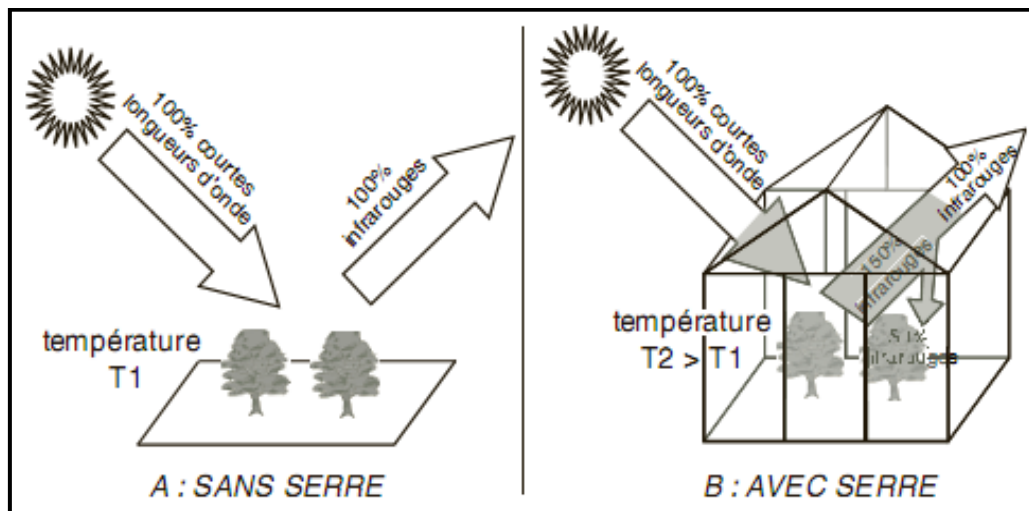


Figure 16 : Equilibre thermique avec et sans effet de serre

D'après ce que nous avons dit, il est obligatoire que ce phénomène se produise sur Terre puisque certains des gaz de l'atmosphère absorbent les infrarouges. En effet, la plus grande partie du rayonnement infrarouge émis par le sol lui est renvoyée par l'atmosphère. Le résultat est que la température de la troposphère, et celle de la surface terrestre, sont beaucoup plus élevées que celles qu'elles devraient avoir sans cet effet. Sans effet de serre, la température terrestre serait d'un peu moins de -19°C . La température au sol étant en fait de 15°C , c'est plus de 34°C que nous fait gagner cet effet de serre naturel. En définitive, l'atmosphère se comporte, au niveau du sol, comme une paroi de serre qui ne laisserait sortir que 60 % de l'énergie intérieure.

5.3. Utilisation des synthèses bioclimatiques à des problèmes d'écologie appliquée

Les climats de la planète ont varié au cours de l'histoire. Des alternances de climats arides et humides ont été observées dans la plupart des régions du globe. Ainsi, ce qui est aujourd'hui un désert a pu être une zone humide et fertile dans le passé et évoluera encore. De même, les forêts actuelles se sont développées à partir de couvertures végétales basses composées d'herbes et d'arbustes. Mais si l'homme continue de surexploiter le bois et d'influencer le climat par les rejets de gaz, qui sait ce qu'il restera de ces forêts dans quelques décennies ?

5.6. La notion d'échelle

La topographie est un paramètre important à prendre en compte en bioclimatologie car elle modifie sensiblement les caractéristiques climatiques locales. Ainsi, un peuplement forestier appartenant à une région climatique bien définie, c'est-à-dire à un mésoclimat bien caractéristique, peut supporter des conditions radicalement différentes des caractéristiques régionales selon son altitude, son exposition, etc. Etant donné le déterminisme qu'exerce la circulation générale de l'atmosphère, c'est-à-dire les mouvements de l'air à grande échelle, il convient de décrire d'abord les caractéristiques du climat régional correspondant puis d'examiner ensuite dans quelle mesure ces caractéristiques sont modifiées par des facteurs de "second" ordre liés à la topographie. Il convient donc de déterminer le topo-climat afin de mieux analyser les effets des conditions climatiques locales sur les différents compartiments des écosystèmes (forestiers et autres...). Le concept de topo-climat a été proposé pour la première fois par Thornthwaite (1953). Il recouvre l'étude des relations entre les formes du paysage et les caractéristiques du climat d'un lieu. A cette notion est associée une échelle spatiale réduite de l'ordre de 10 km en plaine et 1 km en montagne dans le cas d'un relief accidenté. On considère généralement trois types de topo-climats qui sont principalement liés aux irrégularités du relief et à l'altitude : les topo-climats de bord de mer, les topo-climats de plaine et les topo-climats de montagne.

- Les topo-climats de bord de mer ont la particularité principale d'être soumis à l'alternance de la brise de mer et de la brise de terre au cours de chaque période de 24 heures.
- Les topo-climats de plaine se différencient essentiellement en fonction du modelé du relief, qui n'est pas trop accidenté (vallées, collines), et de la proximité de surfaces homogènes étendues telles qu'une forêt ou un lac.
- Les topo-climats de montagne résultent essentiellement des actions combinées de l'altitude et du relief (exposition des versants et inclinaison des pentes).

- L'échelle micro climatique : échelle de l'ordre de 100m. Au sein d'un même topo climat s'emboîte une multitude de micro climats par exemple au niveau d'une parcelle agricole, nous avons la proximité d'une haie, d'une étendue d'eau.

6.1. Définition de l'aridité

L'aridité se caractérise par un déficit pluviométrique presque permanent lié à une forte insolation des températures diurnes élevées, une faible humidité de l'air et une évapotranspiration qui conduit à des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année.

6.2. Les différents indices d'aridité et la classification climatique physique

6.2.1. Indice d'aridité de De Martonne (1926)

L'indice d'aridité annuel de De Martonne (1926) est défini comme suite : $IDM = P/(T+10)$.

Où **T** : température moyenne annuelle en °C, **P** : précipitation moyenne annuelle en mm.

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température ; l'évaporation étant considérée comme une fonction linéaire de la température. Il a été ajouté 10 aux moyennes thermométriques pour éviter les valeurs négatives de l'indice.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Une faible aridité correspondant à des pluies abondantes et/ou des températures basses. De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel (Tableau 2)

$$I = \frac{P \text{ (mm)}}{T \text{ (}^{\circ}\text{C)} + 10}$$

Tableau 2 : Six grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel de De Martonne

Valeur de I_{DM}		Signification
< 5	aridité absolue	désert sans culture
5 à 10	désert (aride)	désert et steppe ; aucune culture sans irrigation
10 à 20	semi-aride	formations herbacées, steppes ou savanes. Irrigation nécessaire pour les cultures exigeant de l'humidité
20 à 30	semi-humide	prairie naturelle ; irrigation généralement non nécessaire
30 à 40	humide	les arbres jouent un rôle de plus en plus grand dans le paysage
> 40	humide	la forêt est partout la formation climatique. Les cultures de céréales tendent à être remplacées par les herbages

Niveau mensuel. Pour un mois donné caractérisé par une précipitation et une température moyennes p et t , l'indice d'aridité est donné dans la formule ci-dessous. La pluviométrie est multipliée par 12 de façon à obtenir une valeur de l'indice comparable à celle de l'indice annuel.

$$I = \frac{12p \text{ (mm)}}{t \text{ (}^\circ\text{C)} + 10}$$

6.2.2. Indice d'aridité d'Angström (1936-1937)

En 1936, Angström suggéra une modification de l'indice de De Martonne. Il montra que l'indice d'aridité était proportionnel à la durée des pluies, ce qui en retour était directement proportionnel à la somme des pluies et inversement proportionnel à une fonction exponentielle de la température. Il définit son coefficient comme :

$$I = \frac{P}{1.07^T}$$

Dans cette fonction, le dénominateur double pour chaque augmentation de 10°C . Il publia des cartes pour le nord-ouest de l'Europe montrant les coefficients pour les mois de janvier et juillet

6.2.3. Indices de Gaussen et Bagnouls (1952)

Indices et diagrammes ombrothermiques

$$BGI = \sum_{i=1}^{12} (2T_i - P_i) \cdot K_i$$

Où T_i : Température moyenne du mois i en $^\circ\text{C}$.

P_i : Précipitation moyenne du mois i en mm.

K_i : proportion du mois pendant laquelle $2T_i > P_i$.

Un mois donné est considéré comme **sec** quand $P < 2T$ c'est-à-dire quand l'évapotranspiration potentielle (ETP) est supérieure aux précipitations. Inversement, quand $P > 2T$, le mois est considéré comme **humide**.

$P < 2T$MOIS SEC

$P > 2T$MOIS HUMIDE

Pour repérer les mois "sec" et "humide" et mettre en évidence les périodes de sécheresse d'une localité, on trace généralement les **diagrammes ombrothermiques**. Ces diagrammes superposent les deux courbes de températures et de précipitations pour les 12 mois de l'année ce qui permet de définir une aire ombrothermique. Plus l'aire est importante et plus la saison est sèche.

Exemple : Pour la région d'Annaba, la durée de la période sèche est de 5 mois (Mai- Septembre) (fig. 17).

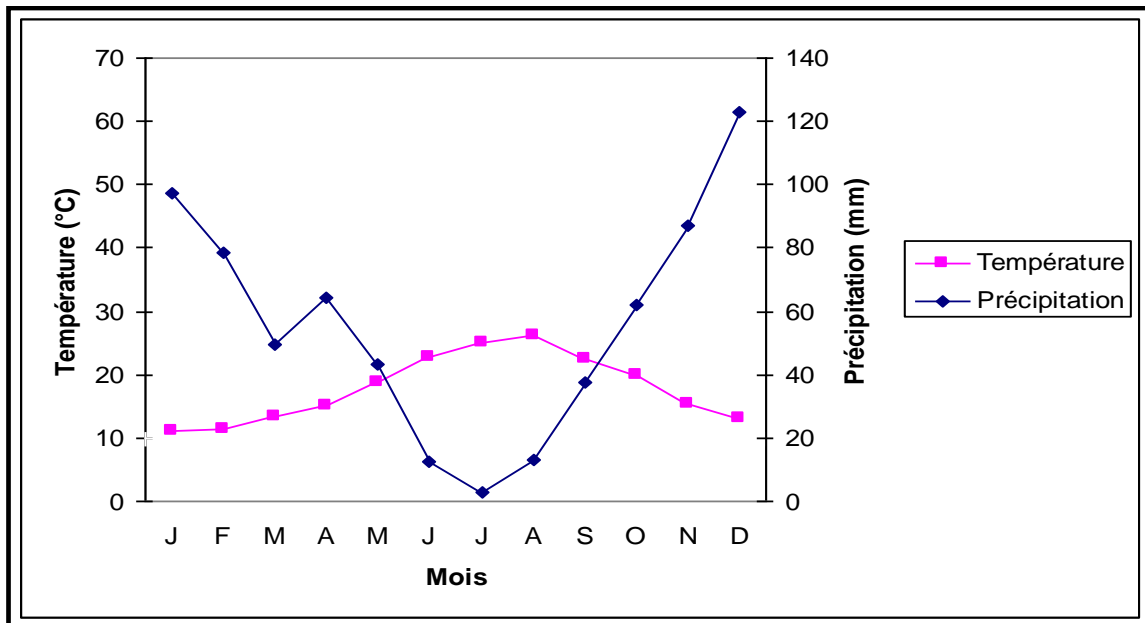


Figure 17 : Diagramme ombrothermique ($P < 2T$) de la région d'Annaba de la période (1990-2005) (Touati, 2008).

6.2.4. Indice de sécheresse de Birot

Comme pour les deux indices d'Emberger et de Giacobbe, Birot caractérise la sécheresse estivale en région méditerranéenne et considère le rapport :

$$I = \frac{PxJ}{T}$$

Avec J le nombre de jours de pluie Birot énonce les définitions suivantes : · tout mois dont l'indice est inférieur à 10 est considéré comme aride.

L'indice d'aridité estivale E est la somme de toutes les différences (10-Im) pour tous les mois où i est inférieur à 10.

La végétation méditerranéenne est possible quand une région a au moins un mois dont l'indice est inférieur à 10.

6.2.5. Indice de sécheresse estivale de Giacobbe

C'est une formule simple qui caractérise la sécheresse estivale en faisant le rapport des pluies estivales PE sur la moyenne des maxima du mois le plus chaud. En région méditerranéenne, on considère que l'été est sec quand le rapport est < 7.

6.3. Les facteurs de désertification

6.3.1. Variations du climat : Lorsque les températures sont élevées pendant plusieurs mois et que les précipitations atteignent des *minima*, elles provoquent des sécheresses qui empêchent la végétation de se développer.

6.3.2. Activités humaines en liaison avec l'augmentation rapide de la population : Ces 2 phénomènes jouent un rôle important sur la désertification et ils sont principalement liés à l'agriculture. En premier lieu, ces dernières décennies ont connu une augmentation considérable de la croissance démographique et les populations se sont progressivement sédentarisées. Elles ont donc modifié les modes d'usage des terres en zone sèche, sans tenir compte de la biodiversité.

6. 4. Les régions arides dans le monde en Afrique au Maghreb

Les zones sèches correspondant aux zones arides, semi-arides et subhumides sèches. Dans un contexte de développement durable, le terme exclut généralement les zones hyperarides (désert). La dégradation des terres dans les zones sèches du monde crée généralement des conditions similaires à celles du désert.

En termes d'environnement, les zones sèches sont caractérisées par :

1. Des précipitations faibles, peu fréquentes, irrégulières et imprévisibles,
2. De grandes variations entre les températures du jour et de nuit,
3. Des sols contenant peu de matières organiques et présentant un manque d'eau,
4. Une faune et une flore adaptées aux variations climatiques (résistants à la sécheresse, s'accommodant de l'eau salée et capables de supporter un manque d'eau).

7.1. Hydrologie de surface

7.1.1. Définitions

D'une façon très générale, l'hydrologie peut se définir comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. L'hydrologie au sens large regroupe :

- La climatologie, pour la partie aérienne du cycle de l'eau (précipitations, retour à l'atmosphère, etc) ;
- L'hydrologie de surface, pour les écoulements à la surface des continents ;
- L'hydrodynamique des milieux non saturés, pour les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (infiltration, retour à l'atmosphère à partir des nappes, etc) ;
- L'hydrodynamique souterraine, pour les écoulements en milieux saturés.

L'hydrologie de surface

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs d'écoulements à la surface des continents. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions (associer à une date une certaine grandeur) ou des prédéterminations (associer à une grandeur une certaine probabilité) de débits ou de volume en un point ou sur une surface.

7.1.2. Domaines d'applications

Les domaines d'application de l'hydrologie de surface sont également très variés. Parmi les plus importants et les plus classiques, on notera :

- L'agriculture : irrigation, drainage ;
- L'étude des ressources en eaux : eau potable, eau pour l'industrie ;
- La lutte contre la pollution : étude des débits d'étiage évacuant les effluents, les calories ;
- L'énergie hydraulique ;
- Le transport solide (dépôt ou érosion) ;
- La navigation ;
- Les loisirs (plans d'eau) ;
- La sécurité des biens et des personnes : protection contre les crues...

7.1.3. Les méthodes de travail en hydrologie de surface

L'hydrologie de surface est une science essentiellement appliquée. La recherche et le développement de cette branche ont toujours été liés à l'existence de problèmes concrets. Ceux-ci ont évolué au cours des temps : on s'est d'abord intéressé aux crues, on en vient seulement à prendre conscience de l'intérêt de l'étude des étiages. En effet,

aux besoins quantitatifs s'ajoutent à présent des problèmes de qualité. Parallèlement à l'évolution des besoins, les progrès des techniques ont transformé nos méthodes de travail.

On peut essayer de schématiser chronologiquement ces dernières de la façon suivante :

Dans une première phase, à chaque problème particulier qui se posait, la réponse de l'hydrologue s'appuyait sur des observations effectuées au point particulier intéressant. Il en déduisait les solutions recherchées : alimentation en eau, protection contre les crues, possibilité de navigation, etc.

Au cours des temps, les stations créées pour chaque problème particulier n'ont pas toutes été abandonnées, et l'on s'est trouvé en présence d'un réseau appelé réseau original, constitué de stations très hétéroclites : chacune d'entre elles répondait à des besoins divers et spécifiques. Elles étaient gérées en outre par différents services (en France par exemple : Ponts et Chaussées, Electricité de France, Ministère de l'Agriculture, Ministère de l'Industrie, etc.). L'ensemble des résultats acquis sur le réseau original constituait donc une banque de données. On en arrive alors à un deuxième stade où l'hydrologue n'est plus obligé d'établir de nouvelles stations pour résoudre un problème. Il peut obtenir des résultats en extrapolant ceux enregistrés sur des stations du réseau original, voisines ou comparables. Il peut également se contenter d'une station nouvelle (station tertiaire ou station de projet), mais observée sur une courte période. Les données de cette station seront étendues par corrélation avec celles, plus longues, du réseau original.

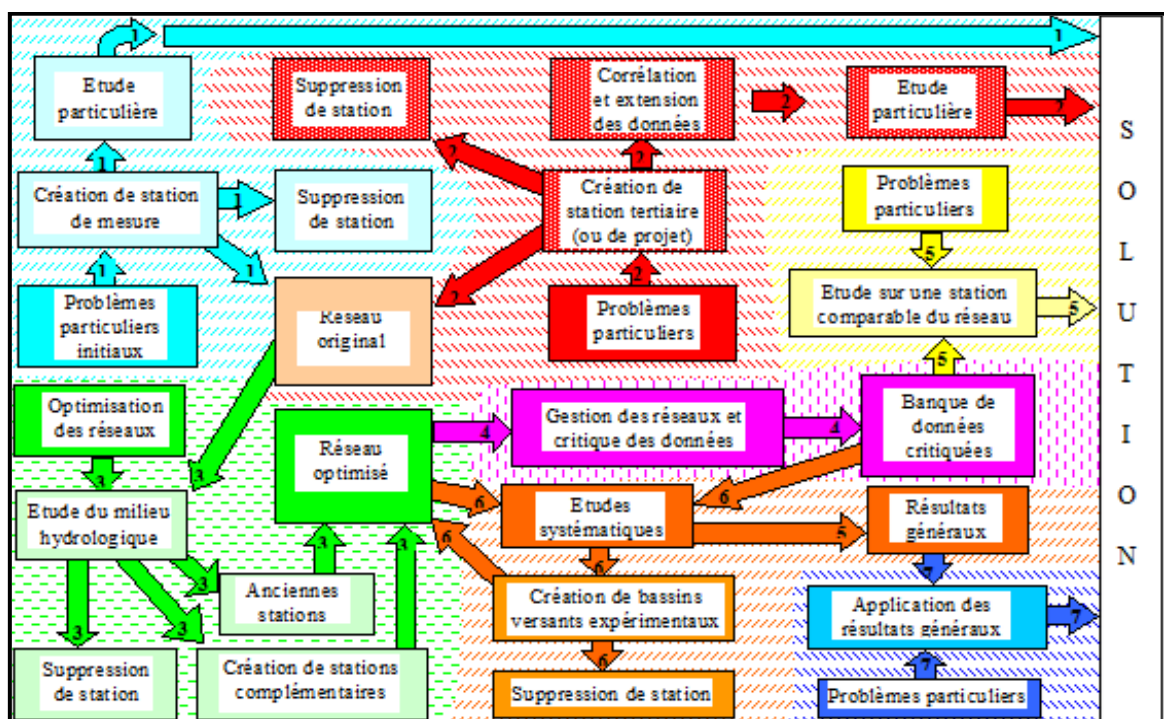


Figure 18 : Organisation schématique et évolution dans le temps d'un service hydrologique
7.1.4. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements accompagnés de changements d'état peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années.

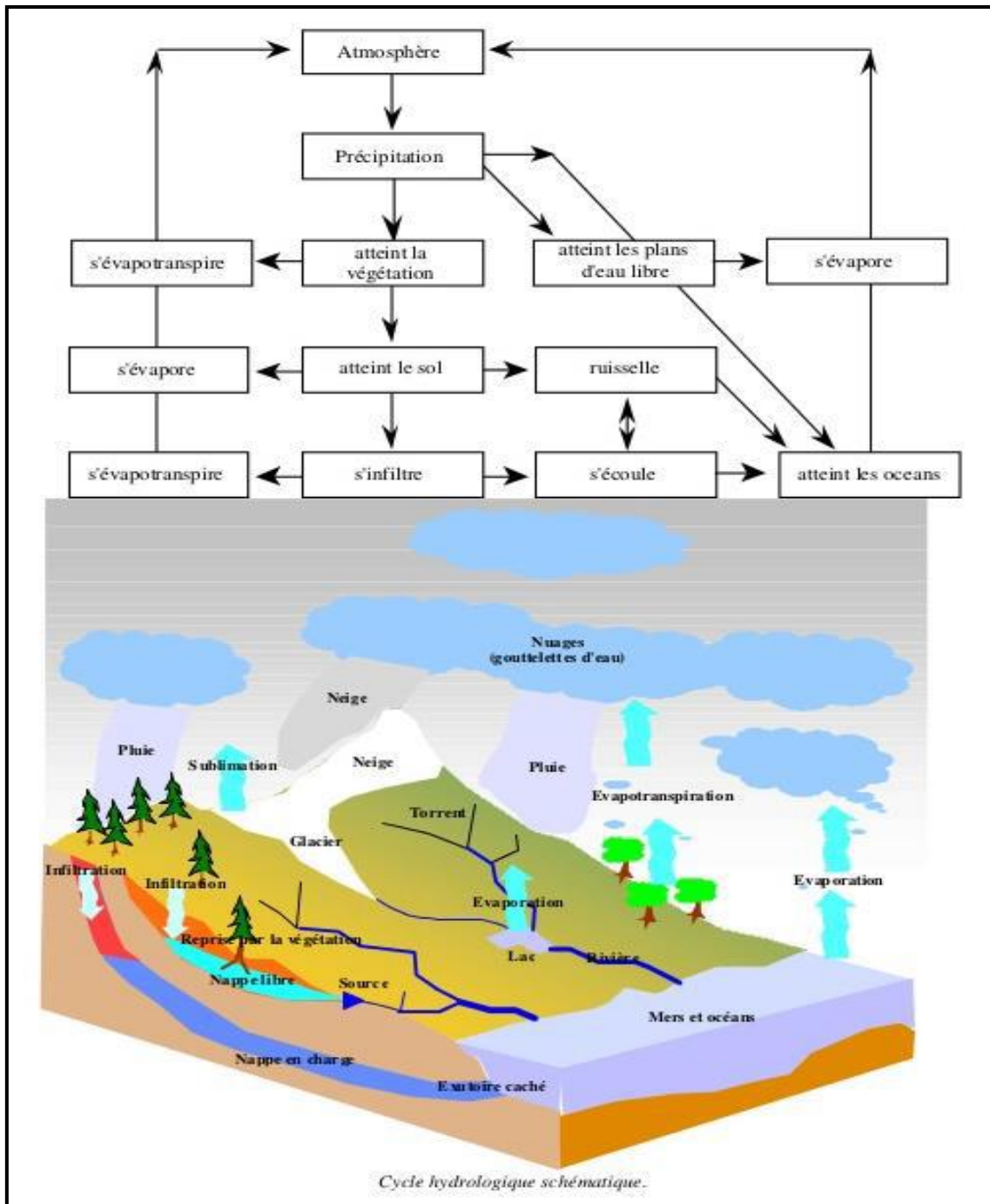


Figure 19 : Cycle de l'eau

7.1.5. Le bassin versant

On appelle bassin versant ou bassin de drainage, d'une rivière considérée en un point donné de son cours, l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point de la rivière. Si le sol est imperméable, il est bien évident que les limites du bassin sont définies topographiquement par la ligne de crête le séparant d'un bassin voisin (bassin topographique).

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval.

7.2. Hydrologie souterraine

7.2.1. Définition

Nommée aussi l'hydrologie souterraine. L'hydrogéologie est la science des eaux qui se trouvent à l'intérieur du sol, avec en particulier un accent mis sur sa chimie, son mode de migration et ses relations avec l'environnement géologique.

L'hydrogéologie, science de l'eau souterraine, a pour but d'en déterminer la situation, autrement dit les gîtes du minerai d'hydrogène, la quantité disponible, les qualités, en indiquant en même temps les moyens appropriés pour faire servir ces eaux aux besoins de l'humanité. On pourrait aussi adopter le nom d'Hydrologie souterraine.

7.2.2. L'hydrogéologie par rapport à d'autres branches

L'hydrogéologie comme la plupart des sciences de la terre est une branche interdisciplinaire. Bien que les principes de base de l'hydrogéologie soient intuitifs (par exemple, l'eau coule vers le bas), l'étude de leurs interactions peut être très complexe. De façon générale, le fait de prendre en compte les interactions de différentes facettes d'un système à plusieurs composantes demande un système à plusieurs composantes demande une connaissance de plusieurs branches tant au niveau expérimental que théorique.

L'hydrogéologie est une branche des sciences de la terre qui s'occupe du flux de l'eau souterraine à travers les aquifères et autres milieux poreux peu profonds (généralement moins

1 000 mètres sous la surface). Le flux de l'eau très peu profonde (plus haute que 3 mètres sous la surface) est une branche pertinente pour la pédologie, l'agriculture et le génie civil, autant que pour l'hydrologie. Le flux de fluides que l'on trouve dans des formations plus profondes (tels que l'eau mais aussi les hydrates de carbone et les fluides géothermiques) est aussi important pour la géologie, la géophysique et la géologie du pétrole. L'eau souterraine est un fluide visqueux (avec un nombre de Reynolds plus petit que 1) qui coule lentement (à l'exception près d'environnements géologiques particuliers comme les conduits karstiques parcourus par les rivières souterraines, les alluvions très grossières et les roches fracturées).

Beaucoup de lois déduites empiriquement de l'eau souterraine peuvent également être déduites de la mécanique des fluides par le cas particulier de flux de Stokes où l'on considère des termes de viscosité et de pression, mais pas d'inertie.

7.2.3. Aquifère définitions et Propriétés

Un aquifère est au sens strict une formation géologique perméable qui contient et transporte de l'eau, par opposition à un aquitard ou un aquiclude qui sont tous deux peu perméables (mais la distinction entre les deux termes prête à confusion). On parle généralement d'aquitard pour désigner une formation géologique peu perméable (relativement à la formation considérée comme perméable).

Les aquifères pourraient être utilisés dans des projets de séquestration géologique du dioxyde de carbone

-Types d'aquifère

On distingue aquifères poreux et aquifères lamellés

Dans les aquifères poreux : l'eau souterraine est soit contenue entre les grains (ex.: sable, gravier) ou soit contenue dans les pores ouverts de la roche (ex.: craie, grès, scories volcaniques).

La perméabilité est matricielle.

Dans les aquifères fissurés : l'eau est contenue et circule dans les failles, fissures ou diaclases de la roche (calcaires, granites, coulées volcaniques, etc.).

La perméabilité est fissurale.

-Porosité

La porosité (n) est une propriété directement mesurable d'un aquifère. C'est une fraction entre 0 et 1 qui indique la quantité d'espace vide entre des particules de sol libres ou dans une roche fracturée. On peut la mesurer par extraction de l'eau (V_{eau}) d'un volume d'aquifère saturé (V_{total}). Il faut distinguer l'existence de ces vides, de leur interconnexion (qui, elle, permet à un fluide de circuler). On parle de porosité efficace pour désigner les vides connectés entre eux.

On distingue :

La porosité de matrice liée à l'agencement des vides entre les grains dans les roches sédimentaires (30 % pour les sables et grès, 1% pour les roches cristallines)

La porosité de fractures liée aux diaclases et fractures, typiquement dans les roches endogènes de type granite

La porosité de type karstique liée à la formation de grands vides dans les roches calcaires ou gypseuses (craie, calcaires, sel)

La porosité n'affecte pas directement la distribution des potentiels hydrauliques dans un aquifère mais elle a un effet très fort sur la migration de contaminants parce qu'elle affecte la vitesse du flux de l'eau souterraine par une relation proportionnelle inverse contenu en eau

Le contenu en eau (ou teneur en eau) est une propriété directement mesurable. Elle représente la fraction de la roche qui est pleine d'eau liquide. C'est une fraction entre 0 et 1 et elle doit être inférieure ou égale à la porosité totale.

7.2.4. Nappe phréatique

La nappe phréatique (le puits) est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable.

C'est la nappe la plus exposée à la pollution en provenance de la surface.

7.2.5. Cartographie hydrogéologique

Elle permet de rendre visible la localisation des aquifères du territoire ce qui est notamment nécessaire pour la protection des champs captants et des périmètres de captages exploités ou susceptibles de l'être pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie. Elle est destinée aux élus, techniciens, et aux enseignants, chercheurs, universitaires, etc.

7.3. Problème spécifiques aux forêts

7.3.1. Causes et facteurs

En premier lieu, il convient de bien distinguer entre les **causes sous-jacentes** de la déforestation et de la dégradation des forêts sur lesquelles il peut y avoir divergence d'évaluation et les **facteurs** proprement dits qui, eux, peuvent être contenus dans le domaine de l'observation objective. Ainsi, s'agissant de la déforestation dans les pays tropicaux en développement, l'expansion par défrichage des différentes formes de l'agriculture vivrière, celles de l'agriculture de rente ou du "ranching" sont des facteurs évidents. Alors que les causes sous-jacentes sont celles qui déclenchent ces facteurs : on dira dans le cas du premier facteur que c'est la pauvreté des agriculteurs qui les oblige à défricher plus de terres faute de pouvoir acheter les intrants qui leur permettraient de

produire plus sur moins de terres, pauvreté elle-même engendrée par la difficulté d'écouler leur production, du fait d'un soutien insuffisant aux prix agricoles, lui-même découlant d'une priorité inadéquate accordée au secteur agricole,... . On peut remonter ainsi très loin dans les causes sous-jacentes, avec un risque accru d'incertitude, de subjectivité et de posture idéologique. Aussi nous limiterons-nous à l'étude des facteurs.

Les facteurs sont soit **directs** - toujours dans le cas de la déforestation dans les pays tropicaux en développement, le remplacement d'une parcelle de forêt par un champ de caféiers est le fait de l'agriculture de rente qui en est le facteur direct et visible, soit **indirects**: par exemple, l'ouverture d'une route (publique ou d'exploitation forestière) dans un massif forestier, en plus d'être un facteur direct, relativement peu significatif, de suppression de la forêt sur la largeur de l'emprise de la route, attire des agriculteurs à la recherche de terres qui vont défricher la forêt. Pour la même surface défrichée par ces agriculteurs, il y a un facteur direct l'agriculture et indirect le programme de colonisation ou l'exploitation forestière. Une question se pose et une précaution est à prendre qui sont : attribue-t-on la déforestation au facteur direct au facteur indirect ou aux deux à la fois ?

Il convient à notre avis de toujours prendre en compte le facteur direct soit comme le seul facteur soit comme l'un des deux facteurs mais en aucune manière de considérer le facteur indirect comme seul facteur; si l'on prend en compte à la fois les facteurs directs et indirects, il faut éviter les doubles comptes dans l'estimation totale de la déforestation.

7.3.2. L'indispensable différenciation entre déforestation et dégradation

La confusion entre les deux notions de déforestation et de dégradation des forêts a trop souvent été entretenue ou inconsciemment faite. Rappelons pour éviter toute ambiguïté quelques éléments qui nous paraissent devoir être retenus :

-Déforestation: elle se traduit par une diminution de la surface couverte de forêt. Il n'est pas possible cependant de la définir sans ajouter à la couverture du sol une référence à son utilisation (ou affectation). En effet, il existe des formes d'utilisation de la forêt et des objectifs dominants de gestion forestière qui peuvent momentanément faire disparaître la couverture forestière mais assurent son maintien. C'est le cas de la coupe à blanc sur des sols où la forêt se reconstituera ou sera reconstituée ou de la coupe finale dans un traitement en futaie régulière, une fois la régénération naturelle assurée. En d'autres termes, il n'y a pas déforestation si la continuité du maintien d'une couverture forestière est garantie.

-Dégradation: elle ne se traduit pas par une réduction de surface de la forêt mais par une baisse de la qualité de son état là où elle se trouve, cette qualité se rapportant à l'une ou à plusieurs

composantes de l'écosystème forestier (strate de végétation, faune, sol, ...), aux interactions entre ces composantes et plus généralement à son fonctionnement.

7.3.3. Caractérisation et estimation de la déforestation et de la dégradation des forêts

- Estimation de la déforestation

Concernant l'identification de la déforestation et l'estimation des surfaces déforestées des progrès n'ont cessé d'être réalisés depuis un demi-siècle grâce notamment aux développements de la télédétection. La phase d'engouement inconditionnelle des années 70 et 80 pour la télédétection satellitaire et radar a heureusement fait place à une utilisation plus consciente des limitations de ces outils, non sans avoir fait entre temps des dégâts importants : adoption de classifications et de résultats inutilisables par les gestionnaires (et sans aucune correspondance sur des zones adjacentes), et réduction, jusqu'à l'abandon, de l'acquisition de la "vérité-terrain" et des inventaires au sol.

Identifier et estimer la déforestation suppose la connaissance au niveau considéré de l'état de la forêt à deux moments. Il existe malheureusement encore trop peu d'inventaires forestiers permanents au niveau national ou à des niveaux inférieurs, et ils sont mis en oeuvre pour la plus grande part dans les pays industrialisés. Et, au niveau international, les évaluations, à commencer par celles, centrales de la FAO n'ont de valeur qu'en tant qu'elles reposent sur une vérité-terrain recueillie par les pays, qui soit fiable et répétée, ce qui exige un renforcement des capacités des pays en développement dans ce domaine.

-Estimation de la dégradation

Les estimations de la dégradation des espaces boisés ne sont en général précises qu'au niveau local, sur des sites de superficie limitée. A des niveaux supérieurs, l'estimation des surfaces affectées, lorsqu'elle existe, reste très approximative. Alors que pour l'estimation de la déforestation, les différentes formes de télédétection sont des outils très utiles, ils le sont beaucoup moins pour l'évaluation de la dégradation, qui nécessite le plus souvent des observations au sol.

La difficulté d'estimation de la dégradation réside aussi dans la nécessité de différencier les formes et les degrés de gravité de celle-ci. La variable de la déforestation est binaire - 0 ou 1 , alors que celle de la dégradation ne saurait l'être, au risque d'une trop grande simplification: il n'y a rien de comparable, par exemple, entre l'"écrémage" d'une forêt dense humide pour la récolte de bois d'oeuvre, et celui de la surexploitation permanente (bois de feu, pâturage) des formations forestières méditerranéennes pouvant aboutir à une déforestation véritable.

7.4. Problèmes spécifiques aux steppes

7.4.1. Définition

Au-delà des compromis politiques une définition consensuelle du processus a été proposée par la CCD :

« La désertification désigne la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».

La désertification concerne donc un processus de dégradation des terres lié à des facteurs naturels exacerbés par l'action de l'homme. La manifestation apparente du phénomène se traduit par une diminution de la couverture végétale et des potentialités des systèmes écologiques et une détérioration des sols et des ressources hydriques.

La désertification, en Algérie, concerne essentiellement les steppes des régions arides et semi-arides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif.

7.4.2. Présentation des régions steppiennes

Sur le plan physique, les steppes algériennes, situées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud couvrent une superficie globale de 20 millions d'hectares. Elles sont limitées au Nord par l'isohyète 400 mm qui coïncide avec l'extension des cultures céréalières en sec et au Sud, par l'isohyète 100 mm qui représente la limite méridionale de l'extension de l'alfa (*Stipa tenacissima*). Les étages bioclimatiques s'étalent du semi aride inférieur frais au per aride supérieur frais. Ce zonage bioclimatique est actuellement en cours de révision par les chercheurs qui se penchent sur l'impact des changements climatiques et celui du processus de désertification sur ces limites. Sur le plan écologique, les régions steppiennes constituent un tampon entre l'Algérie côtière et l'Algérie saharienne dont elles limitent les influences climatiques négatives sur la première.

Les sols steppiennes sont caractérisés par la présence d'accumulation calcaire, la faible teneur en matière organique et une forte sensibilité à l'érosion et à la dégradation. Les ressources hydriques

sont faibles, peu renouvelables, inégalement réparties et anarchiquement exploitées. Les points d'eau sont au nombre de 6500 dont plus de 50% ne sont plus fonctionnels.

Les steppes algériennes sont dominées par 4 grands types de formations végétales : les steppes graminéennes à base d'alfa (*Stipa tenacissima*) et de sparte (*Lygeum spartum*) qui constituent des parcours médiocres et les steppes *chamaephytiques* à base d'armoise blanche (*Artemisia herba alba*) dont les valeurs pastorales sont très appréciables et de *Hamada scoparia* localisées sur les regs. Des formations azonales sont représentées par les espèces psammophiles et les espèces halophiles de bonnes valeurs fourragères.

Sur le plan humain, la croissance démographique des zones steppiques est plus forte que celle enregistrée dans le reste du pays.

7.4.3. Les différents types d'études menées sur la steppe

L'évaluation et la surveillance des agrosystèmes steppiques se font par des mesures malheureusement irrégulières peu systématiques et surtout non coordonnées sur l'ensemble du territoire steppique quantitatives et qualitatives de la végétation et des caractères du milieu et par l'analyse des différents paramètres socioéconomiques qui influent sur la dynamique de ces systèmes. Le fonctionnement des écosystèmes détermine l'état et le niveau de production des ressources.

7.4.4. Les causes de la désertification

Les causes de la désertification sont nombreuses. La cause naturelle principale est bien connue : la sécheresse. Les causes anthropiques (démographie, surpâturages, défrichement des parcours et leurs causes,...) le sont moins. En particulier, les causes qui relèvent des effets des politiques économiques d'ensemble (politiques monétaires, sociales, du commerce extérieur, politique des investissements publics et privés,...)

-La sécheresse

Les steppes algériennes sont marquées par une grande variabilité interannuelle des précipitations. En outre, les dernières décennies ont connu une diminution notable de la pluviosité annuelle, avec parfois plusieurs années consécutives de sécheresse persistante. La diminution des précipitations est de l'ordre de 18 à 27% et la saison sèche a augmenté de 2 mois durant le siècle dernier.

Les perturbations climatiques sont une cause importante de la fragilité de ces milieux déjà très sensibles et provoquent des crises écologiques se répercutant sur l'ensemble de l'écosystème.

-Le surpâturage

L'effectif du cheptel pâturant en zones steppiques dont la composante prédominante est la race ovine (environ 80% du cheptel) n'a cessé d'augmenter depuis 1968. 10,7% des éleveurs possèdent plus de 100 têtes ce qui représente 68,5% du cheptel steppique. Par contre, la majeure partie des possédants, soit 89,3%, ne possèdent que 31,5% du cheptel. Cette inégale répartition du cheptel est due à l'inégalité dans la répartition des moyens de production.

En 1998, les parcours se sont fortement dégradés, la production fourragère a diminué de moitié et l'effectif du cheptel est 10 fois supérieur à ce que peuvent supporter les parcours.

Le surpâturage s'explique par deux facteurs principaux :

1. Le manque de création d'emplois (agricoles et surtout non agricoles) pousse les ménages pauvres à défricher des lopins de terre pour produire un minimum de céréales et les pousse à posséder quelques têtes de caprins et d'ovins pour subvenir à un minimum de leurs besoins.
2. La gratuité des unités fourragères prélevées sur les parcours pousse les gros possédants à accroître la taille de leurs troupeaux et les conduits aussi à défricher les parcours pour se les approprier.

7.4.5. Impacts de la désertification sur les populations

La population des steppes vit de l'élevage autour duquel elle a construit un mode de vie, une organisation sociale et économique des savoirs et des savoirs faire ancestraux diversifiés et d'une grande richesse.

La croissance démographique dans ces régions a créé de nouveaux besoins et a provoqué de nouveaux rapports avec les ressources naturelles. La croissance des troupeaux a entraîné une concurrence accrue entre les éleveurs pour l'usage des parcours, suscitant une appropriation privative de facto, par différents moyens et techniques, de superficies de plus en plus importantes (appropriation tacitement reconnue par l'État (Bédrani, 1996). Ce phénomène a provoqué la limitation des déplacements d'une grande partie des troupeaux, voire leur fixation. Les pasteurs ont modifié leur système de production en associant culture céréalière et élevage. La sédentarisation, qui s'est produite sur des parcours qui ne sont pas aménagés et

gérés en fonction des nouvelles conditions, accentue la dégradation des sols et de la végétation pérenne.

Les politiques macro-économiques de l'époque ont aussi contribué à la surexploitation des ressources naturelles de la steppe. La surévaluation de la monnaie nationale jusqu'à la fin des années quatre-vingts rendait les produits importés très peu coûteux, renforçant les effets de la subvention

des aliments et autorisant, par ailleurs, l'achat de nombreux tracteurs et matériels agricoles pour défricher à grande échelle les parcours en vue de se les approprier. Cette pratique s'est traduite par une surexploitation des parcelles individuelles induisant des remontées de sels et souvent la stérilisation des sols.

En 1968, la production céréalière de la steppe est estimée à 4,35 millions de quintaux et 1,1 million d'hectares ont été cultivés. En 1992, un rapport du Ministère de l'agriculture fait état de 2,1 millions d'hectares labourés et cultivés soit 10% de la steppe. Les faibles rendements obtenus à partir de la culture céréalière steppique (3 à 5 ha) sont loin de compenser la dégradation des sols induite.

8.1. Evapotranspiration réelle

Evapotranspiration réelle d'une région représente l'eau réellement perdue par celle-ci sous forme de vapeur ou elle est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

D'une manière générale, l'évapotranspiration est conditionnée par : les conditions climatiques, les conditions liées au sol, les propriétés physiques et physiologiques de la végétation. On peut également noter qu'il existe deux résistances aux flux évaporatoires à partir d'une couverture végétale, d'une part une résistance aérodynamique et d'autre part une résistance de surface toutes deux dues à la présence de la végétation.

8.2. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration (ET) concerne l'ensemble des processus renvoyant dans l'atmosphère sous forme gazeuse une partie des précipitations (forme liquide). Ce phénomène combine les pertes en eau par **évaporation directe** d'eau liquide (eau libre ou eau du sol dans les 15 premiers cm environ) et par **transpiration** de la biomasse. L'évapotranspiration s'exprime en mm d'eau pour une période donnée et peut intervenir à tout moment du cycle de l'eau à condition qu'il y ait assez d'eau à évapotranspirer et une énergie suffisante. En effet, ce phénomène nécessite une quantité importante d'énergie que l'on appelle chaleur latente de vaporisation de l'eau. Il faut

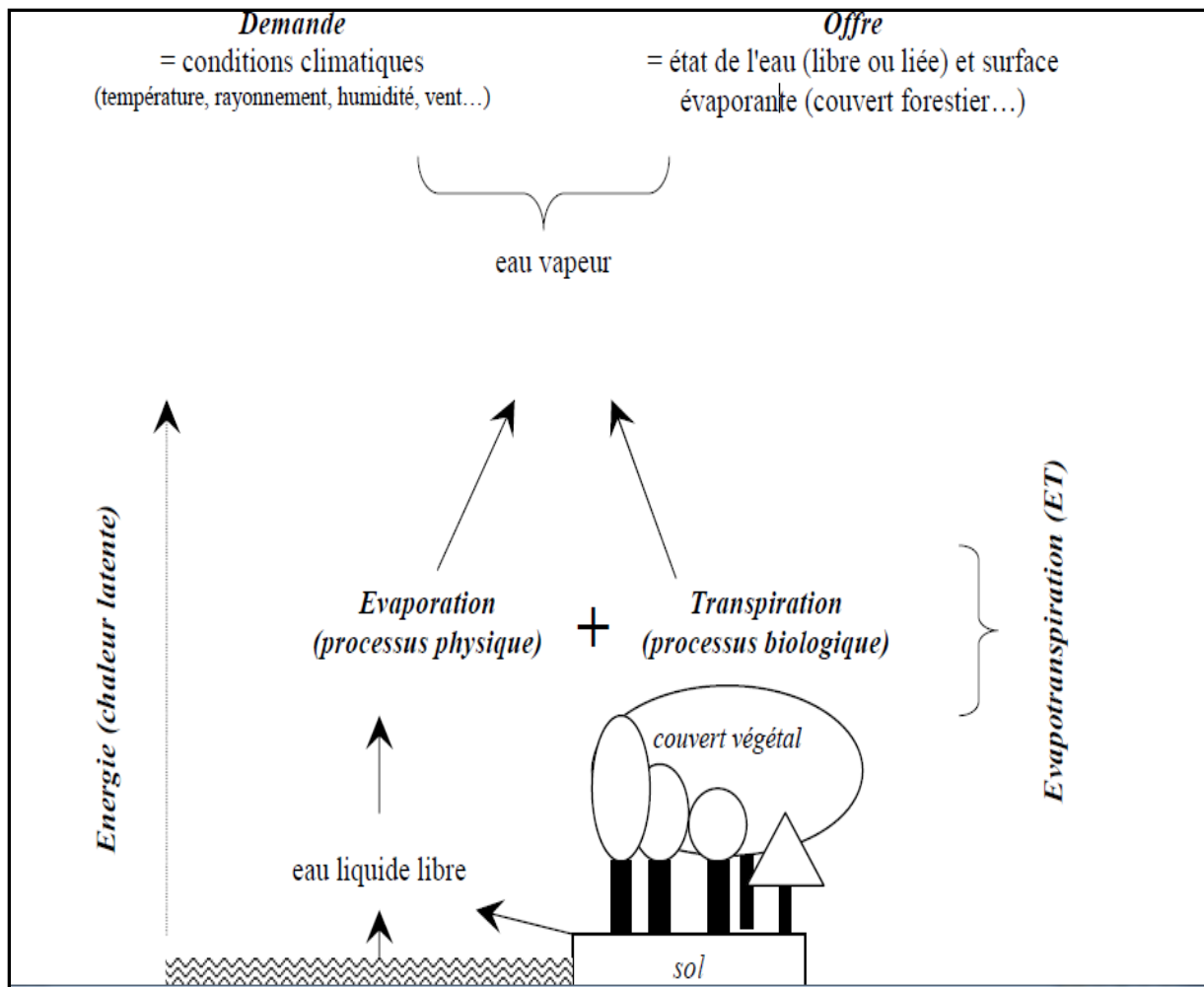


Figure 20 : Evapotranspiration

L'intensité de l'évapotranspiration dépend :

1) De la demande c'est-à-dire des apports énergétiques (rayonnement, température) nécessaires à l'évaporation – et qui conditionnent l'humidité atmosphérique – ainsi que du vent – qui remplace éventuellement l'air humide, au contact de la surface liquide ou humide par de l'air plus sec. Ces apports énergétiques proviennent essentiellement du *bilan radiatif* et plus particulièrement du rayonnement net.

2) De l'offre c'est-à-dire de la disponibilité de l'eau évaporable qui est une fonction de l'état de la surface, de la nature de la couverture végétale, etc. Cette disponibilité est en fait la résultante de

l'ensemble des résistances qui s'opposent au transfert de la vapeur d'eau depuis les "sites" de vaporisation jusqu'à l'air libre :

_ Résistance de l'air (r_a) qui dépend de la vitesse du vent, de la hauteur de la végétation et de la rugosité de la surface supérieure du couvert ;

_ Résistance de l'espace poreux végétal (r_p) qui dépend de la densité et de la structure du couvert végétal et de la vitesse du vent ;

_ Résistance de la couche superficielle du sol (r_o) qui, quand il est desséché, freine l'évaporation du sol (croûte = mulch) ;

_ Résistance des stomates (r_s) au transfert de vapeur d'eau depuis la chambre sous stomatique jusqu'à l'extérieur de la feuille.

Selon la disponibilité en eau et le type de la couverture herbacée considérée, on distingue différentes valeurs de l'évapotranspiration

8.3. Méthode de mesure

Selon la disponibilité en eau et le type de couverture herbacée considérée on distingue différentes valeurs de l'évapotranspiration

Méthode de calcul ETP et ETR

- **L'évapotranspiration potentielle (ETP)** : c'est l'évapotranspiration qui se produirait dans le cas où la **quantité d'eau** évaporable ou transpirable **n'était pas limitée**. Cette évapotranspiration n'est conditionnée que par l'éloignement de la saturation dans lequel se trouve l'air, c'est-à-dire par les seules conditions climatiques ambiantes. L'ETP, qui est parfois appelée **évapotranspiration maximale (ETM)** ou **demande climatique**, évolue donc au cours de la saison et est généralement croissante. Dans un tel cas, la demande est inférieure à l'offre. Un sol nu, mouillé en surface par une pluie évapore à l'ETP. Pour un couvert végétal, cette situation correspond à une ouverture totale des stomates et à une absence de régulation des échanges et des pertes en eau (alimentation en eau optimale). Il faut cependant noter que, dans la réalité, l'ETM n'atteint jamais l'ETP car, même si les stomates sont largement ouverts, le couvert végétal offre de par sa structure une certaine résistance au transfert de la vapeur d'eau. Le seul cas où l'on a $ETP=ETM$ est celui d'un gazon bien alimenté en eau pour lequel on estime que la structure ne joue pas un rôle majeur dans le transfert de la vapeur d'eau.

- **L'évapotranspiration réelle (ETR)** correspond au cas général dans les conditions naturelles. Pour un couvert végétal, elle correspond à la quantité d'eau **réellement transpirée** et prend en compte la disponibilité réelle en eau. **L'ETR est donc toujours inférieure à l'ETP**. L'ETR correspond donc à la situation où la demande est supérieure à l'offre. Elle est fixée par :

Les conditions climatiques et en particulier du bilan radiatif et du vent ;

_ La disponibilité de l'eau à la surface et de la résistance au transfert de l'eau dans le complexe sol – végétation – atmosphère (résistance stomatique...);

_ Des caractéristiques de la surface évaporante (taille et surface des houppiers, disposition des feuilles...).

Sur le plan agronomique et forestier, on est conduit à définir essentiellement trois données :

ETP = évapotranspiration potentielle pour laquelle le seul facteur limitant correspond à une donnée climatique

ETM = évapotranspiration potentielle maximale pour laquelle le seul facteur limitant correspond à une donnée climatique. Cependant, même en l'absence de stress en eau, un couvert végétal offre une certaine résistance au transfert de la vapeur d'eau.

Par définition, $ETM \leq ETP$

ETR = évapotranspiration réelle pour laquelle le seul facteur limitant est le système surface évaporante – liaison de l'eau. Par définition $ETR < ETM \leq ETP$

8.4. Méthodes directes d'estimation de l'évapotranspiration

On peut distinguer deux grandes méthodes : l'évaporomètre et les cases lysimétriques. Ces mesures sont fondées sur l'évaporation d'une certaine masse d'eau.

8.4.1. L'évaporomètre Piche

L'évaporomètre Piche, employé en France et adopté dans divers pays, est constitué par une simple éprouvette en verre, de 1 centimètre carré environ de section et de 35 centimètres de longueur, remplie d'eau et fermée par une rondelle de papier buvard, maintenue au moyen d'une bague métallique faisant ressort. L'éprouvette étant retournée et placée verticalement, l'eau s'évapore progressivement par l'intermédiaire de la rondelle de buvard : c'est un évaporomètre à surface évaporante d'eau « artificielle ». Une division de la graduation correspond à 1 mm d'eau évaporée pour un disque de buvard de 30 mm de diamètre (surface évaporante : 13 cm²). Il est normalement

installé sous l'abri météorologique ouvert sur les côtés. Bien entendu, la forme et aussi les dimensions de la surface qui évapore jouent un rôle important dans les mesures. Il en est de même de la température de la masse d'eau qui évapore, elle-même fonction des caractéristiques propres de l'appareil utilisé. Suivant le type

d'instrument, les indications recueillies dans des conditions de milieu identiques peuvent être ainsi très différentes. De même, il reste évident qu'il n'y a pas, a priori, de commune mesure entre l'évaporation déterminée dans ces conditions et les pertes en eau subies par un sol, une plante ou encore un lac, une rivière ou une simple mare à la surface du sol. Cependant, toutes ces pertes par évaporation ou transpiration dépendent d'un certain nombre de facteurs physiques tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, etc. Elles dépendent aussi du degré de sécheresse de l'air, de sa plus ou moins grande teneur en vapeur d'eau, c'est-à-dire de son humidité. La détermination de la quantité d'eau évaporée journalièrement par une masse d'eau donnée peut fournir une mesure relative et globale de ces influences diverses et simultanées et nous renseigner, sinon sur les pertes d'eau exactes d'un sol ou d'une plante, du moins sur le pouvoir évaporant de l'air dans un lieu et à un instant donnés. C'est bien en effet la signification que l'on attache aux mesures d'évaporation telles qu'elles sont effectuées dans les stations météorologiques. d'instrument, les indications recueillies dans des conditions de milieu identiques peuvent être ainsi très différentes. De même, il reste évident qu'il n'y a pas, a priori, de commune mesure entre l'évaporation déterminée dans ces conditions et les pertes en eau subies par un sol, une plante ou encore un lac, une rivière ou une simple mare à la surface du sol. Cependant, toutes ces pertes par évaporation ou transpiration dépendent d'un certain nombre de facteurs physiques tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, etc. Elles dépendent aussi du degré de sécheresse de l'air, de sa plus ou moins grande teneur en vapeur d'eau, c'est-à-dire de

son humidité. La détermination de la quantité d'eau évaporée journalièrement par une masse d'eau donnée peut fournir une mesure relative et globale de ces influences diverses et simultanées et nous renseigner, sinon sur les pertes d'eau exactes d'un sol ou d'une plante, du moins sur le pouvoir évaporant de l'air dans un lieu et à un instant donnés. C'est bien en effet la signification que l'on attache aux mesures d'évaporation telles qu'elles sont effectuées dans les stations météorologiques.

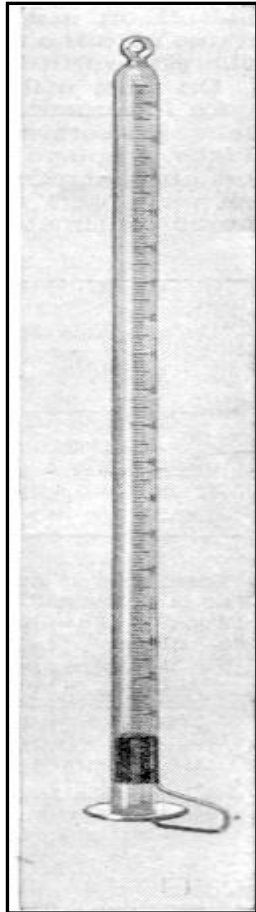


Figure 21 : L'évaporomètre Piche

8.4.2. Les cases lysimétriques

Pour la deuxième méthode, l'ETR peut être considérée comme le terme résiduel de l'équation du bilan hydrique du sol après que tous les autres termes aient été mesurés :

$$DS = (P + I) - (D + R + ETR)$$

Avec :

DS = variation du stock d'eau dans le sol

P = pluie

I = irrigation

D = drainage

R = ruissellement (échanges latéraux d'eau)

Si l'on se place dans le cas où le ruissellement est nul et que les mesures commencent après que le sol se soit ressuyé (drainage = 0), alors on obtient une équation simplifiée :

$$DS = P + I - ETR$$

Connaissant les pluies incidentes et les apports par irrigation (dans le cas de culture), la difficulté majeure consiste à estimer la variation du stock du sol entre deux dates.

Une case lysimétrique est un bac exposé en plein air qui contient un sol couvert d'un certain type de végétation, ou laissé à nu, dont on évalue la quantité d'eau infiltrée et drainée par rapport à celle apportée par les précipitations. Certains lysimètres peuvent être pesés régulièrement pour connaître le volume d'eau contenu dans le sol. La profondeur d'un lysimètre varie de 0,5 à 2 mètres, sa surface de 0,3 à 4 m². Un dispositif de pesée permet d'établir DS. Le ruissellement est éliminé par l'horizontalité de la surface, les sorties par drainage sont recueillies, les précipitations sont mesurées par un pluviomètre. L'ETR est alors connue par différence. Si les bacs sont maintenus à une humidité optimale par recharge journalière, on mesure l'ETM. Si aucun apport n'est effectué alors c'est l'ETR qui est mesurée. Pour que la mesure reste représentative des conditions naturelles, par forts déficits en eau du sol, la cuve doit être aussi profonde que possible. A cet égard, même une profondeur de deux mètres, sous culture herbacée, peut s'avérer insuffisante par forte sécheresse. De plus, la représentativité des mesures exige de limiter au maximum les échanges advectifs entre le dispositif et son environnement immédiat (anneau de garde). La surface évaporante à prendre en compte est aussi délicate quand il y a transgression de la végétation au dessus des bords des cuves.

9.1. Méthodes de caractérisation du climat méditerranéen

9.1.1. Quotient pluviothermique d'Emberger (1932)

L'indice d'Emberger définit le degré d'humidité du climat. Il prend en compte les précipitations annuelles P, la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (m). Comme pour l'indice xérothermique de Gaussen, il est plus particulièrement adapté *aux régions méditerranéennes* dans lesquelles il permet de distinguer différents étages climatiques. Dans ces régions, Emberger a remarqué que l'amplitude

thermique (M-m), donc l'évaporation, est un facteur important de la répartition des végétaux. On sait en effet que, à température moyenne égale, ***l'évaporation est d'autant plus grande que l'amplitude thermique est élevée.***

$$Q_2 = \frac{Px1000}{1/2 [M+m] [M-m]}$$

Le quotient pluviothermique (Q2) pour la région d'Annaba est de 99,55 (tableau 3, figure 22)

La région d'Annaba est localisée dans l'étage bioclimatique sub-humide à hiver chaud

Tableau 3 : Valeurs météorologiques de la région d'Annaba

Mois	Température	Précipitations moyennes (mm)	Humidité moyenne (%)	Fréquence moyenne de vents (m/s)
	Moyenne (°C)			
Janvier	11,06	97.42	78.7	3.46
Février	11,39	78.69	76.8	3.51
Mars	13,28	49.75	75.2	3.5
Avril	15,17	64.23	74.2	3.4
Mai	18,69	43.13	74.9	3.24
Juin	22,68	12.25	72.6	3.23
Juillet	25,04	3.03	69.9	3.44
Août	26,13	13.23	71.9	3.35
Septembre	22,59	37.32	73.5	3.2
Octobre	19,81	61.83	74.6	3.01
Novembre	15,36	86.94	75.9	3.2
Décembre	13,22	123.06	77	3.62

Station météorologique des Salines (1990-2005) (Touati, 2008)

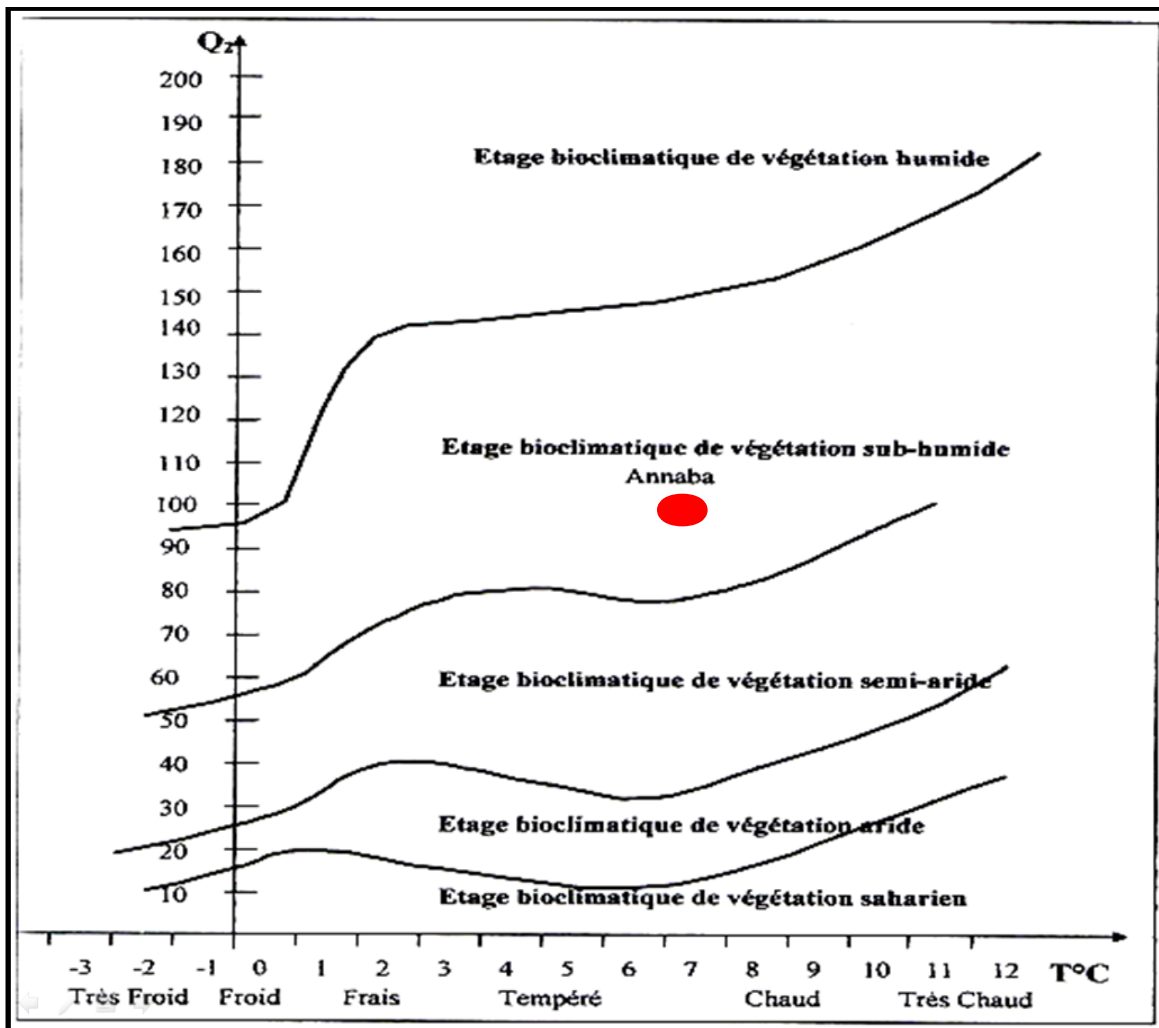


Figure 22 : Climagramme d'Emberger de la région d'Annaba de la période (1990-2005) (Touati, 2008)

9.1.2. Indice d'humidité de Manguet (1954)

Cet indice est surtout adapté pour la classification des climats dans la zone intertropicale. Les facteurs thermiques ne sont pas pris en compte car Manguet estime que dans ces régions la température ne joue pas un rôle direct. L'indice a été établi pour différencier les climats de plaine et des basses montagnes de l'Afrique Occidentale.

$$I = \frac{\left(\frac{P}{100}\right) + Ms + \left(\frac{H_{MAX}}{5}\right)}{nS + \left(\frac{500}{H_{MIN}}\right)}$$

a = facteur d'humidité	}	•	P = pluviométrie moyenne annuelle (en mm)
		•	Ms = moyenne de la pluviométrie des mois secs (< 50 mm)
b = facteur d'aridité	}	•	Hmax = humidité relative (en %) annuelle maximale
		•	nS = nombre de mois secs
		•	Hmin = humidité relative (en %) annuelle minimale

Les valeurs de I diminuent quand les différences entre a et b diminuent c'est-à-dire quand on va vers les climats plus secs. L'auteur considère 5 groupes de climats intertropicaux.

I. $I < 1$ type sahélien (arbres rares, xérophiles spécialisés)

II. $1 < I < 2$ type soudanien (formation plus dense, savane)

III. $2 < I < 3$ type à forêt instable (formation plus dense mais instable)

IV. $3 < I < 7,5$ type forêt mésophile (formation dense, arbre de grande taille)

V. $I > 7,5$ type forêt hygrophile (« rain forest »).

9.1.3. Indice pluviométrique annuel de Moral (1954)

Cet indice est surtout adapté pour la classification des climats dans la zone intertropicale.

Pour Moral, la limite entre l'humidité et la sécheresse est donnée par la hauteur des pluies (en mm).

IM est inférieur à 1 pour un climat sec et supérieur à l'unité pour un climat humide.

$$I_M = P / T^2 - 10T + 200$$

$I_M < 1$... climat sec

$I_M > 1$... climat humide

9.2. Classification climatique physique

En raison de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et de la nécessité de description synthétique, de classement et de comparaison des types de climat et de végétation à travers le monde, de nombreux auteurs ont proposé diverses formules, indices et expressions graphiques, tenant compte d'un nombre plus ou moins élevé de facteurs. Pour ces différents auteurs, la principale difficulté était de définir à partir de quand un climat, une saison, sont-ils secs ? On peut légitimement admettre qu'une période est sèche quand celle-ci dépense plus d'eau qu'elle n'en reçoit, donc qu'elle perd par évaporation et transpiration une quantité d'eau supérieure à celle des précipitations qui tombent pendant le même temps.

Les éléments les plus couramment analysés sont les précipitations, les températures. Les indices climatiques globaux fournissent des variables synthétiques qui combinent généralement des données climatiques moyennes calculées à partir de séries climatologiques correspondant à un poste d'observation. Ces indices ont été tout d'abord utilisés pour classer et cartographier les climats selon leur aridité par les hydrologues et les géomorphologues puis par les botanistes et écologues. A l'échelle macroclimatique, ces indices permettent d'expliquer la répartition biologique des essences, de définir les limites d'aire biotique coïncidant avec celle d'un facteur climatique précis.... Cependant, ce sont avant tout des formules mathématiques qui ignorent les exigences écologiques des plantes, les possibilités écologiques d'un territoire (caractéristiques du sol, topographie...) et la hiérarchie écologique des facteurs déterminant la répartition d'une essence dans un milieu géographique. Beaucoup de ces formules sont empiriques et n'ont aucune signification physique. Elles n'ont de signification que par la bonne corrélation existante avec la distribution de certains groupements végétaux.

9.2.1 Classification des climats selon De Martonne

La classification d’Emmanuel de Martonne est fondée sur un indice d’aridité (fig.4), cet indice (traité en détail plus loin) n’est pas utilisable dans les régions froides, à cause de sa sensibilité aux températures annuelles très basses (-10°C).

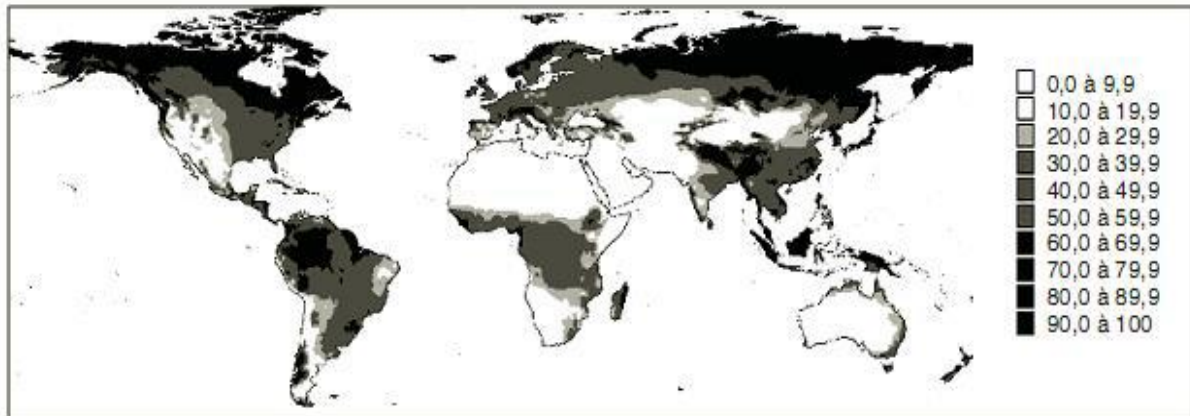


Figure 23. Les zones arides dans le monde selon l’indice de Martonne (période 1951-2000)

9.2.2. Classification des climats selon Köppen

La classification de Köppen-Geiger (1923) (Tab.1), est encore largement utilisée. Köppen, botaniste de formation, donnait beaucoup d’importance aux relations entre le climat et la végétation, ce qui transparaît dans sa classification. Celle-ci utilise 3 critères d’importance décroissante et désignés, pour chaque catégorie, par 3 lettres successives. La première lettre, de A à E, correspond à la caractéristique principale de la catégorie climatique et donc aux grands types de climat. La deuxième lettre correspond essentiellement au régime pluviométrique, parfois à la température. Cette lettre, tantôt une majuscule, tantôt une minuscule, est l’initiale d’un mot allemand : F : Frost (gel), S: Steppe, T: Tundra, W: Wüste (déserts). La troisième lettre se réfère uniquement à la température moyenne : a, b, c, d, h (trocken-heiss : chaud et sec) et k (trockenkalt : froid et sec). Ainsi, par exemple, le climat des steppes péri-sahariennes sera désigné par l’abréviation BSh alors que celui des steppes d’Asie centrale sera désigné par BSk.

Tableau : Grands types de climats de Köppen-Geiger selon M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf et F. Rubel, 2006. Meteorol. Z., 15, 259-263.

Types de climat	Sous-types de climat	Caractéristiques (voir légende ci-dessous)
A : climats équatoriaux ($T_{min} \geq +18 \text{ }^\circ\text{C}$)	Af : forêt humide équatoriale	$P_{min} \geq 60 \text{ mm}$
	Am : mousson équatoriale	$P_{ann} \geq 25(100 P_{min})$
	As : savane équatoriale à été sec	$P_{min} < 60 \text{ mm}$ en été
	Aw : savane équatoriale à été humide	$P_{min} > 60 \text{ mm}$ en été
B : climats arides $P_{ann} < 10 P_{th}$	BS : climat de steppe	$P_{ann} > 5 P_{th}$
	BW : climat de désert	$P_{ann} \leq 5 P_{th}$
C : climats tempérés $-3 \text{ }^\circ\text{C} < T_{min} < +18 \text{ }^\circ\text{C}$	Cs : climats tempérés à été sec	$P_{smin} < P_{wmin}$, $P_{wmax} > 3 P_{smin}$ and $P_{smin} < 40 \text{ mm}$
	Cw : climats tempérés à hiver sec	$P_{wmin} < P_{smin}$ and $P_{smax} > 10 P_{wmin}$
	Cf : climats tempérés toujours humides (ni Cs ni Cw)	
D : climats neigeux $T_{min} \leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$	Ds : climats neigeux à été sec	$P_{smin} < P_{wmin}$, $P_{wmax} > 3 P_{smin}$ and $P_{smin} < 40 \text{ mm}$
	Dw : climats neigeux à hiver sec	$P_{wmin} < P_{smin}$ and $P_{smax} > 10 P_{wmin}$
	Df : climats neigeux toujours humide (ni Ds ni Dw)	
E : climats polaires $T_{max} < +10 \text{ }^\circ\text{C}$	ET : climat de toundra	$0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{max} < +10 \text{ }^\circ\text{C}$
	EF : climat des glaces	

Abréviations :

P : précipitations en mm, avec Pmin (précipitations du mois le plus sec), Pann (cumul annuel), Pmin (précipitations du mois le plus sec du semestre estival), Pwmin (idem pour le semestre hivernal), Pmax (précipitations du mois le plus humide du semestre estival), Pwmax (idem pour le semestre hivernal) ; T : températures en °C, avec Tann (température moyenne annuelle), Tmax : température moyenne du mois le plus chaud, Tmin : température moyenne du mois le plus froid. Pth (th pour threshold, seuil) est égal à $2 \times T_{ann}$ si au moins les 2/3 des précipitations annuelles ont lieu en hiver, $2 \times T_{ann} + 28$ si au moins les 2/3 des précipitations annuelles ont lieu en été, $2 \times T_{ann} + 14$ dans les autres cas.

10.1. Un peuplement végétal

Toute culture est un système complexe résultant du développement de plantes réparties spatialement de façon aléatoire ou en ligne de semis, cette répartition se caractérise simplement par la densité moyenne du peuplement (nombre de pieds par m²).

Ce système développe au cours de sa croissance deux interfaces, lieux de passage obligatoires des échanges avec le milieu extérieur dit pédoclimatique (sol et climat), ce qui explique le rôle considérable joué par ces interfaces dans le domaine des relations milieu et production végétale.

10.2. Surfaces d'échanges

10.2.1. L'interface racinaire

C'est la surface totale des racines en contact avec le sol (réservoir bio-physicochimique de substances diverses, d'éléments minéraux, d'eau). Cette interface se caractérise par une hétérogénéité horizontale et surtout une variation selon la profondeur. On définira simplement la profondeur d'enracinement de ce peuplement (profondeur de sol exploré). Pour une approche plus précise de l'étude des relations sol-plante, on définit **l'indice de surface racinaire totale de la culture (SR)** : c'est le cumul sur la profondeur d'enracinement de toutes les surfaces des racines par unité de surface au sol, soit des m²/m².

Cette exploration racinaire est très importante pour extraire l'eau du sol et surtout pour puiser les éléments minéraux indispensables (rôle de la fertilisation), elle sera d'autant plus aisée que le nombre de racines sera élevé.

10.2.2. L'interface foliaire

C'est la surface totale des feuilles, celle-ci captent de l'énergie radiative lumineuse si importante pour la photosynthèse et échanges de la chaleur et des gaz (vapeur d'eau due à l'évaporation appelée transpiration, gaz carbonique et oxygène liés à la photosynthèse et à la

respiration). On caractérisera simplement la végétation par sa hauteur. On définira pour les relations plante-atmosphère l'**indice de surface foliaire totale de la culture (SF)**: c'est le cumul sur la hauteur de toutes les surfaces de feuilles par unité de surface au sol, soit des m^2/m^2 .

En fait, dans ses relations avec le climat un peuplement végétal sera aussi caractérisé très globalement par quelques paramètres relatifs aux interactions avec certains facteurs physiques particuliers du milieu climatique.

10.3. Caractéristiques physiques

10.3.1. L'albédo : c'est le pouvoir de réflexion de rayonnement par la surface, soit la proportion d'énergie incidente d'origine solaire réfléchi par la surface (on peut retenir qu'environ 15% à 25% sont réfléchis par une végétation, 10% à 40% par un sol nu et 60% à 90% par la neige). Ce rayonnement réfléchi qui correspond à une perte d'énergie donne aux oblats leur couleur : en effet l'œil qui observe ce rayonnement réfléchi ou l'instrument qui l'analyse peuvent saisir les caractéristiques des longueurs d'ondes et préciser les propriétés optiques des surfaces.

10.3.2. Le coefficient d'échange ou vitesse d'échange : C'est la vitesse avec laquelle se font les échanges de chaleur ou de masse (vapeur, gaz carbonique,) entre la surface et l'air. Ce coefficient d'échange dépend de :

1- Le type de culture considéré : la culture sera caractérisée par la rugosité de sa surface, paramètre qui dépend de ses irrégularités et dont le rôle est une modification de la turbulence de l'air et des mouvements convectifs au dessus du couvert.

2- La vitesse du vent : c'est donc une fonction propre au peuplement qui croit rapidement avec cette rugosité ou avec la hauteur et hétérogénéité de la culture. En effet la rugosité déterminée par les différences de hauteur entre les plantes sera d'autant plus forte que la culture sera plus haute, moins dense et plus hétérogène.

10.3.3. La résistance de surface

C'est le frein opposé par la végétation aux échanges d'eau et au gaz carbonique. En effet les surfaces de feuilles sont heureusement protégées contre la dessiccation de l'air par leur épiderme et leur cuticule (pratiquement imperméable), et les échanges de masse (eau ou gaz carbonique) ne se produisent en fait qu'à travers de petits pores appelés stomates. Le frein occasionné par la fermeture des stomates est un système de régulation très efficace pour les

plantes qui réduisent ainsi leurs pertes d'eau. Cette résistance moyenne des stomates des feuilles du couvert (RS) représente le paramètre inverse de la vitesse d'échange précédente.

10.4. Fonctionnement du couvert

Les surfaces et leurs propriétés fonction de la structure du peuplement interviennent donc fortement sur les échanges sol- plante-atmosphère et elles seront toujours à prendre en considération dans les analyses des relations liant la production au climat.

Un peuplement végétal est donc un système très sensible à l'impact des facteurs du milieu dont les effets sur la production sont heureusement partiellement gommés par l'effet intégrateur la plante par ses nombreux mécanismes biologiques d'adaptation. L'expérience montre que malgré une bonne maîtrise phytotechnique de la conduite d'une culture, les variations de climat entraînent au niveau de la production année après année des variations de rendement importantes (15% à 30% voire 100% lors d'accidents climatiques) ; il est alors clair qu'une meilleure maîtrise des facteurs du milieu serait très favorable à une amélioration et à une régularisation d la productivité dans le cadre d'une agriculture de haute performance qui malheureusement, en contre partie provoque une fragilisation du milieu de production.

C'est pourquoi il est nécessaire pour le futur de prévoir plus précisément les impacts de ces facteurs climatiques de les modifier au mieux pour les ajuster à l'optimum de production et d'affiner alors l'aide à la décision.

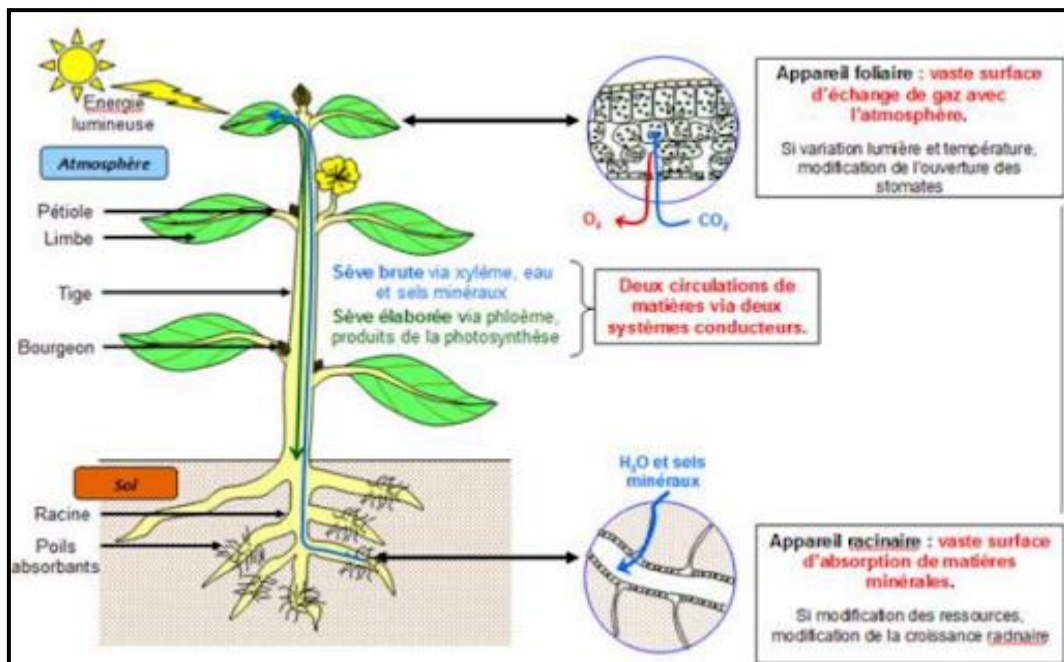


Figure 24 : Relation végétation-climat

11.1. Définition de la carte bioclimatique et choix de la méthode

Une carte bioclimatique a pour but de représenter pour une région donnée une synthèse des facteurs du climat ayant une importance particulière pour les êtres vivants.

Elle est donc basée sur un aspect particulier de l'étude du climat. Cependant, la notion même de (climat) est extrêmement complexe. On en est encore au stade de l'expérience pour déterminer l'action de tel ou tel facteur climatique sur telle espèce animale ou végétale. On en est encore aux conjectures pour démêler les interactions de certains facteurs climatiques entre eux. Par ailleurs, on en est encore, dans de vastes territoires, au stade d'organisation d'un réseau météorologique dense et bien équipé permettant de disposer de données suffisantes en qualité comme en quantité.

11.2. Représentation cartographique des bioclimats : couleurs et disposition des couleurs

Il est généralement admis, pour les cartes à caractère écologique, d'une part que la chaleur est représentée par du rouge et le froid par des hachures noires, d'autre part que la sécheresse est représentée par une teinte allant du rouge au jaune selon son intensité décroissante, et l'humidité par du bleu. Entre ces extrêmes du spectre, les autres couleurs sont combinées pour illustrer les conditions moyennes.

En partant de ces principes, sui- la carte :

Les climats désertiques sont en rouge (on a choisi un rouge brique de préférence au rouge écarlate, trop vif).

Les climats subdésertiques sont en orangé. Comme il a été indiqué plus haut, de petits cercles bleus y indiquent la tendance tropicale **SUT** la carte au **1 / 5 000 000**.

Les climats méditerranéens sont sur fond jaune avec surcharge orangée (période de sécheresse longue) ou surcharge verte (période de sécheresse courte).

Pour **les climats méditerranéens extrêmes**, des bandes larges orangées alternent avec des bandes étroites jaunes quand la période de sécheresse est très longue (**150 < x < 200**).

Les climats tropicaux chauds sont représentés par des bandes verticales alternativement orangées (sécheresse) et violettes (chaud + humide = rouge x bleu = violet).

Dans les **climats tropicaux tempérés**, la couleur violette est remplacée par du vert (jaune + bleu).

Les **climats bixériques** ont la même représentation chromatique que les climats tropicaux, mais les bandes sont inclinées. Ce climat est essentiellement un climat tropical, mais le fait d'avoir deux périodes sèches en fait un climat particulier, en général de transition.

Les **climats axériques** sont en teinte plate : **u**) en violet s'il s'agit de climat chaud (équatorial); **b**) en vert pour les climats tempérés chauds; **c**) en vert foncé pour les climats tempérés; **d**) en vert-jaune pour le climat avec période subsèche.

Les **climats froids** à période de sécheresse suivent les mêmes règles que ci-dessus, mais portent en surcharge des hachures noires. Ainsi la tendance méditerranéenne du climat steppique froid et surtout du climat subaxérique froid apparaît clairement d'après la teinte. De

même, toutes les régions arides, qu'elles soient chaudes ou froides, apparaissent en rouge ou en orange. Pour certaines stations de climat froid, on a indiqué sur la carte la somme des mois secs et des mois de gel, ces derniers en italiques avec la lettre *g*.

Les **climats axériques froids** sont en bleu-vert avec hachures noires si la période de gel n'excède pas 8 mois. Ils sont en blanc avec hachures noires quand la période de gel dépasse 8 mois; plus de 8 mois de gel indiquent, en général, la neige persistante, au moins dans les pays à hiver suffisamment humide.

Le **climat glacial** est en blanc avec quadrillage noir. Il va de soi que la même représentation cartographique a été choisie pour la carte au **1 /5000 000** et les cartons au **1 /10000 000** des régions à climat homologue d'Amérique du Nord, d'Amérique du Sud, d'Australie et d'Afrique du Sud. Il y a donc une seule légende pour l'ensemble des cartes.

11.3. Répartition des principaux bioclimats dans les régions étudiées

L'objet des cartes étant de permettre la comparaison des bioclimats de type méditerranéen dans le monde et d'étudier les transitions qu'ils comportent vers les autres types climatiques, en particulier vers l'aridité, il a paru utile de donner ici une analyse succincte des observations auxquelles conduit l'examen de ces cartes.

Etant donné l'objet général de l'étude, les commentaires présentés ici se rapportent surtout aux régions de climats méditerranéens et subdésertiques de la carte principale et des cartons annexes plutôt qu'aux régions périphériques, de climats nettement différents. A titre de documentation supplémentaire un certain nombre de diagrammes ombrothermiques relatifs à des stations situées sur les cartes ont été reproduits.

Les limites politiques n'ayant été indiquées que pour servir de repères, il va de soi que les termes employés dans cette analyse n'ont qu'une valeur géographique.

Références bibliographiques

- Bagnouls F. et Gaussen H., 1957- Les climats biologiques et leur classification.
- Barbault, R., Foucault, A. 2010. Changement climatique et biodiversité. 282p.
- Delpierre, N., 2015. Ecophysiologie végétale, L.E.S.E. Université Paris Sud.
- De Parcevaux, S. et t Hubert, L., 2007, Bioclimatologie : Concepts et applications, 336p.
- Estienne, P. et Godar, A., (1970). Climatologie »Edition Armand colin, Paris, 368P.
- FAO, 2001 - Global Forest Ressources Assissent, 2000 - Main Report - FAO Forestry Paper 140 - Rome, 479 p.
- Foucault, A., 2009. Climatologie et PaléoClimatologie. 2eme édition. 308 p.
- Fournier F., 1949. Les facteurs climatiques de l'érosion du sol. In: Bulletin de l'Association de géographes français, N°202-203, 26^e.p. 97-103.
- IRD, 2013. Flux de l'eau dans le système sol-plante –atmosphère/ problème de l'échelle.
- Laborde, J.P., 2000. Eléments d'hydrologie de surface, Université de Nice Sophia-Antipolis.
- Le floch, M.E. Grouzis, A., Cornet, j.-c., bille., 1992. L'aridité: une contrainte au développement caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés. p 601.
- Marchand, H., 1986 - Les ressources forestières de l'Afrique du Nord - Document de travail - Rome, 34 p.
- Monteny, B, A. Lhomme, J, P. 1980. Eléments de bioclimatologie. Office de la recherche scientifique et technique outre mer. 90 p.
- Montes, C., 2014. Modélisation spatialisée des échanges surface-atmosphère à l'échelle d'une région agricole méditerranéenne. Environnement et Société.
- U N E S C O - F A O., 1963. organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture, place de fontenoy, paris- 7^e, organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, viale delle terme di caracalla, rome imprimé par firmin-didot, mesnil-sur-l' estrée (eure), 1963. Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne. p : 11,14 et 19.

- Ramade, F., 2009. Element d'écologie. 4eme édition. 689p.
- http://meteocentre.com/internet/climat/climat_du_monde.htm