

Eau et Changement Climatique

Il y a un consensus mondial que le changement climatique actuel est d'origine anthropique. Les différentes activités humaines génèrent des quantités abondantes en gaz à effet de serre et des polluants. Ceci aggrave la situation climatique à l'échelle de la planète toute entière, avec des impacts de plus en plus dangereux. En effet, il demeure important de cerner ces problèmes, leurs causes et leurs conséquences ainsi que les moyens pour les atténuer ou éviter. Dans ce contexte, ce cours s'intéresse à présenter des généralités sur le climat, les facteurs climatiques et les paramètres climatiques. Aussi, la relation entre les ressources hydriques et le changement climatique, et les secteurs en relation avec l'eau.

Chapitre I : Généralités et définitions

1. Météo : est défini comme étant :

- État de l'atmosphère au jour le jour, à un lieu et un moment particuliers (e.g. température, humidité, vent, précipitation, visibilité)
- Résultats des fluctuations à court terme (minutes-semaines) et à large échelle spatiale qui découlent des instabilités internes de l'atmosphère
- Les effets de la météo sont sentis immédiatement
- Plusieurs phénomènes météorologiques font partie de systèmes météorologiques organisés à grande échelle
- Régis par des dynamiques chaotiques non-linéaires, et non prévisibles de façon déterminée au-delà de 1-2 semaines.

2. Climat :

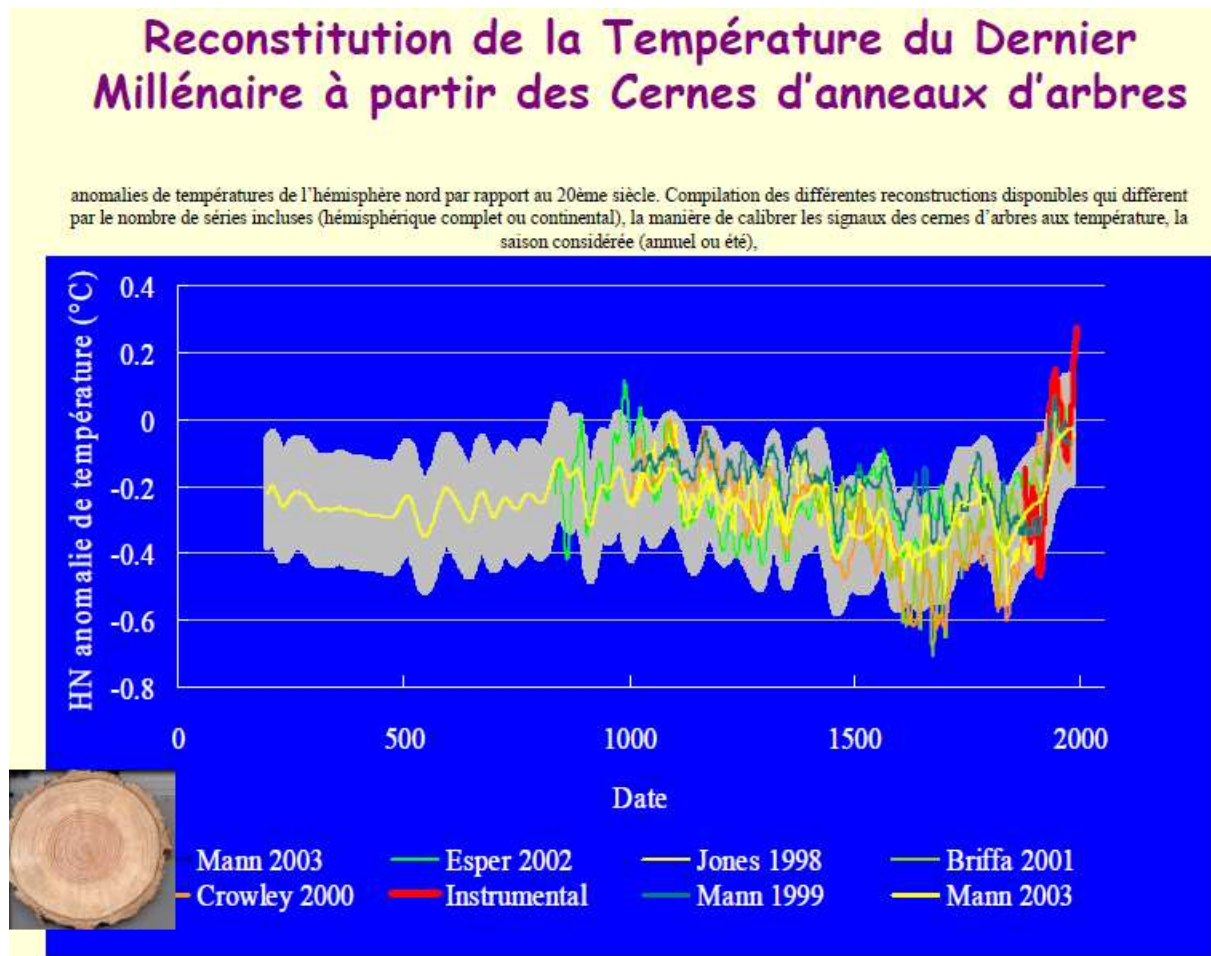
Klima = inclinaison. Cela fait référence au premier facteur explicatif de la géographie des climats : le rayonnement solaire et notamment son inclinaison (= incidence) sur la surface terrestre. Il est défini comme étant :

- L'état moyen de l'atmosphère pendant une période donnée (minute, heure, jour, plusieurs jours, mois, saison, année, plusieurs années) and pour une région géographique donnée (site [10 m], localité [50 km], région [50 km], continent [1K km], Terre [20K km])
- Le lien intime entre la météo et le climat fournit une base pour la compréhension de la façon dont les événements météo peuvent changer avec les changements climatiques

- Le climat est ce que l'on attend, la météo est ce que l'on obtient !
- Le climat indique quels vêtements acheter, la météo indique quels vêtements porter !

3. Paléoclimatologie

Reconstitution des conditions climatiques ayant régné à la surface de notre planète et d'expliquer leur évolution. Voir les exemples ci-dessous sur les techniques utilisées dans l'étude du paléoclimat.



A l'holocène moyen, le sahara vert?



Dépôts lacustres dans le sahara



Gravures rupestres en Lybie et Algérie

Les glaciations du quaternaire



Stries sur les roches montrant l'écoulement d'un glacier
(Scandinavie et Canada,...)

4. Climatologie

L'étude du climat, défini comme "le statut thermodynamique/ hydrodynamique des conditions limites qui déterminent l'ensemble concurrent des patrons de météo." (Bryson, 1997).

5. Système climatique : Il renferme les composants suivants :

5.1. Lithosphère

- La couche solide la plus externe de la Terre
- Couche de sol (pédosphère) "partition des nutriments & énergie"

5.2. Hydrosphère

Océans, rivières, eaux souterraines, précipitation, etc.

5.3. Cryosphère

Glaciers, glace de mer, glace d'eau douce, neige, pergélisol

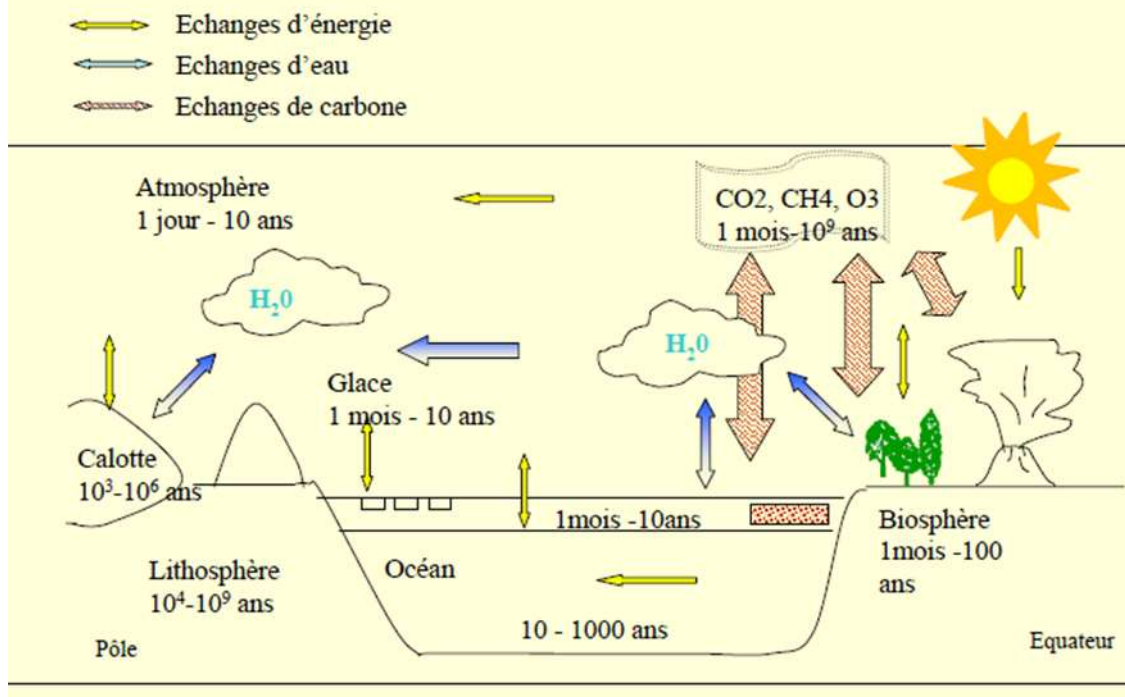
5.4. Biosphère

- Les organismes vivants qui habitent la Terre
- Plantes, animaux, bactéries, algues, etc.

5.5. Atmosphère

- La couche gazeuse qui entoure la Terre
- Redistribue la chaleur et l'humidité
- Fournit les éléments nécessaires à la vie

Complexité du système climatique



6. Notions d'échelle en climatologie

Il est nécessaire en climatologie de bien préciser l'échelle d'espace et l'échelle de temps choisi. Les valeurs représentatives des éléments du climat sont fonction de la période et du domaine spatial étudiés. Il est d'usage en climatologie de définir quatre échelles spatio-temporelle principales, associées à quatre termes désignant le climat:

L'échelle globale ou planétaire: associée au terme « climat global »:

Echelle de temps: 1 semaine et plus.

Echelle d'espace: 10 000 kilomètres à tout le globe.

Pour indiquer les processus et les phénomènes qui s'étendent sur toute l'atmosphère, on dit que ce sont des phénomènes à l'échelle hémisphérique ou à l'échelle globale. On peut citer comme exemple les changements saisonniers qui se produisent simultanément sur tout le globe, la circulation générale, l'échange d'énergie par rayonnement entre la Terre et l'espace qui l'entoure, etc.

La grande échelle ou échelle synoptique: associée au terme « climat régional »:

Echelle de temps: 12 heures à une semaine.

Echelle d'espace: 100 à 10 000 kilomètres.

Les phénomènes synoptiques ou à grande échelle sont, par exemple, des dépressions qui se déplacent avec leurs systèmes frontaux. L'extension de chaque climat régional est variable: elle dépend de la disposition du relief, de la proximité d'une zone océanique, etc.

La moyenne échelle ou méso-échelle: associée au terme « topo climat » ou « climat local »:

Echelle de temps: 1 à 12 heures.

Echelle d'espace: 1 à 100 kilomètres.

A cette échelle, le climat subit l'influence de la disposition géographique du relief ou topographie. Les processus à échelle moyenne engendrent des orages et des tornades ainsi que des phénomènes tels que la brise de Terre et la brise de mer ou encore la formation de nuages lenticulaires au sommet des pics montagneux.

La petite échelle ou micro échelle: associée au terme « microclimat » :

Echelle de temps: 1 seconde à 1 heure.

Echelle d'espace: inférieure à un kilomètre.

Les phénomènes qui peuvent être observés en un lieu donné sont des phénomènes à petite échelle: échauffement ou refroidissement sur la paroi d'un bâtiment, évaporation au-dessus d'un bassin qui modifie les caractéristiques de la masse d'air sus adjacente, refroidissement au-dessous d'un arbre le jour quand l'air est calme, turbulence mécanique engendrée par un bosquet, etc.

7. Réchauffement climatique

Le réchauffement climatique est un phénomène global de transformation du climat caractérisé par une augmentation générale des températures moyennes (notamment liée aux activités humaines), et qui modifie durablement les équilibres météorologiques et les écosystèmes. Lorsque l'on parle du réchauffement climatique aujourd'hui, il s'agit du phénomène d'augmentation des températures qui se produit sur Terre depuis 100 à 150 ans. Depuis le début de la Révolution Industrielle, les températures moyennes sur terre ont en effet augmenté plus ou moins régulièrement. En 2016, la température moyenne sur la planète terre était environ 1 à 1.5 degrés au-dessus des températures moyennes de l'ère préindustrielle (avant 1850).

8. Changement climatique

Désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement. Certaines formes de pollution de l'air, résultant d'activités humaines, menacent de modifier sensiblement le climat, dans le sens d'un réchauffement global. Ce phénomène peut entraîner des dommages importants : élévation du niveau des mers, accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses,

inondations, cyclones, ...), déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce, difficultés agricoles, désertification, réduction de la biodiversité, extension des maladies tropicales, etc.

Selon le GIEC (1995), ce changement climatique s'accompagnerait :

- d'une perturbation du cycle de l'eau,
- d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles d'origine climatique (sécheresses, inondations, tempêtes, cyclones),
- d'une menace de disparition de certains espaces côtiers, en particulier les deltas, les mangroves, les récifs coralliens, les plages d'Aquitaine, etc.
- d'une diminution de 17,5 % de la superficie émergée du Bangladesh, de 1 % de celle de l'Egypte,
- favoriserait la recrudescence du paludisme, et l'extension de maladies infectieuses comme la salmonellose ou le choléra,
- accélérerait la baisse de la biodiversité : disparition d'espèces animales ou végétales,

Chapitre II : Facteurs et paramètres climatiques

1. Définitions

Les éléments du climat: 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 de nuages.

D'autres éléments interviennent dans la caractérisation climatique mais ne font pas l'objet de relevés systématiques dans les stations météorologiques: champ électrique de l'atmosphère, radioactivité de l'air, sa composition chimique, sa teneur en micro-organismes, etc.

Les facteurs du climat: ceux sont des facteurs qui agissent sur la variabilité des éléments du climat. On distingue:

Les facteurs astronomiques : qui font intervenir la rotation de la Terre sur elle-même et autour du 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 anthropogéniques : parmi lesquels le rejet de gaz carbonique dans l'atmosphère tient un rôle important.

2. Facteurs climatiques

Les phénomènes qui intéressent le temps (et donc le climat) d'une manière directe siègent dans les 10 premiers kilomètres de l'atmosphère à partir du niveau sol. L'ensemble des phénomènes qui influencent le climat directement ou indirectement se manifeste dans les 40 premiers kilomètres. A cause de l'effet de la pesanteur, 50% du poids de l'atmosphère se trouve dans les 5 premiers kilomètres qui englobent 90% de la vapeur d'eau existante dans l'atmosphère.

I. Composition de l'air:

a) l'air sec: L'air sec est composé essentiellement d'Azote (78,09%) et d'Oxygène (20.95%). Le un pour cent restant comporte d'autres gaz, tel que : Argon, Anhydride carbonique, Néon, Hélium, Krypton, Hydrogène, Xénon, Ozone et le Radon. La composition de l'air sec est pratiquement constante en termes de proportion jusqu'à une altitude de 80 kilomètre. Cependant on note que:

- ☐ la teneur de l'air en gaz carbonique est très variable, elle dépend de l'activité industrielle dans les basses couches,

- ☐ la proportion d'Ozone au voisinage de la mer est très faible, elle devient plus importante en altitude dans la couche d'Ozone qui s'étend en moyenne entre 15 et 40 kilomètres

b) la vapeur d'eau: Le pourcentage de la vapeur d'eau dans l'air est très variable dans le temps et dans l'espace. Il dépend de plusieurs conditions. Mai le volume occupé par la vapeur d'eau ne peut dépasser 4 à 5%. On note par ailleurs que l'eau existe dans l'air sous ses autres formes: état solide et liquide constituant ainsi les divers types de nuages.

c) Les impuretés (pollution atmosphérique): Les impuretés dans l'atmosphère sont de deux sortes:

□ Les aérosols: les causes sont soit naturelles (vents de sable, poussière volcanique, pollen, ..) soit dues aux activités humaines (fumées d'usines, ...)

□ Les gaz polluants: anhydride sulfureux, oxyde de carbone, hydrocarbure, les Chloro-Fluoro-Carbones (CFCs), les Hydro-Fluoro-Carbones (HFCs), ...

II. La latitude et l'énergie solaire:

La radiation solaire est la première source d'énergie pour le système Terre - atmosphère. L'énergie solaire reçue sur un point de la Terre change en fonction de l'espace et du temps à cause:

- du mouvement de la Terre autour de son axe,
- et du mouvement de la Terre autour du soleil.

Ces deux mouvements engendrent:

a) une durée inégale des jours et des nuits:

Le vecteur directeur de l'axe de rotation de la Terre est fixe et forme avec le plan écliptique (plan de l'orbite de la Terre autour du soleil) un angle constant de $66^{\circ}33'$.

Ce qui donne que:

- à l'équateur: la durée du jour est égale à la durée de la nuit toute l'année,
- dans les autres régions, la durée du jour est différente de celle de la nuit, sauf aux équinoxes (21 Mars et 23 Septembre). Cependant on note que:

- sur la zone tropicale (entre les tropiques du Cancer [$23^{\circ}27'$ Sud] et du Capricorne [$23^{\circ}27'$ Nord]), il y a peu de variation entre la durée du jour et celle de nuit,

- sur les zones tempérées (entre $23^{\circ}27'$ et $66^{\circ}33'$): l'inégalité entre la durée du jour et celle de la nuit augmente en fonction de la latitude

- sur les zones glaciales (arctique: pôle nord, et antarctique: pôle sud): on parle du jour polaire et de nuit polaire qui durent aux pôles 6 mois chacun.

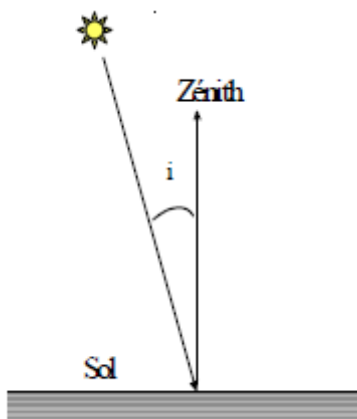
b) une incidence variable des rayons solaires: i

Soit i: l'angle d'incidence et w: la quantité d'énergie reçue sur le sol horizontal

- w est proportionnel à $\cos(i)$,
- la masse de l'atmosphère traversée est proportionnelle à l'angle i ,
- à midi on a : - à l'équateur: $i=0^\circ$ aux équinoxes et $i \leq 23^\circ 27'$ au cours de l'année,
- au pôle nord: $i=90^\circ$ (w est donc nul) aux équinoxes, il descend à $66^\circ 33'$ pendant l'été. Pendant l'hiver w est négatif.

c) une distance Terre - Soleil variable: (à cause de la forme elliptique de l'orbite de la Terre autour du soleil). On note que:

- La Terre reçoit 7% moins d'énergie en Juillet qu'en Janvier,
- La durée de l'hiver boréal (i.e. été austral) dépasse de 7.5 jours celle de l'été boréal (i.e. hiver austral).



III. Le bilan général de la radiation solaire :

La radiation solaire est l'énergie transmise, par rayonnement solaire, au globe Terrestre et à son atmosphère.

On distingue:

a) *le bilan radiatif global* : qui est nul

Ce qui explique que le système "Terre - Atmosphère" est en équilibre énergétique et donc le climat global de la Terre est stable vis à vis des échanges énergétiques entre le système "Terre - Atmosphère" et son extérieur.

$$S + R + T = 0$$

Avec :

S: rayonnement solaire incident reçu sur la surface sommet de l'atmosphère

$S = 175$ milliard de Mégawatts, $= 343 \text{ Watts/m}^2$)

R: rayonnement solaire réfléchi, diffusé vers l'espace

$R = -53$ milliard de Mégawatts $= 30\%$ de S

T: rayonnement infrarouge Terrestre (rayonnement propre au globe Terrestre)

$T = -122$ milliard de Mégawatts $= 70\%$ S)

Remarques:

□ le bilan radiatif à un instant donné en un point donné du globe n'est pas nul. En effet:

S: dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires (i) qui varie en fonction de la latitude, la saison et l'heure du jour. i peut être calculé mathématiquement.

R: dépend de la couverture végétale, de la composition de l'atmosphère et de la réflectivité du sol (mesurée par l'albédo)

T: dépend de la matière

□ En moyenne annuelle, le bilan radiatif est positif aux basses latitudes [40 Sud, 40 Nord] et négatif près des pôles.

b) *la radiation solaire totale: (S)*

La radiation solaire totale reçue par le système "Terre - Atmosphère" est répartie en

- ① Radiation solaire absorbée par la Terre: cette radiation est formée d'une partie du rayonnement solaire direct (34%) et d'une partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère (17%)
- ② Radiation solaire absorbée par l'atmosphère (14% de S)
- ③ Radiation solaire diffusée vers l'espace (35% de S dont 27% dus aux nuages, 6% dus aux rayonnements diffusés par l'atmosphère vers l'espace et 2% dus à l'albédo)

c) Le rayonnement global (qui intéresse le sol) = le rayonnement solaire direct + rayonnement diffusé par l'atmosphère.

d) L'albédo: le rapport, exprimé en pourcentage, entre le flux d'énergie non absorbée par le sol sur le flux d'énergie incident.

L'albédo dépend en premier lieu des caractéristiques de la surface du sol et du rayonnement (intensité et angle). Il est de l'ordre de 80 à 90% pour la neige fraîche, 13 à 18% pour le sable et 7 à 9% pour un sol cultivé et végétation.

IV. La nature de la surface du sol et de son revêtement :

Comme facteur du climat, la surface du sol se caractérise par: son albédo, sa capacité calorifique, son degré d'humidité et de perméabilité, sa couleur, son revêtement végétal, son exposition, son orientation et sa forme. Ces éléments interviennent dans les échanges d'énergie calorifique et d'humidité entre l'atmosphère et la Terre.

Il est à noter que:

- ☐ Le sol présente une faible conductivité thermique: seule la couche superficielle qui s'échauffe puis cède sa chaleur à l'atmosphère (par contact, par conductivité et par rayonnement).
- ☐ La température au voisinage du sol est commandée essentiellement par les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère.
- ☐ La végétation qui recouvre le sol réduit l'échauffement (le jour) ainsi que le refroidissement du sol (la nuit). Ce qui donne une amplitude diurne de température moins importante pour un sol couvert que pour un sol nu.
- ☐ La température des mers s'élève et s'abaisse plus lentement que celle du sol, ce qui donne naissance aux phénomènes de brise de mer et de brise de terre et fait que les mers jouent un rôle de régulateur du climat pour les zones voisines (brassage de l'air entre la terre et la mer), mais aussi à l'échelle globale: on rappelle que la surface du globe est constituée de 71% de mer et de 29% de terre. Cette répartition devient (respectivement) 60% et 40% pour l'hémisphère nord et 82% et 18% pour l'hémisphère sud.
- ☐ L'amplitude thermique $T_x - T_n$ est plus faible près des mers que loin d'elles.

V. Le facteur "évolution de l'eau dans l'atmosphère" :

Il est bien connu que l'eau suit un cycle de vie en passant par ses différentes phases (état gazeux, liquide, solide). La transformation de l'eau d'un état à un autre est accompagnée d'un échange d'énergie entre l'air et l'eau dans l'atmosphère. On cite par exemple:

- ☐ Le processus d'évaporation permet à l'air de perdre sa chaleur reçue par rayonnement. Ce processus fait que les zones tropicales seraient moins chaudes que s'il n'y a pas de mers.
- ☐ Le processus de condensation permet à l'air de gagner de la chaleur. Ce processus fait que les zones de haute latitude seraient moins froides que si la vapeur d'eau ne leur arrive pas (grâce à la circulation atmosphérique générale)
- ☐ Par analogie, les autres processus d'évolution de l'eau dans l'atmosphère permettent des échanges énergétiques entre l'eau et l'atmosphère: fusion, solidification, sublimation, ...

La vapeur d'eau transporte l'énergie calorifique et absorbe le rayonnement solaire et le rayonnement Terrestre.

VI. Le facteur "relief" :

A un accroissement d'altitude correspond une diminution de pression et de température et une modification des précipitations. Par ailleurs, les courants aériens sont perturbés par le relief à cause du frottement et génèrent des actions thermiques (effet des turbulences sur la température, ..) et des actions dynamiques qui dépendent de la forme du relief, la vitesse et la direction du courant ainsi que la stabilité de l'air.

On note au passage :

- ☐ Le phénomène bien connu sous le nom: effet de Foehn: un mouvement ascendant provoqué par la pente entraîne la condensation de la vapeur d'eau ...
- ☐ L'augmentation de la vitesse du vent dans le cas de vallée de plus en plus étroite dans le sens de la direction du vent.

VII. Le facteur "circulation générale atmosphérique" :

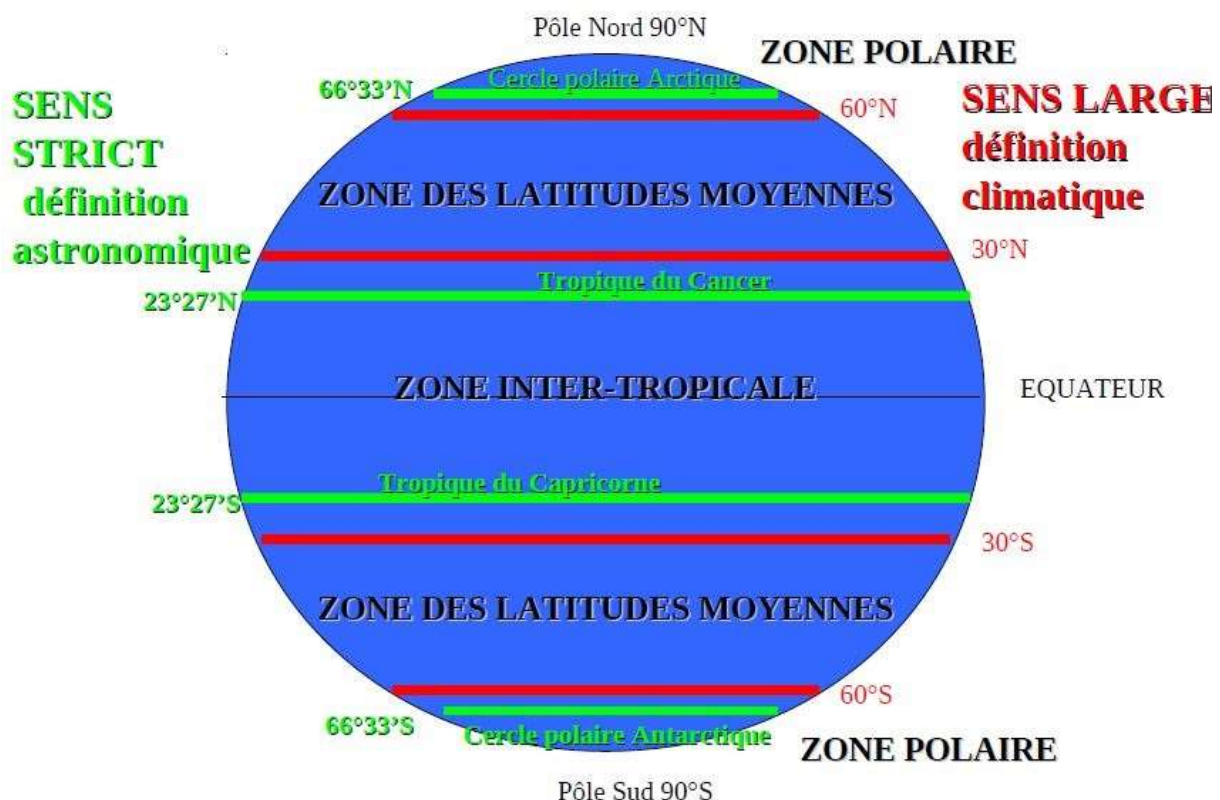
La circulation générale atmosphérique a pour effets:

- La modification de la répartition des masses nuageuses et des constituants de l'atmosphère (essentiellement la vapeur d'eau)
- Le rétablissement de l'équilibre thermique entre les différents points de la Terre grâce au mouvement de l'air et au transport de l'énergie par la vapeur d'eau.

Les causes principales qui provoquent et maintiennent la circulation générale atmosphérique sont:

- La rotation de la Terre
- L'inégalité du bilan thermique à la surface Terrestre
- (+ la distribution des mers et des continents, + les influences géographiques, ...)

LES GRANDES ZONES CLIMATIQUES



3. Paramètres climatiques

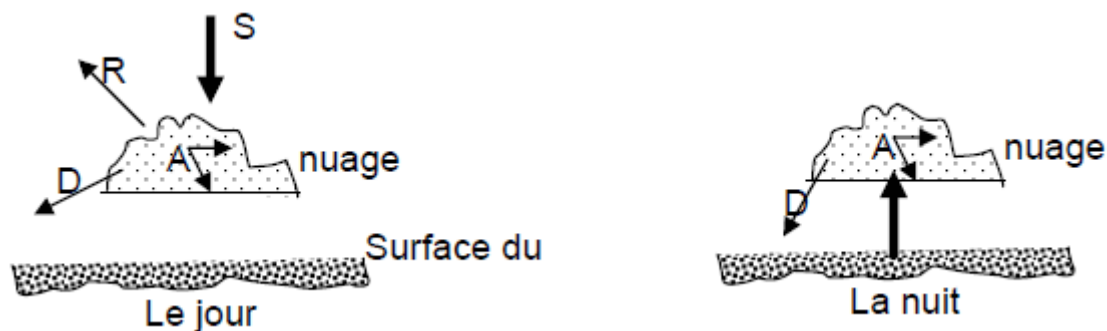
I. Le rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est caractérisé par la durée d'insolation et l'intensité de la radiation globale.

La durée d'insolation pour un jour donnée est fonction de la latitude du lieu de mesure et du jour de l'année. Elle peut être réduite par le relief, la nébulosité, la brume, le brouillard, la fumée dense, ...

II. La nébulosité:

Au cours de la journée et en contact avec une masse nuageuse, le rayonnement solaire (S) est réparti en rayonnement réfléchi (R), rayonnement diffus (D) et rayonnement absorbé (A) et donc seule une partie de l'énergie solaire atteint la surface du sol. Ainsi, au cours de la journée, un ciel nuageux permet la diminution du réchauffement de la surface Terrestre.



Au cours de la nuit, un ciel nuageux permet la réduction de la perte d'énergie de la Terre par rayonnement infra - rouge et donc diminution du refroidissement de la Terre.

III. La température de l'air:

La température de l'air usuelle est la température de l'air mesurée à l'ombre, dans un abri météorologique, à une altitude de 1m50. Le choix de ce niveau d'altitude revient au fait que l'air s'échauffe en contact direct avec le sol. Ainsi, la température de l'air est maximale près du sol; elle s'affaiblit en altitude avec un gradient fort près du sol. Ce gradient devient nul près de 1m50. Dans les premières couches d'air au-dessus du sol, la température du sol est supérieure à celle de l'air pendant le jour et inférieure pendant la nuit.

Remarques:

- ☐ Si la mesure de T est faite au soleil, on risque de mesurer la température du matériel thermomètre.
- ☐ La T_{min} se produit vers le lever du soleil (ou peu après le lever du soleil [une demi-heure]).
- ☐ La T_{max} se produit deux heures après le méridien (le midi soleil).

□ La température de l'air sous abri ne correspond pas étroitement aux sensations de chaleur (ou du froid) par les êtres vivants (l'homme par exemple). Cette sensation est, certes, liée à la température, mais aussi à l'humidité, vent, ... (i.e. indice de confort)

□ Nombreux facteurs agissent sur la variation diurne de la température; on peut citer la nébulosité, l'altitude, la latitude, la saison, la nature du sol, le relief avec toutes ses caractéristiques (forme, exposition, orientation), le degré de continentalité, l'état de l'atmosphère.

□ L'amplitude thermique annuelle augmente en fonction de la latitude.

IV. Les précipitations:

Les précipitations constituent avec la température les éléments les plus importants qui définissent le climat d'un lieu donné. Ils ont une grande influence sur la vie de l'homme et des animaux ainsi que sur les économies des pays.

D'après certains auteurs, rien qu'avec le cumul annuel des précipitations on peut classer les climats en:

- climat désertique : $RR < 120 \text{ mm}$
- climat aride : $120 \text{ mm} < RR < 250 \text{ mm}$
- climat semi-aride : $250 \text{ mm} < RR < 500 \text{ mm}$
- climat modérément humide : $500 \text{ mm} < RR < 1000 \text{ mm}$
- climat humide : $1000 \text{ mm} < RR < 2000 \text{ mm}$
- climat excessivement humide: $RR > 2000 \text{ mm}$

Mais les précipitations sont caractérisées non seulement par leur quantité, mais aussi par: leur nature physique (pluie, neige, grêle, grésil), leur fréquence (une fois par ans ou 100 fois par an?!), leur durée de chute (dix minute ou 24 heures?!), leur intensité (10mm/heure ou 100mm/heure?!), leur répartition dans le temps (exp. jours successifs) et dans l'espace (échelle locale ou synoptique?!). Cet ensemble de caractéristiques influence sur l'absorption du sol, le drainage, les crues des cours d'eau, l'utilité agricole, la sécurité humaine, etc.

Remarques: (en général)

□ Les quantités des précipitations augmentent en se rapprochant de la mer (à latitude égale)

☐ Elles augmentent avec l'altitude: les cartes des précipitations coïncident avec celles hypsométriques (cartes d'altitude).

☐ Au relief, les versants "au vent" sont plus arrosés que les versants "sous le vent" (pour des pentes assez élevées. Bien entendu, pour des vents apportant de l'air humide.

☐ La distribution des précipitations à la surface du globe est caractérisée par:

- entre 20S et 20N : fortes précipitations (1500 mm - 3000 mm)

- entre 20 et 30° latitude : zones sèches (< 200 mm) avec quelques régions pluvieuses.

- entre 30 et 40° latitude : entre 400 et 800 mm

- aux hautes latitudes > 70°: faibles précipitations (< 200 mm)

V. Evaporation:

L'évaporation concerne aussi bien les précipitations qui arrivent au sol que l'eau contenu dans le sol. Elle a un rôle biologique puisqu'elle influence la respiration et la transpiration. Elle est liée à différents facteurs tel que: la température (même sens de variation), humidité relative, pression, mouvement de l'air (vent, turbulence), forme et dimension de la surface d'évaporation, épaisseur de la lame d'eau.

L'évaporation peut être estimée à partir de la vitesse du vent, la radiation solaire, la tension de vapeur d'eau, etc. ...

Remarques:

☐ L'évaporation augmente si l'air est peu humide et plus agité.

☐ L'évaporation provoque la formation du brouillard et des nuages,

VI. L'humidité de l'air:

Elle s'exprime par la tension de la vapeur d'eau (e) et par l'humidité relative (U: exprimée en pourcentage [degré hygrométrique])

La variation de U et de e en fonction du temps et de l'espace est très complexe, mais en général:

☐ e et U ont une distribution zonale,

□ $e = 20$ mm de mercure dans les zones équatoriales; $e < 5$ mm dans les zones polaires.

□ U est de l'ordre de 85% sur les zones équatoriales, très faible sur les zones subtropicales (notamment sur les zones continentales) et élevée dans les moyennes latitudes et dépend de la saison.

VII. La pression atmosphérique:

La pression est le poids de la colonne d'air qui surmonte l'unité de surface sur laquelle elle s'exerce. Sa variation temporelle est liée à celle de la température et son gradient génère le vent (force et direction).

VIII. Le vent:

Le vent est le résultat de la différence de pression entre deux zones voisines. Il provoque le déplacement des masses d'air et transporte ainsi les caractères climatiques. On rappelle par exemple les moussons indiennes qui sont de deux sortes: les moussons humides et pluvieuses dont l'air circule de l'océan vers le continent et les moussons sèches dont l'air circule du continent vers l'océan.

Remarque:

Un vent fort, en contact avec la surface de l'eau ou du corps humain favorise le phénomène de l'évaporation (l'énergie cinétique est perdue en chaleur).

IX. La transparence de l'air (ou la visibilité horizontale):

Elle change en fonction de l'humidité de l'air, sa pureté et sa stabilité. Ainsi une diminution de la visibilité est produite par l'absorption et la diffusion de la lumière (par les constituants de l'atmosphère).

On météorologie, on parle de brouillard lorsque la visibilité est inférieure à 1000 m et de brume lorsqu'elle est comprise entre 1000m et 5000m. La stabilité de l'atmosphère, en présence d'un air humide ou impure, favorise une mauvaise visibilité.

Chapitre III : Identification des étages bioclimatiques

Définitions

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. En 1943, Emberger écrivait « ... il n'est pas douteux que climat et végétation sont solidaires comme force et matière, mais il est clair qu'avant d'affirmer que telle ou telle espèce ou groupement permet de délimiter une aire aussi naturelle que les territoires climatiques, il faut **d'abord connaître le climat**, puis fixer les limites sur le terrain, et **alors seulement chercher les espèces**, qui à l'intérieur de l'aire délimitée, suivent le plus étroitement la frontière climatique... ». 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 laps de temps. Les éléments les plus couramment analysés sont les précipitations, les températures et l'évaporation pour établir le bilan de l'eau. On peut distinguer deux grands types d'indices selon leur finalité : les indices climatiques globaux et les indices climatiques de production

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 sont valables globalement pour la zone de représentativité du poste considéré. Ils ont été tout d'abord utilisés pour classer et cartographier les climats selon leur aridité par les hydrologues et les géomorphologues (Köppen, Lang, De Martonne, Rubner, Gaussen et Bagnouls, Walter et Lieth, Moral...) puis par les botanistes et écologues (Emberger, Thornthwaite...). 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 ; 37

Les indices climatiques de production sont destinés à permettre une estimation de la production d'un type de culture pour une période et dans une zone donnée. Dans ces indices, il existe un modèle climatique sous-jacent nécessitant l'introduction des principaux facteurs qui affectent la croissance des plantes (T, P, durée du jour, rayonnement global, évapotranspiration...).

Un indice climatique est une donc combinaison d'au moins deux valeurs numériques sur l'état de l'atmosphère pour caractériser le climat d'un lieu, en vue de la classification à l'échelle planétaire ou pour des applications spécifiques. Ces indices caractérisent le complexe chaleur-eau, c'est-à-dire, en fait, le facteur sécheresse ou l'aridité. Ils expriment la résultante utile des climats. En désignant par P le pouvoir humidifiant d'un climat et par E son pouvoir desséchant ou évaporant, on peut envisager soit le rapport P/E, soit la différence P-E, soit enfin le rapport : $(P-E) / E$ (Curé 1945). En climatologie, on a surtout utilisé les formules se rattachant au premier groupe.

1. Une représentation graphique simple : les climatogrammes

On entend par régime pluviométrique, en un lieu donné, la répartition de la moyenne dun cumul annuel des précipitations entre les différents mois de l'année (Choisnel et Jacq 1998). Il est généralement représenté par un diagramme indiquant, pour chaque mois, de janvier à décembre, les hauteurs de précipitations moyennes (ou médianes) mensuelles. La notion de régime pluviométrique ne se réfère donc qu'aux caractères du climat moyen, et ne rend pas compte de la variabilité d'une année à l'autre de la pluviométrie en un lieu donné et pour un mois donné. Les climogrammes (climatogrammes = phytoclimogrammes) sont des simples graphiques établis, dans la plupart des cas, à partir des moyennes mensuelles de température (axe des X) et de pluviométrie (axe des Y). Ces représentations ont l'avantage de rendre plus frappantes les variations des phénomènes que l'on étudie, de faciliter les comparaisons et de faire apparaître les contrastes. Par leur forme, ils permettent de caractériser facilement des climats à saisonnalités thermique, pluviométrique, pluviothermique, voire sans saison. Les climatogrammes permettent également de définir les formations végétales et les espèces par les bioclimats et les situer dans des classes d'amplitude.

2. Les indices climatiques fondés sur les données de précipitations (P) et/ou de températures (T)

2.1. L'indice de continentalité pluviométrique d'Angot (1906)

Cet indice ne fait intervenir que les précipitations mensuelles et caractérise le degré de continentalité pluviale des sites

$$\text{Formule : } I_A = \frac{\sum P(6 \text{ mois les plus chauds})}{\sum P(6 \text{ mois les plus froids})}$$

2.2. L'indice de continentalité thermique de Gorczinski (1920) (modifié Daget 1968)

Il caractérise la continentalité thermique des sites par la concentration estivale des températures. On peut l'utiliser avec le coefficient d'Angot pour avoir une idée des variations pluviothermiques selon le degré de continentalité.

$$\text{Formule : } K' = \frac{1,74}{\sin(\gamma + 10 + 9h)} - 14$$

Avec :

A = amplitude thermique annuelle moyenne en °C

γ = latitude en °

h = altitude en kilomètres

Un climat est continental ou semi-continental quand I_A est supérieur à 1 et K' supérieur à 25.

En climat tempéré axérique (Europe du Nord par exemple), les deux continentalités sont associées et la continentalité thermique est particulièrement déterminante au niveau biologique, les fortes amplitudes thermiques annuelles étant conditionnées avant tout par la rigueur hivernale. En climat méditerranéen, la continentalité pluviale est toujours inférieure à 1 en raison de la forte sécheresse estivale. Par contre, au niveau thermique, ce climat étant par nature contrasté, les amplitudes annuelles sont importantes mais, comme elles dépendent avant tout de l'importance des températures estivales, elles sont peu déterminantes pour la végétation en tant que facteur thermique. En revanche, elles jouent un rôle important dans l'accentuation de l'aridité comme a pu le montrer Emberger avec son quotient pluviothermique

2.3. Facteurs de pluie de Lang (1915-1920)

C'est le premier indice combinant les précipitations (en mm) et les températures moyennes mensuelles ou annuelles (en °C). Il s'écrit simplement :

$$\text{Formule : } I_L = \frac{P}{T}$$

Les valeurs inférieures à 1 correspondent aux déserts, celles entre 1 et 2 aux steppes et celles supérieures à 2 aux régions arborescentes. Le quotient de végétation de Cieslar (1937) considère des intervalles de deux mois pendant la période végétative. Pour son facteur réduit de pluie, Albert (1928) ne considère que l'intervalle de temps où la température est supérieure à 0°C, son facteur de pluie réduit n'est qu'une modalité du facteur de Lang.

2.4. Le coefficient pluviométrique relatif d'Angot (q)

Pour mettre en évidence les régimes pluviométriques, la méthode la plus simple consiste à dresser des graphiques où sont reportées les hauteurs moyennes mensuelles des précipitations. Mais, d'une station à l'autre, les différences considérables dans le total annuel rendent les comparaisons difficiles et l'inégalité de la durée des mois fausse un peu les résultats. Le coefficient pluviométrique permet de pallier à ces deux inconvénients en exprimant le caractère plus ou moins pluvieux du mois considéré dans l'ensemble de l'année. Pour chaque mois, la valeur moyenne observée est rapportée à ce que serait la hauteur mensuelle d'eau si les pluies étaient distribuées de façon rigoureusement égale pour chaque jour de l'année.

P = total annuel.....

p = total mensuel d'un mois de 30 jours Valeur de référence d'un mois de 30 jours p=

$P \times 30 / 365$

La valeur du coefficient q pour le mois est : $q = p/p$

Selon le mois, cette valeur sera inférieure ou supérieure à 1, mais la somme des 12 coefficients doit être égale à 12. La notion de régime pluviométrique repose sur les moyennes et ne peut donc pas s'appliquer dans les régions où la variabilité des précipitations devient très grande (zones arides pour lesquelles des années sans pluie peuvent se succéder). Dans des zones plus tempérées, ce coefficient permet d'opposer des climats à saisons bien tranchées et des climats où les précipitations se font tout au long de l'année avec de simples nuances

saisonniers (exemples ci-dessous). Dans la pratique, le calcul de ce coefficient s'effectue à l'aide de formules appropriées. Si les mois étaient tous égaux, on aurait $q = 12p/P$ d'où pour les mois de :

31 jours ($31/365 = 0.085$) ... $q = p/0.085P \Rightarrow q = 11.76 p/P$

30 jours ($30/365 = 0.082$) ... $q = p/0.082P \Rightarrow q' = 12.19 p/P$

28 jours ($28/365 = 0.077$) ... $q = p/0.077P \Rightarrow q'' = 12.99 p/P$

L'intérêt majeur de ce coefficient est de rendre comparable entre elles les répartitions saisonnières des pluies dans des postes où celles-ci diffèrent considérablement en valeur absolue. Un mois recevant 60 mm de pluie dans un site où le total annuel dépasse 2000 mm sera considéré comme sec alors qu'il sera qualifié d'humide dans une station avec 400 mm de pluie annuelle. L'inconvénient de cette représentation est que l'on perd l'information sur les conséquences physiques ou physiologiques de la valeur réelle des précipitations

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

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, De Martonne a défini comme fonction climatologique nouvelle l'indice d'aridité du climat par le quotient $IDM = P/(T+10)$ (Coutagne 1943). 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. On notera l'ingéniosité de la méthode, qui, à première vue, un peu déconcertante par les raisons qui ont fait ajouter 10 à la température- (pourquoi pas 7, ou 8 ou 12 ?), a conduit à une expression essentiellement empirique, mais intuitivement très satisfaisante, ayant une valeur hydrographique et climatologique indéniable (Coutagne 1943). De fait de sa simplicité, il a été beaucoup utilisé par les géographes.

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.

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

Valeur de IDM	Type de climat	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

Les climats sont tout d'abord parfaitement ordonnés selon leurs caractères thermiques, en fonction de la latitude croissante, climats méditerranéens, tempérés et froids puis 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.

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

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

2.7. 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.

Formule :

$$I_M = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} \quad \begin{array}{l} I_M < 1 \dots \text{climat sec} \\ I_M > 1 \dots \text{climat humide} \end{array}$$

2.8. 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.

Formule et sa signification

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

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

Valeurs de l'indice	Signification
$I < 1$	type sahélien (arbres rares, xérophiles spécialisés)
$1 < I < 2$	type soudanien (formation plus dense, savane)
$2 < I < 3$	type à forêt instable (formation plus dense mais instable)
$3 < I < 7,5$	type forêt mésophile (formation dense, arbre de grande taille)
$I > 7,5$	type forêt hygrophile (« rain forest »)

2.9. Indices de Gaussen et Bagnouls (1952)

2.9.1. Indices et diagrammes ombrothermiques

C'est encore à l'heure actuelle un des indices les plus utilisés. Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et de la température (T en °C) et donne une expression relative de la sécheresse estivale en durée et en intensité. Celle-ci est

appréciée à travers un indice de sécheresse S (=indice ombrothermique) calculé en faisant la différence entre les courbes P et T pour le ou les mois les plus secs.

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 (valeur de l'intégrale). Pour les basses latitudes, Birot préfère qualifier de sec un mois pendant lequel $P < 4T$. Moral a, quant à lui , établi non pas deux mais quatre types de mois :

- Mois pluvieux : $p \geq 0.1t^2 + t + 30$
- Mois humide : $0.1t^2 + t + 30 > p \geq 0.1t^2 - t + 20$
- Mois sec : $0.1t^2 - t + 20 > p \geq 0.05t^2 - t + 10$
- Mois aride : $p < 0.05t^2 - t + 10$

2.9.2. 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. Le facteur de pluie pris en compte est le produit du nombre de jours de pluie par an (n) par le cumul moyen annuel (P).

$$Q_E = \frac{P}{2 \left[\left(\frac{M+m}{2} \right) (M-m) \right]} \times 100 = \frac{100P}{M^2 - m^2}$$

Un climat méditerranéen est d'autant moins sec que le quotient est grand. Il est également très important de noter que, à quotient équivalent, celui-ci à une valeur écologique différente selon les valeurs des températures qui y interviennent. La valeur m est une différentielle très importante. Elle est un seuil biologique. D'une manière générale, elle exprime assez bien le degré et la durée de la période critique des gelées, car plus m est bas, plus celles-ci sont sévères. Pour en tenir compte, il est indispensable de combiner QE avec m (Abaque de Sauvage). Cet abaque dû à Sauvage permet de placer une station dans l'une des cinq classes de climat méditerranéen qui ont été définies.

Le climat méditerranéen peut être divisé en **trois faciès** selon la valeur de m :

- Faciès froid : $m < -1$
- Faciès moyen : $-1 < m < 2$
- Faciès chaud : $m > 2$

et cinq formes selon la valeur de QE. Pour le faciès moyen, la valeur prise par QE varie de :

- $QE < 12$ Saharien ou désertique $P < 100$ mm/an
- $12 < QE < 30$ Aride $100 < P < 300$ mm/an
- $30 < QE < 60$ Semi-aride $300 < P < 600$ mm/an
- $60 < QE < 100$... Sub humide $600 < P < 900$ mm/an
- $QE > 100$ Humide $P > 900$ mm/an

Chapitre IV : Indices de changement climatique

Le groupe de l'ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) définit un certain nombre d'indices nommés indices des extrêmes climatiques. Ces indices sont utilisés pour surveiller le changement climatique par le suivi de l'évolution des extrêmes climatiques.

Indices des extrêmes climatiques définis par l'ETCCDI

1. Indices extrêmes de précipitations

Identification	Noms de l'indice	Définition	Unité
1-PRCPTOT	Total annuel des pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($RR \geq 1,0$ mm)	mm
2-RX1day	Hauteur maximale des Précipitations d'un jour	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	mm
3-Rx5day	Cumul maximal des précipitations de 5 jours	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
4-R10	Nombre de jours de précipitations ≥ 10 mm	Nombre de jours de l'année avec précipitation ≥ 10 mm	jour
5-R20	Nombre de jours de précipitations ≥ 20 mm	Nombre de jours de l'année avec précipitations ≥ 20 mm	jour
6-R25	Nombre de jours au-dessus du 25 millimètre	Compte le nombre de jours dans l'année dont la valeur est au-dessus du seuil fixé par le décideur	jours
7-R95p	Jours très pluvieux	Précipitation totale annuelle avec précipitation > 95 e percentile	mm
8-R99p	Jours extrêmement pluvieux	Précipitations totales annuelles avec les précipitations > 99 e percentile	mm
9-SDII	Intensité simple des pluies	Total annuel des précipitations sur le nombre des jours pluvieux ($PRCP \geq 1,0$ mm)	mm/jour
10-CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 1 mm	jour
11-CWD	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm	jour

2. Indices extrêmes de précipitations

12-FDO*	Jours de gel	Compte le nombre de jours dans l'année quand la TN (minimum journalière) < 0°C	Jours
13-SU25*	Jours d'été	Compte le nombre de jours dans l'année quand la TX (maximum journalière) > 25°C	jours
14-IDO*	Jours de glace	Compte le nombre de jours dans l'année quand la TX (minimum journalière) < 0°C	jours
15-TR20*	Nuits tropicales	Compte le nombre de jours dans l'année quand la TX (minimum journalières) > 20°C	jours
16-GSL*	Longueur de saison de croissance	(à partir du 1er janvier au 31 décembre dans l'hémisphère Nord, du 1er juillet au 30 juin dans l'hémisphère Sud) compte le 1er jour de l'année quand le cumul de 6 jours consécutifs TG > 5°C et le premier jour de l'année dont la somme des températures est < 5°C (après le 1er juillet dans l'hémisphère Nord et le 1er janvier dans l'hémisphère sud)	Jours
17-TXx	Maximum des Tmax	Température maximale la plus élevée dans l'année	°C
18-TNX	Maximum des Tmin	Température minimale la plus forte dans l'année	°C
19-TXn	Minimum des Tmax	Température maximale la plus basse dans l'année	°C
20-TNn	Minimum des Tmin	Température minimale la plus basse dans l'année	°C
21-TN10p	Nuits relativement fraîches	Pourcentage des jours avec Tmin < 10ème Percentile	%jours
22-TX10p	Jours relativement frais	Pourcentage des jours avec Tmax < 10ème percentile	%jours
23-TN90p	Nuits relativement chaudes	Pourcentage des jours avec Tmin > 90ème percentile	%jours
24-TX90p	Jours relativement chauds	Pourcentage des jours avec Tmax > 90ème percentile	%jours
25-WSDI	Indicateur des durées des séquences chaudes	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où Tmax > 90e percentile	%jours
26-CSDI	Indicateur des durées des séquences fraîches	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où Tmin < 10e percentile	%jours
27-DTR	Amplitude Thermiques Diurne	Différence moyenne annuelle entre Tmax et Tmin	°C

Chapitre V : Ressources en eau et changement climatique

L'accès à une eau sûre est actuellement considéré comme un droit de l'homme universel. Cependant, le monde est confronté à une augmentation des problèmes liés à la fourniture de services hydrologiques, en particulier dans les pays en développement. Les raisons sont diverses et ne sont pas nécessairement liées au changement climatique. Un manque de disponibilité en eau, une demande en eau accrue et plus irrégulière résultant de la croissance démographique dans des zones concentrées, une augmentation de l'urbanisation, une utilisation plus intensive de l'eau pour améliorer le bien-être général, et le défi d'améliorer la gouvernance de l'eau sont déjà autant d'obstacles majeurs à la fourniture satisfaisante de services hydrologiques. Dans ce contexte, le changement climatique représente tout simplement une charge supplémentaire pour les services d'approvisionnement en eau ou pour tout organisme fournisseur de services hydrologiques souhaitant satisfaire la demande des clients. Il est difficile d'identifier localement les effets du changement climatique, mais les effets observés combinés à des projections fournissent une base utile pour préparer le futur.

1. Effets observés du changement climatique et incidences observées/possibles sur les services hydrologiques.

Effet observé	Incidences observées/possibles
Augmentation de la température atmosphérique	• Réduction de la disponibilité en eau dans les bassins alimentés par les glaciers qui reculent, comme observé dans des villes dans les Andes en Amérique du Sud (Ames, 1998; Kaser et Osmaston, 2002)
Augmentation de la température de l'eau de surface	• Réductions de la teneur en oxygène dissous, des configurations de mélange et de la capacité d'auto-épuration • Augmentation des fleurs d'eau
Élévation du niveau de la mer	• Salinisation des aquifères côtiers
Décalage du régime des précipitations	• Changement de la disponibilité en eau dû aux changements des précipitations et à d'autres phénomènes apparentés (notamment, l'alimentation des nappes souterraines et l'évapotranspiration)
Augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations	• Augmentation de la difficulté de la maîtrise des crues et de l'utilisation des réservoirs pendant la période des inondations
Augmentation de l'évapotranspiration	• Réduction de la disponibilité en eau • Salinisation des ressources en eau • Diminution du niveau des eaux souterraines
Augmentation de l'intensité et de la fréquence des phénomènes extrêmes	• Les crues influencent la qualité de l'eau et l'intégrité des infrastructures de l'eau et augmentent l'érosion fluviale, ce qui introduit différentes sortes de polluants dans les ressources en eau • Les sécheresses influencent la disponibilité et la qualité de l'eau

Une *réduction de la disponibilité en eau* peut être causée par:

- a) Une diminution de l'écoulement dans les bassins alimentés par les glaciers qui reculent et une augmentation de la durée et de la fréquence des saisons sèches;
- b) Une diminution des précipitations en été qui entraîne une réduction de l'eau stockée dans les réservoirs alimentés par des rivières saisonnières (du Plessis *et al.*, 2003);
- c) Une variabilité interannuelle des précipitations et un décalage saisonnier de l'écoulement fluvial;
- d) Une réduction du niveau des eaux souterraines à l'intérieur des terres;
- e) Une augmentation de l'évapotranspiration suite à l'augmentation de la température de l'air, au prolongement de la période de croissance et à l'augmentation de la consommation d'eau pour l'irrigation;
- f) La salinisation (Chen *et al.*, 2004). Selon les projections, le nombre de personnes risquant de souffrir d'une augmentation du stress hydrique sera compris entre 0,4 et 1,7 milliard à l'horizon 2020, entre 1,0 et 2,0 milliards à l'horizon 2050 et entre 1,1 et 3,2 milliards à l'horizon 2080 (Arnell, 2004), l' intervalle étant le résultat des différents scénarios SRES considérés.

Dans certaines régions, la faible disponibilité en eau entraînera une surexploitation des eaux souterraines qui s'accompagnera d'une augmentation des coûts de l'approvisionnement en eau quelle que soit l'utilisation, du fait de la nécessité de pomper l'eau de plus en plus profondément et loin. De surcroît, la surexploitation des eaux souterraines peut entraîner, dans certains cas, une dégradation de la qualité de l'eau. Dans certaines régions de l'Inde, du Bangladesh, de la Chine, du nord de l'Afrique, du Mexique et de l'Argentine, plus de 100 millions de personnes souffrent d'un empoisonnement à l'arsenic et de fluorose (maladie des dents ou des os consécutive à une consommation excessive de fluorure dans l'eau potable) (NU, 2003). Ce phénomène peut aggraver la situation si les personnes sont obligées d'utiliser davantage d'eau des nappes souterraines du fait que les sources d'eau de surface ne sont pas fiables.

L'augmentation de la pénurie d'eau, combinée à la hausse de la demande alimentaire ou de la consommation d'eau pour l'irrigation du fait de la hausse de la température, entraînera Les régions mal desservies par les infrastructures d'assainissement pourraient recourir à des

pratiques (en tant que nouvelle activité ou à un degré plus important) de réutilisation incontrôlée de l'eau (réutilisation d'eau polluée ou même d'eaux usées).

Dégradation de la qualité de l'eau suite à la variation des débits. Lorsqu'une réduction des ressources en eau est prévue, la concentration en polluants de l'eau augmente du fait de la diminution de la capacité de dilution. En même temps, l'augmentation du débit déplace et transporte divers composés du sol vers les ressources en eau via l'érosion fluviale.

Augmentation du ruissellement. Dans certaines régions, la disponibilité en eau augmentera, ce qui sera généralement avantageux compte tenu de la situation mondiale actuelle dans ce domaine. Cependant, il est nécessaire de prendre des dispositions pour que cela reste avantageux à l'échelle mondiale. Par exemple, tandis qu'une augmentation du ruissellement dans l'est et le sud de l'Asie devrait résulter du changement climatique, les pénuries d'eau dans ces régions pourraient ne pas être résolues du fait du manque de ressources pour l'investissement dans les nouvelles capacités de stockage nécessaires pour capturer l'eau supplémentaire et permettre son utilisation pendant la saison sèche.

Dégradation de la qualité de l'eau du fait de l'augmentation de la température. Des températures plus élevées, combinées à des concentrations en phosphore accrues dans les lacs et les réservoirs, favorisent les fleurs d'eau qui compromettent la qualité de l'eau en modifiant la couleur, l'odeur et le goût et en engendrant une éventuelle toxicité pour l'homme, le bétail, la faune et la flore. Le traitement de ces eaux polluées est coûteux avec les technologies disponibles, même pour les installations des pays développés (Environnement Canada, 2001). Des températures plus élevées de l'eau favorisent également le transfert de polluants volatils et semi-volatils (ammoniac, mercure, PCB (biphényles polychlorés), dioxines et pesticides) de l'eau et des eaux usées vers l'atmosphère.

Augmentation de la salinisation. La salinisation des approvisionnements en eau à partir des aquifères côtiers en raison de l'élévation du niveau de la mer est un problème important, étant donné que près d'un quart de la population mondiale vit dans des régions côtières qui sont généralement pauvres en eau et dont la croissance démographique est rapide (Small et Nicholls, 2003; Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). La salinisation peut également concerner les aquifères à l'intérieur des terres en raison d'une réduction de l'alimentation des nappes souterraines (Chen *et al.*, 2004).

2. Adaptation, vulnérabilité et développement durable

Dans le contexte des problèmes évoqués ci-dessus, il est important que les services hydrologiques situés dans les régions à risque planifient en conséquence. Les services hydrologiques sont généralement fournis via des réseaux aménagés. Ces réseaux sont conçus avec des facteurs de sécurité et ont une espérance de vie de 20 à 50 ans (cette durée peut être plus longue pour les réservoirs de stockage). Les examens de la résilience des approvisionnements en eau et de la performance des infrastructures de l'eau ont généralement été réalisés d'après les conditions observées uniquement. L'utilisation de projections climatiques devrait également être envisagée, en particulier dans des cas qui impliquent des réseaux qui sont confrontés à des crues et à des sécheresses.

Diminution de la disponibilité en eau. Hormis quelques pays industrialisés, la consommation d'eau augmente dans le monde entier du fait de la croissance démographique et économique, des changements de mode de vie et de l'extension des réseaux d'approvisionnement en eau.

Dégradation de la qualité de l'eau suite à des variations de débit. La protection des ressources en eau est une stratégie rentable et importante pour faire face aux problèmes futurs relatifs à la qualité de l'eau. Tandis que ces pratiques sont courantes dans certains pays, de nouvelles approches pour la gestion de la qualité de l'eau sont nécessaires dans le monde entier. Une telle approche est la mise en œuvre de plans pour la sécurité de l'eau permettant de réaliser une évaluation détaillée ainsi que la gestion des risques depuis le bassin hydrographique jusqu'au consommateur, telle que proposée par l'OMS (2005). De même, la conception et l'exploitation des usines de traitement des eaux et des eaux usées doivent être régulièrement revues, en particulier dans les zones vulnérables, pour garantir ou augmenter leur fiabilité et leur capacité à faire face à des variations de débit incertaines.

Dessalement. Les procédés de traitement de l'eau sont une solution pour traiter une concentration en sel accrue dans les lieux à risque, telles des zones côtières fortement urbanisées qui dépendent d'aquifères sensibles à l'intrusion d'eau salée. Actuellement, les technologies disponibles se fondent principalement sur les membranes et sont plus coûteuses que les procédés classiques de traitement des approvisionnements en eau douce. Le coût du dessalement est estimé à environ un dollar des États-Unis/m³ pour l'eau de mer et 0,60 dollar des États-Unis/m³ pour l'eau saumâtre (Zhou et Tol, 2005), tandis que la chloration de l'eau douce coûte 0,02 dollar des États-Unis/m³. Fort heureusement, le coût du dessalement diminue, même si sa demande énergétique est élevée. Il est nécessaire de comparer les coûts du dessalement aux coûts de l'extension des conduites et de la réimplantation éventuelle des

installations de traitement de l'eau pour assurer l'accès à l'eau douce. À titre indicatif, le coût de la construction des installations de captage et de traitement et des canalisations de pompage pour l'approvisionnement en eau d'un établissement urbain représente environ la moitié du coût de la totalité du réseau.

Approches complémentaires et approches différentes pour traiter les eaux usées. Des stratégies seront nécessaires pour faire face à des débits supérieurs et plus variables dans les systèmes d'assainissement et les usines de traitement des eaux usées. Ces stratégies devront inclure de nouvelles approches telles que l'utilisation de réseaux décentralisés, la construction de réseaux d'égouts distincts, le traitement de déversoirs d'orage (c'est-à-dire le mélange des eaux usées et du ruissellement dans les villes) et l'injection d'eau de pluie dans le sous-sol.

Gestion améliorée des ressources en eau. Tout en tenant compte des mesures d'adaptation déjà abordées, il convient d'envisager la gestion intégrée de l'eau comme un outil efficace, en prenant le changement climatique comme variable supplémentaire. La réduction ou l'augmentation de la variabilité de la disponibilité en eau entraîneront des conflits entre les divers utilisateurs de l'eau (agriculture, industries, écosystèmes et établissements humains). Les institutions qui gèrent l'affectation de l'eau joueront un rôle prépondérant dans la détermination de l'incidence sociale globale d'un changement de la disponibilité en eau, ainsi que de la distribution des gains et des pertes pour les différents secteurs de la société.

3. Typologie des stratégies d'adaptation dans le secteur de l'eau

Type de stratégie	Exemples de mesures
A - Accepter les risques et les pertes (ne rien faire)	1. Disparition de certains aquifères côtiers, zones humides ou zones d'agriculture pluviale 2. Inondation ou émission de zones péri-fluviales à faibles enjeux
B - Répartir les risques et les pertes	1. Mise en place de systèmes d'assurances et d'instruments de mutualisation financière contre les risques hydrométéorologiques 2. Diversification des sources d'approvisionnement en eau potable
C - Prévenir les effets : technologies et infrastructures (Hard)	● Augmentation de la capacité des retenues ● Augmentation des transferts interbassins ● Mise en œuvre de programmes d'amélioration de l'efficacité des usages ● Développement de systèmes de réutilisation des eaux usées et de dessalement ● Amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation, des réseaux d'AEP et d'assainissement ● Redimensionnement des infrastructures et des ouvrages (surélévation des barrages, exhaussement des digues, modification des infrastructures de transport fluvial, etc.) ● Construction de bâtiments résistants aux inondations
D - Prévenir les effets : réponses politiques, réglementaires et institutionnelles (Soft)	● Plan de gestion de la sécheresse ● Programme d'incitations financières à l'économie d'eau d'irrigation ● Modifications des normes de dimensionnement et des règles de fonctionnement des ouvrages ● Rationnement ● Normes ● Adoption de nouveaux modes de décision intégrant la gestion des incertitudes
E - Changer/Réorganiser les usages et les activités	● Réaffectation de la ressource vers des usages à plus forte valeur ajoutée ● Introduction de cultures plus économes en eau ou résistantes à la sécheresse ● Déplacement d'activités économiques et d'habitations en dehors de zones inondables
F - Recherche, valorisation de l'information climatique	● Amélioration des capacités de modélisation et de prévisions climatiques saisonnières, annuelles et décennales ● Développement d'outils d'aide à la décision et amélioration des méthodes d'évaluation des risques au niveau des bassins et sousbassins (couplage modèles climato/hydro) ● Définition des indicateurs pertinents de vulnérabilité et d'adaptation ● Mise en place des systèmes d'alerte précoce ● Production et mise à disposition facilitées de données climatiques auprès des décideurs, des services techniques et du grand public
G - Renforcement des capacités et éducation	● Elargissement des horizons de planification des décideurs ● Renforcement des capacités techniques des professionnels du secteur en matière de gestion des risques majeurs ● Sensibilisation et éducation citoyenne