



INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

MASTER II MAREMA

COURS D'HYDROMETEOROLOGIE

PROPOSÉ PAR : **MANDELA C. M. HOUNGNIBO**, IR. AGROMÉTÉOROLOGISTE À METEO BENIN

« Il n'y a pas de vie sans eau. Il est un trésor indispensable à toute activité humaine. » Charte européenne sur l'eau, 6 Mai 1968.

12 janvier 2021

Table des matières

Objectifs du cours	i
1 Introduction	1
1.1 Domaines d'application de l'hydrométéorologie	1
1.2 Définition et rappel de concepts	2
2 Cycle hydrologique ou cycle de l'eau	7
3 Précipitations	8
3.1 Mécanismes de formation des précipitations	9
3.2 Les différents types de précipitations	9
3.3 Mesures des précipitations	11
3.3.1 Les appareils à mesure directe	12
3.3.2 Les appareils à mesure indirecte	13
3.4 Utilisation des données de pluie	14
3.4.1 Estimation des données manquantes	14
3.4.2 Cohérence des séries de pluie	16
3.4.3 Cacul de la pluie moyenne sur un bassin versant	16
4 l'évaporation et l'évapotranspiration	22
4.1 L'évaporation (E)	22
4.2 La transpiration (T)	23
4.3 L'évapotranspiration (ET)	23
4.4 Mesures liées à l'estimation de l'évaporation et de l'évapotranspiration	23
4.4.1 Mesures de l'évaporation	23
4.4.2 Mesures de l'évapotranspiration	24
5 Ecoulements	25
5.1 Mesure des écoulements ou hydrométrie	26
6 Bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin versant	27
7 Risques hydrométéorologiques (Exposé sur Les inondations, les sécheresses et les fortes pluies par les étudiants)	27
8 Informations hydrométéorologiques disponibles au Bénin pour la surveillance et la prévention des risques hydrométéorologiques	27

9 Exemples d'analyses statistiques en hydrométéorologie	27
10 Documents consultés	27

Liste des figures

1	Structure verticale de l'atmosphère	3
2	Schéma d'un bassin versant	4
3	Les bassins versants du Bénin	5
4	Les bassins versants du Bénin	5
5	Cycle Hydrologique ou Cycle de l'eau	8
6	Principaux types de précipitations : convectives, orographiques et frontales	10
7	réseau pluviométrique national	11
8	Pluviomètre Classique SPIEA	12
9	Biais climatologique (2001-2010) de quelques produits d'estimation satellitaire en comparaison aux données du CRU (Climate Research Unit)	14
10	Estimation des données manquantes	15
11	Biais climatologique (2001-2010) de quelques produits d'estimation satellitaire en comparaison aux données du CRU (Climate Research Unit)	19
12	Bac classe	24

Liste des tableaux

Objectifs du cours

L'objectif principal de ce cours est d'enseigner les interactions entre l'hydrologie et la météorologie tout en se concentrant sur les processus clés, tels que les précipitations, l'évaporation et l'évapotranspiration, les écoulements des eaux... Un accent sera aussi mis sur les principaux risques hydrométéorologiques. Plus spécifiquement, à la fin de ce cours, l'étudiant sera capable :

- de décrire le cycle de l'eau ;
- de décrire les processus hydrométéorologiques généraux à travers les domaines de la science atmosphérique et hydrologique ;
- comprendre et décrire les risques hydrométéorologiques associés (par exemple les inondations, les sécheresses...) qui sont une préoccupation majeure dans notre société.

1 Introduction

L'eau, dont l'importance est évaluée en comparaison à l'air, est la ressource naturelle la plus précieuse de la planète et est vitale pour toutes les formes de vie. Elle se réfère généralement à la partie de l'eau douce qui est renouvelable annuellement et qui comprend l'eau de surface, et l'eau souterraine. Les précipitations qui constituent la source de toute l'eau douce de la terre et qui se produisent à la suite de la condensation de la vapeur d'eau (humidité atmosphérique), sont régies par la météorologie. De même, la distribution des eaux de pluie sur et sous la surface de la terre est régie par la science de l'hydrologie et la hydrogéologie. La météorologie et l'hydrologie sont toutes deux concernées par le cycle hydrologique (parfois également appelé cycle de l'eau) traitant du mouvement et de l'échange de l'eau entre les océans, l'atmosphère et la terre.

Etant donné, la faible disponibilité des données pour la plupart des cours d'eau, en particulier dans les pays en développement et, d'autre part, vu que les données météorologiques, telles que les précipitations, l'évaporation, la température, l'humidité, la pression de vapeur, le rayonnement, les heures d'ensoleillement, le vent, . . . , sont enregistrées par jour et sont disponibles pour plusieurs années dans de nombreux pays du monde. Il est indiqué qu'en l'absence de données hydrologiques, les données météorologiques peuvent être utilisées pour évaluer les ressources en eau d'une région en se basant sur l'hydrométéorologie ([Rakhecha et Singh, 2009](#)). L'hydrométéorologie apparaît sous ce angle comme cette branche de la science météorologique qui traite de l'application de la météorologie à la solution des problèmes hydrologiques. Selon [Shuttleworth \(2012\)](#) cette définition est désormais obsolète car elle implique un rôle trop passif des influences de la surface terrestre sur l'atmosphère sus-jacente. Ainsi, *l'hydrométéorologie* s'intéresse principalement à la fois aux phases atmosphériques et terrestres du cycle hydrologique, en mettant l'accent sur les relations entre elles (c'est-à-dire les transferts d'eau et d'énergie entre la surface terrestre et la basse atmosphère). De ce fait, l'hydrométéorologie établit des liens évidents avec l'hydrologie, la climatologie et l'agrométéorologie.

les hydrométéorologues s'intéressent à l'étude des risques naturels d'origine hydrométéorologique et à l'atténuation de leurs effets. Parmi ces risques figurent les résultats de processus naturels ou de phénomènes de nature atmosphérique, hydrologique, tels que les inondations, les cyclones tropicaux, la sécheresse et la désertification, ainsi que les impacts potentiels du changement de la couverture terrestre et du changement climatique.

1.1 Domaines d'application de l'hydrométéorologie

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

- l'agriculture : irrigation, drainage, les besoins en eau des cultures ;
- les ressources en eaux : détermination des pertes d'eau des lacs, des étangs et réservoirs, les stocks en eau, l'estimation des ruissellements de surface, la conception et la construction de projets de ressources en eau ;
- la navigation fluviale ;
- les loisirs (plans d'eau) ;
- la sécurité des biens et des personnes : protection contre les crues ;
- etc.

1.2 Définition et rappel de concepts

La météorologie : Elle étudie principalement l'atmosphère terrestre (principalement la troposphère) en mettant l'accent sur la compréhension et la prévision des processus qui donnent lieu à notre temps. Les variables importantes comprennent la température, la pression, la vapeur d'eau, les gradients et les interactions de chaque variable, ainsi que la manière dont ils changent dans le temps. Bien que les météorologues s'appuient désormais fortement sur des modèles informatiques (prévision numérique du temps), il est encore relativement courant d'utiliser des techniques et des modèles conceptuels qui ont été développés avant que les ordinateurs ne soient suffisamment puissants pour faire des prévisions avec précision ou efficacité. Les météorologues sont principalement formés au sein des départements des sciences atmosphériques.

L'air atmosphérique est composé d'un mélange d'un certain nombre de gaz. L'ensemble des gaz, dont les proportions restent constantes, forme l'air sec considéré comme un gaz parfait. La composition de l'air sec ainsi que sa masse molaire ($m = 28,966\text{g}$) ont été, pour les besoins de la météorologie, arrêtées internationalement. Ainsi, un volume d'air sec et pur contient 78% d'azote (N_2), 21% d'oxygène (O_2), et presque 0,096% d'argon (A). En plus, il contient environ 0.03% de dioxyde de carbone (CO_2). L'azote, l'oxygène, l'argon et le CO_2 constitue 99.99% du volume d'air sec et pur. Le reste du volume, représentant environ 0.01%, est constitué de trace de gaz tel que le néon, le krypton, l'hélium, le Xénon et l'hydrogène, l'ozone (O_3). Ces derniers, présent dans l'atmosphère en très faible quantité, n'ont pas d'importance pratique pour l'étude des phénomènes météorologiques.

La structure verticale de l'atmosphère se présente comme suit (figure 1) :

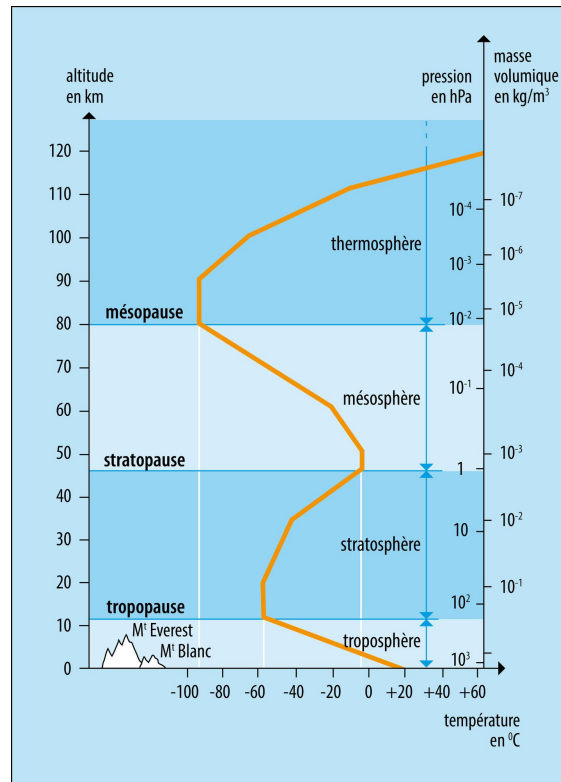


Fig. 1 – Structure verticale de l'atmosphère

Selon les normes de l'atmosphère international standard (ISA), la température niveau mer décroît à un taux de $-6.5^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$ de la surface terrestre jusqu'à la tropopause fixé à 11 km. Elle demeure ensuite constante à -56.5°C de la tropopause jusqu'à 20 km d'altitude. Pour un gaz parfait évoluant au sein de la troposphere, le modèle ISA de la température peut être formulé de la façon suivante : $T = T_0 - 6.5 * \frac{h(m)}{1000}$, où T désigne la température ISA à l'altitude $h(m)$ et T_0 est la température niveau mer (15°C)

Exercice 1 : Déterminer la température à une altitude de 5km dans une atmosphère considérée standard.

Solution 1 :

La climatologie : est la branche de la géographie physique qui étudie les climats de la terre c'est-à-dire la succession des conditions météorologiques ou des états de l'atmosphère d'un lieu donné sur de longues périodes. La climatologie est donc une science rétrospective qui se fonde sur des séries d'observations antérieures (10 ans au moins et 30 ans si possible). la climatologie est plutôt une science de synthèse et est relativement différente de la météorologie qui est une science analytique et explicative. La météorologie fait usage de la physique, de la chimie et des mathématiques pour traiter principalement de la mécanique des fluides et de la thermodynamique

appliquée au mouvement de l'air atmosphérique.

L'hydrologie étudie principalement le mouvement, la distribution et la qualité de l'eau sur Terre. Ils s'intéressent au cycle de l'eau, à la disponibilité spatio-temporelle et à la qualité des ressources en eau, ainsi qu'à la durabilité environnementale des bassins versants. Ils collectent et analysent des données pour aider à résoudre les problèmes liés à l'eau tels que la préservation de l'environnement, les catastrophes naturelles et la gestion de l'eau. La science de l'hydrologie se subdivise principalement en hydrologie des eaux de surface et hydrologie des eaux souterraines (hydrogéologie).

L'hydrologie de surface : est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des 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.

L'hydrogéologie : également nommée hydrologie souterraine et plus rarement géohydrologie, est la science qui étudie l'eau souterraine.

Un bassin versant : en une section d'un cours d'eau, est la surface de terrain drainée par le cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement qui prend naissance à l'intérieur de la surface passe nécessairement par la section considérée appelée exutoire (Figure 2).

Un réseau hydrographique : est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant.

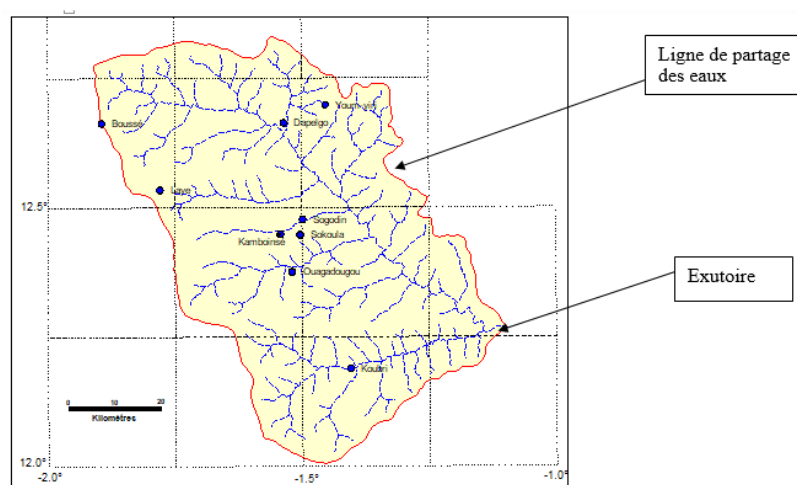


Fig. 2 – Schéma d'un bassin versant

Reading layer 'bassin_versant_detallé' from data source '/media/tamsat/01


```
## Simple feature collection with 24 features and 7 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension: XY
## bbox: xmin: 197653.1 ymin: 687708.7 xmax: 602252.9 ymax: 143999.9
## projected CRS: WGS 84 / UTM zone 31N
```

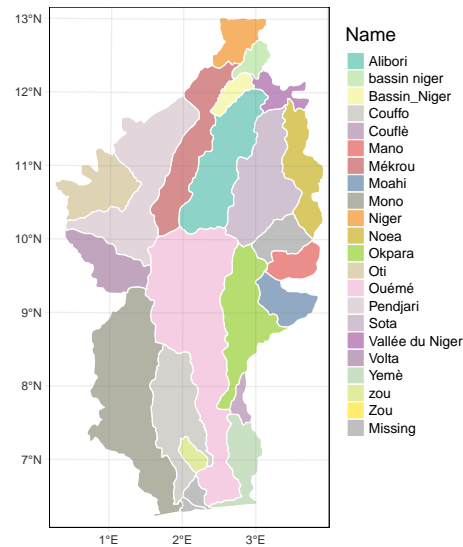


Fig. 3 – Les bassins versants du Bénin

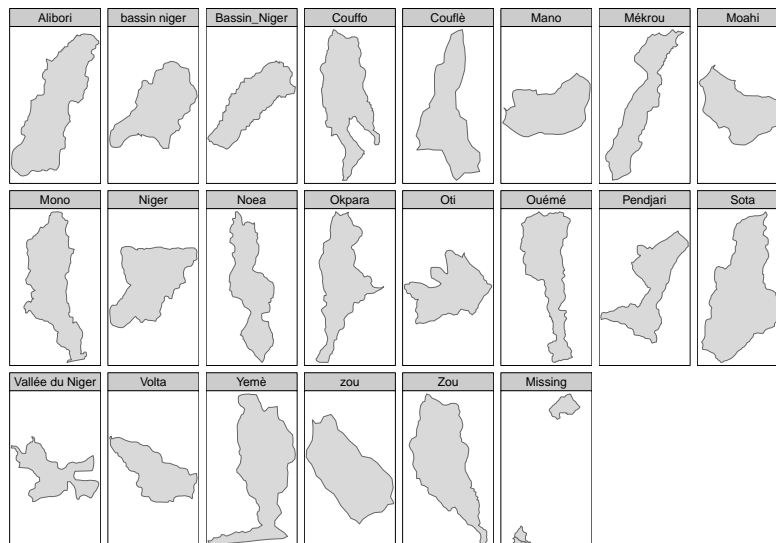


Fig. 4 – Les bassins versants du Bénin

Exercice 2 : délimitation d'un bassin versant du réseau hydrographique national du Bénin.

```
#Avec R
#Télécharger et installer grass gis.
library(rgrass7)
library(raster)

system('"C:/Program Files/GRASS GIS 7.6/grass76.bat"')

#intitiation de Grass GIS dans RSTUDIO et creation du bassin
initGRASS(gisBase='C:/Program Files/GRASS GIS 7.6',
          gisDbase='C:/Users/user/Documents/grassdata',
          location='bassin_ouemel', mapset='PERMANENT', override = TRUE)

#lecture du modèle numérique de terrain
raster("C:/Users/user/Documents/grassdata/raster/BeninTopo.tif") -> r
plot(r)

#creation d'un polygone spatial pour couper le raster
extent(2.23,2.628,7.630,8.75) -> e
p <- as(e, "SpatialPolygons")
#plot(p, add=T)
crop(r, p) -> c
extent(c) -> ex
r2 <- raster(ex,nrow=nrow(c)/5, ncol=ncol(c)/5)

#reechantillonner la taille des cellules si necessaire
new_c <- resample(c, r2, method="ngb")
rast <- as(new_c, "SpatialGridDataFrame")
writeRAST(rast, rast_img, overwrite=T, flags="quiet")

writeRAST(rast, "rast_img",drivername="GTiff")
execGRASS("r.info", map = "rast_img")

#Definir la region d'interet
execGRASS("g.region", raster = "rast_img")
out_raster <- readRAST("rast_img")
```

```

str(out_raster)
plot(out_raster)

#delimitation du bassin versant
execGRASS("r.watershed", flags="overwrite",
          parameters=list(elevation="rast_img", threshold=1000,
                           drainage="fdir", stream="upstream", basin="rbasin"))
execGRASS('r.thin', flags='overwrite',
          parameters = list(input='upstream',
                             output='riv_thin'))
execGRASS("r.to.vect", flags='overwrite',
          parameters = list(input="riv_thin",
                             output="streams", type="line"))
execGRASS('r.to.vect', flags='overwrite',
          parameters = list(input='rbasin',
                             output='catchments', type="area"))
execGRASS('v.out.ogr', flags=c('overwrite'),
          parameters=list(input='catchments',
                           output="area.shp", type="area",
                           format="ESRI_Shapefile"))
execGRASS('v.out.ogr', flags=c('overwrite'), parameters=list(input='streams',
                                                               output="streams.shp", type="line", format="ESRI_Shapefile"))

shapefile("streams.shp") -> s
shapefile("area.shp") -> a
#plot(out_raster)
#plot(a, add=T)
plot(s, add=T, col="white", lwd=2)

```

2 Cycle hydrologique ou cycle de l'eau

Les moteurs du cycle de l'eau sont l'énergie solaire et la gravité de la terre, Sur la surface des océans et des terres, l'eau s'évapore, s'élève dans l'atmosphère, se condense en fines gouttelettes et forme des nuages. Les nuages sont transportés par le vent et distribués au-dessus des océans et des continents.

L'eau, sous forme de pluie ou de neige, retourne directement à l'océan ou bien se répand sur les continents. L'eau tombée sur les continents s'écoule alors par gravité des régions hautes vers les régions basses.

Une partie de l'eau de pluie ruisselle à la surface du sol, une autre partie s'infiltre, une troisième partie s'évapore et regagne l'atmosphère. L'eau qui s'infiltre alimente les nappes souterraines et circule lentement vers les sources pour grossir les ruisseaux, les rivières et/ ou les fleuves et rejoindre finalement l'océan.

Les précipitations arrivant à la surface de la terre constituent un élément principal du cycle de l'eau. A leur arrivée au sol, trois processus peuvent se déclencher :

- L'humidification du sol et l'infiltration ;
- Le ruissellement de surface ;
- L'évaporation.

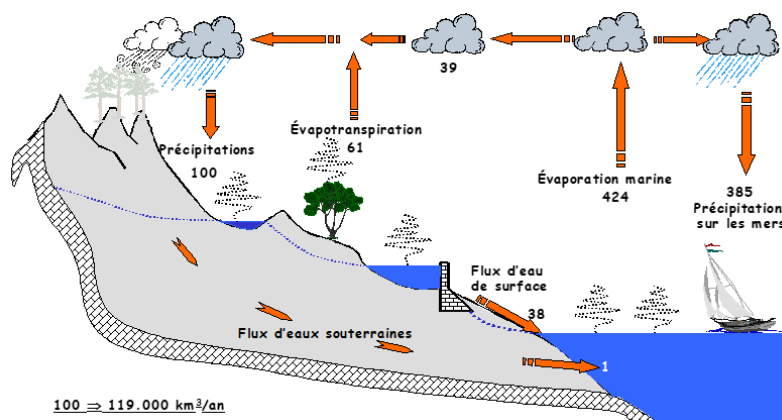


Fig. 5 – Cycle Hydrologique ou Cycle de l'eau

Les processus majeurs et importants du cycle de l'eau et d'intérêt pour les hydrométéorologues sont les précipitations, l'évapotranspiration, les écoulements et aussi comment la surface terrestre répartit l'énergie en différents composants (sensible, latent, flux de chaleur du sol) et comment cela affecte ensuite l'atmosphère sus-jacente.

3 Précipitations

Sont dénommées précipitations, toutes les eaux qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre, ...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique «entrée» des principaux

systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Au Bénin les précipitations rencontrées sont la bruine, la pluie, la grêle, la rosée.

3.1 Mécanismes de formation des précipitations

La formation des précipitations nécessite la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. La saturation est une condition essentielle à tout déclenchement de la condensation. Divers processus thermodynamiques sont susceptibles de réaliser la saturation des particules atmosphériques initialement non saturées et provoquer leur condensation :

- Saturation et condensation par refroidissement isobare (à pression constante) ;
- saturation et condensation par détente adiabatique ;
- saturation et condensation par apport de vapeur d'eau ;
- saturation par mélange et par turbulence.

La saturation n'est cependant pas une condition suffisante à la condensation ; cette dernière requiert également la présence de noyaux de condensation (impuretés en suspension dans l'atmosphère d'origines variées - suie volcanique, cristaux de sable, cristaux de sel marin, combustions industrielles, pollution) autour desquels les gouttes ou les cristaux se forment. Lorsque les deux conditions sont réunies, la condensation intervient sur les noyaux ; il y a alors apparition de gouttelettes microscopiques qui grossissent à mesure que se poursuit l'ascendance, celle-ci étant le plus souvent la cause génératrice de la saturation. Les noyaux de condensation jouent en fait un rôle de catalyseur pour la formation de gouttelettes d'eau.

Plus d'information sur <http://sup.ups-tlse.fr/uved/Ozone/BasesScientifiques/projet/site/html/ThermodynamiqueAtmosphere.html>

3.2 Les différents types de précipitations

Il existe différents types de précipitations : les précipitations convectives, les précipitations orographiques et les précipitations frontales (6).

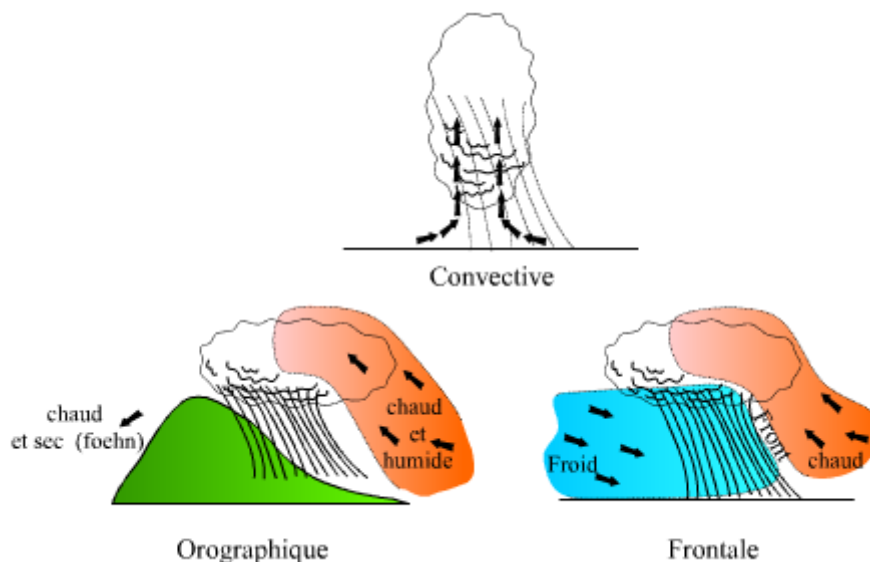


Fig. 6 – Principaux types de précipitations : convectives, orographiques et frontales

Précipitations convectives : Elles résultent d'une ascension rapide des masses d'air dans l'atmosphère. Elles sont associées aux cumulus et cumulo-nimbus, à développement vertical important. Les précipitations résultantes de ce processus sont en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale. Mais plusieurs cellules convectives peuvent s'organiser en des amas nuageux ou en une ligne de grains de grande extension spatiale.

Précipitations orographiques : Si une masse d'air se déplaçant horizontalement rencontre un obstacle topographique (chaîne de montagnes par exemple), il s'ensuit une élévation des masses d'air et par conséquent leur refroidissement. Comme précédemment, on obtient des précipitations sous forme de pluie mais aussi des averses. Après le passage de la chaîne, l'air va redescendre, se comprimer et se réchauffer. On a alors des vents chauds et secs (effet de Foehn). En général, elles présentent une intensité et une fréquence assez régulières.

Précipitations de front : Lorsque plusieurs masses d'air de propriétés différentes se rencontrent, les plus chaudes et les plus humides sont poussées vers les hautes altitudes où elles se refroidissent et se condensent. Fronts chauds : L'air chaud remplace alors l'air froid. La vitesse du front est plus lente que précédemment (de l'ordre de 20 km/h) et la pente de la surface frontale est plus faible (1/100 à 1/1000). Les ascendances sont plus lentes ; les surfaces intéressées par les précipitations sont plus vastes et les intensités plus faibles.

Fronts froids : Ils correspondent, au remplacement d'une masse d'air par un air plus froid. La vitesse de déplacement de tels fronts est de l'ordre de 50 km/h en moyenne. La surface frontale est assez

raide (une pente de l'ordre de 1/10). Il s'ensuit une ascendance rapide des masses d'air, ce qui provoque des pluies souvent intenses mais peu étendues.

3.3 Mesures des précipitations

Au Bénin, L'Agence Nationale de la Météorologie gère un réseau pluviométrique (figure 7) constitué de plus de 120 postes pluviométriques. On y retrouve pour la mesure de la pluie des enregistreurs comme le pluviographe et des non-enregistreurs comme les pluviomètres classiques et automatiques. L'idée est de mesurer la quantité d'eau tombée au sol durant un certain intervalle de temps.

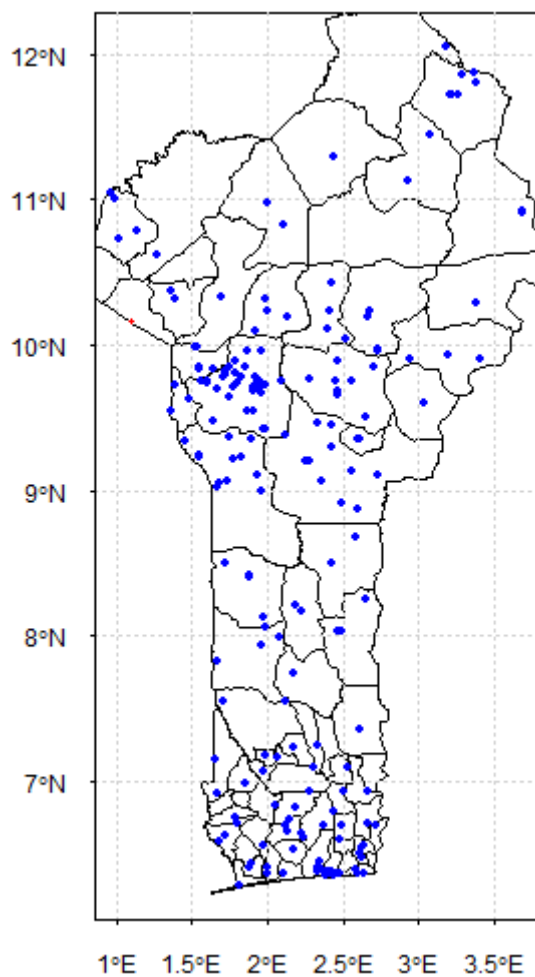


Fig. 7 – réseau pluviométrique national

De manière générale pour la mesure des précipitations, il est utilisé des appareils à mesure directe et des appareils à mesure indirecte.

3.3.1 Les appareils à mesure directe

3.3.1.1 Les pluviomètres (figure 8) : C'est un appareil très simple qui comporte une surface réceptrice limitée par une collerette cylindrique ; l'eau traversant cette surface est dirigée par un entonnoir vers un seau récepteur. Si durant un certain intervalle de temps Δt , on a récupéré un volume V à travers la surface réceptrice S , la hauteur de pluie $H\Delta t$, tombée est : $H\Delta t = V/S$. Dans la pratique, on adjoint à chaque pluviomètre classique une éprouvette graduée (fonction de la surface réceptrice S) qui permet la lecture directe de $H\Delta t$ en mm et 1/10ème.



Fig. 8 – Pluviomètre Classique SPIEA

3.3.1.2 Les pluviographes : Ces appareils sont destinés à l'enregistrement de la hauteur de pluie cumulée en fonction du temps. Deux types principaux ont eu un certain développement : les pluviographes à augets basculeurs et ceux à siphons. Actuellement, ces derniers tendent à être abandonnés. Les pluviographes à augets basculeurs ont la partie captante commune avec les pluviomètres ; ils en diffèrent par la partie réceptrice en aval de l'entonnoir. L'eau est dirigée par un court tube vers les augets de mesures. Ceux-ci sont disposés symétriquement par rapport à un axe de rotation horizontal. Lors du remplissage, le centre de gravité de l'ensemble des deux augets se déplace vers la gauche jusqu'à dépasser la verticale de l'axe de rotation ; l'ensemble bascule alors vers la gauche et l'auget plein se vide alors que celui de droite est venu en position de remplissage. Les augets sont tarés de façon à ce que le basculement se produise lorsqu'ils contiennent 20 g d'eau. La partie captante ayant des surfaces de 2000 cm², 1000 cm² ou 400 cm², un basculement correspond à 0,1 mm, 0,2 mm ou 0,5 mm de pluie. (Les deux dernières surfaces sont celles préconisées par l'Organisation Météorologique Mondiale)

Les pluviomètres automatiques fonctionnent le plus souvent comme des pluviographes. Le dispositif est composé le plus souvent d'un cône collecteur et d'un jeu d'augets qui basculent successivement en générant à chaque fois d'une impulsion égale à 0.2mm d'eau.

Exercice : dépouillement de pluviogrammes avec les étudiants

3.3.2 Les appareils à mesure indirecte

3.3.2.1 Les Radars météorologiques : permettent de localiser les précipitations, de mesurer leur intensité en temps réel et de détecter des phénomènes dangereux. Outre l'intensité des précipitations, les radars météorologiques fournissent également, en exploitant l'effet Doppler, des informations sur le vent dans les zones précipitantes. Les radars les plus récents sont quant à eux capables de faire la distinction entre les types de précipitations (pluie, neige, grêle...). Ils émettent une impulsion de très courte durée de manière périodique. L'intervalle entre deux impulsions est calculé pour une portée donnée du radar. Cela permet de recevoir les échos de retour venant des précipitations avant que l'impulsion suivante ne soit émise. On peut ainsi repérer la position, l'intensité et le déplacement des précipitations.

3.3.2.2 Les mesures satellitaires : depuis la fin des années 70, une surveillance totale de l'atmosphère est assurée par le Système Mondial d'Observation de la Veille Météorologique Mondiale. Ce système mondial comprend une constellation de satellites espacés régulièrement autour de l'équateur en orbite géostationnaire, et d'autres en orbite quasi-polaire. Ces mesures sont traitées pour donner des estimations des précipitations à travers le globe. Le Global Precipitation Measurement (GPM) est l'une des missions phares d'estimation des précipitations. A ce jour on dénombre plusieurs estimations satellitaires des précipitations (GPM-IMERG, TAMSAT, ARC2, CHIRPS...).

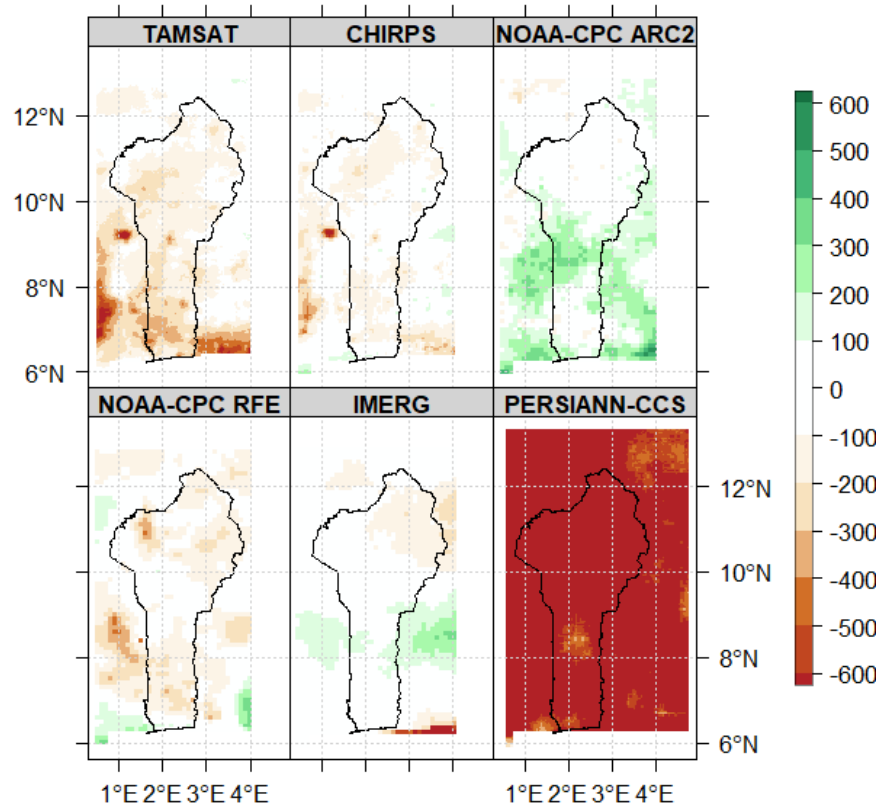


Fig. 9 – Biais climatologique (2001-2010) de quelques produits d'estimation satellitaire en comparaison aux données du CRU (Climate Research Unit)

3.4 Utilisation des données de pluie

3.4.1 Estimation des données manquantes

Parfois, la quantité de pluie à une certaine station pour un certain jour peut être manquante en raison de l'absence de l'observateur ou d'une panne instrumentale. Dans un tel cas, il est nécessaire de compléter la quantité de pluie manquante par les données des stations environnantes. Les méthodes suivantes sont utilisées. Supposons, pour un certain jour, qu'il n'y ait pas d'enregistrement des précipitations à la station A (figure 10). Nous sélectionnons trois stations pluviométriques aussi proches et régulièrement espacées de la station A. Soit Adjohoun, Sakété et Porto-novo. Les valeurs des précipitations pour ces trois stations le jour pour lequel les données en A sont manquantes sont collectées et sont de $P_1=53$, $P_2=48$ et $P_3=68$ respectivement pour les stations de Adjohoun, Sakété et Porto-Novo. Les valeurs de précipitations annuelles normales pour les quatre stations doivent être connues (figure 10) $N_1=1113.2$, $N_2=1168$, $N_3=1212$ et $N_A=1200$.

Maintenant, si les hauteurs normales annuelles pour chacun de ces trois stations voisines diffèrent de moins de 10% de la hauteur normale annuelle de la station A, la manière simple d'estimer les précipitations manquantes en A consistent à prendre la moyenne arithmétique simple des quantités

connues pour les trois stations. Soient respectivement P_1 , P_2 , P_3 et P_A sont leurs valeurs de précipitations pour le jour où les précipitations à la station A manque, P_A est donnée par la formule :

$$P_A = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}.$$

Si les précipitations normales annuelles pour chacun de ces trois stations voisines diffèrent de plus de 10% de la hauteur normale annuelle, la méthode du ratio de la normale est utilisée avec la formule :

$$P_A = 1/3[P_1 * \frac{N_A}{N_1} + P_2 * \frac{N_A}{N_2} + P_3 * \frac{N_A}{N_3}].$$

Exercice 5 Calculez la hauteur de pluie à la station A.

```
## Reading layer 'BENIN_PAYS1' from data source '/media/tamsat/3265-3361/COU
## Simple feature collection with 12 features and 24 fields
## geometry type:  MULTIPOLYGON
## dimension:      XY
## bbox:           xmin: 0.774574 ymin: 6.23514 xmax: 3.851701 ymax: 12.418
## geographic CRS: WGS 84
```

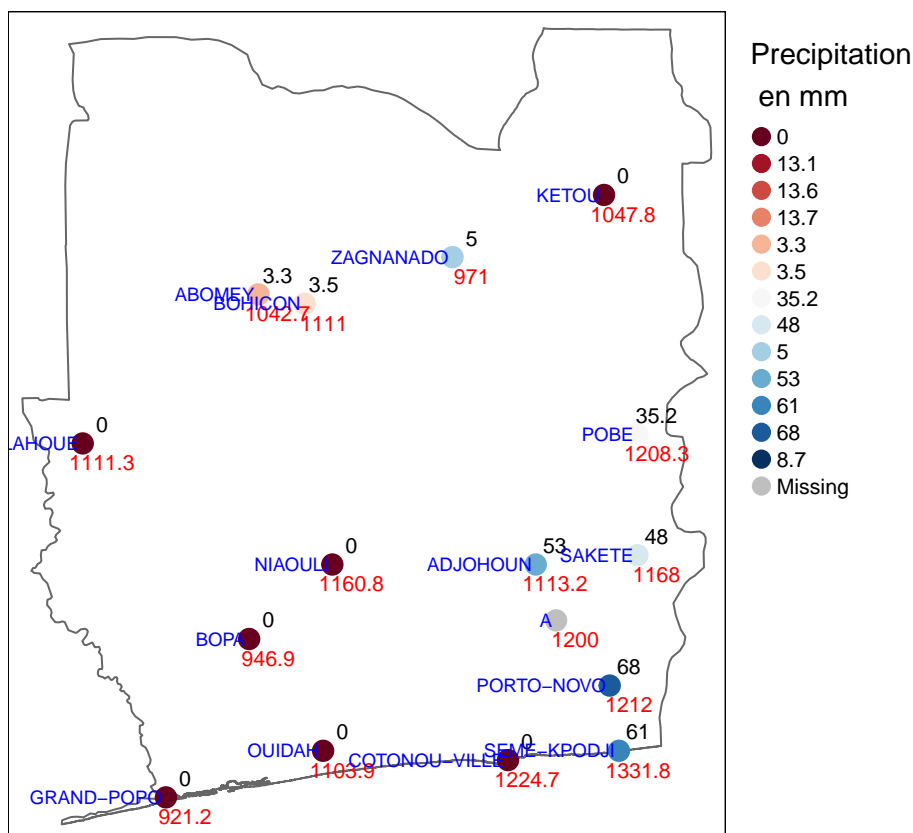


Fig. 10 – Estimation des données manquantes

3.4.2 Cohérence des séries de pluie

3.4.3 Cacul de la pluie moyenne sur un bassin versant

D'une façon générale, le problème se pose de la manière suivante : on connaît sur n points (aux postes pluviométriques), la pluie P et on se propose de calculer la valeur moyenne P_m sur un certain domaine (en général un bassin versant). Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer la pluie moyenne sur un bassin versant, les plus utilisées sont :

- Moyenne arithmétique des postes ;
- Méthode des polygones de Thiessen ;
- Méthode des isohyètes.

3.4.3.1 Moyenne arithmétique La méthode la plus simple qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées, s'applique uniquement si les stations sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène. Cette méthode est souvent peu recommandée car peu représentative. Il s'agit d'une moyenne arithmétique, égale à la somme des pluies mesurées aux n stations de mesures sur le nombre de ces stations.

3.4.3.2 Méthode des polygones de Thiessen (Explication en pratique) La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement). Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence (ou polygone de Thiessen) dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique, et les éléments de surface plus proches d'un pluviomètre que de tout autre, sont déterminés par le réseau des médiatrices des segments joignant les postes 2 à 2. Dans cette hypothèse, la pluie moyenne s'exprime ainsi :

Avec : P_m : précipitation moyenne sur le bassin, S : aire totale du bassin ($= S$), P_i : précipitation enregistrée à la station i , S_i : superficie du polygone associé à la station i .

On remarque alors que les termes α_i (S_i/S) appelés coefficients de Thiessen ne dépendent que de la répartition spatiale des postes par rapport au bassin versant. Ils ne dépendent pas de la pluie, donc la construction géométrique est à faire une fois pour toutes et on appliquera α_i à toutes les averses à étudier.

```
library(sf)
library(tmap)
library(sp)
library(spatstat)
library(maptools)
library(raster)
library(rgeos)

benin <- st_read("/media/tamsat/3265-3361/COURS_hydrometeorology/BEN_adm_shp")
```

3.4.3.2.1 Polygones de Thiessen des pluies moyennes annuelles sur les bassin de l'Ouémé et du Zou

```
## Reading layer `BENIN_PAYS' from data source `/media/tamsat/3265-3361/COURS_hydrometeorology/BEN_adm_shp'
## Simple feature collection with 1 feature and 7 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension: XY
## bbox: xmin: 0.7766666 ymin: 6.210679 xmax: 3.855 ymax: 12.39333
## geographic CRS: WGS 84

bassin <- st_read("/media/tamsat/0173-CEDC/Shapefiles/bassin_versant_detailed")

## Reading layer `bassin_versant_detailed' from data source `/media/tamsat/0173-CEDC/Shapefiles/bassin_versant_detailed'
## Simple feature collection with 24 features and 7 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension: XY
## bbox: xmin: 197653.1 ymin: 687708.7 xmax: 602252.9 ymax: 143990.7
## projected CRS: WGS 84 / UTM zone 31N

bassin=bassin%>%filter(Name%in%c("Ouémé", "Zou", "zou"))
Normale = openxlsx::read.xlsx("/media/tamsat/3265-3361/COURS_hydrometeorology/BEN_adm_shp", sheet = "Normale")
pt.st_bassin <- st_as_sf(Normale[,c(4,5,12)], coords = c("Geogr1.x", "Geogr2.y"), crs = 32631)
pt.st_bassin.utm <- st_transform(pt.st_bassin, 32631)
benin.utm <- st_transform(benin, 32631)

bassin1=as(bassin , "Spatial") #.utm
```

```
pt.st_bassin1=as(pt.st_bassin.utm , "Spatial")

bassin1_agr <- raster::aggregate(bassin1)

voron <- as(dirichlet(as.ppp(pt.st_bassin1)), "SpatialPolygons")
proj4string(voron) <- proj4string(pt.st_bassin1)
voron.z <- over(voron, pt.st_bassin1, fn=mean)
voron.z.spdf <- SpatialPolygonsDataFrame(voron, voron.z)
voron.clp <- raster::intersect(bassin1_agr, voron.z.spdf)

pt.st_bassin1@bbox <- bassin1_agr@bbox
voron.clp$Area <- round(gArea(voron.clp, byid=TRUE)/1000000, 1)

#

tm_shape(bassin1_agr)+tm_polygons(alpha = 0)+
tm_shape(voron.clp) +
  tm_polygons(col="N8110", palette="RdBu", auto.palette.mapping=FALSE,
              title="Normale annuelle \n 1981-2010 (en mm)") +
tm_legend(legend.outside=TRUE)+tm_graticules(alpha=0.2)+
tm_text("Area", col = "black", size=0.55)+tm_legend(legend.outside=TRUE)+
tm_shape(pt.st_bassin1)+tm_dots(col = "black")
```

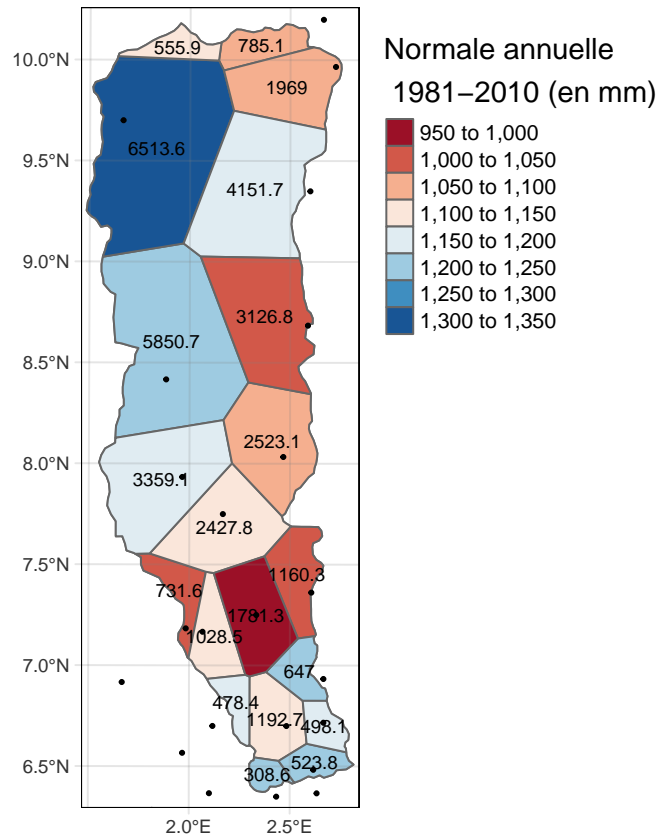


Fig. 11 – Biais climatologique (2001-2010) de quelques produits d'estimation satellitaire en comparaison aux données du CRU (Climate Research Unit)

Exercice 2 : Déterminer la pluie moyenne sur les deux bassins en connaissant les superficies et les hauteurs moyennes dans les différents polygones.

3.4.3.3 Méthode des isohyètes (A réaliser en situation pratique) C'est le procédé le plus rationnel et le plus précis. Le calcul de la lame d'eau se fait de la façon suivante : • Cartographie des courbes isohyètes (courbes de même hauteur pluviométrique); • Planimétrage de la surface partielle S_i , comprise entre deux isohyètes consécutives P_i et P_{i+1} ; • Calcul de la pluviométrie moyenne par la formule :

$$P_m = \sum (P_i + P_{i+1}) / 2 * S_i / S$$
 Avec : S_i = aire du BV comprise entre l'isohyète i et l'isohyète $i+1$
 S = aire du BV
 P_i = cumul de pluie associé à l'isohyète i
 P_{i+1} = cumul de pluie associé à l'isohyète $i+1$

```
# Interpolation des hauteurs moyennes annuelles par la méthode IDW
library(gstat) # Use gstat's idw routine
```

```

library(sp)      # Used for the spsample function

# Create an empty grid where n is the total number of cells
grd              <- as.data.frame(spsample(P, "regular", n=50000))
names(grd)       <- c("X", "Y")
coordinates(grd) <- c("X", "Y")
gridded(grd)     <- TRUE # Create SpatialPixel object
fullgrid(grd)    <- TRUE # Create SpatialGrid object

# Add P's projection information to the empty grid
proj4string(P) <- proj4string(P) # Temp fix until new proj env is adopted
proj4string(grd) <- proj4string(P)

# Interpolate the grid cells using a power value of 2 (idp=2.0)
P.idw <- gstat::idw(Precip_in ~ 1, P, newdata=grd, idp=2.0)

# Convert to raster object then clip to Texas
r      <- raster(P.idw)
r.m    <- mask(r, W)

```

3.4.3.3.1 Isohyètes des pluies moyennes annuelles sur les bassin de l'Ouémé et du Zou

Exercice 2 : Déterminer la pluie moyenne sur les deux bassins.

Exercice 6 Déterminer la normale des précipitations à la station de Cotonou et étudiez leur variabilité.

```

library(openxlsx)
library(dplyr)
library(lubridate)

#lecture du fichier des données
pluie_cotonou=read.xlsx("/media/tamsat/3265-3361/data_cours.xlsx", startRow = 1, endRow = 1000)
#renommer les noms de colonnes
colnames(pluie_cotonou)=c("Dates", "value")
pluie_cotonou=pluie_cotonou%>%
  mutate(Year=substr(Dates, 1, 4), Month=substr(Dates, 5, 6), Dayss=substr(Dates, 7, 10))
pluie_cotonou.month=pluie_cotonou%>%group_by(Year, Month)%>%summarise(haut_moyenne=mean(value))

## `summarise()` regrouping output by 'Year' (override with `.groups` argument)

```



```

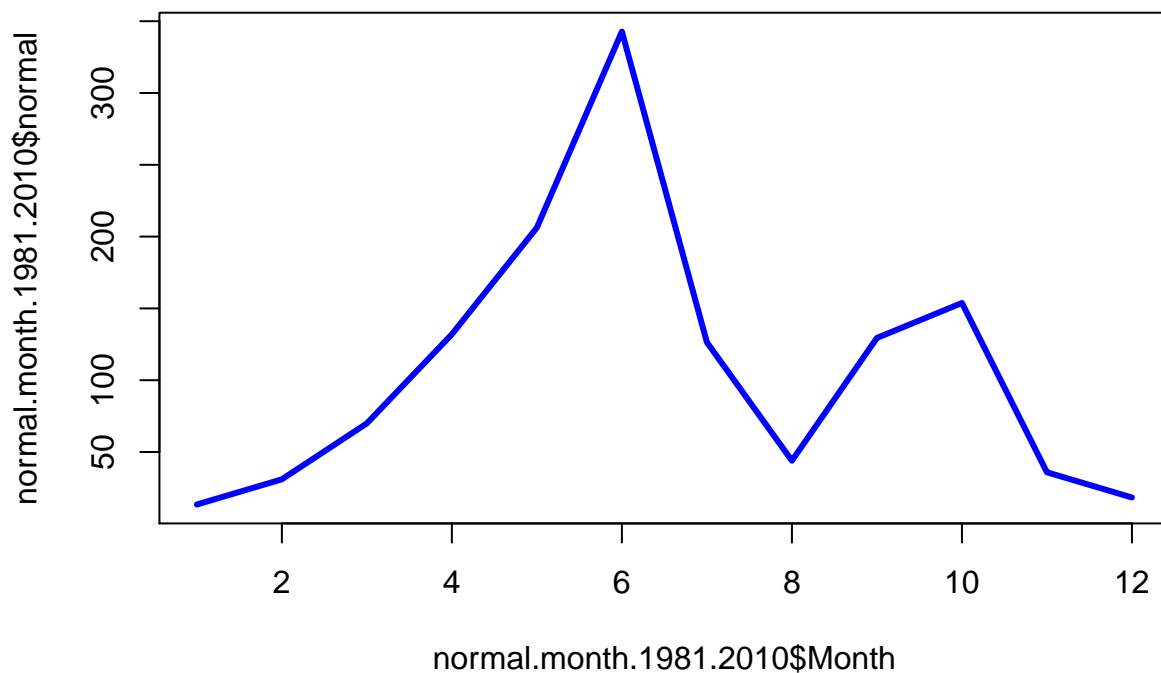
pluie_cotonou.an=pluie_cotonou%>%group_by(Year)%>%summarise(haut_an=sum(val

## `summarise()` ungrouping output (override with `.groups` argument)
normal.month.1981.2010=pluie_cotonou.month%>%
  filter(as.numeric(Year)>=1981&as.numeric(Year)<=2010)%>% group_by(Month)%

## `summarise()` ungrouping output (override with `.groups` argument)
normal.an.1981.2010=pluie_cotonou.an%>%
  filter(as.numeric(Year)>=1981&as.numeric(Year)<=2010)%>%summarise(normal=normal,
SD=pluie_cotonou.an%>%filter(as.numeric(Year)>=1981&as.numeric(Year)<=2010)%>%
  summarise(normal=sd(haut_an))

plot(normal.month.1981.2010$Month,normal.month.1981.2010$normal,col="blue",lwd=4)

```

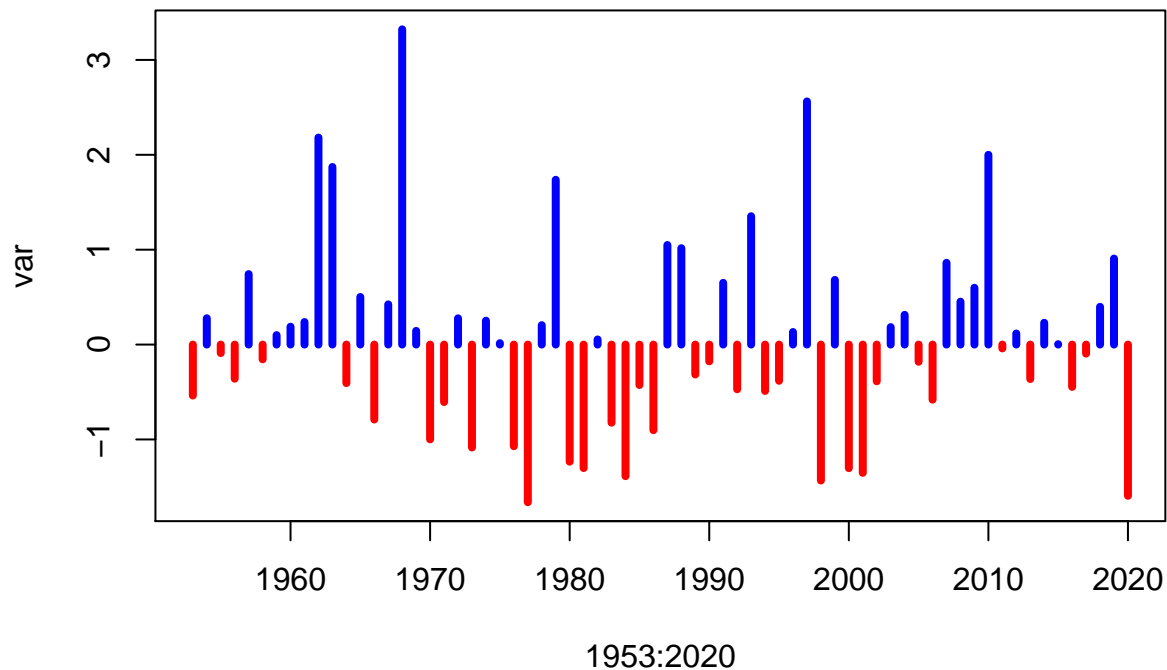


```

#variabilité des pluies annuelles
var=scale(pluie_cotonou.an$haut_an[-1],normal.an.1981.2010$normal,SD$normal)

plot(1953:2020,var, col=ifelse(var>0,"blue","red"), type="h",lwd="4")

```



4 l'évaporation et l'évapotranspiration

l'Évaporation (E) d'une nappe d'eau libre et des surface mouillées et l'évapotranspiration (ET) des végétaux sont des paramètres clés du cycle hydrologique. Une bonne partie des précipitations est perdue sous forme d'évaporation ou d'évapotranspiration avec des pourcentages variables d'une région à une autre à l'échelle globale. La connaissance de ces deux données est évidemment indispensable pour étudier le cycle de l'eau.

4.1 L'évaporation (E)

L'évaporation est un processus physique à travers lequel l'eau liquide est transformé en vapeur d'eau. La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère provient des océans, des lacs, des rivières, des sols, et des végétaux mouillés (l'interception et la rosée).

Facteurs influençant le processus et l'intensité de l'évaporation :

- Les facteurs climatiques :
- la radiation solaire ;

- température de l'air ;
- l'humidité de l'air ;
- la pression atmosphérique ;
- la vitesse des vents ;
- les facteurs du milieu :
 - la température de l'eau ;
 - les caractéristiques du bassin ;
 - la qualité de l'eau etc.

4.2 La transpiration (T)

Transpiration (T) est la perte de l'eau sous forme de vapeur d'eau par les plantes principalement à travers leurs feuilles au niveau des stomates ou des cuticules.

Facteurs influençant la transpiration et son intensité :

- Facteurs structuraux :
 - La surface foliaire ;
 - La constitution foliaire ;
 - La densité des stomates ;
- Facteurs externes :
 - Nature et humidité du sol
 - L'humidité et l'agitation de l'air
 - La température
 - La Luminosité

4.3 L'évapotranspiration (ET)

L'ET est un processus simultané de transfert d'eau vers l'atmosphère à partir de l'évaporation (E) de l'eau dans le sol et de la transpiration (T) des plantes.

4.4 Mesures liées à l'estimation de l'évaporation et de l'évapotranspiration

4.4.1 Mesures de l'évaporation

Les mesures directes de l'évaporation ce sont des mesures locales. Des coefficients d'ajustements sont utilisés pour des besoins d'extrapolation de ces mesures ponctuelles à une région

$$E_0 = K_p * E_{pan}$$

E_0 =évaporation d'une nappe d'eau libre (barrage, fleuve, rivière), E_{pan} = évaporation bac, K_p = coef correctif (<1) et fonction de l'environnement. Le BAC classe A est utilisé

actuellement au niveau des stations synoptiques du réseau météorologique national du Bénin pour l'estimation de l'évaporation (figure 12). Ce bac est constitué d'un cylindre métallique de 121,9 cm de diamètre et de 25,4 cm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une épaisseur d'eau de 17,5 à 20 cm. Le cylindre est supporté par un caillebotis à 15 cm du sol. Le caillebotis doit permettre une bonne aération sous le bac. Ce bac universellement répandu ne satisfait que très partiellement l'hydrologue car, du fait de sa disposition par rapport au sol, il est très sensible aux variations de température, son inertie thermique étant faible. Il y a aussi les Bac COLORADO et ORSTOM qui étant enterrés et avec une plus grande épaisseur d'eau, possèdent une plus grande inertie thermique et se rapproche plus des conditions naturelles.

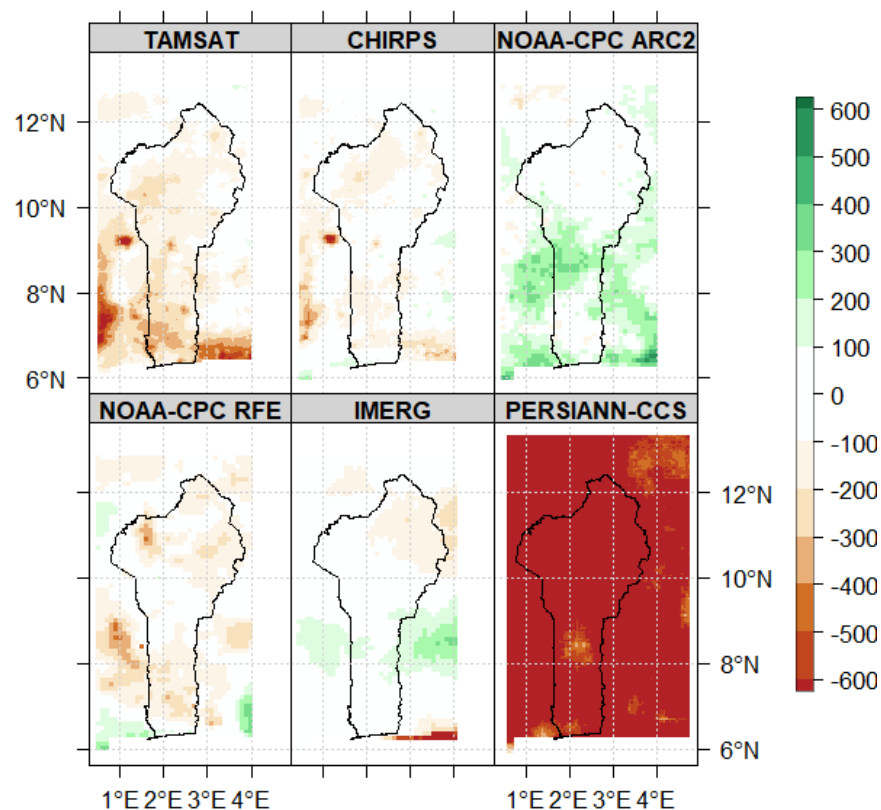


Fig. 12 – Bac classe

Les mesures indirectes de l'évaporation, plus nombreuses, utilise une technique ou la combinaison de plusieurs techniques : le bilan hydrique, le bilan d'énergie, le transfert de masse. . .

4.4.2 Mesures de l'évapotranspiration

Mesures directes de l'évapotranspiration Les mesures directes de ET sont difficiles et très coûteuses. Par conséquent, ces mesures sont réalisées le plus souvent dans des conditions d'expérimentation. Des instruments tels que les **lysimètres** sont utilisées pour une mesure directe de

l'ET sans une étape intermédiaire de calcul. Toutefois, les résultats de ces mesures sont difficiles à utiliser en hydrologie car il y a une très importante différence d'échelle entre la surface de la parcelle d'essai (quelques mètres carrés) et celle d'un bassin versant (des dizaines de kilomètres carrés).

Mesures indirectes de l'évapotranspiration les méthodes d'estimation de l'ET sont nombreuses et variées. Les méthodes micrométéorologiques (Méthode aérodynamique ou du gradient, Méthode d'Eddy covariance...) basées sur l'analyse du profile des éléments météorologiques dans la couche limite de l'atmosphère. Les Méthodes d'estimation de ET par utilisation des données de télédétection (température radiative de la surface, l'albedo, la réflectance, NDVI...). Les Méthodes empiriques de calcul de l'ET par utilisation des relations empiriques entre ET et les paramètres météorologiques ou des données d'évaporation. Ces méthodes sont utilisées lorsqu'il n'y a pas assez de données pour l'emploi des méthodes plus sophistiquées. quelques unes sont présentées ci-dessous :

- Estimation par les données du Bac d'évaporation : $ETP = C_{et} * E_{pan}$ Etp=évapotranspiration de référence d'une culture, Epan= évaporation bac, Cet= coef correctif (<1) et fonction des conditions météorologiques tel que le vent et l'humidité de l'air. Varie entre 0.35 et 0.85 (Jensen,1974).
- Estimation par les méthodes basées sur la température de BLANEY-CRIDDLE et de Hargreaves-Samani ;
- Estimation par les méthodes basées sur la radiation solaire de Abtew et Turk ;
- Estimation par la méthode de Penman-Monteith ;
- Etc...

exercice 3 : Estimez l'évapotranspiration journalière et mensuelle moyenne à la station de Cotonou avec les formules de Abtew, Blaney-Cridlle, Hargreaves-Samani, Penman-Monteith, Priestley-Taylor et Turc puis comparez les résultats.

5 Ecoulements

L'écoulement est le mouvement de l'eau à la surface du sol sous l'effet de la gravité. L'écoulement prend en compte, en plus de l'eau ruisselée, l'eau du sol qui s'écoule plus ou moins horizontalement vers les cours d'eau (écoulement retardé ou hypodermique). L'eau ruisselée des différentes parties des versants convergent en prenant des chemins préférentiels (chemin de plus grande pente) vers les thalwegs. L'eau constituant le débit mesuré à la station hydrométrique provient donc de la pluie en prenant quatre chemins différents : le ruissellement (écoulement de surface), l'écoulement

hypodermique, l'écoulement souterrain et l'eau tombée directement sur les plans d'eau. Supposons le passage de la pluie nette (ruissellement) au débit par application des fonctions de transfert. Il nous reste plus qu'à mesurer ce débit à l'exutoire d'un bassin versant.

5.1 Mesure des écoulements ou hydrométrie

L'hydrométrie est l'ensemble des opérations qui permettent de connaître le débit des cours d'eau, et par voie de conséquence les écoulements en un point donné de son cours. Elle est composée de la limnimétrie et du jaugeage.

La limnimétrie :

La limnimétrie est la mesure des niveaux d'eau en fonction du temps. Toute station comporte au moins une échelle de mesures des hauteurs appelée « échelles limnimétriques » et éventuellement un limnigraphe.

- Les échelles sont les repères fixes sur lesquels on lira le niveau d'eau H . Elles sont réalisées le plus souvent en tôle émaillée. Constituées généralement d'éléments de 1 m, elles portent des indications métriques, décimétriques et centimétriques. L'installation des échelles se fait sur des supports fixes : fers IPN battus dans le lit, culée de point, quais, rives rocheuses, etc.
- Les limnigraphes : ces appareils ont pour but d'enregistrer les niveaux d'eau en fonction du temps. Parmi tous les types de limnigraphes, ceux à flotteurs sont les plus utilisés.

Le jaugeage

Actuellement, il n'existe aucune technique opérationnelle qui permette de mesurer directement le débit en fonction du temps. Cette opération se fait généralement dans la pratique de la manière suivante :

- On enregistre en un point du cours d'eau (la station hydrométrique), la hauteur d'eau H en fonction du temps. Cet enregistrement $H(t)$ est appelé "limnigramme"
- A différents instants on pratique des mesures instantanées de débits ; ces mesures correspondent à des enregistrements de hauteur synchrone.
- Dans certaines conditions hydrauliques, comme le passage en "section critique", il existe une relation biunivoque entre la hauteur d'eau et les débits. Dans ces

- 6 Bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin versant**
- 7 Risques hydrométéorologiques (Exposé sur Les inondations, les sécheresses et les fortes pluies par les étudiants)**
- 8 Informations hydrométéorologiques disponibles au Bénin pour la surveillance et la prévention des risques hydrométéorologiques**
- 9 Exemples d'analyses statistiques en hydrométéorologie**
- 10 Documents consultés**

Références

- RAKHECHA, P. et SINGH, V. P. (2009). *Applied hydrometeorology*. Springer Science & Business Media.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (2012). *Terrestrial hydrometeorology*. John Wiley & Sons.