

CARTOGRAPHIE DES PLUIES ANNUELLES DANS LE BASSIN-VERSANT DE L'OUED SEYBOUSE (NORD-EST ALGERIEN)

Reçu le 15/07/2007– Accepté le 02/11/2009

Résumé

La carte pluviométrique, fréquemment utilisée dans les études hydro-climatologiques, constitue un outil de travail pour les projeteurs. Sa réalisation exige de résoudre deux séries de problèmes : homogénéisation des données (utilisation des composantes principales pour tester la fiabilité des données et pour le comblement des lacunes), variographie et interpolation des données aux nœuds d'une grille. La carte permet de passer d'une connaissance ponctuelle à une connaissance spatiale du phénomène. A l'aval, elle permet l'estimation correcte des lames précipitées pour le calcul des bilans hydrologiques des bassins.

Mots clés: Pluies, bassin, interpolation, cartographie

Abstract

The rainfall map constitutes a work tool for projectors. Its realization needs to solve two kinds of problems : data homogeneity (using of principal components for testing the reliability of data and for filling up the gaps), variography and data interpolation at the nodes of a grid. The map allows a spatial knowledge of rainfall and a correct estimation of rainfall mean for hydrological studies of watersheds.

Keywords: Rainfall, basin, interpolation, cartography.

Abdelaziz LOUAMRI

Faculté des Sciences de la Terre
de la Géographie et de
l'Aménagement du Territoire.
Université de Constantine, Algérie

ملخص

I

ntroduction

La cartographie des pluies (annuelles, mensuelles et maximales) sur le Nord de Algérie a fait l'objet de plusieurs travaux, A.N.R.H., 1993 [1] Mouhous 1998 [2] ; Touazi et al 2001[3] ; Laborde et al 2003 [4]. D'autres travaux ont couvert la région Centre Aissani et al 1983 [5], Touaibia et al 2006[6]. Mebarki, 2005 [7] a réalisé la carte des pluies annuelles sur l'Est algérien.

Ce travail est le résumé des travaux réalisés au cours de deux stages effectués à l'Université de Nice Sophia Antipolis sous la direction du Professeur Jean Pierre Laborde. Il détaille les étapes de réalisation de la carte pluviométrique moyenne inter-annuelle (1969-1998) du bassin de la Seybouse (Code 14, Algérie orientale). Les différentes étapes qui aboutissent à la réalisation de la carte pluviométrique font appel aux méthodes d'analyse de données [8], aux Modèles Numériques de Terrain, et aux méthodes géostatistiques [9].

2. Les postes pluviométriques et l'homogénéisation des données.

La cartographie des pluies annuelles exige de résoudre les contraintes situées à l'amont : problèmes liés aux données dans les séries d'observation et ceux dus à la faible densité des réseaux de mesures pluviométriques.

L'étape de traitement des données fait appel aux méthodes statistiques (A.C.P. pour constituer les vecteurs régionaux, cumuls des résidus de régressions, régressions multiples). Le traitement des données a été réalisé grâce au logiciel Hydrolab [8].

Les Distribution statistique des pluies annuelles.

Les postes pluviométriques finalement retenus pour cette étude sont au nombre de (21). Les études antérieures Chaumont [10], A.N.R.H.[1], Mébarki [7], Touaibia et al [6] ont montré que les pluies aussi bien annuelles que mensuelles pouvaient être ajustées grâce à la loi racine-normale. Après avoir testé les différents types de modèles de distributions statistiques (loi normale, loi log-normale), la loi racine-normale a été retenue, les pluies étant exprimées en racines de dixièmes de millimètres.

L'expression de la loi racine-normale est :

$$F(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad \text{Avec : } u = \frac{\sqrt{P} - \overline{\sqrt{P}}}{\sigma_{\sqrt{P}}}$$

Où :

$F(P)$: probabilité qu'une valeur quelconque P soit inférieure ou égale à p ;

u : variable réduite de Gauss ;

$\overline{\sqrt{P}}$: moyenne des racines carrées de la série d'observations ;

$\sigma_{\sqrt{P}}$: écart-type des racines carrées de la série d'observations.

P : pluie en dixièmes de millimètres

Cette loi est caractérisée par deux paramètres :

- La moyenne des racines carrées des pluies mensuelles ($\overline{\sqrt{P}}$) ;
- L'écart-type des racines carrées des pluies mensuelles ($\sigma_{\sqrt{P}}$).

La loi racine-normale est très bien adaptée aussi bien pour les stations situées en Hautes Plaines peu pluvieuses (fig n° 1 ,Aioun Settara) que les stations telliennes (fig n° 2, Ain Berda) avec une pluviométrie annuelle plus importante.

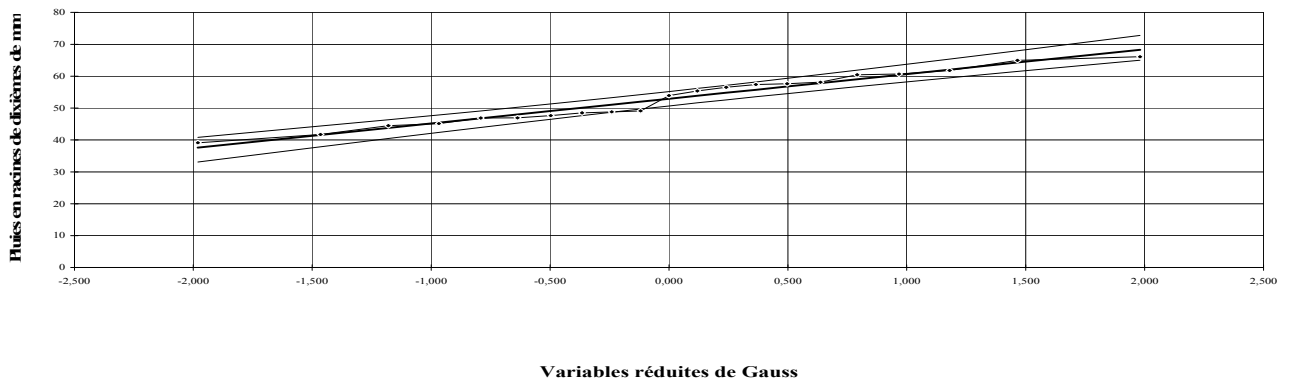


Fig n° 1 : Ajustement à une loi racine-normale des pluies annuelles à Aioun Settara (bassin de l'oued Cherf amont, Hautes Plaines), n=21.

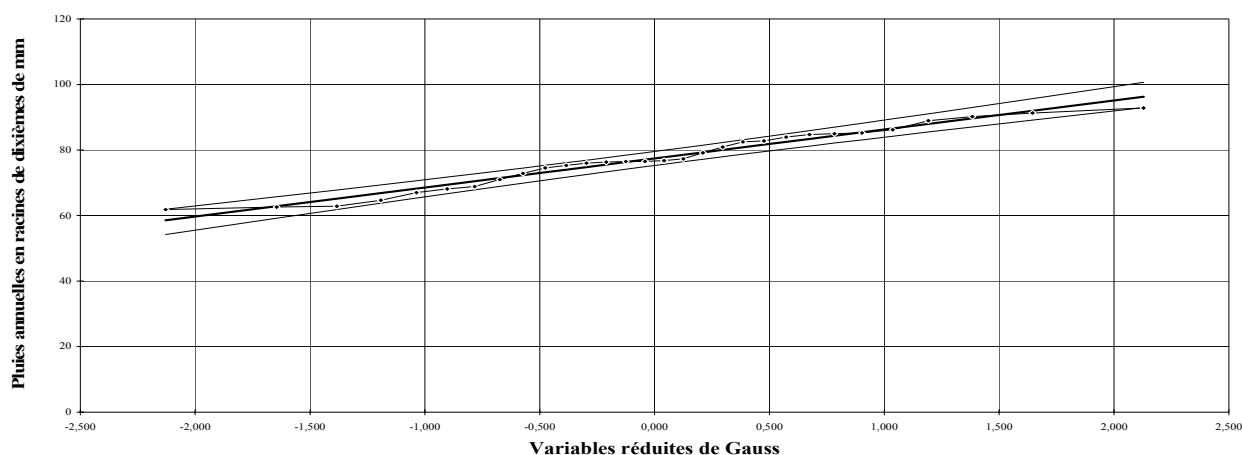


Fig n° 2 : Ajustement à une loi racine-normale des pluies annuelles à Ain Berda (bassin de l'oued Ressoul), Tell méridional , n=30.

2.1. Postes pluviométriques de référence et constitution des vecteurs régionaux.

La méthode de traitement de données, basée sur les vecteurs régionaux, est celle adoptée et développée par Laborde 1993, [1]. Les vecteurs régionaux sont constitués par les composantes principales calculées sur les données annuelles des stations de base.

Celles –ci au nombre de neuf (fig n° 3) présentent peu ou pas de lacunes sur la période adoptée et sont choisies pour être représentatives des différentes zones du bassin de la Seybouse d'une superficie de 6450 km². C'est un bassin à écoulement exoréique qui prend ses sources dans la zone des Hautes Plaines et a un parcours Sud -Nord.

Les Hautes Plaines présentent une topographie plane avec des altitudes élevées. La zone tellienne est plus compartimentée mais avec des altitudes moins élevées.

- 1- Hautes Plaines : Ain Beida, Aioun Settara .
- 2- Tell intermédiaire avec des sites différents : Constantine, Bordj Sabath , Guelma, Boucheougouf .
- 3- sites de vallée : Guelma, Boucheougouf .
- 4-Tell septentrional : Bouati Mahmoud, Ain Berda.
- 5-Zone littorale : Annaba.

Les postes de Ain Beida, Constantine Ain El Bey et Bouati Mahmoud situés à la périphérie du bassin de la Seybouse sont utilisés comme postes de référence car présentant très peu de lacunes.

Les lacunes très peu nombreuses ont été dès le départ comblées pour les stations de référence grâce à la méthode bouche trous [1] et [9] basée sur une A.C.P. sur les stations de base.

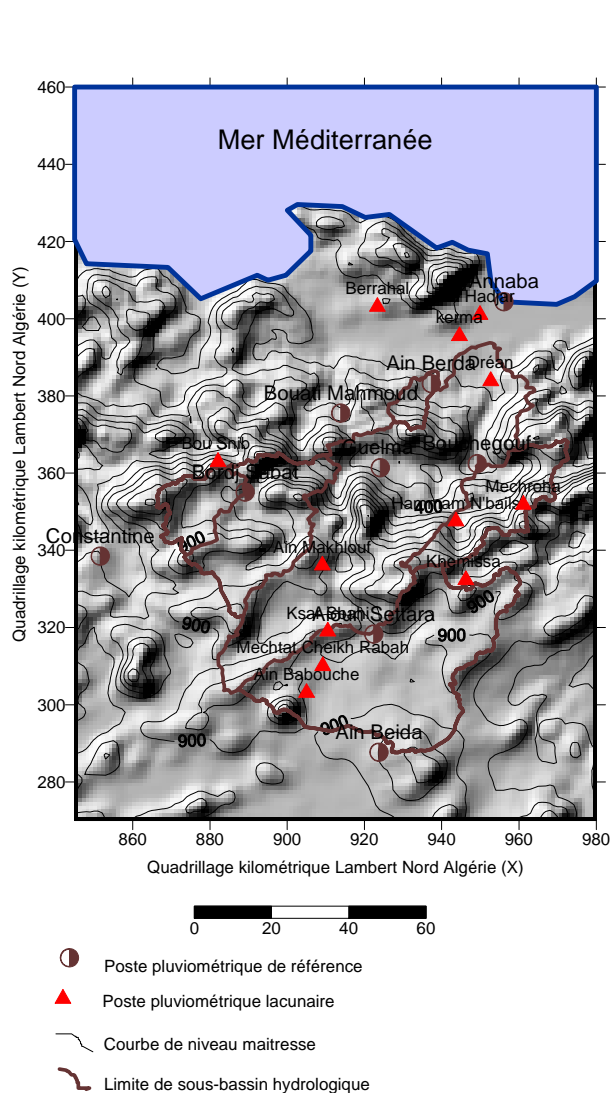


Fig n ° 3 Le bassin de l'oued Seybouse : modèle numérique de terrain, limites des sous-bassins aux stations hydrométriques et localisation des postes pluviométriques

2.2. A.C.P. sur les postes pluviométriques de référence et constitution des vecteurs régionaux.

Les vecteurs régionaux sont constitués par les composantes principales calculées sur la matrice des coefficients de corrélation. Seules les deux premières composantes sont prises en compte, car elles ont une signification spatiale. La première composante représente une part importante de la variance expliquée (75.3%). Les deux premières composantes principales ont une variance cumulée de 86.4 %. En ce qui concerne la projection des variables actives, la première composante représente la répartition temporelle d'ensemble des pluies inter-annuelles. La corrélation est très bonne avec toutes les variables, supérieure à 0.80 sauf pour Aïoun Settara (0.67). Cette valeur est significative car les valeurs tabulées de r limites pour n=30 sont de 0.35 au seuil de 5 %, 0.41 au seuil de 2 % et 0.45 au seuil de 1 %. Le poste de Aïoun Settara a été intégré aux stations de référence pour donner du poids à la zone des Hautes Plaines.

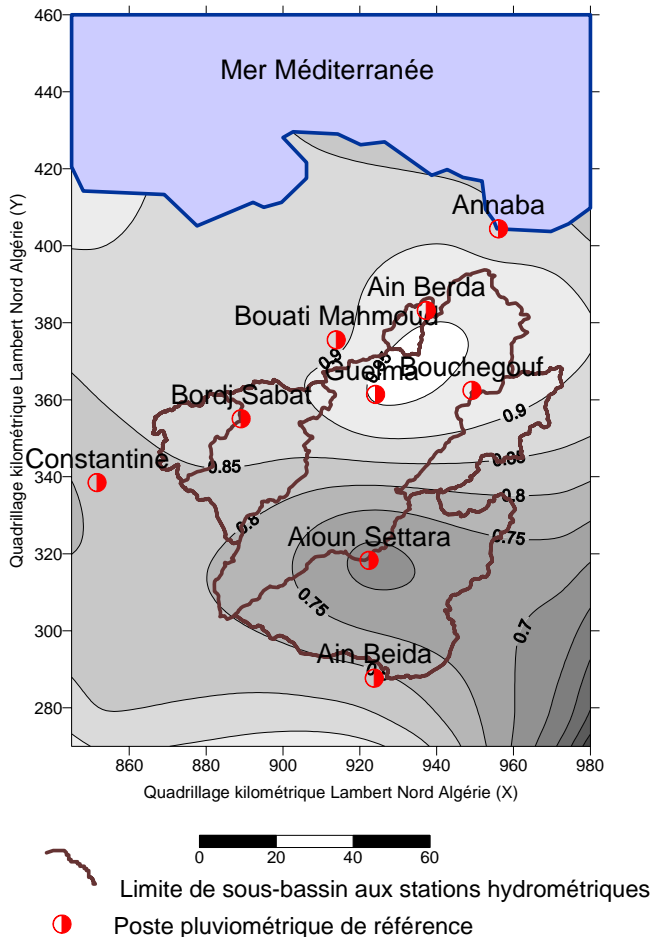


Fig n° 4 Comportement des postes pluviométriques de référence avec la première composante

Par contre, la seconde composante, moins bien corrélée que la première avec les postes pluviométriques différencie spatialement le Nord du bassin (zone tellienne) et le Sud (stations des Hautes Plaines).

Les stations des Hautes Plaines sont corrélées positivement avec la seconde composante alors que les stations telliennes sont corrélées négativement. Les stations situées dans la zone médiane ont une corrélation proche de zéro (fig n° 5).

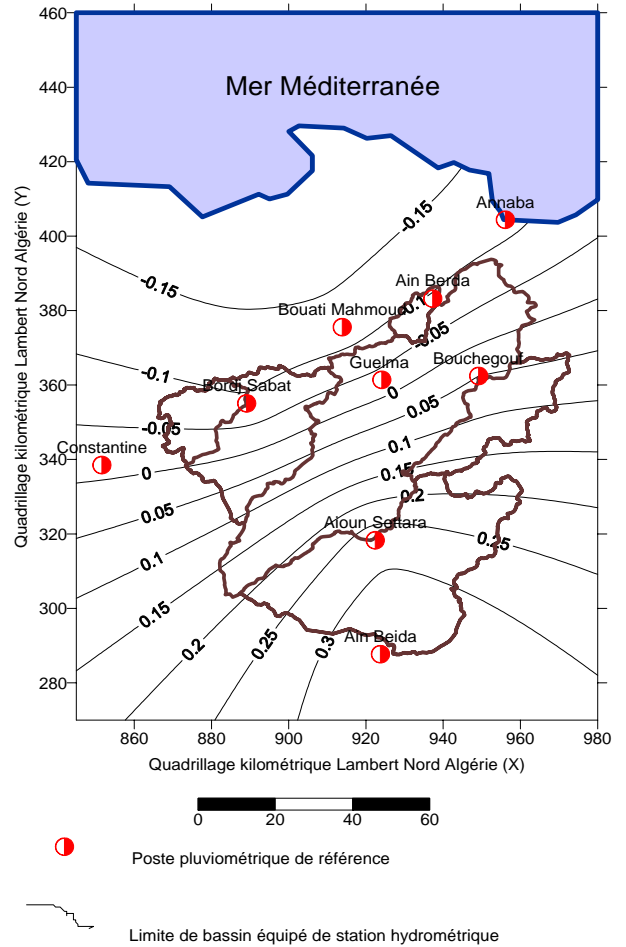


Fig n° 5 Comportement des postes pluviométriques de référence avec la seconde composante

Les deux premières composantes représentent 86.4 % de la variance expliquée, cela signifie pour les stations de référence que les séries pluviométriques se ramènent à une combinaison linéaire de ces composantes, avec un coefficient de corrélation multiple de $0.86^{0.5} = 0.923$. Pour généraliser ce résultat aux autres stations qui sont lacunaires, nous pouvons considérer que les observations pour n'importe quelle station ne dépendent que des valeurs prises par C1 et C2. Les conditions de normalité sont réunies pour les stations lacunaires puisque les pluies sont exprimées en racines de dixièmes de millimètres et pour les composantes C1 et C2 (cf fig 6 et 7). On peut raisonnablement penser que les régressions seront linéaires. Ceci doit permettre d'homogénéiser les données des stations lacunaires en utilisant les composantes C1 et C2.

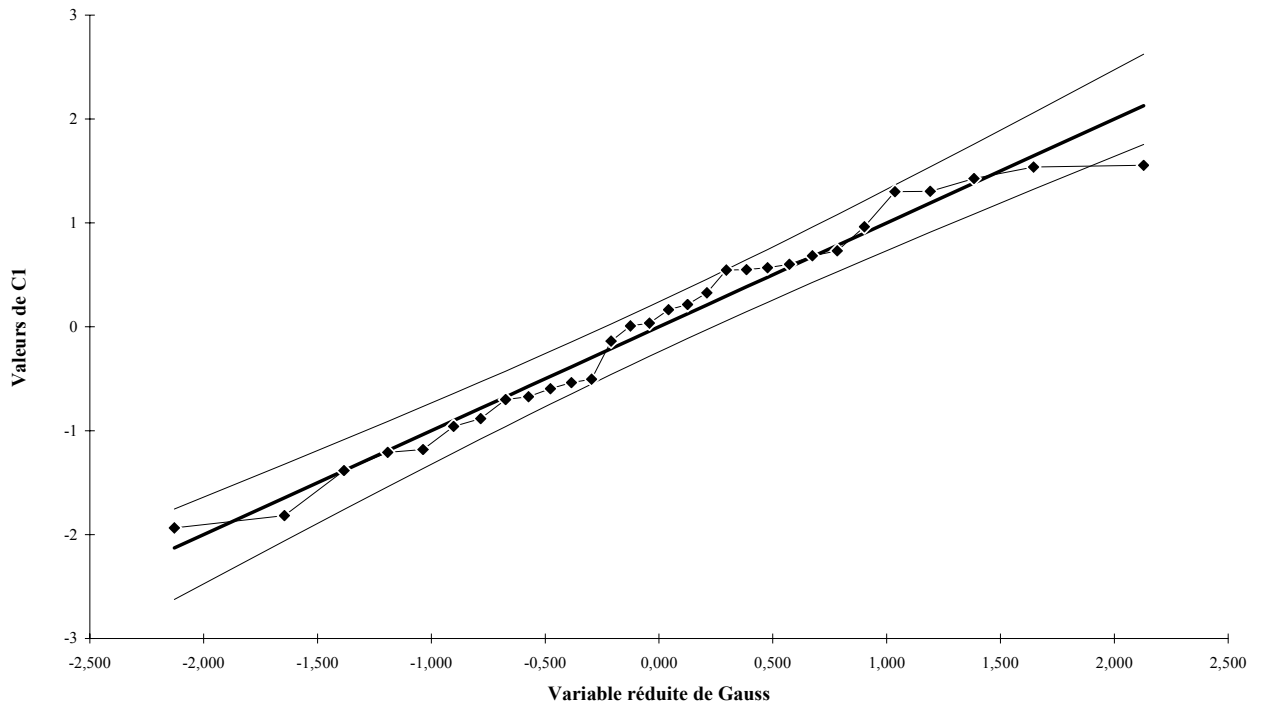


Fig n ° 6 Ajustement à une loi normale des projections sur la première composante (n=30)

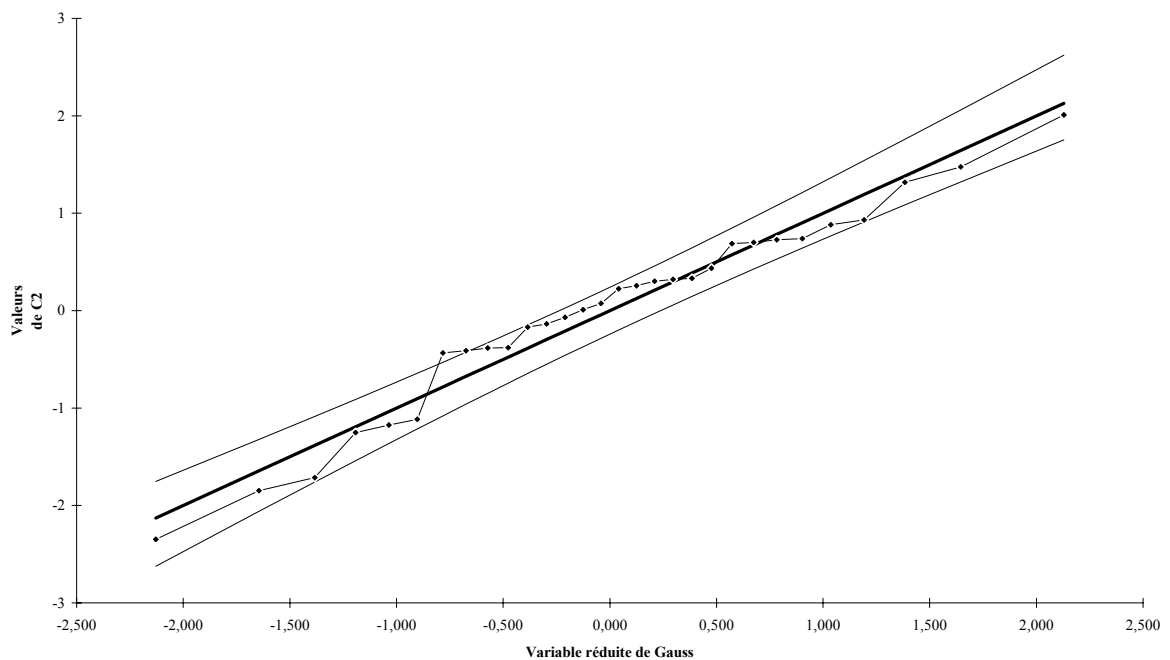


Fig n ° 7 Ajustement à une loi normale des projections sur la seconde composante (n=30)

Homogénéisation des données annuelles.

Les données des 12 stations lacunaires sont homogénéisées en utilisant les deux vecteurs régionaux.

L'homogénéisation comprend la critique des données et le comblement des données des années lacunaires.

2.3. Critique des données par la méthode des cumuls des résidus de régressions.

Deux types d'erreurs peuvent être commises dans le domaine des mesures de la pluie. Les erreurs accidentelles (erreurs lors de la lecture, oublis, erreurs de transcription) et les erreurs systématiques (changement de site avec maintien du nom du poste et même des coordonnées, utilisation d'une éprouvette inadéquate). Les changements d'observateurs sont aussi une cause d'apparition d'erreurs de mesures.

Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature spécialisée pour tenter de découvrir les erreurs. Il serait plus juste de parler de détecter les anomalies par rapport à la représentation statistique du phénomène. La méthode des cumuls des résidus de régressions permet de détecter les anomalies accidentelles et les anomalies systématiques. Cette méthode, plus puissante que celle des doubles-cumuls, peut être mise en œuvre en utilisant un tableur (Excel, etc...). On teste les données observées de chacune des stations lacunaires par rapport à la série fictive basée sur les composantes C1 et C2 afin de détecter les anomalies systématiques et accidentelles. Cependant, pour procéder à des corrections, il est souhaitable de revenir aux originaux. Dans ce travail, on a gardé les données sans faire de corrections.

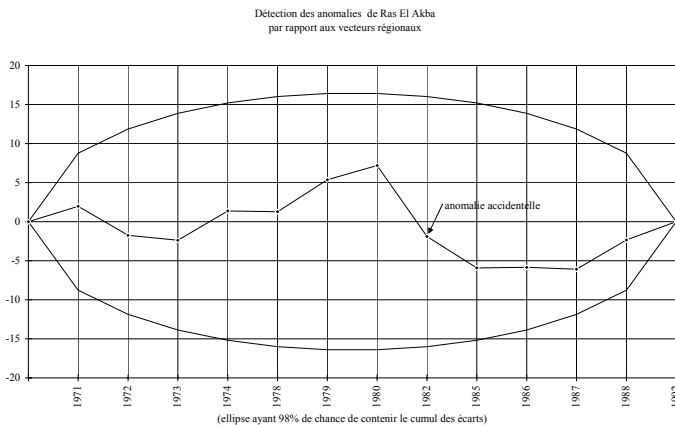


Fig n ° 8 : Détection d'une anomalie ponctuelle (l'année 1982 au poste de Ras El Akba)

Comblement des lacunes.

Le principe de la régression double est d'expliquer une variable z à partir de deux variables x et y. La relation est linéaire du type : $z = a x + b y + c + \varepsilon$

z : variable dépendante, année manquante à la station lacunaire ;

x : variable indépendante une, C1

y : variable indépendante deux, C2.

a et b : paramètres de la régression double,

c : constante ;

ε : résidu de régression.

Les paramètres a, b et c sont déterminés par la méthode des moindres carrés de façon à minimiser la somme des carrés des écarts ε . Appliquée aux pluies annuelles d'une station lacunaire, ceci donne : $x_e = a * C1 + b * C2 + c + \varepsilon$.

Le coefficient de corrélation entre la station lacunaire et C1 et le coefficient de corrélation multiple doivent être significatifs au seuil de 5 %.

On procède ainsi au comblement des lacunes annuelles des 12 stations lacunaires pour la période septembre 1969 à août 1998.

3. Régression pluie –facteurs explicatifs.

La première phase a permis d'accéder à une information pluviométrique sans lacunes et considérée comme fiable. Cependant cette information reste ponctuelle, limitée aux postes pluviométriques.

L'idée développée par plusieurs chercheurs (Laborde, 1984) [9], est d'utiliser toute l'information concernant les variables qui peuvent expliquer la répartition spatiale des pluies, notamment celle relative à la topographie à travers le Modèle Numérique de Terrain. Laborde (1984) [9] a combiné la régression sur des paramètres de relief et l'interpolation des résidus de régression.

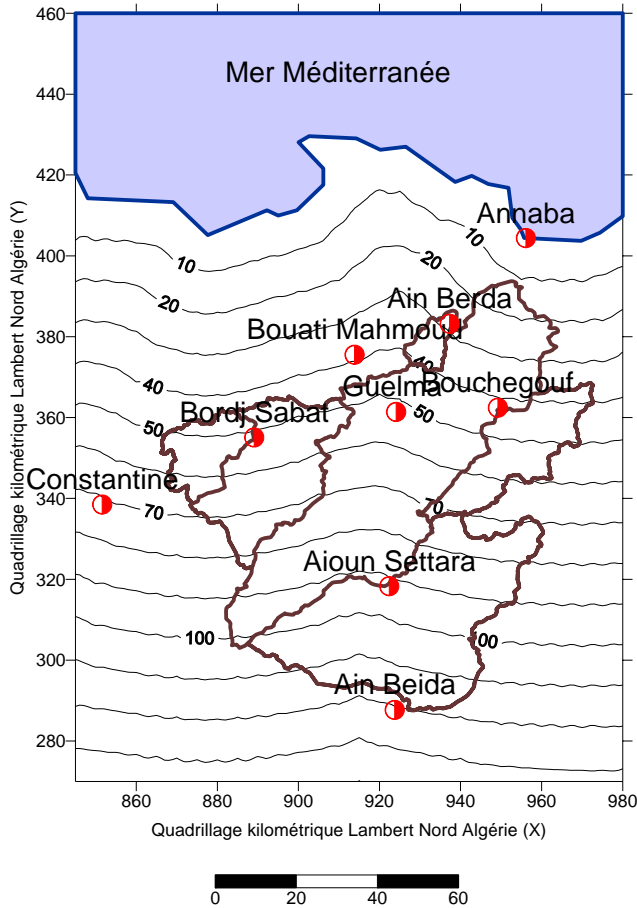
La pluie présente une composante régionale et une composante locale. On peut intégrer la position géographique exprimée par les X Lambert et les Y Lambert et le relief. Ces paramètres interfèrent pour expliquer la plus ou moins grande quantité de pluies qui tombe sur un point de l'espace.

Les paramètres de relief utilisés dans les régressions multiples sont donc la situation géographique des stations grâce aux coordonnées Lambert X et Y, l'altitude réelle ou altitude lissée ZLiss des postes pluviométriques. La distance à la mer, déjà introduite par Davtian [10] a été combinée à l'altitude Zliss par Laborde et al [4].

L'altitude Zliss : La relation entre la pluie et l'altitude est connue depuis longtemps, elle est liée au phénomène d'ascendance orographique. Deux types de données peuvent être utilisés, l'altitude réelle des postes et l'altitude lissée. Plusieurs travaux (Laborde 1984,[11],Davitian 1998[12]) ont abouti à préférer l'altitude lissée ou altitude des sommets environnants . La maille du M.N.T. utilisé est de 1km*1 km. L'altitude lissée est calculée pour chaque nœud du MNT initial, en remplaçant chaque altitude réelle par la moyenne de l'altitude au niveau de ce nœud et de celles des huit nœuds voisins.

Le deuxième paramètre explicatif important est $\text{Exp}^{-(d/p)^p}$ Zliss : exponentielle décroissante de la distance à la mer combinée à l'altitude lissée ZLiss avec un paramètre p de 40 km obtenu après plusieurs essais (10, 20, 30, 40 km). Le paramètre p représente la distance de décroissance de l'effet distance à la mer.

La distance à la mer est calculée par : $d = \min ((X - X_{\text{côte}})^2 + (Y - Y_{\text{côte}})^2)^{0.5}$



La méthode de régression multiple utilisée est la méthode régressive (backward elimination). On introduit dans un premier temps l'ensemble des variables explicatives. On vérifie la signification des coefficients de corrélation partielle et le coefficient de corrélation multiple. Si le test sur l'une des variables introduites est négatif, elle est éliminée et on reprend avec les autres variables explicatives. Les calculs se poursuivent jusqu'à ce que tous les tests de coefficients de corrélation partielle et multiple soient positifs. Après avoir introduit comme variables expliquant la répartition spatiale des pluies les X Lambert, les Y Lambert, Zliss, $(\exp^{(-d/p)})$, $(\exp^{(-d/p)} * Zliss)$, la régression retenue est :

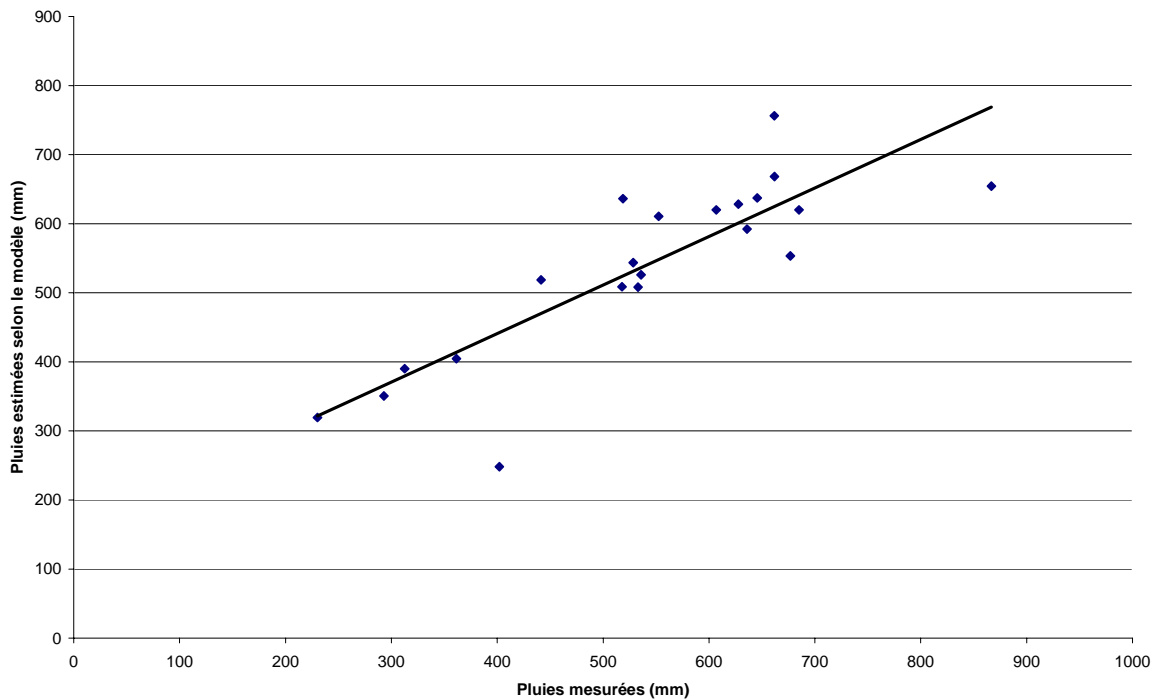
Pluie 1969/1998 = $3.75 * Y \text{ Lambert} + 1.01 * (\exp^{(-d/p)} * Zliss) - 878.77 + \epsilon$ avec un coefficient de corrélation multiple de 0.84 et des coefficients de corrélation partielle de 0.827 pour Y Lambert et 0.629 pour $(\exp^{(-d/p)} * Zliss)$. La pluie diminue du Nord vers le Sud selon les coordonnées Lambert Y et selon une exponentielle décroissante de la distance à la mer combinée à l'altitude lissée Zliss.

Grâce à la régression multiple linéaire, on peut obtenir une estimation de la pluie pour les sites des 21 postes pluviométriques et pour n'importe quel point du bassin dont on connaît les coordonnées X et Y et les valeurs des paramètres explicatifs.



Courbe d'égalité distance à la mer

Fig n° 9 : Courbes d'égalité distance à la mer (km)



$$\text{Pluie estimée} = 0,7025 \text{ pluie mesurée} + 160,02 \text{ avec } R^2 = 0,7025$$

Fig n°10 : Relation pluie mesurée –pluie estimée par le modèle de régression

4 Structure spatiale des pluies et interpolation

Le principe de la variographie est d'estimer en tout point d'une grille régulière la valeur de la variable étudiée à partir des valeurs mesurées après avoir déterminé la structure spatiale de cette variable. Les valeurs de la variable sont modélisées grâce à un variogramme et interpolées dans un logiciel d'interpolation et de dessin isolignes (Surfer).

L'outil du krigeage est le variogramme qui peut être défini comme une fonction permettant de quantifier la variabilité spatiale d'un phénomène comme la pluie.

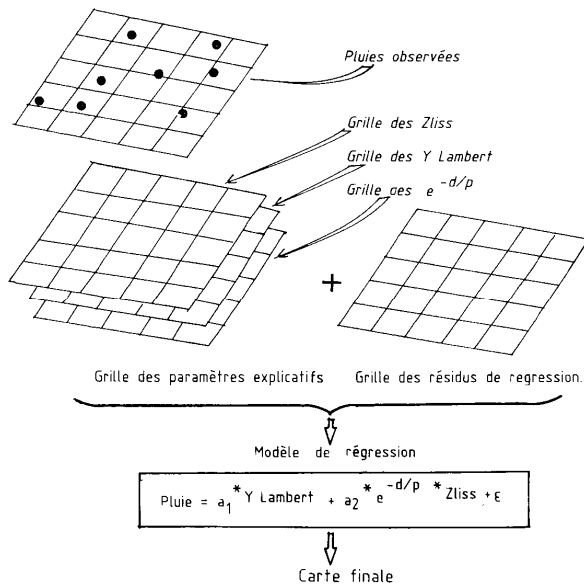
Cette fonction est estimée à partir des couples de valeurs expérimentales aux points de mesures : $\gamma(h) = 1/2 N(h) * \sum (Z(x+h) - Z(x))^2$

Avec $Z(x)$: valeur de z au point x ,

X : points pour lesquels les données sont disponibles,

$N(h)$: nombre de couples de points distants de h .

Les étapes de la cartographie sont résumées et schématisées dans la figure 11.



$$Pluie = 3.75 * Y \text{ Lambert} + 1.01 * e^{-d/40} * Zliss - 878.77 + \epsilon$$

D'après : Laborde (1993), Davtian (1998), Assaba (2003) et Mébarki (2005)

Figure 11 : Schéma de construction de la carte pluviométrique du bassin de la Seybouse (septembre 1969-août 1998)

Pour les 21 postes pluviométriques, on connaît la pluie mesurée et son estimation grâce à la régression multiple linéaire avec une variance expliquée de 70%. Le résidu (pluie observée – pluie estimée) représente la part de la pluie qui ne s'explique pas par le modèle de régression. Les résidus de régression sont interpolés grâce au logiciel Hydrolab (Laborde, 2000), [1]. Les paramètres du variogramme sont la portée, le palier et l'effet de pépité.

On ajuste au variogramme expérimental un variogramme théorique. Les modèles théoriques sont le variogramme linéaire, exponentiel, sphérique et gaussien. L'ajustement se réalise en minimisant l'erreur-type entre le variogramme expérimental et le modèle théorique. Après plusieurs essais, le modèle sphérique a été retenu. Celui-ci est caractérisé par un comportement linéaire à l'origine et atteint son palier C pour une distance (h) égale à la portée (a). Les paramètres du variogramme théorique sont les suivants (fig. 12): portée : 40 km, palier : 7500 mm^2 , sans pépité.

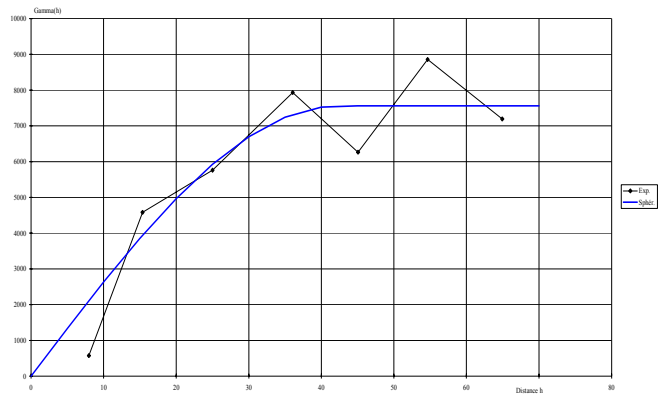


Figure 12 : Variogramme expérimental et théorique des résidus de régression

Le variogramme sphérique s'exprime par :

$$\text{Gamma}(h) = \text{pépité} + C \left(\frac{3}{2} * \frac{h}{a} - \frac{1}{2} * \frac{h^3}{a^3} \right) \text{ si } h < a$$

$$\text{Gamma}(h) = C \text{ pour } h > a$$

Avec :

$\text{Gamma}(h)$: variogramme théorique

h : la distance moyenne intra-classe (km),

C : le palier (mm^2),

a : la portée théorique du phénomène (40km).

Contrairement aux variogrammes qui ont été réalisés pour la carte A.N.R.H. couvrant l'Algérie du Nord [1], le variogramme est isotrope, les résidus du modèle évoluent de la même façon dans toutes les directions. La pépité est nulle, l'effet de pépité est lié soit aux erreurs de mesures, soit à la présence d'un phénomène qui se développe à une échelle inférieure à l'espacement des données.

L'interpolation des résidus grâce à ce variogramme de type sphérique est réalisé dans un logiciel d'interpolation (Surfer). La carte finale est obtenue en ajoutant à la pluie estimée par le modèle de régression le résidu interpolé.

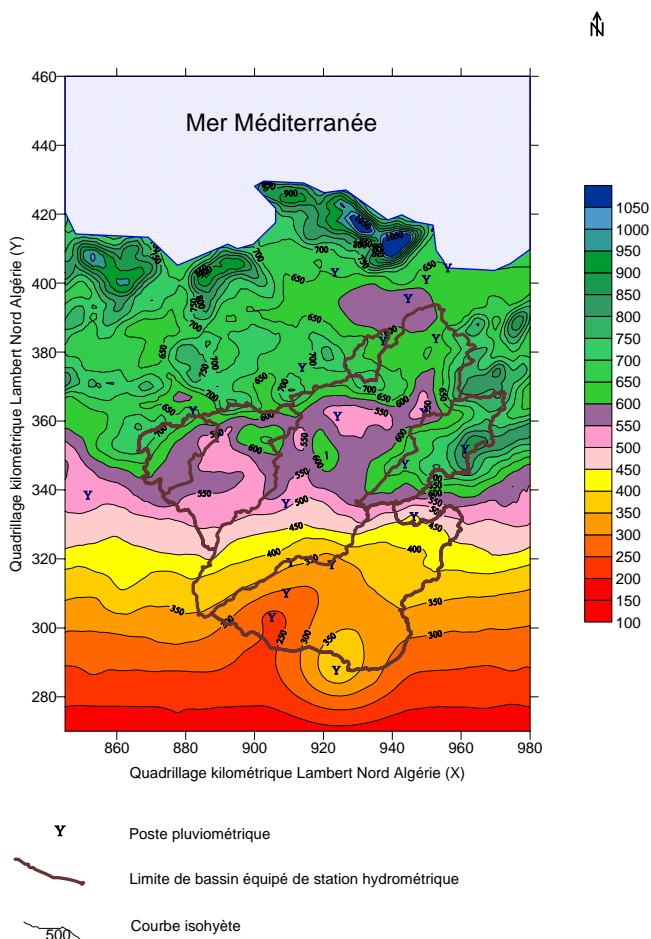


Figure 13 : Carte pluviométrique moyenne inter-annuelle du bassin de la Seybouse (Septembre 1969-août 1998)

Les zones de forte pluviométrie sont le massif de l'Edough qui surplombe la mer Méditerranée et les monts de la Medjerdah (station de Mechroha). Mais la majeure partie des bassins aux stations enregistre moins de 500mm, mis à part le relief de la Mahouna dans la moyenne Seybouse. Les Hautes Plaines, malgré l'altitude supérieure à celle de la zone tellienne, connaissent une diminution importante de la pluviométrie annuelle (moins de 450 mm à 250 mm).

Par rapport à la carte A.N.R.H. 1993 [1], les données enregistrent une diminution moyenne de 10 %. C'est le même pourcentage qui a été remarqué entre les cartes Chaumont [10] et A.N.R.H. La plus forte diminution est celle de Mechroha (-15%) qui est le poste situé le plus en altitude. Seule la station de Ain Beida (Hautes Plaines) commune aux deux périodes présente une légère augmentation de 5%. Mebarki [7] a noté une très bonne corrélation ($r=0.985$) pour 90 postes pluviométriques communs à la carte qu'il a réalisé pour la période 1972/73 à 1983/84 et celle de l'A.N.R.H. et une diminution générale de 8%.

CONCLUSION

La carte pluviométrique constitue un outil de travail pour les projeteurs. Sa réalisation exige de résoudre plusieurs problèmes : homogénéisation des données grâce à des méthodes dont l'efficacité a été prouvée dans plusieurs études (utilisation des composantes principales pour tester la fiabilité des données et pour le comblement des lacunes), utilisation de l'information topographique fournie par un M.N.T., variographie et interpolation des données pour passer d'une connaissance ponctuelle à une connaissance spatiale du phénomène.

Les difficultés principales lors de la cartographie des pluies résident d'une part dans la fiabilité des données, la disponibilité de séries de mesures sans trop de lacunes, la densité du réseau d'observation et, d'autre part dans l'interpolation des pluies. La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage simple en covariance. Les avantages du krigeage sont d'être un interpolateur exact et de fournir une variance d'estimation. Le krigeage des résidus de régression a été utilisé avec beaucoup de réussite dans les études pluviométriques.

On dispose ainsi d'une représentation des pluies sur le bassin qui permet d'avoir une vision globale du phénomène, et de connaître les valeurs ponctuelles des pluies. On peut aussi estimer les lames d'eau précipitées d'une façon plus correcte que celles de la moyenne arithmétique et de Thiessen. Cependant, si la couverture spatiale généralement faible réalisée par les réseaux de mesures pluviométriques trouve une solution par la cartographie des pluies, l'interpolation dans les zones faiblement instrumentées reste difficile.

RÉFÉRENCES

- [1] A.N.R.H., 1993 : *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000* (2 feuilles, une notice de 49 p.). Ministère de l'Equipement, Alger, Ed. I.N.C.
- [2] Mouhous N., 1997, Etude des précipitations extrêmes journalières en Algérie du Nord. Mémoire de D.E.A. « Milieux physiques méditerranéens », Université de Nice-Sophia Antipolis, 100 p.
- [3] Touazi M. et Laborde J-P., 2000, Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 13, pp. 191-199.
- [4] Laborde J-P., Assaba M. et Belhouli L., 2003 : Les chroniques mensuelles de pluies de bassin : un préalable à l'étude des écoulements en Algérie. *Colloque SHF, Gestion du risque en eau en pays semi-arides*, Tunis, 21-22 mai 2003, 10 p.
- [5] Aissani B. et Laborde J.P., 1983 : Les pluies extrêmes et leur cartographie automatique dans la région algéroise. Document préliminaire. *Conférence sur le climat méditerranéen et les ressources en eau, Eau verte - Eau bleue*, Marseille, 8 p.
- [6] Touaibia B. Inegliz S., et Ould Amara A., 2006 : Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du centre de

l'Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'Eau* 19(3) 2006, 213-219.

[7] Mebarki A., 2005 : Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. *Thèse d'Etat*, Université Mentouri de Constantine, 360 p.

[8] Laborde J-P., 2000, *HydroLab. Logiciel de traitement statistique des données hydrologiques*. Université de Nice- Sophia Antipolis.

[9] Laborde J-P., 1997 Les différentes étapes d'une cartographie automatique : l'exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **8**, p37-46.

[10] Chaumont et Paquin C, 1971, *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord*, échelle 1/500 000 (4 feuilles et notice), Société de l'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, Alger

[11] Laborde J-P., 1984 : Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : éléments d'hydrologie lorraine. *Thèse de doctorat d'état ès Sciences*, I.N.P.L., E.N.S.G.A.P.N., Nancy, 484 p.

[12] DAVTIAN G., 1998, Analyse des données et cartographie automatique : application aux principales variables climatiques du versant méditerranée du Maghreb, *Thèse de doctorat*, Université de Nice-Sophia Antipolis, 328 p.