

60 (Peck and Brown, 1962) où elle apparut sous le nom de méthode des anomalies. Le traitement était à l'époque fastidieux car entièrement manuel, et le relief n'était pris en compte que par la seule donnée d'altitude. Il faut attendre 1972 (colloque de Geilo consacré à la distribution des précipitations en zone montagneuses) pour voir apparaître des concepts nouveaux appliqués à l'analyse des champs annuels de précipitations. Les progrès réalisés depuis dans le domaine du traitement des données permettent de concevoir d'une part des paramètres de relief élaborés de façon automatique, d'autre part d'utiliser des schémas d'interpolation modernes.

A notre connaissance le premier à avoir combiné en France régression sur paramètres de relief et interpolation automatique de résidus est J.P. Laborde, pour des gradex saisonniers et des pluies décennales sur le Nord Est de la France (Cf. Laborde, 1984). C'est son travail, considérable, qui a servi de base à notre étude.

(II) - CODAGE DE LA TOPOGRAPHIE ENTOURANT UN POINT

II.1 Le fichier "relief" - Paysage environnement un point.

La relation (1) de décomposition de la pluie observée à un poste suppose que l'on connaît les paramètres topographiques (symbolisés par le vecteur R_i) relatifs au site de mesure. De même la relation (2) de reconstitution de la pluie en un point quelconque (point de grille par exemple) n'a d'intérêt que si l'on est capable de connaître de façon automatique les paramètres topographiques (vecteur R) du site entourant ce point.

D'où la nécessité de disposer en premier lieu, d'une image informatique du relief du territoire français : dans ce but, la Météorologie Nationale a fait l'acquisition d'un fichier, provenant de l'Institut Géographique National, contenant le relief de la France sous forme numérisée : il s'agit d'un "modèle de terrain" fournissant une altitude "estimée" (plus ou moins entachée d'erreur) en tout point d'une grille kilométrique. Sur cette base nous avons procédé à plusieurs essais de codage de site par un système de paramètres de relief. Ces différents systèmes de codage ont du être abandonnés, non qu'il ne fussent pas assez bons prédicteurs du champ à analyser mais plutôt du fait de leur manque de robustesse lors de l'application de la régression aux points de la grille d'interpolation.

Dans un premier temps nous avons effectué un lissage du relief de la France en calculant, en chaque point d'une grille de maille 5km, une altitude moyenne à partir des 25 points environnants de la grille kilométrique. Cette opération permet de gagner en simplicité et la perte d'information qui en résulte est, on le verra plus loin, compensée par un gain en robustesse de la méthode de régression. Une fois ce lissage effectué on détermine le "paysage" environnant en un point G en considérant une matrice carrée $(2n+1, 2n+1)$ d'altitudes moyennes entourant le point G. La dimension n est associée au rayon d'influence supposé du relief sur la pluviométrie. En fait nous avons fixé ce rayon à 25 kilomètres, compromis entre distance moyenne entre postes pluviométriques et notre désir de reconstituer grâce aux paramètres de relief la variance de "moyenne échelle" du champ pluviométrique. Le "paysage" entourant le point G est finalement une matrice (11×11) d'altitudes moyennes (Cf. fig 1).

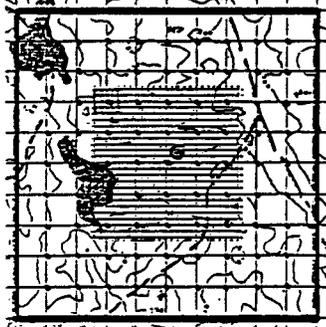


Figure 1.

Le site G est alors caractérisé par 121 valeurs. Nous avons évalué ces 121 valeurs pour environ 27000 sites de la grille 5x5 km plaquée sur la France.

II.2 Analyse en Composantes Principales sur les paysages français.

Une analyse en Composantes Principales (A.C.P.) a été effectuée sur le fichier des sites dans le but de fournir un système réduit de paramètres avec une perte minimum d'information. Nous ne l'avons pas appliquée directement aux paysages et avons préféré travailler sur un paysage relatif, obtenu à partir du paysage de base en ôtant à chacune des 121 altitudes du point central, cette opération de "centrage" permettent d'isoler comme premier prédicteur l'altitude moyenne du point central. après l'A.C.P., le paysage relatif en chaque point G est donné avec une précision satisfaisante (90% de variance expliquée), par la combinaison linéaire de 15 vecteurs propres V_1, \dots, V_{15} , chaque vecteur propre V_j étant pondéré par une composante principale C_j :



Figure 4 : Krigage des résidus
50 km

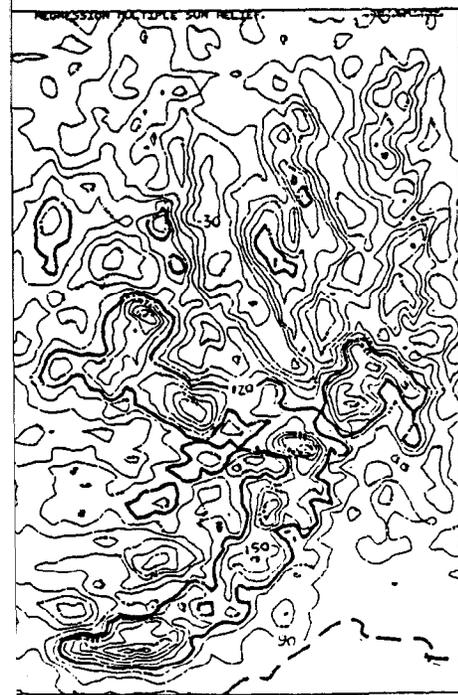
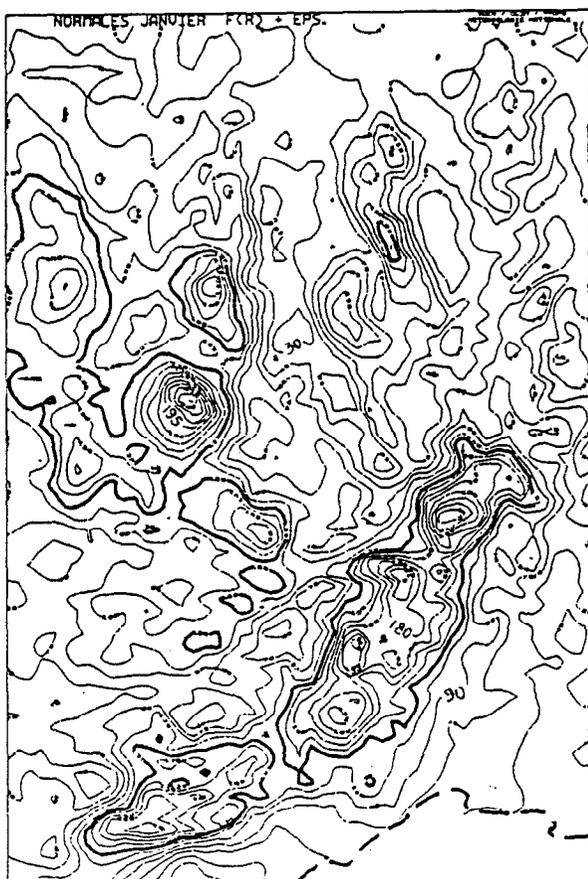


Figure 3 : Regression sur relief



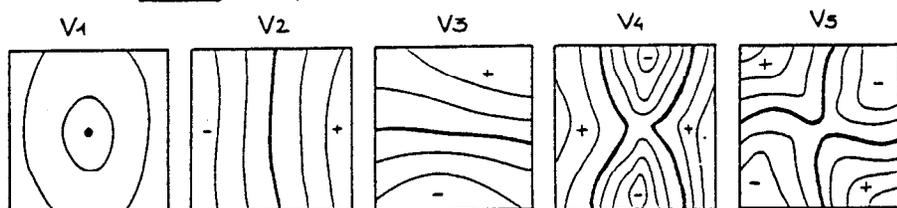
Figure 5 : Ecart-type de l'erreur d'estimation

Figure 6 : Champ reconstitué



$$\text{Paysage relatif en G} = \sum_{j=1}^{15} C_j(G) \cdot V_j$$

De ce fait chaque vecteur propre apparaît comme un paysage type (voir ci-dessous en figure 2 les 5 premiers vecteurs).



Pour résumer chaque site G est maintenant codé par un vecteur R contenant 16 prédicteurs :

- l'altitude moyenne Z du point G
- les 15 premières composantes principales C_1, \dots, C_{15} du paysage relatif en G.

Un tel codage est effectué aux 27000 sites de la grille 5X5 km, puis à tous les points de mesure de la pluie en France (environ 10 000).

[III] - REGRESSION PAR RAPPORT AU RELIEF - EXEMPLE DU MASSIF CENTRAL

III.1 Domaine d'étude

Nous limitons pour le moment notre étude à des champs pluviométriques statistiques, moins fluctuants que des champs journaliers. Le domaine d'étude doit être assez vaste pour que l'échantillon des points de mesure soit suffisant, mais pas trop non plus pour que l'équation de régression garde son sens. Une étude a montré que le coefficient de corrélation pluie/relief décroît soudain lorsque la dimension du domaine excède 300 km. Ces considérations liées à des contraintes d'exploitation nous ont amenés à découper la France en 10 régions que nous avons voulues relativement homogènes (Cf. fig. 10). Parmi ces 10 régions figure le Massif Central (250x370km), c'est sur cette région et sur les normales de janvier que nous présentons les résultats qui suivent. A l'intérieur de ce domaine, 398 postes présentent des valeurs de normales calculées.

III.2 Régression sur les paramètres sélectionnés

L'équation de régression associée est la suivante : $P_{\text{janvier}} (l/10mm) = f(R) + \epsilon$

$$\text{où } f(R) = 2.5C_3 - 0.7C_1 + 0.24Z - 1.5C_9 + 0.4C_2 - 0.1C_{11} + 722.3 \quad (3)$$

Cette équation doit ensuite être appliquée à n'importe quel point G de la grille couvrant le domaine. Il faut cependant s'assurer que cette extension se fait de façon légitime. Si l'on fait l'hypothèse que l'échantillon des points de la grille (un point tous les 5km) est tiré de façon aléatoire de la population mère des points du relief de la zone, cette hypothèse doit aussi se vérifier pour l'échantillon des points de mesure. La procédure de contrôle que nous utilisons consiste à comparer pour chacun des 16 paramètres de relief, les distributions relatives aux points de grille et aux points de mesure. En fait, grâce au lissage effectué sur le relief de base et grâce aux paramètres choisis, il n'existe pas de différences significatives (au sens de tests de Student, Fisher et distance de Mahalanobis) entre les deux échantillons. On peut alors cartographier l'équation (3) sur le Massif Central (Fig.3). Reste alors à analyser les résidus par une méthode de krigeage.

[IV] - KRIGEAGE DES RESIDUS DE LA REGRESSION

La méthode de krigeage est une méthode qui réalise une approche probabiliste de l'interpolation linéaire. On pourra en trouver les détails dans Delfiner (1973). Elle est relativement lourde et suppose certaines hypothèses sur le champ ϵ à analyser, en

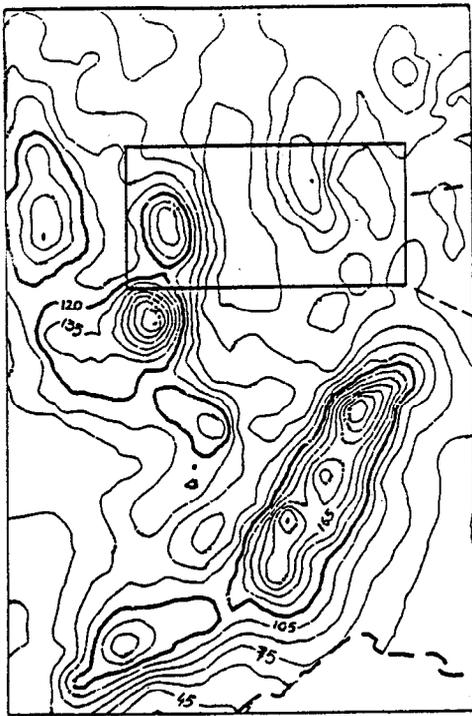


Figure 7 : Krigeage direct sur le réseau complet

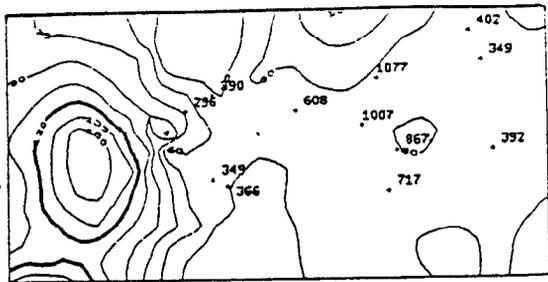


Figure 8 : Krigeage direct avec 12 postes manquants

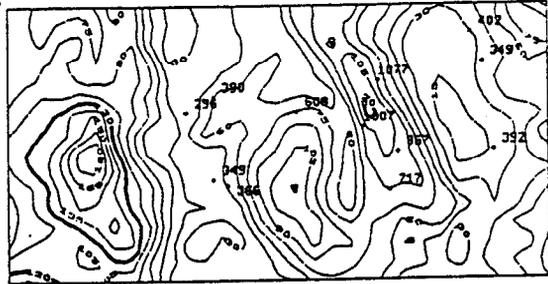


Figure 9 : Méthode AURELHY avec 12 postes manquants

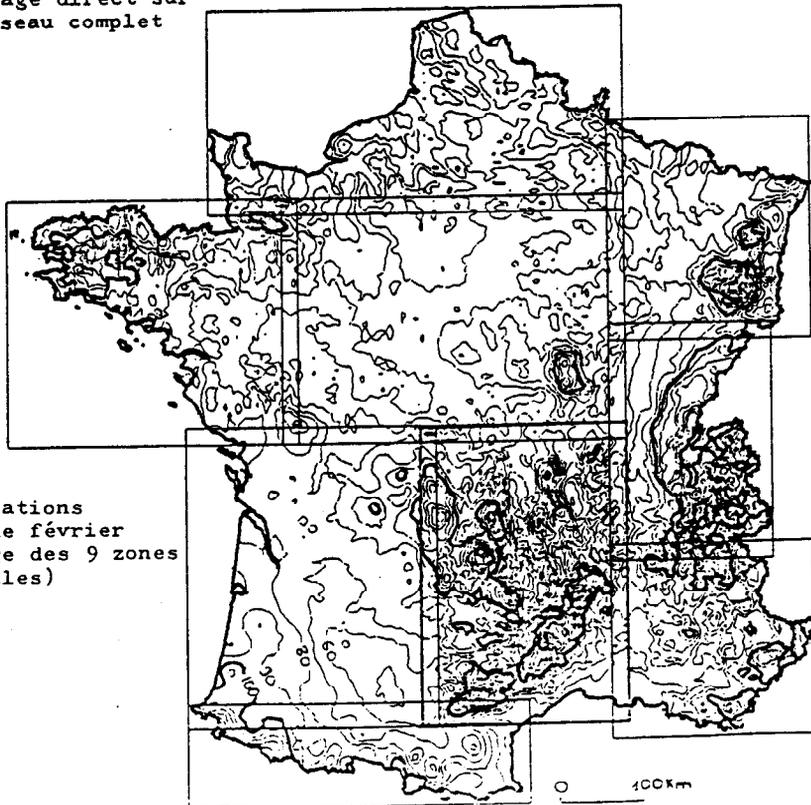


Figure 10 : Précipitations normales de février (assemblage des 9 zones continentales)

particulier l'hypothèse intrinsèque : Le champ $Z(x)$ est intrinsèque si la moyenne et la variance des accroissements $Z(x+h) - Z(x)$ du champ ne dépendent que du vecteur h et non du point d'appui x . On peut penser que le champ des résidus de régression respecte mieux l'hypothèse intrinsèque que le champ de base et se prête donc mieux au krigeage. Le krigeage présente l'avantage d'assurer une erreur d'estimation dont l'espérance est nulle et dont l'écart-type est minimum. Par suite, la connaissance de cet écart-type permet de déterminer de façon rationnelle l'écartement des isolignes de la carte à tracer.

L'estimation $\hat{E}^*(x, y)$ aux points de grille fournit une carte du champ des résidus (fig.4) assortie d'une carte d'écart type d'erreur d'estimation (fig.5).

[V] - RECONSTITUTION DU CHAMP DE PRECIPITATIONS

En chaque point G de la grille couvrant le Massif Central nous connaissons la valeur $f(R)$ donnée par l'équation de régression par rapport au relief, ainsi que le résidu estimé $\hat{E}^*(x, y)$. Nous en déduisons $P(x, y, R) = f(R) + \hat{E}^*(x, y)$ et donc la carte finale des normales de janvier sur le domaine (fig.6).

Indépendamment de tout jugement de valeur subjectif, on peut retenir, après observation des cartes tracées, que la carte des résidus, d'aspect relativement lisse, fournit un champ à variation lente représentant en quelque sorte les phénomènes de très grande échelle affectant le domaine (excès d'eau sur toute la partie ouest du Massif ainsi que sur le flanc cévenol), la carte de la régression modelant cette surface en injectant une variance de moyenne échelle sensée représenter les phénomènes d'échelle plus réduite liés aux reliefs.

Il s'agit maintenant d'apprécier la qualité de la cartographie obtenue ainsi que de la comparer avec celles obtenues par des méthodes plus classiques, comme le tracé manuel ou le krigeage appliqué directement sur les valeurs mesurées (Cf. fig. 7). Nous ne citerons ici que la comparaison la plus frappante : Nous avons retiré des postes de façon à créer artificiellement des zones pauvres (mais non exemptes) en points de mesure. Deux régions ont été choisies (Les Monts d'Aubrac et l'ensemble Limagne-Forez) où 20 postes ont été supprimés pour aboutir à une densité comparable à celle d'une région défavorable comme le Nord Ouest de l'Aveyron. La comparaison des valeurs reconstituées de ces 20 postes a été concluante : le krigeage direct (fig. 8) produit prudemment dans les deux zones un champ relativement plat, ce qui lui vaut une erreur absolue moyenne de reconstitution de 25 mm. La méthode prenant en compte le relief (fig. 9) prend, elle, beaucoup plus de risques (les monts du Forez, du Livradois et les minimums de la Limagne et du Forez apparaissent) tout en faisant chuter l'erreur moyenne de reconstitution de 25 mm à 11 mm pour une valeur moyenne du champ de l'ordre de 80 mm.

[VI] - UTILISATION OPERATIONNELLE ET PERSPECTIVES

La méthode d'analyse exposée ici a été baptisée AURELHY : Analyse Utilisant le RELief pour l'HYDrométéorologie ; elle est maintenant opérationnelle à la subdivision d'hydrométéorologie de la Direction de la Météorologie Nationale. Elle semble être en accord avec les recommandations de l'OMM. Le logiciel correspondant a été élaboré et fonctionne en routine sur n'importe quelle région française avec une précision (maille) de 5 km. La méthode AURELHY a été jusqu'à présent utilisée essentiellement pour la cartographie des normales et quintiles mensuels sur la France. La figure 10 en donne un exemple (normales de février). Le logiciel fournit, en plus de la carte analysée, l'équation de régression avec le relief qu'il peut être intéressant d'interpréter, aussi bien dans le temps (évolution annuelle) que dans l'espace (comparaison entre zones).

A l'avenir la méthode devrait être exploitée sur d'autres champs statistiques tels que pluies de fréquence rare, nombre de jours d'observation de phénomène, paramètres de lois de distribution, Dans un avenir plus lointain l'analyse de cumuls de pluie sur des durées faibles (décades, jour) posera des problèmes autrement plus délicats. L'information radar ainsi que l'information météorologique (type de temps) pourraient alors constituer des outils complémentaires précieux.

REFERENCE :

BENICHOU P., LE BRETON O. (1986) : Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode AURELHY (à paraître dans la Météorologie).