

Agence de l'Eau Rhin-Meuse

"Le Longeau" - Route de Lessy
Rozérieulles - B. P. 19
57161 Moulins-lès-Metz



QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN RHIN-MEUSE
SECTEUR OCCIDENTAL

1^{ère} PHASE : PRECIPITATIONS INTERANNUELLES DE LA PERIODE DE REFERENCE 1971-1990

AVRIL 1996

Centre d'Études Géographiques
de l'Université de Metz

Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex 1

QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN RHIN-MEUSE SECTEUR OCCIDENTAL

1^{ère} PHASE : PRECIPITATIONS INTERANNUELLES DE LA PERIODE DE REFERENCE 1971-1 990

2011

| | |
|--|----|
| 1. Cartographie par interpolation entre les postes | 2 |
| 1. 1. Le réseau pluviométrique | 2 |
| 1. 2. Cartographie..... | 3 |
| 2. Modèle régionalisé..... | 3 |
| 2. 1. Elaboration d'une matrice de variables explicatives..... | 4 |
| 2. 1. 1. Données utilisées | 4 |
| 2. 1. 2. Utilisation du MNT | 4 |
| 2. 1. 3. Simplification de la matrice des variables explicatives.. | 5 |
| 2. 2. Mise en oeuvre du modèle | 6 |
| 2. 2. 1. Méthode de régionalisation..... | 6 |
| 2. 2. 2. Les domaines | 7 |
| 2. 3. Validation du modèle..... | 9 |
| 2. 3. 1. Le réseau complémentaire | 9 |
| 2. 3. 2. Validation | 9 |
| 2. 4. Cartographie..... | 10 |
| 3. Modèle simple..... | 11 |
| 3. 1. Mise en oeuvre du modèle | 11 |
| 3. 2. Calcul des lames d'eau | 12 |
| CONCLUSION | 12 |
| BIBLIOGRAPHIE | 13 |

QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN RHIN-MEUSE SECTEUR OCCIDENTAL

1^{ère} PHASE : PRECIPITATIONS INTERANNUELLES DE LA PERIODE DE REFERENCE 1971-1990

L'estimation des précipitations moyennes constitue le travail préalable à toute étude hydrologique. De sa précision dépendra le calcul des autres termes du bilan hydrologique d'un bassin-versant que sont l'infiltration et l'évapotranspiration, l'écoulement à l'exutoire étant le seul facteur du bilan effectivement mesuré dans sa globalité. Cette relation pluie-débit à l'échelle de l'année moyenne permettra de définir une valeur de l'écoulement moyen annuel pour tous les points du réseau hydrographique qui figureront dans les catalogues de débits caractéristiques d'étiage.

Cette première phase de l'étude est consacrée à la mise en oeuvre d'un modèle pour le calcul des hauteurs de précipitations des zones de la codification hydrographique et des bassins-versants aux stations hydrométriques sur la période 1971-1990. Le secteur étudié a été défini dans une étude précédente [2], il correspond à la partie ouest du bassin Rhin-Meuse (Cf. Carte n°1).

Différentes méthodes et différents modèles ont été testés pour spatialiser les champs pluviométriques moyens annuels. Toutes et tous utilisent les mêmes données et les mêmes outils informatiques et cartographiques. Nous proposons les résultats issus du modèle le plus facile à mettre en oeuvre et avec lequel nous obtenons une précision satisfaisante.

1. CARTOGRAPHIE PAR INTERPOLATION ENTRE LES POSTES

1. 1. Le réseau pluviométrique

Pour le secteur considéré nous disposons de 134 postes pluviométriques (Cf. Carte n°2).

Les données de ces postes proviennent pour la partie française de la Banque Pluvio de Météo France. Elles ont fait l'objet d'une critique préalable [2]. Pour les situer, nous avons utilisé les coordonnées Lambert II étendues fournies par Météo France mais elles se sont parfois révélées erronées. Nous avons donc été amenés à replacer des stations en fonction de la toponymie ou de la connaissance que nous avons par ailleurs de leur emplacement réel.

Nous avons aussi obtenu des-données en Belgique et au Grand Duché de Luxembourg, respectivement à l'Institut Royal de Météorologie et au Ministère. de l'Agriculture. Par contre nous n'avons pas de données pour le territoire allemand, notre démarche auprès du Deutscher Wetterdienst étant restée vaine. L'absence de

données en Allemagne n'a pas trop perturbé notre travail car pour notre secteur la frontière commune avec l'Allemagne n'est pas très étendue et des postes français sont situés relativement près de la frontière.

1.2. Cartographie

Une carte a été réalisée uniquement à partir du réseau de stations utilisées (Cf. Carte n°3). Pour tracer les isohyètes nous avons utilisé le logiciel d'interpolation SURFER [4]. La méthode d'interpolation est le krigeage [7] simple avec un variogramme linéaire qui respecte les valeurs aux stations. Cette carte ne résulte donc que d'une interpolation entre les postes, la topographie ou toute autre facteur d'explication des hauteurs de précipitations n'ont pas été intégrés à la réalisation de cette carte. Il ne s'agit pas non plus de la méthode des isohyètes telle qu'elle est décrite habituellement : "On se contentera de tracer avec le maximum de vraisemblance, compte tenu de ce que l'on sait de la région, des courbes représentant approximativement la répartition spatiale de la pluie pendant la période considérée" [8]. La carte réalisée par J-F ZUMSTEIN [9] a été tracée selon ces règles car elle résulte d'un travail empirique fondé sur sa propre connaissance du bassin et celle des hydrologues qui ont collaboré à sa réalisation.

Si le tracé des isohyètes de la carte n°3 est critiquable, celle-ci permet néanmoins de représenter de manière simple les principaux môles pluviométriques du secteur d'étude (supérieurs à 1000 mm), soit la région du massif ardennais qui se prolonge vers le Pays-Haut, et la région de l'Argonne et du Barrois. Le bassin de la Moselle aval à l'est et la vallée de l'Aisne à l'ouest sont les régions les moins bien arrosées du secteur (précipitations inférieures à 800 mm).

Cette carte permet aussi de montrer l'intérêt de réaliser un modèle pluviométrique car elle fait complètement abstraction de la topographie, facteur explicatif déterminant de la répartition des précipitations. L'interpolation entre les postes ne suffit pas pour déterminer avec précision une hauteur de précipitations moyennes pour des surfaces relativement réduites (la taille moyenne d'une zone hydrographique dans le bassin Rhin-Meuse est d'environ 40 km²). Cette dernière dépend alors intégralement de la répartition spatiale des postes pluviométriques. Seule l'étude de la relation entre la topographie et les hauteurs de précipitations permet de préciser le tracé des isohyètes.

2. MODELE REGIONALISE

Ce modèle est inspiré de l'étude méthodologique de J. HUMBERT [3]. Il utilise les relations qui existent entre la pluviosité et la topographie environnante des postes pluviométriques. Les données relatives à la topographie sont issues d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain), elles constituent les variables explicatives du modèle.

2. 1. Elaboration d'une matrice de variables explicatives

2. 1. 1. DONNEES UTILISEES

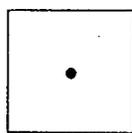
Le CEGUM s'est procuré auprès de l'IGN des blocs de MNT d'une résolution de 1 km. Ce maillage est le plus large que l'IGN diffuse mais compte tenu de l'étendue du secteur à étudier (plus de 30000 km²) il nous a paru important de limiter la taille des fichiers informatiques à traiter. D'autre part dans le secteur d'étude les contrastes altimétriques sont relativement peu marqués dans la mesure où il n'y a pas de massifs montagneux (les Vosges sont exclues de cette étude). A ce fichier s'ajoutent les fichiers dérivés des altitudes maximales et minimales par carreau de 1 km². Ce MNT couvre la partie française et belge. Au Grand Duché de Luxembourg et en Sarre ces données n'existaient pas quand nous avons effectué nos démarches auprès de l'IGN. L'absence de données dans cette région nous prive de précipitations calculées dans une bande de 8 km de large, le long de la frontière avec ces pays (voir plus bas).

Tous les blocs de MNT français et belges ont été regroupés dans un seul fichier informatique éditable par un tableur (format de fichier plus pratique que le format originel de l'IGN). Ce fichier est constitué de 336 lignes et 251 colonnes soit une matrice constituée des altitudes de mailles espacées de 1 km comprises entre 700 et 950 km X, et entre 2270 et 2605 km Y, Lambert II étendu.

2. 1. 2. UTILISATION DU MNT

Un programme informatique a été élaboré pour exploiter ce fichier de manière automatique. Il permet de calculer des moyennes d'altitudes, des écarts-types ou tout autre type d'information sur des zones du fichier MNT. Dans un premier temps, ces calculs sont effectués sur des fenêtres centrées ou excentrées par rapport au site des stations :

• Station



Fenêtres : Centrée



Excentrée
à l'Ouest



Excentrée
au Sud Ouest

9 directions de fenêtre sont utilisées : centrée, excentrée au nord, à l'est, au sud et à l'ouest, et excentrée au nord-est, au sud-est, au sud-ouest et au nord-ouest, avec une extension de 2 à 30 km et un pas de 2 km. Sur ces fenêtres sont calculés la moyenne des altitudes, leur écart-type, la valeur minimum et la valeur maximum, soit une

¹ Ce fichier n'est pas joint au rapport. Les conditions de ventes de l'IGN prévoit une utilisation de ses données "limitée à un usage exclusivement privée ou interne à l'organisme acquéreur".

matrice de 540 variables auxquelles s'ajoutent l'altitude de la maille la plus proche du poste et ses coordonnées en Lambert II étendu.

2. 1. 3. SIMPLIFICATION DE LA MATRICE DES VARIABLES EXPLICATIVES

Par des régressions multiples pas à pas différentes variables de cette matrice permettent d'expliquer la pluviosité moyenne annuelle enregistrée aux stations. Il nous a paru important de limiter le nombre de variable car d'une part, le traitement statistique d'une telle matrice est très lourd (le logiciel de statistique utilisé permet d'introduire au maximum 100 variables dans une régression multiple pas à pas [6]) et, d'autre part, la procédure de régressions multiples prévoit que les variables soient physiquement indépendantes donc non corrélées entre elles [1].

C'est pourquoi nous avons réalisé un corrélogramme pour toutes les altitudes moyennes des fenêtres centrées (Cf. Annexe n°2). Les fenêtres de taille proche ont bien évidemment des altitudes moyennes comparables, elles sont très bien corrélées entre elles. Les fenêtres de dimension importante (supérieures à 16 km) ont toutes des altitudes moyennes très fortement corrélées (coefficient de corrélation supérieur à 0.95). Compte tenu de ces observations nous avons choisi pour la suite d'utiliser une progression de type exponentielle pour la taille des fenêtres soit : 2, 4, 8, 16 et 32 km. Ainsi pour une fenêtre donnée, la surface de la fenêtre précédente ne représente que 25% de sa surface.

En cartographiant les champs pluviométriques issus des premières régressions, il est apparu que certains prédicteurs pouvaient varier de manière considérable dans l'espace et ainsi générer des gradients pluviométriques "aberrants" (plus de 200 mm en moins de 2 km dans des régions où la topographie n'est pas très contrastée). Ces premiers essais nous ont amenés à éliminer de la matrice les écarts-types et les valeurs minimales. Les valeurs maximales ont été remplacées par la moyenne des altitudes supérieures à un seuil égal à la moyenne de toutes les altitudes de la fenêtre plus leur écart-type multiplié par 0.67 (altitude lissée). Si les altitudes de la fenêtre ont une distribution normale, la valeur caractéristique des altitudes maximales correspond à la moyenne du quartile supérieur (25% des valeurs les plus élevées).

La matrice définitive est constituée de :

9 orientations * 5 tailles * 2 paramètres
+ X Lambert + Y Lambert + altitude de la maille la plus proche
= 93 variables explicatives

2. 2. Mise en oeuvre du modèle

Les régressions effectuées avec la totalité des stations situées dans le secteur d'étude n'ont pas donné de résultats très satisfaisants. Elles ont été réalisées en prenant le logarithme des valeurs :

$$\ln(P) = a_1 * \ln(Variable_1) + a_2 * \ln(Variable_2) + \dots + a_n * \ln(Variable_n) + b$$

Les coefficients de détermination (R^2) ne dépassent guère 90% avec 5 prédicteurs, ce qui est peu comparé aux résultats obtenus dans l'étude méthodologique de J. HUMBERT sur le versant oriental des Vosges [3].

En utilisant un groupe de stations situées dans une même région, le coefficient de détermination est nettement plus élevé et dépasse 95%, parfois avec moins de 5 prédicteurs. C. MARAND et J-F. ZUMSTEIN ont montré que les gradients pluviométriques ne sont pas les mêmes d'une région à l'autre [5]. Une première régionalisation des stations a déjà été réalisée dans l'étude précédente sur les régions pluviométriques du Bassin Rhin-Meuse [2]. Celle-ci a servi de base au découpage que nous avons réalisé.

2. 2. 1. METHODE DE REGIONALISATION

L'objectif de la régionalisation est d'obtenir des coefficients de détermination élevés en réunissant par région un maximum de stations. La procédure n'a pas pu être automatisée. Elle a été réalisée manuellement en utilisant un Système d'Information Géographique (MapInfo) et un logiciel de statistiques (MiniTab). Des groupes de stations sont sélectionnés sur le SIG et toutes les variables associées à ces stations sont introduites dans le logiciel de statistiques pour effectuer une régression multiple pas à pas. Dans un premier temps, peu de stations sont sélectionnées, elles constituent en quelque sorte le "noyau" de la région. Puis d'autres postes proches de ce noyau lui sont associés jusqu'à obtenir un coefficient de détermination supérieur à 95%.

Lors des régressions un test de Fisher est effectué sur les variables explicatives. Il permet de faire entrer ou de faire sortir une variable de la régression. Nous avons choisi une valeur de F d'entrée et de F de sortie égale à 4, ce qui évite de "saturer" la régression et ainsi facilite le renouvellement des prédicteurs.

Pour éviter d'obtenir des précipitations calculées très différentes aux limites des régions, nous avons, lorsque cela était possible, intégré des postes dans le lot des stations de régions différentes. Ceci permet par endroits une convergence des régressions. Nous avons ainsi défini 4 régions que nous appellerons par la suite domaines.

Les limites des 4 domaines apparaissent sur la carte n°4. On trouve du nord vers le sud les domaines Ardennes-Pays Haut, Argonne-Barrois, Meuse médiane-Moselle et Haute Meuse.

- Le domaine Ardennes - Pays Haut

Il est constitué de 28 stations, 5 prédicteurs sont nécessaires pour atteindre un coefficient de détermination de 95.3% (Cf. Annexe n°3.1.1 et 3.1.2.). Les hauteurs annuelles de précipitations sont contrastées car elles s'échelonnent de 800 à plus de 1300 mm. Pour ce domaine, nous n'avons utilisé que des fenêtres d'une extension maximale de 16 km. L'absence de MNT pour le Grand Duché de Luxembourg fait que les fenêtres de 32 km sont incomplètes pour les stations situées à l'est du domaine. Si les écarts entre les précipitations mesurées et les précipitations calculées sont inférieurs à 10%, ponctuellement ces résidus peuvent paraître élevés :

- C'est le cas de Chiny en Belgique où la hauteur de précipitations calculée est inférieure de 100 mm à celle effectivement mesurée. Cependant pour la station de Bouillon relativement proche de Chiny la régression respecte au mieux les précipitations observées, l'écart n'étant que de 1%. La station de Chiny serait donc placée dans un site original pour lequel les prédicteurs seraient moins bien adaptés.
- Un même écart apparaît pour la station de Mexy, proche de Longwy dans le Pays Haut. Cette station ne faisait pas partie des stations sélectionnées pour le modèle car elle n'a fonctionné qu'à partir de 1981 (elle appartient au réseau complémentaire, voir plus bas). Mais compte tenu de l'absence de postes dans cette région nous avons utilisé ses données en affectant la moyenne interannuelle d'un coefficient pour corriger le caractère plus ou moins sec ou humide de sa période de fonctionnement (1981-1990) et la rendre représentative de la période 1971-1990. C'est avec Longuyon la seule station du Pays Haut pour laquelle nous avons des données pour les fenêtres de 16 km d'extension. Nous l'avons donc incluse dans la régression afin de corriger les hauteurs de précipitations apparemment trop élevées que nous proposait la régression sans cette station.

Ce modèle a peut-être tendance à surestimer les précipitations dans le Pays Haut, mais l'absence de stations nous empêche de préciser davantage les précipitations calculées. L'intégration des stations des domaines contigus s'est avérée impossible pour le domaine situé au sud (l'introduction d'une seule station faisant baisser le coefficient de détermination de manière très sensible). Seulement deux stations du domaine situé à l'ouest ont pu être introduites. Pour les autres domaines nous avons rencontré moins de difficultés.

• Le domaine Argonne - Barrois

36 stations appartiennent à ce domaine et seulement 4 prédicteurs ont permis d'obtenir un coefficient de détermination de 95.5% (Cf. Annexe 3.2.1. et 3.2.2.). Les précipitations sont relativement contrastées puisqu'elles vont de moins de 700 à plus de 1100 mm.

Les résidus sont en pourcentage très réduits car pratiquement tous sont inférieurs ou égaux à 5%. Seule la station de Souilly dépasse ce seuil. Les précipitations calculées y sont largement inférieures aux précipitations mesurées. Mais cette station, en marge de ce domaine, appartient aussi au domaine situé à l'est (Meuse médiane-Moselle). Pour celui-ci l'écart tombe à 3%.

• Le domaine Meuse médiane - Moselle

Ce domaine rassemble le nombre le plus élevé de stations : 41. 4 prédicteurs expliquent 95.7% de la variance (Cf. Annexe 3.3.1. et 3.3.2.). Peu de stations enregistrent des précipitations supérieures à 1000 mm. Les hauteurs les plus faibles sont inférieures à 700 mm.

Tous les résidus sont inférieurs ou égaux à 5%. Les écarts les plus élevés concernent les stations aux limites du domaine ou sont parfois liés à la résolution du MNT comme pour Pagny-sur-Moselle situé au pied de la côte de Moselle.

• Le domaine Haute-Meuse

Seulement 22 stations appartiennent à ce domaine. 5 prédicteurs permettent d'obtenir un coefficient de détermination de 95.2% (Cf. Annexe 3.4.1. et 3.4.2.). Les précipitations sont très peu contrastées car comprises entre 800 et 1080 mm.

Les résidus sont ici aussi relativement faibles, du fait de la taille réduite de l'échantillon traité et de l'homogénéité des hauteurs de précipitations. L'intégration des postes de ce domaine aux domaines contigus notamment au domaine Meuse médiane - Moselle n'a pas été possible, les coefficients de détermination diminuent alors de manière significative. Ce domaine correspond à une zone de transition entre le plateau de Langres et le plateau lorrain.

Le tracé des limites de ces 4 domaines correspond grossièrement aux grands ensembles de relief du secteur d'étude. Ils se justifient d'un point de vue géographique, la statistique validant les choix effectués. D'autre part il est très important d'obtenir des coefficients de détermination très élevés et une variance résiduelle faible qui évitent de corriger les précipitations calculées par les résidus. La validation permet de vérifier la cohérence des champs de précipitations calculés.

2. 3. Validation du modèle

La validation que nous avons appliquée consiste à confronter les précipitations calculées au droit de postes qui n'ont pas été intégrés à la régression avec les précipitations effectivement mesurées à ces postes. Compte tenu de la densité particulièrement faible des postes pluviométriques situés dans notre secteur d'étude, nous avons utilisé un réseau complémentaire pour la validation.

2. 3. 1. LE RESEAU COMPLEMENTAIRE

Ce réseau est constitué des stations qui ont fonctionné entre 9 et 16 ans durant la période 1971-1990. Les précipitations moyennes issues de ces stations sont corrigées par un coefficient qui tient compte du caractère plus ou moins humide de la période de fonctionnement de la station (voir plus haut). Ce coefficient a été déterminé pour chaque station. Il correspond au rapport entre les précipitations moyennes sur la période de fonctionnement du poste du réseau complémentaire et les précipitations sur la période 1971-1990 en utilisant les données des postes du modèle les plus proches (Cf. Annexe n°4.1.). Les précipitations corrigées sont donc représentatives de la période 1971-1990. 47 stations du réseau complémentaire ont pu être utilisées pour la validation du modèle régionalisé.

2. 3. 2. VALIDATION

Les résultats de la validation sont globalement satisfaisants (Cf. Annexe n°4.2.).

Pour le domaine Ardennes - Pays Haut, trois points sortent du rail représentant plus ou moins 10% des précipitations observées (Cf. Annexe n°4.3.). Pour les écarts négatifs, il s'agit des postes d'Inor et de Mouzon. La régression trouve dans la topographie des variables qui conduisent à sous-estimer la pluviométrie moyenne annuelle dans cette partie très localisée de la vallée de la Meuse alors que pour la station de Stenay, pourtant proche, l'écart est réduit (à peine 4%). A l'inverse, les précipitations calculées pour la station de Hautes-Rivières dans les Ardennes sembleraient beaucoup trop élevées. Pour ce domaine, particulièrement difficile à modéliser (voir plus haut), la régression utilisée est peut-être mal adaptée pour certains sites de stations.

La validation du domaine Argonne - Barrois est très satisfaisante car tous les points sont situés à l'intérieur du rail alors que les stations de validation enregistrent des hauteurs de précipitations très contrastées, comprises entre 650 et 1050 mm (Cf. Annexe n°4.4.).

Il en est de même pour le domaine Meuse médiane - Moselle où seule la station d'Haudiomont (ancienne gare) sort du rail (Cf. Annexe n°4.5.). Pour l'autre station située à Haudiomont, gérée par la DDA, l'écart est inférieur à 10%. Mais il est

possible que dans cette région, à la limite du domaine, la régression ne respecte pas tout à fait les précipitations mesurées.

Pour le domaine de la Meuse amont, le graphique de validation est un peu singulier car les précipitations sont peu contrastées (Cf. Annexe n°4.6.). Seule la station de Clinchamp connaît un écart supérieur à 10%. Mais il s'agit de la seule station située sur l'interfluve Meuse - Marne pour laquelle on calcule un résidu aussi élevé.

Cette phase de validation nous permet d'adopter définitivement les prédicteurs choisis pour les différents domaines.

2.4. Cartographie

La cartographie est fondée sur un maillage d'une résolution de 2 km. Cette amplitude des mailles nous semble relativement bien adaptée à la fois à l'échelle du secteur d'étude et pour le calcul des lames d'eau précipitées sur les zones de la codification hydrographique (leur surface moyenne étant de 40 km²). Les fichiers informatiques ont ainsi une taille raisonnable facilement manipulable pour un micro-ordinateur.

La réalisation d'une carte représentant les champs de précipitations issus des régressions pose le problème des précipitations calculées aux limites des différents domaines. Ce ne sont pas des limites nettes et pour être cohérent le passage d'un domaine à l'autre doit se faire de manière régulière et progressive. Nous avons donc défini des zones de transition de 8 km de part et d'autre de chaque limite. A l'intérieur de ces zones nous avons défini des bandes de 0 à 2 km de la limite, de 2 à 4, de 4 à 6 et de 6 à 8 km (Cf. Carte n°5). Les précipitations calculées aux mailles situées à l'intérieur de ces bandes sont des précipitations moyennes pondérées issues des régressions des deux domaines contigus. Elles sont calculées comme suit :

| Domaine A | | | | Domaine B | | | |
|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 6-8 km | 4-6 km | 2-4 km | 0-2 km | 0-2 km | 2-4 km | 4-6 km | 6-8 km |
| PA*0.95+PB*0.05 | PA*0.8+PB*0.2 | PA*0.65+PB*0.35 | PA*0.5+PB*0.5 | PA*0.5+PB*0.5 | PA*0.35+PB*0.65 | PA*0.2+PB*0.8 | PA*0.05+PB*0.95 |

PA : précipitations calculées avec la régression du domaine A

PB : précipitations calculées avec la régression du domaine B

Sur la carte représentant les précipitations du modèle régionalisé, une bande relativement large au nord-est du secteur d'étude n'est pas couverte, en raison de l'absence de MNT au Luxembourg. Par souci de représentation les isohyètes ont été lissées avec une fonction du logiciel SURFER (procédure matrix smooth avec une pondération d'une valeur de 3 du centre de la fenêtre de 1 km d'extension). A la différence de la première carte présentée (interpolation entre les postes) la topographie détermine le tracé des isohyètes. Non seulement le massif ardennais, mais aussi le Barrois, l'Argonne et les côtes de Moselle et de Meuse apparaissent de manière très nette (Cf. Carte n°6).

Mais compte tenu de la complexité de la mise en oeuvre d'un tel modèle, nous avons mis au point un modèle plus simple.

3. MODELE SIMPLE

Nous avons tout d'abord enrichi la matrice des variables explicatives en calculant les altitudes caractéristiques des fenêtres de manière différente. Nous avons par exemple utilisé des altitudes relatives (méthode AURELHY [3]), changé la forme des fenêtres (essai à partir de triangles), etc... Nous n'avons pas trouvé de prédicteur qui explique les précipitations de manière satisfaisante à l'échelle de tout le secteur d'étude. Les essais que nous avons réalisés sur des matrices qui regroupent des variables calculées de manières différentes montrent que lors des régressions multiples pas à pas, ce sont les variables calculées d'une même manière qui se complètent le mieux pour expliquer la variance (les altitudes relatives ne s'intègrent pas aux régressions utilisant déjà des altitudes brutes).

3. 1. Mise en oeuvre du modèle

Nous nous sommes orientés vers un modèle avec peu de prédicteurs et une correction par les résidus. Nous avons utilisé la matrice des variables du modèle régionalisé mais toujours par souci de simplification, sans anamorphose logarithmique. Avec seulement 3 prédicteurs et les 134 stations du secteur d'étude, 80% de la variance est expliquée. Les prédicteurs sont le X Lambert des postes, l'altitude moyenne de la fenêtre centrée de 8 km d'extension et l'altitude moyenne d'une fenêtre excentrée au sud-ouest de 16 km d'extension :

$$P = 1536 - 1.2 * X + 3.09 * C8M - 1.78 * SW16M$$

Une valeur de 80% pour le coefficient de détermination nous semble satisfaisante, les 20% de variance résiduelle ne peuvent être pris en compte qu'en spatialisant les résidus. L'introduction de prédicteurs supplémentaires n'améliore que très peu la part de variance expliquée.

L'équation ci-dessus a été appliquée à toutes les mailles de la grille de 2 km d'espacement (voir plus haut, Cf. carte n°7). Les résidus ont été krigés (méthode simple avec un variogramme linéaire, Cf. Carte n°8) et répartis sur une même grille. La superposition des deux grilles permet de corriger les valeurs calculées par les résidus (Cf. Carte n°9).

Ce modèle a été validé en utilisant les mêmes stations de validation que celle du modèle régionalisé. Pour certaines zones les écarts étaient très importants, supérieurs à 10%. Nous avons donc intégré à la régression les postes de validation où les résidus étaient élevés. Ceci nous permet de respecter au maximum les champs de précipitations observés. Après cette opération, les résultats de la validation sont bien évidemment satisfaisants (Cf. Annexe n°5.1. et 5.2.).

La carte issue de ce modèle n'est pas fondamentalement différente de celle du modèle régionalisé. D'autre part, on constate nombre de similitudes avec la carte réalisée par J-F. ZUMSTEIN [9]. Le principal inconvénient de ce modèle est qu'il repose sur la répartition des postes pour la correction par les résidus.

Pour la partie nord-est du secteur où la fenêtre centrée de 8 km d'extension n'a pas pu être calculée, nous avons interpolé les hauteurs de précipitations entre les postes et les mailles où les précipitations ont pu être calculées selon la même méthode de krigeage. Ce modèle a été utilisé pour le calcul des hauteurs de précipitations moyennes annuelles par zone hydrographique et par bassin-versant contrôlé par une station hydrométrique.

3. 2. Calcul des lames d'eau

La grille du modèle simple réalisé avec SURFER a été importée sur le SIG MapInfo et les mailles de la grille ont été géocodées. L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse a fourni les cartes numérisées de la codification hydrographique et des bassins-versants du réseau hydrométrique utilisés dans le cadre du catalogue des débits d'étiage. Ces deux cartes et la grille constituent 3 couches distinctes pour le SIG. Une requête SQL permet de calculer la moyenne des précipitations correspondant aux mailles situées à l'intérieur d'une entité sut-facique, zone hydrographique ou bassin-versant (Cf. Annexe 6 et 7.1.).

La confrontation entre les lames d'eau écoulées et les hauteurs de précipitations par bassin-versant permet d'estimer le déficit d'écoulement (Cf. Annexe 7.2.). Le graphique qui en résulte n'a pu être tracé qu'entre 750 et 1100 mm de précipitations. On ne peut pas à partir de ce graphique estimer le déficit d'écoulement de bassins-versants plus arrosés. Il permet, dans un premier temps de montrer les stations dont l'alimentation est très anthropisée telle que Maison-Neuves sur la Fensh ou celles situées dans des bassins-versants karstiques telles que les stations de l'Aroffe (Rigny-St-Martin et Vannes-le-Chatel).

CONCLUSION

La mise en oeuvre de plusieurs modèles est intéressante à plus d'un titre. Elle permet tout d'abord de relativiser les précipitations calculées par un modèle par rapport à celle d'un autre modèle. Mais elle permet surtout de mettre en lumière les inconvénients et les avantages d'une démarche par rapport à une autre. Nous avons choisi une démarche plus pragmatique qui permette de calculer rapidement et avec un maximum de précision les hauteurs de précipitations pour le catalogue des débits d'étiage ou pour tout autre usage futur. La méthode du modèle régionalisé n'est cependant pas à abandonner car s'il s'agit d'une procédure exclusivement statistique; elle tend à expliquer les précipitations par les seuls effets de la topographie et évite de considérer les champs pluviométriques uniquement en fonction du réseau de mesure. En obtenant des coefficients de détermination très élevés, il nous semble inutile de corriger par les résidus, opération qui introduit par définition une

interpolation entre les postes. Par contre, le modèle simple que nous avons adopté utilise la correction par les résidus. Cette correction risque d'introduire des biais dans les précipitations des mailles proches d'un poste affecté d'un effet de site. Ceci pose le problème, dans ce cas, du bien-fondé de la correction par les résidus

Les résultats de ce modèle doivent être, à présent complétés, et comparés avec ceux du domaine oriental du Bassin Rhin-Meuse. Par la suite un modèle devra être appliqué aux précipitations des années particulières, et aux précipitations mensuelles.

D. FRANCOIS
CEGUM 1996

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Groupe CHADULE (1987) : Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Ed. MASSON, Paris.
- [2] D. FRANCOIS, E. GILLE et J-F. ZUMSTEIN (1995) : Définition de régions pluviométriques dans les bassins de la Meuse, de la Moselle et des affluents alsaciens du Rhin. CEGUM - Agence de l'Eau Rhin-Meuse.
- [3] J. HUMBERT, J-L. PERRIN et L. PERRON (1993) : Etude méthodologique de quantification spatiale des précipitations appliquée à la France du Nord-Est. Secteur-test : Versant oriental des Vosges. Agence de l'Eau Rhin-Meuse - CEREG/URA 95 CNRS, Université L. Pasteur, Strasbourg.
- [4] D. KECKLER (1994) : SURFER for Windows. Golden Software, Inc.
- [5] C. MARAND, J-F. ZUMSTEIN (1990) : La modélisation des précipitations moyennes annuelles appliquée au massif vosgien. Hydrologie Continentale n°5.
- [6] MINITAB Inc. (1994) : MINITAB Reference Manuel (version 10 for Windows).
- [7] C. OBLED (1987) : Introduction au krigeage à l'usage des hydrologues. Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 16-17 septembre 1986. Ed. de l'ORSTOM, Coll. Colloques et Séminaires.
- [8] M. ROCHE (1963) : Hydrologie de surface. ORSTOM, Gauthier-Villars, Paris.
- [9] J-F. ZUMSTEIN (1995) . Hauteurs des précipitations annuelles. Bassin Rhin-Meuse et régions limitrophes Agence-de l'Eau Rhin-Meuse.

CARTES

: Secte & étude

Réseau pluviométrique

Précipitations moyennes annuelles 1971-1 990. Interpolation entre les postes

• Domaines du modèle régionalisé

: Bandes de chevauchement des domaines

Précipitations moyennes annuelles 1971-f 990. Modèle régionalisé

Précipitations moyennes annuelles 1971-1 990. Modèle à 3 paramètres -

Précipitations moyennes annuelles 1971-1990. Résidus du modèle à 3 paramètres

Précipitations moyennes annuelles 1971-1 990. Modèle à 3 paramètres et correction par les résidus. Interpolation entre les postes pour la zone hors MNT

Agence de l'Eau Rhin-Meuse

"LeLongeau" - Route de Lessy
Rozérieulles - B.P. 19
571 61 Moulins-lés-Metz



QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN RHIN-MEUSE
SECTEUR OCCIDENTAL

2^{ème} PHASE : PRECIPITATIONS ANNUELLES DE LA PERIODE DE REFERENCE 1971-1990

JUILLET 1997

Centre d'Etudes Géographiques
de l'Université de Metz

Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex 1

QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN RHIN-MEUSE SECTEUR OCCIDENTAL

2^{ème} phase : Précipitations annuelles de la période de référence 1971-1990

| | |
|--|---|
| 1. Les données utilisées | 1 |
| 1. 1. Les données de précipitations | 1 |
| 1. 2. Les données altimétriques | 2 |
| 2. Mise en oeuvre du modèle | 2 |
| 2. 1. Variables explicatives définies pour la lère phase | 2 |
| 2. 2. Détermination des variables les plus pertinentes.. | 2 |
| 3. Résultats obtenus | 3 |
| 3. 1. Les régressions | 4 |
| 3. 2. Validation | 5 |
| 4. Cartographie | 6 |
| 5. Lames d'eau précipitées | 6 |
| Conclusion | 7 |
| Bibliographie | 8 |

QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN RHIN-MEUSE SECTEUR OCCIDENTAL

2^{ème} phase : Précipitations annuelles de la période de référence 1971-1990

Pour la deuxième phase de l'étude relative à la quantification spatiale des précipitations du bassin Rhin-Meuse - Secteur occidental, le modèle de spatialisation des précipitations a été appliqué aux précipitations annuelles de la période 1971-1990. Celui-ci, inspiré de la méthodologie élaborée par le CEREG [2], avait été mis en oeuvre, dans une première phase [1], pour la cartographie des précipitations interannuelles de la période 1971-1990.

La connaissance des lames d'eau précipitées pour des années particulières est fondamentale pour évaluer les ressources en eaux lors des années sèches telles que 1971 ou 1976 et permet aussi d'apprécier la variabilité des précipitations annuelles dans le temps et dans l'espace.

La mise en oeuvre de cette deuxième phase s'est révélée beaucoup plus lourde que la première car non seulement 20 cartes ont été élaborées mais aussi des données d'autres stations ont été introduites. Des modifications d'ordre méthodologique ont également été apportées.

1. Les données utilisées

Le modèle de quantification spatiale des précipitations utilise des corrélations entre les précipitations mesurées aux stations (variables expliquées) et les données altimétriques (variables explicatives).

1. 1. Les données de précipitations

Comme pour la première phase les données de précipitations de la partie française du secteur d'étude proviennent de la banque de données de Météo France (Banque Pluvio puis Colchique). Une mise à jour des coordonnées géographiques des stations a été effectuée par Météo France au cours de l'étude. Les résultats présentés dans ce rapport tiennent compte de ces corrections mais pour la première phase certains postes ont des coordonnées erronées. En plus des 132 stations utilisées lors de la première phase, 56 qui n'ont pas fonctionné durant toute la période 1971-1990 ont été introduites dans les différents modèles annuels suivant qu'elles disposaient ou non de données.

Les données des stations étrangères provenant de l'Institut Royal de Météorologie belge et du ministère de l'Agriculture luxembourgeois n'ont pas été complétées ni modifiées car elles constituent un réseau relativement dense couvrant un territoire périphérique par rapport au secteur d'étude.

1. 2. Les données altimétriques

Les données altimétriques proviennent d'un Modèle Numérique de Terrain d'un pas de 1 km acheté à l'IGN. Ce MNT couvre la quasi-totalité du secteur d'étude à l'exception des territoires luxembourgeois et sarrois pour lesquels ce type de données n'existait pas encore au début de cette étude. C'est pour cette raison que pour une bande d'une largeur de 16 km (taille de la fenêtre la plus étendue, voir plus bas) le long de la frontière avec le Luxembourg et l'Allemagne, les précipitations calculées résultent d'une simple interpolation entre les stations.

2. Mise en oeuvre du modèle

Pour la deuxième phase de l'étude, les mêmes fichiers et les mêmes programmes informatiques que ceux de la première ont été utilisés.

2. 1. Variables explicatives définies pour la 1^{ère} phase

Un programme mis au point au CEGUM permet d'extraire du MNT les variables explicatives introduites dans les régressions multiples. Ces variables résultent du calcul de moyennes sur des fenêtres centrées ou excentrées par rapport au site des stations. 9 directions de fenêtres sont utilisées : centrée, excentrée, au nord, à l'est, au sud, à l'ouest, au nord-ouest, au nord-est, au sud-est et au sud-ouest. Ces fenêtres ont une extension de 2 à 32 kilomètres avec une progression géométrique soit 2, 4, 8, 16 et 32 km. Pour chaque fenêtre la moyenne de tous les points de la grille du MNT est calculée ainsi que la moyenne des valeurs maximales, soit tous les points dont l'altitude est supérieure à la moyenne plus 67% de l'écart-type. Si les altitudes de la fenêtre ont une distribution normale, cette moyenne s'applique à 25% des valeurs les plus élevées. A ces variables s'ajoutent les coordonnées géographiques des stations et l'altitude du point du MNT le plus proche de la station. Au total 93 variables explicatives ont ainsi été calculées.

Ces variables explicatives, définies lors de la première phase pour les 132 stations utilisées dans le modèle interannuel, ont été calculées dans la deuxième pour les 56 stations introduites dans les modèles annuels.

2.2. Détermination des variables les plus pertinentes

Le modèle mis en oeuvre dans la première phase utilise des régressions multiples pas à pas entre les précipitations et les variables explicatives issues des données altimétriques. Les régressions en Log-Log n'améliorent pas les résultats, elles n'ont donc pas été utilisées.

Compte tenu du nombre important de régressions à réaliser, il était intéressant de vérifier si les mêmes variables explicatives étaient sélectionnées pour chacune des 20 années et si les fenêtres de grande taille particulièrement longues à calculer permettent d'obtenir de meilleurs résultats.

Des régressions ont donc été réalisées systématiquement pour chaque année en utilisant la matrice de 93 variables avec une extension maximale des fenêtres de **32km**, puis une matrice de 75 variables avec une extension maximale des fenêtres de 16 km, et enfin une matrice de 57 variables avec une extension maximale des fenêtres de 8 km.

L'étude de ces régressions (60 au total) a montré que les coefficients de détermination (R^2) et les écarts-types résiduels issus de la matrice où sont intégrées les fenêtres de grande taille (32 km) sont comparables à ceux obtenus avec la matrice contenant des fenêtres d'une extension maximale de 16 km. Avec la matrice où la taille maximale des fenêtres est de 8 km les valeurs de R^2 sont largement plus faibles. Cependant, il est important de noter que globalement les valeurs de R^2 sont peu élevées car comprises entre 0.67 et 0.85.

C'est donc la matrice composée de 75 variables (extension maximale des fenêtres de 16 km) qui a été utilisée pour déterminer les prédicteurs expliquant au mieux les précipitations annuelles. Parmi ceux-ci, un certain nombre d'entre eux apparaissent plusieurs fois et parfois très souvent pour les 20 ans. C'est ainsi que les variables intervenant au moins 2 fois comme prédicteurs dans les régressions multiples pas à pas ont été sélectionnées. Elles sont au nombre de 20 (Cf. Tableau n°1).

Le X Lambert est la variable qui apparaît le plus souvent. Pour les données altimétriques ce sont les variables calculées sur les fenêtres excentrées au sud-ouest et dans une moindre mesure au sud qui sont le mieux représentées. Les fenêtres centrées figurent moins souvent dans les régressions alors que celles suivant d'autres directions apparaissent encore plus rarement.

Dans la mesure où les coefficients de détermination restent satisfaisants, ce sont uniquement ces 20 variables qui ont été utilisées pour réaliser le modèle des 20 années de la période de référence. Toute cette démarche de simplification de la matrice de variables explicatives déjà entreprise dans la première phase présente de multiples intérêts :

- de 540 la matrice comprend 93 (à l'issue de la première phase) puis 75 et enfin 20 variables explicatives ce qui réduit considérablement le nombre de calculs,
- les 20 variables peuvent être calculées systématiquement pour toutes les mailles du secteur d'étude,
- la méthode des régressions multiples pas à pas peut être abandonnée au profit d'une méthode qui sélectionne la meilleure combinaison de prédicteurs (procédure Best Subsets Regression de MiniTab [3]).

3. Résultats obtenus

La période de référence du modèle et son domaine d'application connaissent des contrastes particulièrement importants puisque les précipitations annuelles introduites dans les régressions s'échelonnent de 361 mm à Essey et Maizerais en

Tableau n°1 :

Variables les plus fréquentes dans les regressions multiples pas à pas

| Nom de la fenêtre | Signification | Nombre d'apparition |
|-------------------|--|---------------------|
| X | X Lambert en km | 18 |
| Y | Y Lambert en km | 4 |
| C16M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre centrée de 16 km d'extension | 2 |
| C16X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre centrée de 16 km d'extension | 2 |
| NW16M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au nord-ouest de 16 km d'extension | 2 |
| NE8M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au nord-est de 8 km d'extension | 3 |
| NE8X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au nord-est de 8 km d'extension | 3 |
| SE8M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au sud-est de 8 km d'extension | 4 |
| SE8X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au nord-est de 8 km d'extension | 2 |
| SW4X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au sud-ouest de 4 km d'extension | 3 |
| SW8M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au sud-ouest de 8 km d'extension | 7 |
| SW16M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au sud-ouest de 16 km d'extension | 17 |
| SW16X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au sud-ouest de 16 km d'extension | 2 |
| N4X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au nord de 4 km d'extension | 2 |
| W1X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée à l'ouest de 1 km d'extension | 2 |
| S8M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au sud de 8 km d'extension | 2 |
| S8X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au sud de 8 km d'extension | 5 |
| S16M | Moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au sud de 16 km d'extension | 2 |
| S16X | Moyenne des altitudes maximales dans une fenêtre excentrée au sud de 16 km d'extension | 7 |

1971 à 1686 mm à Bouillon en 1981. La qualité du modèle proposé est évaluée à la fois par les résultats des régressions et par une validation pour laquelle les précipitations calculées sont comparées aux précipitations de stations qui n'ont pas été incluses dans le modèle.

3. 1. Les régressions

Les valeurs des coefficients de détermination sont ici aussi relativement peu élevées car comprises entre 68 et 84% selon les années (Cf. Tableau n°2). La variance résiduelle varie de 52 à 97 mm selon le caractère plus ou moins humide de l'année. Le nombre de prédictors utilisés est élevé car compris entre 5 et 10, sa moyenne est supérieure à 7. Globalement 76% de la variance des précipitations annuelles est expliqué par les régressions, la variance résiduelle, 75 mm en moyenne, ne peut être prise en compte que par la spatialisation des résidus. A l'échelle interannuelle les résultats étaient nettement plus satisfaisants car R^2 était supérieur à 80% avec seulement 3 prédictors.

Quatre variables sont très souvent utilisées dans les régressions :

- Le X Lambert apparaît systématiquement dans chaque régression avec un coefficient négatif qui exprime la diminution longitudinale des précipitations.
- La moyenne des altitudes d'une fenêtre de 16 km excentrée au sud-ouest (SW16M) a été sélectionnée 19 années sur 20. Ses coefficients sont toujours négatifs (comme à l'échelle interannuelle) et semblent liés à un effet d'abri par rapport aux reliefs situés au sud-ouest.
- A l'inverse, la moyenne des altitudes maximales d'une fenêtre de 16 km excentrée au sud (S16X), utilisée pour 15 années, a un coefficient positif révélateur d'un effet d'ascendance qui provoque des précipitations orographiques.
- La moyenne des altitudes d'une fenêtre de 8 km excentrée au sud-ouest (SW8M) apparaît pour 13 années. Contrairement à la même fenêtre de 16 km d'extension, ses coefficients sont tous positifs et traduisent cette fois un effet orographique.

Les autres variables sont beaucoup moins utilisées et d'une manière générale leur contribution dans les régressions est beaucoup plus faible (d'après le test du t de Student sur les coefficients). D'autre part leur coefficient peut changer de signe d'une année à l'autre. L'utilisation de ces variables permet au modèle de s'adapter à la situation pluviométrique particulière de chacune des années. Il est aussi intéressant de constater que les fenêtres centrées et excentrées à l'ouest sont peu voire jamais utilisées.

Toutes ces équations ont été appliquées à une grille de points régulièrement espacés de 2 km. Les résidus aux stations ont été spatialisés par krigeage (méthode simple avec un variogramme linéaire) et répartis sur une grille identique. La somme

Tableau n°2

Paramètres des régressions

| Coefficients | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|---------|---------|----------------|---------------|----------|----------------|---------------|---------|---------------|----------------|-----------------|------------------|
| Variables | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | Nb d'apparition | |
| X | -0.7052 | -1.6058 | -0.9406 | -1.1592 | -1.5511 | -0.4594 | -0.9568 | -1.3455 | -0.9494 | -1.0353 | -1.2095 | -0.5483 | -0.7235 | -0.7720 | -0.8982 | -0.7212 | -1.3615 | -1.9208 | -0.6490 | -0.9913 | 20 | |
| Y | 0.8598 | | | 0.7891 | | | -0.4333 | | | 0.3515 | | | | 0.8285 | | -0.3992 | | 0.6739 | 0.6485 | | 8 | |
| C16M | 1.4402 | | | 3.3322 | | 1.1882 | | | | | | | | | | -1.6991 | -1.7014 | | | 3.3247 | fi | |
| C16X | | | | | | | | | 0.7710 | | | | | | 1.42041 | | | | | | -1.8775 | 3 |
| C8M | | 2.3996 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2.8666 | | 2 |
| N4X | | | | | | | 0.5449 | 0.7514 | | 0.6316 | | | | | | | | | | | 0.7672 | 4 |
| NE8M | | | | | | | 0.4398 | 0.4525 | 0.4218 | | | | 1.0423 | 0.6400 | | | | | 0.6473 | | | 6 |
| NE8X | | | 0.6067 | | | | 0.4466 | | 0.7834 | 0.4468 | | | | | | 0.9966 | 0.7374 | 0.8677 | | 0.4671 | | 8 |
| NW16M | | | | | 0.88221 | | | | | 0.5424 | 1.51161 | 0.59501 | | 0.5043 | | 1.4329 | 0.7336 | | | | | 7 |
| S16M | | | | | -2.2022 | | | 2.2247 | 0.9971 | | | | | | | | | | | | | 3 |
| S16X | | 0.7943 | 0.8938 | | 2.0942 | 0.8205 | 1.3311 | | | 2.3473 | 1.6561 | 2.2545 | 2.2094 | 2.5055 | | 2.1023 | 2.0201 | 1.8206 | 1.3502 | 1.4338 | | 15 |
| S8M | | | | | 2.5824 | | | | | | | | 1.4675 | 1.9914 | 0.7404 | | | | 2.9090 | | | 5 |
| S8X | | 1.4829 | | | | 0.8667 | | 0.5226 | | | 1.1862 | | | | | | | | | | | 4 |
| SE8M | 0.5182 | | 0.7451 | 0.6728 | | | | | | | | 1.3017 | -1.0031 | -0.8559 | | | | | | -0.6533 | | 7 |
| SE8X | | -0.7466 | -0.6692 | | -0.5665 | | | | | | | | | | | | | | | -1.5815 | | 4 |
| SW16M | -1.6686 | -3.0594 | -2.0886 | -3.0550 | | -2.0640 | -2.9115 | -3.6970 | -3.3922 | -3.3021 | -3.9520 | -2.0117 | -3.2591 | -3.8833 | -2.9834 | -3.3466 | -4.0823 | -3.8504 | -3.1162 | -3.1219 | | 19 |
| SW16X | | | | | -1.6360 | -0.9285 | | | | -1.5412 | -1.7513 | -1.9112 | -1.0162 | -1.1240 | | | | | | | | 7 |
| SW4X | 0.75921 | | 1.2966 | 1.0775 | | -0.3243 | | | 0.4970 | | | | | | | | | | 0.7895 | 0.8010 | | 7 |
| SW8M | | | | | | 1.2679 | 1.6160 | 0.8967 | 1.7118 | 2.4606 | 2.9489 | 1.2887 | 2.10931 | 1.85341 | 1.60781 | 1.88941 | 2.3122 | | | | 0.97311 | 13 |
| W1X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Constante | -1217.7 | 1770.0 | 1182.6 | -642.7 | 1689.2 | 680.3 | 2294.4 | 1619.7 | 1250.8 | 409.4 | 1638.4 | 986.7 | 1063.9 | -960.0 | 1182.8 | 2090.1 | 1770.9 | 461.9 | -691.4 | 1201.6 | | Valeurs moyennes |
| Nb prédicteurs | 6 | 6 | 7 | 6 | 7 | 8 | 8 | 7 | 8 | 9 | 7 | 7 | 8 | 10 | 5 | 8 | 7 | 9 | 7 | 8 | | 7.4 |
| R² | 72% | 81% | 75% | 75% | 74% | 71% | 80% | 76% | 77% | 84% | 83% | 74% | 74% | 76% | 68% | 73% | 75% | 81% | 81% | 77% | | 76% |
| s | 67 | 67 | 65 | 97 | 65 | 52 | 69 | 75 | 83 | 69 | 76 | 76 | 86 | 89 | 68 | 84 | 73 | 95 | 69 | 80 | | 75 |

des valeurs d'un même point sur les deux grilles détermine la valeur corrigée définitive. C'est cette dernière qui sera utilisée pour la phase de validation.

3. 2. Validation

Pour déterminer les stations de validation, le secteur d'étude a été divisé en secteurs de 2500 km² d'après le quadrillage Lambert (Cf. Carte n°1). Pour chaque secteur et pour 2 années séparées de 10 ans une station de validation a été sélectionnée. Certains secteurs comportant trop peu de stations n'ont pas de station de validation pour toutes les années. Au minimum une dizaine de station de validation par an a été ainsi sélectionnée.

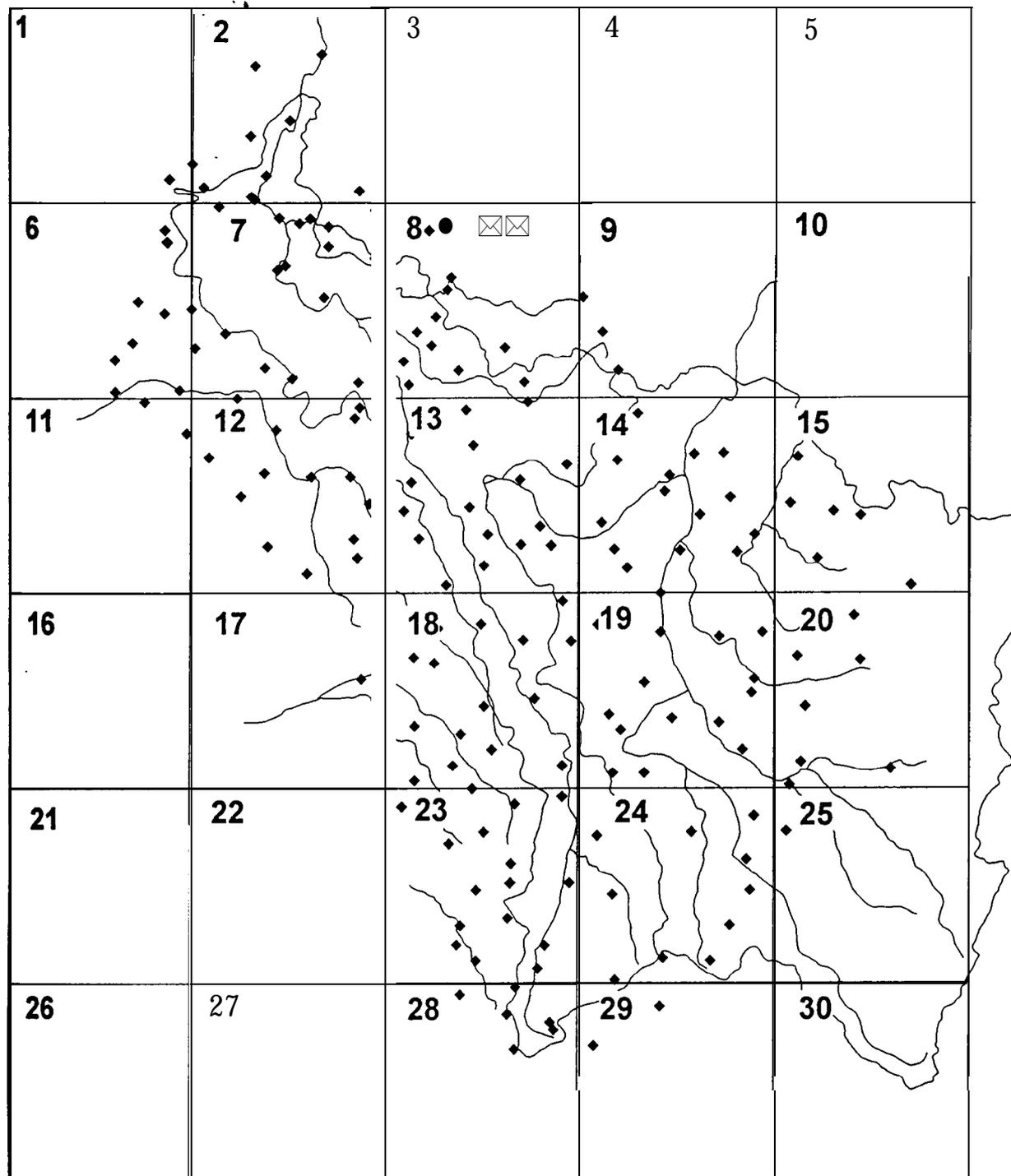
Les résultats de la validation du modèle sont très variables en fonction des années et des stations (Cf. Annexe 1). La moyenne des écarts absolus entre les précipitations issues du modèle (c'est à dire calculées par les régressions et corrigées par les résidus) et les précipitations mesurées est de 7%. Ce résultat relativement satisfaisant masque des écarts beaucoup plus élevés car l'écart absolu maximum atteint 32%.

D'une manière générale, c'est pour les années sèches que les écarts moyens les plus importants apparaissent (1971 et 1976). Par contre on ne remarque pas de secteur où la validation donne des résultats particulièrement médiocres si ce n'est pour le secteur n°13 où les écarts sont 7 années sur 20 supérieurs à 10%. Ce secteur comprenant la Woëvre septentrionale et une partie des Hauts de Meuse est particulièrement difficile à modéliser. Les reliefs n'ont pas véritablement d'orientation dominante et sont très contrastés d'où la difficulté d'obtenir pour ce secteur une fenêtre de taille et de direction adéquate. Pour toutes les années le nombre de stations dont l'écart entre les précipitations mesurées et les précipitations calculées est supérieur à 10% est très largement minoritaire. D'autre part, il arrive que le choix aléatoire d'une station comme station de validation soit particulièrement malheureux. C'est le cas de Conflans pour l'année 1974 où l'écart de 32% est le plus élevé à la station comparativement aux valeurs de résidus obtenus pour les corrélations.

Cette phase de validation permet aussi d'émettre des réserves sur la fiabilité de certaines stations utilisées dans le modèle. Le parti pris de n'effectuer aucune critique des stations et de ne se fier qu'à la mesure peut amener à utiliser des données erronées et provoquer les effets suivants :

- La qualité des régressions est altérée par la présence de stations aux résidus élevés.
- La prise en compte d'une station peu fiable pour la validation dégrade le degré de précision que l'on peut accorder au modèle.
- La correction par les résidus intégrant des données erronées fausse toute une partie de la grille du modèle.

Réseau pluviométrique utilisé dans le modèle et zones de validation



• Station pluviométrique

— Limite de zone de validation

30 N° de zone de validation

50 km



D'une manière générale, la validation montre aussi que la correction par les résidus n'augmente pas forcément la précision de la valeur calculée. Cette dernière est parfois plus proche de la valeur mesurée avant la correction.

Malgré toutes ces réserves et les résultats pas toujours satisfaisants rencontrés pour certaines stations de validation, le modèle proposé pour les 20 années de la période 1971-1990 peut être considéré comme relativement fiable avec une marge d'erreur moyenne de 7%.

4. Cartographie

La cartographie des résultats du modèle montre qu'il n'y a pas de changement notable dans la disposition des isohyètes d'une année à l'autre (Cf. Annexe 2). Les principaux pôles pluviométriques apparaissent toujours de la même manière avec le Barrois, l'Argonne et le Massif Ardennais toujours bien arrosé. A l'Est les précipitations sont nettement plus faibles avec des vallums pluviométriques centrés sur la Woëvre et la vallée de la Seille.

La correction par les résidus provoque l'apparition de cercles concentriques d'isohyètes autour de l'emplacement des stations. Ceci est surtout visible dans le Barrois avec la station de Villers-le-Sec qui provoque régulièrement un "trou" pluviométrique très localisé au milieu d'une région bien arrosée. Les inconvénients de la correction par les résidus apparaissent donc de manière très nette avec la cartographie.

5. Lames d'eau précipitées

Les lames d'eau précipitées ont été calculées pour chaque année pour toutes les zones de la codification hydrographique (Cf. Annexe 3) et pour tous les bassins versants des stations hydrométriques (Cf. Annexe 4) situés intégralement dans le secteur d'étude. La méthode de calcul est la même que pour la première phase; la lame d'eau moyenne précipitée correspond à la moyenne de tous les points de la grille du modèle espacés de 2 km situés à l'intérieur des limites de la zone hydrographique ou du bassin-versant.

La moyenne des précipitations calculées par le modèle pour toutes les années a été comparée avec la valeur issue du modèle interannuel de la première phase. L'écart le plus important est de 10%, ce qui valide d'une autre manière les précipitations calculées pour la deuxième phase.

Cette comparaison a aussi été réalisée pour les lames précipitées sur des bassins-versants contrôlés par des stations hydrométriques. Les écarts sont ici aussi très faibles. Par contre la comparaison avec les lames d'eau écoulées peut révéler des problèmes pour certaines stations hydrométriques. Ceux ci sont liés à des influences anthropiques, notamment d'exhaures, et apparaissent chaque année pour la Fensh à Maisons-Neuves (déficits pluviométriques négatifs), le bassin de

l'orne, l'Alzette à Audun-le-Tiche et la Rosselle à Petite-Rosselle. Les bassins karstiques de l'Aroffe ont des déficits d'écoulement particulièrement élevés. Pour d'autres stations il semblerait que les données de certaines années soient erronées. C'est le cas de la station de Belval sur la Sormonne en 1984 et 1985, de la station de Domremy sur la Meuse de 1982 à 1986 pour lesquels les déficits d'écoulement sont particulièrement faibles.

Conclusion

L'application du modèle de quantification spatiale des précipitations aux précipitations annuelles a été relativement difficile. Les résultats obtenus pour les précipitations d'années particulières sont nettement moins satisfaisants que ceux issus de la première phase concernant des moyennes interannuelles. Les valeurs de R^2 sont peu élevées et les nombres de prédicteurs sont très importants. D'autre part il semble difficile d'obtenir une variance résiduelle inférieure à 60 mm dans ce secteur d'étude.

La phase de validation nous indique que les précipitations calculées ponctuellement ont une précision moyenne de plus ou moins 7%. Il est probable que pour des précipitations moyennes calculées sur des surfaces plus grandes la précision augmente.

Cette phase a par ailleurs permis de rendre ce modèle plus opérationnel car la simplification de la matrice de variables explicatives permet d'alléger considérablement les procédures. Les variables explicatives sont calculées une fois pour toutes pour tous les points de la grille. Seules les régressions sont à refaire pour l'application du modèle à une année particulière. De plus, on connaît les variables qui figureront le plus probablement dans la régression.

A l'échelle des années particulières il serait peut-être souhaitable d'effectuer une critique des données (par exemple la méthode du vecteur régional) et corriger les valeurs douteuses ce qui permettrait lors de la phase de validation de déterminer quels sont les sites de stations qui posent problème pour le modèle. D'autre part il semble que la réalisation de cartes représentant la pluviométrie sur tout le secteur d'étude n'est peut-être pas la meilleure méthode pour la quantification de lames d'eau précipitées par bassin-versant. La précédente phase du modèle a montré qu'on obtenait de très bons résultats en régionalisant le modèle ce qui complique considérablement la tâche si on veut réaliser une carte de tout le secteur d'étude. Cette possibilité de critique des données et de régionalisation semble séduisante si l'on veut appliquer le modèle à des échelles de temps plus petites (saisonniers voire mensuelles).

Bibliographie

- 1] **D. FRANCOIS (1996)** : Quantification spatiale des précipitations du bassin Rhin-Meuse. Secteur occidental. CEGUM - Agence de l'Eau Rhin-Meuse.
- 2] **J. HUMBERT, J.-L. PERRIN et L PERRON (1993)** : Etude méthodologique de quantification spatiale des précipitations appliquée à la France du Nord-Est. Secteur-test : Versant oriental des Vosges. Agence de l'Eau Rhin-Meuse - IREGE/URA 95 CNRS, Université L. Pasteur, Strasbourg.
- 3] **MINITAB Inc. (1994)** : MINITAB Reference Manuel (Release 10 for Windows).

ANNEXE 1

VALIDATIONS DES MODELES ANNUELS

Sur les graphiques la droite tracée en trait continu correspond à la bissectrice où P mesurée = P calculée, les droites en pointillées représentent l'intervalle +/- 10% autour de la bissectrice.