

TH-0A2

**THESE**

présentée par

**Anne KIEFFER WEISSE**

**Ingénieur ENSHMG-INPG**



Unité Climat Sol et Environnement  
Bâtiment Sol  
Domaine Saint-Paul - Site Agroparc  
F. 84914 AVIGNON CEDEX 9

Pour obtenir le grade de DOCTEUR de

**l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement

**Etude des précipitations exceptionnelles de pas de temps  
court en relief accidenté (Alpes françaises)**

**Méthode de cartographie des précipitations extrêmes**

*Relations avec le contexte topographique*

*Utilisation de l'information au pas de temps de la journée*

Date de soutenance : 3 Juillet 1998

Composition du jury

Joël HUMBERT

Président

Pierre HUBERT

Rapporteur

Jean-Pierre LABORDE

Rapporteur

Rémy GARCON

Examineur

Etienne LEBLOIS

Examineur

Philippe BOIS

Directeur de Thèse

Thèse préparée au **Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement**

UMR 5564 (CNRS - INPG - ORSTOM - UJF)

*A Olivier*

## REMERCIEMENTS

*Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un plan Etat-Région : "Risques Naturels en Montagne" et du Programme National Risques Naturels 1994 de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers). Il a aussi été financé pour partie par le Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels.*

*L'ensemble des données utilisées pour ce projet ont été fournies par les services d'EDF-DTG, CEMAGREF et Météo France.*

*Enfin, j'ai bénéficié pendant trois années d'une Bourse de Docteur Ingénieur du CNRS.*

*Cette thèse a été effectuée dans l'équipe Hydro-météorologie du Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement de Grenoble. Je tiens donc à remercier M. VAUCLIN, directeur du LTHE, et M. CREUTIN, responsable de l'équipe, pour leurs accueils.*

*M. BOIS a été mon directeur de thèse : il a suivi et motivé mon travail, malgré le peu de temps que lui laisse l'enseignement... Qu'il en soit remercié ici.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux personnes qui ont évalué ce travail :*

- *M. HUMBERT, professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, a accepté de présider mon jury de thèse.*
- *M. HUBERT, professeur à l'Ecole des Mines de Paris, et M. LABORDE, professeur à l'Université de Nice, ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse, je les en remercie, ainsi que pour leurs accueils et conseils.*
- *M. GARCON, chef de branche Hydrologie et Gestion de l'eau à EDF-DTG, a été examinateur. Ces conseils sur les ajustements, la loi de Gumbel... au début de l'étude ont été précieux.*
- *M. LEBLOIS, Ingénieur du Génie Rural des Eaux et Forêts, a suivi « de loin » l'ensemble de cette étude, puisqu'il a lui même travaillé sur le sujet bien avant moi.*

*Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement de ma thèse (M. PAREL -EDF-DTG-, Mme DESAINTIGNON -LAMA-, M. DOLS -DIREN Valence-, M. LAVABRE -CEMAGREF Aix en Provence-, M. LABORIER -DDA Bourg en Bresse-, Mme MATHYS -CEMAGREF Saint Martin d'Hères-, M. THILLET -METEO France Saint Martin d'Hères-), et en particulier M. DUBAND pour son intérêt et les discussions que nous avons eues.*

*Toute ma sympathie va aux membres du laboratoire qui d'une façon ou d'une autre m'ont aidée et ont rendu ce travail agréable. Une attention particulière à mes amies : Rachel, Florentina, Katia...*

# TABLE DES MATIERES



|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| <b>TABLE DES MATIERES.....</b> | <b>5</b> |
|--------------------------------|----------|

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE.....</b> | <b>15</b> |
|-----------------------------------|-----------|

|                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PARTIE A      DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES<br/>PRECIPITATIONS EXTREMES DANS LES ALPES FRANÇAISES</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                   |                                                                  |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>CHAPITRE I</b> | <b>PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE ET DES DONNEES DE PLUIE</b> |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.1. Description du domaine : relief, climat et précipitations.....</b> | <b>25</b> |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| I.1.1. Situation géographique ..... | 25 |
|-------------------------------------|----|

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| I.1.2. Caractéristiques générales du relief ..... | 26 |
|---------------------------------------------------|----|

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| I.1.3. Climat des Alpes françaises ..... | 27 |
|------------------------------------------|----|

I.1.3.1. Alpes du Nord : un domaine océanique atténué

I.1.3.2. Alpes du Sud : une influence méditerranéenne décroissante

I.1.3.3. Vents alpins

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| I.1.4. La pluviométrie des Alpes françaises ..... | 31 |
|---------------------------------------------------|----|

I.1.4.1. Précipitations annuelles

I.1.4.2. Précipitations mensuelles et régimes pluviométriques

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| I.1.5. Différents types de systèmes précipitants ..... | 36 |
|--------------------------------------------------------|----|

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| I.1.6. Types de temps dans les Alpes françaises ..... | 37 |
|-------------------------------------------------------|----|

I.1.6.1. Classification des types de temps sur les Alpes

I.1.6.2. Classification des types de temps spécifique à l'espace Rhônealpin

I.1.6.3. Alpes internes françaises : l'exemple de Briançon (05)

I.1.6.4. Conclusion : division climatologique

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1.7. Exemples d'épisodes de fortes intensités à Grenoble (Campus de Saint Martin<br>d'Hères)..... | 44 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

I.1.7.1. Exemples d'épisodes associés à des fronts froids

I.1.7.2. Exemple d'épisode associé à un front chaud, un front froid et un front occlus (7/07/1996)

I.1.7.3. Exemple d'épisode de type convectif (14/05/1997)

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.2. Réseaux de stations utilisés dans l'étude : pluviographes et pluviomètres .....</b> | <b>47</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| I.2.1. Appareils de mesure des précipitations..... | 48 |
|----------------------------------------------------|----|

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| I.2.2. Erreurs de mesure des précipitations ..... | 48 |
|---------------------------------------------------|----|

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| I.2.3. Le réseau de pluviographes..... | 49 |
|----------------------------------------|----|

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| I.2.4. Le réseau de pluviomètres..... | 53 |
|---------------------------------------|----|

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| I.2.5. Dépouillement et correction de WEISS ..... | 53 |
|---------------------------------------------------|----|

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| I.2.6. Vérifications effectuées sur les données fournies ..... | 56 |
|----------------------------------------------------------------|----|

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>I.3. Conclusion .....</b> | <b>57</b> |
|------------------------------|-----------|

**CHAPITRE II ESTIMATION DES VALEURS DE PLUIES EXTREMES POUR LES DIFFERENTS PAS DE TEMPS**

**LE PROBLEME DES SAISONS A PLUS FORT RISQUE**

|                                                                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>II.1. Distributions fréquentielles utilisées : loi de Gumbel et somme de deux exponentielles.....</b>                                                                  | <b>61</b>  |
| II.1.1. Rappels sur les lois de probabilité .....                                                                                                                         | 62         |
| II.1.2. Loi de Gumbel .....                                                                                                                                               | 63         |
| II.1.2.1. Estimation des paramètres de la loi de Gumbel                                                                                                                   |            |
| II.1.2.2. Estimation de l'intervalle de confiance sur un quantile                                                                                                         |            |
| II.1.3. Somme de deux exponentielles .....                                                                                                                                | 67         |
| II.1.4. Comparaison des différentes estimations du gradex et du mode.....                                                                                                 | 69         |
| II.1.4.1. Intérêt de la méthode des moments pondérés par rapport à la méthode des moments                                                                                 |            |
| II.1.4.2. Comparaison de la loi somme de deux exponentielles et de la loi de Gumbel                                                                                       |            |
| II.1.5. Evolution du gradex en fonction du pas de temps : le coefficient de Montana.....                                                                                  | 73         |
| II.1.6. Conclusion .....                                                                                                                                                  | 73         |
| <b>II.2. Estimation des précipitations extrêmes.....</b>                                                                                                                  | <b>75</b>  |
| II.2.1. Introduction : constitution de l'échantillon pour l'estimation des précipitations extrêmes, définition d'une saison à plus fort risque et démarche envisagée..... | 75         |
| II.2.2. Définition de saison à plus fort risque pour chaque pas de temps et pour chaque station .....                                                                     | 77         |
| II.2.2.1. Relation gradex mensuels / moyennes mensuelles                                                                                                                  |            |
| II.2.2.2. Détermination des saisons à plus fort risque                                                                                                                    |            |
| II.2.2.3. Etude de la sensibilité du calcul des pluies extrêmes au nombre d'années de données disponibles                                                                 |            |
| II.2.2.4. Etude de la sensibilité du calcul des pluies extrêmes à la définition de la saison à plus fort risque                                                           |            |
| II.2.2.5. Conclusion et première méthode appliquée                                                                                                                        |            |
| II.2.3. Définition d'une saison à plus fort risque unique pour chaque pas de temps.....                                                                                   | 85         |
| II.2.4. Définition de saisons à plus fort risque par région pour chaque pas de temps.....                                                                                 | 87         |
| II.2.5. Comparaison des différentes méthodes d'estimation des précipitations extrêmes et choix d'une méthode .....                                                        | 90         |
| II.2.6. Estimation des valeurs de pluies extrêmes .....                                                                                                                   | 94         |
| II.2.6.1. Cas des pluviographes                                                                                                                                           |            |
| II.2.6.2. Cas des pluviomètres                                                                                                                                            |            |
| II.2.6.3. Statistiques des valeurs de pluies extrêmes                                                                                                                     |            |
| <b>II.3. Conclusion.....</b>                                                                                                                                              | <b>100</b> |

|                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PARTIE B      CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS EXTREMES DANS LES ALPES FRANÇAISES</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|

## **INTRODUCTION A LA PARTIE B**

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. Les différentes méthodes de cartographie envisagées.....</b>       | <b>105</b> |
| <b>2. Présentation de la méthode de validation croisée utilisée.....</b> | <b>106</b> |

## **CHAPITRE III      CARTOGRAPHIE PAR KRIGEAGE**

|                                                                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>III.1. Théorie du krigeage.....</b>                                                                                      | <b>113</b> |
| III.1.1. Inférence statistique.....                                                                                         | 114        |
| III.1.1.1. Stationnarité d'ordre 2                                                                                          |            |
| III.1.1.2. Hypothèse intrinsèque                                                                                            |            |
| III.1.1.3. La fonction de structure : le variogramme                                                                        |            |
| III.1.2. Formalisation du krigeage.....                                                                                     | 119        |
| <b>III.2. Etude de la structure spatiale des caractéristiques des précipitations extrêmes à l'aide de variogrammes.....</b> | <b>121</b> |
| III.2.1. Détermination des classes d'interdistance.....                                                                     | 121        |
| III.2.2. Variogrammes isotropes des pluies décennales et centennales.....                                                   | 122        |
| III.2.2.1. Pas de temps de 24 h                                                                                             |            |
| III.2.2.2. Pas de temps inférieurs à 24 h                                                                                   |            |
| III.2.2.3. Conclusion : modèles théoriques ajustés                                                                          |            |
| III.2.3. Variogrammes isotropes des gradex.....                                                                             | 137        |
| III.2.4. Variogramme isotrope du coefficient de Montana.....                                                                | 137        |
| III.2.5. Variogrammes directionnels.....                                                                                    | 139        |
| III.2.6. Conclusion.....                                                                                                    | 139        |
| <b>III.3. Cartes krigées des différents champs pluviométriques.....</b>                                                     | <b>140</b> |
| III.3.1. Pluies décennales.....                                                                                             | 140        |
| III.3.2. Coefficient de Montana.....                                                                                        | 144        |
| <b>III.4. Conclusion .....</b>                                                                                              | <b>145</b> |

## **CHAPITRE IV      CARTOGRAPHIE S'APPUYANT SUR LA REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE AVEC LE RELIEF**

|                                                                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>IV.1. Théorie de la régression linéaire multiple .....</b>                                                      | <b>150</b> |
| IV.1.1. Estimation des coefficients de régression .....                                                            | 150        |
| IV.1.2. Estimation de l'écart type résiduel $\sigma_e$ : coefficient de corrélation multiple R .....               | 152        |
| IV.1.3. Variance et covariance des coefficients de régression .....                                                | 152        |
| IV.1.4. Méthode par adjonction (Stepwise Upward).....                                                              | 153        |
| <b>IV.2. Première approche envisagée pour expliquer les paramètres pluviométriques par la topographie.....</b>     | <b>154</b> |
| <b>IV.3. Paramètres morphométriques caractérisant un site .....</b>                                                | <b>156</b> |
| IV.3.1. Variables locales .....                                                                                    | 156        |
| IV.3.2. Paramètres caractérisant la région.....                                                                    | 158        |
| IV.3.3. Analyse des paramètres morphométriques.....                                                                | 159        |
| <b>IV.4. Relations simples entre les paramètres pluviométriques et les paramètres morphométriques définis.....</b> | <b>161</b> |
| IV.4.1. Pluies décennales et centennales .....                                                                     | 162        |
| IV.4.2. Gradex .....                                                                                               | 164        |
| IV.4.3. Coefficient de Montana.....                                                                                | 164        |
| IV.4.4. Conclusion .....                                                                                           | 165        |
| <b>IV.5. Régression linéaire multiple entre paramètres pluviométriques et paramètres morphométriques .....</b>     | <b>166</b> |
| IV.5.1. Etude du pouvoir explicatif des variables locales et des variables globales .....                          | 166        |
| IV.5.2. Modèles linéaires retenus.....                                                                             | 168        |
| IV.5.2.1. Pluies décennales, centennales et gradex                                                                 |            |
| IV.5.2.2. Coefficient de Montana                                                                                   |            |
| IV.5.3. Etude de la robustesse des équations .....                                                                 | 171        |
| IV.5.3.1. Etude des coefficients de régression en variables centrées réduites                                      |            |
| IV.5.3.2. Validation croisée                                                                                       |            |
| IV.5.3.3. Conclusion                                                                                               |            |
| IV.5.4. Estimation d'un intervalle de confiance.....                                                               | 176        |
| IV.5.5. Conclusion .....                                                                                           | 177        |
| <b>IV.6. Méthode de cartographie s'appuyant sur la régression linéaire multiple avec le relief.....</b>            | <b>178</b> |

|                                                                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| IV.6.1. Analyse spatiale des résidus de régression et cartographie .....                                                                                | 179        |
| IV.6.2. Estimation d'un écart type de l'erreur d'estimation pour la méthode de cartographie envisagée .....                                             | 183        |
| IV.6.2.1. Formulation théorique de l'écart type de l'erreur d'estimation                                                                                |            |
| IV.6.2.2. Variance de l'erreur d'estimation par l'équation de régression                                                                                |            |
| IV.6.2.3. Coefficient de corrélation entre les erreurs d'estimation par l'équation de régression et les erreurs d'estimation des résidus e par krigeage |            |
| IV.6.2.4. Formulation finale de l'écart type de l'erreur d'estimation                                                                                   |            |
| IV.6.3. Exemple de cartes obtenues par application de la méthode .....                                                                                  | 187        |
| <b>IV.7. Conclusion .....</b>                                                                                                                           | <b>194</b> |

## **CHAPITRE V      CARTOGRAPHIE PAR COKRIGEAGE AVEC LE RELIEF**

|                                                                                                                                                                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>V.1. Théorie du cokrigeage.....</b>                                                                                                                                                                          | <b>197</b> |
| V.1.1. Variogramme croisé .....                                                                                                                                                                                 | 198        |
| V.1.2. Inégalité de Cauchy-Schwarz .....                                                                                                                                                                        | 200        |
| V.1.3. Formulation du cokrigeage.....                                                                                                                                                                           | 201        |
| <b>V.2. Cokrigeage avec le relief .....</b>                                                                                                                                                                     | <b>202</b> |
| V.2.1. Etude de la structure spatiale des variables auxiliaires tirées du relief et de la cofluctuation des variables pluviométriques et des variables auxiliaires : variogrammes et variogrammes croisés ..... | 203        |
| V.2.1.1. Variogrammes des estimées des pluies grâce au relief                                                                                                                                                   |            |
| V.2.1.2. Variogrammes croisés des pluies et des estimées des pluies par le relief                                                                                                                               |            |
| V.2.2. Conclusion : application du cokrigeage .....                                                                                                                                                             | 213        |
| <b>V.3. Cartes des différents champs pluviométriques obtenues par cokrigeage avec le relief.....</b>                                                                                                            | <b>214</b> |
| V.3.1. Pluies décennales.....                                                                                                                                                                                   | 214        |
| V.3.2. Coefficient de Montana .....                                                                                                                                                                             | 218        |
| <b>V.4. Conclusion.....</b>                                                                                                                                                                                     | <b>219</b> |

## **CHAPITRE VI      UTILISATION DE L'INFORMATION AU PAS DE TEMPS DE LA JOURNÉE POUR L'AMÉLIORATION DE LA CARTOGRAPHIE**

|                                                                                                                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>VI.1. Relations entre précipitations extrêmes journalières et précipitations extrêmes de durées inférieures à 24 h.....</b>                                       | <b>223</b> |
| VI.1.1. Relations entre variables pluviométriques de pas de temps différents.....                                                                                    | 224        |
| VI.1.2. Relations linéaires simples entre précipitations extrêmes journalières et précipitations extrêmes de durées inférieures à 24 h.....                          | 226        |
| VI.1.3. Conclusion .....                                                                                                                                             | 226        |
| <b>VI.2. Cokrigage à pas de temps inférieur à la journée à l'aide de l'information à 24 h.....</b>                                                                   | <b>228</b> |
| VI.2.1. Variabilité spatiale des différents paramètres .....                                                                                                         | 228        |
| VI.2.2. Modèles de variogrammes croisés adoptés .....                                                                                                                | 232        |
| VI.2.3. Conclusion : exemples de cartes obtenues par cokrigage à l'aide de l'information à 24 h.....                                                                 | 235        |
| <b>VI.3. Cartographie à pas de temps inférieur à la journée à l'aide de l'information à 24 h, se basant sur les relations linéaires simples entre variables.....</b> | <b>238</b> |
| VI.3.1. Méthode s'appuyant sur la variabilité spatiale des estimées de pluies grâce au pas de temps journalier.....                                                  | 238        |
| VI.3.2. Méthode s'appuyant sur la répartition spatiale des pluies journalières et des résidus de régression.....                                                     | 242        |
| VI.3.2.1. Variogrammes expérimentaux des résidus de régression                                                                                                       |            |
| VI.3.2.2. Estimation d'un écart type de l'erreur d'estimation pour la méthode de cartographie envisagée                                                              |            |
| VI.3.2.3. Conclusion                                                                                                                                                 |            |
| VI.3.3. Comparaison des deux méthodes de cartographie définies.....                                                                                                  | 248        |
| VI.3.4. Conclusion et exemples de cartes .....                                                                                                                       | 251        |
| <b>VI.4. Méthodes utilisant la répartition spatiale des champs à 24 h.....</b>                                                                                       | <b>253</b> |
| VI.4.1. Méthode s'appuyant sur la répartition spatiale du coefficient de Montana .....                                                                               | 253        |
| VI.4.2. Cartographie se basant sur l'information horaire et journalière, pour des durées comprises entre 1 h et 24 h.....                                            | 256        |
| VI.4.2.1. Propriétés des coefficients $k(t)$                                                                                                                         |            |
| VI.4.2.2. Variabilité spatiale des coefficients $k(t)$                                                                                                               |            |
| VI.4.2.3. Conclusion : méthode envisagée et exemples de cartes de coefficients $k(t)$ et des champs pluviométriques                                                  |            |
| <b>VI.5. Conclusion .....</b>                                                                                                                                        | <b>264</b> |

## **CHAPITRE VII    CONCLUSION A LA PARTIE B : COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES DE CARTOGRAPHIE DES PLUIES EXTREMES**

|                                                                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>VII.1. Récapitulatif des méthodes de cartographie de champs statistiques d'extrêmes envisagées .....</b>                                                | <b>267</b> |
| <b>VII.2. Application de la validation croisée aux différentes méthodes de cartographie .</b>                                                              | <b>271</b> |
| <b>VII.3. Etude des performances des différentes méthodes de cartographie par validation croisée .....</b>                                                 | <b>274</b> |
| VII.3.1. Comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et estimées .....                                                                         | 274        |
| VII.3.2. Etude des coefficients de détermination $R^2$ pour chaque méthode.....                                                                            | 276        |
| VII.3.3. Conclusion .....                                                                                                                                  | 281        |
| <b>VII.4. Comparaison des différentes méthodes de cartographie par validation croisée pour les variables pluies décennales, centennales et gradex.....</b> | <b>282</b> |
| VII.4.1. Pas de temps inférieurs à 24 h .....                                                                                                              | 282        |
| VII.4.2. Pas de temps de 24 h.....                                                                                                                         | 283        |
| VII.4.3. Conclusion .....                                                                                                                                  | 285        |
| <b>VII.5. Comparaison des différentes méthodes de cartographie par validation croisée pour le coefficient de Montana.....</b>                              | <b>287</b> |
| <b>VII.6. Conclusion.....</b>                                                                                                                              | <b>289</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE.....</b>                                                                                                                            | <b>291</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                                                                   | <b>299</b> |

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe 1 :** Liste des pluviographes disponibles

**Annexe 2 :** Liste des pluviomètres disponibles

**Annexe 3 :** Valeurs de pluies extrêmes pour les pluviographes et intervalles de confiance à 80 % correspondants. Pas de temps : 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h et 24 h. Temps de retour de 10 ans et 100 ans, gradex et mode, coefficient de Montana.

**Annexe 4 :** Valeurs de pluies extrêmes pour les pluviomètres et intervalles de confiance à 80 % correspondants. Temps de retour de 10 ans et 100 ans, gradex et mode.

**Annexe 5 :** Cartes des champs de pluies centennales et des gradex obtenues par krigeage

**Annexe 6 :** Paramètres morphométriques caractérisant un site

**Annexe 7 :** Régression linéaire multiple entre les paramètres pluviométriques et les paramètres morphométriques :

Graphes des valeurs observées en fonction des valeurs estimées

Graphes des résidus en fonction des valeurs observées



# INTRODUCTION GENERALE



« Au cours du mois d'août 1996, en Espagne, une crue soudaine a entièrement détruit un camping installé dans les Pyrénées et a causé la mort de 85 personnes. Mais l'événement le plus catastrophique de ce pays a été enregistré en Catalogne, au cours du mois de septembre 1962, causant plus de 815 morts en moins de 3 heures. Dans le Sud de la France, les crues qui se sont produites le 22 septembre 1992 ont entraîné 41 morts dans le bassin de l'Ouvèze. Ce même événement a produit des crues catastrophiques dans le Nord Ouest de l'Italie, une région qui fût à nouveau affectée par les pluies fortes et les crues en septembre 1993 et novembre 1994. Plus de 2200 personnes ont trouvé la mort en 1988 lors des crues du Gange et du Brahmapoutre au Bangladesh. En juillet 1993, le bassin du Mississippi a été touché par une des plus fortes crues de l'histoire des Etats Unis : 9 Etats furent touchés, 47 personnes perdirent la vie, et le montant des dommages s'éleva à plus de 12 milliards de dollars. Au cours du même mois, 3000 personnes moururent en Inde et au Népal à la suite d'inondations... » (LLASAT, 1997)

Cet inventaire, non exhaustif, mais effrayant, montre les conséquences néfastes des crues et des inondations. Pour ces événements, l'hydrologie et la météorologie ont un rôle majeur. Les pluies "fortes" sont souvent à l'origine de telles catastrophes, mais n'en sont pas les seuls facteurs : l'état hydrique des sols, les caractéristiques du terrain : pentes, profondeur des sols, géologie, sont aussi déterminants.

Les zones de montagne, tout comme les zones soumises au climat méditerranéen, sont particulièrement vulnérables. En effet, des vallées encaissées définissent de petits bassins versants aux temps de réponse brefs (de l'ordre de quelques heures). Ces bassins versants sont très vite exposés à des risques d'inondations, d'écoulements de laves torrentielles, et en hiver, à des risques de formation de congères ou d'avalanches, en cas de précipitations longues et d'intensité moyenne.

Il est donc primordial pour le projeteur qui a à préserver ou à aménager hydrauliquement les zones d'altitude, de bien connaître la répartition spatiale des paramètres comme les pluies de fréquences rares à des petits pas de temps.

C'est pourquoi, une région comprenant les Alpes françaises et le pourtour méditerranéen a été choisie comme domaine d'étude pour les précipitations extrêmes. Les pas de temps considérés vont de l'heure à la journée.

Ce travail a débuté par le dépouillement de données pluviographiques, dans le cadre du X<sup>e</sup> plan Etat Région "Risques Naturels en Montagne" (EDF DTG-CEMAGREF, 1995). D'autre part, un financement a été attribué au laboratoire LTHE par le Programme National Risques Naturels 1994 de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) pour la valorisation des données de pluie ainsi acquises.

Le but du travail présenté ici est, dans un premier temps, la détermination ponctuelle des caractéristiques statistiques des précipitations extrêmes à pas de temps fins dans les Alpes françaises. Dans un deuxième temps, c'est la répartition spatiale des paramètres pluviométriques, pluies décennales, centennales et gradex qui nous intéresse. Différentes techniques de cartographie des précipitations extrêmes à pas de temps fins sont envisagées. Les premières s'appuient sur une information topographique, et ensuite l'apport de l'information disponible à 24 h grâce aux pluviomètres est testé.

De nombreuses études antérieures sont à la base de ce travail.

L'étude la plus ancienne trouvée sur les Alpes françaises concerne la cartographie des gradex journaliers (GRARD et al., 1969).

Une seconde analyse, locale quant à elle, des précipitations extrêmes sur 300 postes du Sud Est de la France s'attache à des pas de temps longs : de 1 à 10 jours et des temps de retour compris entre 1 et 25 ans (BOIRET et al., 1982, 1984).

D'autre part, une analyse des précipitations sur une zone rectiligne des Pré-Alpes du Nord a été initiée par le CEMAGREF en 1987 : le TPG (Transect de Pluviographes pour l'analyse et la modélisation de Gradients d'intensités d'altitude) est composé de 23 pluviographes. DESUROSNE (1992) s'appuie sur les données collectées sur ce réseau pour une analyse statistique des précipitations extrêmes et leur liaison avec l'altitude.

Par ailleurs, différentes analyses des précipitations extrêmes ont été menées sur des régions françaises.

LABORDE (1984) utilise la topographie pour la cartographie des précipitations extrêmes en Lorraine. Notre étude s'appuie d'ailleurs largement sur ce travail pour la caractérisation du relief.

De plus, différents travaux, menés au LTHE (SLIMANI, 1985 ; THAO, 1993) ont débouché sur l'édition d'un premier *Atlas expérimental des risques de pluies intenses sur la région Cévennes Vivarais* (BOIS et al., 1997). Cet atlas regroupe des cartes de précipitations décennales, centennales et de gradex pour des pas de temps allant de l'heure à la journée. La technique de cartographie utilisée est le krigeage, qui prend uniquement en compte la variabilité spatiale des variables à cartographier pour l'interpolation.

Enfin, ce travail s'inscrit dans la continuité de ceux de SAIDI BOUOUDINA (1996) et de LEBLOIS (1997) qui s'attachaient déjà à l'étude des précipitations extrêmes dans les Alpes françaises sur la base du réseau de pluviographes dépouillés dans le cadre du X<sup>e</sup> plan Etat Région.

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en deux grandes parties :

La première partie traite de la détermination des caractéristiques statistiques des précipitations extrêmes dans les Alpes françaises (*PARTIE A*) :

- i) Après une présentation des Alpes françaises et des caractéristiques climatologiques de cette région, nous décrivons le réseau de stations de mesure de pluie utilisé dans l'étude, composé de pluviographes (appareils de mesure à pas de courts) et de pluviomètres (appareils de mesure au pas de temps de la journée) (*chapitre I*).
- ii) Le *chapitre II* est consacré à l'estimation statistique des valeurs de pluies extrêmes pour les différents pas de temps. En particulier, l'échantillon utilisé pour le calcul statistique est discuté, ce qui débouche sur la définition de saisons à plus fort risque pluvieux.

Ensuite, nous nous attachons à la cartographie des précipitations extrêmes (*PARTIE B*). Pour ce faire, différentes méthodes sont envisagées :

- iii) La cartographie par krigeage utilise uniquement la structure spatiale des différentes variables pluviométriques (*chapitre III*).

- iv) Ensuite, c'est l'apport d'une information topographique qui est testé : les variables pluviométriques sont liées par régression linéaire multiple à des variables décrivant le relief (*chapitre IV*).
- v) Dans le *chapitre V*, le cokrigage est utilisé avec comme information supplémentaire une variable décrivant le relief.
- vi) Les dernières techniques envisagées visent à prendre en compte l'information au pas de temps de la journée, fournie par les pluviomètres (*chapitre VI*).
- vii) Enfin, le *chapitre VII* conclut la deuxième partie, puisqu'il présente la comparaison des différentes méthodes de cartographie des pluies extrêmes par validation croisée.

# PARTIE A

## DETERMINATION DES

## CARACTERISTIQUES DES PRECIPITATIONS

## EXTREMES DANS LES ALPES FRANÇAISES

**CHAPITRE I**

**PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE**

**ET DES DONNEES DE PLUIE**





Cette partie est consacrée à la présentation du domaine étudié : les Alpes françaises et le réseau de mesure de pluie utilisé.

Après une rapide description du relief, nous nous intéresserons au climat de la zone d'étude et à sa pluviométrie : répartition spatiale des pluies moyennes annuelles et des pluies mensuelles. De plus, différentes classifications des types de temps sur les Alpes françaises nous permettront de mettre en évidence les situations météorologiques engendrant de fortes précipitations. Enfin, nous illustrerons cette partie avec quelques exemples de hyétogrammes (pluie en fonction du temps) correspondant à des épisodes de fortes intensités à Grenoble, et nous décrirons les situations synoptiques ayant engendré ces pluies.

Dans un deuxième temps, les données de base utilisées dans cette étude seront décrites : le réseau de stations de mesure des précipitations à pas de temps fin -les pluviographes- et les stations de mesure au pas de temps de la journée -les pluviomètres-, ainsi que les données de pluie disponibles pour les différents appareils.

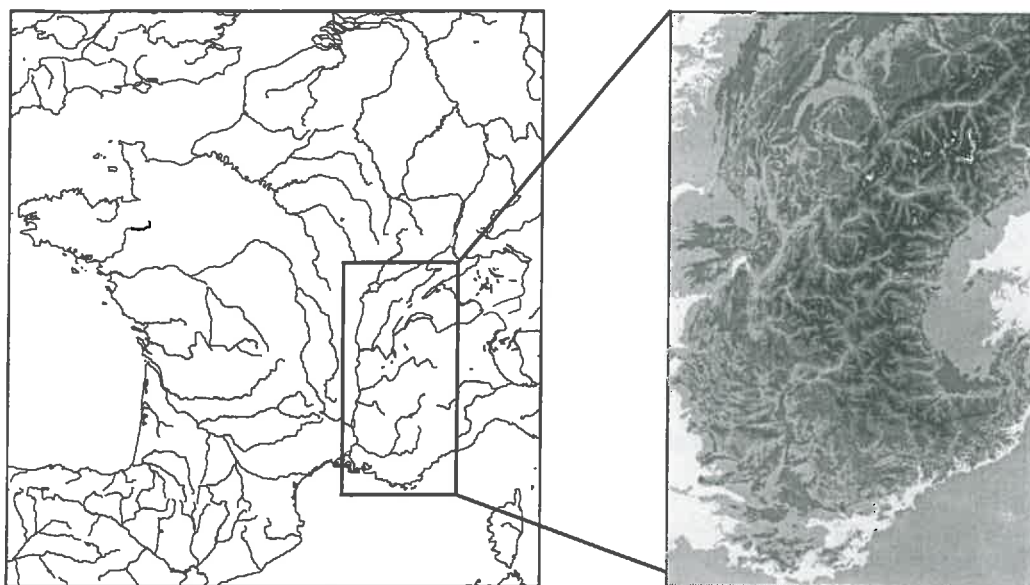
## **I.1.Description du domaine : relief, climat et précipitations**

### **I.1.1. Situation géographique**

La région étudiée est l'ensemble des Alpes françaises, dans la partie Sud-Est de la France (cf. Figure I 1). Ses limites sont :

- à l'Ouest, les vallées du Rhône et de la Saône,
- au Sud, la Méditerranée,
- à l'Est, les frontières italienne et suisse,
- au Nord, le lac de Neuchâtel.

La surface du domaine couvert est de plus de 100 000 km<sup>2</sup> (environ 250 km×450 km).



*Figure I 1 : Situation géographique de la région étudiée (Alpes françaises) et relief correspondant (carte obtenue à partir d'un Modèle Numérique de Terrain à maille de 525 m)*

### I.1.2. Caractéristiques générales du relief

Les Alpes françaises sont divisées en deux grands ensembles : les Alpes du Nord et les Alpes du Sud, séparées par une ligne jalonnée par le col de la Croix-Haute, le col Bayard et, approximativement, le col du Lautaret. Les Alpes du Nord correspondent à peu près au bassin de l'Isère, et les Alpes du Sud, à celui de la Durance.

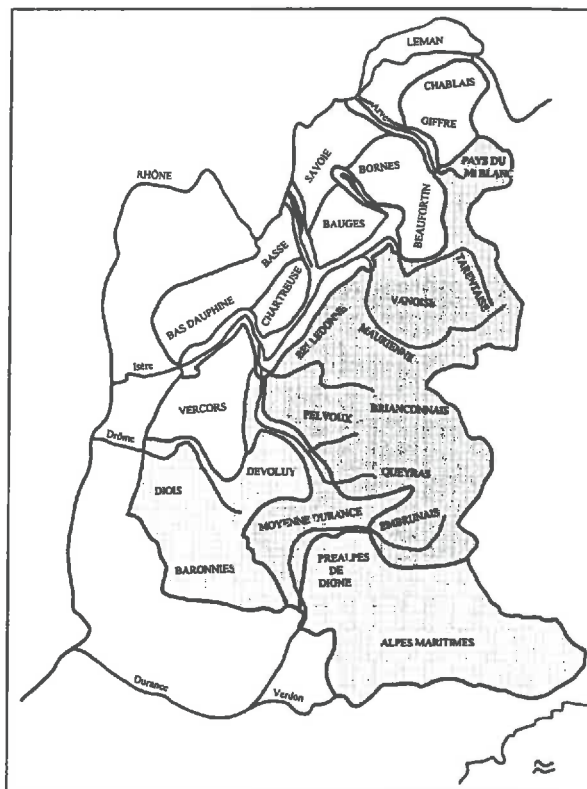
Les Alpes du Nord représentent une chaîne de montagne élevée culminant à 4807 m (Mont Blanc). L'altitude moyenne de cette zone est de 1525 m. Les altitudes diminuant globalement du Nord vers le Sud dans les Alpes, les Alpes du Sud ont quant à elles une altitude moyenne de 300 m inférieure à celle des Alpes du Nord.

Les Alpes du Nord possèdent un relief ordonné, où se succèdent d'Ouest en Est (cf. Figure I 2) :

- les *Préalpes* (Chablais, Bornes, Bauges, Chartreuse, Vercors),
- le *Sillon alpin*, vaste couloir ouvert entre les Préalpes et les massifs centraux (combe de Savoie, Grésivaudan),

- les *massifs centraux* (Mont-Blanc, Beaufortin, Belledonne, Oisans et Pelvoux), partie la plus élevée,
- la *zone intra-alpine*, aérée par les vallées de l'Isère supérieure (Tarentaise), de l'Arc (Maurienne) et de la Romanche.

Les Alpes du Sud n'offrent pas une disposition aussi simple. Les *Préalpes* s'étendent en dessinant un arc de cercle du Diois et des Baronnies aux *Alpes Maritimes*. Elles sont traversées par la Durance (cf. Figure I 2). Au Sud-Est du Pelvoux, la barrière des massifs centraux s'interrompt.



*Figure I 2 : Les Alpes françaises : les grands ensembles*

### *1.1.3. Climat des Alpes françaises*

Les Alpes françaises, sur une distance en latitude d'environ 400 km sont le théâtre d'une lutte d'influences atlantique et méditerranéenne.

Comme pour la description du relief, nous pouvons distinguer les Alpes du Nord des Alpes Méridionales (ou du Sud). Au Nord se trouvent les régions humides et vertes et au Sud sont situées les parties les plus sèches et les plus dénuées de végétation. Ainsi, les Alpes du Nord sont parmi les régions les plus arrosées de France alors que les Alpes du Sud sont plus sèches. Ces dernières reçoivent des averses abondantes uniquement au printemps et en automne (BENEVENT, 1926).

Après la description des climats des deux grandes parties des Alpes (VEYRET, 1979), nous nous intéresserons aux vents alpins, et en particulier à ceux qui accompagnent les précipitations.

#### I.1.3.1. Alpes du Nord : un domaine océanique atténué

L'influence dominante dans les Alpes du Nord est océanique. Combinée avec le relief constitué de murailles face à l'Ouest, elle entraîne humidité et fraîcheur. Il n'y a pas de saison sèche, contrairement au Sud.

Les *plaines de montagne* (cluses de l'Arve, d'Annecy, de Chambéry, de Grenoble et les parties basses du Sillon Alpin) bénéficient d'un climat privilégié. L'abri aux vents et la faible altitude modèrent les hivers, et contribuent à la chaleur des étés.

Par ailleurs, les *Préalpes du Nord* (du Vercors au Chablais) condensent le maximum d'humidité, en présentant une barrière topographique au flux d'air le plus humide venant d'Ouest. L'abondance et la fréquence des pluies diminuent l'ensoleillement et les températures moyennes.

Les dépressions d'Ouest arrivent ensuite sur une seconde barrière : les « *massifs cristallins externes* » (du Pays du Mont Blanc au massif de Belledonne et Pelvoux). Dans cette zone, par rapport à la région précédente, le nombre de jours pluvieux diminue, l'ensoleillement augmente, les températures sont moins écartées et l'été retrouve de la vigueur.

Enfin, derrière les « *massifs cristallins externes* », il ne reste des précipitations que pour les sommets : cette région est donc peu arrosée. Elle est froide en hiver, chaude en été, lumineuse en toute saison. La frontière italienne se distingue cependant, car elle est soumise à

des « retours d'Est » (cf. § I.1.3.3.3) qui apportent de temps en temps de l'humidité de la plaine du Pô, sous forme de précipitations localement intenses.

### I.1.3.2. Alpes du Sud : une influence méditerranéenne décroissante

Les Alpes du Sud sont caractérisées par un ensoleillement abondant, une humidité modérée, ce qui les oppose aux Alpes du Nord. L'influence méditerranéenne se reconnaît à la sécheresse d'été et, même atténué, à un maximum pluvial automnal très marqué.

Le climat méditerranéen (déséquilibre saisonnier entre un été très sec et un automne très arrosé) intéresse le Sud et la vallée de la Durance, jusqu'à Sisteron.

Plus au Nord, le climat méditerranéen de transition conserve des traits méditerranéens : faible pluviosité totale, faible nombre de jours de pluie, violence des averses, ensoleillement important, vents du Nord fréquents. Cependant l'effet thermique de la Méditerranée s'atténue de plus en plus en allant vers le Nord : les hivers deviennent plus froids et les étés plus chauds.

### I.1.3.3. Vents alpins

RHAM (1928) a établi un inventaire des vents rencontrés dans les Alpes françaises. Ces vents peuvent être séparés en deux groupes : les vents que l'on observe par beau temps (*bise et mistral*) et ceux qui sont associés à la pluie. Ces derniers sont plutôt le *vent du Midi*, le *marin*, la *traverse*, le *labech* et la *Lombarde*.

#### I.1.3.3.1. Bise et mistral

La *bise* peut être considérée comme un vent caractéristique des Alpes françaises (sauf à la frontière où pénètrent les influences italiennes, cf. § I.1.3.3.3). Ce vent du Nord touche une grande partie des Alpes : depuis les Bauges, jusqu'à la latitude de Sisteron, où elle cède la place au mistral. Ses caractéristiques sont la violence, la sécheresse et une température basse.

Le *mistral* est, en fait, la bise de Provence (bien que ces deux vents ne soufflent pas forcément simultanément). Au centre des Alpes, c'est un vent du Nord. Vers la Côte méditerranéenne, sa direction s'infléchit vers l'Est.

#### I.1.3.3.2. Vent du Midi, marin, traverse et labech

Le *vent du Midi* et le *marin* sont les opposés respectifs des 2 précédents. Ainsi, le *vent du midi* souffle du Sud ou du Sud-Ouest, alors que le *marin* souffle du Sud-Est. Tous deux sont fréquemment associés à la pluie, mais pas nécessairement. Par exemple, sur la Côte d'Azur, le *marin* souffle même plus souvent par beau temps que par ciel couvert.

La *traverse* est un vent d'Ouest dans les Alpes du Nord. Le *labech* est le vent qui lui correspond dans les Alpes du Sud. L'un et l'autre peuvent être associés aux pluies torrentielles, mais de courte durée, aux orages, parfois à la grêle. Ainsi, ils sont par excellence les vents de grains.

#### I.1.3.3.3. Lombarde

La *Lombarde* est un terme qui désigne les vents issus des régions Est. C'est un vent « redouté » car il s'accompagne de précipitations très importantes. On parle « d'épisodes de Lombarde » ou de « retours d'Est ». La zone alors touchée est assez limitée en France, puisqu'elle concerne le versant oriental de la chaîne des Alpes franco-italiennes (hautes vallées de l'Isère, de l'Arc et de la Durance). Par exemple, « *les très fortes pluies sur le Mont Cenis (Est de la Savoie) sont souvent associées à des courants d'Est ou de Sud-Est, à des fronts qui effleurent juste l'Est des Alpes françaises* » (RONCHAIL et al., 1981).

L'explication de ce phénomène est simple : l'air provenant de latitudes relativement méridionales, à une température assez élevée, se charge en vapeur d'eau lors de son passage au-dessus de la Méditerranée. Il arrive sur les versants italiens des Alpes saturé sur de grandes épaisseurs. Ensuite, le caractère abrupt du versant italien oblige cet air chaud et humide à une ascendance violente au cours de laquelle des phénomènes orageux accompagnés de précipitations orographiques abondantes ont lieu dans les hautes vallées, ainsi que sur les

crêtes frontalières. Alors, des débordements pluvieux localisés se produisent dans les hautes vallées du versant français, tandis qu'un temps à caractère de föhn<sup>1</sup> s'établit sur les régions plus éloignées des crêtes.

GRARD et al. (1968) ont étudié les « épisodes de Lombarde ». Une vingtaine ont été comptabilisés de 1960 à 1964, en général au printemps ou à l'automne. L'étude montre que les fortes précipitations liées aux averses importantes d'Italie tombent sur des zones bien déterminées qui sont :

- le bassin de l'Isère en amont de Val d'Isère,
- la rive gauche de l'Arc en amont de Modane,
- le bassin du Guil en amont d'Abriès.

Après avoir décrit de manière assez simplifiée le climat et les vents alpins, nous nous intéressons aux aspects de la pluviométrie.

#### 1.1.4. La pluviométrie des Alpes françaises

Différentes études ont porté sur la pluviométrie des Alpes françaises (FREI et al., 1997 ; BENEVENT, 1926 ; CEMAGREF LAMP, 1996 ; DOUGUEDROIT, 1987 ; CHASSAGNEUX et al., 1992 ; BLANCHET, 1993 ; CHAMPEAUX et al., 1995 ; ...). A partir de celles-ci, nous décrivons de manière simplifiée les grandes caractéristiques des précipitations annuelles et mensuelles. Cependant, cette description omet totalement les variations locales.

<sup>1</sup> Effet de föhn (TRIPLET et al., 1986) :

L'ascendance au flanc au vent des reliefs entraîne une détente adiabatique qui, si l'air est suffisamment humide, va donner lieu à condensation, matérialisée par des nuages d'aspect divers. Si l'on suppose qu'une partie de l'eau condensée au cours de l'ascendance précipite au vent de la montagne, l'air en redescendant sous le vent, se dessaturera rapidement. On peut alors observer de belles éclaircies sous le vent du relief ainsi qu'un assèchement de l'air et un réchauffement notables.

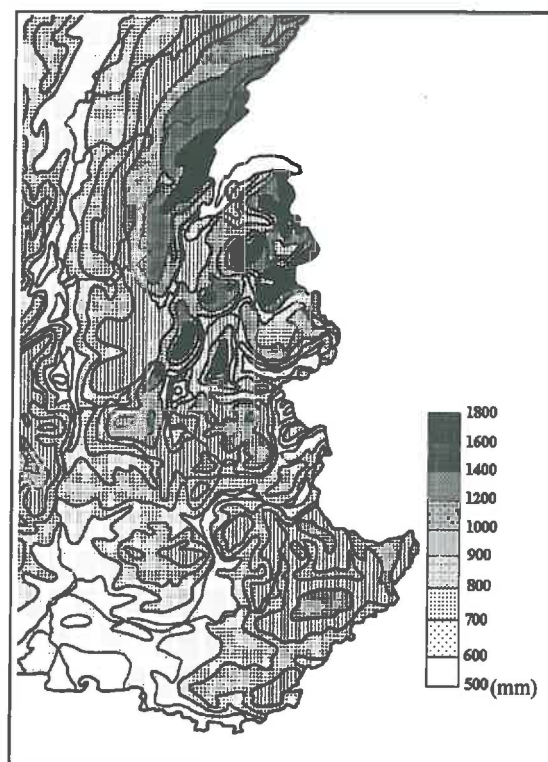
L'effet de föhn s'observe sous le vent de tous les massifs montagneux.



#### I.1.4.1. Précipitations annuelles

A partir de 6600 stations de mesure de pluie à 24 h (période 1971-1990), FREI et al. (1997) ont établi une climatologie des Alpes dans leur ensemble, de la France à l'Autriche. Cette étude est globale et ne permet de montrer que les grands traits des précipitations moyennes annuelles. Ainsi, ces précipitations augmentent d'abord lorsque l'on pénètre dans le massif, et un effet d'abri dans les vallées intérieures a été mis en évidence. Dans les Alpes françaises, les zones les plus humides sont situées au Nord. Les valeurs des isohyètes diminuent ensuite vers la Méditerranée, vers le Rhône (où les valeurs les plus faibles de cette analyse ont été enregistrées) et vers la frontière italienne.

L'étude de BENEVENT (1926) est plus détaillée et s'attache uniquement aux Alpes françaises. Elle met en évidence le contraste Nord Sud déjà cité : le Nord est très humide alors que le Sud est beaucoup plus sec. D'autre part, il y a un contraste entre les régions extérieures aux Alpes et les massifs alpestres (cf. Figure I 3).



*Figure I 3 : Précipitations moyennes annuelles sur les Alpes françaises (extrait des « Précipitations en France », Direction de la Météorologie Nationale (1988))*

*I.1.4.1.1. Alpes du Nord*

Dans les Alpes du Nord, les Préalpes sont la zone la plus humide, car elles sont les premières touchées par les nuages arrivant généralement du secteur Ouest (CEMAGREF LAMP, 1996). Ainsi, les massifs du Chablais, des Bornes, des Aravis, des Bauges, de la Chartreuse et du Vercors reçoivent de 1500 à 1800 mm de pluie selon l'altitude et l'exposition (plus de 2000 mm en Chartreuse). Le massif de la Chartreuse est le plus arrosé, le Vercors méridional l'est beaucoup moins.

La pluviosité décroît graduellement de l'Ouest à l'Est à mesure qu'on pénètre plus avant dans les massifs intérieurs. Par exemple, en Tarentaise ou en Vanoise, les totaux n'atteignent que 900 mm environ.

Le minimum pour les Alpes du Nord se situe dans la région de la Maurienne (entre 750 et 1000 mm), tandis que le maximum se situe au Mont Blanc. En effet, au voisinage de la frontière italienne, deux éléments sont en jeu : l'effet d'abri contre les influences de l'Ouest devient très important (Maurienne, Briançonnais), et l'action de la Lombarde accroît l'humidité des chaînes-frontières (BENEVENT, 1926).

Par ailleurs, chaque vallée offre, suivant sa forme, sa direction et sa dimension, des conditions différentes aux courants humides. Ainsi, les précipitations sont importantes dans les grandes cluses qui découpent les Préalpes en massifs, et faibles pour les hautes vallées.

Enfin, il faut noter que, pour un massif pris isolément, c'est le versant tourné vers la direction des nuages qui reçoit la plus grande quantité d'eau (DOUGUEDROIT, 1987).

Des cartes des déciles inférieurs, supérieurs et de la médiane des précipitations annuelles ont été tracées par BLANCHET (1993) pour la région Rhône Alpes. Elles sont basées sur l'étude d'environ 200 postes pluviométriques pour la période 1946-1975. Celles-ci confirment pour cette zone les observations de BENEVENT (1926).

#### I.1.4.1.2.Alpes du Sud

Dans cette partie, le relief entraîne une complexité de la répartition des précipitations, mais il atténue les effets de l'orientation, puisqu'il n'y a plus de vallées aussi marquées.

Dans les parties déprimées, le phénomène de la pluviosité est surtout fonction du voisinage plus ou moins immédiat de la mer et de l'orientation du lieu par rapport à la direction des vents humides dont le plus important est celui du Sud-Est.

En fait cette région est divisée en trois parties à pluviométrie différente : il y a deux régions de pluies abondantes situées de part et d'autre d'une zone moins favorisée correspondant à la voie de la Durance.

#### I.1.4.2.Précipitations mensuelles et régimes pluviométriques

On peut distinguer trois types de régimes pluviométriques à partir de moyennes mensuelles faites sur la période 1881-1910 (BENEVENT, 1926). Ces régimes pluviométriques sont définis à partir des maxima et des minima pluvieux :

- *zone méditerranéenne (Alpes du Sud) : maximum d'automne et minimum d'été*
- *zone de centre-Est (Alpes du Nord sauf la partie Nord-Est) : maxima de printemps et d'automne*
- *zone continentale (Nord-Est des Alpes du Nord, région soumise à la Lombarde) : maxima d'été et d'hiver.*

BALSEINTE (1957), sur la base de mesures de précipitations plus exactes (données de 1935 à 1950), affirme que l'hiver est la saison à pluviosité maximale pour les départements de Haute Savoie, Savoie et Isère. Cela n'était pas évident pour BENEVENT (1926), au vu des mesures dont il disposait (certainement mauvaises en hiver par temps de neige).

Enfin, RONCHAIL (1981) retrouve ces zones par des techniques d'analyse factorielle appliquées aux précipitations et aux températures journalières. Les 2 régions opposées, méditerranéenne et continentale, sont bien définies. Au contraire, la région centre-Est

s'individualise surtout par situation de Lombardie. Pour d'autres situations, elle peut se rattacher au Nord ou au Sud.

La Figure I 4 donne quelques exemples d'histogrammes de l'évolution des précipitations moyennes mensuelles au cours de l'année. Pour ces villes, situées relativement loin de la Méditerranée, il n'y a pas de saison sèche. D'autre part, les pluies se répartissent assez bien tout au long de l'année. Cependant certaines saisons se distinguent comme étant celles de plus grande ou de plus faible pluviosité.

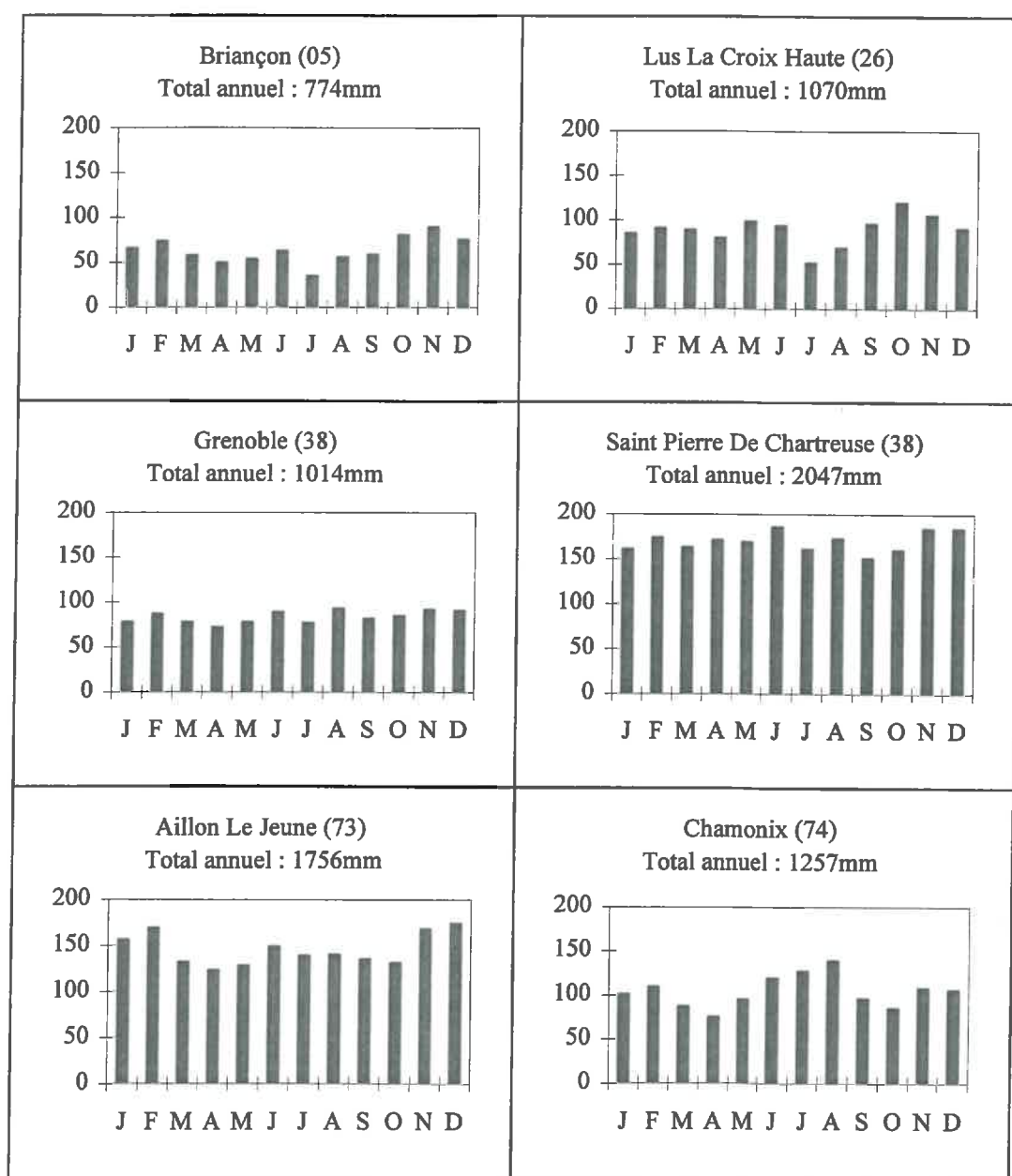


Figure I 4 : Quelques exemples de répartition des précipitations moyennes mensuelles (valeurs en mm) - période 1951-1980 (source : BLANCHET, 1990)

### **I.1.5. Différents types de systèmes précipitants**

Quatre grands types de systèmes précipitants peuvent être mis en évidence (NEPPEL, 1997).

#### ① Les *systèmes frontaux*, de grande échelle :

Les situations frontales se produisent lorsque deux masses d'air de température différentes entrent en contact. La trace au sol de la frontière entre les deux masses d'air est appelée front. On distingue deux types de front : les fronts froids provoqués par l'avancée d'une masse d'air froid qui soulève l'air chaud et les fronts chauds occasionnés par un déplacement de l'air chaud au dessus de l'air froid dans la même direction.

Les fronts froids sont en général des bandes pluvieuses étroites, de quelques kilomètres de largeur et de quelques centaines de kilomètres de longueur. Ils peuvent engendrer de fortes intensités.

Les fronts chauds sont plutôt des bandes pluvieuses larges, de quelques dizaines de kilomètres de largeur et de quelques centaines de kilomètres de longueur, qui n'engendrent en général que de faibles intensités.

#### ② Les *systèmes convectifs* :

Ce sont les cellules convectives de quelques km<sup>2</sup> (orages, lignes de grains). Le développement de ces cellules est local et leur durée de vie est généralement inférieure à l'heure, alors que celle du système auquel elles appartiennent peut avoir une durée de vie de plusieurs heures. Leur déplacement est fonction du vent en altitude. Les systèmes convectifs donnent en général les intensités les plus fortes sur des pas de temps courts (de quelques minutes à l'heure).

Les situations convectives se produisent lorsque deux masses d'air de température différentes se superposent, notamment quand une masse d'air froid évolue au dessus d'une couche d'air réchauffée par le sol. Un flux de chaleur s'établit du sol vers l'atmosphère parfois très rapide (10 m/s). L'instabilité thermique est à l'origine d'ascendance donnant naissance aux cellules convectives.

③ Les systèmes mixtes :

Ce sont les plus répandus. Il s'agit de cellules convectives imbriquées dans des systèmes frontaux à grande échelle. Le déplacement des cellules est généralement différent du système frontal.

④ Les situations orographiques :

Elles se produisent lorsque des masses d'air humide s'élèvent sous l'effet du relief et des vents. Il en résulte un refroidissement de ces masses d'air, qui selon leurs caractéristiques et le profil thermique vertical peut conduire à une instabilité en air saturé ou instabilité convective. Ce dernier cas est le plus fréquent dans le déclenchement des précipitations en zone de montagne.

**I.1.6. Types de temps dans les Alpes françaises**

Différentes classifications des types de temps ont été établies pour les Alpes. Cependant, dans chaque étude, le domaine considéré est différent, et finalement aucune ne porte uniquement sur les Alpes françaises.

SCHUEPP (1957) donne une classification pour l'ensemble des Alpes, mais qui ne s'appuie que sur des observations du mois de janvier.

D'autre part, MERTZ (1957) s'est intéressée à une partie très importante des Alpes : les Alpes françaises et les Alpes suisses.

Quant à la classification de CADEZ (1957), elle concerne le Sud-Est des Alpes (Bulgarie).

Et l'étude de BLANCHET (1990) ne prend en compte que l'espace Rhônalpin, soit la moitié de notre domaine d'étude.

Enfin, RONCHAIL et al. (1981) ont porté leurs efforts sur les Alpes internes.

Ces différentes classifications mettent en évidence les situations météorologiques propices à des pluies sur les Alpes. Nous allons nous appuyer sur l'étude de MERTZ (1957) qui concerne le domaine se rapprochant le plus de notre zone (i.e. à la fois le plus restreint possible et englobant les Alpes françaises dans leur totalité). Les conclusions formulées seront

ensuite confirmées et affinées grâce aux cas particuliers de la région Rhône Alpes (BLANCHET, 1990) et des Alpes internes françaises (RONCHAIL et al., 1981).

#### I.1.6.1. Classification des types de temps sur les Alpes

L'étude de MERTZ (1957) concerne les Alpes françaises mais aussi les Alpes suisses. Une classification des types de temps alpins est proposée, basée sur la période 1950-1952.

Le principe est d'utiliser la direction du flux à 500 hPa (approximativement à 5500 m) comme premier critère de classification des types de temps alpins, ce qui s'appuie sur les constatations suivantes :

- le tracé des isohypses (courbes d'égale altitude) en altitude conduit à des configurations isobariques de plus en plus simples au fur et à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère,
- le niveau 500 hPa est le premier niveau standard qui échappe aux multiples perturbations occasionnées par les accidents du relief,
- un flux serré en altitude, bien organisé et d'orientation appropriée est très fréquemment favorable à des précipitations importantes sur le relief terrestre.

Pour chaque journée, un régime de vent sur les Alpes au niveau 500 hPa est défini : c'est la direction des isohypses (direction parallèle aux isohypses) à 500 hPa donnée par la carte météorologique de 03h00 TU, dans les Alpes Bernoises (centre du massif alpin). Ce classement conduit à 9 régimes météorologiques : N, NW, W, SW, S, SE, E, NE et X (cas où la direction n'est pas déterminable).

De plus, la situation isobarique au niveau 500 hPa est analysée pour déterminer les centres d'action paraissant en jeu dans l'afflux des masses d'air sur la région des Alpes.

Enfin, les types de temps ont été classés en 3 catégories, sur la base des hauteurs d'eau de 22 stations des Alpes :

- *journées de fortes précipitations* (pour 2 stations au moins, la hauteur d'eau recueillie est supérieure ou égale à 10 mm/24 h, ce qui ne correspond pas forcément à des pluies intenses à notre sens),
- *journées de précipitations faibles ou nulles* (la moyenne des précipitations des stations est inférieure à 0.1 mm, ou une seule station a enregistré des précipitations),



- *journées de précipitations modérées* (tous les autres cas).

Ces définitions ont conduit aux conclusions résumées dans le Tableau I 1.

Les précipitations importantes sont principalement dues aux *régimes de Nord-Ouest, d'Ouest et de Sud-Ouest* (cf. Tableau I 1).

Le *régime de Nord-Ouest cyclonique* peut être dû :

- ① à des dépressions centrées sur l'Allemagne ou la Scandinavie,
- ② ou à un talweg avec fond sur le Sud de la France, l'Italie ou la Yougoslavie et s'ouvrant vers l'Europe septentrionale.

Le *régime d'Ouest cyclonique* est amené :

- ③ soit par un talweg sur l'Europe Occidentale s'ouvrant vers le Nord ou le Nord-Est,
- ④ soit par une dépression ou une zone dépressionnaire sur l'Europe septentrionale.

Enfin, le *régime de Sud-Ouest cyclonique* est commandé :

- ⑤ soit par des talwegs ouverts vers les îles britanniques et dont la branche orientale séjourne sur les Alpes,
- ⑥ soit par des dépressions sur le Nord-Ouest de l'Europe.

Ainsi, la majeure partie des précipitations se produit par *régime de Sud-Ouest*. En effet, dans ce cas, la progression des perturbations est ralentie voire momentanément bloquée par le relief, ce qui occasionne des pluies à la fois importantes et de longue durée sur la moitié occidentale du massif Alpin. Ce type de temps du *Sud-Ouest* concerne environ 31 % des jours (cf. Tableau I 1, statistiques sur une période assez courte malheureusement).

Ensuite, le *régime de Nord-Ouest* (19 % des jours) s'accompagne parfois de précipitations importantes intéressant surtout le Nord-Ouest des Alpes.

De même, le *régime d'Ouest* (18 % des jours) occasionne de fortes pluies sur les versants des Alpes exposés à l'Ouest.



|                                      | Période                                                                           | Régime                              | Pluviométrie                                                                              |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Régime de Nord</i><br>[10%]       | Surtout en hiver                                                                  | Plus fréquemment anticyclonique     | Précipitations plutôt faibles                                                             |
| <i>Régime de Nord-Ouest</i><br>[19%] | Toute l'année<br>Surtout de la mi-automne à la fin de l'hiver                     | Anticyclonique ou cyclonique        | A : pas de précipitations<br><b>C : parfois précipitations fortes dans le Nord-Ouest</b>  |
| <i>Régime d'Ouest</i><br>[18%]       | Toute l'année<br>Mais fréquence plus forte en avril, en été et en novembre        | Plus fréquemment anticyclonique     | <b>C : précipitations importantes sur les versants exposés au flux d'Ouest</b>            |
| <i>Régime de Sud-Ouest</i><br>[31%]  | Toute l'année avec une fréquence plus grande de la mi-printemps à la fin de l'été | Plus souvent cyclonique             | <b>Précipitations fortes et de longue durée sur la moitié occidentale du Massif Alpin</b> |
| <i>Régime de Sud</i><br>[6%]         | Fréquence maximale en mai                                                         | Anticyclonique ou cyclonique        | Précipitations maximales sur les versants Sud                                             |
| <i>Régime de Sud-Est</i><br>[3%]     | Rare                                                                              | Cyclonique                          | Précipitations modérées sur les versants Sud-Est                                          |
| <i>Régime d'Est</i><br>[3%]          | Hiver                                                                             | Anticyclonique ou cyclonique        | Froid et sec                                                                              |
| <i>Régime de Nord-Est</i><br>[8%]    |                                                                                   | Surtout anticyclonique              | A : froid et sec en hiver<br>C : précipitations modérées                                  |
| <i>Régime X</i> [3%]                 |                                                                                   | Col isobarique, marais barométrique | précipitations souvent négligeables, sauf évolution orageuse d'été                        |

*Tableau I 1 : Classification des types de temps alpins selon MERTZ (1957) (les pourcentages correspondent au nombre de jours observés pour chaque régime sur la période 1950-1952)*

*(A : anticyclonique, C : cyclonique)*

#### I.1.6.2. Classification des types de temps spécifique à l'espace Rhônalpin

La classification de BLANCHET (1990), plus récente que la précédente, est cependant limitée à la région Rhône Alpes, qui ne couvre que la moitié de notre domaine. Elle est basée

sur l'étude des cartes de surface (emplacement des centres dépressionnaires et des anticyclones) et des cartes d'altitude à 500 hPa. La période d'étude prise en compte est de 20 ans : de 1970 à 1989.

Cette classification nous permet de déterminer les régimes qui engendrent des précipitations dans le Nord de notre région d'étude. Ce sont principalement :

- les *régimes d'Ouest* : celui intéressant tout particulièrement la région Rhône Alpes est dû à la présence d'une dépression située sur les Iles Britanniques et d'un anticyclone à l'Ouest de la Péninsule Ibérique (cas ④ de la classification de MERTZ (1957)).  
17 % des précipitations à Lyon sont issues d'une telle situation (période 1970-1989).

- les *régimes de Sud-Ouest* : dans ce cas, un centre dépressionnaire est situé sur les Iles Britanniques et un anticyclone sur la Grèce et l'Italie (cas ⑥ de la classification de MERTZ (1957)).  
34 % des précipitations à Lyon résultent d'une telle configuration (période 1970-1989).

- les *régimes de Nord-Ouest* : la dépression est centrée sur l'Europe centrale et l'anticyclone se situe à l'Ouest de la Péninsule Ibérique (cas ① de la classification de MERTZ (1957)).  
Cette situation a engendré 7 % des précipitations entre 1970 et 1989.

Ainsi, les régimes qui engendrent des précipitations sur le Nord des Alpes étaient déjà mis en évidence par MERTZ (1957).

En particulier, nous avons relevé les pourcentages de précipitations par régime pour quelques stations des Alpes : Chamonix (Haute Savoie), Grenoble (Isère) et Embrun (Hautes Alpes) et les 2 années 1974 et 1987 (cf. Tableau I 2). Ces pourcentages confirment que ce sont les *régimes d'Ouest, de Sud-Ouest et de Nord-Ouest* qui engendrent en majorité les précipitations dans notre zone d'étude. Par exemple, 39 % des précipitations à Chamonix en 1974 se sont produites par *régime d'Ouest*, 26 % par *régime de Sud-Ouest* et 22 % par *régime de Nord-Ouest*.

Cependant, toutes les situations évoquées par MERTZ (1957) ne se trouvent pas dans la classification de l'espace Rhône-alpin. Cela s'explique par le fait que les domaines d'étude ne sont pas les mêmes, celui évoqué ici étant beaucoup plus restreint.

|                  | Année | Régime d'Ouest | Régime de Sud-Ouest | Régime de Nord-Ouest | Régime de Nord | Régime de Sud-Est | Régime de Sud |
|------------------|-------|----------------|---------------------|----------------------|----------------|-------------------|---------------|
| Chamonix<br>(74) | 1974  | 39.1           | 26.0                | 22.2                 | 4.9            | 2.8               | 0             |
|                  | 1987  | 37.0           | 12.6                | 17.9                 | 4.6            | 1.4               | 3.5           |
| Grenoble<br>(38) | 1974  | 27.2           | 34.4                | 25.4                 | 4.2            | 2.4               | 0             |
|                  | 1987  | 25.5           | 17.2                | 16.5                 | 8.8            | 0.3               | 8.5           |
| Embrun<br>(05)   | 1974  | 31             | 44.6                | 15.1                 | 1.4            | 4.1               | 0             |
|                  | 1987  | 28.5           | 20.2                | 3.4                  | 7.3            | 0.4               | 14.7          |

*Tableau I 2 : Pourcentages des précipitations par régime dans quelques stations du Nord des Alpes pour les années 1974 et 1987, par exemple (source : BLANCHET, 1990)*

### I.1.6.3.Alpes internes françaises : l'exemple de Briançon (05)

Cette dernière classification (RONCHAIL et al., 1981) est spécifique aux Alpes internes françaises. Elle s'appuie sur 6 groupes d'information et sur la période juillet 1976-novembre 1978 :

- la situation générale au sol (à 0 h et 12 h, indication du caractère perturbé ou non des masses d'air),
- la situation à 500 hPa,
- le flux « local » au sol (secteur central des Alpes françaises), à 0 h et 12 h,
- le flux « régional » à 850 hPa (moitié Sud de la France).

Des résultats détaillés pour la ville de Briançon sont fournis.

L'absence de précipitations est liée dans la majorité des cas à un anticyclone au sol, un vent nul ou de secteur Nord-Est au sol, de Nord ou Nord-Est à 850 hPa. Mais une dépression au sol peut ne pas donner de précipitations.

Les *journées pluvieuses* sont au moins passagèrement soumises à l'influence d'une dépression au sol. Le flux à 850 hPa est le plus souvent de secteur *Ouest* en hiver ou de secteur *Sud Sud-Ouest* en été, quant il n'est pas nul.

Les *journées de fortes précipitations* (supérieure à 10 mm, donc pas forcément très forte à notre sens) se distinguent de l'ensemble par l'orientation du courant local, principalement de *Sud* ou *Sud-Ouest*, et surtout par la prépondérance, écrasante en été, des flux de *Sud-Ouest* (versant Est de vallée) à 500 hPa.

Ces résultats rejoignent les conclusions de MERTZ (1957) et BLANCHET (1990), à savoir que les précipitations se produisent en général par régime *d'Ouest ou de Sud-Ouest et les régimes de Sud*.

Cependant, dans la région de Briançon, les régimes de *Nord* ou de *Nord-Ouest* ne s'accompagnent pas de précipitations en général, ce qui s'explique par un effet d'abri dans les Alpes internes.

#### I.1.6.4. Conclusion : division climatologique

En résumé, les différents auteurs mettent en évidence le fait que la majeure partie des précipitations se produit par régime de *Sud* à *Sud-Ouest*, de *Nord-Ouest* ou *d'Ouest cycloniques* dans les Alpes françaises.

De plus, l'étude des précipitations journalières dans une dizaine de stations des Alpes internes (1951-1970) permet de retrouver la division climatologique des Alpes établie par BENEVENT (1926) sur la base des précipitations mensuelles (cf. §I.1.4.2). La situation engendrant des précipitations est particulière à chaque région (RONCHAIL et al., 1981) :

- pour les *précipitations méridionales*, la situation générale au sol est perturbée *d'Ouest* de *Sud-Ouest* ou de *Sud*,
- pour les *journées à fortes précipitations septentrionales*, on dénombre majoritairement des situations dépressionnaires de *Nord* ou *Nord-Ouest*, qui affectent donc en priorité le Nord des Alpes,

Les très fortes précipitations sur l'Est des Alpes sont souvent associées à des courants au sol d'Est ou de Sud-Est et à des fronts qui n'affectent qu'une étroite bande frontalière, notamment au voisinage de cols.

### I.1.7. Exemples d'épisodes de fortes intensités à Grenoble (Campus de Saint Martin d'Hères)

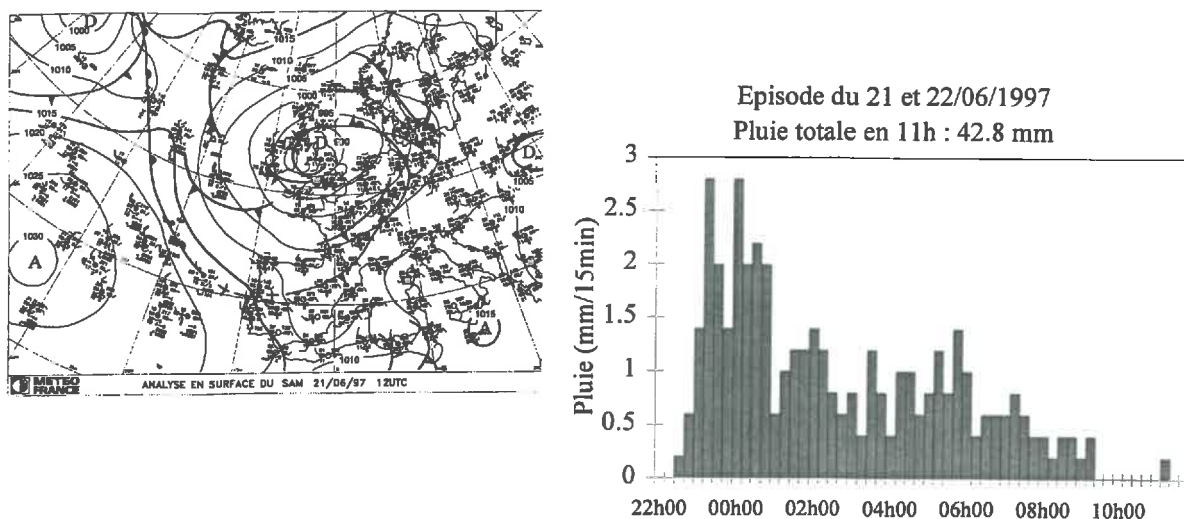
Pour conclure cette partie, nous allons donner quelques exemples concrets d'épisodes, en décrivant la situation synoptique associée. Les épisodes choisis ont fourni des totaux pluvieux importants, et sont donc particulièrement intéressants pour notre étude.

Nous disposons, à Saint Martin d'Hères, de données de pluies au pas de temps du ¼ d'heure pour les années 1996 et 1997. Nous avons repéré des épisodes d'intensité importante pour ces 2 années. L'étude de cartes de surface et d'altitude à 500 hPa nous a permis de déterminer les situations générales correspondant à ces épisodes (communication personnelle avec M. THILLET, Météo France, Grenoble). Nous donnons ici des exemples illustrant quelques régimes que l'on peut trouver dans les Alpes et qui ont conduit à des totaux importants à Saint Martin d'Hères.

#### I.1.7.1. Exemples d'épisodes associés à des fronts froids

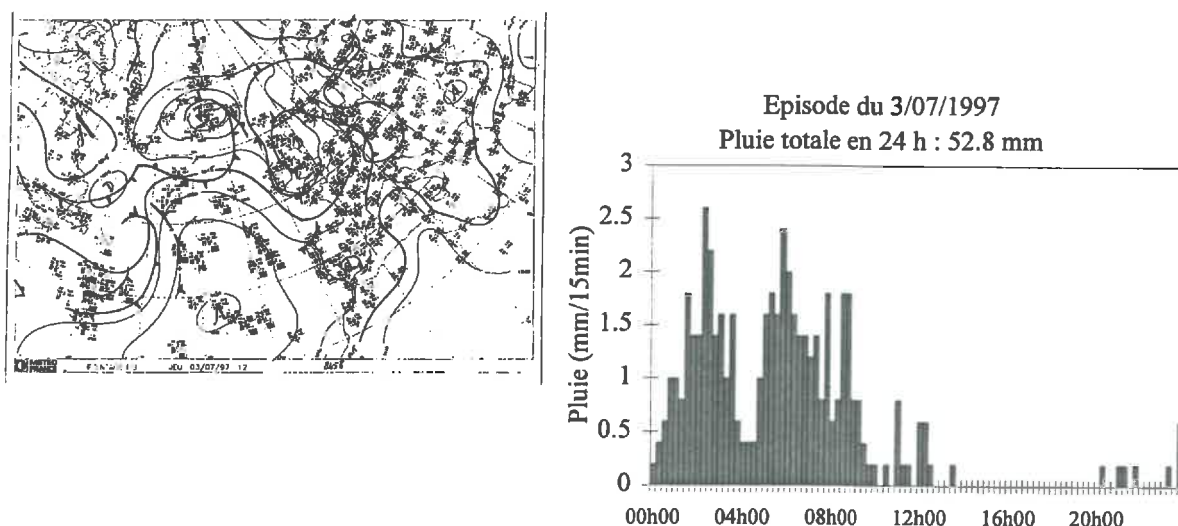
Les totaux pluvieux des épisodes du 21 et 22/06/1997 et du 3/07/1997 sont assez importants : 42.8 mm en 11 h pour le premier et 52.8 mm en 24 h pour le deuxième (cf. Figure I 5 et Figure I 6). Ils sont associés à des fronts froids.

- Les 21 et 22/06/1997, on observe un front froid progressant par le Nord-Ouest, accompagné de vents du Sud-Ouest (de l'ordre de 120 km/h à 500 hPa). Cette situation est accompagnée d'une dépression sur les Iles britanniques.



*Figure I 5 : Carte de la situation au sol et hyétogramme (Campus de Saint Martin d'Hères) des précipitations pour l'épisode du 21 et 22/06/1997*

- Le 3/07/1997, les précipitations importantes résultent d'un front froid ondulant venant de l'Ouest précédé et accompagné de vents forts du Sud-Ouest (80 km/h à 500 hPa). Une dépression est sur les Iles britanniques, annotée de pulsations pluvieuses associées au passage de deux ondulations successives du front.

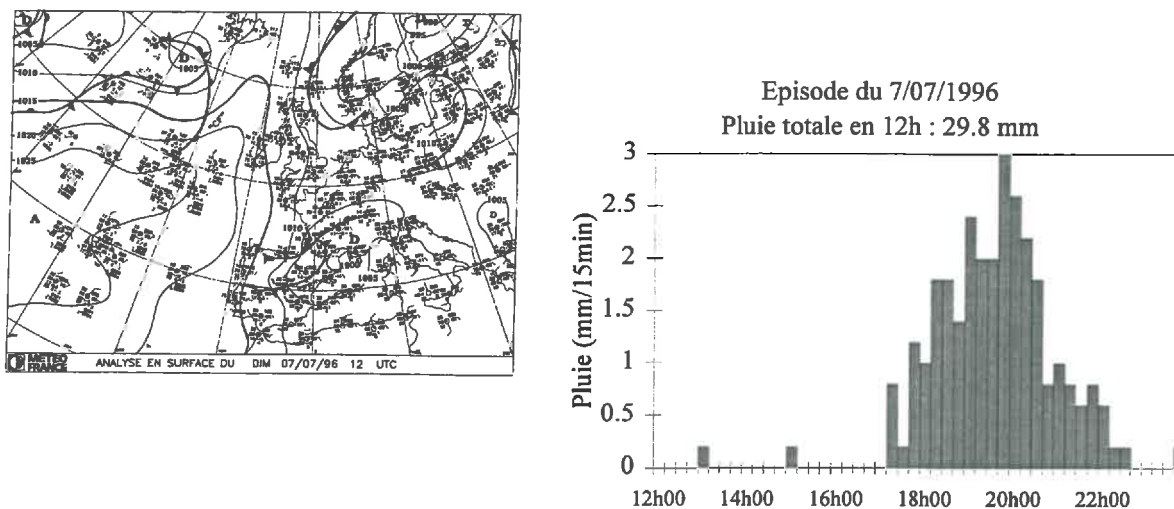


*Figure I 6 : Carte de la situation au sol et hyétogramme (Campus de Saint Martin d'Hères) des précipitations pour l'épisode du 3/07/1997*

### I.1.7.2.Exemple d'épisode associé à un front chaud, un front froid et un front occlus (7/07/1996)

Le 7/07/1996, 29.8 mm de pluie ont été enregistrés à Saint Martin d'Hères en 12 h (cf. Figure I 7).

Dans ce cas, un talweg (à 500 hPa) allant des Iles britanniques au Sud de l'Espagne est très accentué et très marqué. La perturbation (combinaison d'un front chaud, d'un front froid et d'un front occlus (fusion d'un front froid et d'un front chaud)) est située sur le Sud-Est de la France, et contourne le talweg par le Sud. Ce système est précédé et accompagné de vents de Sud-Ouest (à 500 hPa) allant de 80 à 100 km/h.

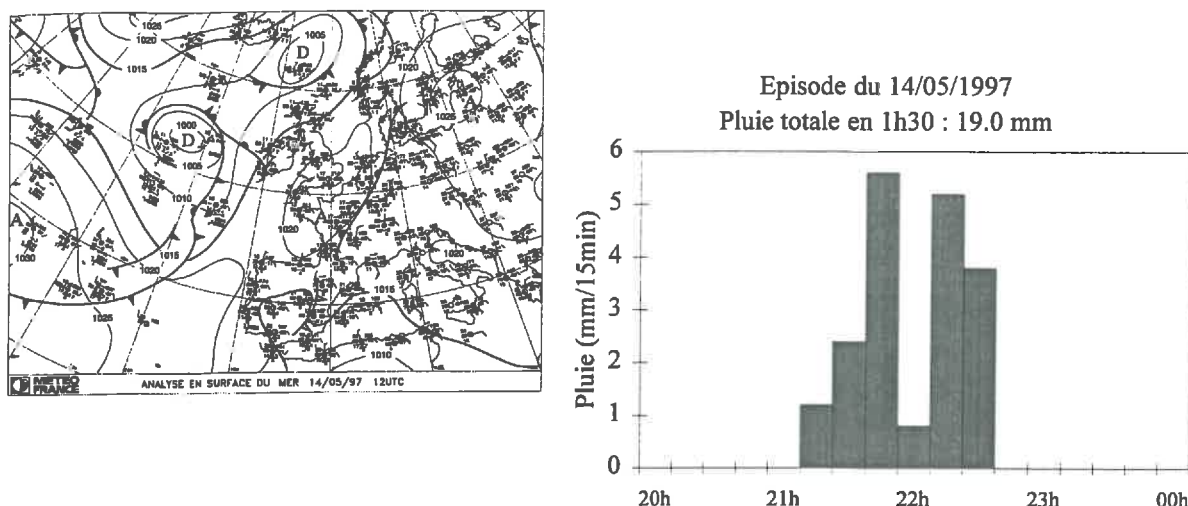


*Figure I 7 : Carte de la situation au sol et hyétogramme (Campus de Saint Martin d'Hères) des précipitations pour l'épisode du 7/07/1996*

### I.1.7.3.Exemple d'épisode de type convectif (14/05/1997)

Ce dernier exemple est celui d'un système convectif. Le 14/05/1997, 19.0 mm sont tombés en 1h30, à Saint Martin d'Hères entre 21h et 22h30 (cf. Figure I 8). Cet orage se place dans un flux général de *Sud-Ouest* instable (90 km/h à 500 hPa). L'intensité maximale horaire atteinte dans ce cas est de 15.4 mm/h.





*Figure I 8 : Carte de la situation au sol et hyétogramme (Campus de Saint Martin d'Hères) des précipitations pour l'épisode du 14/05/1997*

## **I.2.Réseaux de stations utilisés dans l'étude : pluviographes et pluviomètres**

Dans notre étude, nous avons utilisé des pluviographes (appareils de mesure à pas de temps fin) et des pluviomètres (appareils de mesure au pas de temps de la journée). Seuls 90 pluviographes ont été recensés pour la région, alors que les pluviomètres sont beaucoup plus nombreux : nous en avons comptabilisé 463. Ainsi, pour le pas de temps de 24 h, nous avons une information beaucoup plus dense, ce qui nous permettra de tracer des cartes de pluies extrêmes plus exactes qu'avec seulement 90 postes.

Après une rapide description des différents types d'appareils de mesure de pluie, nous passerons en revue les erreurs de mesure possibles. Ensuite, nous nous intéresserons aux réseaux de pluviographes et de pluviomètres utilisés dans l'étude et surtout aux données de pluies disponibles.



### **I.2.1. Appareils de mesure des précipitations**

Il existe 3 types d'appareils de mesure des précipitations au sol : *les pluviomètres non enregistreurs*, *les pluviographes* et *les pluviomètres totalisateurs*.

Les *pluviomètres non enregistreurs* mesurent la quantité de précipitations tombée **en 24 h**. Chaque matin, un agent relève la quantité dans un seau ou sur une éprouvette graduée. Cette valeur est affectée au jour précédent.

Les *pluviographes* ou *pluviomètres enregistreurs* permettent de connaître la quantité de précipitations tombée pour des pas de temps courts : allant de **la minute à l'heure**. Ces appareils sont munis d'un stylet qui trace, sur un diagramme, la courbe des précipitations cumulées en fonction du temps. Ce stylet est relié soit à des augets, soit à un siphon qui envoie une impulsion lorsque l'eau recueillie atteint une certaine limite (généralement 0.2 mm). Une tendance actuelle est de remplacer l'enregistrement sur papier par des appareils électroniques qui comptent soit le nombre de basculements par pas de temps, soit qui enregistrent l'instant de basculement.

Enfin, les *pluviomètres totalisateurs* sont des appareils capables de contenir le cumul des pluies sur **un mois**, voire **une année**. Ce type de poste n'a pas été utilisé dans cette étude.

### **I.2.2. Erreurs de mesure des précipitations**

La quantité d'eau recueillie par un pluviomètre ou un pluviographe pendant un intervalle de temps est liée à la pluie moyenne pendant ce même intervalle de temps. Différents travaux (ADKIZIAN-GERARD, 1994 ; JACQ, 1994 GRUNOW, 1957 ; SCHNEIDER-CARIUS, 1957) permettent de dresser une liste non exhaustive des différents types d'erreur. Nous pouvons distinguer 4 grandes catégories d'erreurs, dues :

- à l'environnement de l'appareil :
  - mauvaise implantation de l'appareil,
  - influence du vent sur le pouvoir de captation (la présence de l'appareil modifie le flux de précipitations en créant des turbulences, ce qui conduit à une légère sous-estimation des intensités de pluie).

- à l'appareil :
  - mise en charge de l'eau dans le cône suite à l'obturation totale ou partielle du conduit d'écoulement,
  - pertes dues au sur-remplissage des augets lors des pluies intenses,
  - débordement du pluviomètre au cours d'un épisode,
  - stockage d'eau dû à une vidange incomplète,
  - pertes par mouillage (erreur de 2 à 10%).
- à l'enregistrement des mesures :
  - mauvais comptage des basculements,
  - décalage de la base de temps,
  - pertes d'information.
- aux erreurs de lecture.

D'autre part, une quantité d'eau non négligeable n'a pas été mesurée dans les cas suivants :

- pluviomètre sans système de chauffage et situé dans une limite pluie - neige,
- pluviomètre emporté au cours de l'événement.

Enfin, JACQ (1994) rappelle la disparité dans le passé des équipements avec lesquels les précipitations ont été mesurées. Cela est important dans notre étude, puisque le calcul des pluies extrêmes en un point nécessite de connaître les précipitations sur des périodes longues (au moins 10 ans).

### **I.2.3. Le réseau de pluviographes**

Un nombre assez important de pluviographes est actuellement en service sur les Alpes françaises : environ 150 appareils. Cependant ces postes sont souvent récents et ne peuvent être utilisés pour le calcul des pluies extrêmes.

Pour notre étude, nous avons sélectionné les pluviographes ayant fonctionné au moins 10 ans au 1<sup>er</sup> janvier 1996 (un nombre d'années d'observations plus grand aurait été trop limitant). Ce critère nous a conduit à recenser 90 pluviographes (pour une seule station, nous

ne disposons que de 8 ans). 65 d'entre eux avaient déjà été dépouillés dans le cadre du X<sup>e</sup> plan Etat Région (EDF DTG-CEMAGREF, 1995).

Ce réseau est essentiellement constitué de stations gérées par :

- EDF (Electricité de France),
- Météo France,
- SRAE (Service Régional d'Aménagement des Eaux),
- CEMAGREF (Etablissement public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement anciennement Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts),
- et DDAF (Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt).

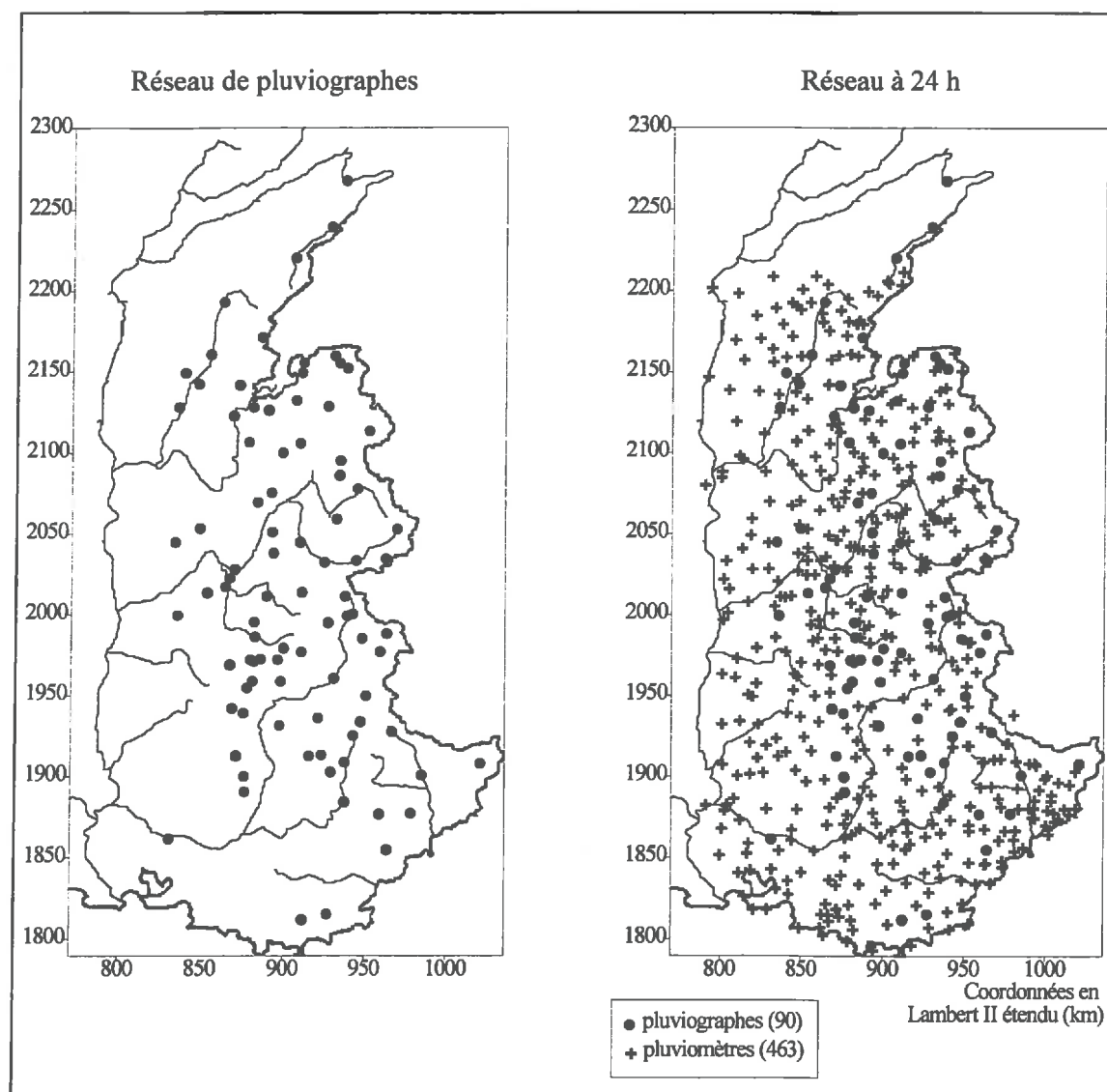
**Pour chacun de ces postes, nous ne disposons que de maxima hebdomadaires pour 6 pas de temps (1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h et 24 h).** La manière dont a été effectué le dépouillement est décrite au § I.2.4.

La densité de ce réseau est assez élevée au centre du domaine (cf. Figure I 9). Au Nord et au Sud, le manque de stations laisse présager des résultats assez mauvais. Cependant, la région couverte est d'une surface de plus de 100 000 km<sup>2</sup>. Ceci correspond donc, en moyenne, à un poste tous les 1100 km<sup>2</sup>, donc quasiment un pluviographe tous les 33 km dans toutes les directions. Ainsi, toute influence spatiale se manifestant à une distance moindre ne pourra être mise en évidence.

Ces capteurs sont généralement implantés à proximité, voire dans les villages, d'où évidemment une faible densité en altitude. Ainsi, un histogramme de répartition des stations en fonction de leur altitude (cf. Figure I 10), montre que la plupart des stations sont situées entre 500 et 1250 m d'altitude, ce qui ne traduit pas la répartition réelle des altitudes sur les Alpes. Cependant, la gamme d'altitudes couverte va de 75 m à 2010 m.

D'autre part, les durées de données disponibles varient entre 8 et 42 ans (cf. Figure I 11). De plus, les périodes d'observation ne sont pas identiques pour tous les postes, cette contrainte étant trop grande pour la sélection.

La liste des 90 stations est fournie en annexe 1, avec leur localisation, leur altitude, la durée et la période de données connue. Pour ces postes, les coordonnées -en Lambert II étendu-, ainsi que les latitudes et les longitudes ont été vérifiées à la main sur des cartes IGN à l'échelle 1/25000.



*Figure I 9 : Cartes de localisation des 90 pluviographes et des 463 pluviomètres*

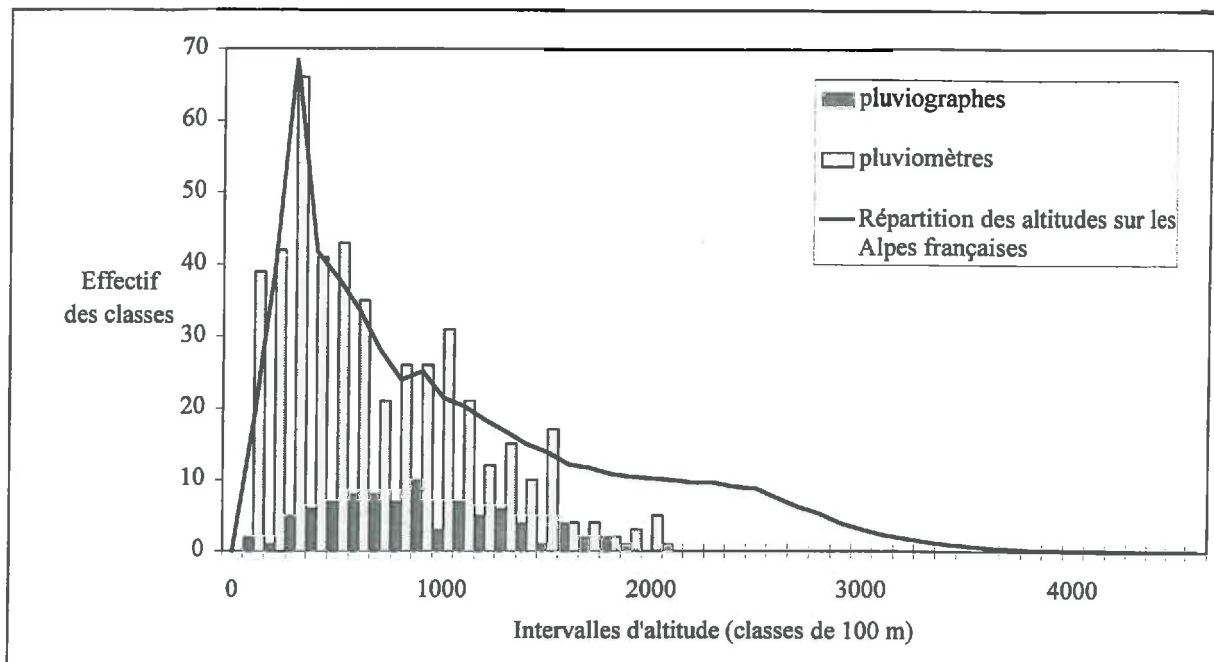


Figure I 10 : Histogramme de répartition des stations en fonction de leur altitude pour les pluviographes et les pluviomètres (classes de 100 m)

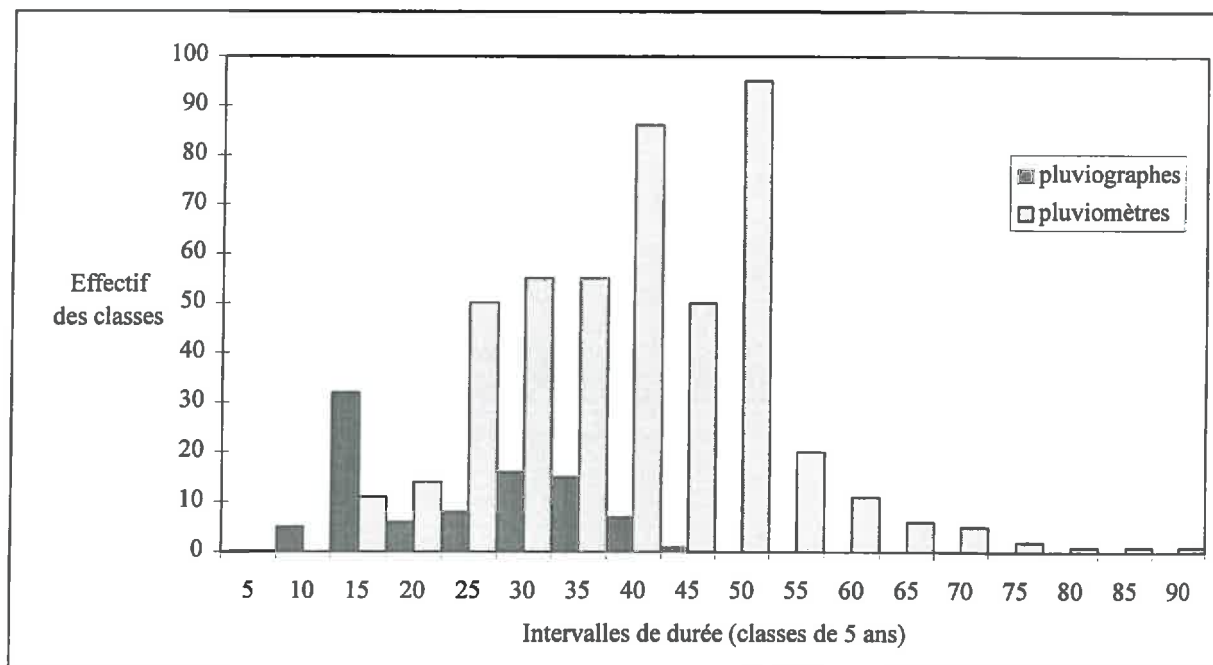


Figure I 11 : Histogramme de répartition des stations en fonction des durées d'observation disponibles pour les pluviographes et les pluviomètres

#### **I.2.4. Le réseau de pluviomètres**

Les pluviomètres sont beaucoup plus nombreux que les pluviographes. En effet, ces appareils sont moins coûteux car moins sophistiqués, et surtout, ils sont plus anciens.

Nous avons recensé 463 pluviomètres dont la durée de données disponible est supérieure ou égale à 10 ans au 1<sup>er</sup> janvier 1996. Ces données nous ont été fournies par EDF (115 appareils) et par la « banque pluvio » mise en place par Météo France en 1996 (348 appareils). Cette dernière recense les données pluviométriques pour un maximum de réseaux métropolitains dont les stations sont actuellement en service ou ont déjà été arrêtées.

**Pour ces 463 stations de mesure, nous disposons des maxima mensuels de pluie journalière (pluie de 8 h à 8 h, en général).** Pour les pluviomètres Météo France et pour chaque valeur de maximum mensuel, la date à laquelle est arrivée cette valeur de pluie est connue.

La densité du réseau à 24 h (constitué par 553 pluviographes et pluviomètres), est beaucoup plus élevée que celle pour les pas de temps inférieurs (cf. Figure I 9). Pour la région (d'environ 100 000 km<sup>2</sup>), cela correspond à un poste tous les 180 km<sup>2</sup>, donc quasiment un poste tous les 13 km dans toutes les directions.

Dans ce cas, la répartition des stations en fonction de leur altitude est plus proche de celle des Alpes (cf. Figure I 10). Cependant, les hautes altitudes ne sont pas instrumentées. D'autre part, les durées d'observation disponibles varient entre 11 et 87 ans (cf. Figure I 11).

Les principales caractéristiques des stations : coordonnées, altitude, durée des données disponibles et période, sont fournies en annexe 2.

#### **I.2.5. Dépouillement et correction de WEISS**

Dans le cadre du X<sup>e</sup> plan Etat Région (EDF DTG-CEMAGREF, 1995), les enregistrements pluviographiques de 65 appareils ont été dépouillés par séquence d'une

semaine en extrayant, pour chaque semaine, les pluies maximales en 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h et 24 h. Ces pluies maximales hebdomadaires ont été dépouillées sur la base d'un découpage fixe, à savoir :

- 0-24 h pour les pluies en 24 h,
- 0-12 h et 12-24 h pour les pluies en 12 h,
- 0-6 h, 6-12 h, 12-18 h, 18-24 h pour les pluies en 6 h,
- 0-3 h, 3-6 h, 6-12 h, ..., 21-24 h pour les pluies en 3 h,
- 0-2 h, 2-4 h, 4-6 h, ..., 22-24 h pour les pluies en 2 h,
- les pluies en 1 h ont été évaluées sur la base d'un découpage en heures rondes.

Pour posséder des données homogènes, les 25 pluviographes qui ont été rajoutés ont été dépouillés de la même façon.

D'autre part, les données pluviométriques connues sont les maxima mensuels de pluie en 24 h. Dans ce cas, les données sont relevées en général chaque matin à 6 h, 7 h ou 8 h, selon les organismes et la période de l'année (heure d'été ou d'hiver).

Ainsi, cette manière de dépouiller les données (pluviographes) ou de relever les quantités d'eau tombées en 24 h (pluviomètres) conduit à une sous-estimation pour les maxima de totaux pluvieux. En effet, un comptage à pas de temps glissant donnerait des valeurs plus fortes dès que l'épisode est à cheval sur deux découpages.

Pour les totaux journaliers, JACQ (1994) donne l'exemple de l'épisode du 4/5 septembre 1964 sur les Bouches-du-Rhône, où le cumul de pluie était réparti sur 2 jours. Il est tombé 210 mm à Salon de Provence le 5 septembre dont 68 mm avant 6 h TU (comptabilisés le 4) et 142 mm après 6 h TU (comptabilisés le 5).

D'autre part, une pluie forte d'une heure qui commence à 8h20 et finit à 9h20 sera sous-estimée. Le même cas peut arriver pour des pluies de 2 h, 3 h, ...etc.

L'épisode du 14/05/1997 (cf. Figure I 8 p47 et Tableau I 3) donne un exemple de sous-estimation due au dépouillement. Il a commencé à pleuvoir à 21h et la pluie s'est arrêtée à 22h30. La pluie centrée maximale de 1 h pour cette journée est de 15.4 mm/h alors que la pluie maximale dépouillée en heure ronde est seulement de 9.8 mm/h. De même, la pluie maximale centrée de 2 h est de 19 mm/2 h, alors que celle dépouillée en heures rondes est de 15.4 mm/2 h seulement.

|               | 1 h (mm/h) | 2 h (mm/2h) | 3 h (mm/3h) |
|---------------|------------|-------------|-------------|
| Origine fixe  | 9.8        | 15.4        | 19          |
| Pluie centrée | 15.4       | 19          | 19          |

Tableau I 3 : Différence entre les pluies maximales dépouillées à origine fixe et les pluies maximales centrées pour l'épisode du 14/05/1997 (Campus de Saint Martin d'Hères)

Le rapport entre une pluie dépouillée à pas de temps glissant et une pluie dépouillée à pas de temps fixe a été étudié par WEISS (1964). Si nous appelons :

- $P_c$  la pluie sur un épisode de durée  $n\Delta t$  d'origine variable (« pluie centrée »)
- et  $P_b$  la pluie sur une même durée  $n\Delta t$ , mais dont les origines varient de façon discrète avec un pas de temps  $\Delta t$ ,

nous passons de  $P_b$  à  $P_c$  par le coefficient correcteur  $K_w$  de WEISS, qui est une approximation statistique :

$$P_c = K_w P_b \text{ avec } K_w = \frac{n}{n - \frac{1}{8}} \quad (I - 1)$$

Ce coefficient peut varier selon le type de pluies. Par exemple, en zone tropicale, où les pluies tombent surtout le soir et la nuit,  $K_w$  est voisin de 1 pour 24 h.

Dans la région Alsace Lorraine, LABORDE (1984) a montré que le rapport  $P_{24h}/P_{1j}$  ( $P_{24h}$  : pluie décennale centrée et  $P_{1j}$  : pluie décennale basée sur un dépouillement à origine fixe) était d'environ 1.13. Cette valeur est proche de celle du coefficient de WEISS et la différence entre ces 2 coefficients est négligeable devant les incertitudes de mesure et d'estimation des pluies décennales. Par contre, ce rapport n'est pas le même d'une saison à l'autre (LABORDE, 1984).

Dans notre cas,  $n$  vaut toujours 1, puisque nous voulons passer de pluies dépouillées à pas de temps fixe (par exemple  $\Delta t=6$  h), à des pluies centrées (correspondant à  $t=6$  h). Alors,  $K_w$  vaut 1.14.

Nous n'avons jamais appliqué ce coefficient dans nos calculs, ainsi les cartes de pluies extrêmes établies dans ce rapport se rapporteront toujours à des pluies dépouillées à origine



fixe. Le lecteur prendra soin d'appliquer ou non le coefficient de WEISS présenté ici, selon ses besoins.

### ***1.2.6. Vérifications effectuées sur les données fournies***

Pour ce qui concerne les pluviographes, la cohérence des données dépouillées pour 65 postes avait été vérifiée dans le cadre du X<sup>e</sup> plan Etat Région.

La plupart des appareils ajoutés au jeu de données sont gérés par EDF, ou CEMAGREF (Bassin du Réal Collobrier), et ces organismes vérifient systématiquement la cohérence de leur données une fois par mois.

Enfin, lors du dépouillement de pluviogrammes, nous avons été confrontés aux erreurs classiques, telles que l'obturation du conduit. Dans tous les cas incertains, nous avons considéré les valeurs comme manquantes.

Pour les pluviomètres, les vérifications ont été plus systématiques, sauf pour les données EDF. En effet, comme pour les pluviographes, ces données avaient déjà été contrôlées.

D'autre part, seules les valeurs de pluies très fortes ont pu être contrôlées. Cependant ce sont celles-ci qui doivent être analysées si l'on ne veut pas commettre d'erreurs importantes sur l'estimation des pluies extrêmes.

Pour l'ensemble des pluviomètres fournis par Météo France, nous disposons du numéro du jour correspondant à la pluie maximale mensuelle. Cela nous a permis d'étudier la possibilité qu'une pluie très forte soit arrivée en la comparant aux pluies maximales mensuelles des postes environnant qui sont arrivées le même jour.

Ainsi, nous avons repéré toutes les pluies d'intensité supérieure à 100 mm/24h. Puis nous avons recherché les stations environnantes pour lesquelles la pluie maximale était arrivée à la même date ou les jours précédent et suivant. Plusieurs cas de figure se présentent alors :

- à la date repérée, des pluies assez fortes sont enregistrées pour plusieurs stations : alors la valeur forte sera conservée, puisqu'elle semble probable ;

- à la date repérée, il n'y a qu'une valeur forte, celle de la station étudiée et les autres stations présentent des valeurs très inférieures : la valeur forte semble donc erronée, on l'éliminera ;
- seule la station considérée enregistre une valeur de pluie le jour donné (et les jours précédent et suivant), on ne peut alors savoir si cette pluie est réellement arrivée ou résulte d'une erreur de donnée. Si la valeur est très élevée, on l'éliminera.

Cette vérification est la seule que nous pouvions faire, puisque nous ne disposions pas de l'ensemble des pluies journalières. Dans ce cas, il aurait été plus aisé de comparer les valeurs des pluies entre stations pour un jour donné. Le problème rencontré est qu'il peut avoir beaucoup plu sur une région à deux périodes d'un même mois, alors des postes proches n'enregistrent pas forcément la même date pour les maxima mensuels. Un poste peut donc avoir une valeur très forte de pluie un certain jour alors que les postes proches enregistrent leur maxima mensuel un autre jour.

Finalement, nous avons pu constater que les données étaient assez fiables, et que la plupart des erreurs étaient certainement liées à des erreurs de positionnement de virgule.

### **I.3.Conclusion**

Dans cette partie, nous nous sommes attachés à la présentation du domaine étudié, les Alpes françaises, et du réseau de mesure de pluie utilisé.

Une synthèse bibliographique sur la climatologie nous a permis de mettre en évidence un découpage des Alpes françaises s'appuyant sur les précipitations mensuelles et sur les types de temps engendrant des précipitations (zone méridionale, septentrionale et zone Est, proche de l'Italie). Ce découpage sera à comparer à la variabilité spatiale des précipitations extrêmes.

Ensuite, nous avons décrit le jeu de données à la base de l'étude. Nous disposons de 90 pluviographes et de 463 pluviomètres. Les données disponibles sont respectivement des

maxima hebdomadaires et mensuels, qui ont été vérifiés autant que possible. Ces données nous permettront d'évaluer les valeurs de pluies extrêmes, par ajustement statistique sur des échantillons de maxima.

CHAPITRE II

ESTIMATION DES VALEURS  
DE PLUIES EXTREMES  
POUR LES DIFFERENTS PAS DE TEMPS

LE PROBLEME DES SAISONS A PLUS  
FORT RISQUE



Différentes méthodes d'estimation des débits de crue sont basées sur la connaissance de paramètres caractéristiques des pluies extrêmes (par exemple, la méthode du Gradex mise au point par MM. DUBAND et GUILLOT (BOUVARD et al., 1994)). Suivant la nature du projet à réaliser et le type de réponse du bassin versant, les valeurs de pluies extrêmes sur différentes durées sont nécessaires : 1 h, 2 h, 24 h... Ainsi, l'objet de ce chapitre est la détermination de ces paramètres pour les pas de temps allant de l'heure à la journée dans les Alpes françaises.

Les différentes lois utilisées dans cette étude, la loi de Gumbel et la loi somme de deux exponentielles, seront décrites, ainsi que les différentes méthodes d'estimation de leurs paramètres. Leur comparaison aboutira à une méthodologie d'estimation des pluies extrêmes à partir d'un échantillon d'observations.

Dans un deuxième temps, c'est l'échantillon considéré pour le calcul des pluies extrêmes qui sera discuté dans le cas des Alpes françaises. Pour avoir des échantillons de taille suffisante, nous ne considérerons pas des maxima annuels, mais plutôt des maxima mensuels d'une saison à plus fort risque pluviométrique.

Pour finir, les paramètres statistiques des précipitations extrêmes seront estimés pour les 90 pluviographes et les 463 pluviomètres disponibles.

## **II.1.Distributions fréquentielles utilisées : loi de Gumbel et somme de deux exponentielles**

L'ajustement statistique d'extrêmes pose problème quant à la loi à utiliser. Différentes études ont comparé un panel de lois statistiques (SLIMANI, 1985 ; THAO, 1993). Cependant, la loi la plus couramment choisie pour l'ajustement des maxima de pluie sur des périodes longues (mois ou année) est la loi de Gumbel (EDF DTG-CEMAGREF (1995)). En effet, cette loi est relativement simple : deux paramètres la régissent. De plus, nos données de pluie s'ajustent bien à ce type de loi (cf. § II.2).

Par ailleurs, la loi somme de deux exponentielles est bien adaptée à l'ajustement de toutes les pluies successives d'une durée donnée (par exemple, l'ensemble des pluies

journalières). Mais, elle peut aussi s'appliquer à des maxima hebdomadaires, données dont nous disposons pour les pluviographes.

Ainsi, après des généralités sur les lois de probabilité, nous décrirons la loi de Gumbel et la somme de deux exponentielles et nous comparerons les différentes méthodes d'estimation des paramètres.

### **II.1.1. Rappels sur les lois de probabilité**

On cherche à décrire et à résumer un échantillon de  $n$  valeurs  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , considéré comme un sous-ensemble d'une population qui est souvent infinie.

Sur cette population, la *fonction de répartition* :  $F(x)$  est définie. Cette fonction exprime la probabilité de tirer au hasard une valeur  $X$  inférieure ou égale à la valeur  $x$  :

$$F(x) = \Pr(X \leq x) \quad (II - 1)$$

La *densité de probabilité* est la fonction  $f(x)$  qui représente la probabilité de tirer au hasard une valeur  $X$  entre  $x - dx/2$  et  $x + dx/2$  :

$$\Pr(x - dx/2 < X \leq x + dx/2) = f(x).dx \quad (II - 2)$$

La représentation graphique de l'échantillon s'appuie sur la *fonction de répartition empirique*  $F^*(x)$ . Cette courbe, tracée à partir de l'échantillon, se veut être la plus proche possible de la fonction de répartition  $F(x)$  et peut être une aide à sa détermination.

Si les  $n$  valeurs  $x_i$  de l'échantillon sont classées dans l'ordre croissant, une estimation simple de  $F(x)$  est fournie par :

$$F^*(x_i) = \frac{i - a}{n + b} \quad (II - 3)$$

où  $a$  et  $b$  ont un optimum qui dépend de la loi dont sont issus les échantillons :

Loi Normale (Gauss) :  $a=0.375$  et  $b=0.25$

Loi de Gumbel :  $a=0.5$  et  $b=0$  (LABORDE, 1984)

Enfin, le *temps de retour T d'un événement* est une notion statistique qui correspond à la probabilité d'occurrence de cet événement : par exemple, si une valeur de pluie P a un temps de retour T de 10 ans, elle a 1 chance sur 10 d'être dépassée durant une année donnée.

Par définition, le temps de retour associé à un événement x est :

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (II - 4)$$

### II.1.2.Loi de Gumbel

La loi de Gumbel est en général ajustée à des maxima annuels ou mensuels (de pluie, de débit...). Elle suppose que les extrêmes ont une distribution fréquentielle à décroissance exponentielle.

C'est une loi à deux paramètres  $x_0$  et  $a$ , de même dimension que  $x$ . La fonction de distribution de Gumbel a pour expression :

$$\text{Pr ob}(X \leq x) = F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - x_0}{a}\right)\right) = \exp(-\exp(-u)) \quad (II - 5)$$

où  $F(x)$  est la probabilité qu'une valeur quelconque  $X$  soit inférieure ou égale à  $x$ .

$x_0$  est le paramètre de position appelé *mode*,

$a$  est le paramètre d'échelle appelé *gradex* (gradient de l'exponentiel),

$u$  est la variable réduite de Gumbel  $u = -\ln(-\ln(F(x)))$ .

La formule (II - 5) peut aussi s'écrire sous la forme d'une équation de droite :

$$x = x_0 + a \times (-\ln(-\ln F(x))) \quad (II - 6)$$

Ainsi, la représentation de la loi sur papier de Gumbel ( $x$  en ordonnées,  $u$  en abscisses) est une droite de pente  $a$ , le *gradex*, et d'ordonnée à l'origine  $x_0$ , le *mode* (pour  $u=0$ ) (CUNNANE, 1978).

Enfin, le caractère gumbélien des distributions persiste si on s'intéresse aux valeurs les plus fortes d'échantillons tirés de lois gumbéliennes. Par exemple, si un échantillon de maxima mensuels de pluie est gumbélien, alors les maxima annuels le seront aussi. De plus, si



on considère l'échantillon des  $n$  maxima tiré d'un échantillon de Gumbel, les deux distributions empiriques correspondantes sont séparées de  $\ln(n)$  sur papier de Gumbel<sup>1</sup>.

### II.1.2.1. Estimation des paramètres de la loi de Gumbel

Il existe différentes méthodes d'estimation des paramètres  $x_0$  et  $a$  à partir des valeurs de l'échantillon. La méthode des moments, des moments pondérés et du maximum de vraisemblance sont décrites dans ce qui suit, pour le cas particulier de la loi de Gumbel.

#### II.1.2.1.1. La méthode des moments

Selon la méthode des moments, le gradex et le mode sont choisis de façon à ce que les valeurs théoriques des deux premiers moments soient égales à leurs estimations sur l'échantillon. Pour un échantillon de  $n$  valeurs  $x_i$ , de moyenne  $m$  et d'écart type  $s$ , on obtient :

$$a = 0.78 \times s \text{ et } x_0 = m - 0.577 \times a \quad (II - 7)$$

$$\text{avec } s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 / (n-1)} \text{ et } m = \sum_{i=1}^n x_i / n$$

Les deux valeurs 0.78 et 0.577, qui sont respectivement l'inverse de l'écart type et la moyenne de la variable réduite  $u$  de Gumbel, varient avec la taille de l'échantillon. Ces

---

<sup>1</sup> En effet, la probabilité  $F_n(x)$  que  $x$  soit non-dépassé dans un échantillon de  $n$  valeurs ayant elles-mêmes des fréquences au non-dépassement  $F(x)$  est :  $F_n(x) = F(x)^n$  (formulation qui repose sur l'indépendance des  $n$  événements). Alors :

$$\ln(F_n(x)) = n \ln(F(x))$$

$$-\ln(-\ln(F_n(x))) = -\ln(n) - \ln(-\ln(F(x)))$$

$$-\ln(-\ln(F_n(x))) = -\ln(n) + \frac{x - x_0}{a}$$

$$\text{avec } x_0' = x_0 + a \times \ln(n), F_n(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - x_0'}{a}\right)\right)$$

Le caractère gumbélien est bien maintenu, le mode change mais le gradex reste constant.

valeurs correspondent à un échantillon de taille théoriquement infini (SLIMANI, 1985). En pratique, ce sont toujours elles qui sont utilisées.

Cette méthode a le défaut de fournir des valeurs de gradex biaisées si la distribution empirique n'est pas tout à fait gumbélienne et si une courbure ou une cassure existe dans le nuage de points. Ceci est dû à l'utilisation du moment d'ordre 2 qui donne un poids trop fort aux valeurs faibles de l'échantillon. La droite alors obtenue est mal ajustée sur les valeurs fortes. Pour pallier ce problème plusieurs solutions ont été envisagées (LABORDE, 1984) :

- ajuster la droite sur les valeurs supérieures à un seuil de pluie pour éliminer les maxima qui ne sont pas des valeurs extrêmes,
- ajuster la droite au-delà d'une fréquence seuil  $F_0$ , donc éliminer la queue inférieure de la distribution,
- prendre un sous échantillon de tous les maxima disponibles de manière à n'avoir que des valeurs relativement fortes, tout en gardant un nombre suffisant pour l'ajustement (ce qui n'est plus vraiment la méthode des moments).

#### II.1.2.1.2. La méthode des moments pondérés

La méthode des moments pondérés est intéressante pour les lois qui permettent d'exprimer facilement  $x$  en fonction de  $F$  ( $x=x(F)$ ). Elle permet d'estimer les paramètres à partir des valeurs de l'échantillon.

De manière générale, les moments pondérés s'écrivent (CUNNANE, 1989) :

$$M_{ijk} = E\left[x^i F^j (1-F)^k\right] = \int_0^1 x(F)^i F^j (1-F)^k dF \quad (II - 8)$$

où  $i, j, k$  sont des nombres réels.

Avec  $j=k=0$  et  $i$  un entier non négatif, on retrouve la définition des moments traditionnels.

Pour des applications hydrologiques, une formulation de la fréquence empirique est proposée :

$$F^*(x_i) = \frac{i - 0.35}{n} \quad (II - 9)$$

Les moments sont estimés grâce à l'échantillon de  $n$  valeurs  $x_i$  par :

$$\hat{M}_{1j0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F^*(x_i)^j x_i \quad (II - 10)$$

où  $x_i$  est la  $i$ ème valeur de l'échantillon classé dans l'ordre croissant.

Dans le cas de la loi de Gumbel, cette méthode fournit :

$$M_{1j0} = \frac{x_0}{1+j} + \frac{a \times \{\ln(1+j) + \varepsilon\}}{1+j} \quad (II - 11)$$

où  $\varepsilon = 0.57721$  est le nombre d'Euler

d'où les formules donnant gradex et mode :

$$a = \frac{(2 \times M_{110} - M_{100})}{\ln(2)} \text{ et } x_0 = M_{100} - a \times \varepsilon \quad (II - 12)$$

### II.1.2.1.3. Le maximum de vraisemblance

Dans ce cas, la vraisemblance (produit des densités de probabilité) de l'échantillon observé doit être maximale. L'application de cette méthode donne les équations suivantes pour le gradex et le mode (OTTEN et al., 1980) :

$$a + \frac{\sum_{i=1}^n x_i \exp\left(-\frac{x_i}{a}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i}{a}\right)} = m \text{ et } x_0 = -a \times \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i}{a}\right)}{n}\right) \quad (II - 13)$$

FIORENTINO et al. (1984) ont proposé des modifications à ces équations pour obtenir des paramètres non biaisés :

$$a^* = \frac{a}{(1 - 0.8/n)} \text{ et } x_0^* = -a^* \times \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i}{a^*}\right)}{n}\right) - 0.7 \frac{a^*}{n} \quad (II - 14)$$

### II.1.2.2. Estimation de l'intervalle de confiance sur un quantile

Soit une variable  $X$  distribuée selon une loi de Gumbel, dont les paramètres sont estimés par la méthode des moments.  $u_F$  est la variable réduite de Gumbel correspondant à la fréquence  $F$  :  $u_F = -\ln(-\ln(F(x)))$ . On peut estimer le quantile  $x_F$  par la relation :

$$\hat{x}_F = x_0 + a \times u_F \quad (II - 15)$$

L'intervalle de confiance à  $\alpha\%$  sur l'estimation du quantile  $x_F$  est donné approximativement par l'expression suivante (LABORDE, 1984) :

$$\hat{x}_F - T_2 \times s \leq (x_F)_{\text{vrai}} \leq \hat{x}_F + T_1 \times s \quad (II - 16)$$

avec :

$$T_i = \frac{t_\alpha \sqrt{\frac{1 + 1.13 \dot{u}_F + 1.1 \dot{u}_F^2}{n}} \pm t_\alpha^2 \frac{1.1 \dot{u}_F + 0.57}{n}}{1 - 1.1 \frac{t_\alpha^2}{n}} \quad (II - 17)$$

(signe + pour  $T_1$ ,  
signe - pour  $T_2$ )

où  $t_\alpha$  représente la variable réduite de Gauss correspondant à la fréquence  $\frac{1+\alpha}{2}$ ,

$\dot{u}_F$  est la variable réduite de Gumbel après centrage et réduction :  $\dot{u}_F = \frac{u_F - 0.577}{1.28}$ ,

$n$  est la taille de l'échantillon et  $s$  son écart type.

### II.1.3. Somme de deux exponentielles

Cette loi est en général ajustée à des échantillons de pluies successives d'une durée donnée. Elle prend en compte la cassure fréquemment trouvée dans les distributions empiriques de pluies extraites de périodes courtes (SLIMANI, 1985) : pluies maximales hebdomadaires, pluies maximales décadaires. En augmentant la période sur laquelle sont pris les maxima, par exemple l'année, la cassure disparaît mais en contrepartie, la taille de l'échantillon se réduit.

Cette loi est une somme de deux exponentielles :

$$F(x) = 1 - \gamma \exp\left(-\frac{x}{a}\right) - \beta \exp\left(-\frac{x}{c}\right) \quad (II - 18)$$

Si on pose :  $\gamma = \frac{m^2}{s^2}$  et  $K = \frac{m^2 + s^2}{2}$  (où  $m$  est la moyenne et  $s$  l'écart type de l'échantillon) et  $f(0)$  la fréquence observée des valeurs nulles, l'estimation des paramètres de cette loi par la *méthode des moments* fournit :

$$\begin{aligned} a &= \frac{\gamma m + \sqrt{\gamma \beta (K\omega - m^2)}}{\gamma \omega} & \beta &= 1 - f(0) - \gamma \\ \omega &= \gamma + \beta = 1 - f(0) & c &= \frac{m - \gamma a}{\beta} \end{aligned} \quad (II - 19)$$

On constate que, pour des pas de temps inférieurs à 24 h, ces paramètres conduisent à une sous-estimation du gradex par rapport à une estimation par la méthode des moments sur des maxima mensuels. Pour améliorer les résultats pour des pas de temps inférieurs à 24 h, SLIMANI (1985) a proposé une autre formulation pour le paramètre  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{m^2}{s^2} C_k[t, F(0)] \text{ avec } C_k[t, F(0)] = \frac{1}{1 - \ln\left(\frac{t}{24}\right)^{\frac{F(0)}{2}}} \quad (II - 20)$$

D'autre part, d'après SLIMANI (1985), on a souvent  $\frac{a}{c} \approx 10$  et  $\beta \approx 3\gamma$ , donc (II - 18)

s'écrit aussi :

$$F(x) = 1 - \gamma \left( \exp\left(-\frac{x}{a}\right) - 3 \exp\left(-\frac{10x}{a}\right) \right) \quad (II - 21)$$

De plus, la deuxième exponentielle est négligeable devant la première pour les valeurs fortes,

$$\text{car } \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{\exp\left(-\frac{x}{a}\right)}{3 \exp\left(-\frac{10x}{a}\right)} \right) = \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{3} \exp\left(\frac{9x}{a}\right) \right) = \infty.$$

Ainsi, le coefficient a donne la pente d'un ajustement sur les fortes valeurs de l'échantillon : a est le gradex de la loi somme de deux exponentielles, sa valeur est proche du gradex de la loi de Gumbel (cf. § II.1.4 et Tableau II 2).

#### **II.1.4.Comparaison des différentes estimations du gradex et du mode**

Différentes méthodes d'estimation des paramètres de la loi de Gumbel et de la loi somme de deux exponentielles ont été proposées. Cette partie vise à les comparer et à se définir une méthode pour l'estimation finale des précipitations extrêmes.

##### **II.1.4.1.Intérêt de la méthode des moments pondérés par rapport à la méthode des moments**

La méthode des moments pondérés donne un poids plus faible que la méthode des moments aux valeurs de pluies très fortes enregistrées sur la période connue, c'est-à-dire aux horsains ou outliers (MASSON, 1992). En effet, pour un échantillon donné comportant un horsain :

- pour la méthode des moments, la valeur correspondante est élevée au carré dans le calcul du moment d'ordre 2 (l'écart type),
- pour la méthode des moments pondérés, cette même valeur est pondérée par sa fréquence empirique dans le calcul du moment d'ordre 2 correspondant (cf. (II - 10)).

Pour quantifier les différences d'estimation du gradex, du mode et des quantiles par la méthode des moments et celle des moments pondérés, nous avons appliqué ces deux méthodes sur les maxima mensuels (12 valeurs par an) de différents « pluviographes » :

- Le Chatelard (station courte : 8 ans) et La Condamine (station longue : 42 ans),
- et deux stations imaginaires comportant un horsain artificiel : pour chaque pas de temps, une valeur correspondant à 2 fois la valeur maximale réelle connue a été ajoutée aux données réelles du Chatelard et de La Condamine.

Les gradex calculés par la méthode des moments pondérés sur un échantillon avec un horsain artificiel sont inférieurs à ceux calculés par la méthode des moments. Ainsi, les rapports entre les gradex obtenus par les moments pondérés et ceux obtenus par les moments ( $a_{\text{momentspondérés}}/a_{\text{moments}}$ ) varient entre 0.67 et 0.78, pour 8 ans de données et entre 0.86 et 0.95 pour 42 ans de données.

Au contraire, les modes obtenus par les moments pondérés sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par les moments. Dans ce cas, les rapports ( $x_{0\text{momentspondérés}}/x_{0\text{moments}}$ ) varient entre 1.04 et 1.28, pour 8 ans de données et entre 1 et 1.02 pour 42 ans de données.

Mais finalement, les valeurs de pluies évaluées par la méthode des moments pondérés sont toujours plus faibles que celles évaluées par la méthode des moments. Les rapports vont de 0.73 à 0.84 pour 8 ans de données et de 0.89 à 0.96 pour 42 ans de données.

Cependant, il est intéressant de voir si les valeurs de pluies calculées par les moments pondérés sur des échantillons avec horsain sont très différentes de celles calculées sur les mêmes échantillons mais sans horsain. Ainsi, pour chaque durée, nous avons estimé l'erreur commise sur l'évaluation des pluies sur les échantillons avec horsain,  $P_h$ , par rapport à l'évaluation des pluies sur l'échantillon sans horsain,  $P$  :

$$\text{écart} = \frac{P_h - P}{P} \quad (II - 22)$$

Pour les deux stations testées : La Condamine et Le Chatelard, les estimations par les deux méthodes diffèrent respectivement de 5 % au maximum pour 42 ans de données et de 18 % maximum pour 8 ans de données (cf. Tableau II 1).

|              | Méthode des moments | Méthode des moments pondérés |
|--------------|---------------------|------------------------------|
| Le Chatelard | 0.19-0.61           | 0.11-0.18                    |
| La Condamine | 0.04-0.15           | 0.02-0.05                    |

*Tableau II 1 : Ecart minimaux et maximaux sur l'estimation des quantiles sur des échantillons avec horsain (artificiel) et sans horsain (statistiques sur tous les pas de temps)*

En conclusion, la méthode des moments pondérés donne des résultats moins influencés par les horsains que la méthode des moments. De plus, pour des stations à série longue, cette

méthode donne des estimations de quantiles sur des échantillons avec horsains qui ne sont pratiquement pas influencées par l'existence de ces extrêmes.

#### II.1.4.2.Comparaison de la loi somme de deux exponentielles et de la loi de Gumbel

Les estimations de gradex et de mode par différentes méthodes : la loi somme de deux exponentielles, la loi de Gumbel (méthode des moments et des moments pondérés) sont comparées. Pour toutes les stations disponibles, nous avons estimé :

- sur les *maxima hebdomadaires* (52 valeurs par an) : le gradex  $a_1$  par la somme de deux exponentielles,
- sur les *maxima mensuels* (12 valeurs par an) : le gradex et le mode par un ajustement de Gumbel par la méthode des moments  $a_2$  et  $m_2$  et des moments pondérés  $a_4$  et  $m_4$ ,
- sur les *maxima annuels* (1 valeur par an) : le gradex et le mode par un ajustement de Gumbel par la méthode des moments  $a_3$  et  $m_3$  et des moments pondérés  $a_5$  et  $m_5$ .

Les coefficients de détermination  $R^2$  entre les gradex (respectivement les modes) calculés par les différents ajustements sont donnés au Tableau II 2. Pour le calcul des  $R^2$ , on a considéré deux échantillons différents :

- celui des pluviographes, ce qui correspond à 540 observations (les différents pas de temps sont mélangés : pour 90 stations, 6 observations, i.e. une par pas de temps),
- celui des pluviographes et des pluviomètres, soit 1003 observations (540 observations pour les pluviographes et 463 observations pour les pluviomètres).

De manière générale, les gradex sont bien corrélés entre eux et les modes aussi. Ces observations peuvent être affinées :

- Les gradex  $a_1$  estimés par la somme de deux exponentielles sont proches de ceux évalués par la loi de Gumbel sur les maxima mensuels ( $R^2$  de 0.83 et 0.85). La liaison est moins bonne avec les estimations sur les maxima annuels, ce qui s'explique par le faible nombre de données dans ce cas (problème d'échantillonnage). En effet, les durées



disponibles pour les pluviographes varient entre 8 et 42 ans, ce qui est en général peu pour l'estimation de quantiles de pluie.

- Les estimations par ajustement de Gumbel par les méthodes des moments et des moments pondérés donnent des résultats très proches lorsque les évaluations se font sur les mêmes échantillons (maxima mensuels ou maxima annuels). Par exemple, le coefficient de détermination est de 0.98 dans le cas de l'évaluation des gradex sur les maxima mensuels par les deux méthodes.
- Enfin, la comparaison entre les estimations par ajustement de Gumbel sur les maxima annuels et les maxima mensuels (par les méthodes des moments et des moments pondérés) montre à nouveau le problème d'échantillonnage. Les coefficients de détermination sont moins bons que lorsque les mêmes échantillons sont utilisés pour l'ajustement.

|                | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub>      | a <sub>4</sub>      | a <sub>5</sub>      |
|----------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| a <sub>1</sub> | 1              | 0.83           | 0.53                | 0.85                | 0.63                |
| a <sub>2</sub> |                | 1              | 0.75<br><i>0.80</i> | 0.98<br><i>0.99</i> | 0.85<br><i>0.88</i> |
| a <sub>3</sub> |                |                | 1                   | 0.67<br><i>0.71</i> | 0.95<br><i>0.95</i> |
| a <sub>4</sub> |                |                |                     | 1                   | 0.78<br><i>0.82</i> |
| a <sub>5</sub> |                |                |                     |                     | 1                   |

|                | m <sub>2</sub> | m <sub>3</sub>      | m <sub>4</sub>      | m <sub>5</sub>      |
|----------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| m <sub>2</sub> | 1              | 0.82<br><i>0.80</i> | 0.99<br><i>0.99</i> | 0.82<br><i>0.80</i> |
| m <sub>3</sub> |                | 1                   | 0.83<br><i>0.81</i> | 0.99<br><i>0.99</i> |
| m <sub>4</sub> |                |                     | 1                   | 0.83<br><i>0.82</i> |
| m <sub>5</sub> |                |                     |                     | 1                   |

**Tableau II 2 :** Coefficients de détermination  $R^2$  entre gradex et modes évalués par différents ajustements (en italique : coefficients obtenus avec les 463 pluviomètres, sinon coefficients obtenus avec les 90 pluviographes)

[a<sub>1</sub> : gradex calculé par la somme de deux exponentielles sur des maxima hebdomadaires ; a<sub>2</sub> et m<sub>2</sub> : gradex et mode calculés par un ajustement de Gumbel par la méthode des moments sur les maxima mensuels ; a<sub>3</sub> et m<sub>3</sub> : gradex et mode calculés par un ajustement de Gumbel par la méthode des moments sur les maxima annuels ; a<sub>4</sub> et m<sub>4</sub> : gradex et mode calculés par un ajustement de Gumbel par la méthode des moments pondérés sur les maxima mensuels ; a<sub>5</sub> et m<sub>5</sub> : gradex et mode calculés par un ajustement de Gumbel par la méthode des moments pondérés sur les maxima annuels]

Finalement, les estimations sur des maxima annuels sont moins robustes que celles sur des maxima mensuels, ce qui est dû au problème d'échantillonnage. D'autre part, les ajustements par la loi somme deux exponentielles sur des maxima hebdomadaires confirment les estimations sur des maxima mensuels par la loi de Gumbel.

### **II.1.5. Evolution du gradex en fonction du pas de temps : le coefficient de Montana**

Différentes formules sont proposées pour exprimer l'évolution du gradex en fonction du temps. La plus utilisée est celle du *coefficient de Montana*  $n$  :

$$a = \alpha \times t^n \quad (II - 23)$$

où  $n$  est le coefficient de Montana,

et  $a$  est le gradex au pas de temps  $t$ .

Ce coefficient est déterminé par la méthode des moindres carrés<sup>2</sup>. Il peut être utilisé pour déterminer l'évolution des pluies de temps de retour donné en fonction du pas de temps :

$$\frac{P(t, T)}{P(t_0, T)} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^n \quad (II - 24)$$

### **II.1.6. Conclusion**

Après avoir décrit les deux lois principalement utilisées dans notre étude : la loi de Gumbel et la loi somme de deux exponentielles, ce sont les différentes méthodes d'estimation des paramètres qui ont été comparées, en particulier l'estimation du gradex.

---

<sup>2</sup> En effet, en appliquant le logarithme népérien à la loi de Montana (II - 23), on obtient l'équation d'une droite :

$$\ln(a) = \ln(\alpha) + n \times \ln(t)$$

dont la pente et l'ordonnée à l'origine peuvent être déterminées par la méthode des moindres carrés.

Pour ce qui concerne l'estimation du gradex par la loi de Gumbel, les méthodes sont équivalentes. En général, c'est celle des moments qui sera utilisée, vu sa simplicité.

Par contre, la méthode des moments pondérés est peu influencée par la présence éventuelle de horsains, au contraire de la méthode des moments. Ainsi, les ajustements par la méthode des moments sont moins proches du centre de la distribution. Finalement, lorsque des échantillons présenteront des horsains, *dont l'exactitude ne pourra être réellement vérifiée*, nous appliquerons la méthode des moments pondérés.

D'autre part, les ajustements par la loi somme deux exponentielles sur des maxima hebdomadaires confirment les estimations sur des maxima mensuels par la loi de Gumbel. Cette constatation nous permettra de comparer éventuellement les gradex évalués par la loi de Gumbel et la loi somme de deux exponentielles, dans le cas où les ajustements posent problème (par exemple pour assurer une cohérence entre les différents pas de temps, si une pluie de 2 h est supérieure à une pluie de 3 h).

Enfin, le choix d'une méthode d'ajustement s'accompagne aussi d'un choix sur les échantillons considérés : ceux-ci devront être de taille suffisante, pour représenter la population dont ils sont issus. Des échantillons de maxima annuels sont à proscrire dans notre cas, car pour de nombreuses stations, les durées d'observation disponibles sont trop faibles.

## II.2. Estimation des précipitations extrêmes

### II.2.1. Introduction : constitution de l'échantillon pour l'estimation des précipitations extrêmes, définition d'une saison à plus fort risque et démarche envisagée

Une façon de procéder pour définir les échantillons sur lesquels sont calculées les pluies extrêmes peut être de retenir les épisodes pluvieux les plus forts (par exemple, supérieurs à un seuil) quelle que soit la date à laquelle ils interviennent. Plusieurs difficultés sont alors à envisager. Les différentes valeurs de l'échantillon ne seront pas forcément indépendantes. De plus, l'échantillon ainsi constitué peut correspondre à des mélanges de populations, puisque les phénomènes météorologiques qui génèrent les épisodes peuvent être de nature différente. Cette idée est donc à rejeter.

La solution adoptée consiste à définir les précipitations extrêmes comme étant les plus fortes pluies sur différentes périodes de l'année. Les mélanges de population sont diminués en regroupant les mois en saison et en étudiant les statistiques saisonnières. Alors un type de phénomène provoquant les précipitations (front, convection, ...) est supposé être dominant durant une saison.

Ce type de découpage saisonnier doit permettre de regrouper entre eux des mois à l'intérieur desquels les pluies maximales sont équiprobables. Par exemple, juillet et août seront dans la même saison si toute précipitation de hauteur  $x$  a la même probabilité d'être dépassée en juillet et en août, quelle que soit la durée des données disponibles sur laquelle on mesure  $x$  et quelle que soit la hauteur  $x$ .

ESTORGE et al. (1980) s'appuient sur l'évolution de la moyenne des pluies maximales de chaque mois (moyennes mensuelles) pour déterminer un découpage en saisons. Nous considérerons aussi les gradex mensuels (cf. § II.2.2). Dans une majorité de cas, deux

saisons sont distinctes sur l'année pour chaque station et chaque pas de temps. En effet, deux grands ensembles de mois peuvent être déterminés :

- le premier comprend les mois consécutifs à gradex et à moyennes les plus faibles
- et le deuxième les mois consécutifs à gradex et à moyennes les plus forts, ce sont les mois constituant la « **saison à plus fort risque** ».

C'est la détermination de cette dernière qui nous intéresse ici.

Pour définir la saison à plus fort risque, il faut prendre en compte les variabilités spatiale et temporelle des phénomènes engendrant les pluies extrêmes.

En effet, dans un domaine aussi grand que les Alpes, toutes les régions ne sont pas touchées par le même genre de phénomènes pluvieux (retours de Lombardie à l'est, influence de la Méditerranée au sud..., cf. chapitre I). Les phénomènes les plus intenses ne se manifestent pas non plus au même moment dans l'année sur l'ensemble du domaine.

D'autre part, la saison à plus fort risque peut varier suivant le pas de temps, puisque la nature des phénomènes les plus intenses dépend de celui-ci. En effet, les maxima horaires sont en général le résultat d'orages d'été, ce qui n'est pas forcément le cas pour les précipitations de 24 h.

Pour prendre en compte ces différents aspects, 3 méthodes ont été envisagées pour définir les saisons à plus fort risque.

La première méthode consiste à définir *une saison à plus fort risque pour chaque pas de temps et chaque station* (cf. § II.2.2). Cette méthode est cependant lourde et difficile à mettre en oeuvre. Au cas par cas, il n'est pas toujours évident de définir une saison pour un pas de temps donné. Différents problèmes peuvent se manifester :

- les gradex et les moyennes mensuels sont tous du même ordre de grandeur,
- plusieurs saisons à plus fort risque peuvent parfois être définies : une en début d'année, une au milieu...
- si la période de données disponibles est faible, un événement intense peut conduire à des valeurs de gradex et de moyennes très fortes pour le mois considéré, et il est difficile de savoir s'il faut inclure d'autres mois dans la saison à plus fort risque, ou s'il faut tenir compte de ce mois lorsqu'il est assez éloigné des autres mois à gradex et moyennes forts...

• ...

En fait, tous ces problèmes peuvent en partie être résolus par une très bonne connaissance du site. Il va sans dire que cette connaissance ne peut s'acquérir qu'au fil du temps, et qu'elle sera toujours incomplète pour un domaine aussi important que les Alpes.

Une autre solution consiste à définir *une seule saison par pas de temps pour l'ensemble des stations* (cf. § II.2.3). C'est ce qui a été fait par SLIMANI (1985) dans les Cévennes et par LABORDE (1984) en Lorraine. Cela revient à négliger le fait que certaines stations de par leur situation géographique réagissent différemment des autres : toutes les stations sont traitées de la même façon.

Enfin, nous étudierons la possibilité de délimiter des régions sur le domaine. Alors pour chaque pas de temps, *une saison unique sera définie pour chaque région* (cf. § II.2.4).

L'échantillon des maxima mensuels saisonniers sera pris en compte pour l'estimation des précipitations extrêmes (par exemple, si la saison à plus fort risque comprend 4 mois, l'échantillon est constitué, pour chaque année connue, de 4 maxima mensuels). Cela évite les problèmes d'échantillonnage rencontrés si l'on ne considère qu'un maximum par an (maximum saisonnier). Ainsi, les ajustements sont plus robustes. C'est aussi une manière d'éviter les problèmes de horsains.

### **II.2.2.Définition de saison à plus fort risque pour chaque pas de temps et pour chaque station**

L'idée de départ est basée sur le fait que, en un endroit donné et pour chaque mois, l'échantillon des maxima mensuels<sup>3</sup> correspondant s'ajuste bien à une loi de Gumbel. Les paramètres des lois ajustées sont les gradex mensuels et modes mensuels (12 pour un pas de

---

<sup>3</sup> Par exemple, pour le pluviographe X dont la période d'observation va de 1960 à 1989 (30 ans de données), l'échantillon des maxima mensuels de janvier est constitué de 30 valeurs (sauf valeurs manquantes) : le maximum de janvier de 1960, le maximum de janvier de 1961, ... le maximum de janvier de 1989.

temps et une station). Les estimations sont faites par la méthode des moments, donc le mode se déduit du gradex et de la moyenne de l'échantillon (cf. (II - 7)) : la moyenne mensuelle.

Après une étude des relations entre moyennes et gradex mensuels, la définition d'une saison à plus fort risque à partir de ces deux paramètres sera décrite. La sensibilité de cette définition au nombre d'années d'observation sera étudiée, ainsi que la sensibilité de l'estimation des pluies extrêmes à la détermination de la saison à plus fort risque.

Cette approche débouche sur la première méthode appliquée pour le calcul des pluies extrêmes : la définition *d'une saison à plus fort risque pour chaque pas de temps et chaque station*.

### II.2.2.1.Relation gradex mensuels / moyennes mensuelles

Les gradex mensuels et les moyennes mensuelles sont évalués grâce aux échantillons des maxima mensuels du mois considéré. Pour chaque pas de temps et chaque station, 12 valeurs de gradex mensuels (un par mois) et 12 valeurs de moyennes mensuelles sont connues.

Les coefficients de détermination  $R^2$  entre ces deux variables pour les différents pas de temps ont été étudiés (cf. Tableau II 3). Ces coefficients sont calculés à partir de 1080 observations pour les pas de temps inférieurs à 24 h (90 pluviographes  $\times$  12) et à partir de 6636 observations à 24 h (553 postes  $\times$  12).

En général, les variables sont bien corrélées entre elles, c'est-à-dire que pour un pas de temps donné et pour chaque mois, l'écart type et la moyenne des échantillons des maxima mensuels sont très liés. Les coefficients de détermination varient entre 0.68 (1 h) et 0.51 (24 h). Ainsi, la corrélation diminue lorsque le pas de temps augmente.

|       | 1 h  | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h | 24 h |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| $R^2$ | 0.68 | 0.61 | 0.57 | 0.54 | 0.52 | 0.51 |

*Tableau II 3 : Coefficients de détermination  $R^2$  entre les gradex mensuels et les moyennes mensuelles pour les 6 pas de temps (6636 observations pour 24 h , 1080 observations sinon)*



### II.2.2.2.Détermination des saisons à plus fort risque

La détermination des saisons peut être faite grâce à la relation qui existe entre les gradex mensuels et les moyennes mensuelles. En effet, ces variables coïncident au cours de l'année et deux grands ensembles de mois peuvent être déterminés (cf. exemple Figure II 1) :

- le premier comprend les mois consécutifs à gradex et à moyennes les plus faibles
- et les mois consécutifs à gradex et à moyennes les plus forts définissent la « **saison à plus fort risque** ».

Cependant, il semble ardu de délimiter avec précision la saison à plus fort risque : où commence-t-elle et où s'arrête-t-elle ?

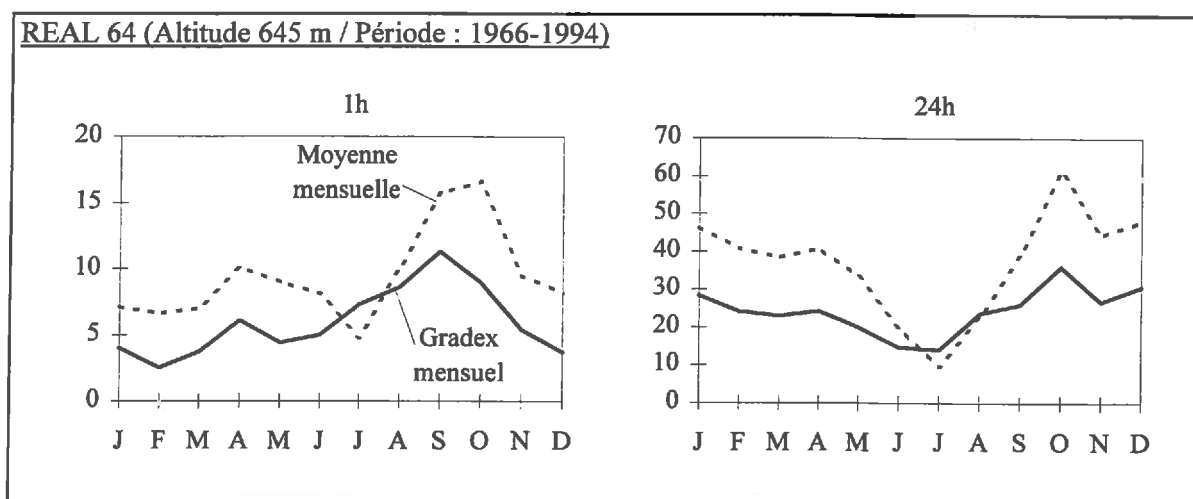


Figure II 1 : Pour un pluviographe, représentation des gradex et moyennes mensuels (mm par pas de temps) en fonction des mois (exemple des pas de temps de 1 h et 24 h)

Ainsi, pour déterminer ces saisons de manière systématique (et automatique), les gradex mensuels et les moyennes mensuelles ont été centrés et réduits. Ce calcul se fait suivant le schéma 1 :

- la moyenne  $M(g)$  et l'écart type  $s(g)$  des gradex sont obtenus à partir des 12 valeurs de gradex mensuels connus,
- pour chaque mois, le gradex mensuel centré réduit est obtenu à partir du gradex mensuel, de la moyenne  $M(g)$  et de l'écart type  $s(g)$ .

La démarche est la même pour les moyennes mensuelles.



Pour un pas de temps et une station :

|                   | <i>gradex mensuels</i> | <i>moyennes mensuelles</i> | <b>gradex mensuels<br/>centrés réduits</b> | <b>moyennes mensuelles<br/>centrées réduites</b> |
|-------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Janvier           | $g_J = g_1$            | $m_J = m_1$                | $\frac{g_J - M(g)}{s(g)}$                  | $\frac{m_J - M(m)}{s(m)}$                        |
| Février           | $g_F = g_2$            | $m_F = m_2$                | $\frac{g_F - M(g)}{s(g)}$                  | $\frac{m_F - M(m)}{s(m)}$                        |
| .                 | .                      | .                          | ..                                         | ..                                               |
| .                 | .                      | .                          |                                            |                                                  |
| Décembre          | $g_D = g_{12}$         | $m_D = m_{12}$             | $\frac{g_D - M(g)}{s(g)}$                  | $\frac{m_D - M(m)}{s(m)}$                        |
| <i>moyenne</i>    | $M(g)$                 | $M(m)$                     |                                            |                                                  |
| <i>écart type</i> | $s(g)$                 | $s(m)$                     |                                            |                                                  |

avec  $M(g) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} g_i$  et  $s(g) = \sqrt{\frac{1}{12-1} \sum_{i=1}^{12} [g_i - M(g)]^2}$  (de même pour  $M(m)$  et  $s(m)$ )

Schéma 1 : Détermination des gradex et moyennes mensuels centrés réduits

Ces deux variables sont représentées en fonction des mois pour chaque pas de temps et chaque station (cf. exemple Figure II 2). Cela correspond à 6 graphes pour un pluviographe et un seul pour un pluviomètre.

A partir de ces graphes (Figure II 2), la saison à plus fort risque est définie comme étant constituée par les mois consécutifs où les deux variables centrées réduites sont positives, ou l'une très fortement positive et l'autre faiblement négative. Pour l'exemple de la Figure II 2, les saisons à plus fort risque sont :

- pour 1 h, 2 h, 3 h et 6 h : août - novembre,
- pour 12 h et 24 h : septembre - janvier.

REAL 64 (Altitude 645 m / Période : 1966-1994)

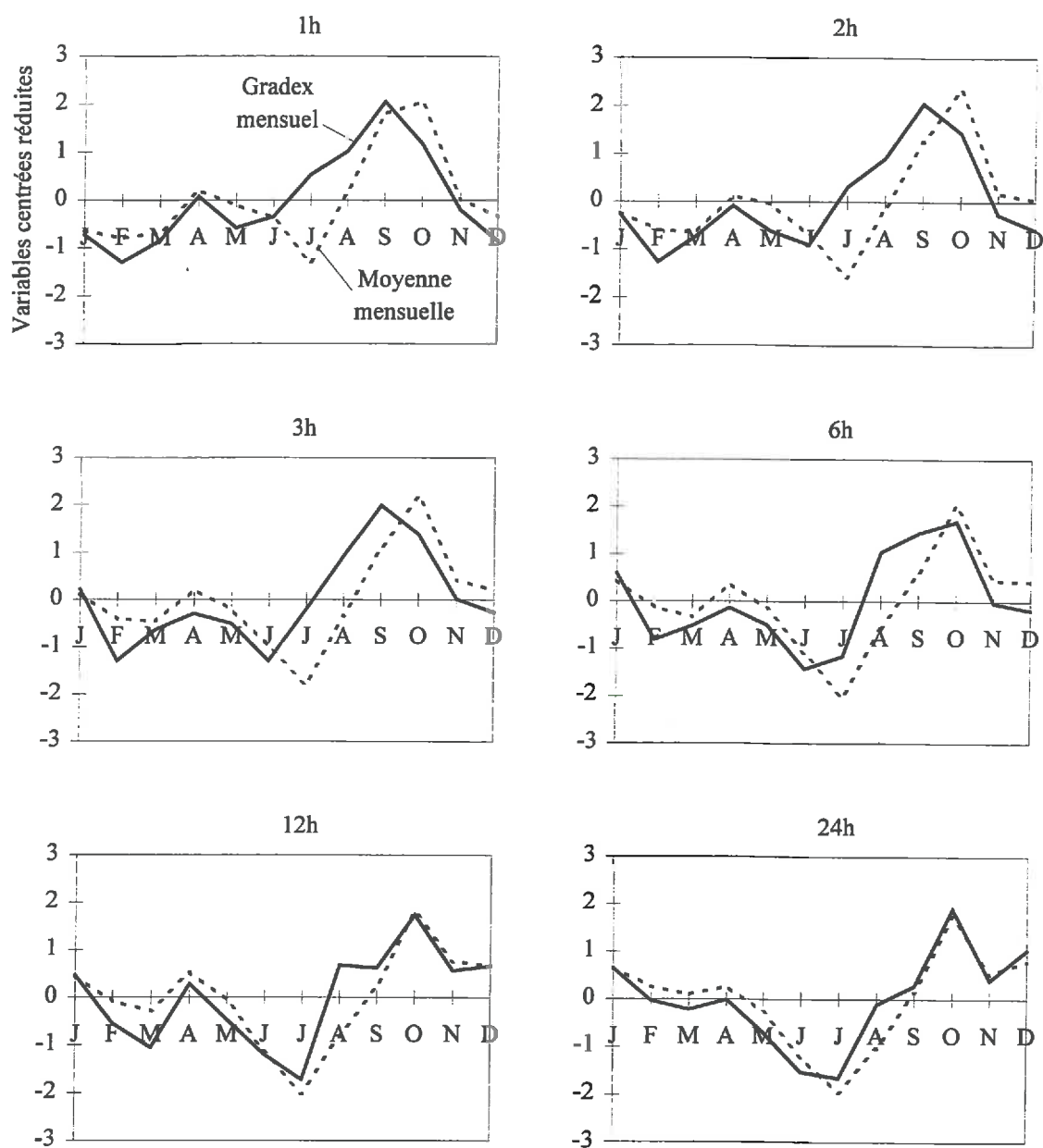


Figure II 2 : Pour un pluviographe, représentation des gradex et des moyennes mensuels centrés réduits en fonction des mois pour les 6 pas de temps

### II.2.2.3. Etude de la sensibilité du calcul des pluies extrêmes au nombre d'années de données disponibles

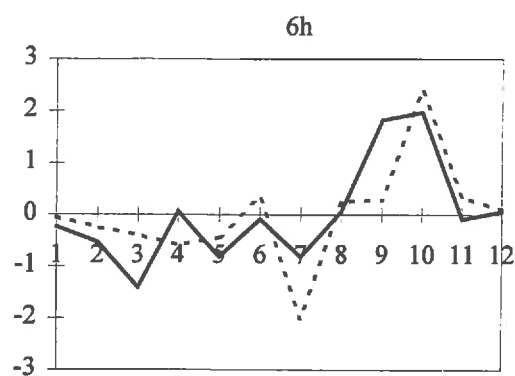
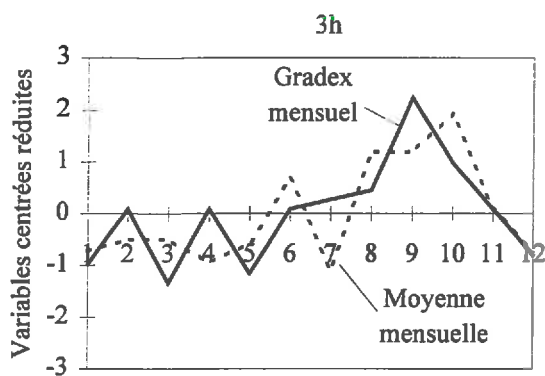
L'influence du nombre d'années de données sur la détermination des saisons est importante, puisque pour de nombreuses stations, la période d'observation est courte (entre 10 et 15 ans).

Pour étudier l'impact du nombre d'années disponibles, nous avons diminué la longueur des séries de quelques stations longues (La Condamine : 42 ans, Pelvoux Les Claux : 39 ans, ...), de manière à créer des stations plus courtes en ne prenant que 20 ans ou 10 ans des données initiales. Pour ces nouvelles stations, les saisons sont définies comme précédemment (cf. exemple Figure II 3).

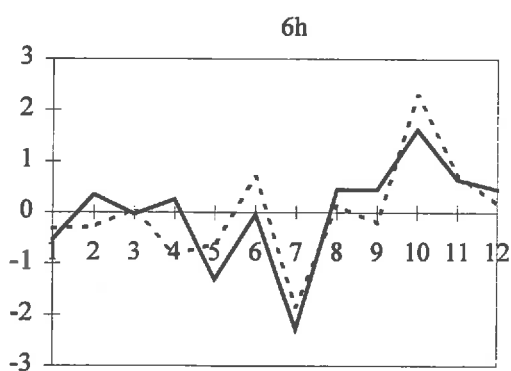
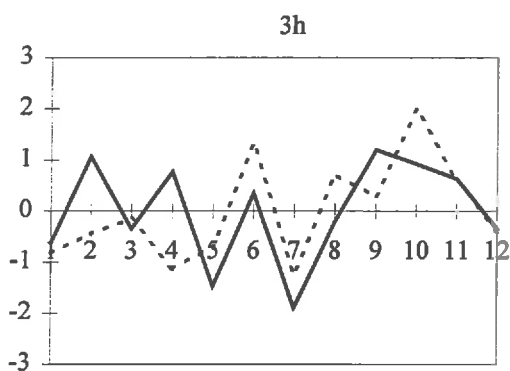
Pour un nombre d'années supérieur à 20 ans, les saisons de la station initiale sont bien retrouvées. Par contre, pour 10 ans de données seulement, il s'avère parfois difficile de retrouver les saisons de départ. Pour certains pas de temps, il est même impossible de définir de manière systématique une saison, puisqu'aucun groupe de mois ne se détache vraiment des autres (cf. Figure II 3 : Pelvoux Les Claux 1952-1961).

Finalement, pour les stations dont la période d'observation est supérieure à 20 ans, la définition de la saison à plus fort risque ne pose pas de problème a priori. Cependant, pour des durées inférieures, la définition n'est pas toujours évidente et surtout elle ne correspond pas forcément à la réalité : c'est le problème majeur rencontré dans la définition d'une saison pour chaque pas de temps et chaque station.

PELVOUX LES CLAUX (1952-1990)



PELVOUX LES CLAUX (1952-1971)



PELVOUX LES CLAUX (1952-1961)

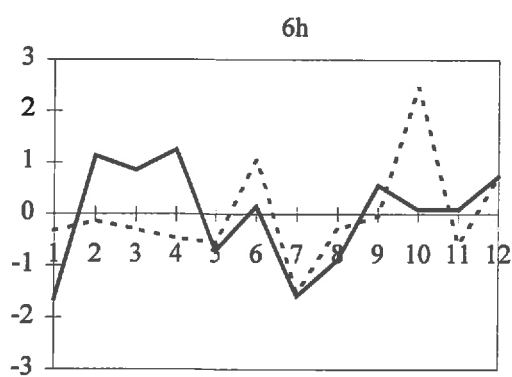
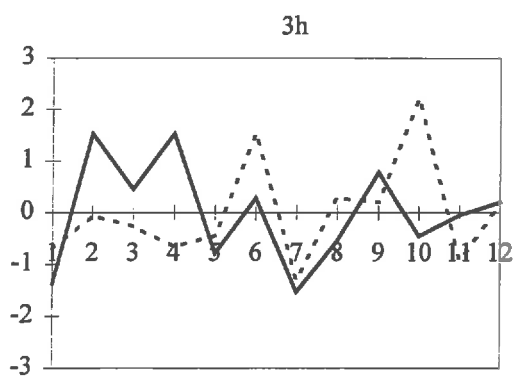


Figure II 3 : Station de Pelvoux Les Claux : exemple de graphes obtenus (gradex et moyennes mensuels centrés réduits en fonction du mois) en diminuant la longueur des séries de données

#### II.2.2.4. Etude de la sensibilité du calcul des pluies extrêmes à la définition de la saison à plus fort risque

Dans de nombreux cas, les saisons ne sont pas faciles à définir : par exemple, pour certains mois, une des deux variables (gradex mensuel ou moyenne mensuelle centré réduit) peut être positive et l'autre négative.

- Ce mois peut se trouver au milieu de mois pour lesquels les deux variables sont positives. Dans ce cas, il sera englobé dans la saison à plus fort risque.
- Ce mois peut aussi être au début ou en fin de la saison telle que nous la définirions, faut-il alors l'inclure ?

Pour répondre à cette dernière question, nous avons défini plusieurs saisons dont les mois de début et de fin varient légèrement, pour chaque pas de temps et quelques pluviographes (Arvieux : 12 ans de données, Briançon : 39 ans, Lassera : 21 ans). Par exemple, pour Briançon, les deux saisons à plus fort risque, de juin à septembre et de juin à octobre, ont été comparées pour 1 h. Pour chacune des saisons, les valeurs de pluies extrêmes ont été estimées en considérant les échantillons des maxima mensuels saisonniers.

De manière générale, les différences entre estimations sont inférieures à 10 %, ce qui reste tout à fait acceptable.

De plus, elles diminuent avec le temps de retour. En effet, les mois que l'on hésite à inclure dans la saison à plus fort risque sont des mois dont les maxima mensuels sont plutôt faibles par rapport aux mois pour lesquels gradex et moyennes mensuels centrés réduits sont positifs. Ils se trouvent donc plutôt au début des distributions empiriques et vers les temps de retour forts, les distributions sont inchangées.

En définitive, ce résultat est intéressant puisque les temps de retour qui nous occupent sont ceux supérieurs à 10 ans. Pour ceux-ci, le fait d'inclure ou non un mois « douteux » n'a pas d'influence importante.

### II.2.2.5. Conclusion et première méthode appliquée

Nous avons établi une façon systématique de définir une saison à plus fort risque, quels que soient le pas de temps et la station. Lorsque le nombre d'années connues est faible, cette définition peut être difficile et ne pas représenter la réalité. Cependant, l'ajout ou le retrait d'un mois douteux dans la saison n'a pas une influence déterminante sur l'estimation des pluies extrêmes.

Ainsi, la première méthode envisagée pour l'estimation des quantiles est de considérer les échantillons des maxima mensuels de la saison à plus fort risque pour chaque pas de temps et chaque station. Dans cette approche, si le graphe des variables centrées réduites ne montre pas un ensemble de mois consécutifs où les deux variables sont simultanément positives, la station la plus proche sera considérée pour définir la saison.

### II.2.3. Définition d'une saison à plus fort risque unique pour chaque pas de temps

Définir pour chaque station et chaque pas de temps une saison à plus fort risque semble très anecdotique. En effet, cela néglige l'homogénéité spatiale des pluies. Ainsi, une saison unique sur les Alpes pour chaque pas de temps a été considérée, ce qui simplifie au maximum le problème. Cette définition se base sur la fluctuation de l'ensemble des gradex mensuels (toutes stations confondues).

Pour chaque durée, un certain nombre de valeurs de gradex mensuels est disponible pour chaque mois :

- 90 gradex par mois pour les pas de temps inférieurs à 24 h (pluviographes)
- et 553 gradex pour 24 h (pluviomètres et pluviographes).

Pour visualiser les fluctuations de l'ensemble de ces valeurs, nous avons représenté, en fonction du mois (cf. Figure II 4) :

- les déciles inférieur (valeur non dépassée dans 10 % des cas) et supérieur (valeur non dépassée dans 90 % des cas)
- et la médiane (valeur non dépassée dans 50 % des cas).

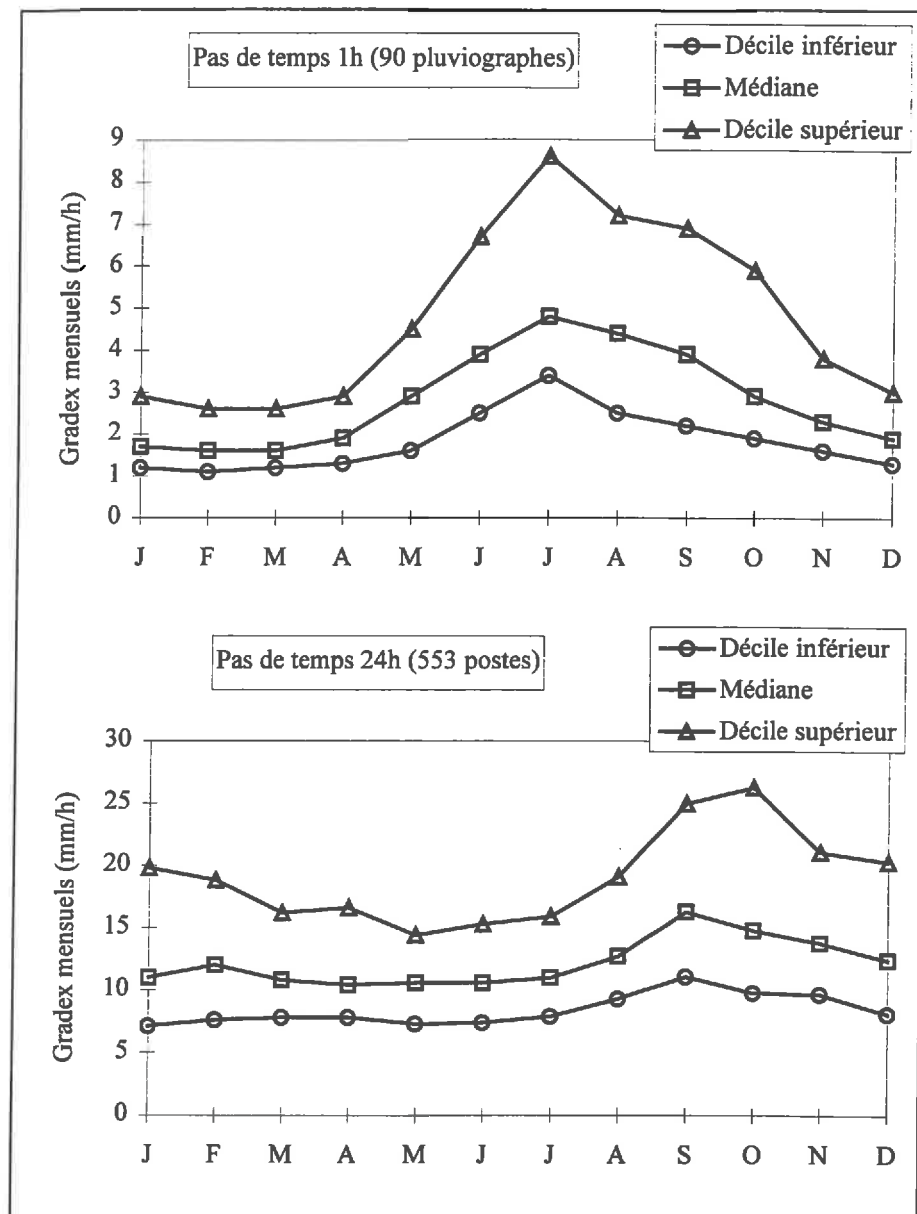


Figure II 4 : Représentation des déciles inférieur et supérieur et de la médiane des gradex mensuels en fonction des mois (exemple des pas de temps de 1h et 24 h)

Pour tous les pas de temps, les déciles obtenus présentent des variations saisonnières qui permettent la définition d'une saison par pas de temps : ce sont les mois consécutifs dont les 3 déciles ont les valeurs les plus fortes (cf. Tableau II 4). Par exemple pour 1 h, les mois de juin à septembre constituent cette saison.

| Pas de temps | Saison à plus fort risque |
|--------------|---------------------------|
| 1 h          | juin à septembre          |
| 2 h          | juin à octobre            |
| 3 h          | juin à octobre            |
| 6 h          | juillet à octobre         |
| 12 h         | août à novembre           |
| 24 h         | août à novembre           |

*Tableau II 4 : Définition d'une saison à plus fort risque pour chaque pas de temps*

Finalement, la deuxième méthode d'estimation des précipitations extrêmes consiste à considérer une saison unique pour tous les postes et pour chaque durée. Cette méthode est beaucoup plus simpliste que la précédente et présente de ce fait des inconvénients majeurs.

En effet, pour certaines stations, on peut « perdre » un orage en changeant de pas de temps. Par exemple, la station d'Eybens enregistre 2 gros épisodes, l'un au mois de juillet 1958 (66 mm/1 h, 116.5 mm/2 h), l'autre au mois de juillet 1964 (73 mm/1 h). Avec les saisons choisies pour les pas de temps 12 h et 24 h, ces deux épisodes ne font plus partie des échantillons, alors qu'ils sont importants.

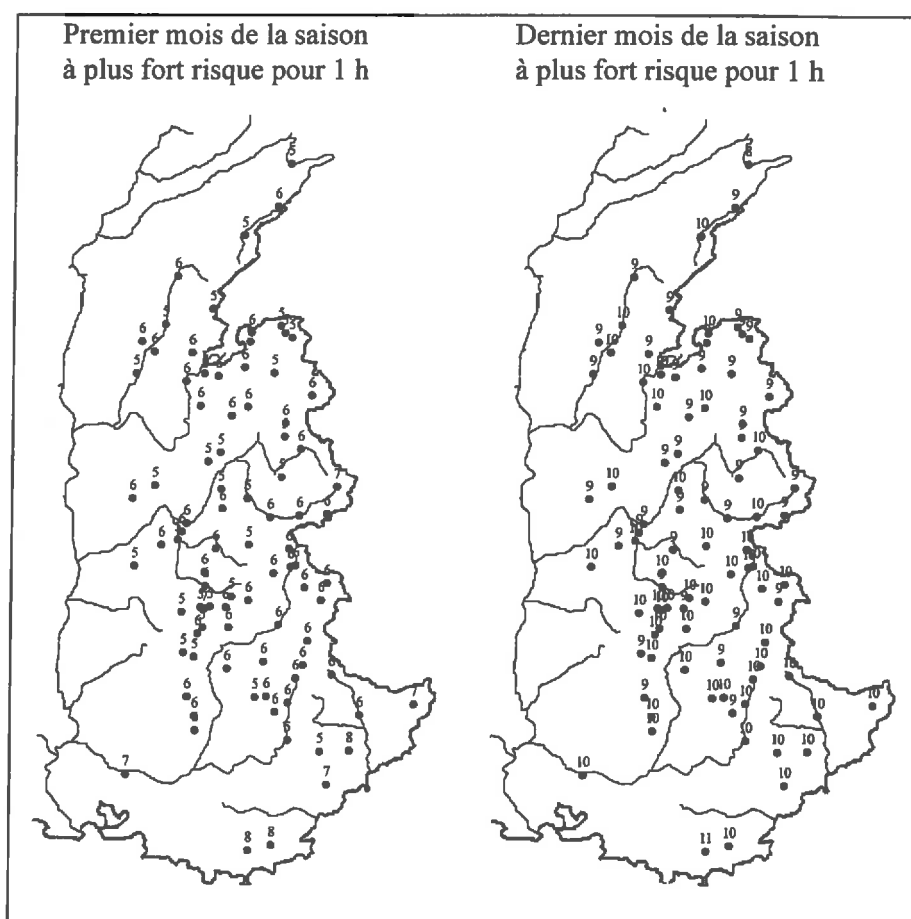
D'autre part, pour certaines stations, nous passons totalement à côté des saisons à plus fort risque. Par exemple, la station de Coursegoules a une saison à plus fort risque pour 1 h qui s'étend de août à novembre. Avec la saison définie ici, les pluies horaires sont sous-estimées.

#### **II.2.4.Définition de saisons à plus fort risque par région pour chaque pas de temps**

La définition d'une seule saison par pas de temps pour tout le domaine peut être remise en question pour certaines stations. En effet, les précipitations intenses d'une durée donnée ne se produiront pas forcément à la même période de l'année au Sud des Alpes et au Nord. Partant du principe que deux stations proches sont soumises aux mêmes types d'événements à la même période, des régions ont été délimitées, au sein desquelles les saisons sont les mêmes pour un pas de temps.



La méthode consiste à représenter, pour chaque pas de temps, les cartes des mois de début et de fin de la saison à plus fort risque à partir des pluviographes et des pluviomètres disponibles (cf. exemple Figure II 5). Pour chaque station, la saison considérée est celle définie en § II.2.2, c'est-à-dire à partir des gradex mensuels et des moyennes mensuelles. Le but est de définir des régions au sein desquelles les mois de début et de fin de saison sont similaires. Cette démarche s'est appuyée en particulier sur les stations de plus de 20 ans de données. En effet, si une station courte présentait une saison différente de stations qui l'entourait, elle n'était pas prise en compte.



*Figure II 5 : Exemple de cartes de début et de fin de saison à plus fort risque (durée de 1 h)*

Ces cartes ont conduit à mettre en évidence 10 régions au sein desquelles la saison à plus fort risque dépend du pas de temps considéré (cf. Figure II 6 et Tableau II 5). Pour les zones dépourvues de pluviographes (Sud des Alpes), seule la saison à 24 h a pu être déterminée.

En fait, pour les pas de temps faibles, c'est-à-dire **jusqu'à 3 h**, il y a pratiquement une **saison unique** sur tout le domaine : la seule région qui se distingue est la région ① (Jura). Par contre, à partir de 6 h, les régions deviennent distinctes.

A 24 h, la saison à plus fort risque se décale

- de l'été au Nord (juin-septembre pour la région ①),
- à la fin de l'année au Sud (septembre-février pour la région ⑩).

Cette remarque avait déjà été avancée par CLERC (1988), dans une étude sur quelques stations des Alpes.

D'autre part, DESBORDES et al. (1994) montrent que, dans la région méditerranéenne, les principaux épisodes intenses se sont produits en automne, quelle que soit leur durée. C'est ce que traduisent les saisons à plus fort risque définies pour les régions ⑨ et ⑩. De même, JACQ (1994) note une nette prédominance des mois d'automne (septembre, octobre, novembre), ainsi qu'un maxima secondaire en janvier et février (région ⑩).

Pour ce qui concerne les Préalpes du Nord (étude sur le TPG), WATREMEZ (1996) note que les fortes pluies à pas de temps faibles (1 h, 2 h et 3 h) sont plus abondantes en début et en fin de période estivale : de juin à septembre en général. Pour des durées plus grandes, les pluies se rassemblent aux mois de juillet et août. Ces remarques rejoignent nos constatations sur la région ⑦, puisque les saisons définies englobent les mois cités par WATREMEZ (1996).

Par ailleurs, ce découpage en régions a été fait uniquement sur la base des cartes des mois de début et de fin de saison à plus fort risque. Cependant, le tracé des principaux fleuves montre que, au Nord, ce découpage se rapproche beaucoup de celui des principaux massifs alpins. En effet, la région ③ correspond au Jura et la région ④ au Chablais. La région ⑤ regroupe les vallées de la Tarentaise et de la Maurienne. Le long de la frontière italienne, la région ⑥ semble être celle touchée par les retours d'Est.

Au sud, par contre, le découpage est plus simple et semble conditionné par la présence de la Durance (opposition entre les régions ⑦ et ⑧).

Enfin, ce découpage rejoint celui de GRARD et al. (1969), mais en étant beaucoup plus affiné, puisque cette étude ne divisait les Alpes qu'en 3 grandes régions à saisons à plus fort risque distinctes pour 24 h.

|          | 1 h  | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h | 24 h |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| Région ① | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-9  | 6-9  |
| Région ② |      |      |      |      |      | 6-11 |
| Région ③ | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-11 | 8-11 | 8-2  |
| Région ④ | 5-9  | 5-9  | 5-9  | 6-9  | 5-10 | 5-10 |
| Région ⑤ | 6-10 | 6-10 | 6-11 | 6-11 | 8-2  | 9-2  |
| Région ⑥ | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-11 | 7-11 | 9-2  |
| Région ⑦ | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-11 | 8-11 |
| Région ⑧ | 6-10 | 6-10 | 6-10 | 6-11 | 7-11 | 8-12 |
| Région ⑨ |      |      |      |      |      | 9-11 |
| Région ⑩ | 8-11 | 8-11 | 8-11 | 8-11 | 9-2  | 9-2  |

Tableau II 5 : Définition des saisons à plus fort risque pour chacune des 10 régions

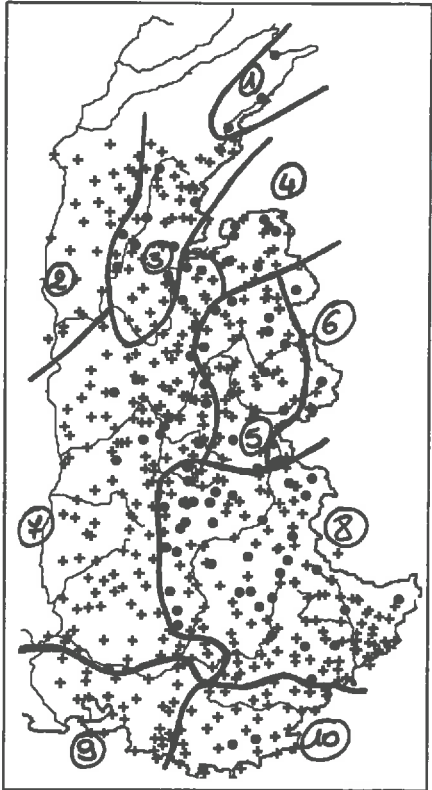


Figure II 6 : Carte des régions adoptées pour la définition des 10 régions au sein desquelles les saisons à plus fort risque sont fonction du pas de temps

### II.2.5.Comparaison des différentes méthodes d'estimation des précipitations extrêmes et choix d'une méthode

Le but de ce paragraphe est de comparer les estimations des valeurs de pluies extrêmes par les 3 méthodes proposées :

- méthode 1 : estimation des pluies extrêmes en considérant des saisons à plus fort risque par station et par pas de temps,

- méthode 2 : estimation des pluies extrêmes en considérant des *saisons à plus fort risque uniques pour chaque pas de temps*,
- méthode 3 : estimation des pluies extrêmes en considérant des *saisons à plus fort risque par région*.

Dans chaque cas, les pluies extrêmes ont été estimées par ajustement de Gumbel (méthode des moments) sur les échantillons des maxima mensuels de la saison considérée.

La comparaison de ces 3 méthodes débouchera sur le choix d'une méthode pour l'estimation finale des précipitations extrêmes.

Pour comparer les résultats des méthodes envisagées, un écart a été calculé pour chaque pas de temps  $t$  et chaque temps de retour  $T$ . Il est du type :

$$E = \frac{P_i - P_j}{(P_1 + P_2 + P_3)/3} \text{ avec } i,j=1,3 \quad (II - 25)$$

où  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  sont les valeurs de pluies (pour le pas de temps  $t$  et le temps de retour  $T$  donnés) calculées par les méthodes 1, 2 et 3.

Cette comparaison a uniquement été faite pour les pluviographes (vu l'importance des données à manipuler pour les pluviomètres). La Figure II 7 montre la comparaison des pluies extrêmes estimées par les méthodes 2 (saison unique) et 3 (saison par région), et la Figure II 8 montre la comparaison entre les méthodes 3 (saison par région) et 1 (saison par station).

Dans le premier cas, les résultats donnent des écarts parfois élevés (jusqu'à 27 %). Cela était prévisible, puisque le fait de définir une seule saison sur toutes les Alpes semble trop simple et omet l'étendue du domaine, au moins pour les durées longues.

Cependant, une majorité des écarts est inférieure à 10 % (cf. Figure II 7). C'est pour 24 h que les écarts sont les plus forts : dans 20 % des cas l'écart est supérieur à 10 %. Pour 1 h, les écarts ne dépassent 10 % que dans 6 % des cas. En effet, pour 1 h, l'étude de saisons par région a mis en évidence une saison unique au sein de notre domaine (ou presque, cf. § II.2.4), ce qui n'est pas le cas pour 24 h.

## tre II : Estimation des valeurs de pluies extrêmes pour les différents pas de temps blème des saisons à plus fort risque

Les écarts entre les estimations par les méthodes 3 (saison par région) et 1 (saison par station) ne dépassent pas 17 % (cf. Figure II 8).

Les écarts maximaux sont à nouveau obtenus pour les pas de temps forts : 12 h et 24 h. Mais, les écarts dépassent 10 % dans seulement 8 % des cas pour 24 h et 1 % des cas pour 1 h. Les deux évaluations sont donc assez proches l'une de l'autre. En fait, les écarts obtenus sont faibles devant les intervalles de confiance sur les quantiles.

Parfois, les estimations par la méthode 3 (saison par région) donnent des valeurs supérieures à celles par la méthode 1 (saison par station), ce qui peut être étonnant a priori. En fait, pour la définition des saisons par région nous avons toujours considéré des saisons les plus étendues possibles pour ne pas « rater » un mois important. Alors que dans la définition des saisons par station, nous n'avons pris que les mois les plus importants, c'est-à-dire ceux pour lesquels les deux variables gradex mensuels et moyennes mensuelles centrés réduits étaient simultanément positives. Ainsi, des mois où les gradex étaient forts alors que les moyennes étaient faibles (ou inversement) ont pu être éliminés.

De plus, pour le pas de temps de 24 h, il est parfois impossible de définir de façon objective les saisons à plus fort risque pour une station. Alors la saison de la station la plus proche a été considérée, ce qui ne certes élimine parfois quelques valeurs fortes.

Pour conclure, il existe de grandes différences entre les estimations par la méthode 2 (saison unique) et les deux autres. Cela semble logique, puisque le fait de définir une saison sur tout le domaine pour chaque pas de temps ne prend pas du tout en compte la variabilité spatiale des pluies. Cette méthode est donc à rejeter pour un domaine aussi grand que les Alpes.

Les méthodes 1 (saison par station) et 3 (saison par région) sont quasiment équivalentes. Cependant, le fait de définir une saison pour chaque station est trop anecdotique et néglige le fait que deux stations proches sont soumises aux mêmes types de temps.

**Finalement, la définition de saisons par région est la technique retenue : c'est celle qui prend en compte à la fois la variabilité spatiale des pluies dans un domaine aussi grand que les Alpes et une cohérence spatiale à échelle plus fine.**

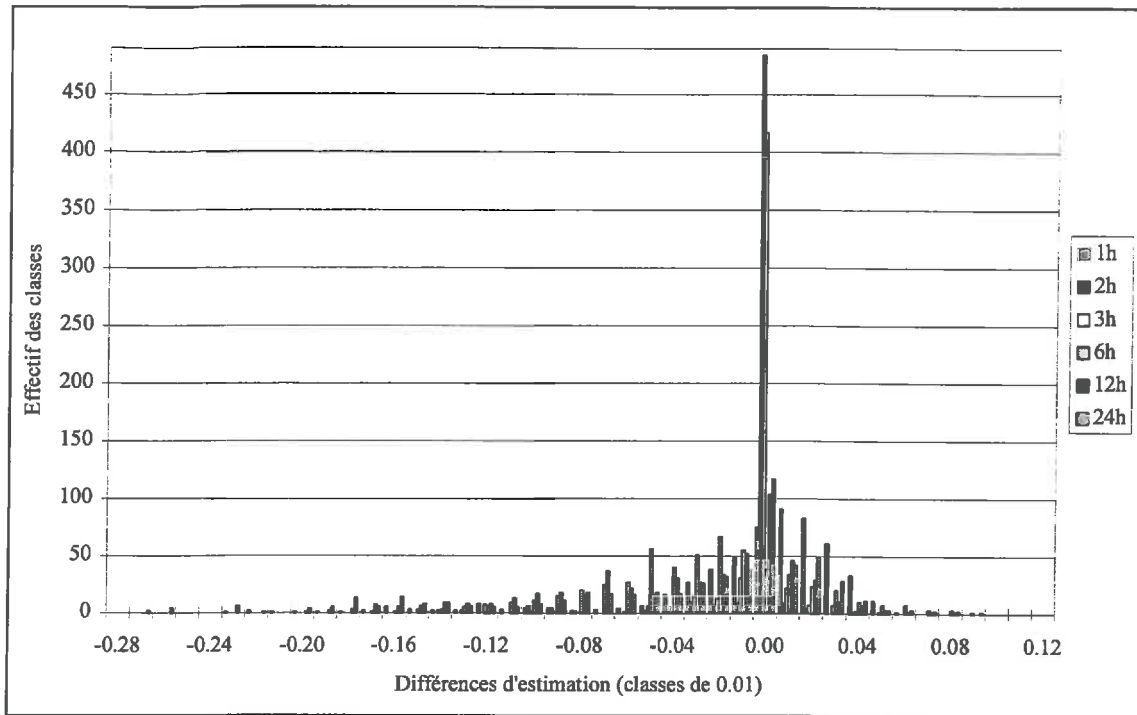


Figure II 7 : Histogramme des écarts : comparaison entre les estimations par la méthode 2 (saison unique) et celles par la méthode 3 (saison par région) pour les 6 pas de temps

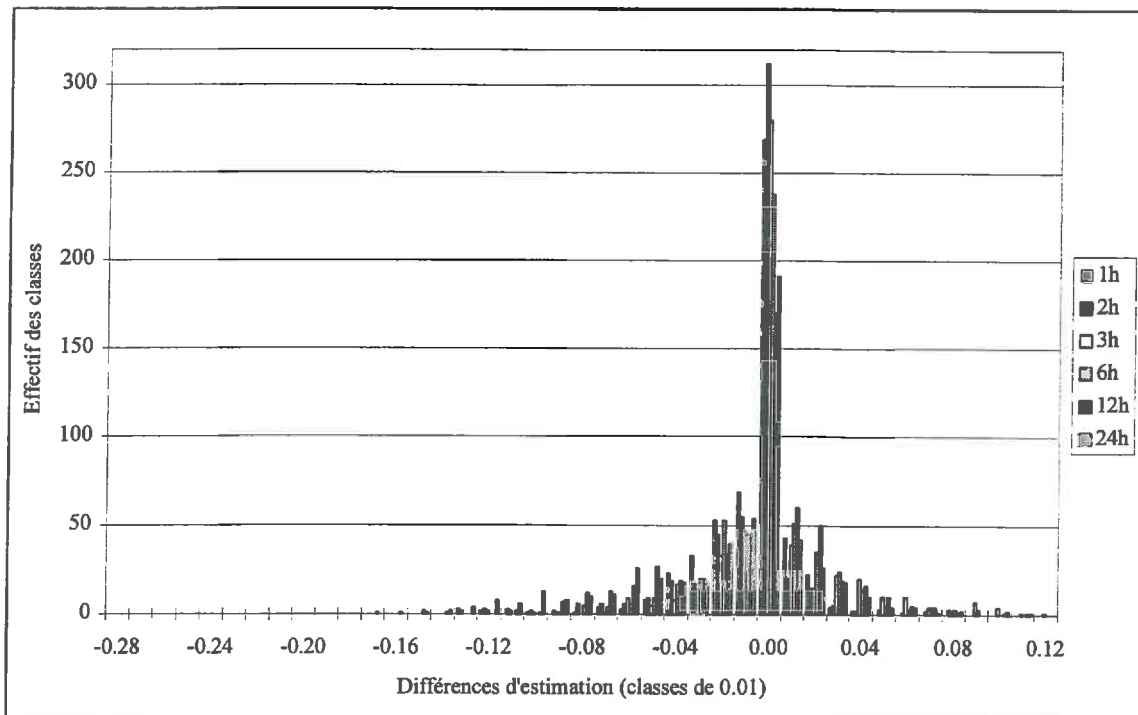


Figure II 8 : Histogramme des écarts : comparaison entre les estimations par la méthode 3 (saison par région) et celles par la méthode 1 (saison par station) pour les 6 pas de temps

### II.2.6. Estimation des valeurs de pluies extrêmes

Pour les pluviomètres aussi bien que pour les pluviographes, les estimations des pluies extrêmes sont faites par ajustement de Gumbel par la méthode des moments sur les maxima mensuels saisonniers. Cette partie est destinée à décrire les techniques utilisées pour vérifier les estimations faites : assurer une cohérence entre les pas de temps pour les pluviographes, par exemple, et surtout traiter le problème d'éventuels horsains.

#### II.2.6.1. Cas des pluviographes

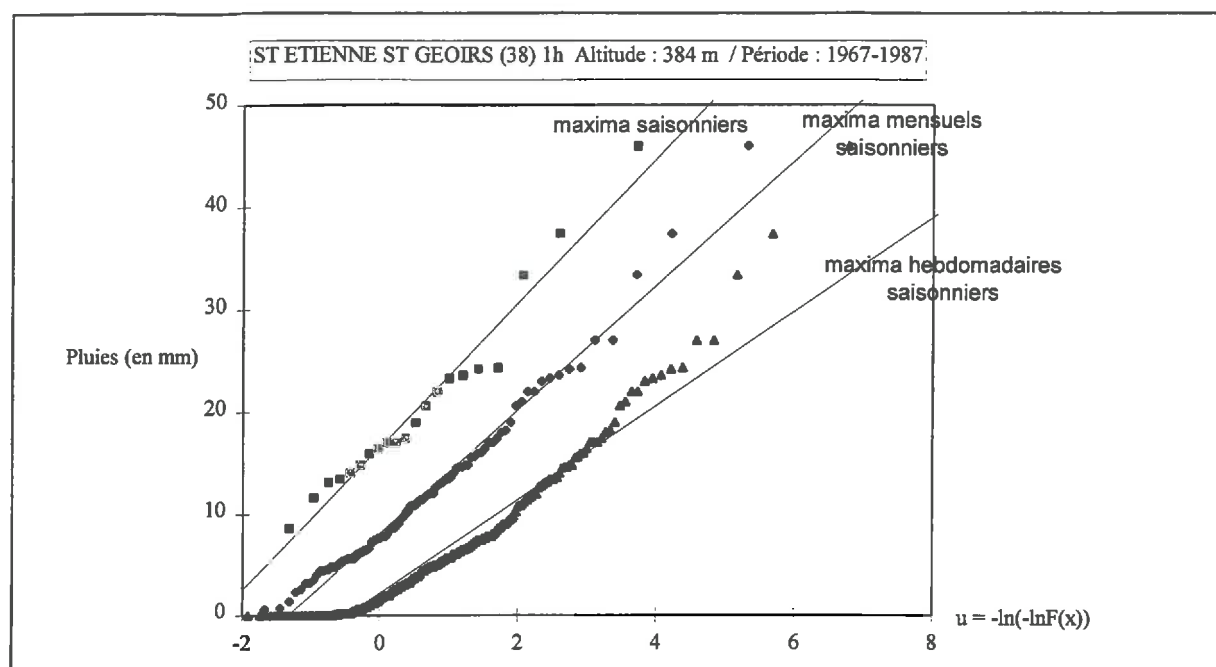
Pour une station et un pas de temps donnés, une fois la saison à plus fort risque définie, les distributions suivantes et leurs ajustements par la méthode des moments sont représentés sur papier de Gumbel (cf. Figure II 9) :

- la distribution des maxima hebdomadaires saisonniers (maxima hebdomadaires des mois de la saison à plus fort risque),
- la distribution des maxima mensuels saisonniers,
- et la distribution des maxima saisonniers.

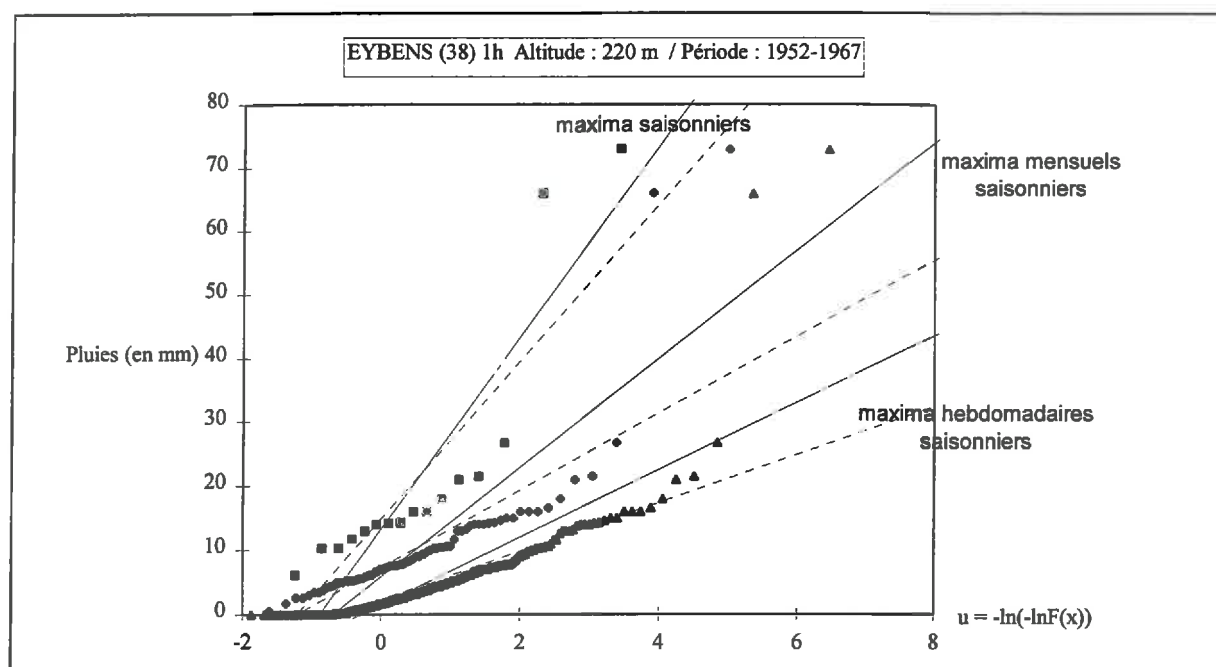
Ce graphe permet de repérer d'éventuelles valeurs aberrantes. Mais surtout, les ajustements de ces distributions doivent être sensiblement parallèles.

Dans le cas de valeurs aberrantes, nous avons rajouté sur le graphe précédent les ajustements de Gumbel par la méthode des moments pondérés (cf. Figure II 10). De cette manière, nous avons éventuellement pris en compte les valeurs de gradex obtenues par la méthode des moments pondérés (cas très rare : uniquement pour la station d'Eybens).





*Figure II 9 : Pour un pluviographe et un pas de temps donné, représentation sur papier de Gumbel des distributions des maxima hebdomadaires saisonniers, des maxima mensuels saisonniers, des maxima saisonniers et des ajustements correspondant (Gumbel par la méthode des moments)*

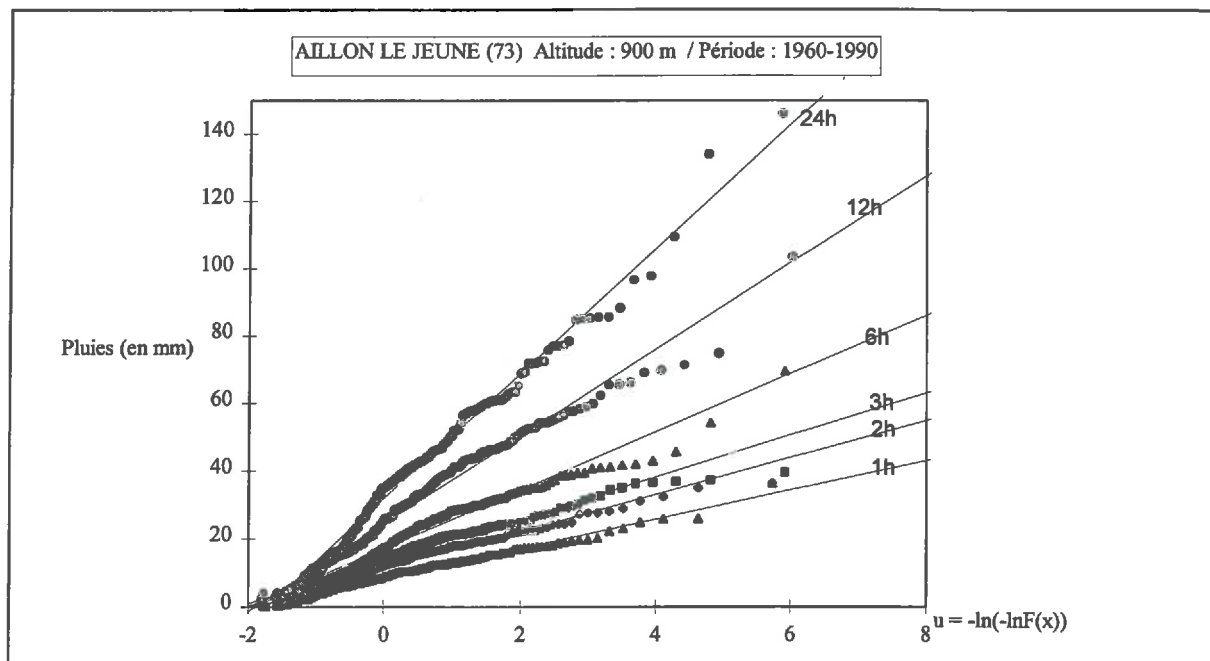


*Figure II 10 : Pour un pluviographe et un pas de temps donnés, représentation sur papier de Gumbel des distributions des maxima hebdomadaires saisonniers, des maxima mensuels saisonniers et des maxima saisonniers et des ajustements : Gumbel par la méthode des moments (droites) et Gumbel par la méthode des moments pondérés (droites en pointillés)*



D'autre part, les échantillons des maxima mensuels saisonniers pour les 6 pas de temps étudiés ainsi que les ajustements de Gumbel par la méthode des moments sont représentés sur papier de Gumbel (cf. Figure II 11). Cette représentation permet de voir la progression normalement observée de 1 h à 24 h. En particulier, dans certains cas, elle met en évidence les problèmes rencontrés entre 2 h et 3 h et dus au dépouillement. Les ajustements de ces deux pas de temps sont parfois très proches et parallèles. Dans ce cas, les valeurs de gradex ont été modifiées pour assurer la cohérence entre les pas de temps, tout en respectant la marge des gradex imposée par les calculs sur les échantillons des maxima hebdomadaires, saisonniers, ou par la méthode des moments pondérés.

Enfin, le dernier graphe représente le gradex en fonction du pas de temps sur papier ln-ln, de manière à contrôler l'adéquation à la loi de Montana (cf. Figure II 12).



*Figure II 11 : Pour un pluviographe, représentation sur papier de Gumbel des échantillons maxima mensuels saisonniers pour les 6 pas de temps et de leurs ajustements (Gumbel par la méthode des moments)*

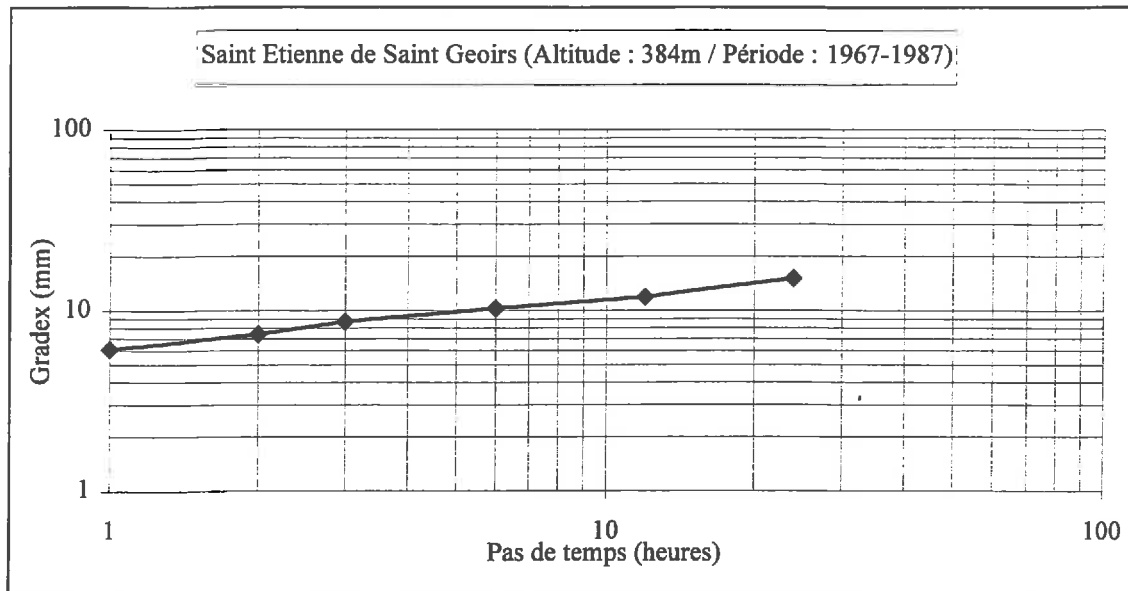


Figure II 12 : Pour un pluviographe, représentation sur papier ln-ln du gradex en fonction du pas de temps

#### II.2.6.2.Cas des pluviomètres

Pour les pluviomètres, seuls les maxima mensuels nous ont été fournis. Ainsi, ce sont les distributions empiriques des maxima saisonniers et des maxima mensuels saisonniers qui ont été tracées. Les échantillons sont ajustés par la loi de Gumbel. Les estimations par la méthode des moments et la méthode des moments pondérés sont comparées (cf. Figure II 13).

Finalement, il n'y a que pour 3 pluviomètres que nous avons opté pour la méthode des moments pondérés : Meyrargues (station n°19 du département 13), Les Pennes-Mirabeau (station n°20 du département 13, cf. Figure II 14), Montmin (station n°13 du département 74).

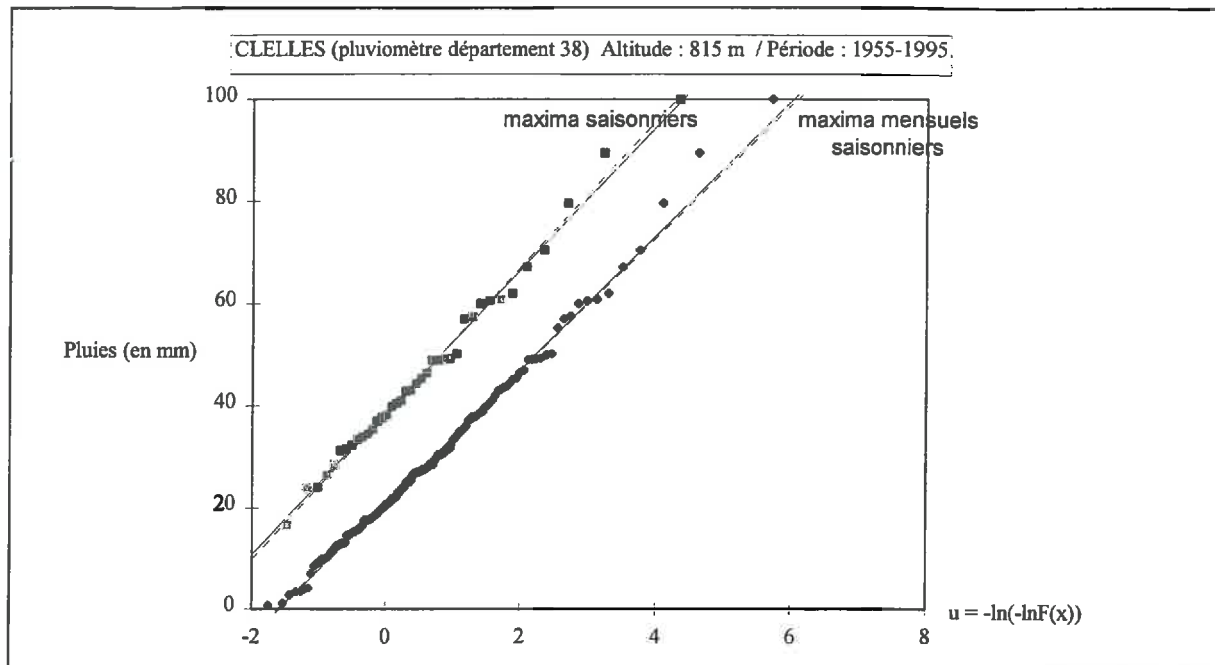


Figure II 13 : Pour un pluviomètre, représentation sur papier de Gumbel des distributions des maxima mensuels saisonniers et des maxima saisonniers et des ajustements : Gumbel par la méthode des moments (droites) et Gumbel par la méthode des moments pondérés (droites en pointillés)

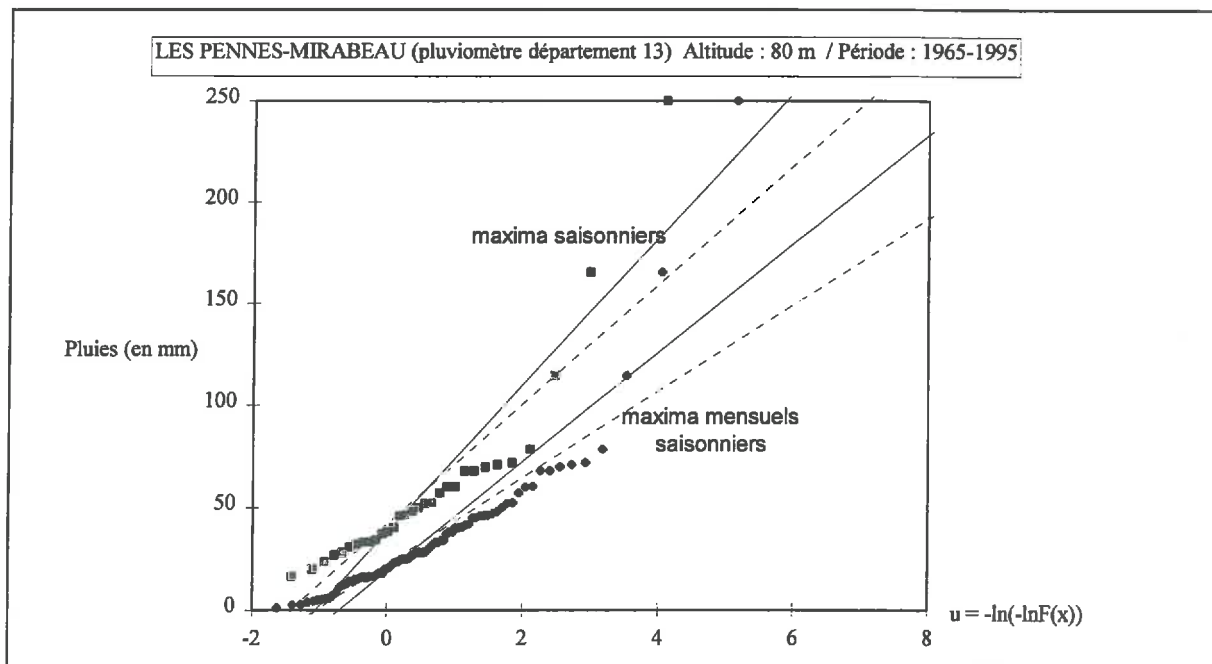


Figure II 14 : Exemple de cas où l'ajustement de Gumbel par la méthode des moments pondérés est choisi : Les Pennes-Mirabeau (station n°20 du département 13)

### II.2.6.3. Statistiques des valeurs de pluies extrêmes

Les Tableau II 6 et Tableau II 7 résument les valeurs de pluies extrêmes calculées en donnant minimum, maximum, moyenne et écart type des différents champs.

Ces valeurs sont à comparer par exemple à celles trouvées sur les Cévennes (THAO, 1993). Dans ce cas, les pluies horaires décennales varient entre 23 mm/h (Thoras) et 72 mm/h (Saint Jean du Gard) ; les pluies décennales journalières varient entre 78 mm/24h (Thoras) et 307 mm/24h (Valleraugue). La région des Cévennes est exposée à des pluies plus intenses que les Alpes françaises.

Les annexes 3 et 4 récapitulent les valeurs de quantiles de pluies calculées pour l'ensemble des stations avec les intervalles de confiance correspondants, les gradex et modes et les coefficients de Montana pour les pluviographes.

|          |            | 1 h                 | 2 h                 | 3 h                   | 6 h                   | 12 h                  | 24 h                  |
|----------|------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| T=10ans  | Minimum    | 12.9<br>Le Chazelet | 17.9<br>Vignotan    | 22.3<br>Vignotan      | 28.5<br>Vignotan      | 39.3<br>Vignotan      | 53.7<br>Scientrier    |
|          | Maximum    | 47.3<br>Forcalquier | 58.2<br>Forcalquier | 67.0<br>Coursegoules  | 97.5<br>Coursegoules  | 128.0<br>Coursegoules | 174.0<br>Coursegoules |
|          | Moyenne    | 25.8                | 32.1                | 37.4                  | 47.8                  | 61.8                  | 83.6                  |
|          | Ecart type | 7.3                 | 8.6                 | 9.7                   | 12.3                  | 15.0                  | 18.5                  |
| T=100ans | Minimum    | 18.3<br>Le Chazelet | 24.8<br>Vignotan    | 30.7<br>Vignotan      | 39.4<br>Vignotan      | 54.9<br>Vignotan      | 75.6<br>Scientrier    |
|          | Maximum    | 70.9<br>Forcalquier | 87.7<br>Forcalquier | 101.2<br>Coursegoules | 147.9<br>Coursegoules | 194.1<br>Coursegoules | 265.5<br>Coursegoules |
|          | Moyenne    | 37.3                | 46.2                | 53.7                  | 68.3                  | 88.9                  | 120.9                 |
|          | Ecart type | 11.3                | 13.4                | 15.1                  | 18.9                  | 22.9                  | 28.6                  |
| gradex   | Minimum    | 2.3<br>Le Chazelet  | 3.0<br>Vignotan     | 3.6<br>Vignotan       | 4.6<br>Vignotan       | 6.6<br>Vignotan       | 9.3<br>Scientrier     |
|          | Maximum    | 10.1<br>Forcalquier | 12.5<br>Forcalquier | 14.6<br>Coursegoules  | 21.5<br>Coursegoules  | 28.1<br>Coursegoules  | 39.0<br>Coursegoules  |
|          | Moyenne    | 4.9                 | 6.0                 | 7.0                   | 8.7                   | 11.5                  | 15.9                  |
|          | Ecart type | 1.7                 | 2.1                 | 2.3                   | 2.9                   | 3.4                   | 4.4                   |

*Tableau II 6 : Statistiques des valeurs de quantiles de pluies extrêmes en mm par pas de temps (90 pluviographes pour les pas de temps de 1 h à 12 h et 553 postes pour 24 h)*

|            | Coefficient de Montana |
|------------|------------------------|
| Minimum    | 0.20 Planche           |
| Maximum    | 0.57 La Joue Du Loup   |
| Moyenne    | 0.36                   |
| Ecart type | 0.09                   |

*Tableau II 7 : Statistiques des coefficients de Montana (90 pluviographes)*

### **II.3.Conclusion**

Les caractéristiques des précipitations extrêmes ont été estimées dans les Alpes françaises pour des pas de temps allant de l'heure à la journée :

- par ajustement de Gumbel, par la méthode des moments -ou des moments pondérés, en cas de horsains-,
- sur les échantillons de maxima mensuels saisonniers.

En effet, nous avons montré que les différentes méthodes d'estimation du gradex par la loi de Gumbel sont équivalentes. C'est donc la méthode des moments qui est utilisée, vu sa simplicité. Par contre, la méthode des moments pondérés est peu influencée par la présence éventuelle de horsains, ce qui n'est pas le cas de la méthode des moments. C'est pourquoi, lorsque les échantillons présentent des horsains, dont l'exactitude ne peut être vérifiée, la méthode des moments pondérés est appliquée.

D'autre part, les saisons à plus fort risque ont été définies grâce aux variations au cours de l'année des gradex et moyennes mensuels. L'étude a conduit à définir des régions au sein desquelles les saisons varient en fonction de la durée. Ces régions sont en accord avec différentes constatations sur les pluies intenses dans des zones bien définies des Alpes :

- WATREMEZ (1996) pour les Préalpes du Nord,
- DESBORDES et al. (1994) et JACQ (1994) pour le pourtour méditerranéen.

### *Le problème des saisons à plus fort ri*

le Jura, le Chablais, les vallées de la Tarentaise et de la Maurienne. Le long de la frontière italienne, une région se distingue : c'est celle touchée par les retours d'Est.

Au sud, par contre, le découpage est plus simple et semble conditionné par la présence de la Durance.

Finalement, nous disposons des valeurs de pluies décennales et centennales en 90 points pour des durées allant de l'heure à la journée et 553 points à 24 h.

Bonne étude  
Impression : bien sûr pour le non-spécialiste.  
~~de la méthode de la cavalière~~  
la méthode de la cavalière est très stimulante du grand public.  
signe des courbes.

Margot = souvent à par cavalière  
du char à manège (méthode de surveillance?).



## PARTIE B

# CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS EXTREMES DANS LES ALPES FRANÇAISES



# INTRODUCTION A LA PARTIE B

pb d'interpolat<sup>n</sup> de pluies extrêmes.

La première partie a conduit à la détermination des paramètres statistiques des précipitations extrêmes, en 90 pluviographes (durées de 1 h à 24 h) et 463 pluviomètres (durée de 24 h) des Alpes françaises :

- pour les différents pas de temps, estimation des précipitations extrêmes décennales et centennales ainsi que des gradex,
- et estimation des coefficients de Montana pour les pluviographes.

Cette étude a été faite en chaque station sans tenir compte des autres, sauf pour la définition d'une saison à plus fort risque pluvieux. Ainsi, le projeteur a des difficultés à estimer, par exemple, une pluie décennale en un point quelconque du domaine (à moins que ce point ne corresponde avec un point de mesure, au quel cas, il n'est pas tout à fait quelconque...). Nous sommes donc confrontés au problème de l'interpolation des valeurs statistiques de pluies extrêmes et de leur cartographie.

## 1. Les différentes méthodes de cartographie envisagées

Différentes méthodes de cartographie ont été envisagées (chapitres III à VI) et comparées par validation croisée (chapitre VII). Elles peuvent être regroupées en trois grands ensembles, suivant l'information supplémentaire utilisée.

- Aucune information supplémentaire

Dans un premier temps, seules les valeurs des champs en un nombre restreint de points (pluviographes et pluviomètres) sont prises en compte. L'étude de la structure spatiale de ces champs aboutit à une première interpolation par la *méthode du krigeage* (chapitre III).

- Information supplémentaire : la topographie

Dans un deuxième temps, nous utilisons *l'information topographique* pour améliorer la cartographie.

Chaque poste de mesure est caractérisé par son environnement (altitude, pente...) et sa position dans le domaine (distance à la mer...). Alors les relations entre paramètres pluviométriques et morphométriques permettent d'estimer en un point quelconque la valeur du champ de pluie étudié, à partir de ses caractéristiques topographiques (chapitre IV).

Ensuite, la combinaison entre une information pluviométrique et topographique, pour une interpolation entre les points de mesure, est faite par *cokrigage* (chapitre V).

- Information supplémentaire : information à 24 h fournie par les pluviomètres

Enfin, le moyen de prendre en compte l'information à 24 h est testé (chapitre VI). En effet, le réseau de mesure de pluie au pas de temps de la journée est beaucoup plus dense que celui à pas de temps plus fin. Ainsi, différentes techniques sont définies pour l'amélioration de la cartographie des champs de pluie à pas de temps courts.

## 2. Présentation de la méthode de validation croisée utilisée

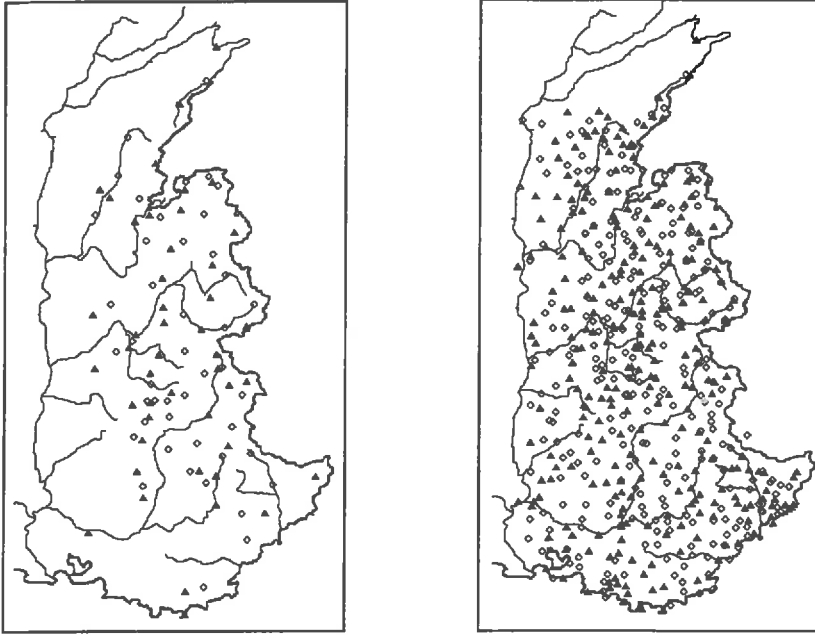
Pour choisir une méthode de cartographie plutôt qu'une autre, ou pour choisir les variogrammes théoriques à ajuster aux variogrammes expérimentaux (cf. chapitre III), nous avons appliqué une méthode inspirée de la validation croisée.

Le réseau de mesure de pluie a été divisé en deux sous réseaux, chacun étant aléatoirement réparti dans l'espace (cf. Figure 1). Pour les pas de temps inférieurs à 24 h, les deux sous réseaux sont constitués de 45 pluviographes chacun, et pour 24 h, le premier sous réseau compte 276 postes et le deuxième 277.

La méthode consiste à utiliser les valeurs prises par les variables aux postes du premier sous réseau comme base de données pour l'interpolation. Ce calcul conduit à une évaluation  $z^*(x_i)$  du champ en tout point  $x_i$  du domaine et en particulier aux postes du deuxième sous réseau. Ce dernier sert alors de validation : les valeurs réelles connues  $z(x_i)$  sont comparées aux valeurs estimées  $z^*(x_i)$ .

Ainsi, la comparaison peut se faire pour un nombre de points assez important, contrairement à la méthode classique de validation croisée. En effet, cette dernière consiste à

éliminer un seul point de l'échantillon pour l'interpolation et c'est ce point qui sert à la validation. Cette façon de faire est beaucoup moins sévère que la nôtre.



*Figure 1 : Sous réseaux de mesure utilisés en validation croisée (à gauche 2 sous réseaux de pluviographes, à droite 2 sous réseaux de postes à 24 h)*

Un certain nombre de critères de comparaison des valeurs réelles et des valeurs estimées ont été utilisés, ils sont inspirés de TABIOS et al. (1985).

① Comparaison de la moyenne et de l'écart type des valeurs estimées et des valeurs observées.

② Calcul du coefficient d'efficience :

$$E = 1 - \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

$$\text{avec } S = \sum_{i=1}^N [z^*(x_i) - z(x_i)]^2 \text{ et } S_0 = \sum_{i=1}^N [z(x_i) - m_0]^2$$

où  $z^*(x_i)$  est l'estimée en  $x_i$  de  $z$ ,

$m_0$  est la moyenne du champ sur l'échantillon de validation,

$N$  est le nombre de postes dans le sous réseau de validation.

Plus  $E$  est proche de 1, meilleure est la qualité de l'interpolation.

③ Coefficient de détermination entre les valeurs estimées et les valeurs réelles :

$$R^2(z^*(x_i), z(x_i)).$$

④ Comparaison entre la valeur réelle et l'intervalle de confiance associé à la valeur interpolée, obtenu à partir de l'écart type de l'erreur d'estimation  $\sigma_e$  (lorsque celui-ci est connu).

Si l'on suppose que les erreurs suivent une loi normale : a-t-on, par exemple,

$$z(x_i) \in [z^*(x_i) - 1.28 \times \sigma_e, z^*(x_i) + 1.28 \times \sigma_e] ? \text{ (intervalle de confiance à 80\%).}$$

#### Remarque concernant le coefficient d'efficience $E$

Le coefficient d'efficience  $E$  permet de déterminer si les estimées  $z^*(x_i)$  ont le même ordre de grandeur que les valeurs réelles. En effet, le coefficient de détermination  $R^2$  peut être bon, parce qu'il y a une bonne relation linéaire entre les estimées  $z^*(x_i)$  et les valeurs réelles  $z(x_i)$ , alors que  $E$  est mauvais car les estimées  $z^*(x_i)$  sont systématiquement surestimées ou sous estimées par rapport aux valeurs réelles. C'est ce qui est illustré par la Figure 2, où on a représenté trois nuages de corrélation séparés de 15 mm chacun. Cependant, ce type d'erreur est déjà mis en évidence lors de la comparaison de la moyenne et de l'écart type des valeurs estimées et des valeurs observées.

La Figure 3 montre par contre un exemple où les moyennes, écarts type et coefficients de détermination  $R^2$  sont identiques pour les deux échantillons. Dans ce cas, c'est le coefficient d'efficience  $E$  qui met en évidence le problème sur les valeurs estimées.

Finalement, le coefficient d'efficience  $E$  n'est acceptable que lorsque le nuage de points est proche de la bissectrice, et c'est uniquement pour mettre en évidence de "grosses" erreurs que nous l'avons utilisé.

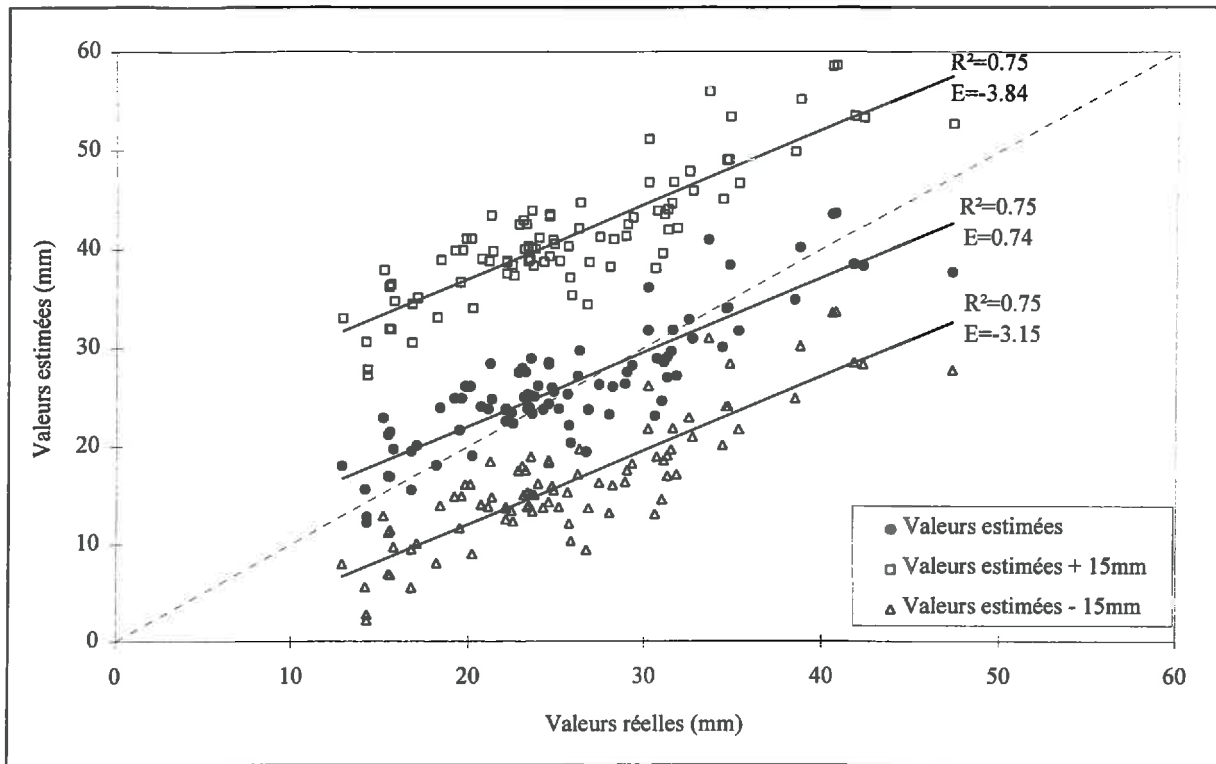


Figure 2 : Utilité du coefficient E : représentation de trois nuages de points décalés de 15mm

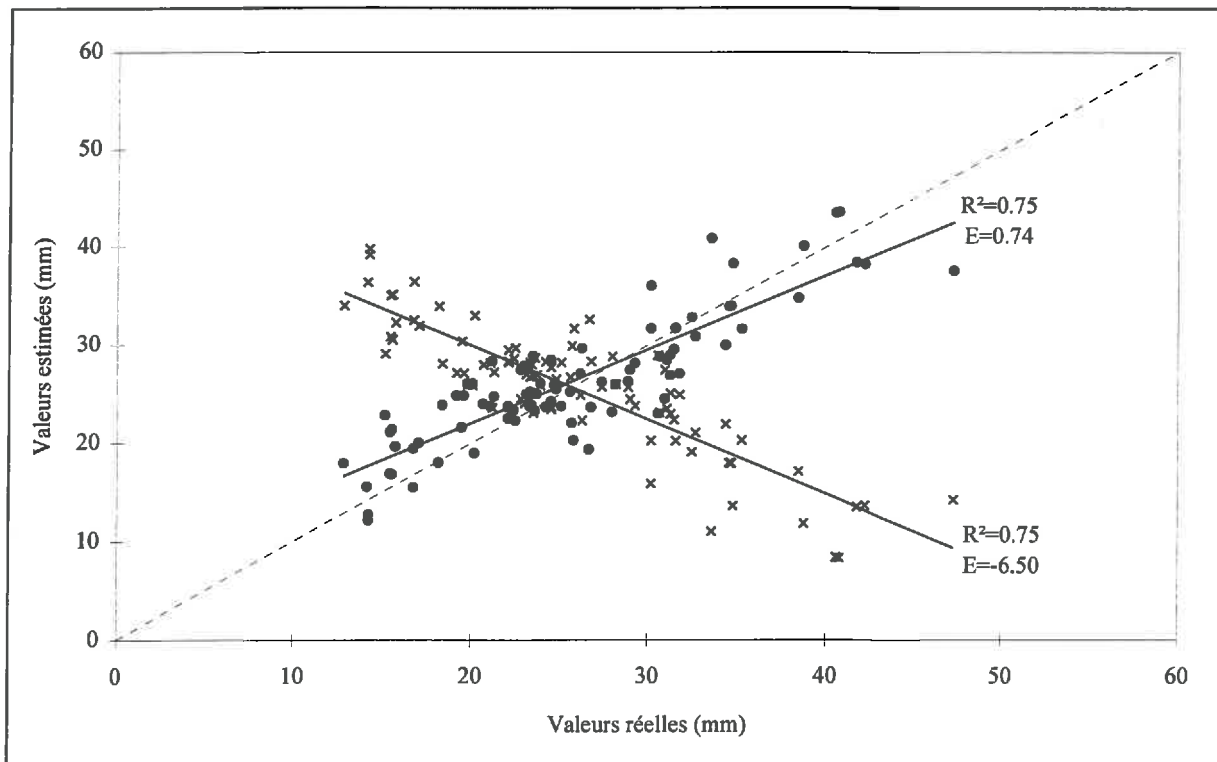


Figure 3 : Utilité du coefficient E : représentation de deux nuages dont les moyennes, écarts type et coefficients de détermination sont égaux

I : cartographie par krigage  
 II : ~~par krigage~~  $\frac{1}{2} \text{ info sup} - \text{topo}$   
 III : par krigage + info sup  
 IV : cartographie  
 V : info sup = 24h  
 VI :

## CHAPITRE III

### CARTOGRAPHIE PAR KRIGEAGE

De plus, les données sont souvent krigées en point KL  
 les stat<sup>os</sup>  
 et est-ce incompatible?



Les méthodes géostatistiques d'interpolation ont été initialement développées pour l'analyse spatiale de gisements miniers (DELHOMME, 1978). Cependant, elles ont été appliquées depuis à de nombreux autres problèmes, incluant l'interpolation spatiale de pluies extrêmes (SLIMANI, 1985 ; THAO, 1993, ...).

En effet, les méthodes géostatistiques sont en général « supérieures » à des méthodes telles que la technique de la distance inverse ou l'interpolation polynomiale (TABIOS et al., 1985). En particulier, le krigeage permet de disposer d'un indice de qualité de l'estimation.

CREUTIN et al. (1982) ont comparé plusieurs méthodes de cartographie pour des épisodes pluvieux sur les Cévennes : le krigeage, les fonctions splines, l'Analyse en Composantes Principales de processus et l'interpolation optimale de Gandin. Le krigeage donne en général les meilleurs résultats, bien que les coefficients de corrélation entre valeurs estimées et connues sont très proches pour les trois méthodes krigeage, spline et Gandin. De même, THAO (1993) a montré que la cartographie de pluies extrêmes dans la région Cévennes Vivarais était meilleure par krigeage que par la méthode spline.

La première partie de ce chapitre sera consacrée aux rappels des hypothèses et des outils de la géostatistique. Puis, nous étudierons la structure spatiale des différentes caractéristiques des pluies extrêmes : pluies décennales, centennales, gradex et coefficients de Montana. Enfin, nous commenterons les différentes cartes obtenues par krigeage.

### **III.1. Théorie du krigeage**

Le krigeage est une méthode d'estimation basée sur la théorie des Variables Régionalisées (MATHERON, 1962, 1965). Les Variables Régionalisées (V.R.) désignent un phénomène se déployant dans l'espace (ou dans le temps) avec une certaine structure. La théorie des V.R. a pour but :

- d'établir des bases théoriques permettant de rendre compte, sous une forme mathématique appropriée, des caractéristiques structurales des phénomènes naturels,
- de fournir les moyens pratiques pour résoudre les divers problèmes d'estimation qui se posent à partir d'un échantillonnage fragmentaire.



Pour traiter les V.R. tout en restant dans un cadre mathématique rigoureux, la théorie probabiliste des Fonctions Aléatoires (F.A.) est utilisée. La V.R.  $z(x)$ , que l'on cherche à interpoler, peut être considérée comme une réalisation particulière de la F.A.  $Z(x)$ . La loi de probabilité de la F.A. est inconnue, mais nous ferons des hypothèses courantes dans la théorie des F.A. concernant la stationnarité de cette fonction (cf. § III.1.1).

Nous allons exposer rapidement les hypothèses et outils de la géostatistique. Pour plus de précision, on se référera à JOURNEL (1977) et DELHOMME (1978).

Dans ce qui suit,  $x$  désigne les coordonnées dans le repère choisi (abscisse le long d'une ligne,  $(x,y)$  dans  $R^2$  ou  $(x,y,z)$  dans  $R^3$ ). Les valeurs de la variable  $z(x)$  -réalisation particulière de la F.A.  $Z(x)$ - sont connues en  $n$  points expérimentaux  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . On souhaite définir en un point  $x_0$  non mesuré un estimateur de  $z$  :

$$z^*(x_0) = z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (III - 1)$$

### III.1.1. Inférence statistique

L'inférence statistique consiste à reconstituer la loi de la F.A., ou du moins ses premiers moments. La connaissance d'un grand nombre de réalisations de la F.A. permet d'en estimer les caractéristiques, mais, en général, une réalisation unique est connue. L'inférence statistique requiert alors l'introduction d'hypothèses supplémentaires sur la F.A.

#### III.1.1.1. Stationnarité d'ordre 2

L'hypothèse de stationnarité est souvent formulée dans la théorie des F.A. : « une F.A. est dite stationnaire si la loi de probabilité des valeurs prises par cette fonction en  $k$  points arbitraires est invariante par translation d'ensemble de ces points » (DELHOMME, 1978). Cette homogénéité spatiale permet de supposer que chaque réalisation particulière suffit à rendre compte de l'ensemble des réalisations possibles.

En pratique, on se limite à la stationnarité d'ordre 2 :

① Espérance mathématique constante :

$$E[Z(x)] = m(x) = m \text{ indépendante de } x \quad (III - 2)$$

② Covariance entre deux points  $x$  et  $x'$  fonction uniquement du vecteur  $x-x'=h$  (i.e. indépendante des points d'appui) :

$$C(x, x+h) = E[(Z(x) - m)(Z(x+h) - m)] = C(h) \quad (III - 3)$$

En particulier :

$$C(x, x) = E[(Z(x) - m)^2] = C(0) = \text{var}(Z(x)) \quad (III - 4)$$

### III.1.1.2.Hypothèse intrinsèque

En fait, les développements des calculs d'estimation optimale n'exigent pas que la F.A. soit stationnaire d'ordre 2, mais seulement que ses accroissements le soient. Pour tout vecteur  $h$ , on suppose que l'accroissement  $(Z(x+h) - Z(x))$  a une espérance mathématique nulle et une variance indépendante du point  $x$ , c'est l'hypothèse intrinsèque :

$$\begin{cases} E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \\ \text{var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \end{cases} \quad (III - 5)$$

Une F.A. satisfaisant l'hypothèse intrinsèque est une F.A. intrinsèque.  $\gamma(h)$  est appelé le *demi-variogramme*, ou -par abus de langage- *variogramme*.

### III.1.1.3.La fonction de structure : le variogramme

#### III.1.1.3.1.Définition et estimation du variogramme

Le variogramme  $\gamma(h)$  d'une F.A. est défini par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (III - 6)$$

$$\text{ou } \gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[ (Z(x+h) - Z(x))^2 \right] \quad (III - 7)$$
$$\left( \text{car } E(Z(x+h) - Z(x)) = 0 \right)$$

Ainsi,  $2\gamma(h)$  est l'accroissement quadratique moyen entre deux points distants de  $h$ .

En supposant satisfaite l'hypothèse intrinsèque,  $\gamma(h)$  est estimé à partir des couples de points expérimentaux et sur l'ensemble des réalisations disponibles :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i + h) - z(x_i))^2 \quad (III - 8)$$

où  $z(x_i)$  est la valeur de  $z$  au point  $x_i$ ,

$x_i$  sont les points pour lesquels les données sont disponibles à la fois en  $x_i$  et  $x_i + h$ ,

$N(h)$  est le nombre de couples de points distants de  $h$ .

Cependant, comme le nombre de stations est fini, et pour avoir un nombre de stations par classe acceptable, les classes comprennent en fait les stations dont les points sont distants de  $h \pm \Delta h$ .

Lorsque les points expérimentaux sont irrégulièrement répartis dans l'espace, on procède à des regroupements par classe de distance et d'angle pour le calcul des accroissements quadratiques moyens. L'étude des comportements du variogramme dans les différentes directions renseigne sur les anisotropies éventuelles du phénomène.

#### III.1.1.3.2. Comportement du variogramme expérimental

Dans l'étude du variogramme expérimental obtenu, les comportements à l'origine (i.e. aux faibles distances) et à l'infini (i.e. aux grandes distances) sont analysés avec soin.

##### Comportement à l'origine

L'allure à l'origine traduit la continuité de la V.R. Quatre types de comportement à l'origine se distinguent par ordre de régularité décroissante : allure parabolique, linéaire, discontinuité à l'origine et aspect plat (cf. Figure III 1).

Pour un phénomène spatialement continu, le variogramme passe par l'origine ( $\gamma(0) = 0$ ). Une allure parabolique caractérise une variable extrêmement régulière. Une allure linéaire correspond à une variable moins régulière.

Une discontinuité à l'origine signifie que la variable est très irrégulière : c'est l'*effet de pépite* ( $\gamma(h) \rightarrow C$  quand  $h \rightarrow 0$ ). Elle peut être due soit à une microrégionalisation d'échelle très inférieure à l'espacement des données, soit à des erreurs de mesure, sans qu'il soit possible de discerner *a priori* la part respective de ces deux causes (DELHOMME, 1978).

Enfin, un aspect plat à l'origine (effet pépitique pur) correspond au cas aléatoire pur : il y a absence totale de structure.

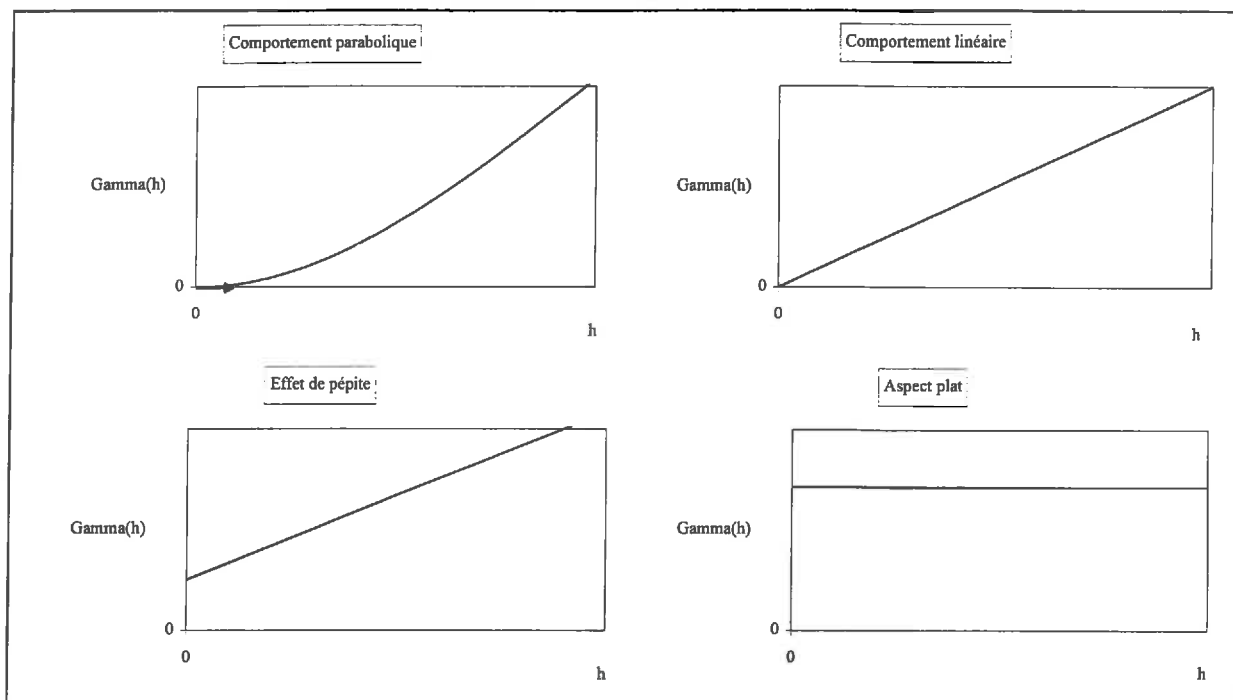


Figure III 1 : Comportement à l'origine du variogramme

### Comportement à l'infini

Lorsque  $h$  augmente, le variogramme croît sur une zone correspondant à une distance de décorrélation appelée *portée*. Aux distances supérieures à la portée, la corrélation est nulle et le variogramme se stabilise autour d'une valeur égale à la variance du champ : le *palier* (cf. Figure III 2).

La présence d'une *dérive* ( $\gamma(h) \rightarrow \infty$  quand  $h \rightarrow \infty$ , variogramme non borné) peut montrer que la moyenne du champ n'est pas constante dans l'espace. Dans ce cas, le

phénomène ne peut être stationnaire d'ordre 2 et ceci interdit le krigeage en covariance (la possibilité d'une estimation d'une moyenne générale du champ disparaît) ; le krigeage ordinaire est cependant possible, la somme des pondérations  $\lambda$  devenant une condition d'autorisation au lieu d'être simplement une condition de non biais (cf. éq. (III - 10)).

Enfin, une chute brusque de la variance dans les dernières classes peut être due à un nombre insuffisant de couples dans ces classes et à l'utilisation de points mal répartis dans l'espace : c'est *l'effet de trou*.

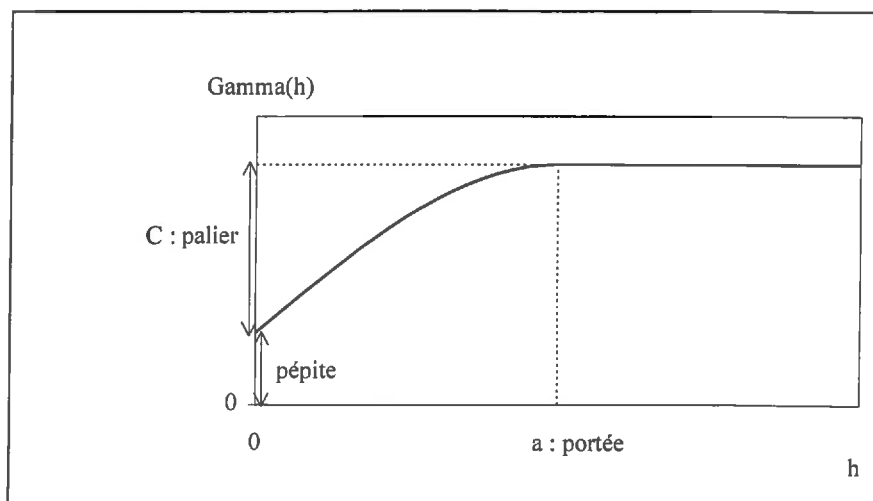


Figure III 2 : Définition de la portée, du palier et de la pépité d'un variogramme

### III.1.1.3.3. Ajustement à un modèle

Dans la pratique, et pour garantir la cohérence mathématique des calculs, on ajuste un modèle théorique classique au variogramme brut : modèles puissance, sphérique, exponentiel et gaussien (cf. Figure III 3).

Le modèle gaussien a une allure parabolique à l'origine, alors que les modèles exponentiel et sphérique ont une allure linéaire.

Le modèle sphérique atteint son palier pour une distance  $h=a$ , la portée. Pour les modèles exponentiel et gaussien, le palier n'est atteint qu'asymptotiquement :

- modèle exponentiel : pour  $h=3a$ ,  $\gamma(h) \approx 0.95 \times C$  ( $C$  : palier),
- modèle gaussien : pour  $h=\sqrt{3} a$ ,  $\gamma(h) \approx 0.95 \times C$ .

Enfin, le modèle puissance est sans palier, il est linéaire pour  $\lambda=1$ .

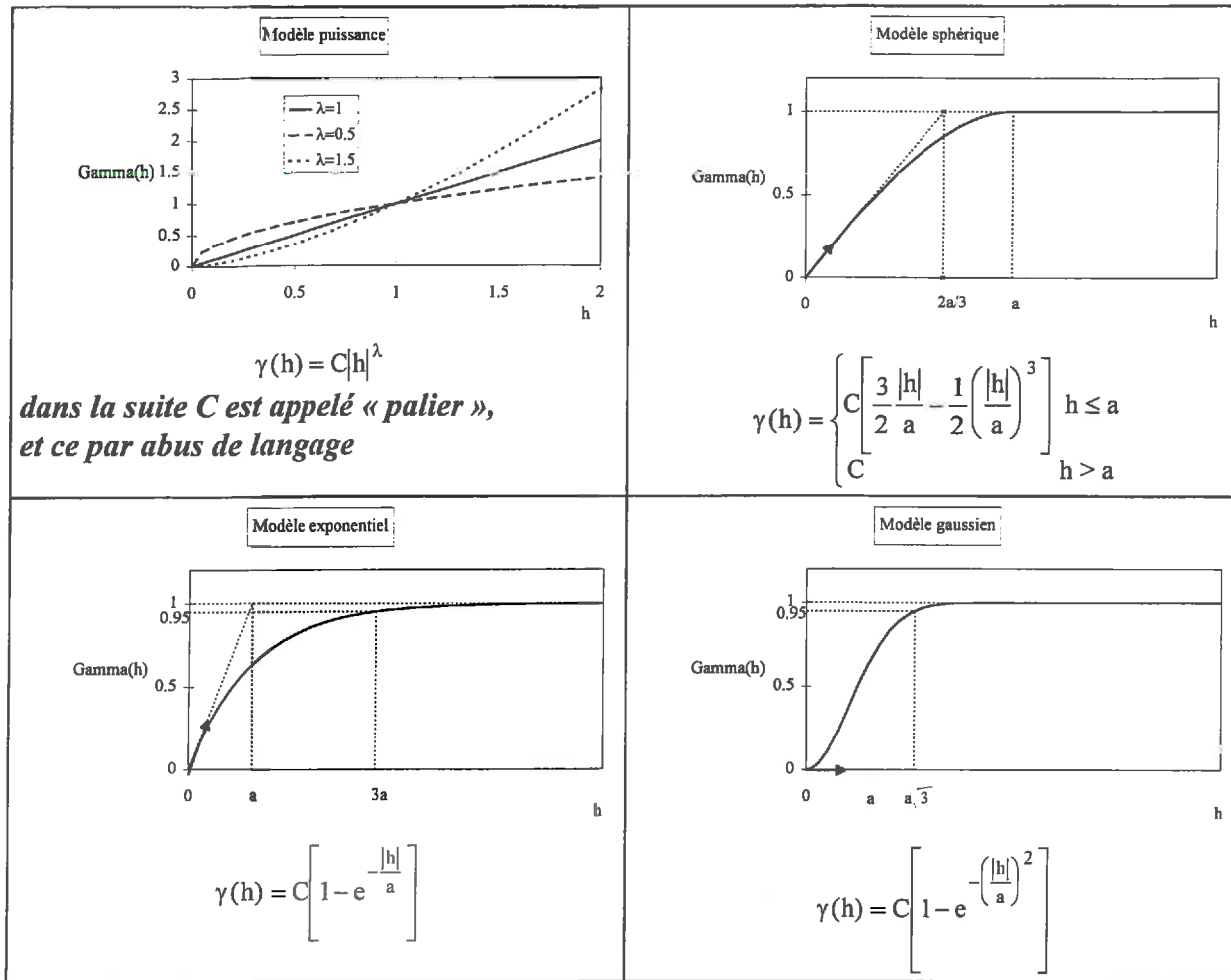


Figure III 3 : Principaux modèles de variogrammes utilisés (graphes tracés avec  $C=1$ )

### III.1.2. Formalisation du krigeage

Dans ce qui suit, on suppose que l'espérance mathématique de la F.A.  $Z(x)$  est une fonction :  $m(x) = E[Z(x)]$  appelée *dérivée*. Cette fonction varie de manière lente et régulière relativement à l'échelle du domaine. Cela nous permet d'élargir le cadre de l'hypothèse intrinsèque dans le cas où la moyenne n'est pas constante.

Localement,  $m(x)$  peut être écrite sous la forme :

$$m(x) = \sum_{l=1}^k a_l f^l(x) \quad (III - 9)$$

où les  $f^l$  sont des fonctions données (souvent des monômes)

et les  $a_l$  des coefficients inconnus.

Le *krigeage simple* est le cas où la moyenne est constante et connue :  $m(x) = a_1$  connue. Le *krigeage ordinaire* correspond au cas où la moyenne est constante et inconnue :  $m(x) = a_1$  inconnue, alors que la moyenne est variable  $m(x) = \sum_{l=1}^k a_l f^l(x)$  dans le cas du *krigeage universel*.

Les valeurs de la V.R.  $z(x)$  sont connues en  $n$  points expérimentaux  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . En tout point  $x_0$ , la variable  $z$  s'exprime comme une combinaison linéaire des  $n$  valeurs connues (cf. (III - 1)). Le problème consiste à trouver les poids  $\lambda_i$  ( $i=1, n$ ) qui donnent la meilleure estimation possible. Or  $z(x)$  est une réalisation de la F.A.  $Z(x)$ , cela revient à considérer l'estimateur  $Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ . Cet estimateur doit être :

$$\textcircled{1} \text{ sans biais } E[Z_0^* - Z_0] = 0 \quad (III - 10)$$

$$\textcircled{2} \text{ d'erreur quadratique minimale : } E[(Z_0^* - Z_0)^2] \text{ minimum} \quad (III - 11)$$

Comme  $\text{var}[Z_0^* - Z_0] = E[(Z_0^* - Z_0)^2] - (E[Z_0^* - Z_0])^2$ , cela devient :

$$\begin{cases} E[Z_0^* - Z_0] = 0 \\ \text{var}[Z_0^* - Z_0] \text{ minimum} \end{cases} \quad (III - 12)$$

A partir de ces deux conditions et de l'expression de  $m(x)$ , on obtient le système de krigage :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{ij} + \sum_{l=1}^k \mu_l f_i^l = \gamma_{i0} & i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j f_j^l = f_0^l & l = 1, \dots, k \end{cases} \quad (III - 13)$$

et la variance de krigage :

$$\sigma_s^2(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{j0} + \sum_{l=1}^k \mu_l f_0^l \quad (III - 14)$$

La résolution du système conduit à l'estimation des poids  $\lambda_i$  ( $i=1, n$ ) et des coefficients de Lagrange  $\mu_l$  ( $l=1, k$ ). Ainsi, il y a autant de systèmes à résoudre que de points à estimer. Si la totalité des données disponibles est considérée à chaque point, on parle de *voisinage unique*. Pour des raisons informatiques (temps de calcul trop long), le système de krigeage peut être reformé à chaque fois en ne retenant que les données situées dans un voisinage proche du point à estimer : c'est le *voisinage glissant*.

Enfin, une des propriétés essentielles du krigeage est qu'il est un interpolateur exact (en un point connu, il donne la valeur en ce point).

## III.2. Etude de la structure spatiale des caractéristiques des précipitations extrêmes à l'aide de variogrammes

L'application du krigeage nécessite dans un premier temps l'étude de la variabilité spatiale des champs. En effet, si ces champs ont une bonne structure, modélisable par un variogramme théorique classique, nous pourrions les interpoler par krigeage. Ainsi, après avoir défini les classes d'interdistance pour le calcul des variogrammes expérimentaux, nous passerons à leur étude.

### III.2.1. Détermination des classes d'interdistance

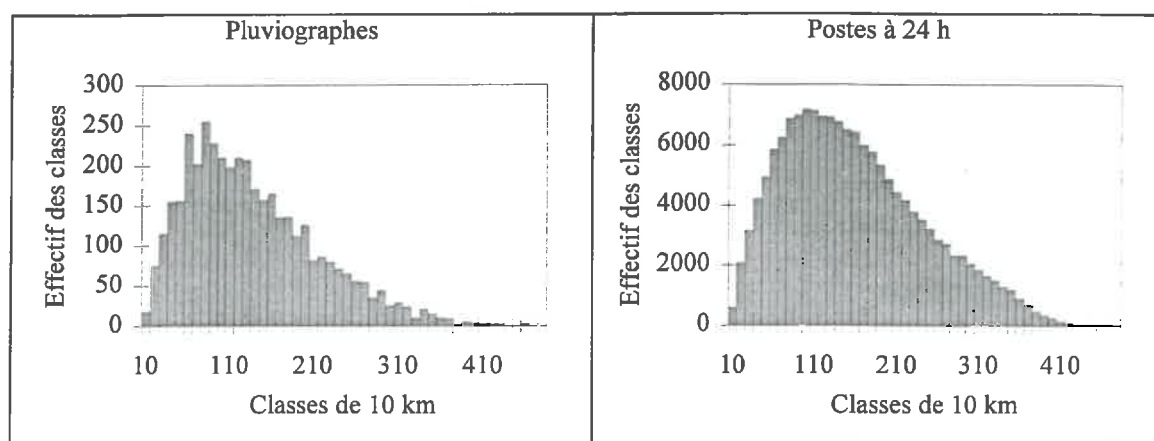
Pour les pas de temps inférieurs à 24 h, nous disposons de 90 pluviographes sur le domaine, ce qui correspond à 4005 couples de points. Chacun est caractérisé par la distance séparant ses 2 éléments. Les interdistances varient entre 2.6 et 460 km.

Pour l'évaluation des variogrammes expérimentaux, le nombre et la largeur des classes sont choisis de façon à ce que les premières classes aient un nombre suffisant de couples par classe, c'est-à-dire au moins 10 couples. Nous avons exclusivement travaillé avec des classes d'égale largeur  $L$  : la première classe a pour largeur  $L/2=5$  km et les suivantes  $L=10$  km. La première classe 0-5 km ne comprend que 3 couples, nous ne nous appuyons sur celle-ci que pour nous donner une « idée » du comportement à l'origine. Par contre la deuxième classe (5-



15 km) comprend déjà un nombre suffisant de couples pour être significative (43 couples). Les ajustements ne seront donc réellement fiables qu'à partir de 5 km (cf. Figure III 4).

Pour le pas de temps de 24 h, les 463 pluviomètres s'ajoutent aux 90 pluviographes, ce qui correspond à 152 628 couples en tout. Les interdistances sont alors comprises entre 0.1 et 477 km. Toutes les classes d'interdistance (classes de 10 km) ont un nombre significatif de couples (la première classe comprend 160 couples).



*Figure III 4 : Histogramme des interdistances entre pluviographes et entre postes à 24 h*

### III.2.2. Variogrammes isotropes des pluies décennales et centennales

Les variogrammes expérimentaux pour les pluies de temps de retour 10 ans et 100 ans montrent que les variables ont une assez bonne structure spatiale pour les faibles pas de temps : de 1 h à 6 h, les allures sont sphériques. Mais, plus le pas de temps augmente, plus l'allure des variogrammes devient linéaire (cf. Figure III 5, cf. § III.2.2.3 , p133).

Nous allons nous attacher dans un premier temps à modéliser les variogrammes du pas de temps de la journée, qui posent problème, pour passer ensuite aux pas de temps plus faibles.

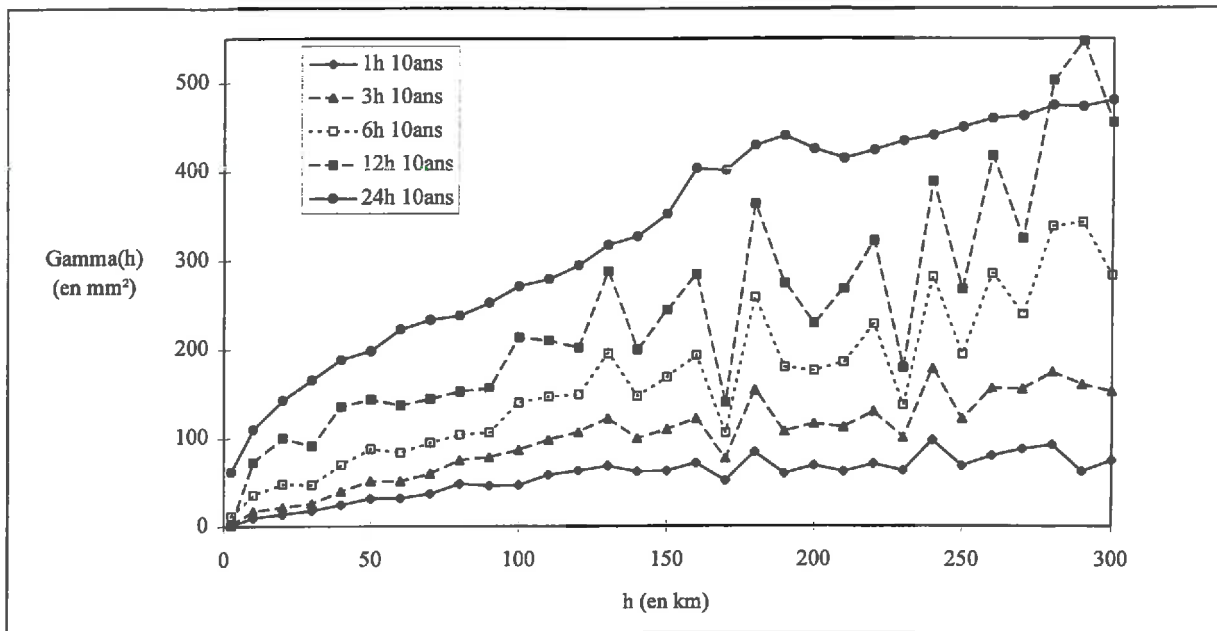


Figure III 5 : Variogrammes expérimentaux des pluies décennales pour différentes durées

#### III.2.2.1. Pas de temps de 24 h

Les variogrammes expérimentaux des pluies journalières décennales et centennales ont une allure linéaire, significative d'une moyenne non constante sur le domaine. Tel quel, un modèle puissance pépitique (avec  $\lambda < 1$ ) peut modéliser leur allure. Cependant, nous avons tenté de mettre en évidence une dérive, fonction des coordonnées X et Y. D'autre part, la division du domaine en deux conduit à définir deux sous régions homogènes au sein desquelles les variogrammes expérimentaux n'ont plus une allure linéaire.

Finalement, les estimations de pluie obtenues à partir de ces trois modélisations seront comparées par validation croisée, pour aboutir à un choix final de modélisation du variogramme.

##### III.2.2.1.1. Etude de la dérive

A 24 h, une forme de dérive du type :  $m(X, Y) = a_1X + a_2Y + a_3$  a été imposée : la moyenne, non constante sur le domaine est supposée être une fonction de X et Y.

La variable étudiée  $z$  est alors la somme de  $m(X,Y)$  et d'un résidu  $\varepsilon_z$ , correspondant à la variable sans dérive (en anglais « detrended ») :

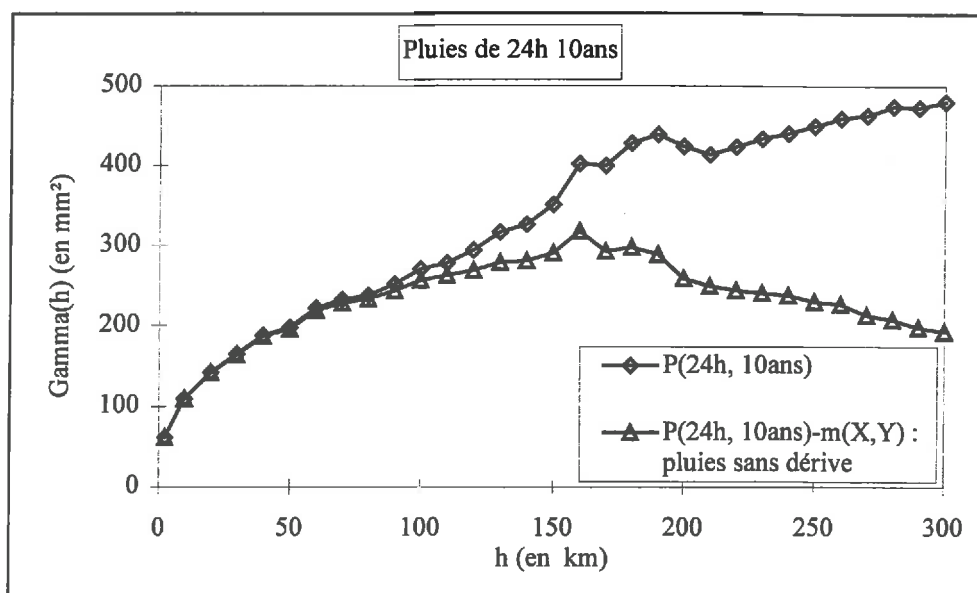
$$z(X, Y) = m(X, Y) + \varepsilon_z = a_1 X + a_2 Y + a_3 + \varepsilon_z \quad (III - 15)$$

C'est l'étude de la variabilité spatiale du résidu  $\varepsilon_z$  qui est importante. En effet, le système de krigeage avec dérive (krigeage universel) nécessite la définition d'un variogramme théorique pour  $\varepsilon_z$ , variable sans dérive.

Le résidu  $\varepsilon_z$  est déterminé par régression linéaire multiple entre la variable  $z$  et les coordonnées  $X$  et  $Y$  : c'est le résidu de régression (cf. Tableau III 1). Ensuite, le variogramme expérimental de  $\varepsilon_z$  est évalué (cf. Figure III 6).

| Equation de régression                                               | $R^2$ |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| $P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans}) = 0.0498 * X - 0.0799 * Y + 198.4$  | 0.29  |
| $P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans}) = 0.0603 * X - 0.1398 * Y + 345.4$ | 0.34  |

**Tableau III 1 :** Régression linéaire multiple entre les pluies journalières décennales et centennales (mm/24 h) et les coordonnées  $X$  et  $Y$  (en km) (statistiques sur 553 observations)



**Figure III 6 :** Comparaison des variogrammes expérimentaux de la variable brute  $Z$  et de la variable sans dérive  $\varepsilon_z$  : exemple des pluies décennales à 24 h

Les variogrammes expérimentaux des pluies brutes et des pluies sans dérive ont la même allure jusqu'à une distance d'environ 90 km (cf. Figure III 6 : exemple des pluies décennales à 24 h). C'est donc pour une distance supérieure à 90 km que la dérive apparaît. De plus, les variogrammes expérimentaux des résidus  $\varepsilon_z$  ont une allure exponentielle pépitique.

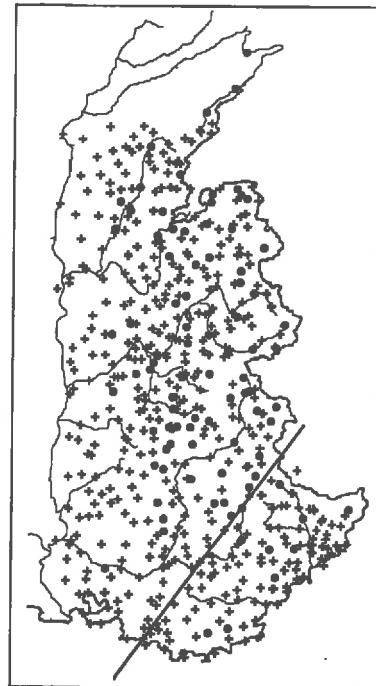
Finalement, une dérive fonction de X et Y a pu être mise en évidence, les variogrammes des résidus obtenus ayant une bonne structure spatiale (cf. Figure III 6).

Cependant, les estimations par krigeage universel ne seront pas très différentes de celles calculées avec un modèle puissance par krigeage ordinaire, puisque seuls les points proches du point à estimer ont une importance et les variogrammes pour des distances faibles ont la même allure. C'est ce que rappelle JOURNEL et al. (1989) : pour l'interpolation de données, krigeage universel et ordinaire sont équivalents.

#### III.2.2.1.2. Division du domaine en deux

En repérant sur une carte les valeurs de pluies journalières (décennales ou centennales), une zone de fortes valeurs dans le Sud-Est du domaine se distingue. Ainsi, le domaine a été partagé en deux régions (cf. Figure III 7) et les variogrammes expérimentaux de chacune de ces sous régions ont été étudiés.

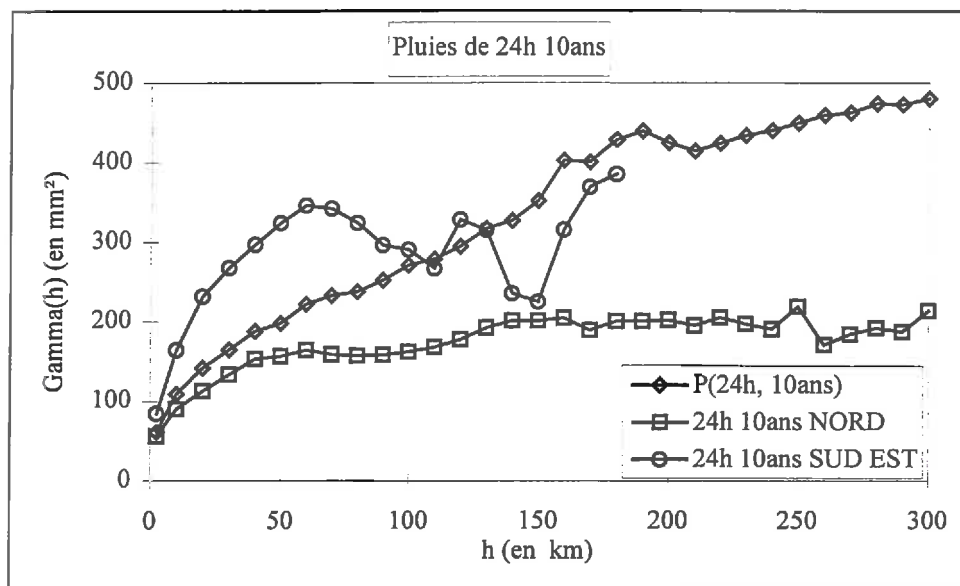
La séparation se fait suivant la droite d'équation :  $Y = 1.4 \times X + 596.7$  (X et Y coordonnées en Lambert II étendu). La région Nord comprend 434 postes et la région Sud Est 119 postes.



*Figure III 7 : Division du domaine en deux régions pour l'étude de la structure spatiale des pluies extrêmes de 24 h*

Sur chacune des deux sous régions, les variogrammes expérimentaux montrent que les pluies ont une bonne structure spatiale (cf. Figure III 8). Ils ont été ajustés par des variogrammes exponentiels pépitiqes. Au Nord, les portées sont plus importantes qu'au Sud Est. Le phénomène des pluies au Sud Est est donc très localisé. Par contre, le palier au Sud Est est supérieur à celui au Nord. L'effet de pépité est en partie dû à l'erreur d'estimation sur les quantiles.

Cette séparation peut s'expliquer géographiquement. En effet, les pluies beaucoup plus intenses dans la région du Sud Est résultent de l'influence de la Méditerranée dans cette zone. Cette influence distingue cette région par rapport au reste des Alpes.



*Figure III 8 : Variogrammes expérimentaux des pluies brutes et des pluies correspondant à deux sous régions des Alpes : exemple des pluies décennales à 24 h*

### III.2.2.1.3. Comparaison des estimations

#### *III.2.2.1.3.1. Ajustements de modèles de variogrammes théoriques et application du krigeage*

Dans les 3 cas précédents, les variogrammes expérimentaux sont ajustés par (cf. Figure III 9) :

- un variogramme puissance pépétique lorsqu'on analyse les pluies brutes des 553 postes,
- un variogramme exponentiel pépétique pour la pluie sans dérive (553 postes),
- deux modèles exponentiels pépétiques lorsque le domaine est divisé en deux sous régions.

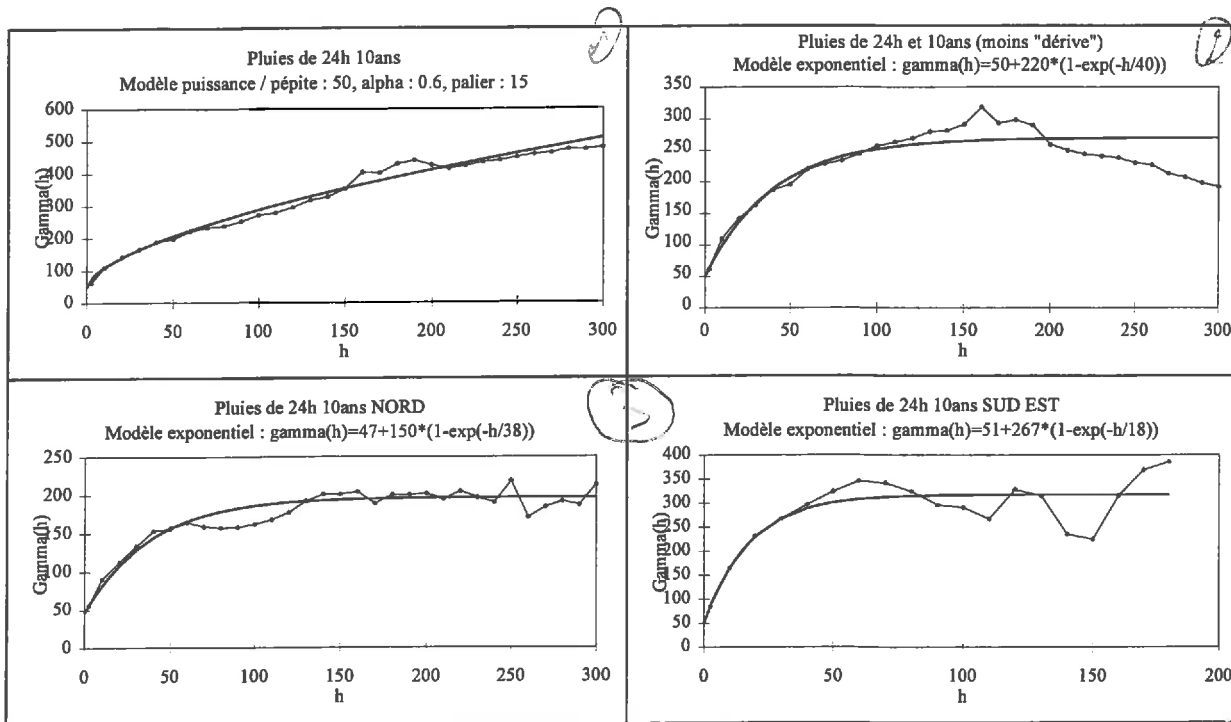


Figure III 9 : Ajustements de différents variogrammes expérimentaux des pluies décennales à 24 h ( $\Gamma(h)$  en  $\text{mm}^2$  et  $h$  en km)

L'application du krigeage permet de comparer les différents ajustements de variogramme par validation croisée (cf. introduction à la partie B, § 2, p106). Les calculs ont été faits par :

- krigeage ordinaire pour les pluies brutes (553 postes),
- krigeage universel dans le cas des pluies sans dérive (553 postes),
- krigeage ordinaire sur les deux sous régions.

Dans le dernier cas, un problème se pose quant au raccordement des champs krigés des deux sous régions. Pour le résoudre, nous avons appliqué la méthode suivante.

Au Nord, le krigeage est appliqué sur l'échantillon des postes de mesure situés dans la région et ceux situés jusqu'à 20 km au Sud de la limite ( $Y = 1.4 \times X + 596.7 - 20$ ). De même, au Sud

Est, on considère les postes situés dans la région et ceux situés jusqu'à 20 km au Nord de la limite ( $Y = 1.4 \times X + 596.7 + 20$ ).

Ensuite, la zone de raccordement est constituée par une bande de 20 km de large :  $[Y_1 = 1.4 \times X + 596.7 - 10, Y_2 = 1.4 \times X + 596.7 + 10]$ . Sur cette zone, la valeur finale du champ est la moyenne des valeurs obtenues par krigeage pour la région Nord et la région Sud Est, mais on ne peut pas y évaluer un écart type d'erreur d'estimation. Ainsi, les champs de pluie et d'écart type d'estimation associés sont obtenus en considérant :

- pour  $Y > Y_2 = 1.4 \times X + 596.7 + 10$ ,

$$z(X_i, Y_i) = z_{\text{Nord}}(X_i, Y_i) \text{ et } \sigma_\varepsilon(X_i, Y_i) = \sigma_{\varepsilon \text{Nord}}(X_i, Y_i)$$

- pour  $Y \in [Y_1 = 1.4 \times X + 596.7 - 10, Y_2 = 1.4 \times X + 596.7 + 10]$ ,

$$z(X_i, Y_i) = \frac{z_{\text{Nord}}(X_i, Y_i) + z_{\text{SudEst}}(X_i, Y_i)}{2} \text{ et pas d'évaluation de } \sigma_\varepsilon,$$

- pour  $Y < Y_1 = 1.4 \times X + 596.7 - 10$ ,

$$z(X_i, Y_i) = z_{\text{SudEst}}(X_i, Y_i) \text{ et } \sigma_\varepsilon(X_i, Y_i) = \sigma_{\varepsilon \text{SudEst}}(X_i, Y_i).$$

#### III.2.2.1.3.2. Comparaison des méthodes, validation croisée

Dans un premier temps, nous avons comparé les valeurs estimées et les écarts type associés par les différentes méthodes. Le calcul est fait pour les pluies décennales de 24 h (moyenne : 83.6 mm/24 h et écart type : 18.5 mm/24 h).

Les différences d'estimation sont en général faibles dans la zone d'intérêt :

- les différences varient entre -5 et 3 mm/24 h entre le krigeage des pluies brutes et des pluies sans dérive,
- les différences varient entre -12 et 6 mm/24 h entre le krigeage des pluies brutes et la division en deux sous régions, en particulier les différences d'estimation au Nord varient entre -2 et 2 mm/24 h et c'est dans la région Sud Est que les différences deviennent plus importantes (dans les zones de pluies plus fortes, Coursegoules par exemple, la méthode « régions » donne des estimations légèrement plus fortes),

- les différences varient entre -12 et 10 mm/24 h entre le krigeage des pluies sans dérive et la division en sous régions, de même que précédemment les différences d'estimation sont plus fortes au Sud-Est.

D'autre part, les écarts type d'estimation des différentes méthodes sont aussi comparables :

- les écarts type d'estimation par krigeage universel sont toujours plus faibles que ceux par krigeage sur les pluies brutes : les différences varient entre 0.2 et 1 mm/24 h,
- au Nord, les écarts type d'estimation par la méthode « régions » sont légèrement inférieurs à ceux du krigeage des pluies brutes : entre 1 et 2 mm/24 h de moins ; par contre, au Sud Est, c'est l'inverse, et les différences varient entre 0 et -4 mm/24 h,
- les différences vont dans le même sens lorsque l'on compare les écarts type d'estimation par la méthode « régions » et ceux du krigeage des pluies sans dérive avec au Nord des différences entre 0 et 2 mm/24 h et au Sud entre 0 et -4 mm/24 h.

Les résultats de la validation croisée montrent que, quelle que soit la méthode, les coefficients de détermination  $R^2$  entre variables estimées par krigeage et variables connues sont bons : entre 64 et 68 % de la variance est expliquée, suivant les cas (cf. Tableau III 2). De même, les moyennes sont bien retrouvées par le krigeage (cf. Tableau III 3). Par contre, les écarts type, et donc minimum et maximum, le sont moins bien.

Finalement, cette comparaison montre que les résultats sont équivalents, aucune méthode ne se distingue comme reconstituant mieux les champs qu'une autre.

|       | Domaine complet :<br>pluie brute<br>Modèle puissance | Domaine complet :<br>pluie sans dérive<br>Modèle exponentiel | Division en deux sous<br>régions : pluie brute<br>Modèles exponentiels |
|-------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $R^2$ | 0.66                                                 | 0.66                                                         | 0.65                                                                   |
| E     | 0.66                                                 | 0.66                                                         | 0.65                                                                   |

*Tableau III 2 : Comparaison de différentes méthodes d'estimation par krigeage à 24 h par validation croisée pour les pluies décennales à 24 h : critères de performance (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*

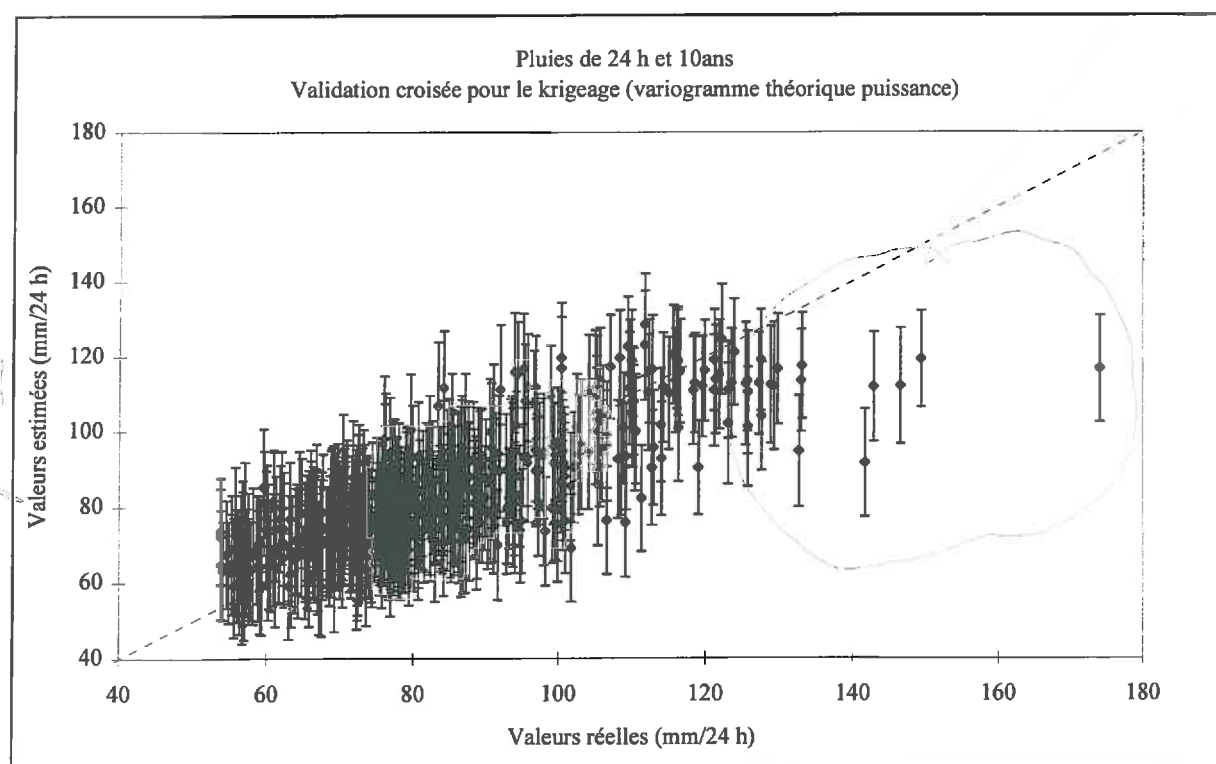


active  
par krigeage

|            | eur réelle | Domaine complet :<br>pluie brute<br>Modèle puissance | Domaine complet :<br>pluie sans dérive<br>Modèle exponentiel | Division en deux sous<br>régions : pluie brute<br>Modèles exponentiels |
|------------|------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|            | 83.7       | 83.6                                                 | 83.5                                                         | 83.5                                                                   |
| Ecart type | 18.5       | 14.6                                                 | 15.0                                                         | 14.6                                                                   |

**Tableau III 3 :** Comparaison de différentes méthodes d'estimation par krigeage à 24 h par validation croisée pour les pluies décennales à 24 h : comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et interpolées (pas de la maille de calcul : 5.25 km)

Par ailleurs, les intervalles de confiance à 80 % des valeurs estimées sont tout à fait raisonnables. En général, les valeurs connues se trouvent dans l'intervalle de confiance de la valeur estimée correspondante (cf. exemple Figure III 10).



**Figure III 10 :** Graphe des valeurs estimées avec un intervalle de confiance à 80 % en fonction des valeurs connues, exemple de résultats de validation croisée pour le krigeage des pluies décennales brutes à 24 h

### *III.2.2.1.3.3. Conclusion*

Pour conclure, les trois méthodes proposées donnent des estimations équivalentes et la validation croisée ne permet pas d'en distinguer une meilleure que les autres pour l'interpolation.

Le modèle puissance est facile à utiliser, puisqu'il ne nécessite que l'utilisation du krigeage ordinaire, alors que le modèle associé à la pluie sans dérive nécessite le krigeage universel. D'autre part, le fait de diviser le domaine en deux sous régions pose problème quant aux écarts type d'estimation sur une zone de raccord des calculs. Cependant, cette étude a permis de distinguer une zone à risque plus grand dans le domaine d'étude.

Finalement, c'est la modélisation par un variogramme puissance qui a été retenue dans la suite, pour sa simplicité et sa bonne reconstitution des champs de pluie.

### III.2.2.2. Pas de temps inférieurs à 24 h

Pour les pas de temps courts (1 h à 6 h), les variogrammes expérimentaux des pluies décennales et centennales ont des allures sphériques (cf. Figure III 5). Par contre, les variogrammes à 12 h semblent plus linéaires, et se rapprochent de la forme de ceux à 24 h à partir d'une distance de 100 km. Ainsi, comme pour le pas de temps de la journée, nous avons testé la possibilité de séparer le domaine en deux sous régions et celle de mettre en évidence une dérive fonction de X et Y. Les résultats de validation croisée ont été comparés à ceux d'un krigeage ordinaire avec un modèle sphérique. Comme pour le pas de temps de 24 h, les méthodes sont équivalentes (la division en deux sous régions donnant des résultats légèrement moins bons), et seule la modélisation par un modèle sphérique a été retenue. Dans la suite, le fait de prendre un modèle pépétique ou non est discuté.

En effet, le premier point des variogrammes expérimentaux ne correspond qu'à 3 couples (cf. § II.2.1). Pour les pas de temps courts, ce point est proche de 0, ce qui suggère de ne pas modéliser le comportement à l'origine du champ avec une pépète. Mais, comme ce point n'est pas très représentatif, nous avons étudié par validation croisée l'influence d'une

pépité : le krigeage a été appliqué à chaque paramètre pluviométrique avec un modèle pépitique et un modèle non pépitique.

Jusqu'à 6 h, les critères montrent que les estimations ne diffèrent pas beaucoup dans les deux cas (cf. Tableau III 4 et Tableau III 5, pour le cas des pluies décennales). Moyennes et écarts type des échantillons estimés sont équivalents et proches de ceux des valeurs réelles, les écarts type étant toujours sous-estimés. De plus, les différences entre coefficients de détermination des valeurs estimées et des valeurs connues ne sont que de quelques pourcent, non significatifs devant l'incertitude sur les valeurs réelles.

A 12 h, les résultats sont mauvais quelle que soit la méthode utilisée : seuls 32 ou 37 % de la variance sont expliqués, le choix n'est donc pas déterminé par ce pas de temps.

Ainsi, nous avons choisi de modéliser les structures spatiales des pluies à pas de temps courts par des modèles non pépitiques.

D'autre part, les coefficients de détermination diminuent avec le pas de temps : par exemple, pour les pluies décennales, environ 66 % de la variance est expliquée à 1 h alors que seulement 32 % est expliquée à 12 h. Ainsi, les résultats d'interpolation deviennent moins bons quand la durée augmente.

|           | Echantillon de validation |            | Modèle non pépitique |            | Modèle pépitique |            |
|-----------|---------------------------|------------|----------------------|------------|------------------|------------|
|           | Moyenne                   | Ecart type | Moyenne              | Ecart type | Moyenne          | Ecart type |
| 1h 10ans  | 25.7                      | 7.3        | 25.7                 | 6.4        | 25.8             | 6.2        |
| 2h 10ans  | 32.1                      | 8.6        | 32.2                 | 7.6        | 32.3             | 7.4        |
| 3h 10ans  | 37.3                      | 9.7        | 37.5                 | 8.8        | 37.6             | 8.4        |
| 6h 10ans  | 47.9                      | 12.4       | 48.3                 | 11.2       | 48.3             | 10.6       |
| 12h 10ans | 61.9                      | 15.1       | 61.6                 | 9.2        | 62.1             | 11.3       |

**Tableau III 4 :** Statistique descriptive des valeurs réelles et interpolées en validation croisée pour le choix entre un modèle théorique pépitique ou non (exemple des pluies décennales, valeurs en mm par pas de temps) (pas de la maille de calcul : 5.250 km)

|           | R <sup>2</sup>       |                  | E                    |                  |
|-----------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
|           | Modèle non pépitique | Modèle pépitique | Modèle non pépitique | Modèle pépitique |
| 1h 10ans  | 0.66                 | 0.68             | 0.67                 | 0.68             |
| 2h 10ans  | 0.63                 | 0.66             | 0.65                 | 0.65             |
| 3h 10ans  | 0.59                 | 0.61             | 0.59                 | 0.61             |
| 6h 10ans  | 0.51                 | 0.54             | 0.48                 | 0.52             |
| 12h 10ans | 0.32                 | 0.39             | 0.38                 | 0.37             |

*Tableau III 5 : Critères de performance en validation croisée pour le choix entre un modèle théorique pépitique ou non (exemple des pluies décennales) (pas de la maille de calcul : 5.250 km)*

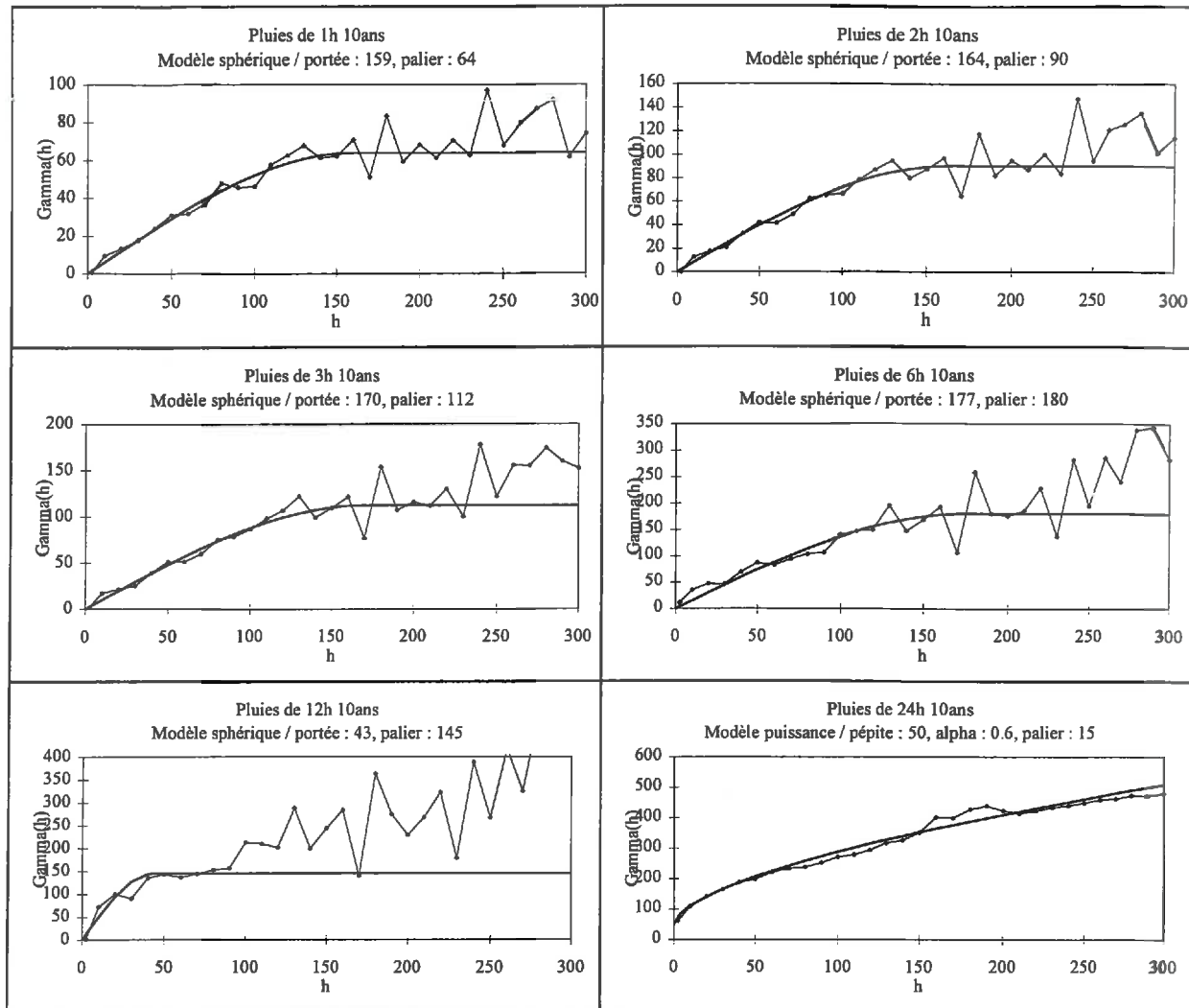
### III.2.2.3. Conclusion : modèles théoriques ajustés

Les pluies décennales et centennales de faible pas de temps (1 h à 6 h) ont une bonne structure spatiale, les modèles théoriques ajustés sont des modèles sphériques non pépitiques (cf. Tableau III 6, Figure III 11, Tableau III 7 et Figure III 12).

Jusqu'à 6 h, les portées des phénomènes sont assez grandes. Cela signifie que la probabilité d'observer une forte pluie de 1 h, par exemple, est bien répartie dans les Alpes. Ces portées augmentent avec le pas de temps jusqu'à 6 h. D'autre part, les paliers sont supérieurs aux variances des champs (de 20 % environ). En effet, les points utilisés pour le calcul des variances des champs sont corrélés, ce qui peut expliquer cette différence.

A 12 h, les portées sont plus faibles que pour les pas de temps inférieurs et le palier est inférieur à la variance du champ. Pour ce pas de temps, le faible nombre de stations disponibles se fait ressentir par une incertitude sur la modélisation de la variabilité spatiale du champ ; c'est ce que met en évidence la validation croisée, puisqu'à ce pas de temps les résultats sont les moins bons.

Enfin, à 24 h, la variabilité spatiale des pluies décennales ou centennales a été ajustée par un modèle puissance. Cependant une étude plus approfondie a permis de distinguer une zone à risque plus important au Sud Est de notre domaine.



**Figure III 11 :** Variogrammes expérimentaux et théoriques des pluies décennales pour les différents pas de temps (Gamma(h) en mm<sup>2</sup> et h en km)

| Pas de temps                         | 1 h       | 2 h  | 3 h  | 6 h   | 12 h  | 24 h      |
|--------------------------------------|-----------|------|------|-------|-------|-----------|
| Type de modèle                       | sphérique |      |      |       |       | puissance |
| Pépite (mm <sup>2</sup> )            | 0         | 0    | 0    | 0     | 0     | 50        |
| Portée (km)                          | 159       | 164  | 170  | 177   | 43    | 0.6       |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 64        | 90   | 112  | 180   | 145   | 15        |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 53.7      | 74.6 | 94.6 | 153.3 | 227.0 | 342.3     |

**Tableau III 6 :** Caractéristiques des variogrammes des pluies décennales

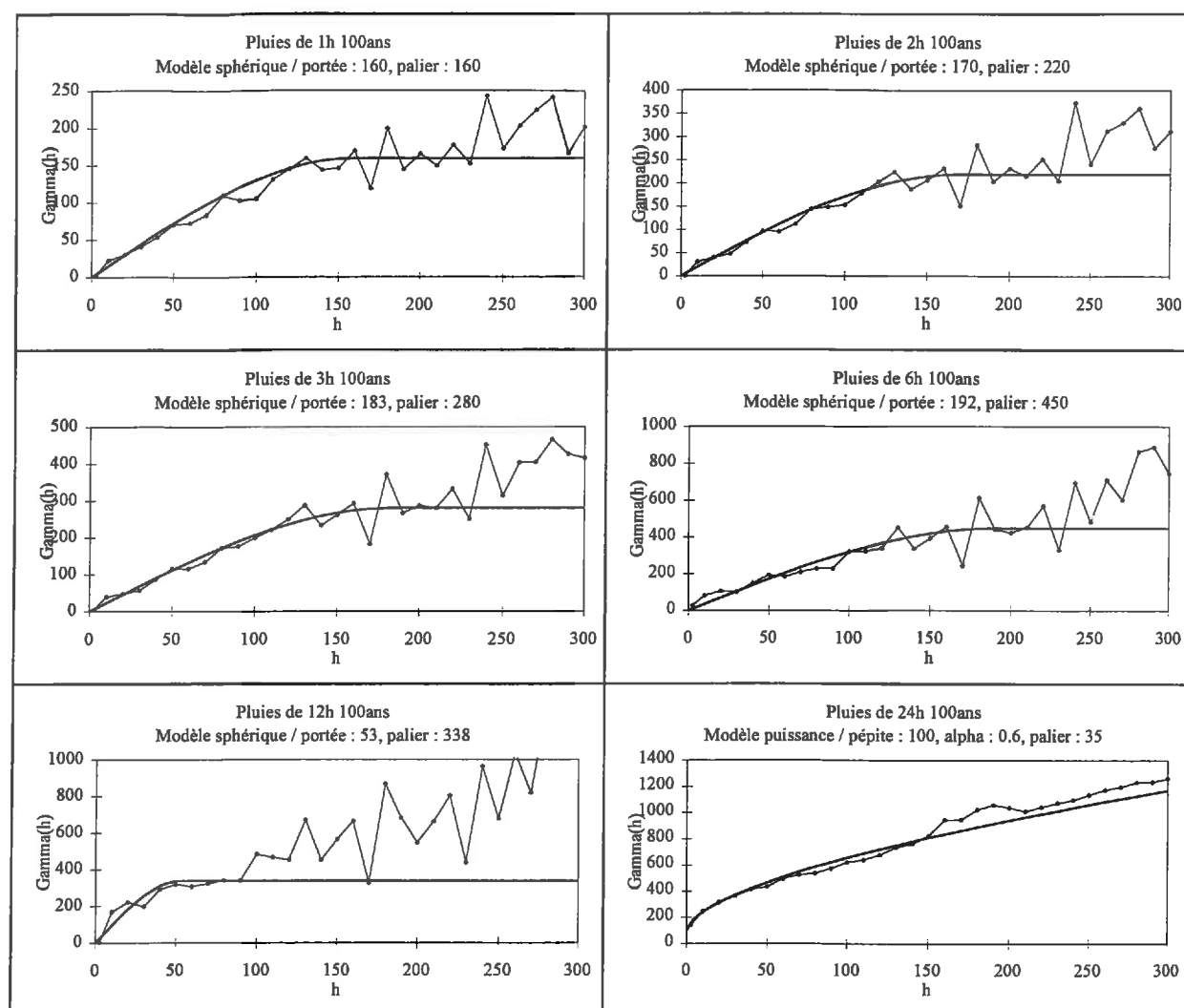


Figure III 12 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des pluies centennales pour les différents pas de temps (Gamma(h) en mm<sup>2</sup> et h en km)

| Pas de temps                         | 1 h       | 2 h   | 3 h   | 6 h   | 12 h  | 24 h      |
|--------------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Type de modèle                       | sphérique |       |       |       |       | puissance |
| Pépite (mm <sup>2</sup> )            | 0         | 0     | 0     | 0     | 0     | 100       |
| Portée (km)                          | 160       | 170   | 183   | 192   | 53    | 0.6       |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 160       | 220   | 280   | 450   | 338   | 35        |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 128.1     | 179.7 | 228.3 | 362.5 | 532.0 | 818.0     |

Tableau III 7 : Caractéristiques des variogrammes des pluies centennales

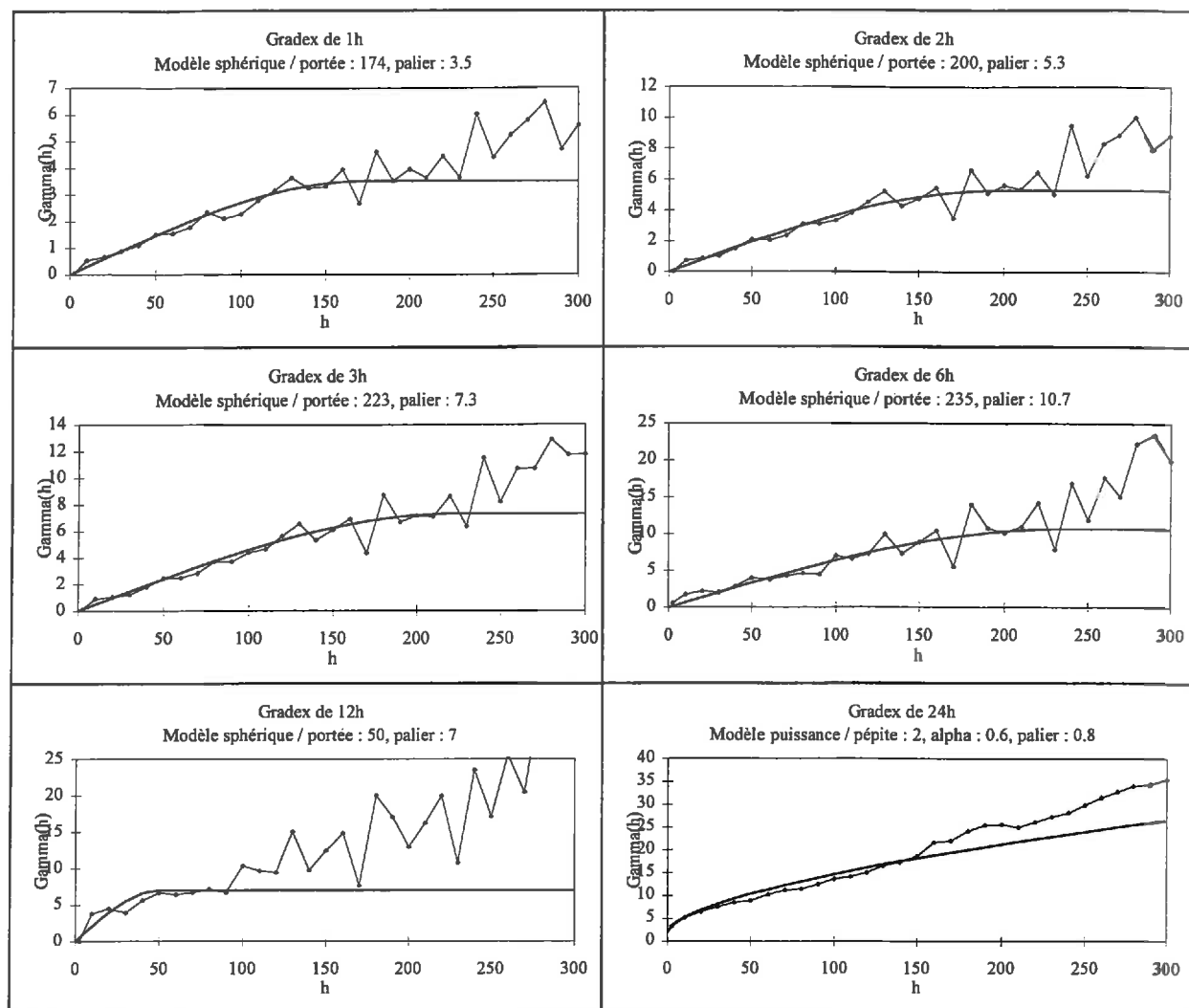


Figure III 13 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des gradex pour les différents pas de temps (Gamma(h) en  $\text{mm}^2$  et h en km)

| Pas de temps                        | 1 h       | 2 h | 3 h | 6 h  | 12 h | 24 h      |
|-------------------------------------|-----------|-----|-----|------|------|-----------|
| Type de modèle                      | sphérique |     |     |      |      | puissance |
| Pépite ( $\text{mm}^2$ )            | 0         | 0   | 0   | 0    | 0    | 2         |
| Portée (km)                         | 174       | 200 | 223 | 235  | 50   | 0.6       |
| Palier ( $\text{mm}^2$ )            | 3.5       | 5.3 | 7.3 | 10.7 | 7    | 0.8       |
| Variance du champ ( $\text{mm}^2$ ) | 3.0       | 4.2 | 5.4 | 8.3  | 12.0 | 19.4      |

Tableau III 8 : Caractéristiques des variogrammes des gradex

### III.2.3. Variogrammes isotropes des gradex

Les variogrammes des gradex ont pour chaque durée la même allure que les pluies décennales ou centennales (cf. Figure III 13 et Tableau III 8).

Ainsi, les gradex ont une bonne structure spatiale pour les faibles pas de temps et des modèles sphériques non pépitiques ont été ajustés de 1 h à 12 h. Des remarques similaires quant aux portées et aux paliers peuvent être faites, en particulier les portées sont assez grandes jusqu'à 6 h.

Comme dans le cas des précipitations décennales et centennales, le variogramme expérimental des gradex à 24 h présente une dérive. Il a été ajusté par un modèle puissance.

### III.2.4. Variogramme isotrope du coefficient de Montana

Le coefficient de Montana semble avoir une bonne structure spatiale, si le premier point correspondant à 3 couples de postes de mesure est pris en compte (cf. Figure III 14 et Tableau III 9). Le modèle choisi est exponentiel pépitique. Cependant, la portée de ce phénomène est faible : elle peut être estimée à 20 km.

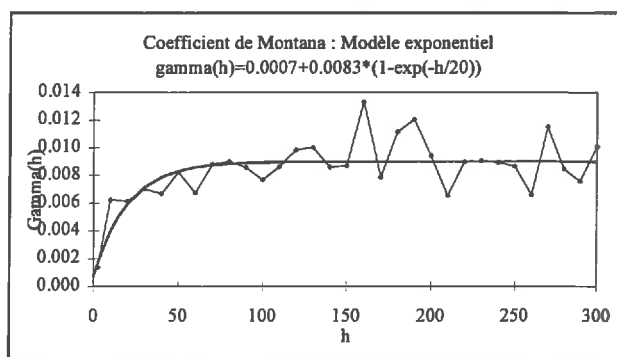


Figure III 14 : Variogrammes expérimental et théorique du coefficient de Montana ( $h$  en km)

|                    | Pépite | Portée (km) | Palier | Variance du champ |
|--------------------|--------|-------------|--------|-------------------|
| Modèle exponentiel | 0.0007 | 20          | 0.0083 | 0.0083            |

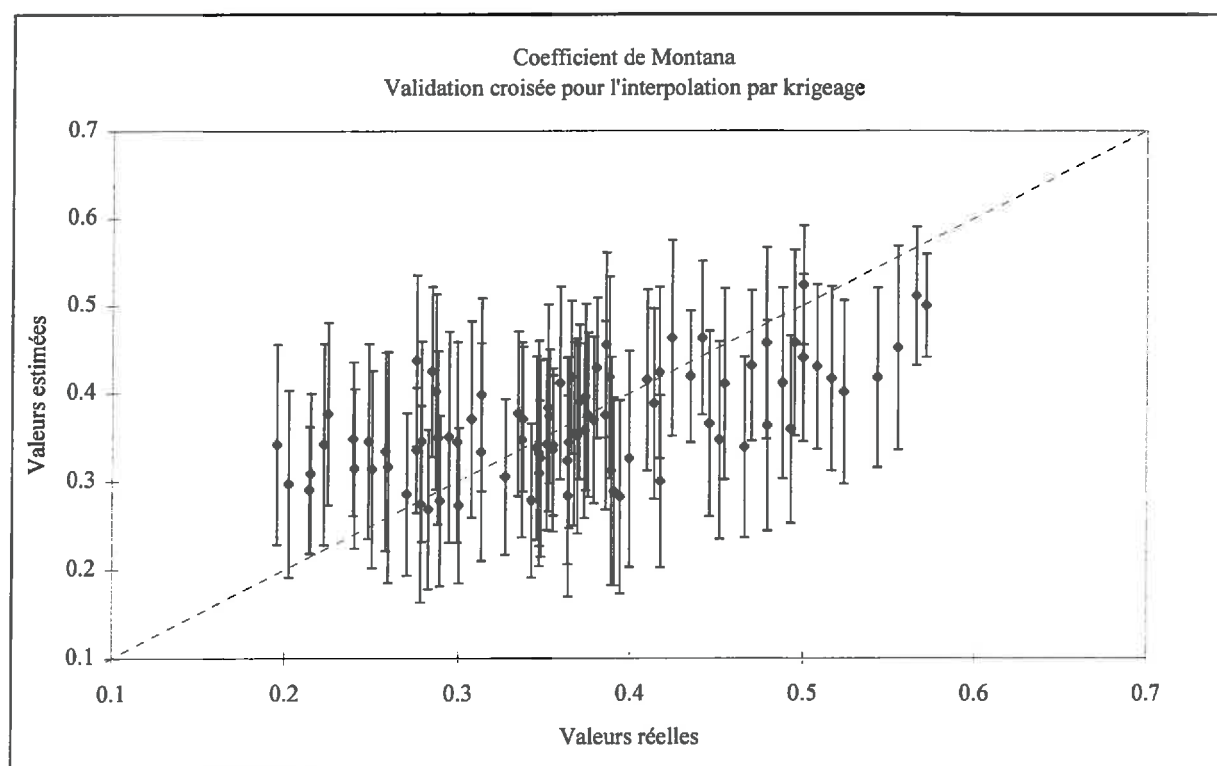
Tableau III 9 : Caractéristiques du variogramme du coefficient de Montana



Les résultats de validation croisée montrent que l'interpolation par krigage des coefficients de Montana n'est pas très satisfaisante (cf. Tableau III 10 et Figure III 15). Le coefficient de détermination entre valeurs réelles et estimées est de 0.39 seulement. D'autre part, la moyenne des valeurs estimées est proche de la moyenne des valeurs réelles, mais les écarts type sont sous-estimés. Cela peut s'expliquer par la faible portée du phénomène et la faible densité du réseau de pluviographes.

|       | Interpolation par krigage |          | Valeurs réelles | Interpolation par krigage |
|-------|---------------------------|----------|-----------------|---------------------------|
| $R^2$ | 0.39                      | m        | 0.367           | 0.367                     |
| E     | 0.39                      | $\sigma$ | 0.091           | 0.058                     |

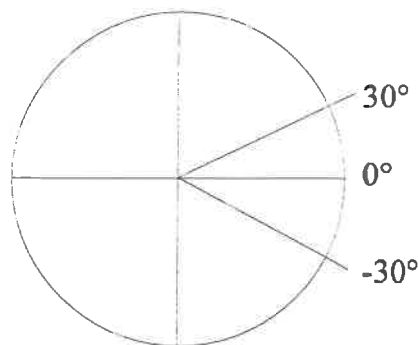
*Tableau III 10 : Résultats de validation croisée du krigage des coefficients de Montana (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*



*Figure III 15 : Graphe des valeurs estimées avec un intervalle de confiance à 80 % en fonction des valeurs connues, validation croisée pour le krigage des coefficients de Montana*

### III.2.5. Variogrammes directionnels

Pour chacune des variables pluviométriques, nous avons recherché des directions privilégiées par le calcul de variogrammes directionnels. Pour ce faire, les directions obtenues par rotation autour de l'origine, par pas de  $15^\circ$  ont été testées (angles de  $30^\circ$ ). Le problème rencontré dans ce cas est dû à la forme du domaine. Ainsi, pour des directions comprises entre  $-30^\circ$  et  $30^\circ$ , les classes dont le nombre de couples est significatif sont peu nombreuses.



Cependant, aucune direction privilégiée ne s'est distinguée pour les différentes variables pluviométriques.

### III.2.6. Conclusion

Tous les phénomènes sont assez bien structurés dans l'espace. De plus, l'interdistance minimale entre stations est de 14 km en moyenne pour les pluviographes. La distance entre les postes et leurs 6 plus proches voisins est en général inférieure à 50 km. Quelques stations font exception à cette règle, ce sont les stations situées en bordure du domaine (Liebvilliers, Villers Le Lac, Tanneron Saint Cassien, Mallemort ...). Ainsi, pour les variables pluies décennales, centennales et gradex, il y a toujours des stations situées à « portée » d'un point quelconque, auxquelles ce point est statistiquement lié, au moins partiellement. Il y a peu de zones hors de portée des stations et par conséquent, l'interpolation et la cartographie par krigeage sont possibles.

Par contre, la portée du coefficient de Montana étant de 20 km seulement, les résultats de krigeage pour cette variable sont mauvais.

Finalement, nous avons appliqué le krigeage ordinaire à toutes les variables pluviométriques étudiées. Les commentaires des cartes obtenues font l'objet du paragraphe suivant.

### **III.3. Cartes krigées des différents champs pluviométriques**

Les Figure III 16, Figure III 17 et Figure III 18 donnent les exemples des cartes des pluies décennales obtenues par krigeage et les cartes des écarts type de l'erreur d'estimation associées. Les cartes de pluies centennales et de gradex sont données en annexe 5, elles présentent les mêmes caractéristiques que celles des pluies de temps de retour 10 ans. De plus, Figure III 19 représente la cartographie du coefficient de Montana.

#### **III.3.1. Pluies décennales**

Pour les pas de temps relativement courts, *de 1 h à 3 h*, les cartes des champs sont peu chahutées. Une zone de faibles valeurs de précipitations extrêmes est située au centre des Alpes, dans une région allant de la Tarentaise au Nord du Briançonnais.

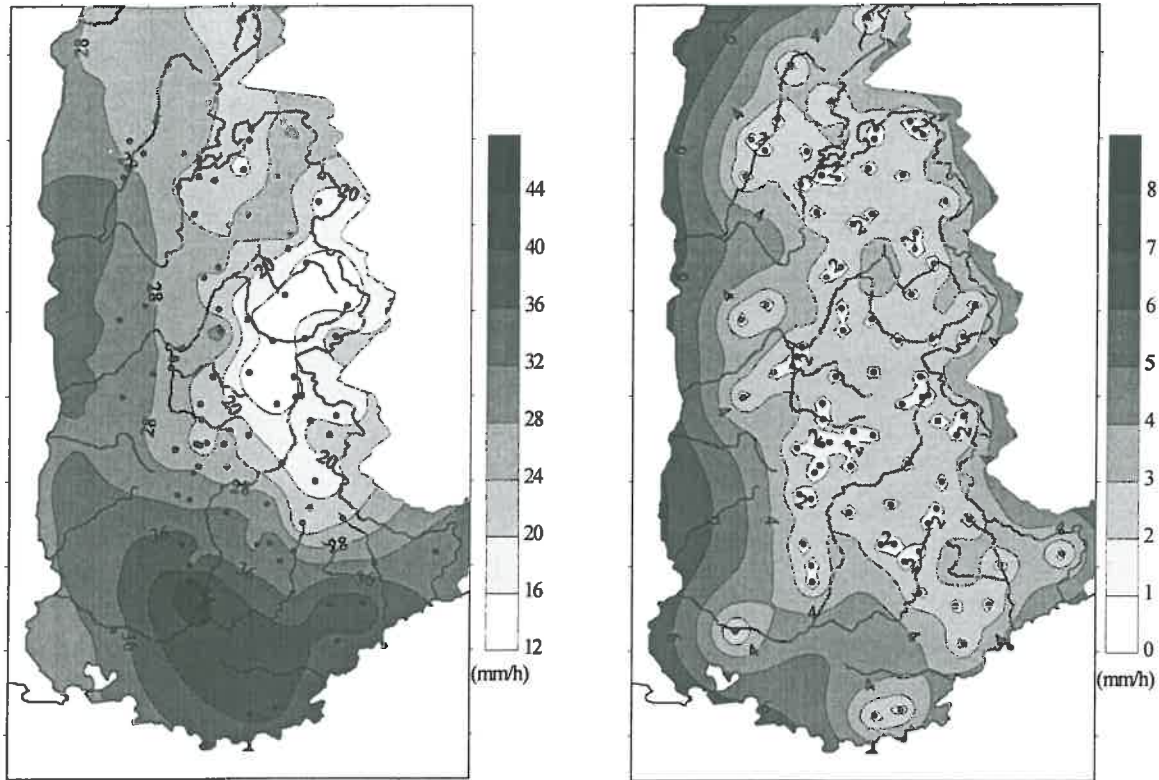
Les précipitations sont plus importantes au Nord, à l'Ouest et au Sud. En particulier, c'est au Sud que les valeurs de précipitations les plus fortes sont enregistrées pour tous les pas de temps, ce qui s'explique par l'influence de la Méditerranée. Ces cartes mettent donc en évidence un effet d'abri croissant lorsque l'on pénètre dans le massif alpin.

*Lorsque la durée augmente*, les cartes ont un aspect moins lisse et des foyers de précipitations fortes par rapport aux autres se distinguent, en particulier à Coursegoules.

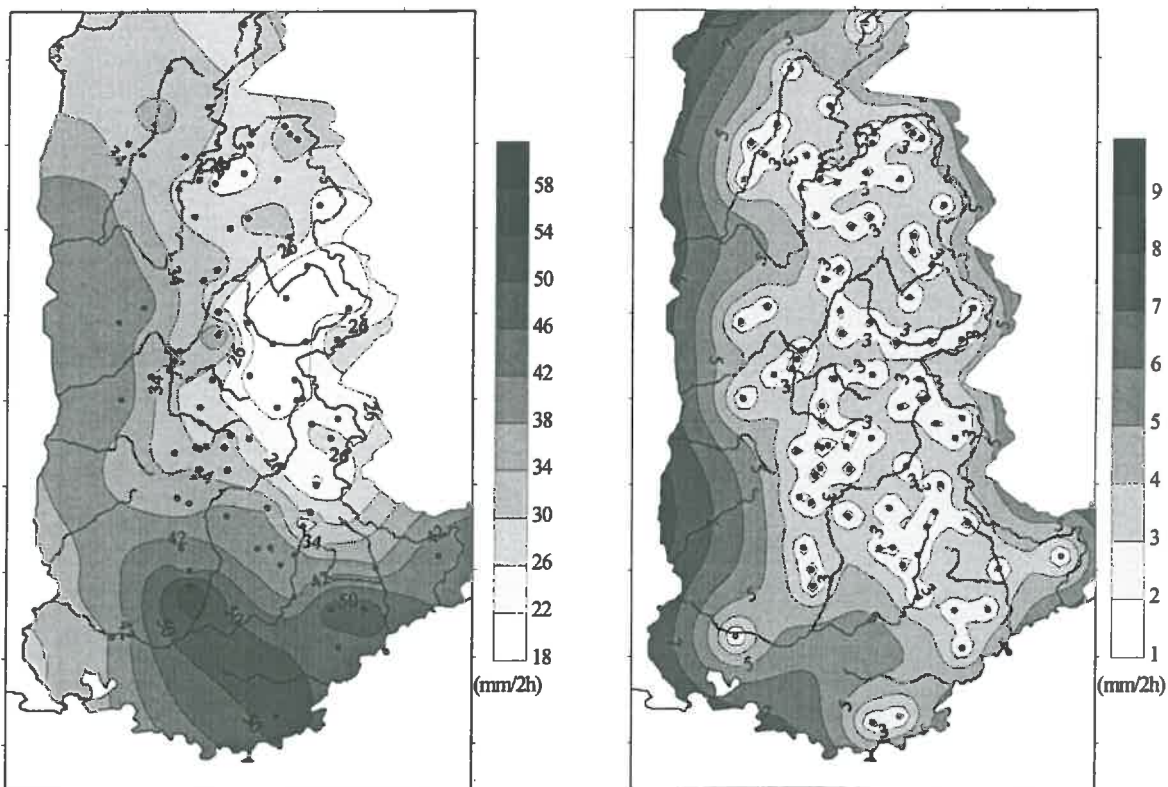
*A 24 h*, le champ est bien défini, vu la densité d'information pluviométrique. Les zones de plus fortes intensités pluvieuses sont situées au Sud-Est du domaine (Var et Alpes Maritimes). Ensuite, différents massifs montagneux se distinguent comme étant des zones à intensités élevées : le Jura, la Chartreuse, le Dévoluy et les Baronnies. Enfin, la zone à plus faibles intensités est toujours celle du centre des Alpes (Maurienne et Tarentaise).

La comparaison entre la carte à 12 h et celle à 24 h suggère que le champ à 12 h est mal reconstitué à partir du faible nombre de pluviographes. C'est déjà ce que la validation croisée avait montré.

Pluies de 1 h et 10ans



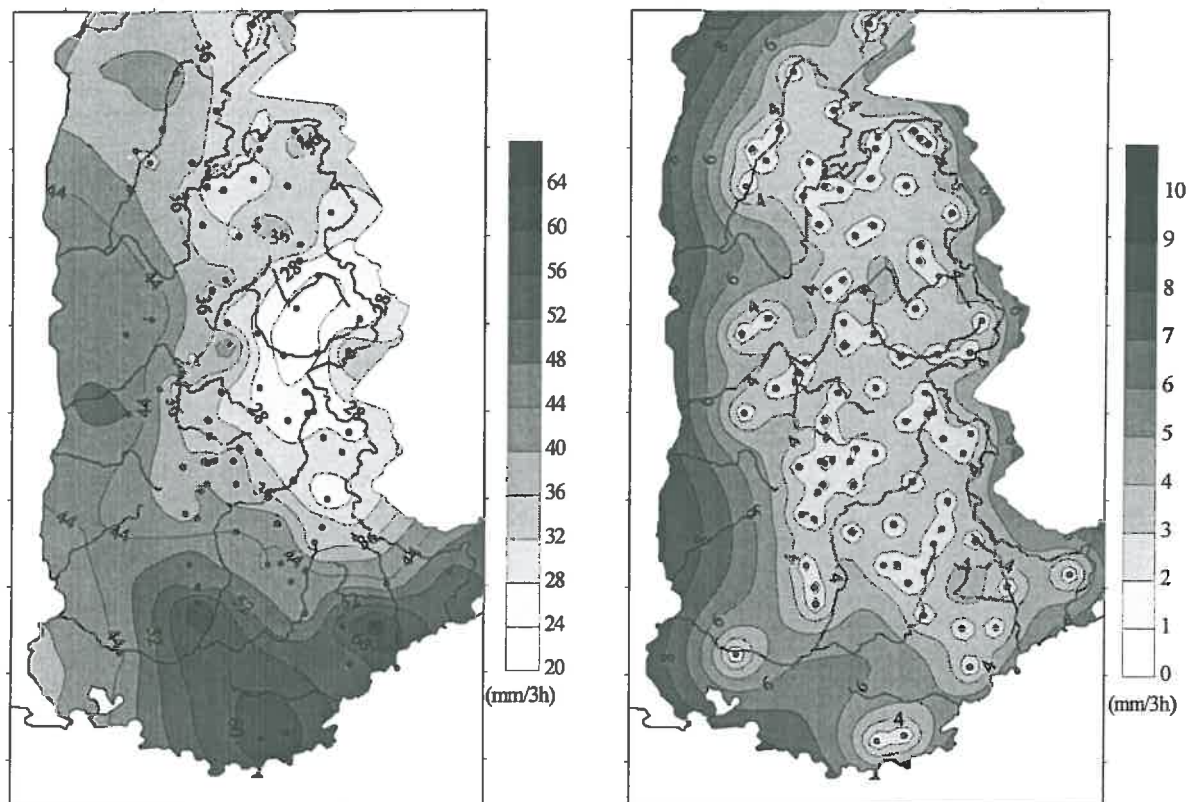
Pluies de 2 h et 10ans



**Figure III 16 :** Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par krigeage : pluies décennales de 1 h et de 2 h (pas de calcul : 5.25 km)



Pluies de 3 h et 10ans



Pluies de 6 h et 10ans

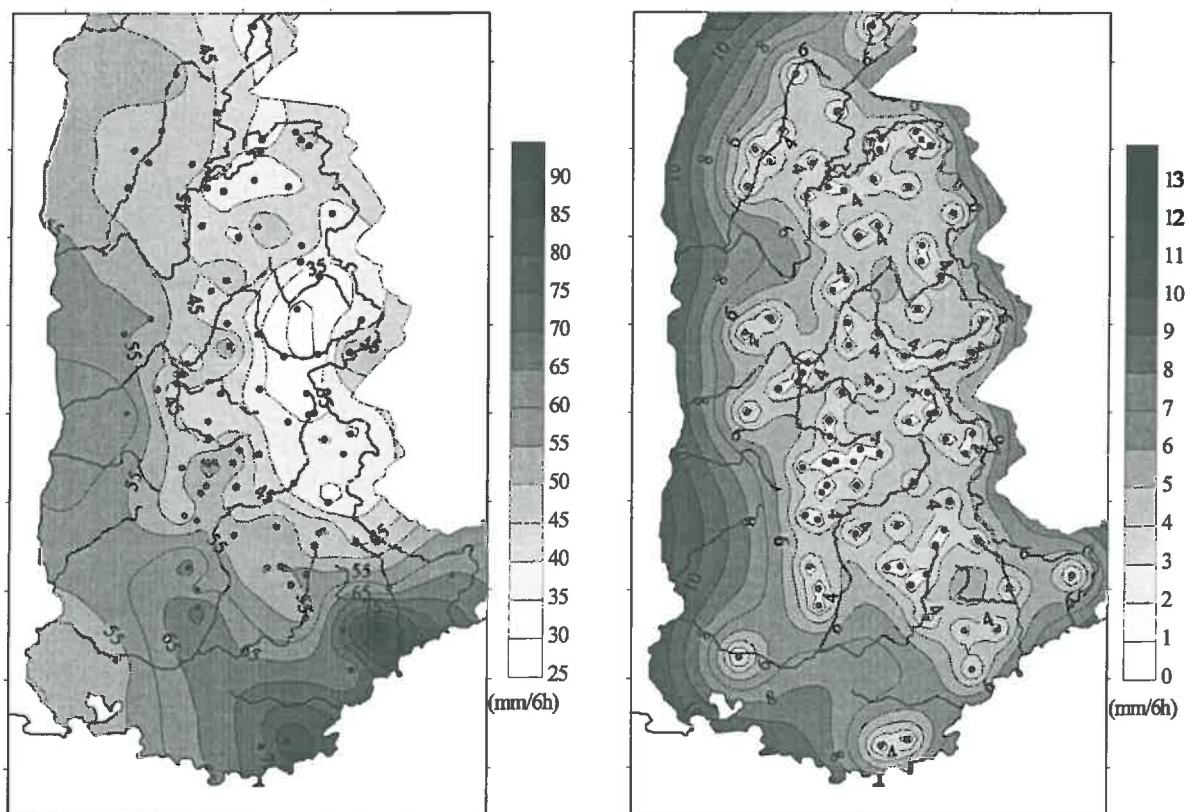
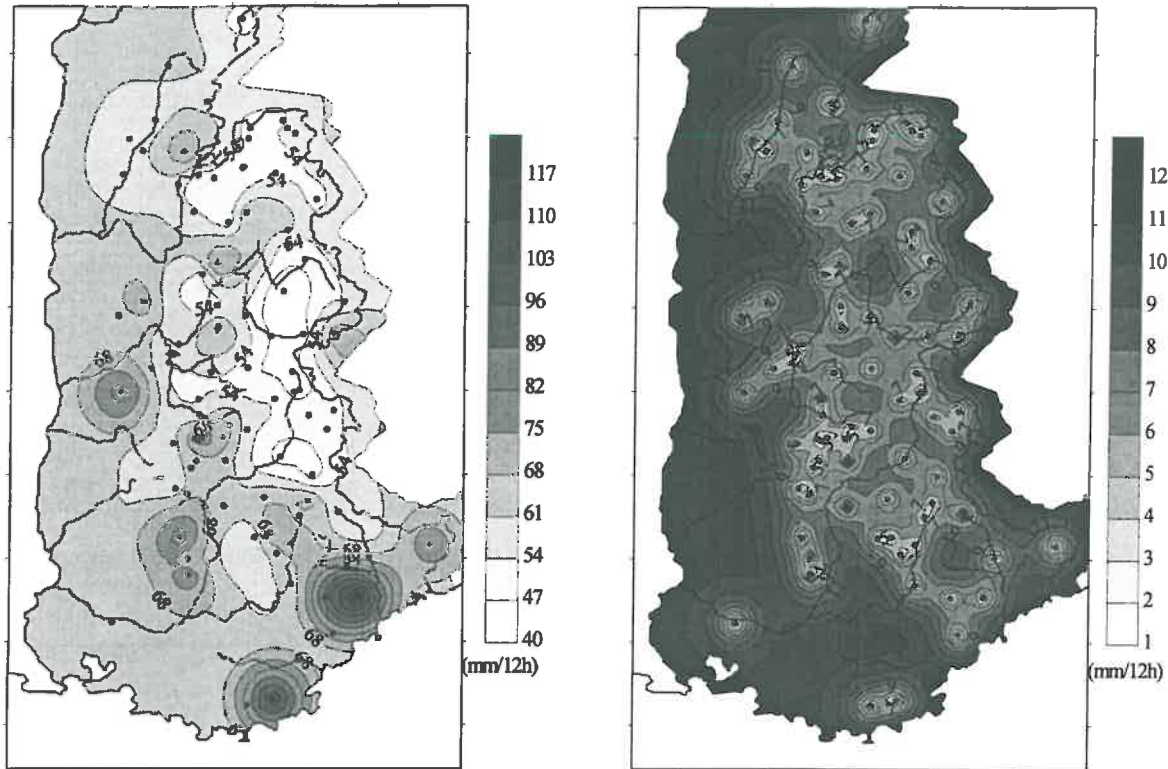
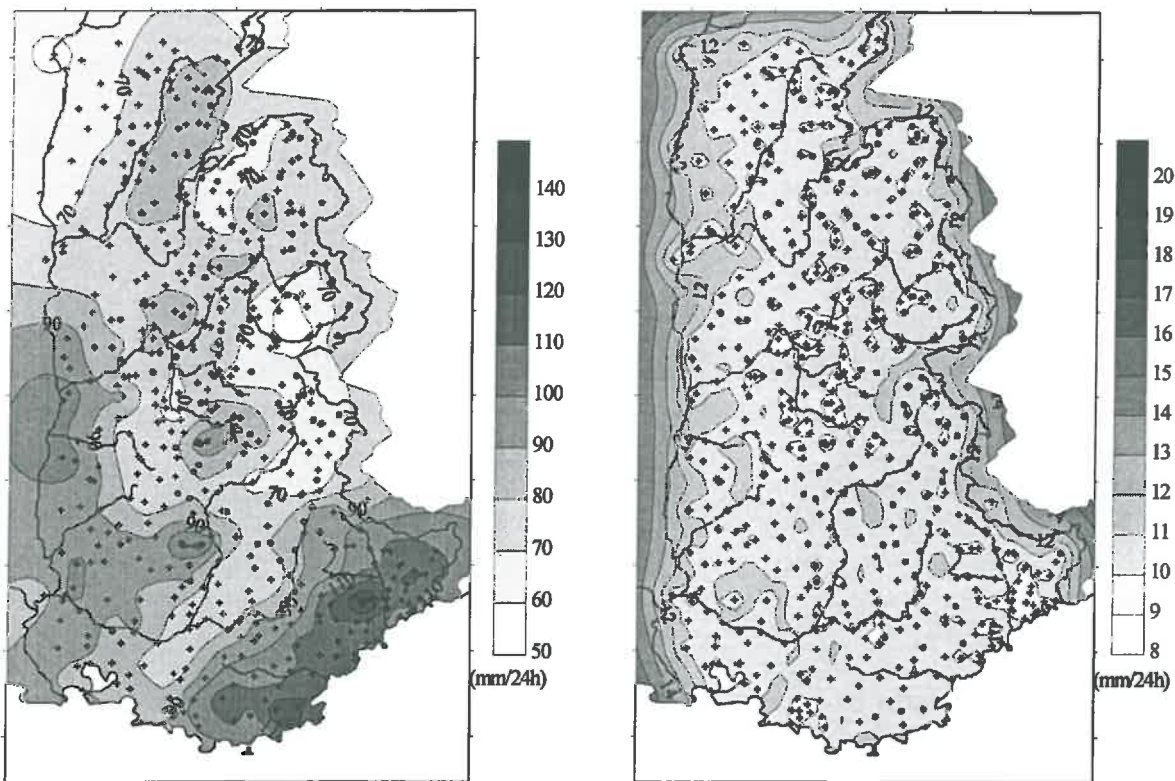


Figure III 17 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par krigeage : pluies décennales de 3 h et de 6 h (pas de calcul : 5.25 km)

Pluies de 12 h et 10ans



Pluies de 24 h et 10ans



**Figure III 18 :** Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par krigeage : pluies décennales de 12 h et de 24 h (pas de calcul : 5.25 km)

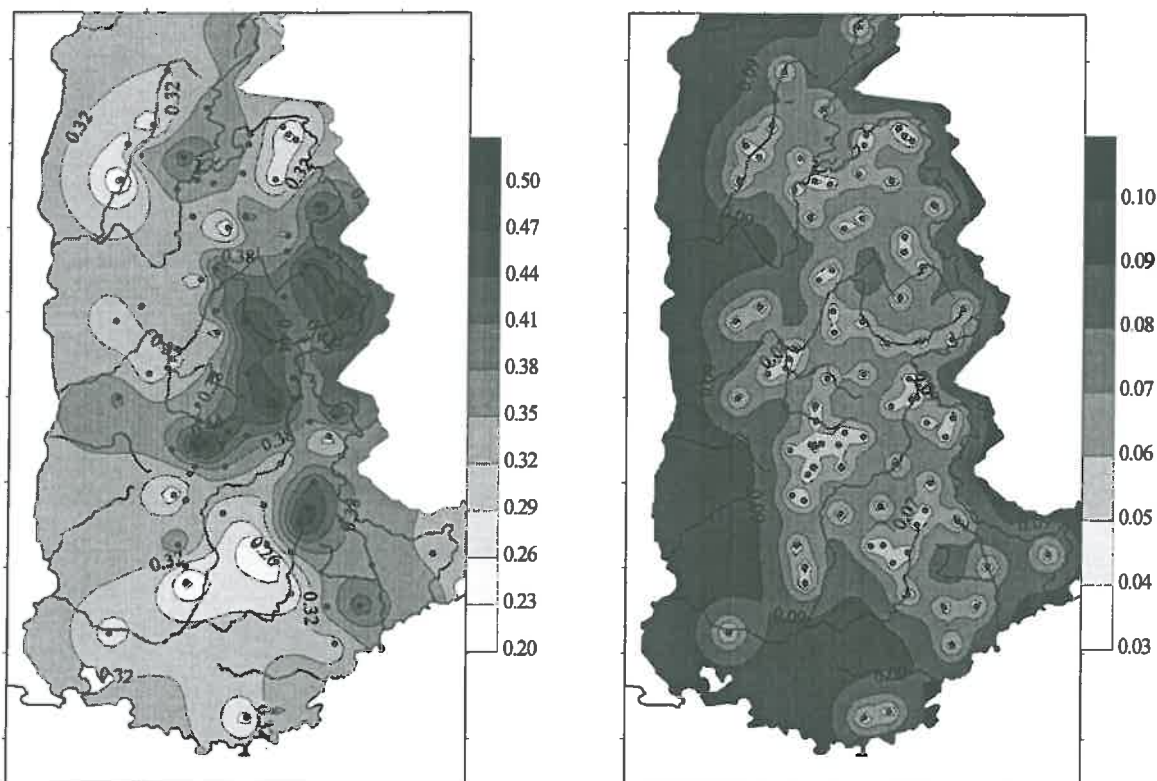


Ces cartes sont difficilement comparables au découpage avancé au chapitre I, et qui s'appuyait sur les précipitations mensuelles et les types de temps engendrant les précipitations (zone méridionale, septentrionale, zone Est). En effet, ce découpage ne se retrouve à aucun pas de temps.

### **III.3.2.Coefficient de Montana**

La cartographie des coefficients de Montana montre une répartition spatiale des coefficients "inverse" de celle des champs de pluies décennales. En effet, les valeurs les plus élevées de Montana sont situées au centre des Alpes et au Nord des Alpes Maritimes. Les valeurs plus faibles se trouvent dans l'ensemble des Pré-alpes, c'est-à-dire dans la moitié Ouest de notre domaine.

Or plus le coefficient de Montana est élevée, moins le gradex varie d'un pas de temps à l'autre. C'est pour cela que la zone centre, par exemple, reste toujours celle qui enregistre les valeurs extrêmes les plus faibles.



**Figure III 19 :** *Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par krigeage : coefficients de Montana (pas de calcul : 5.25 km)*

### **III.4.Conclusion**

Après avoir rappelé la théorie du krigeage, nous sommes passés à l'étude de la variabilité spatiale des caractéristiques des pluies extrêmes : pluies décennales et centennales, gradex et coefficient de Montana.

De manière générale, tous les champs sont bien structurés pour les pas de temps faibles : de 1 h à 6 h. De plus, des portées importantes montrent que la probabilité d'observer une pluie forte et courte est bien répartie dans les Alpes.

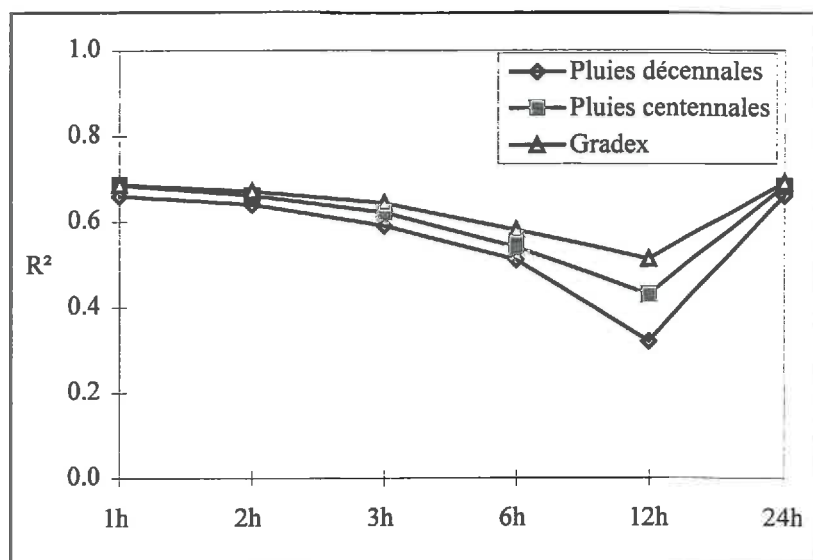
Par contre, à 12 h, le faible nombre de postes de mesure empêche de bien connaître les champs correspondants.

Pour le pas de temps de 24 h et grâce au grand nombre de postes disponibles, l'étude a permis de distinguer une zone à risque plus important au Sud Est de notre domaine.

Ces remarques et la répartition spatiale des postes pour les différentes durées permettent d'appliquer le krigeage pour la cartographie des pluies décennales, centennales et des gradex. Le coefficient de Montana a une portée trop courte pour que le krigeage donne de bons résultats avec le réseau de pluviographes actuellement disponible.

D'autre part, les résultats de validation croisée (cf. Figure III 20) montrent que les interpolations par krigeage sont assez bonnes : les pourcentages de variance expliquée sont supérieurs à 60 % jusqu'à 3 h, et à 24 h. Le pas de temps de 12 h est le moins bien reconstitué.





*Figure III 20 : Résultats de validation croisée : évolution des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et interpolées en fonction du pas de temps (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*

Enfin, l'application du krigeage met en évidence une répartition spatiale assez simple et lisse pour les durées courtes, alors qu'à 24 h, les cartes sont plus chahutées. En effet, pour le pas de temps de la journée, certains massifs montagneux se distinguent avec des intensités élevées (Jura, Chartreuse, Dévoluy et Baronnies). La zone des précipitations extrêmes les plus faibles est toujours celle du centre des Alpes (de la Tarentaise au Nord du Briançonnais) : cela montre un effet d'abri croissant lorsqu'on pénètre dans les Alpes. La zone à précipitations les plus fortes est le Sud Est des Alpes (Var et Alpes Maritimes).

CHAPITRE IV

CARTOGRAPHIE S'APPUYANT SUR LA  
REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE AVEC  
LE RELIEF



En région faiblement accidentée, le problème de la connaissance des précipitations en dehors des stations de mesure se résout assez facilement par interpolation. Par contre, le problème devient plus ardu lorsque le relief est prononcé. Généralement, une relation, presque toujours linéaire, entre l'altitude d'un lieu et les précipitations qui y sont enregistrées est recherchée. Cette façon de voir s'appuie sur le fait que les précipitations sont en grande partie liées à des ascendances orographiques. Ainsi, en Catalogne, 64 % de la variance des pluies journalières est expliquée par l'altitude (LLASAT et al., 1992). De même, ZWAHLEN (1981) explique les cumuls saisonniers de pluies par l'altitude en Suisse ( $r^2$  entre 0.21 et 0.58 suivant la saison).

Cependant cette méthode s'applique à des régions où le relief est massif, et les profils topographiques peu découpés. Ainsi, les précipitations en un lieu ne sont pas forcément liées seulement à l'altitude, mais aussi au relief environnant. SPREEN (1947) montre que les précipitations moyennes hivernales dans le Colorado sont liées à l'altitude, la pente, l'exposition et l'orientation. 88 % de la variance est expliquée avec ces 4 paramètres, alors que l'altitude n'en explique que 30 %. De même, les précipitations annuelles dans une région de Californie sont corrélées à des paramètres tels que l'altitude, la pente, la direction de la ligne de crête, la position dans le domaine ( $R^2=0.70$ ) (BURNS, 1953). Enfin, HUMBERT et al. (1997) expliquent les précipitations annuelles dans l'Est de la région Rhin Meuse par des variables décrivant l'altitude moyenne. Les pourcentages de variance expliquée sont de plus de 92 % pour toutes les années étudiées (période : 1971-1990). Ces altitudes moyennes sont calculées sur des fenêtres soit centrées sur la station soit « excentrées » : la station est située sur un côté ou dans un coin de la maille de calcul (méthode PLUVIA, HUMBERT et al., 1993).

Des études ont déjà été menées en ce sens pour expliquer les caractéristiques statistiques des précipitations extrêmes par des variables topographiques : en Lorraine (LABORDE, 1984), dans la région cévenole (SLIMANI, 1985). Pour les Alpes françaises, des premiers travaux ont été réalisés par SAIDI BOUOUDINA (1996) et LEBLOIS (1997). Les travaux présentés ici se veulent donc être une synthèse des différentes approches.

Après des rappels théoriques sur la régression linéaire multiple, nous testerons, dans un premier temps, des variables liées uniquement aux altitudes environnant les points de mesure pour expliquer les précipitations extrêmes. Puis nous définirons un certain nombre de

paramètres décrivant le relief plus explicitement, tels que la pente, l'encaissement, la position géographique dans les Alpes... Enfin, nous définirons une méthode de cartographie des champs de précipitations extrêmes s'appuyant sur les relations entre ces paramètres topographiques et les paramètres pluviométriques.

### **IV.1. Théorie de la régression linéaire multiple**

On cherche à estimer une variable  $Y$  (variable à expliquer) grâce à un ensemble de  $p$  variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$  (variables explicatives) par une relation linéaire du type :

$$\hat{Y} = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_p X_p = Y - \varepsilon \quad (IV - 1)$$

où  $\hat{Y}$  est l'estimée de  $Y$  par régression multiple,

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$  sont les coefficients de régression ( $\alpha_0$  est la constante de l'équation),  
et  $\varepsilon$  est le résidu de la régression.

En pratique, on ne peut qu'estimer les coefficients de régression car l'échantillon d'observations disponible est tiré d'une population inconnue. Les estimées de ces coefficients à partir de l'échantillon connu sont notées :  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ , l'équation devient :

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_p X_p = Y - e \quad (IV - 2)$$

où  $e$  est l'estimée de  $\varepsilon$ , résidu de régression.

#### **IV.1.1. Estimation des coefficients de régression**

Nous disposons de  $n$  observations pour la variable à expliquer  $Y$  ( $Y_i, i=1, n$ ) et les  $p$  variables explicatives  $X_j$  ( $X_{ji}, j=1, p$  et  $i=1, n$ ). Pour chaque observation  $i$ , le but est d'avoir l'estimée par régression  $\hat{Y}_i$  la plus proche possible de la valeur observée  $Y_i$ , donc un résidu  $e_i$  minimum. On cherche à minimiser sur l'échantillon la somme quadratique des résidus :

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \text{ minimal, avec } \hat{Y}_i = a_0 + \sum_{j=1}^p a_j X_{ji} \quad (IV - 3)$$

C'est le critère des *moindres carrés des écarts d'estimation*.

Les équations aux dérivées partielles par rapport à  $a_0, a_1, \dots, a_p$  s'annulent, ce qui donne  $p+1$  équations pour  $p+1$  paramètres à estimer :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left( Y_i - a_0 - \sum_{j=1}^p a_j X_{ji} \right) = 0 \\ \sum_{i=1}^n \left( Y_i - a_0 - \sum_{j=1}^p a_j X_{ji} \right) X_{li} = 0 \\ \dots \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \left( Y_i - a_0 - \sum_{j=1}^p a_j X_{ji} \right) X_{pi} = 0 \end{cases} \quad (IV - 4)$$

Ce système s'écrit sous forme matricielle (VIGIER, 1981), en posant :

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (n \text{ lignes}) \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{p1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{pn} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} (n \text{ lignes} \\ p+1 \text{ colonnes}) \end{matrix} \quad \text{et} \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix} \quad (p+1 \text{ lignes})$$

ce qui revient à écrire que  $\hat{Y} = a_0 X_0 + a_1 X_1 + \dots + a_p X_p$  avec  $X_0 = \text{constante} = 1$ .

Alors :

$$(X^t X) = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{li} & \sum_{i=1}^n X_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{pi} \\ \sum_{i=1}^n X_{li} & \sum_{i=1}^n X_{li}^2 & \sum_{i=1}^n X_{li} X_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{li} X_{pi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n X_{pi} & \sum_{i=1}^n X_{pi} X_{li} & \sum_{i=1}^n X_{pi} X_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{pi}^2 \end{bmatrix} \quad (IV - 5)$$

Le système (IV - 4) peut s'écrire sous forme matricielle :  $(X^t X) A = X^t Y$  où  $X^t$  est la transposée de  $X$ . Donc pour trouver les coefficients de régression, il suffit d'inverser  $(X^t X)$  :

$$A = (X'X)^{-1} X'Y \quad (IV - 6)$$

En général, cette matrice s'inverse facilement, sauf dans certains cas : variables explicatives liées linéairement, moins d'observations que de variables...

#### **IV.1.2. Estimation de l'écart type résiduel $\sigma_\epsilon$ : coefficient de corrélation multiple R**

On estime l'écart type résiduel de la population  $\sigma_\epsilon$  grâce à l'échantillon par :

$$\hat{\sigma}_\epsilon^2 = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n - p - 1} \quad (IV - 7)$$

Le coefficient de corrélation multiple R est le coefficient de corrélation entre  $\hat{Y}$  et Y.  $R^2$ , coefficient de détermination, mesure le pourcentage de la variance de Y expliquée par le modèle :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{\text{variance}(\hat{Y})}{\text{variance}(Y)} \quad (IV - 8)$$

où  $\bar{Y}$  est la moyenne de Y évaluée sur l'échantillon connu.

De plus, on définit des coefficients de corrélation partielle, qui donnent la contribution de chaque variable, compte tenu des autres variables explicatives (BAILLARGEON, 1989).

#### **IV.1.3. Variance et covariance des coefficients de régression**

Les estimées des coefficients de régression sur différents échantillons issus de la même population sont différentes d'un échantillon à l'autre. Les fluctuations de ces estimées peuvent être quantifiées grâce à la variance des coefficients de régression  $\text{var}(a_j)$ . De même, la

cofluctuation des estimées des coefficients de régression d'un échantillon à l'autre est évaluée par une covariance entre les coefficients  $\text{cov}(a_j, a_k)$ . En effet, si on note (VIGIER, 1981) :

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} b_{00} & b_{01} & b_{02} & \dots & b_{0p} \\ b_{10} & b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{p0} & b_{p1} & b_{p2} & \dots & b_{pp} \end{bmatrix} \quad (IV - 9)$$

une estimation des variances et des covariances des coefficients de régression multiple est donnée par :

$$\widehat{\text{var}}(a_j) = \widehat{\sigma}_{a_j}^2 = b_{jj} \widehat{\sigma}_e^2 \quad \text{pour } j=0, p \quad (IV - 10)$$

$$\widehat{\text{cov}}(a_j, a_k) = b_{jk} \widehat{\sigma}_e^2 \quad \text{pour } j=0, p \text{ et } k=0, p (j \neq k) \quad (IV - 11)$$

Les variances  $\widehat{\text{var}}(a_j)$  et les covariances  $\widehat{\text{cov}}(a_j, a_k)$  sont des estimées à partir d'un échantillon des fluctuations des coefficients que l'on aurait pu constater sur un grand nombre d'échantillons. Ces définitions nous permettront d'évaluer un écart type d'estimation pour la méthode de cartographie proposée dans ce chapitre (cf. § IV.6.2).

#### IV.1.4.Méthode par adjonction (Stepwise Upward)

La méthode de régression utilisée pour lier paramètres pluviométriques et morphométriques est la méthode par adjonction (Stepwise Upward). Cette méthode consiste à chercher d'abord la variable la plus corrélée avec la variable à expliquer. On ajoute ensuite, successivement, les variables provoquant le plus fort accroissement de  $R^2$  avec, à chaque pas, des tests de signification de Fisher pour ne pas introduire une variable non significative ou pour éliminer des variables déjà introduites et qui éventuellement ne sont plus informatives, compte tenu de la dernière variable sélectionnée. Chercher quelle est la nouvelle variable qui provoque le plus fort accroissement de  $R^2$  revient à chercher celle qui a le plus fort coefficient de corrélation partielle avec Y.



## **IV.2.Première approche envisagée pour expliquer les paramètres pluviométriques par la topographie**

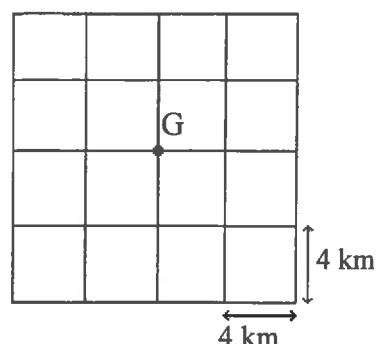
Dans cette étude (KIEFFER, 1995), les paramètres décrivant le relief sont inspirés de ceux définis par la méthode AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) développée par BENICHOUE et LE BRETON (1987). Cette méthode a pour but de répondre de façon automatique à des besoins en cartographie de paramètres pluviométriques statistiques.

Ainsi, un champ est reconstitué de façon automatique en tout point d'une grille régulière, à partir de valeurs ponctuelles et en tenant compte du relief. La topographie *locale* sert à expliquer par corrélation linéaire multiple les variables pluviométriques, et les résidus de régression sont interpolés par krigeage. Les variables décrivant un site sont basées sur les altitudes entourant ce site. Elles décrivent donc uniquement l'environnement proche du site, et non sa position géographique.

Cette méthode a été appliquée dans les Cévennes par CANELLAS et al. (1994) pour la cartographie de précipitations journalières pour des temps de retour allant de 5 à 75 ans. Dans ce cas, les valeurs minimales et maximales des pourcentages de variance expliquée par le relief varient entre 46 et 75 %. De même HUMBERT et al. (1993, 1994) comparent cette méthode et la méthode PLUVIA (HUMBERT et al., 1993) pour la cartographie de précipitations mensuelles et annuelles dans l'Est de la région Rhin Meuse.

Pour appliquer la méthode dans notre cas, nous avons d'abord défini des variables décrivant la topographie locale, du type AURELHY. Puis, nous avons cherché des relations linéaires par régression multiple entre nos variables pluviométriques (pluies décennales, centennales, gradex et coefficients de Montana) et ces variables morphométriques.

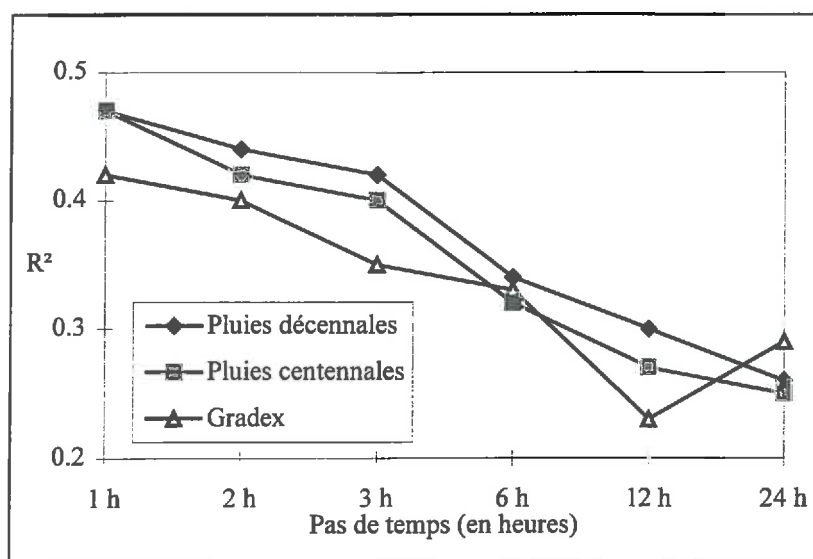
Chaque point G est caractérisé par les 25 altitudes d'une grille régulière entourant ce point (cf. Figure IV 1). On soustrait à chacune des 25 altitudes l'altitude du point central G. G est alors caractérisé par 24 différences d'altitude et son altitude réelle, soit 25 variables. Ces 25 variables ont été déterminées en 6431 points des Alpes françaises.



*Figure IV 1 : Localisation des 25 altitudes retenues pour caractériser le site G*

Pour réduire le nombre de variables et condenser l'information, une Analyse en Composantes Principales (BRAUD, 1987) est appliquée aux 24 variables représentant les différences d'altitude. L'ACP permet de retenir seulement 10 composantes principales. Finalement, la topographie locale du point G est représentée par 11 variables : son altitude et les 10 premières composantes principales en ce point.

La Figure IV 2 résume les résultats de régression linéaire multiple pour les pluies décennales, centennales et les gradex.



*Figure IV 2 : Evolution du coefficient de détermination multiple  $R^2$  en fonction du pas de temps pour différentes variables pluviométriques, dans le cas de la régression avec des variables du type "AURELHY" - statistiques sur 63 observations - (KIEFFER, 1995)*

Les faibles pas de temps sont mieux expliqués que les forts pas de temps. Dans le meilleur des cas, 47 % de la variance est expliquée, c'est le résultat trouvé pour les pluies horaires décennales et centennales. Le coefficient de détermination multiple vaut 0.26 pour les pluies journalières décennales, par exemple.

D'autre part, les variables définies ne sont pas pertinentes pour expliquer le *coefficient de Montana* :  $R^2$  vaut 0.29.

Finalement, quelle que soit la variable pluviométrique étudiée, les résultats sont peu encourageants et nous poussent à décrire le relief de manière plus explicite, avec des variables comme la pente, l'exposition...

### **IV.3.Paramètres morphométriques caractérisant un site**

A partir d'un Modèle Numérique de Terrain de pas 525 m (MNT, échantillonnage régulier d'altitudes, effectué aux noeuds d'un réseau à mailles carrées), des paramètres caractérisant l'environnement morphométrique d'un point de manière plus explicite que précédemment sont calculés.

Deux grands groupes de variables peuvent être distingués : les variables locales et les variables globales. Les variables locales sont celles définies à partir de la topographie aux environs du point de calcul. Au contraire, l'évaluation d'une variable globale nécessite la connaissance du domaine dans son entier. **Le détail des calculs de ces variables est donné annexe 6.**

Nous nous attacherons aussi aux relations qui existent entre les différents paramètres morphométriques définis.

#### **IV.3.1.Variables locales**

##### **Paramètres altimétriques : altitudes lissées**

Différents paramètres décrivent l'altitude d'un point, en intégrant plus ou moins les cotes environnantes :

- son altitude « réelle »  $Z$  (notée  $z_{réelle}$ ) ;
- les altitudes  $FA_9$ ,  $FA_{25}$  et  $FA_{49}$ , calculées par interpolation de Lagrange basée sur les 9, 25 ou 49 noeuds les plus proches voisins du point (LABORDE, 1984 ; cf. annexe 6) ;
- les altitudes  $FB$  et  $FC$ , calculées par approximation de Lagrange basée sur les 25 ou les 49 noeuds les plus proches du point (LABORDE, 1984 ; cf. annexe 6) ;
- et l'altitude  $ZFS$ , dont le lissage supprime les vallées de largeur inférieure à deux fois le pas du MNT (SCHERER, 1977 ; LABORDE, 1984) ; le calcul de cette cote pour différents pas de MNT permettra de déterminer la largeur des vallées qui affectent les pluies extrêmes dans les Alpes françaises.

#### Paramètres d'exposition liés aux altitudes lissées

Le calcul des altitudes  $FA$ ,  $FB$  et  $FC$  nécessite la définition de l'équation de surfaces  $P_1(X,Y)$ ,  $P_2(X,Y)$  et  $P_3(X,Y)$ . Pour caractériser l'exposition d'un point, nous évaluons les dérivées par rapport à  $X$  et à  $Y$  de  $P_1(X,Y)$ ,  $P_2(X,Y)$  et  $P_3(X,Y)$  en ce point (SLIMANI, 1985), notées  $x\_exp\_FA$  et  $y\_exp\_FA$ ,  $x\_exp\_FB$  et  $y\_exp\_FB$ ,  $x\_exp\_FC$  et  $y\_exp\_FC$ .

Les signes des valeurs prises par ces dérivées sont liés à l'orientation du repère choisi. Dans notre cas :

- si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial X} < 0$ , le site est exposé à l'Est et si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial X} > 0$ , le site est exposé à l'Ouest,
- si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial Y} < 0$ , le site est exposé au Nord et si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial Y} > 0$ , le site est exposé au Sud.

#### Caractérisation de l'encaissement d'un site : les tangentes (LABORDE, 1984)

Les tangentes ont été calculées suivant différents horizons : tangente Nord-Est (**TNE**), tangente Nord-Ouest (**TNO**), tangente Sud-Est (**TSE**), tangente Sud-Ouest (**TSO**), tangente sur tout l'horizon (**TT**), tangentes maximale (**TMAX**) et minimale (**TMIN**) parmi les précédentes.

La tangente totale **TT** permet de caractériser un horizon qui peut être en moyenne « bouché » ou « ouvert ». Les tangentes **TNE**, **TNO**, **TSO** et **TSE** ont le même rôle pour des portions d'horizon. **TMAX** et **TMIN** repèrent respectivement le point le plus haut et le point le plus bas du relief environnant le site.

Pentes et azimuts

Cette définition de la pente et de l'orientation (LEEYAVANIJA, 1992) s'appuie sur les 9 ou 25 altitudes des points environnant le point considéré. On évalue les tangentes de  $\theta$ , l'angle par rapport à la verticale, qui représente la pente, et de  $\phi$ , l'angle par rapport au Nord, qui représente l'azimut. Les variables sont notées : **TAN\_PHI1** et **TAN\_TETA1** (estimation sur 9 points) et **TAN\_PHI2** et **TAN\_TETA2** (estimation sur 25 points).

Rayons de courbure principale

Nous utilisons les rayons de courbure principale pour quantifier le fait que le site est

- concave (rayon de courbure négatif), la station est dans un creux,
- convexe (rayon de courbure positif), la station est sur une bosse.

Les rayons de courbure **RMIN** et **RMAX** ont été évalués à partir des surfaces  $P_1(X, Y)$ .

Pour évaluer l'influence de la distance d'investigation, toutes les variables locales sont calculées pour différents pas : 525 m, 1050 m, 1575 m, 2100 m et 2625 m. Les variables correspondantes sont notées **FB1**, **FB2**, **FB3**, **FB4** et **FB5** par exemple. **FB<sub>i</sub>** est la valeur de **FB** pour un pas  $i \times 525$  m.

IV.3.2. Paramètres caractérisant la région

Distance à la mer et coordonnées X et Y

Pour modéliser les influences méditerranéennes, nous déterminons la distance minimale d'un point à la mer, **DM** (en km), et la coordonnée **Y**. Les flux d'Ouest (cf. chapitre I), qui touchent aussi les Alpes françaises, sont représentés par la coordonnée **X** (**X** et **Y** en Lambert II étendu).

Distance à la mer et au Rhône

Les variables **d1merrhone** et **d2merrhone** combinent les influences d'Ouest et de Sud :

- **d1merrhone** est la distance minimale d'un point à la mer ou au Rhône (distance à une droite  $X=800$  km en Lambert II étendu) ;

- pour modéliser le fait que les influences d'Ouest touchent plutôt une partie Nord du domaine, **d2merrhone** est la distance à la mer au Sud, et pour des Y supérieurs à 1900 km (Lambert II étendu), la distance minimale à la mer ou au Rhône.

#### Caractérisation de la forme générale des Alpes

La topographie des Alpes françaises est -de manière grossière- organisée comme un croissant, qui peut être modélisé par une ellipse (SAIDI BOUOUDINA, 1996) ou un cercle, centrés sur des points situés dans les Hautes Alpes. Ainsi, chaque point des Alpes est caractérisé :

- par sa distance aux foyers de l'ellipse, c'est-à-dire par la somme des distances à chaque foyer : variable **d2points** (foyers de l'ellipse :  $X_1=951$  km,  $Y_1=2070$  km et  $X_2=908$  km,  $Y_2=2013$  km).
- par sa distance au "centre" des Alpes ( $X=931$  km,  $Y=2041.5$  km) : variable **d1point**.

#### Effet de barrière

Enfin, la variable **barriere** modélise l'arrêt de la propagation des nuages par les différentes chaînes de montagne (SCHERMERHORN, 1967 ; LEBLOIS, 1997). En un point donné de la région, on explore les 8 directions cardinales et intermédiaires (E, S, O, N, SE, SO, NE et NO). Dans chacune de ces directions, la cote maximale traversée pour rejoindre le bord de la zone d'étude est retenue. La variable **barriere** est la plus faible de ces valeurs.

Nous avons finalement défini un ensemble de 134 variables en chaque point des Alpes. Ces variables décrivent la cote du lieu et son environnement proche, son exposition, l'encaissement et la pente du site et sa situation générale dans le massif.

#### IV.3.3. Analyse des paramètres morphométriques

Cette analyse est basée sur les valeurs des variables morphométriques aux 551 postes de mesure de pluie situés dans le domaine couvert par le MNT (les deux pluviographes Liebvillers et Villers Le Lac sont plus au Nord). Elle vise à quantifier les relations entre les différents paramètres.

Dans un premier temps, nous avons appliqué une Analyse en Composantes Principales (ACP) à l'ensemble des variables morphométriques, pour déterminer des groupes éventuels de variables se ressemblant. Cependant, le grand nombre de variables rend l'interprétation difficile. La seule conclusion que nous avons pu tirer de cette analyse est que *les altitudes lissées* sont très liées entre elles (leurs projections sont proches dans le plan des deux premières composantes principales).

C'est la matrice de **corrélation totale** (matrice des  $r^2$ ) entre les différentes variables qui nous a conduit aux remarques suivantes.

#### Variables locales

De manière générale les variables décrivant un même phénomène (altitude, pente, ..) sont bien liées entre elles. Les variables les plus liées sont celles qui correspondent à des pas de calcul proches (525 m et 1050 m, par exemple). Plus les pas de calcul sont différents (525 m et 5250 m, par exemple), plus les coefficients de détermination diminuent.

- Pour les *paramètres altimétriques*, les  $r^2$  sont supérieurs à 0.80.
- Les  $r^2$  entre *paramètres d'exposition* vont de 0.13 à 0.76. Les *paramètres d'exposition* suivant un axe donné sont assez bien liés entre eux lorsqu'ils résultent de la même définition d'altitude lissée, par exemple les **x\_exp\_FAi** entre eux.
- Pour les *tangentes selon une direction*, les  $r^2$  varient entre 0.42 et 0.69.
- Pour les *pentés* (**TAN\_TETA**), les  $r^2$  sont compris entre 0.92 et 0.21.

Par contre les *azimuts* sont très peu corrélés entre eux, ce qui peut aussi s'expliquer par un relief très chahuté. De même, les *rayons de courbure* sont pratiquement décorrélés d'un pas de calcul à un autre ( $r^2$  inférieurs à 0.02).

Enfin, les *altitudes lissées* sont liées aux *tangentes maximales* **TMAX** et aux *tangentes minimales* **TMIN** ( $r^2$  entre 0.2 et 0.4), ainsi qu'aux *distances Mer / Rhône* ( $r^2$  de 0.49) et aux *distances à des points* ( $r^2$  de l'ordre de 0.36). Ces deux dernières corrélations s'expliquent par le fait que massivement, les altitudes varient comme les distances Mer / Rhône et inversement comme les distances à des points intérieurs aux Alpes.



Variables globales

Pour ce qui concerne les différents paramètres caractérisant la région, la *distance à la Mer* est très corrélée avec *Y*, ce qui est logique ( $r^2$  de 0.98). Les *distances Mer / Rhône* et **d2points** et **d1points** sont moins liées à *Y* ( $r^2$  de 0.25 environ).

La *distance à la Mer DM* est peu corrélée aux autres distances.

Les deux *distances Mer / Rhône* sont très liées ( $r^2$  de 0.98) et assez bien corrélés aux variables décrivant la forme globale des Alpes : **d2points** et **d1points** ( $r^2$  de 0.6).

Le coefficient de détermination entre **d2points** et **d1points** est de 0.98.

L'*effet de barrière* est bien lié aux autres variables globales, sauf à la *distance à la mer DM* ( $r^2$  de 0.03). Les coefficients de détermination sont de 0.63 pour **d2points** et 0.68 pour **d1merrhone**.

La variable **barrière** est bien corrélée aux *altitudes* ( $r^2$  varient entre 0.74 et 0.89 suivant les définitions). C'est la variable **ZFS5** qui est la plus liée à **barrière**. En fait, **ZFS5** prend en compte les altitudes les plus hautes situées dans un rayon de 2625 m, c'est-à-dire dans une zone assez étendue autour du point considéré. C'est aussi ce que fait **barrière**, puisque cette variable retient l'altitude minimale parmi les plus hautes traversées dans 8 directions dans l'espace, ce qui correspond souvent à prendre une altitude très proche du point. D'autre part, l'*effet de barrière* est aussi bien lié aux *tangentes*.

Dans la suite, nous étudions le pouvoir explicatif de toutes ces variables sur les paramètres de précipitations extrêmes dans les Alpes françaises.

#### IV.4.Relations simples entre les paramètres pluviométriques et les paramètres morphométriques définis

Dans un premier temps, des relations simples, du type  $Y=aX+b$  (régression linéaire simple), ont été cherchées entre paramètres pluviométriques et paramètres morphométriques. Nous avons donc étudié les coefficients de détermination  $r^2$  (551 observations pour 24 h, 88 sinon) entre :



- les pluies décennales et centennales des différents pas de temps, les gradex, les coefficients de Montana
- et les différentes variables morphométriques.

#### IV.4.1. Pluies décennales et centennales

Les coefficients de détermination montrent que les pluies décennales et centennales ne sont pas liées à la coordonnée **X** ( $r^2$  inférieurs à 0.06), aux *paramètres d'exposition* ( $r^2$  inférieurs à 0.07), aux *rayons de courbure principale* ( $r^2$  inférieurs à 0.06), et aux *azimuts* ( $r^2$  inférieurs à 0.03).

De manière générale, les pluies décennales et centennales sont mieux liées aux variables globales qu'aux variables locales. De plus, lorsque les coefficients de corrélation sont significatifs, les pourcentages de variance expliquée diminuent quand la durée augmente (cf. Figure IV 3 et Figure IV 4).

#### Variables locales

L'évolution des coefficients de détermination en fonction du pas de temps montre un décrochement après 3 h (cf. Figure IV 3). Pour les pas de temps inférieurs, les coefficients de détermination diminuent de façon lente. A partir de 3 h, ils diminuent fortement et deviennent pour la plupart proches de 0. Ainsi, des phénomènes tout à fait différents influencent les précipitations de court pas de temps et celles de fort pas de temps. Quelques variables échappent à cette règle : **TNE4** et **TSO4**. Pour celles-ci, le coefficient de détermination diminue brutalement seulement à 24 h.

Pour les faibles pas de temps, plus le lissage est important, meilleure est la corrélation, jusqu'à 2625 m au moins. Ainsi, les *altitudes* évaluées avec un pas de 2625 m sont les plus corrélées aux pluies. D'autre part, les coefficients de corrélation entre les **ZFS** et les pluies tendent à montrer que plus la vallée est large, plus elle influence les pluies de courte durée (les meilleurs  $r^2$  sont obtenus avec **ZFS4** et **ZFS5**).

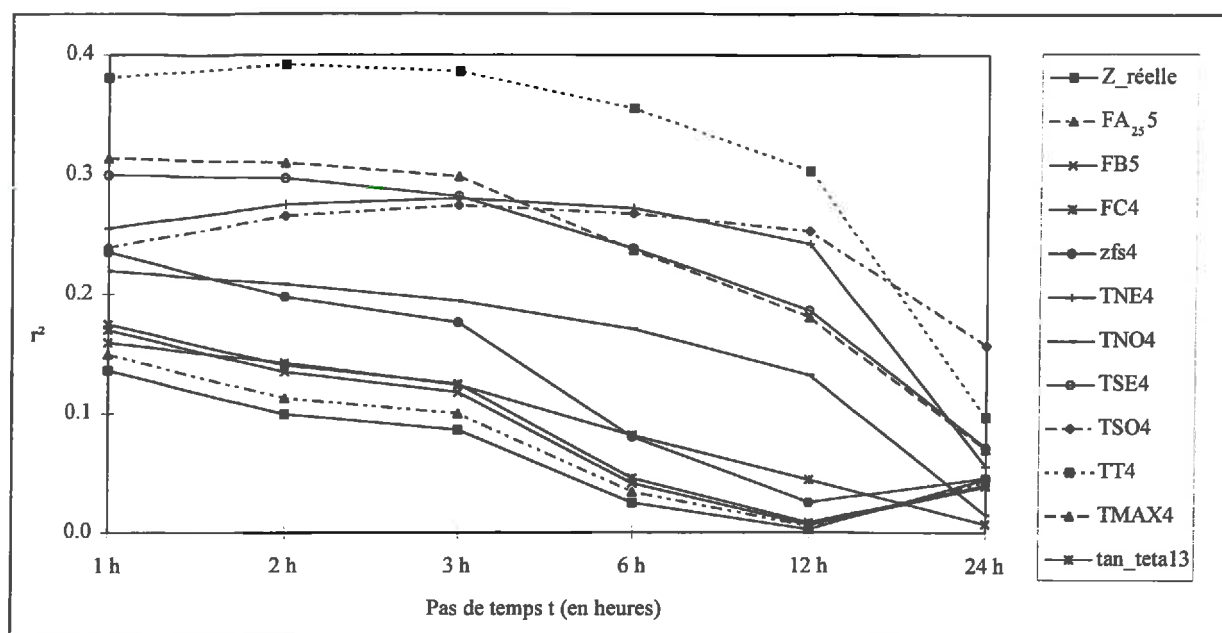


Figure IV 3 : Coefficients de détermination  $r^2$  entre les pluies décennales et des variables morphométriques locales en fonction du pas de temps

La corrélation des pluies décennales avec les différentes *tangentes* est significative (sauf avec TMINi). Pour une tangente donnée (par exemple *tangente nord-est* TNEi), c'est celle définie à 2100 m qui est la plus corrélée avec les pluies.

D'autre part, les meilleurs  $r^2$  sont obtenus avec la *tangente totale* TT4, qui caractérise le fait que l'horizon soit « fermé » ou non.

Les pluies sont assez bien corrélées avec les *tangentes maximales* TMAXi alors qu'elles le sont très peu avec les *tangentes minimales* TMINi, ce qui montre que c'est le relief environnant le plus haut qui influence les pluies, c'est-à-dire celui qui empêche les nuages d'avancer.

#### Variables globales

Les pluies décennales sont bien liées aux variables globales. Par exemple, le pourcentage expliqué par chacune des *distances Mer / Rhône* varie entre 50% pour 1 h et 29% pour 24 h et un temps de retour de 10 ans (cf. Figure IV 4).

La *distance à la mer* DM est la seule variable qui explique légèrement mieux les forts pas de temps que les faibles pas de temps. En effet  $r^2$  vaut 0.28 pour les pluies décennales de 24 h et seulement 0.17 pour les pluies décennales de 1 h.

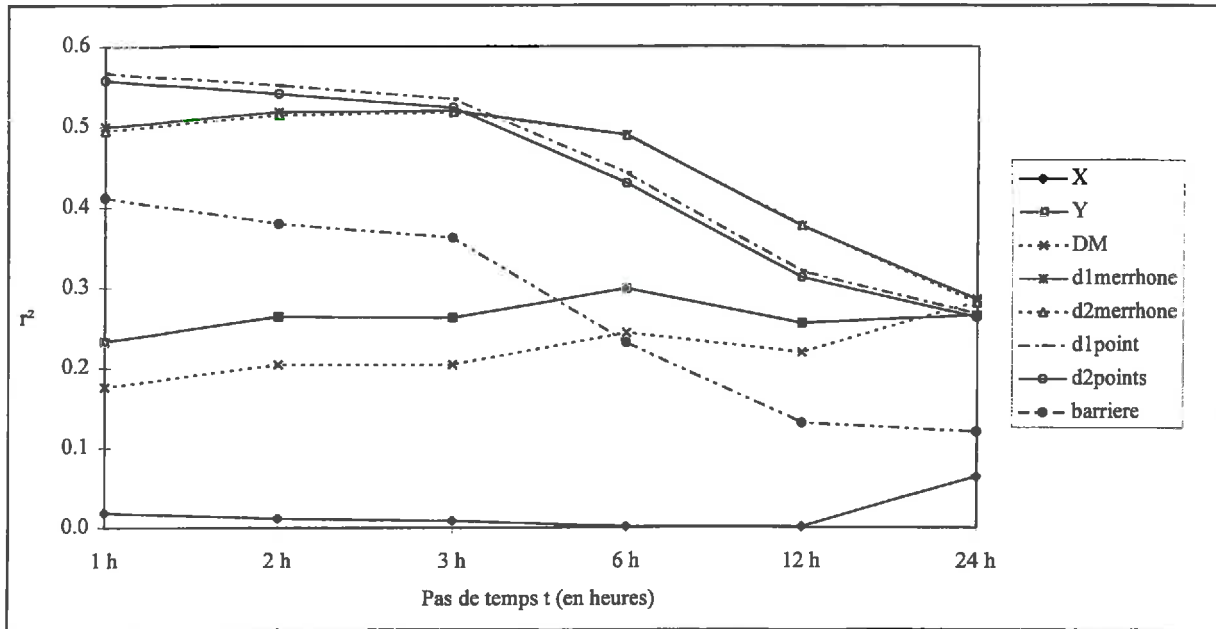


Figure IV 4 : Coefficients de détermination entre les pluies décennales et les variables morphométriques globales en fonction du pas de temps

#### IV.4.2. Gradex

Les gradex présentent les mêmes caractéristiques que les pluies décennales ou centennales. En effet, pour un pas de temps donné, les gradex sont liés avec les mêmes variables topographiques que les précipitations et les coefficients de détermination sont du même ordre de grandeur. La seule différence est que les variables globales sont plus liées aux gradex qu'aux pluies. En particulier, la *distance à la mer DM* explique 45% de la variance des gradex de 24 h, alors qu'elle n'explique que 28% de celle des pluies décennales de 24 h.

#### IV.4.3. Coefficient de Montana

Le coefficient de Montana n'est pas lié aux coordonnées **X** et **Y**, aux *paramètres d'exposition* ( $r^2$  inférieurs à 0.14), aux *rayons de courbure principale* ( $r^2$  inférieurs à 0.05) et aux *azimuts* ( $r^2$  inférieurs à 0.02).

#### Variables locales

Il est bien lié aux *altitudes* : les coefficients de détermination varie entre 0.27 et 0.36.

**ZFS4** est la meilleure variable explicative parmi les altitudes.

Les liaisons avec les *tangentes* dépendent surtout du pas de calcul : elles sont mauvaises avec les tangentes à 2625 m, alors que les pas de 1050 m et 1575 m donnent les meilleurs résultats. C'est avec les **TMAXi** que le Montana est le mieux lié ( $r^2$  de 0.30 pour **TMAX2**). Ainsi, le coefficient de Montana semble très influencé par la topographie locale.

#### Variables globales

Les variables globales ont un pouvoir explicatif plus faible que dans le cas des précipitations extrêmes ou des gradex. Il n'y a pas de relation avec la *distance à la mer* **DM**. Les *distances Mer / Rhône* expliquent seulement 12% de la variance et les *distances à un ou deux points* 20%. Par contre, *l'effet de barrière* explique 36% de la variance du Montana.

Cette analyse permet de conclure que le coefficient de Montana est une variable très liée à l'environnement topographique considéré. Les influences locales sont marquées.

#### IV.4.4. Conclusion

Finalement, les pluies décennales, centennales et les gradex sont assez bien liés à des variables globales, les pas de temps courts, jusqu'à 3 h, étant mieux expliqués que les pas de temps forts. Par contre, le coefficient de Montana est mieux expliqué par des variables locales.

Les relations trouvées sont encourageantes : **d1point** explique 57 % de la variance des pluies horaires décennales, **d1merrhone** explique 29 % de la variance des pluies journalières décennales. Pour améliorer ces résultats, nous allons chercher des modèles explicatifs à plusieurs paramètres, du type  $Y=a_1X_1+a_2X_2+\dots$

## **IV.5. Régression linéaire multiple entre paramètres pluviométriques et paramètres morphométriques**

Cette partie est consacrée à l'étude des relations linéaires multiples entre paramètres pluviométriques et morphométriques. Le choix d'une relation linéaire est discutable, mais il n'y a pas de relation non-linéaire évidente entre les paramètres.

Pour appliquer la régression linéaire multiple, les variables à expliquer sont des variables pluviométriques (pluies décennales, centennales, gradex, coefficient de Montana). Les variables explicatives proposées sont les variables décrivant la topographie, au nombre de 134. Par régression « Stepwise Upward », seules les quelques variables explicatives les plus pertinentes sont retenues.

Ainsi, après avoir établi les relations, nous étudierons la robustesse de celles-ci.

### **IV.5.1. Etude du pouvoir explicatif des variables locales et des variables globales**

Dans un premier temps, nous avons testé, parmi les variables locales et les variables globales, celles qui expliquent le mieux les paramètres pluviométriques. Pour ce faire, la régression est faite avec les différents jeux de variables explicatives suivants :

- ① l'ensemble des variables,
- ② seulement les variables locales,
- ③ seulement les variables globales.

La variable la plus corrélée avec les différents paramètres pluviométriques est une variable globale (sauf dans le cas du coefficient de Montana, cf. § IV.4). Un dernier essai ④ a donc été fait en prenant comme variables explicatives la variable globale la plus corrélée avec la variable pluviométrique à expliquer et toutes les variables locales.

La Figure IV 5 présente l'évolution du coefficient de détermination  $R^2$  en fonction du pas de temps pour les différents cas de régression et pour les pluies décennales. Pour pouvoir comparer les  $R^2$ , les équations de régression sont constituées de 4 variables explicatives dans

les cas ①, ② et ④. Dans le cas ③, il n'y a que 3 variables explicatives ; la 4ème est non significative, les variables globales étant trop liées entre elles.

Sauf pour le coefficient de Montana, cette étude montre que les *variables globales* expliquent mieux les différents paramètres pluviométriques que les *variables locales*. En effet, les  $R^2$  obtenus avec les variables locales (cas ②) sont toujours inférieurs à ceux obtenus avec les variables explicatives contenant au moins une variable globale.

D'autre part, lorsque l'on considère l'ensemble des variables morphométriques (cas ①), les équations de régression contiennent souvent plusieurs paramètres globaux, ce qui peut paraître redondant puisque les variables globales sont assez corrélées entre elles. Cependant, s'il n'y a qu'une variable globale dans les variables explicatives (cas ④), les coefficients de détermination sont moins bons. Cela nous a conduit à utiliser l'ensemble des variables topographiques définies pour établir les équations de régression.

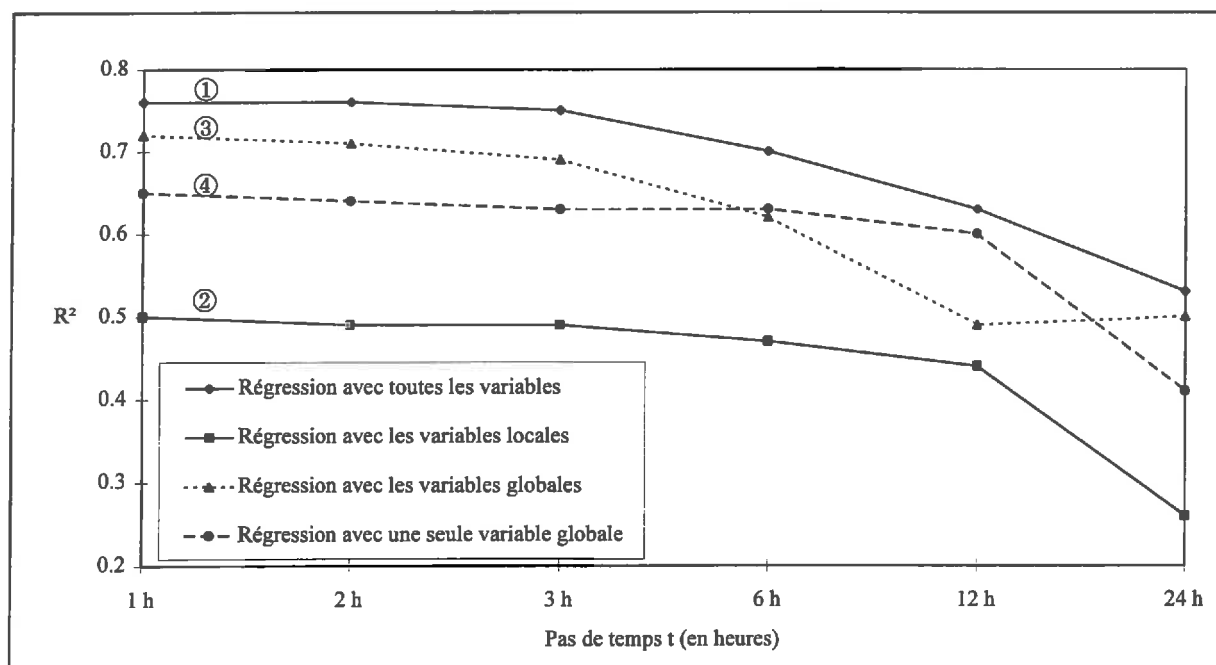


Figure IV 5 : Evolution du coefficient de détermination multiple  $R^2$  en fonction du pas de temps pour différents cas de régression multiple linéaire, exemple des pluies décennales

### IV.5.2. Modèles linéaires retenus

Les modèles linéaires retenus pour les différents paramètres pluviométriques ont 4 variables explicatives. Les raisons de ce choix sont diverses.

En général, l'introduction d'une variable supplémentaire n'apporte pas une augmentation du pourcentage de variance expliquée très importante (cf. Figure IV 6). De plus, dans de nombreux cas, la 5<sup>ème</sup> variable introduite n'est pas significative au sens des tests de Fisher ou de Student.

D'autre part, nous avons voulu homogénéiser le nombre de variables explicatives des différentes équations, et un modèle avec un grand nombre de paramètres devient difficile à utiliser pour la cartographie qui est le but final de cette étude.

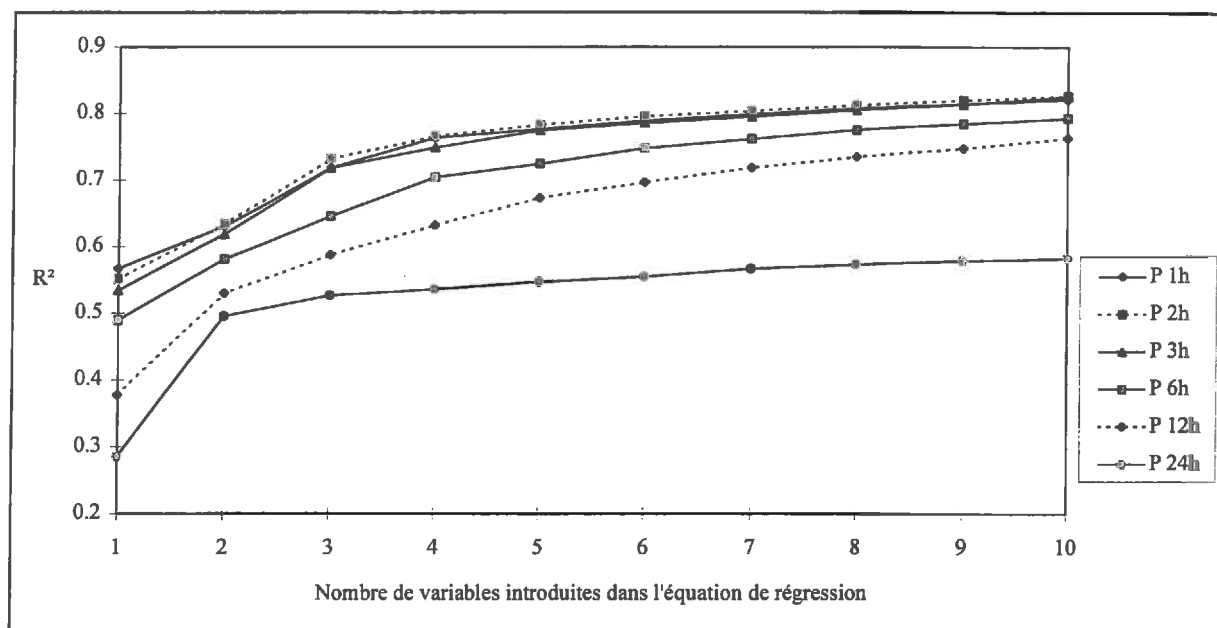


Figure IV 6 : Evolution du coefficient de détermination multiple  $R^2$  en fonction du nombre de variables explicatives introduites dans l'équation de régression pour les pluies décennales

Les équations finales sont présentées dans les Tableau IV 1, Tableau IV 2 et Tableau IV 3. De plus, les graphes des valeurs connues en fonction des valeurs estimées et des résidus en fonction des valeurs connues sont présentés en annexe 7.

|      | Equation de régression multiple                                                                                                 | R <sup>2</sup> |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1 h  | $0.0424 \times \text{d1point} - 0.0341 \times Y - 0.00367 \times \text{barrière} - 31.5 \times \text{TNO4} + 97.1$              | 0.76           |
| 2 h  | $0.0381 \times \text{d1point} - 0.0415 \times Y - 60.5 \times \text{TT4} - 0.00367 \times \text{barrière} + 120.3$              | 0.76           |
| 3 h  | $0.0419 \times \text{d1point} - 0.0467 \times Y - 70.0 \times \text{TT4} - 0.00391 \times \text{barrière} + 136.4$              | 0.75           |
| 6 h  | $-0.131 \times \text{d1merrhone} - 52.2 \times \text{TMIN5} - 0.0553 \times \text{DM} - 102.5 \times \text{TT4} + 71.7$         | 0.70           |
| 12 h | $-0.229 \times \text{d2merrhone} - 184.7 \times \text{TMIN5} - 0.0507 \times \text{DM} + 7.87e^{-6} \times \text{RMAX4} + 83.7$ | 0.63           |
| 24 h | $-0.291 \times \text{d1merrhone} + 0.160 \times X - 68.6 \times \text{TMIN4} - 46.9 \times \text{TSO5} - 42.3$                  | 0.53           |

*Tableau IV 1 : Régression linéaire multiple - résultats finaux pour les pluies décennales (mm par pas de temps)*

|      | Equation de régression multiple                                                                                                | R <sup>2</sup> |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1 h  | $0.0652 \times \text{d1point} - 0.0563 \times Y - 0.00559 \times \text{barrière} - 46.1 \times \text{TNO4} + 154.5$            | 0.77           |
| 2 h  | $0.0585 \times \text{d1point} - 0.0692 \times Y - 89.1 \times \text{TT4} - 0.00569 \times \text{barrière} + 192.6$             | 0.78           |
| 3 h  | $0.0664 \times \text{d1point} - 0.0782 \times Y - 100.9 \times \text{TT4} - 0.00610 \times \text{barrière} + 218.4$            | 0.76           |
| 6 h  | $-0.202 \times \text{d1merrhone} - 0.0889 \times \text{DM} - 182.9 \times \text{TT4} + 0.0347 \times \text{T\_TETA21} + 105.9$ | 0.72           |
| 12 h | $-0.222 \times \text{d2merrhone} - 167.8 \times \text{TMIN5} - 0.106 \times \text{DM} - 157.1 \times \text{TT4} + 128.0$       | 0.65           |
| 24 h | $-0.0565 \times \text{DM} - 0.431 \times \text{d1merrhone} + 0.182 \times X - 118.3 \times \text{TMIN4} - 9.6$                 | 0.57           |

*Tableau IV 2 : Régression linéaire multiple - résultats finaux pour les pluies centennales (mm par pas de temps)*

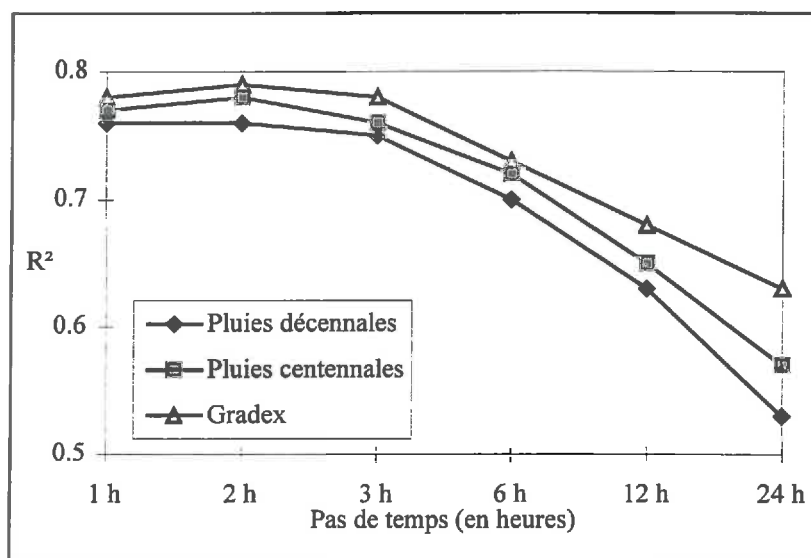
|      | Equation de régression multiple                                                                                                     | R <sup>2</sup> |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1 h  | $0.00983 \times \text{d1point} - 0.00939 \times Y - 0.00081 \times \text{barrière} - 6.21 \times \text{TNO4} + 24.3$                | 0.78           |
| 2 h  | $0.00853 \times \text{d1point} - 0.0118 \times Y - 12.1 \times \text{TT4} - 0.000870 \times \text{barrière} + 30.8$                 | 0.79           |
| 3 h  | $0.0105 \times \text{d1point} - 0.0134 \times Y - 13.1 \times \text{TT4} - 0.000923 \times \text{barrière} + 34.9$                  | 0.78           |
| 6 h  | $-0.0178 \times \text{d1merrhone} - 0.0184 \times \text{DM} - 26.4 \times \text{TT4} - 0.0184 \times \text{T\_TETA25} + 15.5$       | 0.73           |
| 12 h | $-0.0320 \times \text{d1merrhone} - 0.0182 \times \text{DM} - 30.7 \times \text{TT4} + 0.00899 \times \text{T\_TETA21} + 17.9$      | 0.68           |
| 24 h | $-0.0150 \times \text{DM} - 0.0594 \times \text{d1merrhone} + 0.0194 \times X - 14.7 \times \text{TMIN4} + 4.1$                     | 0.63           |
| M    | $7.76e^{-5} \times \text{ZFS4} + 0.535 \times \text{TNO3} - 0.000168 \times Y_{\text{exp\_FC5}} - 0.392 \times \text{TNE5} - 0.257$ | 0.47           |

*Tableau IV 3 : Régression linéaire multiple - résultats finaux pour les gradex (mm par pas de temps) et le coefficient de Montana (M)*



#### IV.5.2.1. Pluies décennales, centennales et gradex

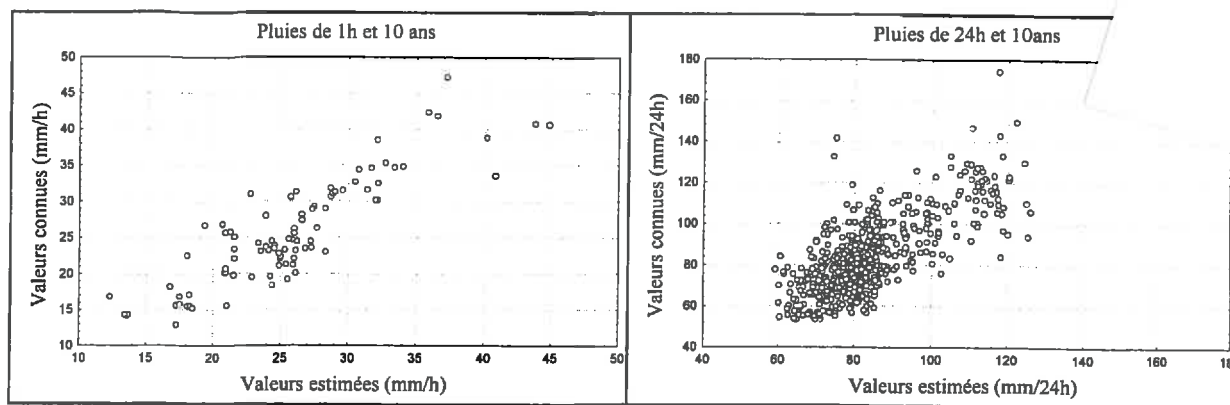
Pour ces 3 paramètres, les pourcentages de variance expliquée diminuent avec le pas de temps (cf. Figure IV 7) : pour 12 h et 24 h, les équations n'ont plus un pouvoir explicatif important. Ceci est confirmé par les résultats à 24 h qui s'appuient sur des échantillons beaucoup plus importants que ceux des autres pas de temps.



*Figure IV 7 : Evolution du coefficient de détermination multiple  $R^2$  en fonction du pas de temps pour différentes variables pluviométriques*

De manière générale, pour toutes les durées, et surtout les longues, les valeurs élevées sont assez mal estimées (cf. Figure IV 8). En fait il semble que les nuages de points ne soient pas homoscedastiques, mais nous reviendrons à cet aspect dans le paragraphe § IV.5.4.

Les équations de régression pour des pas de temps inférieurs à 3 h contiennent les mêmes variables explicatives pour la pluie décennale, centennale et le gradex : **dlpoint**, **Y** et **barrière**. C'est donc la description de la topographie générale des Alpes (en forme d'arc de cercle) qui explique le mieux ces pas de temps. **Y** représente les entrées maritimes et **barrière**, la capacité des flux à arriver jusqu'au point d'observation. C'est une combinaison de ces effets qui explique la répartition spatiale des pluies extrêmes de faibles pas de temps.



*Figure IV 8 : Représentation des graphes des valeurs connues en fonction des valeurs estimées dans le cas des pluies centennales de 1 h ( $R^2=0.76$ , 88 observations) et de 24 h ( $R^2=0.53$ , 551 observations)*

Pour les pas de temps supérieurs à 6 h, les variables topographiques sélectionnées dans les différentes équations sont moins semblables. Cependant les variables **dmerrhone** sont toujours présentes. Ainsi, pour les pas de temps forts, les pluies extrêmes sont dues soit aux influences d'Ouest, soit aux influences méditerranéennes suivant l'endroit où l'on se trouve dans le domaine. D'autre part, les variables locales introduites sont toujours des *tangentes*, c'est donc l'encaissement du site qui est important pour ces paramètres pluviométriques.

#### IV.5.2.2.Coefficient de Montana

L'équation de régression correspondant au coefficient de Montana ne contient que des variables locales ( $R^2=0.47$ ). C'est l'*altitude ZFS4* qui est sélectionnée en premier, elle explique 36% de la variance. Les *tangentes Nord Ouest TNO3* et *Nord Est TNE5* et l'*exposition Y\_exp\_FC5* sont les 3 autres variables introduites dans l'équation. Leur interprétation est difficile.

#### IV.5.3.Etude de la robustesse des équations

Ce paragraphe a pour but de tester la robustesse des équations établies. D'abord, les coefficients de régression sur les variables centrées réduites sont étudiés. Ensuite, la validation

croisée ou la suppression d'une station à fortes pluies (Coursegoules) nous permettront d'apprécier la qualité des équations.

#### IV.5.3.1. Etude des coefficients de régression en variables centrées réduites

*Pour les pas de temps inférieurs ou égal à 3 h*, les équations de régression contiennent les mêmes variables explicatives pour les pluies décennales, centennales et les gradex. De plus, ces variables sont introduites dans l'équation dans le même ordre. Dans un tel cas, l'étude des coefficients de régression en variables centrées réduites  $b_i$  est intéressante (cf. Tableau IV 4).

Pour un pas de temps, le coefficient correspondant à une variable explicative donnée est du même ordre de grandeur pour les trois variables pluies décennales, centennales et gradex. Par exemple, le coefficient  $b_i$  correspondant à **d1point** vaut 0.276 pour les pluies horaires décennales, 0.275 pour les pluies horaires centennales et 0.273 pour les gradex horaires. De plus, vu les écarts type d'estimation  $\sigma_{b_i}$ , les coefficients  $b_i$  sont du même ordre de grandeur d'un pas de temps à l'autre. Cela montre que les modèles choisis ne dépendent que de l'écart type de la variable à expliquer  $Y$ . En effet, le coefficient de régression correspondant à la variable  $X_i$  est  $b_i \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_i}}$ . Jusqu'à 3 h, les schémas semblent donc robustes.

*Pour des pas de temps supérieurs à 3 h*, les équations de régression contiennent au moins deux variables identiques sur les 4, mais elles n'apparaissent pas à la même étape de la régression. Dans ce cas, les coefficients  $b_i$  n'ont plus les mêmes ordres de grandeur.

Finalement, les équations correspondant aux pas de temps faibles sont robustes. Mais pour les pas de temps supérieurs à 3 h, les équations sont moins bonnes, ce que les coefficients de détermination multiples montraient déjà (cf. Figure IV 7).

|       | Pluies décennales |        |               | Pluies centennales |        |               | Gradex            |        |               |
|-------|-------------------|--------|---------------|--------------------|--------|---------------|-------------------|--------|---------------|
|       | Variable          | $b_i$  | $\sigma_{bi}$ | Variable           | $b_i$  | $\sigma_{bi}$ | Variable          | $b_i$  | $\sigma_{bi}$ |
| 1 h   | <b>d1point</b>    | 0.276  | 0.086         | <b>d1point</b>     | 0.275  | 0.084         | <b>d1point</b>    | 0.273  | 0.083         |
|       | <b>Y</b>          | -0.442 | 0.062         | <b>Y</b>           | -0.472 | 0.061         | <b>Y</b>          | -0.519 | 0.060         |
|       | <b>barrière</b>   | -0.352 | 0.084         | <b>barrière</b>    | -0.348 | 0.082         | <b>barrière</b>   | -0.332 | 0.081         |
|       | <b>TNO4</b>       | -0.248 | 0.062         | <b>TNO4</b>        | -0.236 | 0.061         | <b>TNO4</b>       | -0.209 | 0.060         |
| $R^2$ | 0.76              |        |               | 0.77               |        |               | 0.78              |        |               |
| 2 h   | <b>d1point</b>    | 0.211  | 0.088         | <b>d1point</b>     | 0.208  | 0.085         | <b>d1point</b>    | 0.198  | 0.083         |
|       | <b>Y</b>          | -0.457 | 0.062         | <b>Y</b>           | -0.491 | 0.060         | <b>Y</b>          | -0.547 | 0.059         |
|       | <b>TT4</b>        | -0.304 | 0.072         | <b>TT4</b>         | -0.289 | 0.070         | <b>TT4</b>        | -0.257 | 0.068         |
|       | <b>barrière</b>   | -0.300 | 0.086         | <b>barrière</b>    | -0.299 | 0.084         | <b>barrière</b>   | -0.298 | 0.082         |
| $R^2$ | 0.76              |        |               | 0.78               |        |               | 0.79              |        |               |
| 3 h   | <b>d1point</b>    | 0.206  | 0.091         | <b>d1point</b>     | 0.210  | 0.088         | <b>d1point</b>    | 0.215  | 0.085         |
|       | <b>Y</b>          | -0.456 | 0.064         | <b>Y</b>           | -0.491 | 0.062         | <b>Y</b>          | -0.546 | 0.060         |
|       | <b>TT4</b>        | -0.313 | 0.074         | <b>TT4</b>         | -0.290 | 0.072         | <b>TT4</b>        | -0.245 | 0.070         |
|       | <b>barrière</b>   | -0.284 | 0.089         | <b>barrière</b>    | -0.284 | 0.086         | <b>barrière</b>   | -0.279 | 0.084         |
| $R^2$ | 0.75              |        |               | 0.76               |        |               | 0.78              |        |               |
| 6 h   | <b>d1merrhone</b> | -0.383 | 0.089         | <b>d1merrhone</b>  | -0.383 | 0.084         | <b>d1merrhone</b> | -0.223 | 0.084         |
|       | <b>TMIN5</b>      | -0.122 | 0.069         | <b>DM</b>          | -0.404 | 0.068         | <b>DM</b>         | -0.554 | 0.065         |
|       | <b>DM</b>         | -0.386 | 0.070         | <b>TT4</b>         | -0.418 | 0.075         | <b>TT4</b>        | -0.398 | 0.075         |
|       | <b>TT4</b>        | -0.360 | 0.089         | <b>T_TETA21</b>    | 0.148  | 0.066         | <b>T_TETA25</b>   | -0.172 | 0.064         |
| $R^2$ | 0.70              |        |               | 0.72               |        |               | 0.73              |        |               |
| 12 h  | <b>d2merrhone</b> | -0.547 | 0.070         | <b>d2merrhone</b>  | -0.347 | 0.096         | <b>d1merrhone</b> | -0.334 | 0.090         |
|       | <b>TMIN5</b>      | -0.355 | 0.068         | <b>TMIN5</b>       | -0.211 | 0.076         | <b>DM</b>         | -0.455 | 0.073         |
|       | <b>DM</b>         | -0.291 | 0.071         | <b>DM</b>          | -0.399 | 0.076         | <b>TT4</b>        | -0.385 | 0.080         |
|       | <b>RMAX4</b>      | 0.214  | 0.068         | <b>TT4</b>         | -0.296 | 0.096         | <b>T_TETA21</b>   | 0.211  | 0.071         |
| $R^2$ | 0.63              |        |               | 0.65               |        |               | 0.68              |        |               |
| 24 h  | <b>d1merrhone</b> | -0.671 | 0.039         | <b>DM</b>          | -0.209 | 0.038         | <b>DM</b>         | -0.358 | 0.035         |
|       | <b>X</b>          | 0.450  | 0.032         | <b>d1merrhone</b>  | -0.641 | 0.038         | <b>d1merrhone</b> | -0.570 | 0.036         |
|       | <b>TMIN4</b>      | -0.155 | 0.033         | <b>X</b>           | 0.329  | 0.037         | <b>X</b>          | 0.226  | 0.034         |
|       | <b>TSO5</b>       | -0.118 | 0.036         | <b>TMIN4</b>       | -0.172 | 0.030         | <b>TMIN4</b>      | -0.138 | 0.028         |
| $R^2$ | 0.53              |        |               | 0.57               |        |               | 0.63              |        |               |

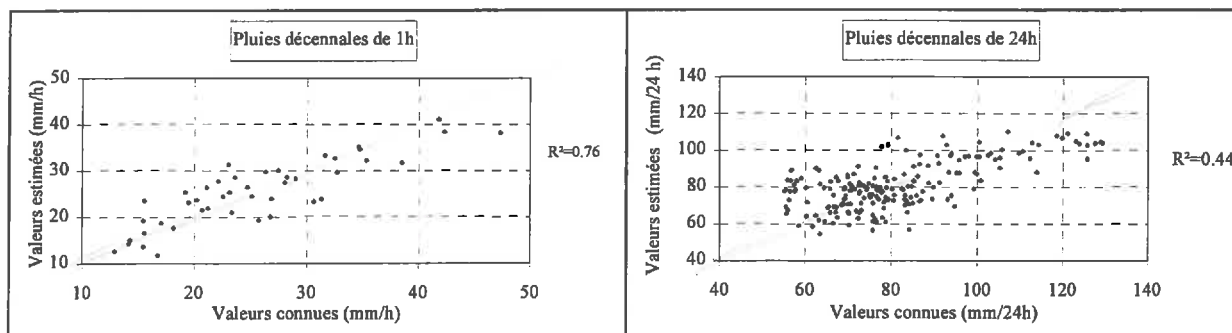
Tableau IV 4 : Coefficients de régression en variables centrées réduites  $b_i$  et écarts type d'estimation  $\sigma_{bi}$  associés pour les pluies décennales, centennales et les gradex

#### IV.5.3.2. Validation croisée

La validation croisée (cf. introduction à la partie B, § 2, p106) est un autre moyen d'étudier la robustesse des équations entre variables pluviométriques et variables morphométriques. Au lieu de supprimer seulement une observation à la fois, les équations de régression sont évaluées sur la moitié des observations (réseau 1 par exemple) et l'autre moitié des observations sert de validation (réseau 2 par exemple).

Pour les pluies décennales, centennales et gradex, les variables sélectionnées dans les équations sur un sous réseau sont pratiquement les mêmes que celles pour l'échantillon global. De plus, on retrouve le fait que les pourcentages de variance expliquée diminuent avec les pas de temps : par exemple, 76 % de la variance des pluies horaires décennales est expliqué, alors que seulement 44 % est expliquée à 24 h.

La deuxième étape est celle de la validation (cf. Figure IV 9). Les différents paramètres sont bien estimés à pas de temps courts, et moins bien à pas de temps longs : les coefficients de détermination entre les valeurs connues et les valeurs estimées sont égaux à 0.76 et 0.72 pour 1 h, 0.44 et 0.35 pour 24 h, pour les pluies décennales par exemple.



*Figure IV 9 : Validation croisée : graphe des valeurs estimées en fonction des valeurs connues (exemple des pluies décennales horaires et journalières)*

Les résultats en validation croisée pour le coefficient de Montana sont moins convaincants, les variables sélectionnées étant différentes de celles pour l'ensemble des observations.

D'autre part, il est possible qu'une observation contribue très fortement à augmenter le coefficient de corrélation obtenu par régression linéaire multiple, surtout lorsque l'échantillon considéré est assez petit : à pas de temps court, on ne dispose que de 88 observations. Nous avons voulu tester si la station de Coursegoules avait cet effet, car elle enregistre toujours la valeur de pluie décennale, centennale ou de gradex la plus forte. Ainsi, la régression linéaire multiple a été appliquée aux variables avec une observation en moins, celle de Coursegoules.

Les coefficients de détermination  $R^2$  sont en général égaux et parfois légèrement inférieurs à ceux obtenus sur l'échantillon complet (cf. Tableau IV 5). Cette station ne contribue donc pas à une augmentation artificielle des coefficients de détermination et elle a donc été conservée dans les observations pour établir les modèles finaux.

|                    | 3 h                 | 6 h                 | 12 h                | 24 h                |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Pluies décennales  | 0.75<br><b>0.75</b> | 0.70<br><b>0.70</b> | 0.63<br><b>0.60</b> | 0.53<br><b>0.53</b> |
| Pluies centennales | 0.76<br><b>0.76</b> | 0.72<br><b>0.71</b> | 0.65<br><b>0.62</b> | 0.57<br><b>0.57</b> |
| Gradex             | 0.78<br><b>0.79</b> | 0.73<br><b>0.73</b> | 0.67<br><b>0.68</b> | 0.63<br><b>0.63</b> |

Tableau IV 5 : Coefficients de détermination multiple  $R^2$  pour la régression avec ou sans la station de Coursegoules (les coefficients en gras correspondent au cas sans Coursegoules)

#### IV.5.3.3.Conclusion

Finalement, différentes techniques nous ont permis d'établir la robustesse des équations entre paramètres pluviométriques et morphométriques jusqu'à 3 h. Les pas de temps forts : 12 h et 24 h sont moins bien expliqués par les variables définies ici. De même, les résultats pour le coefficient de Montana sont peu satisfaisants.

#### 5.4. Estimation d'un intervalle de confiance

Pour les pluies décennales, centennales et les gradex, les nuages de points des valeurs estimées par régression en fonction des valeurs connues ne semblent pas vérifier la propriété d'homoscédasticité (invariance de l'écart type des résidus quelle que soit la valeur de la variable observée). Ceci empêche de donner un intervalle de confiance lié à l'écart type résiduel  $\sigma_\epsilon$ . Cependant, les nuages de points du logarithme des valeurs observées ( $\ln(Y)$ ) en fonction du logarithme des valeurs estimées par régression multiple ( $\ln(\hat{Y})$ ) sont homoscédastiques (cf. Figure IV 10 à comparer à la Figure IV 8).

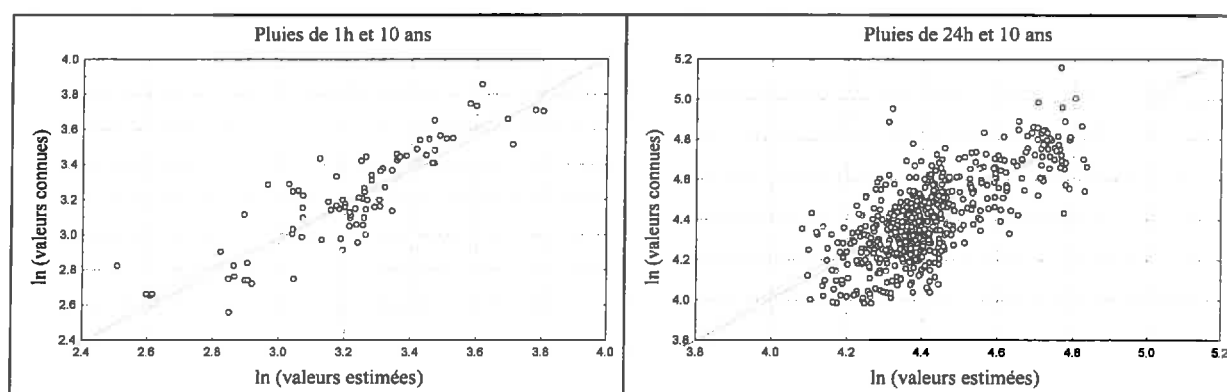


Figure IV 10 : Représentation des graphes du logarithme des valeurs connues en fonction du logarithme des valeurs estimées dans le cas des pluies centennales de 1 h et de 24 h

L'écart type résiduel  $\sigma_\epsilon'$  correspondant à ces nuages de points est obtenu par régression simple entre les variables  $\ln(Y)$  et  $\ln(\hat{Y})$ . Dans ce cas, l'intervalle de confiance à 80% peut être estimé de la manière classique, en supposant les variables normales :

$$\ln(Y) = \ln(\hat{Y}) \pm 1.28 \times \sigma_\epsilon' \quad (IV - 12)$$

On en déduit un intervalle de confiance sur les données brutes donné par :

$$Y = \frac{1}{\exp(1.28 \times \sigma_\epsilon')} \times \hat{Y} \quad \text{et} \quad Y = \exp(1.28 \times \sigma_\epsilon') \times \hat{Y} \quad (IV - 13)$$

Le Tableau IV 6 fournit les écarts type résiduels  $\sigma_\epsilon'$ , qui permettent l'évaluation des intervalles de confiance pour les pluies décennales, centennales et les gradex.



|          |                            | 1 h   | 2 h   | 3 h   | 6 h   | 12 h  | 24 h  |
|----------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T=10ans  | Moyenne (mm/t)             | 25.8  | 32.1  | 37.4  | 47.8  | 61.8  | 83.6  |
|          | $\sigma_{\epsilon}$ (mm/t) | 3.65  | 4.28  | 4.99  | 6.89  | 9.35  | 12.64 |
|          | $\sigma_{\epsilon}'$       | 0.144 | 0.130 | 0.128 | 0.138 | 0.143 | 0.147 |
| T=100ans | Moyenne (mm/t)             | 37.3  | 46.2  | 53.7  | 68.3  | 88.9  | 120.9 |
|          | $\sigma_{\epsilon}$ (mm/t) | 5.49  | 6.43  | 7.49  | 10.31 | 14.03 | 18.79 |
|          | $\sigma_{\epsilon}'$       | 0.151 | 0.136 | 0.133 | 0.143 | 0.145 | 0.151 |
| Gradex   | Moyenne (mm/t)             | 4.9   | 6.0   | 7.0   | 8.7   | 11.5  | 15.9  |
|          | $\sigma_{\epsilon}$ (mm/t) | 0.82  | 0.97  | 1.12  | 1.54  | 2.00  | 2.71  |
|          | $\sigma_{\epsilon}'$       | 0.175 | 0.158 | 0.153 | 0.158 | 0.156 | 0.163 |
| Montana  | Moyenne                    | 0.36  |       |       |       |       |       |
|          | $\sigma_{\epsilon}$        | 0.068 |       |       |       |       |       |

*Tableau IV 6 : Moyennes des variables, écart type résiduel  $\sigma_{\epsilon}$  de la régression multiple entre les paramètres pluviométriques et les paramètres morphométriques et écart type résiduel  $\sigma_{\epsilon}'$  de la régression simple entre les variables  $\ln(Y)$  ( $Y$  : paramètre pluviométrique observé) et  $\ln(\hat{Y})$  ( $\hat{Y}$  : estimé du paramètre pluviométrique  $Y$  par régression multiple)*

#### **IV.5.5.Conclusion**

Finalement, nous avons établi des relations linéaires entre paramètres pluviométriques et morphométriques qui s'avèrent être assez pertinentes pour les pas de temps faibles. Ces équations sont robustes. Les pas de temps forts : 12 h et 24 h sont moins bien expliqués par les variables. Il en est de même pour le coefficient de Montana.



## **IV.6.Méthode de cartographie s'appuyant sur la régression linéaire multiple avec le relief**

Désormais, chaque variable pluviométrique  $Y$  est considérée comme la somme de deux variables :

$$Y = f(R_i) + e \quad (IV - 14)$$

où  $f(R_i)$  est l'équation de régression de régression associée à la variable  $Y$ ,

$R_i$  représente l'ensemble des variables  $X_i$  tirées du relief sélectionnées dans l'équation de régression de  $Y$ ,

et  $e$  est le résidu de régression : la partie de  $Y$  non expliquée par les variables  $X_i$ .

Notre but final est la cartographie des pluies extrêmes. Il s'agit donc d'évaluer en chaque point du domaine la valeur de  $Y$  par la formule (IV - 14).

- L'équation de régression  $f(R_i)$  peut être calculée en chaque noeud d'un MNT (donc tous les 525 m dans notre cas), ce qui conduit à une carte du champ obtenue par régression : carte de  $f(R_i)$ .
- Le résidu  $e$  est connu en chaque station de mesure de pluie : en 551 postes pour 24 h et en 88 pour les pas de temps inférieurs. Il reste donc à interpoler ce résidu sur l'ensemble du domaine, de manière à estimer une valeur de résidu en n'importe quel point.

KRAVCHENKO (1996) applique le krigeage à l'interpolation des résidus de régression entre les précipitations moyennes annuelles du Wyoming (USA) et des variables topographiques (altitude, pente, exposition, coordonnées géographiques). PHILLIPS et al. (1992) font de même pour la cartographie des précipitations moyennes annuelles en Oregon (USA). LABORDE (1984) utilise la méthode des filtres autorégressifs dans une configuration similaire à la notre : les résidus à interpoler sont ceux de la régression entre les pluies extrêmes et des variables topographiques en Lorraine.

Il s'agit donc d'étudier la variabilité spatiale des résidus de régression (par le biais du variogramme), ce qui nous permettra d'établir si la cartographie des résidus est possible dans notre cas, et par quelle méthode on peut l'envisager.

### **IV.6.1. Analyse spatiale des résidus de régression et cartographie**

Les variogrammes expérimentaux des différents résidus pluviométriques montrent que les phénomènes sont bien structurés dans l'espace. Les hypothèses de stationnarité d'ordre 1 (moyenne constante, i.e. représentative) et d'ordre 2 (le variogramme tend vers la variance) sont respectées (cf. Figure IV 11, Figure IV 12 et Figure IV 13). Pour les pas de temps forts (12 h et 24 h), les variogrammes expérimentaux n'ont plus une allure de dérive comme pour les variables brutes (cf. chapitre III).

Dans tous les cas, nous pouvons ajuster aux variogrammes expérimentaux un modèle exponentiel pépitique.

A 24 h, l'effet de pépité est clair. En effet, la première classe d'interdistance comprend 130 couples (classe 0-5 km) et l'écart quadratique moyen correspondant  $\gamma(h)$  est toujours différent de 0 quelle que soit la variable (pluies décennales, centennales ou gradex).

Ainsi, pour les pas de temps inférieurs, nous avons aussi choisi des modèles pépitiques, puisque le premier point représenté sur les graphes est peu fiable (il ne correspond qu'à 3 couples). Cela assure une cohérence avec le pas de temps de 24 h.

Les paliers ont été pris de telle sorte que la somme de la pépité et du palier soit égale à la variance du champ. La seule exception est le coefficient de Montana pour lequel la somme pépité - palier dépasse légèrement la variance du champ.

Les portées, beaucoup plus faibles que celles des variables brutes, sont plus grandes pour les pas de temps courts que pour les pas de temps forts : on retrouve des comportements différents pour des durées inférieures et supérieures à 3 h.

Finalement, la bonne structure spatiale des résidus permet leur cartographie par krigeage ordinaire. Des exemples de cartes obtenues sont présentées en § IV.6.3

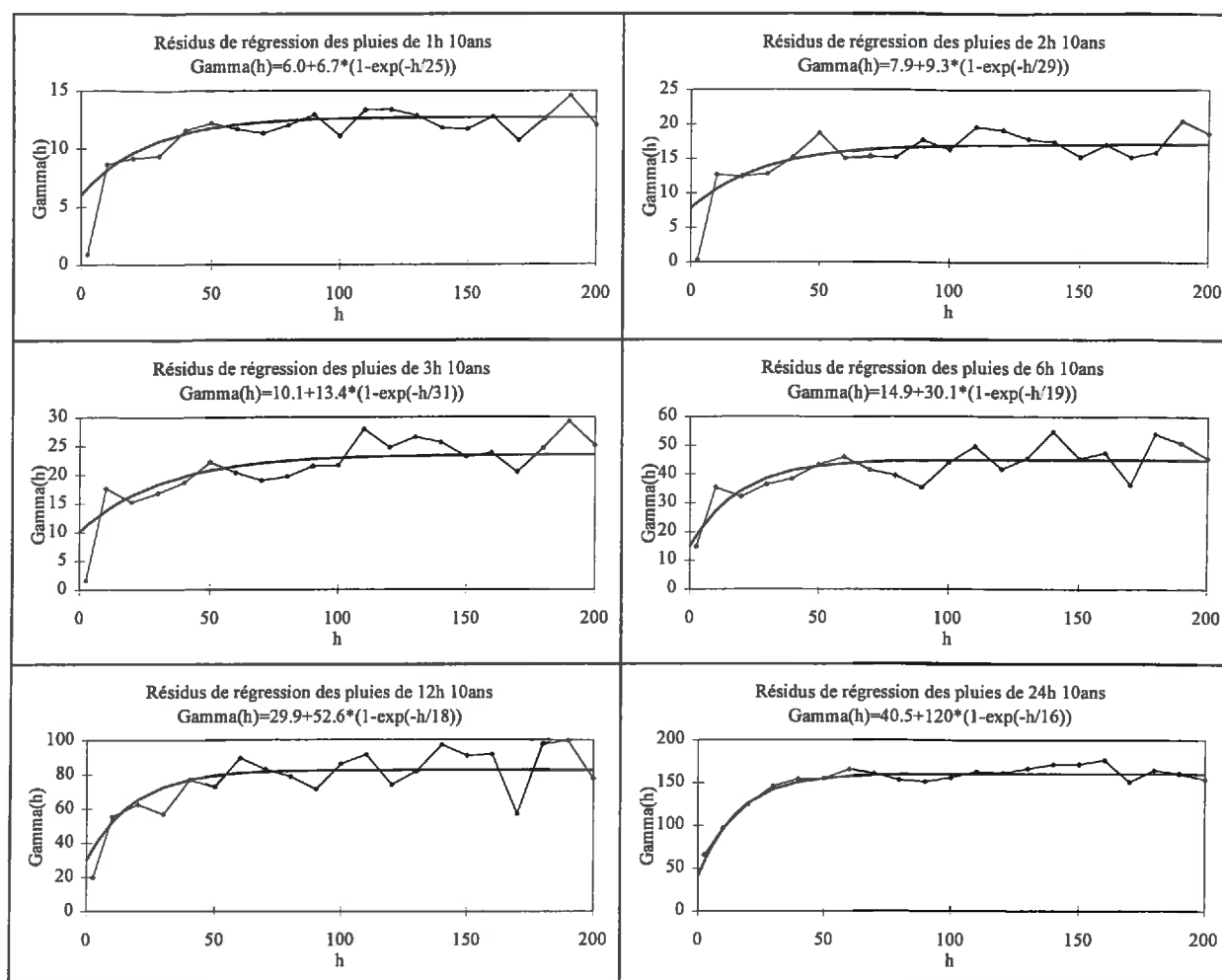


Figure IV 11 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des résidus de régression avec le relief pour les pluies décennales ( $\Gamma(h)$  en  $\text{mm}^2$  et  $h$  en km)

|                            | T=10 ans |      |      |      |      |       | T=100 ans |      |      |       |       |       |
|----------------------------|----------|------|------|------|------|-------|-----------|------|------|-------|-------|-------|
| Pas de temps               | 1 h      | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h | 24 h  | 1 h       | 2 h  | 3 h  | 6 h   | 12 h  | 24 h  |
| Pépité ( $\text{mm}^2$ )   | 6.0      | 7.9  | 10.1 | 14.9 | 29.9 | 40.5  | 13.1      | 15.2 | 19.2 | 39.9  | 81.0  | 97.8  |
| Portée (km)                | 25       | 29   | 31   | 19   | 18   | 16    | 28        | 29   | 31   | 23    | 18    | 15    |
| Palier ( $\text{mm}^2$ )   | 6.7      | 9.3  | 13.4 | 30.1 | 52.6 | 120   | 15.6      | 24.3 | 33.7 | 61.8  | 105.6 | 253.2 |
| Variance ( $\text{mm}^2$ ) | 12.7     | 17.4 | 23.7 | 45.3 | 83.5 | 158.5 | 28.8      | 39.8 | 53.5 | 101.5 | 187.9 | 350.5 |

Tableau IV 7 : Caractéristiques des variogrammes des résidus de régression avec le relief des pluies décennales et centennales (modèles exponentiels)

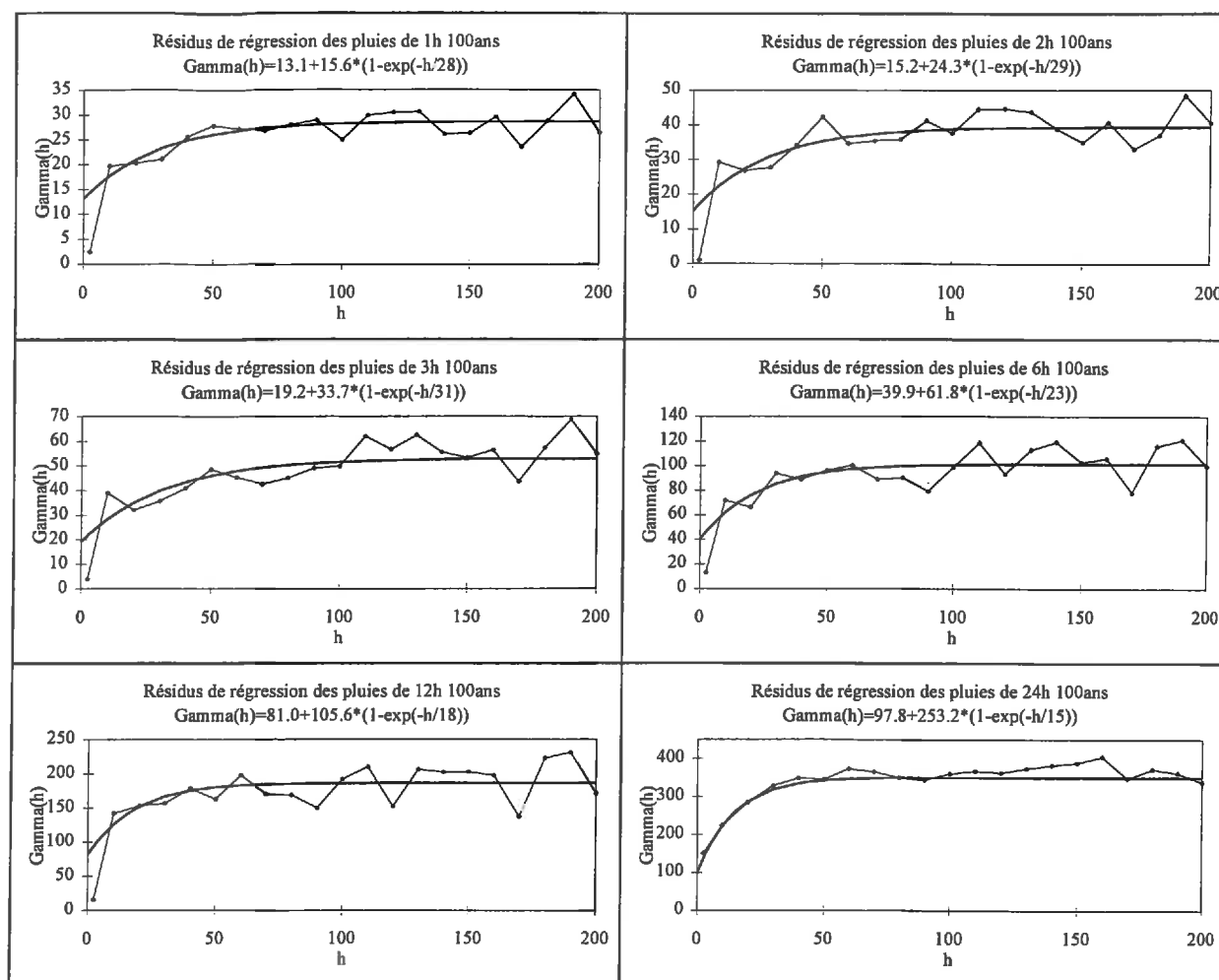


Figure IV 12 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des résidus de régression avec le relief pour les pluies centennales (Gamma(h) en mm<sup>2</sup> et h en km)

|                             | Gradex |      |      |      |      |      |                        |
|-----------------------------|--------|------|------|------|------|------|------------------------|
| Pas de temps                | 1 h    | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h | 24 h | Coefficient de Montana |
| Pépité (mm <sup>2</sup> )   | 0.24   | 0.31 | 0.40 | 0.90 | 1.8  | 2.4  | 0.0015                 |
| Portée (km)                 | 28     | 29   | 31   | 27   | 18   | 18   | 14                     |
| Palier (mm <sup>2</sup> )   | 0.41   | 0.58 | 0.78 | 1.35 | 1.9  | 5.3  | 0.0032                 |
| Variance (mm <sup>2</sup> ) | 0.6    | 0.9  | 1.2  | 2.3  | 3.8  | 7.3  | 0.0044                 |

Tableau IV 8 : Caractéristiques des variogrammes des résidus de régression avec le relief des gradex et du coefficient de Montana (modèles exponentiels)

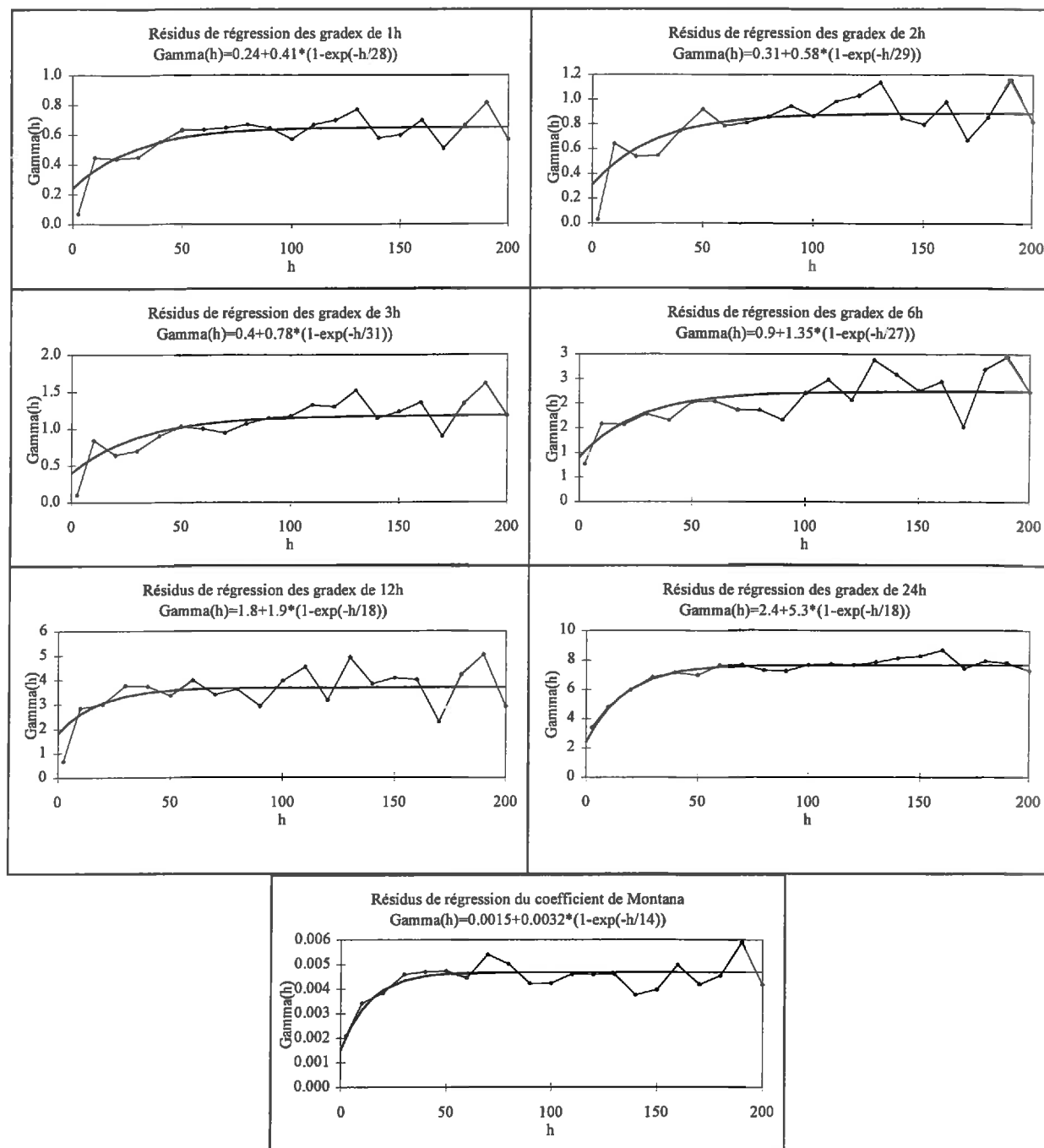


Figure IV 13 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des résidus de régression avec le relief pour les gradex ( $\Gamma(h)$  en  $\text{mm}^2$  et  $h$  en km) et le coefficient de Montana ( $h$  en km)

**IV.6.2. Estimation d'un écart type de l'erreur d'estimation pour la méthode de cartographie envisagée**

L'évaluation de l'écart type de l'erreur d'estimation en tout point du domaine pour la méthode développée ici est inspirée de DINGMAN et al. (1988). Dans ce cas, la moyenne inter-annuelle des précipitations (New Hampshire et Vermont, USA) est exprimée en fonction de l'altitude uniquement : la relation linéaire est simple et les résidus de régression sont interpolés par krigeage.

Les équations de régression mises en évidence pour les pluies extrêmes des Alpes françaises contiennent 4 variables morphométriques, quelle que soit la variable pluviométrique étudiée, ce qui complique le calcul des écarts type de l'erreur d'estimation par rapport au cas de DINGMAN et al. (1988). Les développements théoriques pour le calcul de l'écart type de l'erreur d'estimation font l'objet de ce paragraphe.

**IV.6.2.1. Formulation théorique de l'écart type de l'erreur d'estimation**

Nous ne disposons que d'une estimée de l'équation de régression sur un échantillon réduit et non pas de l'équation réelle correspondant à la population (cf. § IV.1). Les coefficients de l'équation ne sont en fait que des estimations des coefficients réels  $\alpha_i$ .

En tout point  $x_i$  du domaine, l'estimée de P (variable pluviométrique) par la méthode peut s'écrire :

$$\hat{P}(x_i) = \underbrace{a_0 + a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + a_3 X_{3i} + a_4 X_{4i}}_{\hat{f}(R_i)} + \hat{e}_i \quad (IV - 15)$$

où  $\hat{f}(R_i)$  est l'estimée de l'équation de régression sur un échantillon, appliquée au point  $x_i$ , de relief environnant  $R_i$ ,

les  $a_j$  sont les estimées, à partir de l'échantillon, des coefficients  $\alpha_j$  de l'équation de régression ( $\alpha_j$  coefficients de régression pour la population),

$X_{ji}$  ( $j=1, 4$ ) désigne la valeur en  $x_i$  de la  $j^{\text{ème}}$  variable topographique,

$\hat{e}_i$  est l'estimée par krigeage du résidu de régression  $e_i$  ( $e_i$  est l'estimée de l'erreur  $\varepsilon_i$  sur un échantillon).

L'écart type de l'erreur d'estimation sur la valeur de  $P$  en tout point  $x_i$  s'écrit :

$$\sigma_P^2(x_i) = E\left[\left\{\hat{P}(x_i) - P(x_i)\right\}^2\right] \quad (IV - 16)$$

soit :

$$\sigma_P^2(x_i) = E\left[\left\{\hat{f}(R_i) + \hat{e}_i - f(R_i) - e_i\right\}^2\right] \quad (IV - 17)$$

où  $f(R_i)$  est l'équation de régression réelle (celle de la population), appliquée au point  $x_i$ , de relief environnant  $R_i$ ,

$e_i$  est le résidu de régression en un point  $x_i$ , estimé de  $\varepsilon_i$ .

Cela devient :

$$\sigma_P^2(x_i) = E\left[\left\{\hat{f}(R_i) - f(R_i)\right\}^2\right] + E\left[\left\{\hat{e}_i - e_i\right\}^2\right] + 2E\left[\left\{\hat{f}(R_i) - f(R_i)\right\}\left\{\hat{e}_i - e_i\right\}\right] \quad (IV - 18)$$

$$\bullet \quad \rho^2(X, Y) = \frac{\left(E\left[(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})\right]\right)^2}{E\left[(X - \bar{X})^2\right]E\left[(Y - \bar{Y})^2\right]} \text{ est le coefficient de détermination entre les variables}$$

$X$  et  $Y$  ( $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  : moyennes de  $X$  et  $Y$ ).

- De plus, le krigeage et la régression multiple sont sans biais (la moyenne des erreurs d'estimation est nulle dans les 2 cas) :

① en effet, la première ligne du système (IV - 4) s'écrit  $E[\varepsilon] = 0$  (sur la population) :

c'est la condition de non biais pour la régression multiple ;

② pour le krigeage, la condition de non biais suppose que :  $E[Z_0^* - Z_0] = 0$  où  $Z_0^*$  est

l'estimée de  $Z_0$  (valeur du champ en  $x_0$ ) par krigeage (cf. chapitre III).

On a donc :

$$E\left[\left\{\hat{f}(R_i) - f(R_i)\right\}\left\{\hat{e}_i - e_i\right\}\right] = E\left[\left\{\hat{f}(R_i) - f(R_i) - \underbrace{E(\hat{f}(R_i) - f(R_i))}_{=0}\right\}\left\{\hat{e}_i - e_i - \underbrace{E(\hat{e}_i - e_i)}_{=0}\right\}\right]$$

$$E\left[\left\{\hat{f}(R_i) - f(R_i)\right\}\left\{\hat{e}_i - e_i\right\}\right] = \rho\left(\hat{f}(R_i) - f(R_i), \hat{e}_i - e_i\right) \sigma_{f(R)}(x_i) \sigma_e(x_i) \quad (IV - 19)$$

(IV - 18) devient :

$$\sigma_P^2(x_i) = \sigma_{f(R)}^2(x_i) + \sigma_e^2(x_i) + 2 \rho\left(\hat{f}(R_i) - f(R_i), \hat{e}_i - e_i\right) \sigma_{f(R)}(x_i) \sigma_e(x_i) \quad (IV - 20)$$

où  $\sigma_{f(R)}^2(x_i)$  est la variance de l'erreur d'estimation par l'équation de régression en  $x_i$ ,

$\sigma_e^2(x_i)$  est la variance de l'erreur d'estimation des résidus  $e$  par krigeage en  $x_i$ ,

$\rho\left(\hat{f}(R) - f(R), \hat{e} - e\right)$  est le coefficient de corrélation entre les erreurs d'estimation par l'équation de régression d'une part et les erreurs d'estimation des résidus  $e$  par krigeage d'autre part.

Il nous reste donc à déterminer  $\sigma_{f(R)}^2(x_i)$  et  $\rho\left(\hat{f}(R) - f(R), \hat{e} - e\right)$ .

#### IV.6.2.2. Variance de l'erreur d'estimation par l'équation de régression

L'écart type de l'erreur d'estimation par l'équation de régression en  $x_i$  est :

$$\sigma_{f(R)}^2(x_i) = E\left[\left\{\hat{f}(R_i) - f(R_i)\right\}^2\right] \quad (IV - 21)$$

soit :

$$\sigma_{f(R)}^2(x_i) = E\left[\left\{(a_0 + a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + a_3 X_{3i} + a_4 X_{4i}) - (\alpha_0 + \alpha_1 X_{1i} + \alpha_2 X_{2i} + \alpha_3 X_{3i} + \alpha_4 X_{4i})\right\}^2\right] \quad (IV - 22)$$

(IV - 22) s'écrit encore :

$$\sigma_{f(R)}^2(x_i) = E\left[\left\{(a_0 - \alpha_0) + (a_1 X_{1i} - \alpha_1 X_{1i}) + (a_2 X_{2i} - \alpha_2 X_{2i}) + (a_3 X_{3i} - \alpha_3 X_{3i}) + (a_4 X_{4i} - \alpha_4 X_{4i})\right\}^2\right]$$

$$\sigma_{f(R)}^2(x_i) = E\left[(a_0 - \alpha_0)^2\right] + \sum_{j=1}^4 E\left[(a_j X_{ji} - \alpha_j X_{ji})^2\right]$$

$$+ 2 \sum_{j=1}^4 E\left[(a_0 - \alpha_0)(a_j X_{ji} - \alpha_j X_{ji})\right] + 2 \sum_{j=1}^4 \sum_{k>j}^4 E\left[(a_j X_{ji} - \alpha_j X_{ji})(a_k X_{ki} - \alpha_k X_{ki})\right] \quad (IV - 23)$$



En considérant que les variables topographiques  $X_j$  sont connues exactement (pas d'erreur d'estimation sur ces variables), (IV - 23) devient :

$$\sigma_{f(R)}^2(X_i) = \sigma_{a_0}^2 + \sum_{j=1}^4 X_{ji}^2 \sigma_{a_j}^2 + 2 \sum_{j=1}^4 X_{ji} \text{cov}(a_j, a_0) + 2 \sum_{j=1}^4 \sum_{k>j}^4 X_{ji} X_{ki} \text{cov}(a_j, a_k) \quad (IV - 24)$$

En fait, nous ne disposons que des estimations des variances  $\text{var}(a_j)$  et les covariances  $\text{cov}(a_j, a_k)$  des coefficients de régression multiple (cf. § IV.1.3, équations (IV - 10) et (IV - 11)), (IV - 24) s'écrit donc :

$$\sigma_{f(R)}^2(X_i) = \hat{\sigma}_{a_0}^2 + \sum_{j=1}^4 X_{ji}^2 \hat{\sigma}_{a_j}^2 + 2 \sum_{j=1}^4 X_{ji} \hat{\text{cov}}(a_j, a_0) + 2 \sum_{j=1}^4 \sum_{k>j}^4 X_{ji} X_{ki} \hat{\text{cov}}(a_j, a_k) \quad (IV - 25)$$

Finalement, l'erreur d'estimation par l'équation de régression est due uniquement à l'erreur d'estimation des coefficients, c'est-à-dire à une erreur d'échantillonnage.

#### IV.6.2.3.Coefficient de corrélation entre les erreurs d'estimation par l'équation de régression et les erreurs d'estimation des résidus e par krigeage

Les estimations des résidus de régression sont calculées à partir :

- des valeurs des variables topographiques  $X_j$ , donc de valeurs sans erreurs
- et des estimées des coefficients de régression.

Ainsi, on suppose que les erreurs d'estimation de  $e$  sont très bien corrélées avec les erreurs sur les coefficients de régression (DINGMAN et al., 1988) :

$$\rho(\hat{f}(R) - f(R), \hat{e} - e) = 1 \quad (IV - 26)$$

#### IV.6.2.4.Formulation finale de l'écart type de l'erreur d'estimation

Finalement, (IV - 20) devient :

$$\sigma_p^2(x_i) = \sigma_{f(R)}^2(x_i) + \sigma_e^2(x_i) + 2 \sigma_{f(R)}(x_i) \sigma_e(x_i) \quad (IV - 27)$$

$\sigma_{f(R)}^2(x_i)$  est calculé par l'équation (IV - 25) et  $\sigma_e^2(x_i)$  est l'écart type de l'erreur d'estimation par krigeage.

Cette formule montre bien que l'erreur d'estimation par la méthode proposée est une combinaison de l'erreur d'estimation par régression multiple et de l'erreur d'estimation par krigeage.

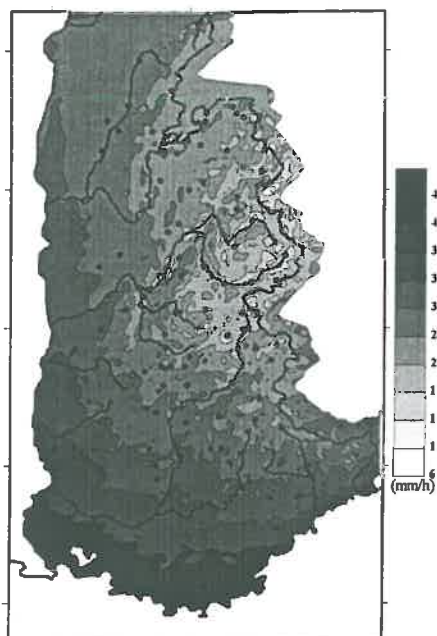
#### IV.6.3.Exemple de cartes obtenues par application de la méthode

Les Figure IV 14 et Figure IV 15 donnent les différentes cartes de la méthode « régression avec le relief et krigeage des résidus de régression », pour l'exemple des pluies décennales horaires et journalières :

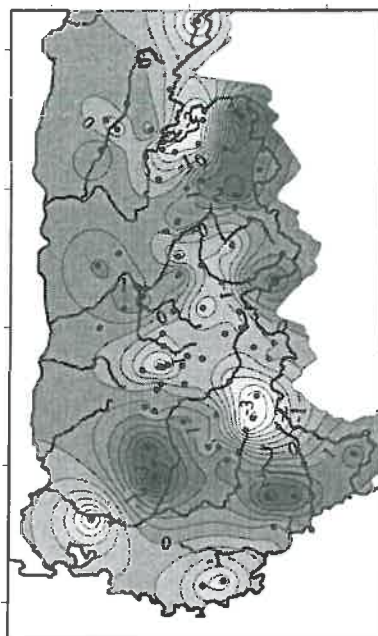
- *la carte obtenue par régression multiple*, c'est-à-dire l'application de l'équation de régression linéaire multiple entre les variables pluviométriques et les variables morphométriques en chaque point du domaine ;
- *la carte des résidus de régression* obtenue par krigeage des résidus, et *la carte des écarts type d'erreur d'estimation* associée ;
- *la carte finale du champ pluviométrique*, somme des cartes de régression multiple et des résidus ;
- *la carte finale des écarts type de l'erreur d'estimation du champ pluviométrique*, application en chaque point de l'équation (IV - 27).

Les cartes obtenues par régression multiple et les cartes finales sont très influencées par le relief : on distingue nettement la chaîne des Alpes aussi bien à 1 h qu'à 24 h.

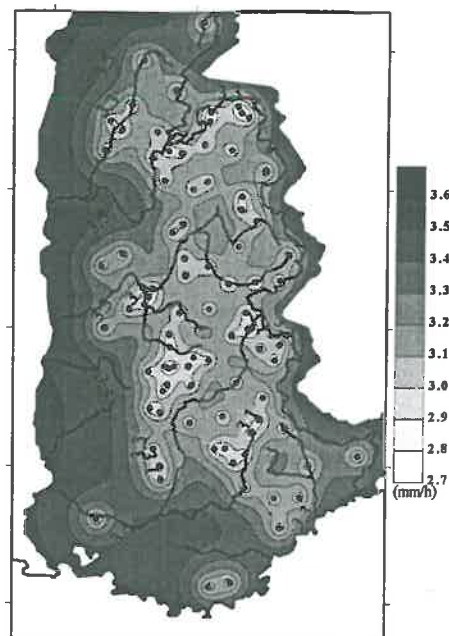
Carte des pluies de 1h et 10 ans  
(obtenue par régression multiple)



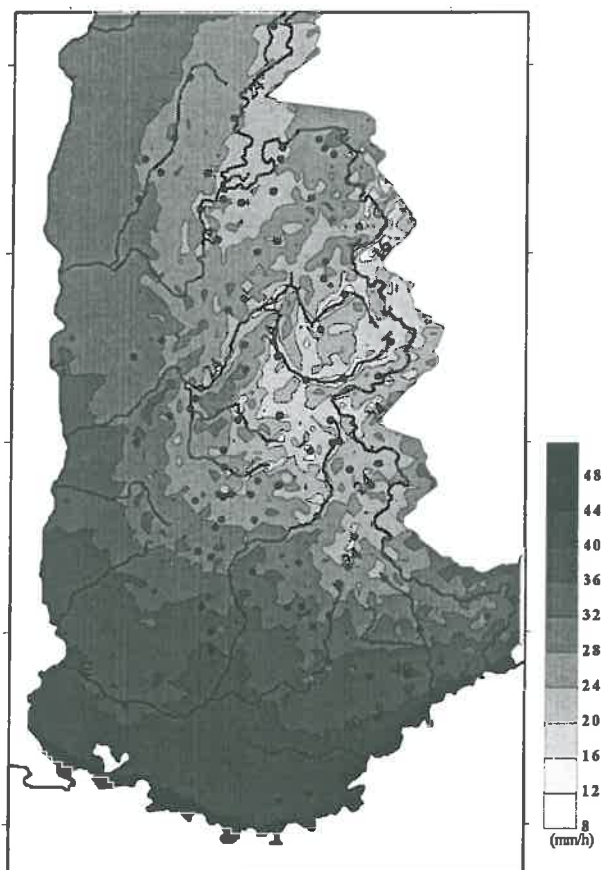
Carte des résidus de régression  
(obtenue par krigeage)



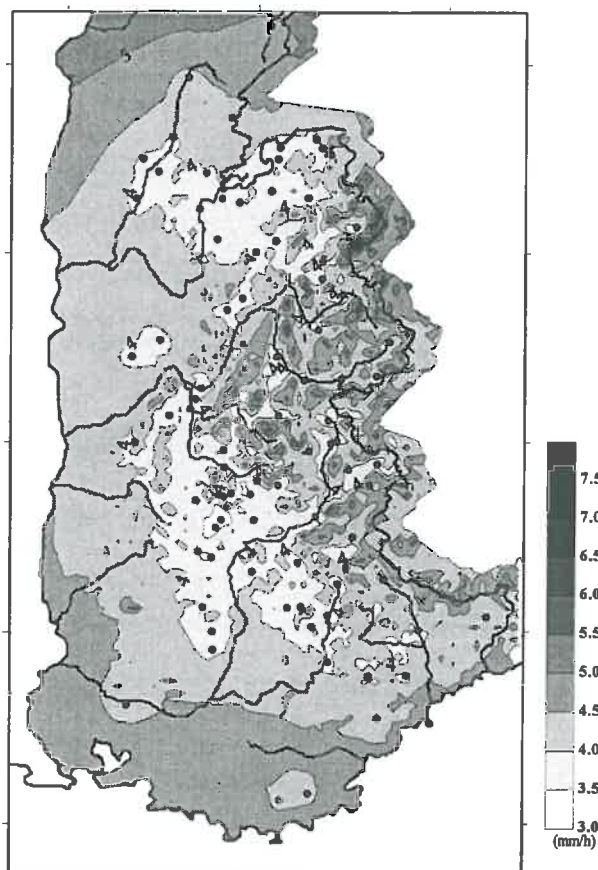
Carte des écarts type des résidus de  
régression (obtenue par krigeage)



Carte finale des pluies de 1h et 10 ans



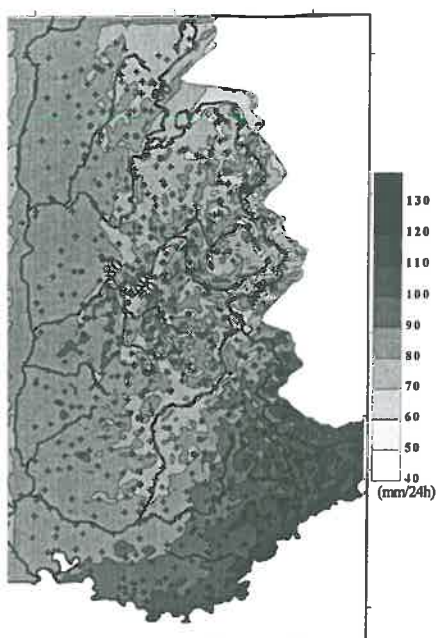
Carte finale des écarts type d'erreur d'estimation



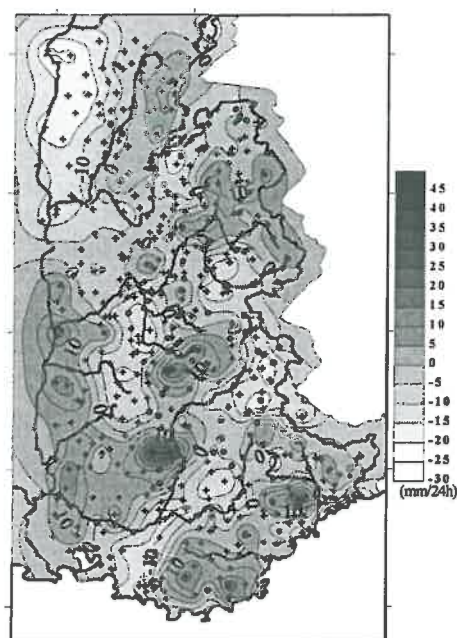
*Figure IV 14 : Application de la méthode « régression avec le relief et krigeage des résidus de régression » : cas des pluies horaires décennales (pas de calcul : 5.25 km)*



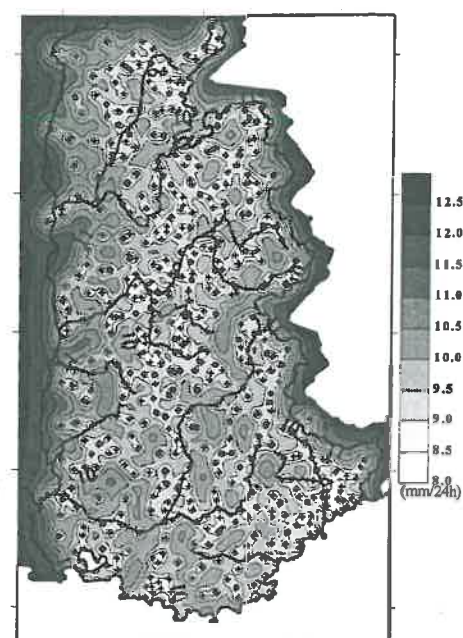
Carte des pluies de 24h et 10 ans  
obtenue par régression multiple)



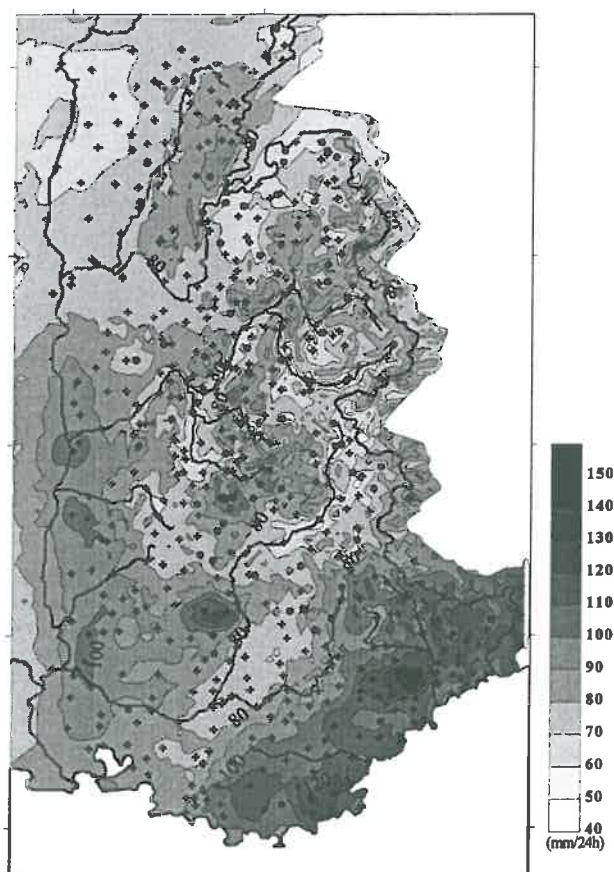
Carte des résidus de régression  
(obtenue par krigeage)



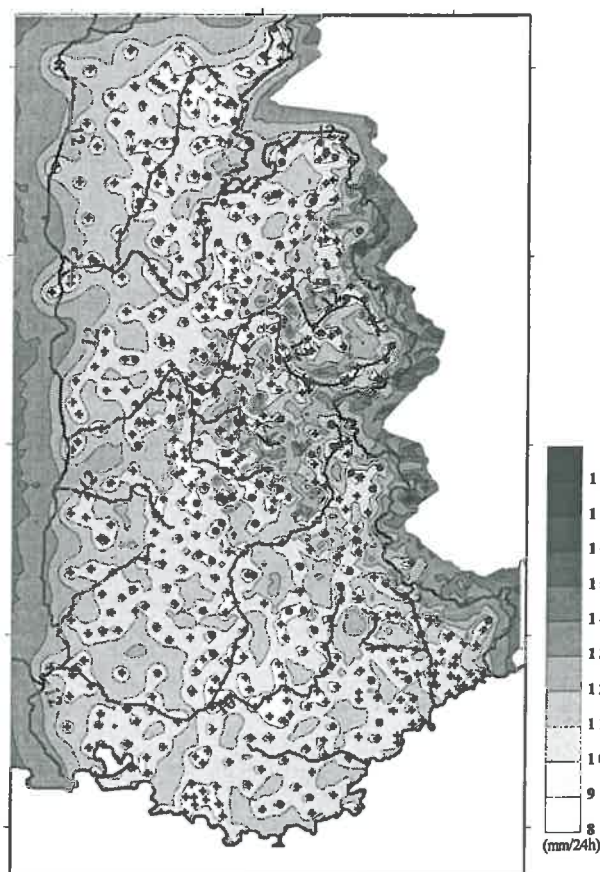
Carte des écarts type des résidus de  
régression (obtenue par krigeage)



Carte finale des pluies de 24h et 10 ans



Carte finale des écarts type d'erreur d'estimation



*Figure IV 15 : Application de la méthode « régression avec le relief et krigeage des résidus de régression » : cas des pluies journalières décennales (pas de calcul : 5.25 km)*

Les *cartes des résidus de régression* sont assez lisses, du fait de la modélisation des champs avec une pépité.

Pour les durées courtes, les résidus de régression sont faibles (cf. Tableau IV 9). L'ajout de ces résidus aux cartes obtenues par régression linéaire multiple n'apporte donc pas une modification importante aux cartes de régression. Cependant, cela permet de retrouver en chaque poste de mesure la valeur de pluie extrême connue en ce point.

Par contre, pour les pas de temps forts, les résidus de régression sont plus importants et leur ajout à la carte de régression améliore donc la cartographie du champ de façon notable.

Enfin, les *cartes finales des écarts type de l'erreur d'estimation* montrent aussi quelle est la part la plus importante pour la cartographie : la régression linéaire avec le relief ou le krigeage des résidus. En effet, les cartes de faibles pas de temps reflètent surtout les erreurs sur la régression, alors que les cartes de pas de temps forts sont plus influencées par les écarts type d'erreur d'estimation des résidus.

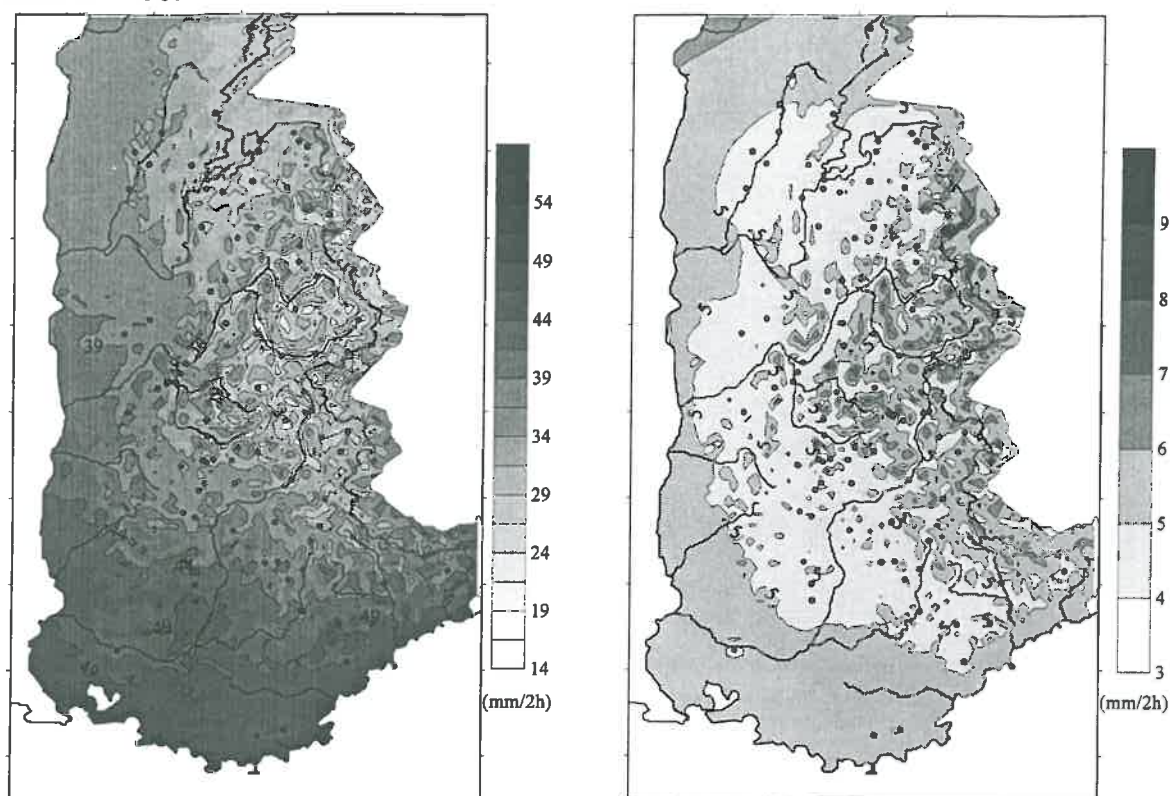
|         |                              | 1 h    | 2 h     | 3 h     | 6 h     | 12 h    | 24 h    |
|---------|------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| T=10ans | Moyenne                      | 5.4E-8 | -1.7E-7 | -1.9E-7 | -1.1E-7 | -1.7E-7 | -6.9E-8 |
|         | Minimum                      | -7.2   | -10.6   | -13.1   | -14.1   | -25.7   | -34.2   |
|         | Maximum                      | 10.2   | 12.1    | 13.4    | 21.9    | 31.0    | 66.5    |
|         | Ecart type                   | 3.6    | 4.2     | 4.9     | 6.7     | 9.1     | 12.6    |
|         | Moyenne des variables brutes | 25.8   | 32.1    | 37.4    | 47.8    | 61.8    | 83.6    |

Tableau IV 9 : Statistiques des résidus de régression (mm par pas de temps), exemple des pluies décennales (551 observations à 24 h, 88 sinon)

D'autre part, les Figure IV 16, Figure IV 17 et Figure IV 18 donnent les exemples des cartes des pluies décennales (2 h à 12 h), des coefficients de Montana et des cartes des écarts type de l'erreur d'estimation associées.



Pluies de 2 h et 10ans



Pluies de 3 h et 10ans

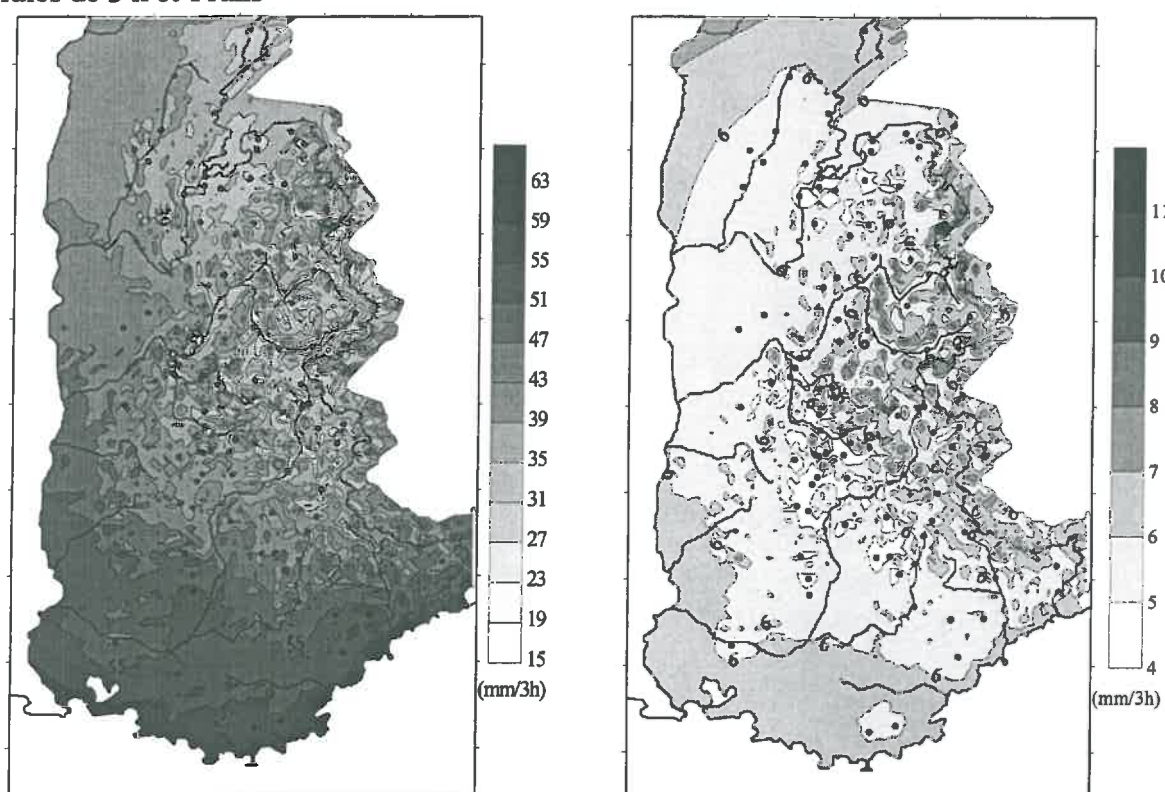
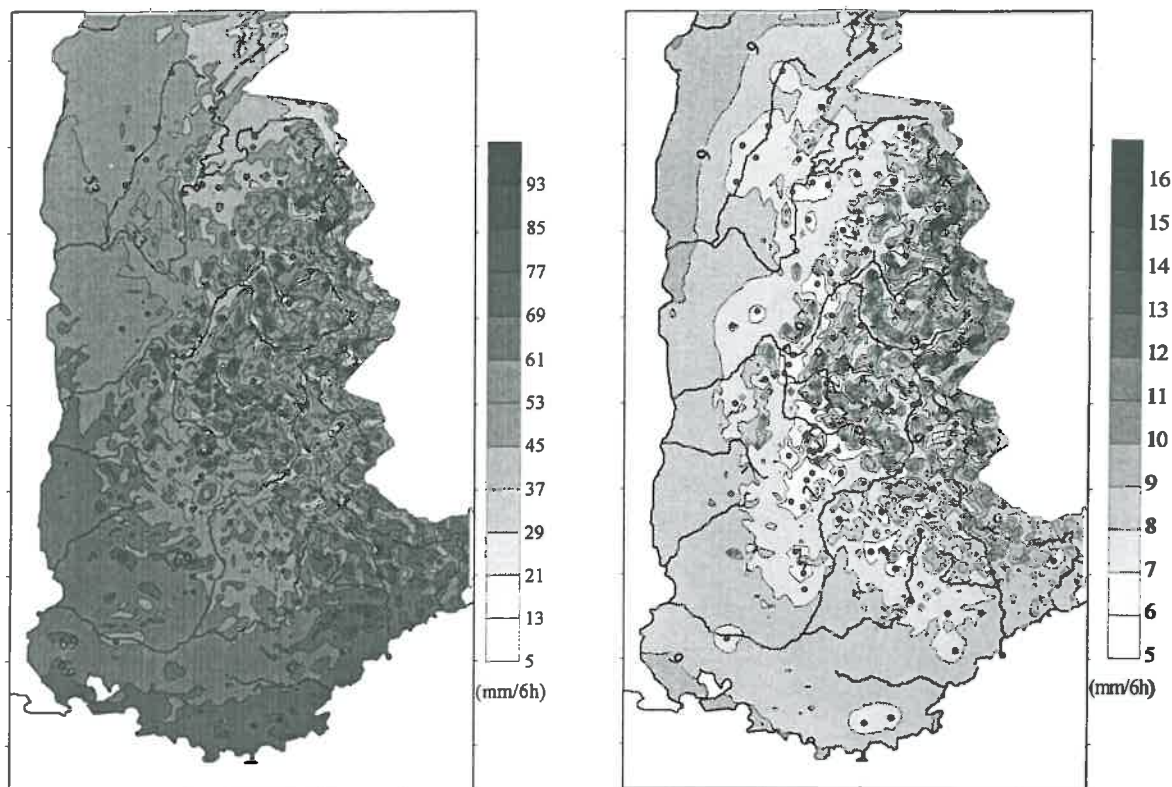
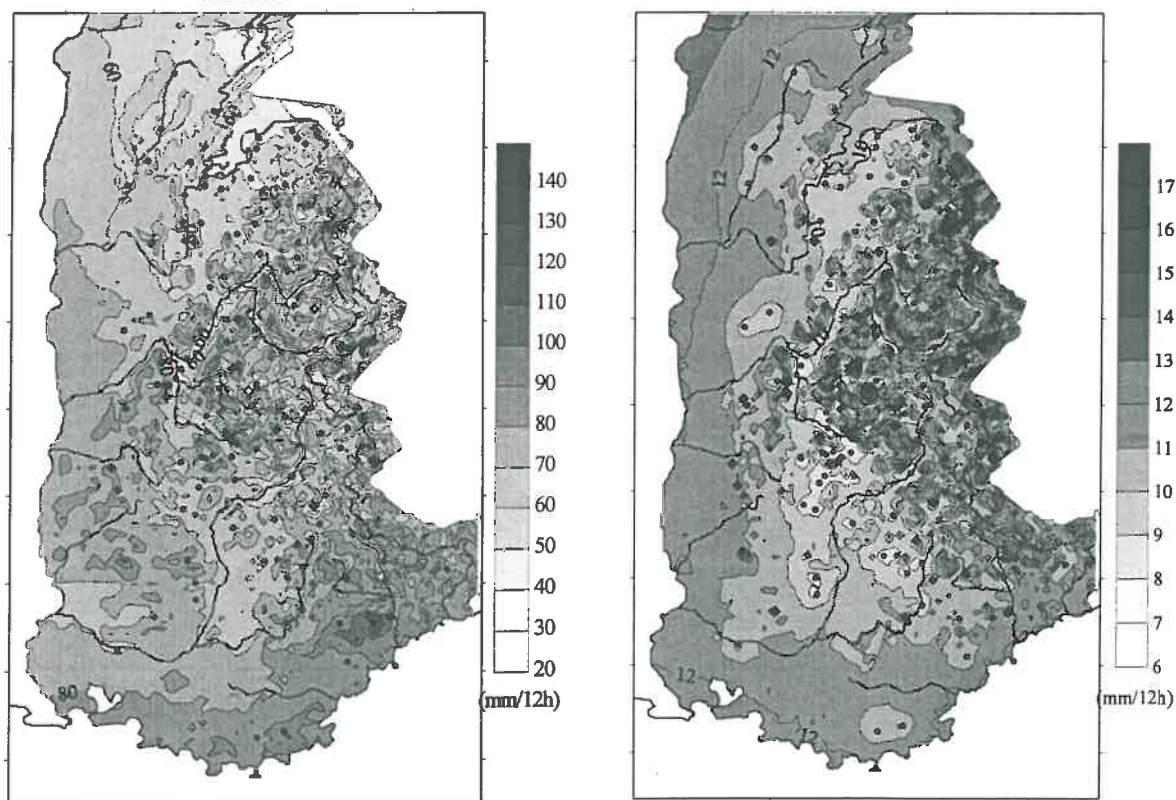


Figure IV 16 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) : pluies décennales de 2 h et de 3 h (pas de calcul : 5.25 km)

Pluies de 6 h et 10ans



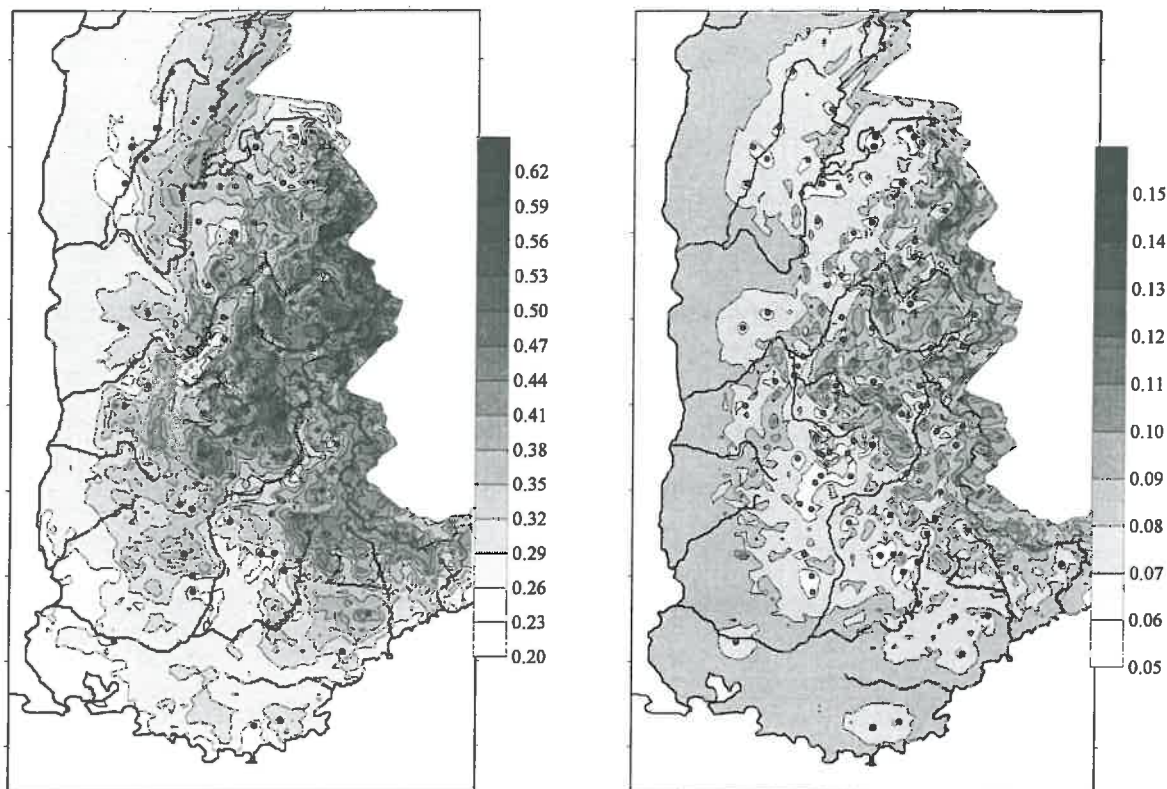
Pluies de 12 h et 10ans



*Figure IV 17 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) : pluies décennales de 6 h et de 12 h (pas de calcul : 5.25 km)*



Coefficients de Montana



*Figure IV 18 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) : coefficients de Montana (pas de calcul : 5.25 km)*

De manière générale, les cartes des champs sont bien plus chahutées que celles obtenues par krigeage (cf. chapitre III) : elles reflètent beaucoup plus le relief des Alpes, ce qui rend leur commentaire difficile.

Cependant, les grandes caractéristiques des différents champs sont présentes. Ainsi, la zone au centre des Alpes enregistre :

- des valeurs globalement plus faibles que le reste des Alpes pour les pluies décennales (les pluies centennales et les gradex),
- des valeurs globalement plus fortes pour le coefficient de Montana.

Pour les pluies décennales (les pluies centennales et les gradex), les valeurs les plus fortes sont situées au Sud-Est du domaine.



## **IV.7.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tenté d'expliquer les caractéristiques des pluies extrêmes par la topographie. Cela passe par la définition de différents paramètres caractérisant la situation d'un site : sa cote et son environnement proche, son exposition, l'encaissement et la pente et la situation générale dans les Alpes françaises.

Plutôt qu'une simple relation linéaire entre paramètres pluviométriques et paramètres morphométriques, c'est une relation linéaire multiple qui a été utilisée. Les relations mises en évidence modélisent bien les faibles pas de temps : 76 % de la variance des pluies horaires décennales est expliquée contre seulement 53 % de la variance des pluies journalières décennales. Par ailleurs, 47 % de la variance du coefficient de Montana est expliquée. Evidemment, ces résultats n'ont pu être validés pour des altitudes élevées (supérieures à 2000 m), faute de stations de mesure.

Sur cette base, une méthode de cartographie des champs de précipitations extrêmes est définie. Les champs peuvent être cartographiés en appliquant en chaque point du domaine l'équation de régression correspondant à la variable. Ensuite, l'étude de la variabilité spatiale des résidus de régression montre que leur cartographie est possible par krigeage. Ce champ est ajouté au précédent pour obtenir une carte finale du champ pluviométrique.

La carte obtenue a la propriété de donner en chaque point de mesure la valeur connue en ce point. Enfin, une carte des écarts type de l'erreur d'estimation par cette méthode est évaluée grâce à l'erreur d'estimation par régression et grâce aux écarts type de l'erreur d'estimation des résidus par krigeage.

Cependant, les cartes obtenues ne sont pas pleinement satisfaisantes, car elles sont très chahutées. On cherche donc une autre manière d'intégrer le relief dans la cartographie, c'est ce qui fait l'objet de chapitre V.

CHAPITRE V

CARTOGRAPHIE PAR

COKRIGEAGE AVEC LE RELIEF



Le cokrigage est une méthode géostatistique qui utilise la corrélation spatiale entre deux variables, ou plus, pour réduire la variance de l'erreur d'estimation, par rapport à celle obtenue par krigeage. En général, la variable à estimer est sous échantillonnée par rapport aux autres. La diminution de variance dépend de la corrélation entre les variables et de la distribution spatiale des données. De plus, le cokrigage peut être utilisé pour estimer en même temps plusieurs variables (MYERS, 1982).

Cette méthode, d'abord développée dans le cadre de gisements miniers, a ensuite été appliquée dans d'autres cas, en particulier pour la cartographie des pluies à l'aide de l'altitude. Ainsi, HEVESI et al. (1992) utilisent le cokrigage pour cartographier les précipitations moyennes annuelles en zone de montagne au Nevada (USA). En effet, dans ce cas, l'altitude explique plus de 75 % de la variance des précipitations. PHILLIPS et al. (1992) font de même pour les précipitations moyennes annuelles en Oregon (USA).

Dans un premier temps, nous rappellerons les outils et la théorie du cokrigage, puis nous appliquerons cette méthode à l'estimation des caractéristiques des pluies extrêmes à l'aide du relief. Pour cela, il faut d'abord définir les variables topographiques utilisées, et ensuite étudier leur variabilité spatiale ainsi que leur co-fluctuation avec les variables à cartographier.

## **V.1. Théorie du cokrigage**

Le cokrigage est une méthode d'interpolation linéaire qui permet d'évaluer la valeur d'une variable  $z_i$  en un point quelconque grâce aux valeurs de  $z_i$  et de variables auxiliaires en des points voisins.

**Dans la suite, nous nous plaçons dans le cas particulier où l'on veut estimer une variable  $z_i$  connue en  $n_i$  points expérimentaux à l'aide d'une seule variable auxiliaire  $z_j$  connue en  $n_j$  points ( $n_j > n_i$ ).  $z_i$  est supposé être une réalisation particulière de la Fonction Aléatoire (F.A.)  $Z_i$  et  $z_j$  une réalisation de la F.A.  $Z_j$ .**

On souhaite définir en un point  $x_0$  non mesuré un estimateur de  $z_i$  du type :

$$z_i^*(x_0) = \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} z_i(x_k) + \sum_{l=1}^{n_j} \lambda_{jl} z_j(x_l) \quad (V-1)$$

où  $z_i^*(x_0)$  est l'estimée de  $z_i$  au point  $x_0$ ,

$n_i$  (respectivement  $n_j$ ) est le nombre de points pour lesquels on connaît  $z_i$  (resp.  $z_j$ ),

$z_i(x_k)$  et  $z_j(x_l)$  sont les valeurs de  $z_i$  et  $z_j$  aux points  $x_k$  et  $x_l$ ,

$\lambda_{ik}$  et  $\lambda_{jl}$  sont les poids associés.

La démarche du cokrigage, similaire à celle du krigeage, peut être divisée en trois étapes :

- étude de la variabilité spatiale des différentes variables (variogrammes expérimentaux de  $z_i$  et  $z_j$ ) et des co-fluctuations de ces variables en fonction de la distance (variogramme croisé expérimental cf. § V.1.1) ;
- ajustement de modèles théoriques de manière à modéliser les différentes variabilités spatiales ;
- calcul des différents poids  $\lambda_{ik}$  et  $\lambda_{jl}$  grâce aux modèles de variogrammes et variogramme croisé et détermination de la valeur interpolée.

Le cokrigage est une méthode particulièrement intéressante lorsque la variable auxiliaire est bien corrélée avec la variable à interpoler ( $|r| > 0.5$ ) et est connue en plus de points (PHILLIPS et al., 1992). Dans la suite, nous rappelons les outils et la théorie du cokrigage, on trouvera plus de détails dans JOURNEL (1977).

### V.1.1. Variogramme croisé

Pour le cokrigage, la *stationnarité d'ordre 2* suppose :

- ① l'espérance mathématique constante pour chaque F.A.  $Z_i(x)$  et  $Z_j(x)$  :

$$E[Z_i(x)] = m_i = \text{constante indépendante de } x \quad (V-2)$$

$$E[Z_j(x)] = m_j = \text{constante indépendante de } x$$

- ② la covariance croisée fonction uniquement de l'interdistance  $h$  entre deux points  $x$  et  $x'$  :

$$C_{ij}(h) = E[Z_i(x+h) \cdot Z_j(x)] - m_i \cdot m_j \quad (V - 3)$$

Pour  $i=j$ , la définition de  $C_{ij}$  donne la covariance de  $Z_i$ .

Pour pouvoir définir les variogrammes expérimentaux, seule l'hypothèse intrinsèque doit être vérifiée par les F.A.  $Z_i$  et  $Z_j$ . Cette hypothèse ne suppose plus l'existence des covariances croisées mais seulement l'existence et la stationnarité des espérances et des variogrammes croisés  $\gamma_{ij}$  :

$$\begin{cases} E[Z_i(x) - Z_i(x+h)] = 0 \\ E[Z_j(x) - Z_j(x+h)] = 0 \\ E\left[\{Z_i(x+h) - Z_i(x)\} \{Z_j(x+h) - Z_j(x)\}\right] = 2\gamma_{ij} \end{cases} \quad (V - 4)$$

$\gamma_{ij}$  est le *demi-variogramme croisé* ou *variogramme croisé* des deux F.A.  $Z_i$  et  $Z_j$  :

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2} E\left[\{Z_i(x+h) - Z_i(x)\} \{Z_j(x+h) - Z_j(x)\}\right] \quad (V - 5)$$

Pour  $i=j$ , on retrouve la définition du variogramme de  $Z_i$ .

En supposant l'hypothèse intrinsèque satisfaite, le variogramme croisé peut être estimé à partir des couples de points expérimentaux où on dispose d'une réalisation de  $z_i$  et de  $z_j$  par :

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{k=1}^{N(h)} [z_i(x_k + h) - z_i(x_k)] [z_j(x_k + h) - z_j(x_k)] \quad (V - 6)$$

où  $\gamma_{ij}(h)$  est le variogramme croisé de  $z_i$  et  $z_j$  à la distance  $h$  (pour  $i \neq j$ ),

$z_i(x_k)$  est la valeur de  $z_i$  au point  $x_k$  et  $z_j(x_k)$  la valeur de  $z_j$  au point  $x_k$ ,

$x_k$  sont les points pour lesquels les données sont disponibles à la fois en  $x_k$  et  $x_k+h$ ,

$N(h)$  est le nombre de couples de points distants de  $h \pm \Delta h$ .

Ainsi, le variogramme croisé est déterminé à partir des points où les deux variables  $z_i$  et  $z_j$  sont connues simultanément.

### Propriétés des moments croisés

1. Un variogramme croisé  $\gamma_{ij}(h)$  peut prendre des valeurs négatives tandis qu'un variogramme direct  $\gamma_{ii}(h)$  est toujours positif. Une valeur négative du variogramme croisé traduit le fait

qu'un accroissement positif de l'une des variables correspond *en moyenne* à un accroissement négatif de l'autre variable (JOURNEL, 1977).

2. Sous l'hypothèse stationnaire d'ordre 2, l'existence des covariances croisées entraîne celle des variogrammes croisés :

$$2\gamma_{ij}(h) = 2C_{ij}(0) - C_{ij}(h) - C_{ji}(h) \quad (V - 7)$$

3. Le variogramme croisé est symétrique en (i,j) et (h,-h) alors que la covariance croisée ne l'est pas nécessairement :

$$\gamma_{ij}(h) = \gamma_{ji}(h) \text{ et } \gamma_{ij}(-h) = \gamma_{ij}(h) \quad (V - 8)$$

$$C_{ij}(h) = C_{ji}(-h) \text{ et } C_{ij}(-h) \neq C_{ij}(h) \quad (V - 9)$$

### V.1.2. Inégalité de Cauchy-Schwarz

Le cokrigage nécessite la définition de deux variogrammes (ceux de  $z_i$  et  $z_j$ ) et d'un variogramme croisé  $\gamma_{ij}$ .

Les deux variogrammes doivent être définis positifs, ce qui est assuré en ajustant un modèle classique (modèles puissance, sphérique, exponentiel ou gaussien).

De plus, l'inégalité de Cauchy-Schwarz doit être vérifiée (HEVESI et al., 1992) :

$$\text{pour toute distance } h : \quad \gamma_{ij}(h) < \sqrt{\gamma_{ii}(h)\gamma_{jj}(h)} \quad (V - 10)$$

En pratique, des modèles classiques sont ajustés aux différents variogrammes : modèles puissance, sphérique, exponentiel et gaussien. On compare ensuite les variables  $PDC = \sqrt{\gamma_{ii}(h)\gamma_{jj}(h)}$  et  $\gamma_{ij}(h)$  (PDC : « Positive Definite Condition »).

### V.1.3. Formulation du cokrigage

Les poids  $\lambda_{ik}$  et  $\lambda_{jl}$  de l'équation (V - 1) sont obtenus en imposant que l'estimateur

$$Z_i^*(x_0) = \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} Z_i(x_k) + \sum_{l=1}^{n_j} \lambda_{jl} Z_j(x_l) \text{ soit :}$$

$$\textcircled{1} \text{ sans biais } E[Z_i^*(x_0) - Z_i(x_0)] = 0 \quad (V - 11)$$

$$\textcircled{2} \text{ d'erreur quadratique minimale: } E[(Z_i^*(x_0) - Z_i(x_0))^2] \text{ minimum} \quad (V - 12)$$

Cela conduit au système d'équations pour le cokrigage :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} \gamma_{ii}(x_m, x_k) + \sum_{l=1}^{n_j} \lambda_{jl} \gamma_{ij}(x_m, x_l) + \mu_i = \gamma_{ii}(x_m, x_0) & m=1, n_i \\ \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} \gamma_{ij}(x_m, x_k) + \sum_{l=1}^{n_j} \lambda_{jl} \gamma_{jj}(x_m, x_l) + \mu_j = \gamma_{ij}(x_m, x_0) & m=1, n_j \\ \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} = 1 \\ \sum_{l=1}^{n_j} \lambda_{jl} = 0 \end{cases} \quad (V - 13)$$

La résolution de ce système fournit les poids  $\lambda_{ik}$  ( $k=1, n_i$ ) et  $\lambda_{jl}$  ( $l=1, n_j$ ) et les coefficients de Lagrange  $\mu_i$  et  $\mu_j$ .

La variance de l'erreur d'estimation en un point  $x_0$  où l'on ne connaît pas  $z_i$  est :

$$\sigma_e^2(x_0) = \mu_i + \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} \gamma_{ii}(x_k, x_0) + \sum_{l=1}^{n_j} \lambda_{jl} \gamma_{ij}(x_l, x_0) \quad (V - 14)$$

La réduction de la variance d'estimation par cokrigage par rapport au krigeage augmente lorsque la relation entre la variable  $z_i$  et la variable auxiliaire augmente.



## **V.2.Cokrigage avec le relief**

Au chapitre IV, nous avons mis en évidence des relations linéaires entre paramètres pluviométriques et paramètres morphométriques. Ces variables morphométriques peuvent être déterminées en une infinité de points. C'est donc une information que l'on peut introduire dans un système de cokrigage pour améliorer les estimations des variables pluviométriques. Les variables auxiliaires peuvent être :

- des variables tirées du relief (cas ①),
- ou les estimées de la variable à cartographier par régression linéaire multiple avec le relief (cas ②).

### ① Variables auxiliaires : variables tirées du relief

La technique de régression multiple linéaire nous a permis de sélectionner un ensemble de 4 variables topographiques pour expliquer chaque variable pluviométrique : ce sont celles qui expliquent le maximum de variance de la variable étudiée. Ainsi, le cokrigage peut être appliqué en utilisant comme variables auxiliaires ces 4 variables morphométriques.

Cependant, cette approche nécessite l'étude de 15 variogrammes expérimentaux :

- 5 variogrammes "directs" : celui de la variable pluviométrique étudiée et ceux des 4 variables morphométriques associées,
- et 10 variogrammes croisés, correspondant aux 10 couples de variables obtenus à partir de la variable pluviométrique et des 4 variables morphométriques.

Cette démarche est donc assez lourde. Ainsi, au lieu d'introduire les 4 variables séparément dans le système de cokrigage, il est plus simple de n'en prendre qu'une seule, combinaison linéaire des 4 variables de départ. Les coefficients à appliquer pour cette combinaison linéaire sont ceux obtenus par régression linéaire multiple (cf. ②).

② Variable auxiliaire : estimée de la variable à cartographier par régression linéaire multiple avec le relief

Si  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  et  $X_4$  sont les variables topographiques sélectionnées pour expliquer une variable pluviométrique  $P$  donnée, l'estimée par régression multiple linéaire de  $P$  en un point  $x_i$  s'écrit :

$$\hat{P}(x_i) = a_0 + a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + a_3 X_{3i} + a_4 X_{4i} \quad (V - 15)$$

où  $X_{ji}$  est la valeur de la variable morphométrique  $X_j$  ( $j=1,4$ ) au point  $x_i$ ,

$a_j$  ( $j=1,4$ ) sont les coefficients de régression multiple et  $a_0$  la constante de régression.

Cette variable "estimée de la variable à cartographier par régression linéaire multiple avec le relief" peut être calculée en une infinité de points, nous l'utilisons donc comme variable auxiliaire pour le cokrigage. Dans ce cas, pour chaque variable pluviométrique, il n'y a que 3 variogrammes à étudier :

- deux variogrammes "directs" : celui de la variable pluviométrique étudiée et celui de son estimée par le relief,
- et un variogramme croisé.

L'étude des variogrammes "directs" des pluies brutes a déjà été faite au chapitre III, il reste donc à s'intéresser aux variogrammes "directs" des estimées des pluies grâce au relief et aux variogrammes croisés.

**V.2.1. Etude de la structure spatiale des variables auxiliaires tirées du relief et de la co-fluctuation des variables pluviométriques et des variables auxiliaires : variogrammes et variogrammes croisés**

Le variogramme expérimental de chaque variable auxiliaire est déterminé grâce aux valeurs aux noeuds d'une grille de pas de 10.5 km recouvrant le domaine, ce qui correspond à 1144 points (soit 653 796 couples). D'autre part, les variogrammes croisés sont déterminés à partir de 88 points (puisque les pluviographes Liebvilliers et Villers Le Lac sont en dehors de notre MNT).

Les différents variogrammes sont ajustés par des modèles classiques. Ensuite, pour une variable pluviométrique donnée, on compare les variogrammes directs de la variable, de la variable auxiliaire et le variogramme croisé correspondant, pour s'assurer que la condition de Cauchy-Schwarz (V - 10) est vérifiée.

#### V.2.1.1. Variogrammes des estimées des pluies grâce au relief

##### V.2.1.1.1. Pluies décennales, centennales et gradex

De manière générale, les variogrammes expérimentaux obtenus pour les estimées des pluies décennales, centennales et des gradex par le relief ne sont pas comparables à ceux des variables réelles. En effet, pour tous les pas de temps et toutes les variables, les variogrammes expérimentaux ont une allure de dérive : ils ont donc été modélisés par des modèles puissance (cf. Figure V 1, Figure V 2 et Figure V 3). Rappelons que les variogrammes des pluies brutes avaient été ajustés par des modèles sphériques pour des pas de temps inférieurs à 24 h, et le pas de temps de la journée était le seul pour lequel on avait choisi un modèle puissance.

Nous n'avons pas cherché à modéliser la dérive autrement que par un modèle puissance. En effet, cette étude a été faite au chapitre III, pour le pas de temps de 24 h : la modélisation de la dérive par une division du domaine en deux ou par une relation avec les coordonnées X et Y n'avait pas apporté d'amélioration importante pour l'interpolation du champ à 24 h. C'est aussi ce qu'affirment JOURNEL et al. (1989) : pour l'interpolation, le krigeage ordinaire et le krigeage avec dérive sont équivalents.

Pour les trois paramètres (pluies décennales, centennales et gradex), il faut noter une incohérence du pas de temps de 24 h par rapport aux autres. En effet, le variogramme correspondant à 24 h a des valeurs plus faibles que celui correspondant à 12 h, ce qui n'est pas logique a priori :

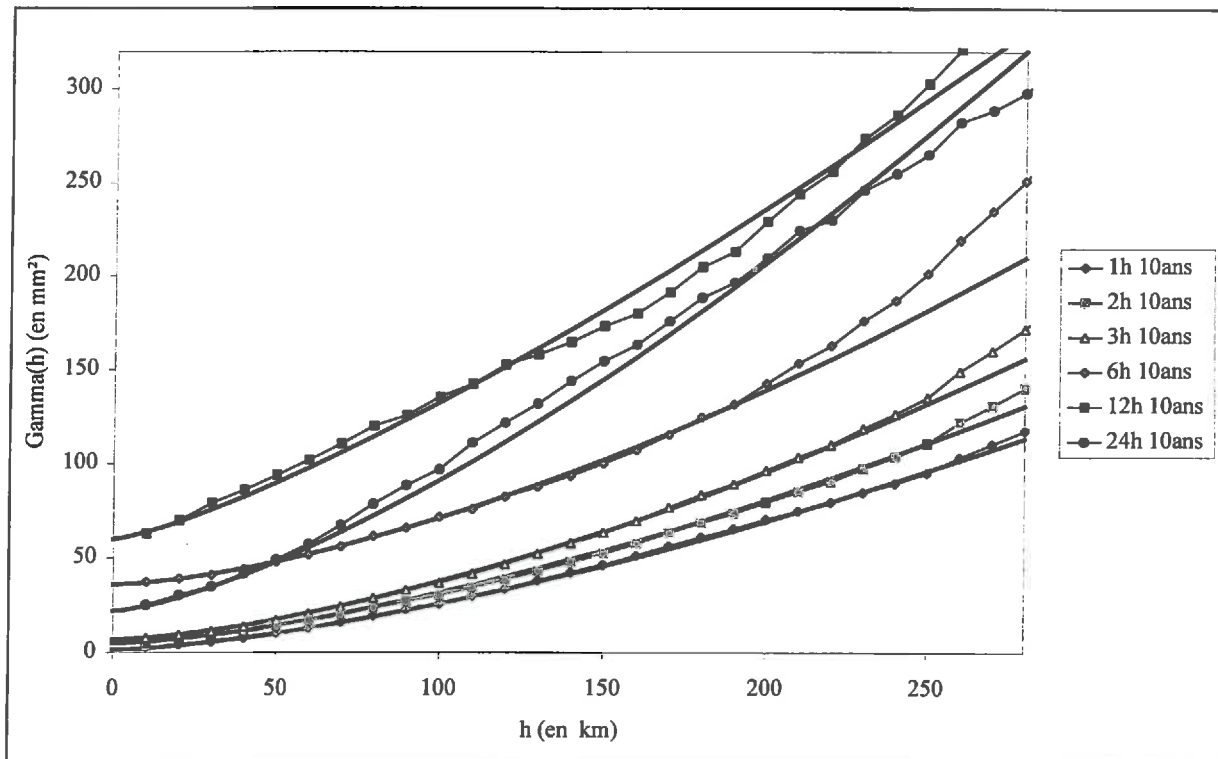
- pour les pluies décennales, c'est le cas quelle que soit la distance,

- pour les pluies centennales et les gradex, c'est vrai jusqu'à des distances d'environ 130 km et 100 km respectivement.

De plus, le variogramme à 24 h a des valeurs plus faibles que celui à 6 h, jusqu'à des distances d'environ 50 km.

En fait, nous avons vu que ces pas de temps (12 h, 24 h) étaient mal expliqués par la régression linéaire multiple avec le relief, ce qui est une explication plausible de ce problème.

En ce qui concerne les modèles ajustés, pour une durée donnée, seul le palier du phénomène est différent d'une variable à l'autre. Par exemple, pour 1 h, les modèles puissance ajustés ont tous un  $\lambda$  de 1.492, mais le palier pour les pluies décennales est de  $0.025 \text{ mm}^2$ , celui des pluies centennales est de  $0.063 \text{ mm}^2$  et celui des gradex est de  $0.0015 \text{ mm}^2$  (cf. Tableau V 1 et Tableau V 2).



*Figure V 1 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des estimées des pluies décennales par le relief pour les différents pas de temps*

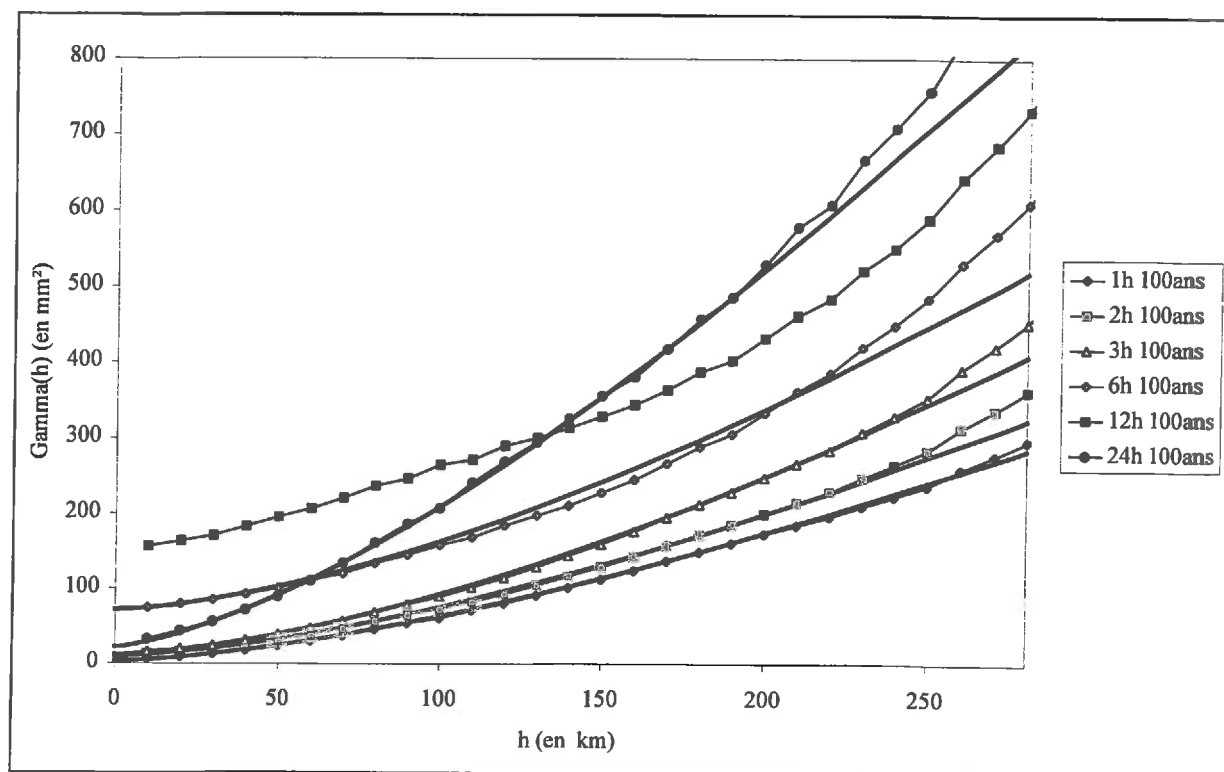


Figure V 2 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des estimées des pluies centennales par le relief pour les différents pas de temps

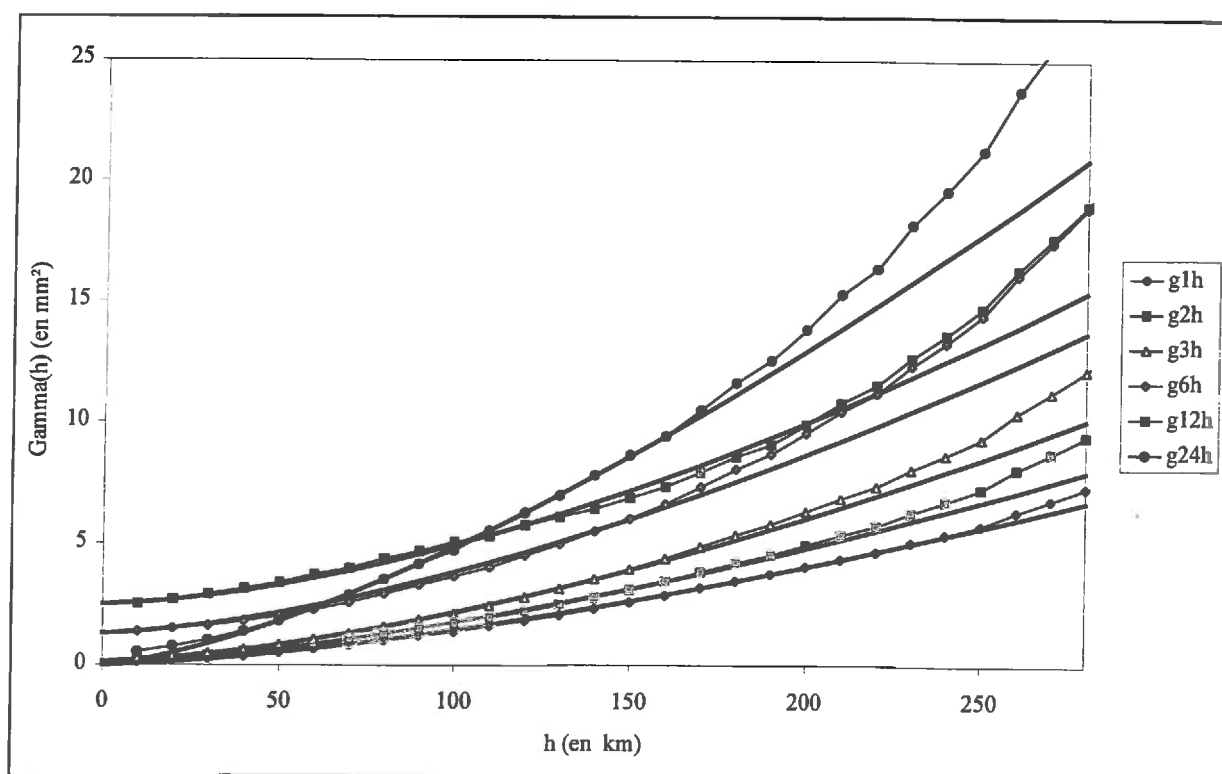


Figure V 3 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des estimées des gradex par le relief pour les différents pas de temps

|                             | T=10 ans |       |       |       |       |       | T=100 ans |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pas de temps                | 1 h      | 2 h   | 3 h   | 6 h   | 12 h  | 24 h  | 1 h       | 2 h   | 3 h   | 6 h   | 12 h  | 24 h  |
| Pépité (mm <sup>2</sup> )   | 1.5      | 5     | 7     | 36    | 60    | 22    | 3         | 10    | 12    | 72    | 140   | 22    |
| $\lambda$                   | 1.492    | 1.52  | 1.55  | 1.55  | 1.28  | 1.42  | 1.492     | 1.52  | 1.55  | 1.55  | 1.28  | 1.42  |
| Palier (mm <sup>2</sup> )   | 0.025    | 0.024 | 0.024 | 0.028 | 0.2   | 0.1   | 0.063     | 0.060 | 0.064 | 0.72  | 0.3   | 0.27  |
| Variance (mm <sup>2</sup> ) | 74.3     | 88.8  | 108.7 | 166.3 | 249.4 | 208.8 | 185.6     | 227.7 | 283.7 | 397.7 | 508.3 | 609.1 |

*Tableau V 1 : Caractéristiques des variogrammes des estimées des pluies décennales et centennales par régression linéaire multiple avec le relief (modèles puissances)*

|                             | Gradex |        |        |       |        |       |
|-----------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Pas de temps                | 1 h    | 2 h    | 3 h    | 6 h   | 12 h   | 24 h  |
| Pépité (mm <sup>2</sup> )   | 0      | 0.1    | 0.15   | 1.3   | 2.5    | 0     |
| $\lambda$                   | 1.492  | 1.52   | 1.55   | 1.55  | 1.62   | 1.42  |
| Palier (mm <sup>2</sup> )   | 0.0015 | 0.0015 | 0.0016 | 0.002 | 0.0014 | 0.007 |
| Variance (mm <sup>2</sup> ) | 4.5    | 5.9    | 7.5    | 11.9  | 12.4   | 17.2  |

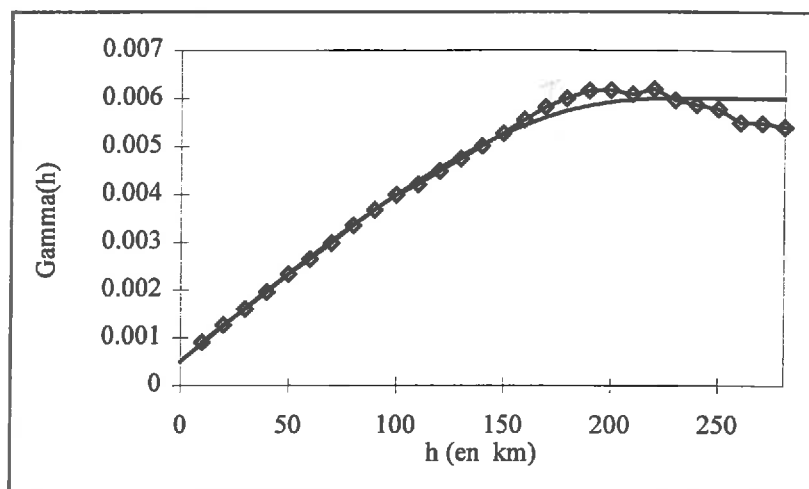
*Tableau V 2 : Caractéristiques des variogrammes des estimées des gradex par régression linéaire multiple avec le relief (modèles puissances)*

#### V.2.1.1.2.Coefficient de Montana

Le variogramme expérimental de l'estimée du coefficient de Montana par le relief a une allure sphérique pépitique (cf. Figure V 4). Le variogramme de la variable brute avait une allure exponentielle pépitique. Cependant, la portée, assez importante (220 km), est bien plus grande que celle du coefficient de Montana (portée de 20 km pour un modèle exponentiel, il faut donc comparer 3×20 km à la portée d'un modèle sphérique, cf. chapitre III, Figure III 3).

|                  | Pépite | Portée (km) | Palier | Variance |
|------------------|--------|-------------|--------|----------|
| Modèle sphérique | 0.0005 | 220         | 0.0055 | 0.0049   |

*Tableau V 3 : Caractéristiques du variogramme des estimées du coefficient de Montana par régression linéaire multiple avec le relief*



*Figure V 4 : Variogrammes expérimental et théorique des estimées du coefficient de Montana par le relief*

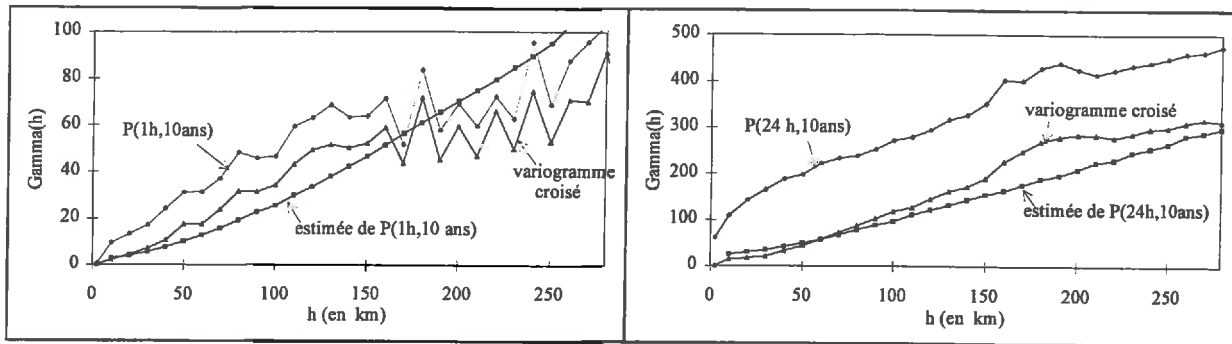
#### V.2.1.2. Variogrammes croisés des pluies et des estimées des pluies par le relief

##### V.2.1.2.1. Pluies décennales, centennales et gradex

L'allure des différents variogrammes croisés est une combinaison des allures sphériques des variogrammes des variables brutes et des allures puissances des variogrammes des estimées des variables par le relief (cf. Figure V 5) :

- pour les faibles distances, le comportement parabolique à l'origine (dérivée nulle pour  $h=0$ , sauf à 12 h) est plutôt influencé par l'allure puissance des variables auxiliaires,
- pour les distances plus grandes, les allures sont similaires à celles des variogrammes des pluies brutes.

Ainsi, comme pour les variables brutes, plus la durée augmente, plus l'allure des variogrammes croisés est linéaire.



*Figure V 5 : Représentation des variogrammes des pluies brutes, des estimées des pluies grâce au relief et des variogrammes croisés pour les pluies horaires décennales  $P(1\text{ h}, 10\text{ans})$  et les pluies journalières décennales  $P(24\text{ h}, 10\text{ans})$  ( $\text{Gamma}(h)$  en  $\text{mm}^2$  et  $h$  en km)*

Jusqu'au pas de temps de 3 h, les différents variogrammes croisés ont des allures gaussiennes. A 12 h, par contre l'ajustement d'un modèle sphérique est plus approprié, vu l'allure à l'origine. Enfin, comme pour les pluies brutes, le variogramme croisé à 24 h est ajusté par un modèle puissance.

D'autre part, l'ajustement des variogrammes croisés est soumis à la condition de Cauchy-Schwarz. Cette contrainte nous a conduit à choisir des paliers parfois plus faibles que ceux qu'on aurait choisi normalement.

Pour une durée donnée, seul le palier du modèle ajusté est différent d'une variable à l'autre. Par exemple, pour 1 h, les modèles puissances ajustés ont tous une portée de 110 km, mais le palier pour les pluies décennales est de  $61\text{ mm}^2$ , celui des pluies centennales est de  $150\text{ mm}^2$  et celui des gradex est de  $3.4\text{ mm}^2$ . Notons aussi que les portées sont beaucoup plus élevées que celles des variables brutes.



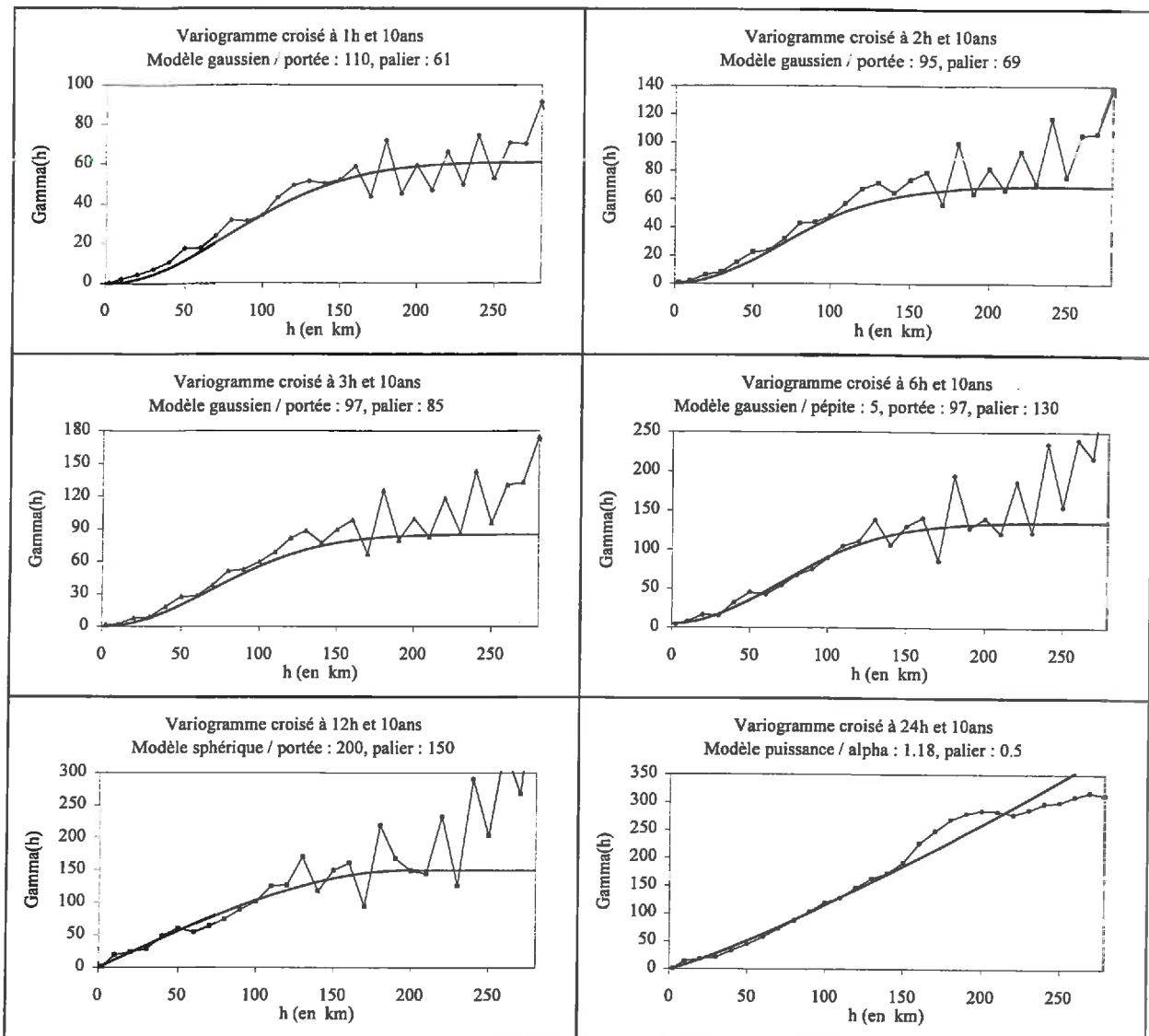


Figure V 6 : Variogrammes croisés expérimentaux et théoriques pour les pluies décennales et de leurs estimées par le relief pour les différents pas de temps ( $\Gamma(h)$  en  $\text{mm}^2$  et  $h$  en km)

| Pas de temps             | 1 h      | 2 h | 3 h | 6 h | 12 h      | 24 h      |
|--------------------------|----------|-----|-----|-----|-----------|-----------|
| Type de modèle           | Gaussien |     |     |     | sphérique | puissance |
| Pépité ( $\text{mm}^2$ ) | 0        | 0   | 0   | 5   | 0         | 0         |
| Portée (km)              | 110      | 95  | 97  | 97  | 200       | 1.18      |
| Palier ( $\text{mm}^2$ ) | 61       | 69  | 85  | 130 | 150       | 0.5       |

Tableau V 4 : Caractéristiques des variogrammes croisés des pluies décennales et de leurs estimées par le relief

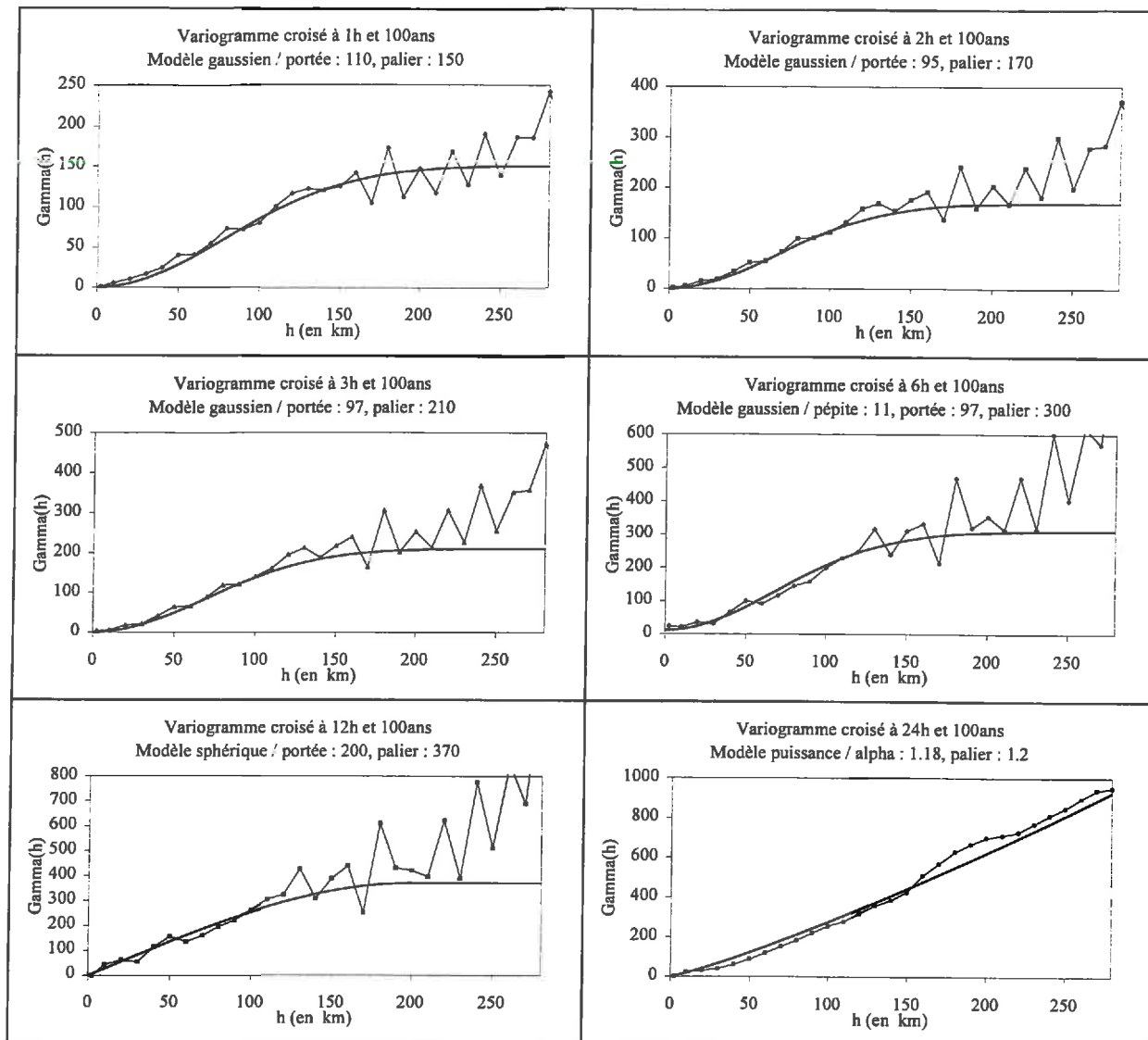


Figure V 7 : Variogrammes croisés expérimentaux et théoriques des pluies centennales et de leurs estimées par le relief pour les différents pas de temps (Gamma(h) en mm² et h en km)

| Pas de temps   | 1 h      | 2 h | 3 h | 6 h | 12 h      | 24 h      |
|----------------|----------|-----|-----|-----|-----------|-----------|
| Type de modèle | Gaussien |     |     |     | sphérique | puissance |
| Pépité (mm²)   | 0        | 0   | 0   | 11  | 0         | 0         |
| Portée (km)    | 110      | 95  | 97  | 97  | 200       | 1.18      |
| Palier (mm²)   | 150      | 170 | 210 | 300 | 370       | 1.2       |

Tableau V 5 : Caractéristiques des variogrammes croisés des pluies centennales et de leurs estimées par le relief

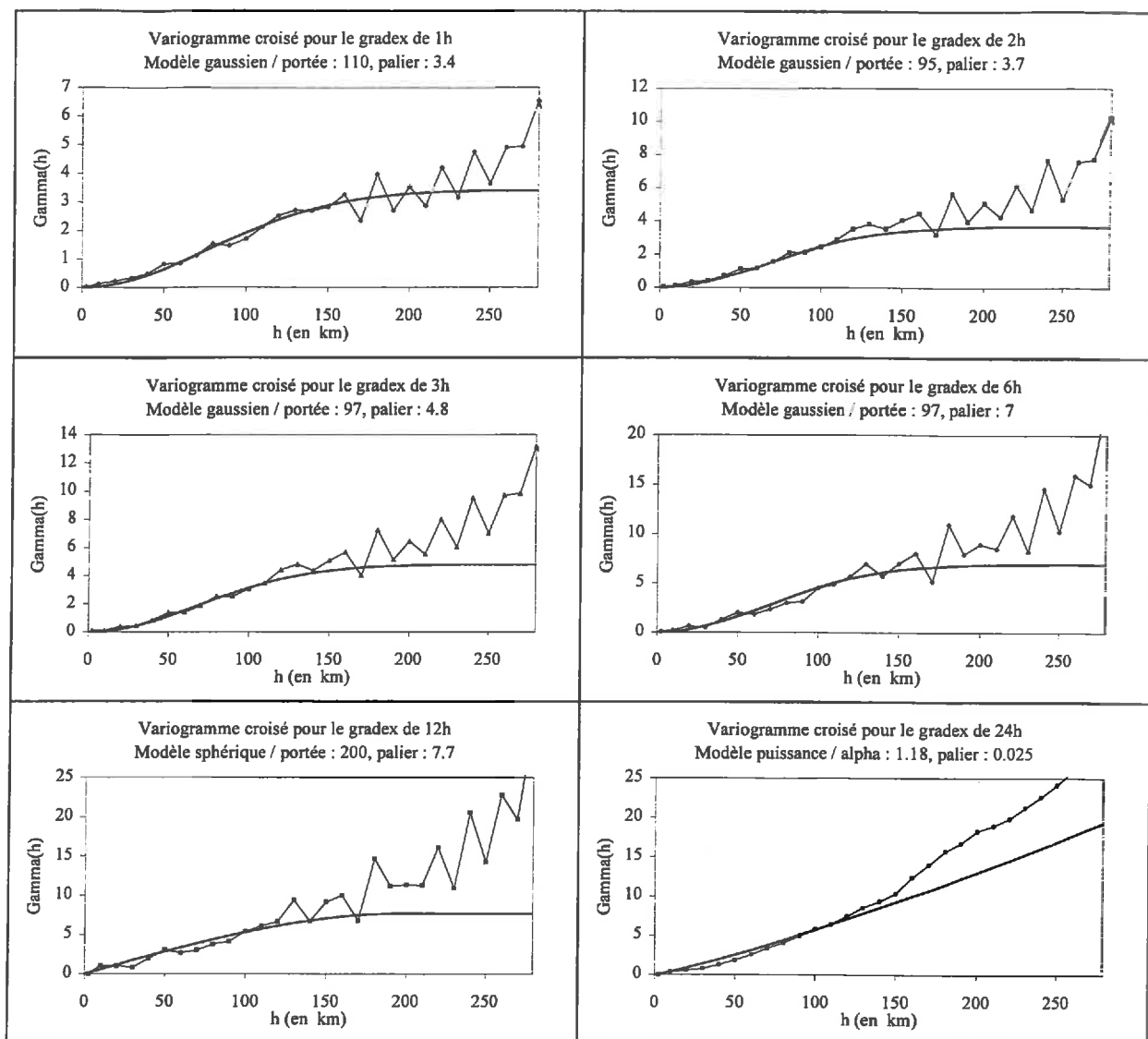


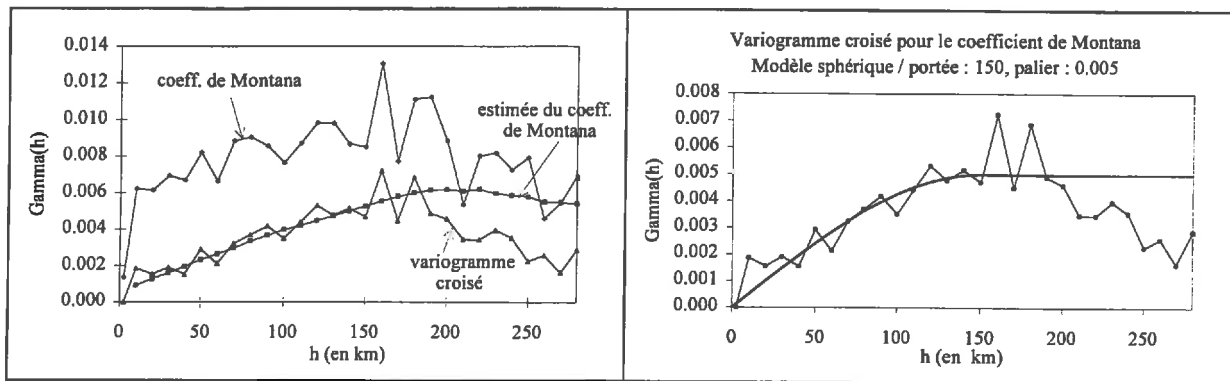
Figure V 8 : Variogrammes croisés expérimentaux et théoriques des gradex et de leurs estimées par le relief pour les différents pas de temps (Gamma(h) en  $\text{mm}^2$  et h en km)

| Pas de temps             | 1 h      | 2 h | 3 h | 6 h | 12 h      | 24 h      |
|--------------------------|----------|-----|-----|-----|-----------|-----------|
| Type de modèle           | Gaussien |     |     |     | sphérique | puissance |
| Pépite ( $\text{mm}^2$ ) | 0        | 0   | 0   | 0   | 0         | 0         |
| Portée (km)              | 110      | 95  | 97  | 97  | 200       | 1.18      |
| Palier ( $\text{mm}^2$ ) | 3.4      | 3.7 | 4.8 | 7   | 7.7       | 0.025     |

Tableau V 6 : Caractéristiques des variogrammes croisés des gradex et de leurs estimées par le relief

### V.2.1.2.2. Coefficient de Montana

Le variogramme croisé pour le coefficient de Montana a une allure sphérique (cf. Figure V 9). Sa portée, de 150 km, est intermédiaire entre celles des variogrammes "directs" ( $3 \times 20$  km et 220 km).



*Figure V 9 : Représentation des variogrammes des coefficients de Montana, de leurs estimées grâce au relief et du variogrammes croisé (à gauche) - Variogrammes croisés expérimental et théorique des coefficients de Montana et de leurs estimées par le relief (à droite)*

|                  | Pépite | Portée (km) | Palier |
|------------------|--------|-------------|--------|
| Modèle sphérique | 0      | 150         | 0.005  |

*Tableau V 7 : Caractéristiques du variogramme croisé des coefficients de Montana et de leurs estimées par le relief*

### V.2.2. Conclusion : application du cokrigage

Finalement, les variogrammes des variables auxiliaires et les variogrammes croisés ont pu être modélisés par des variogrammes classiques, tout en respectant la condition de Cauchy-Schwarz. D'autre part, les portées des différents phénomènes sont telles que, comme pour les variables brutes, un nombre suffisant de stations est à « portée » d'un point quelconque à interpoler. Il y a peu de zones hors de portée des stations et par conséquent, l'interpolation et la cartographie par cokrigage sont possibles.

A partir des différents variogrammes évalués précédemment, le cokrigage est appliqué en utilisant les 10 plus proches voisins pour la variable à cartographier et la variable auxiliaire ("voisinage glissant"). Des exemples de cartes obtenues par cette méthode sont présentés au paragraphe suivant.

### **V.3.Cartes des différents champs pluviométriques obtenues par cokrigage avec le relief**

Les Figure V 10, Figure V 11 et Figure V 12 donnent les exemples des cartes des pluies décennales obtenues par cokrigage avec le relief et les cartes des écarts type de l'erreur d'estimation associées. Les cartes de pluies centennales et de gradex présentent les mêmes caractéristiques que celles des pluies de temps de retour 10 ans. De plus, la Figure V 13 représente la cartographie du coefficient de Montana.

#### **V.3.1.Pluies décennales**

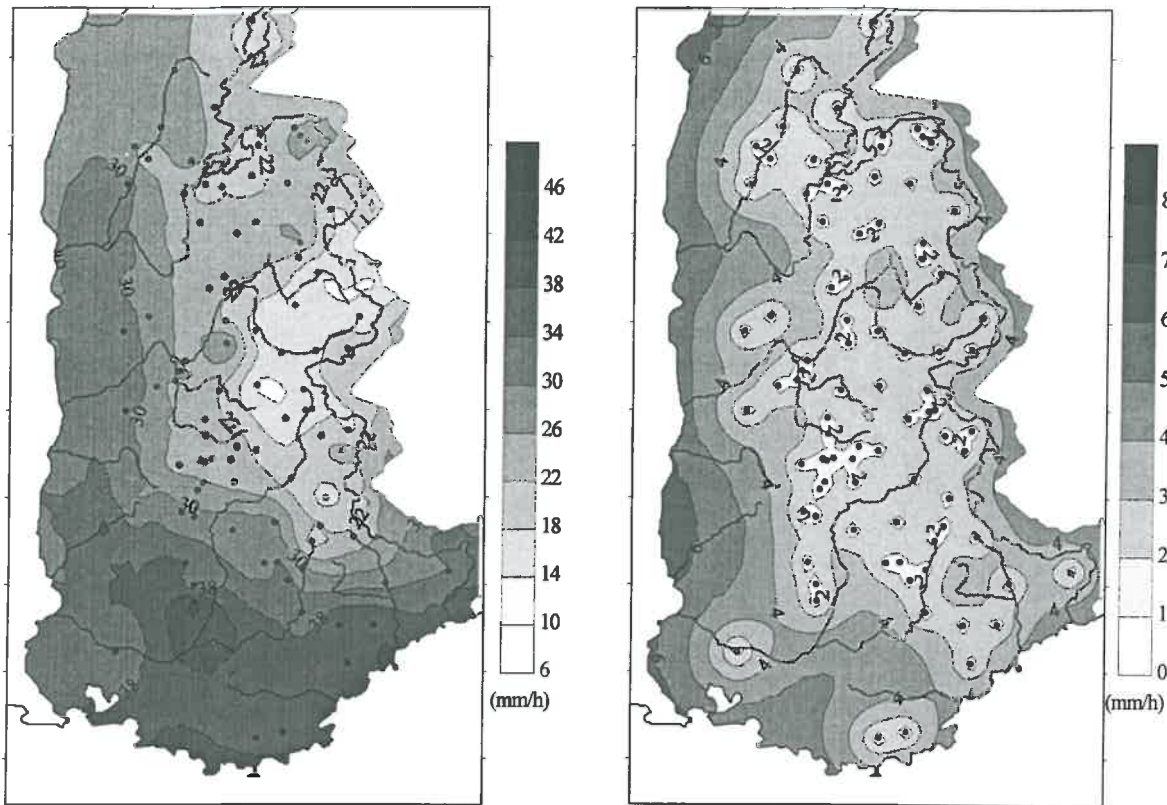
De manière générale, on retrouve toujours les mêmes caractéristiques pour la répartition spatiale des précipitations extrêmes. Les cartes sont relativement simples pour les courts pas de temps :

- effet d'abri croissant lorsqu'on pénètre à l'intérieur du massif alpin, avec une zone de plus faibles précipitations au centre des Alpes (de la Tarentaise au Nord du Briançonnais),
- zone de fortes précipitations au Sud Est (Var et Alpes Maritimes).

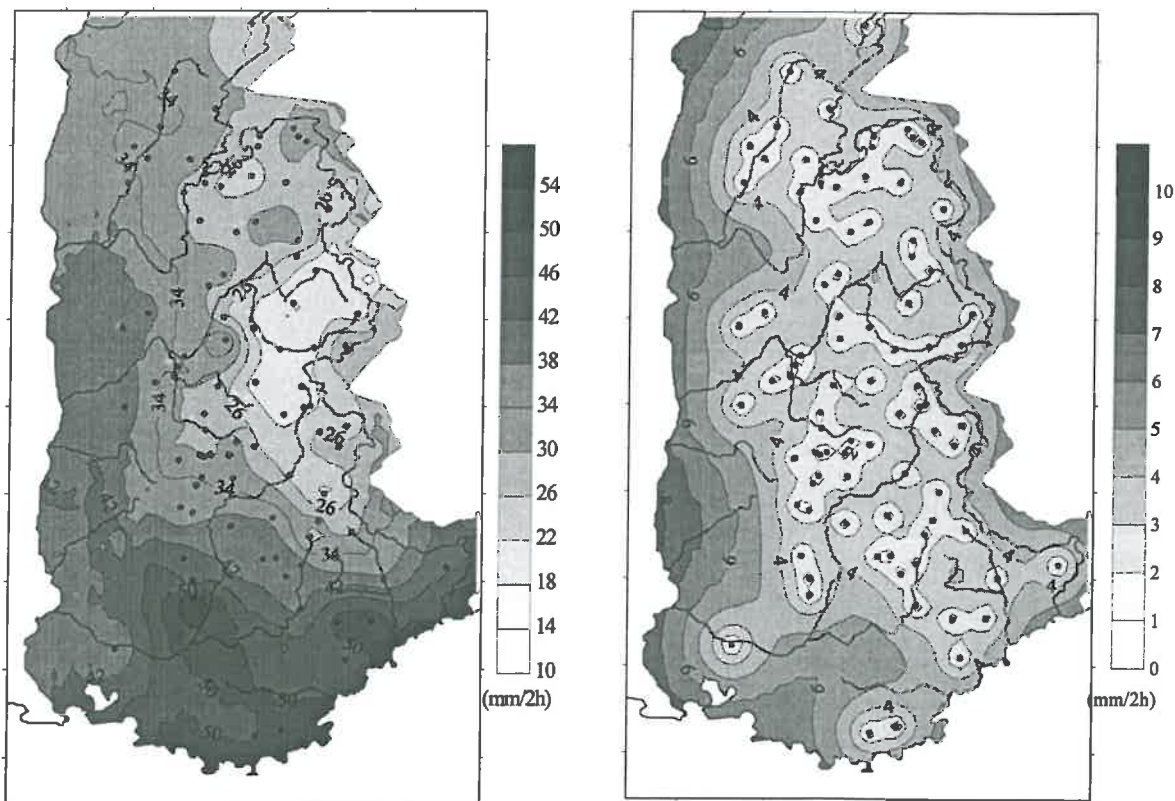
A 24 h, les zones de précipitations les plus élevées sont situées sur certains massifs montagneux : Jura, Chartreuse, Dévoluy et Baronnies.

La comparaison de ces cartes avec celles obtenues par krigeage montre qu'elles sont légèrement plus chahutées, ce qui est dû à l'introduction du relief. Mais on observe surtout une diminution des écarts type de l'erreur d'estimation. Cependant, ces cartes sont moins influencées par le relief que celles obtenues au chapitre IV.

Pluies de 1 h et 10ans



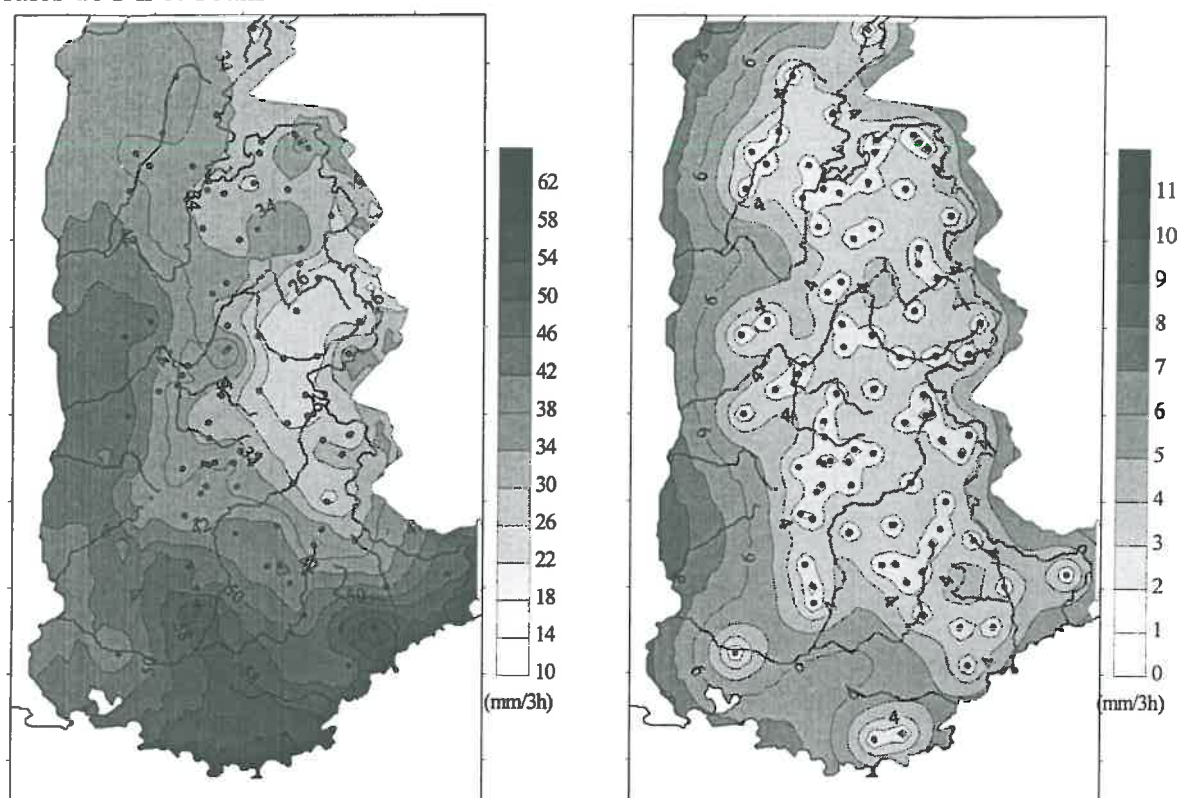
Pluies de 2 h et 10ans



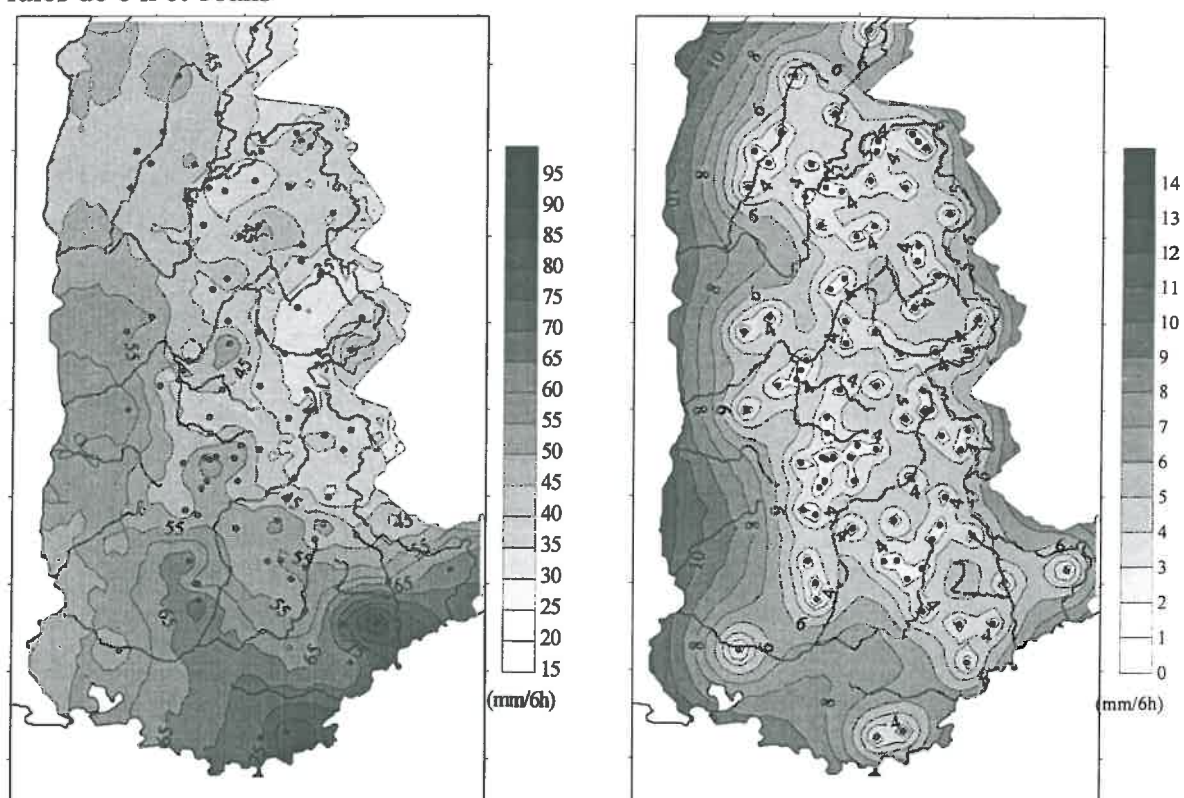
**Figure V 10 :** Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par cokrigage avec le relief : pluies de 1 h et 2 h et 10ans (pas de calcul : 5.25 km)



Pluies de 3 h et 10ans

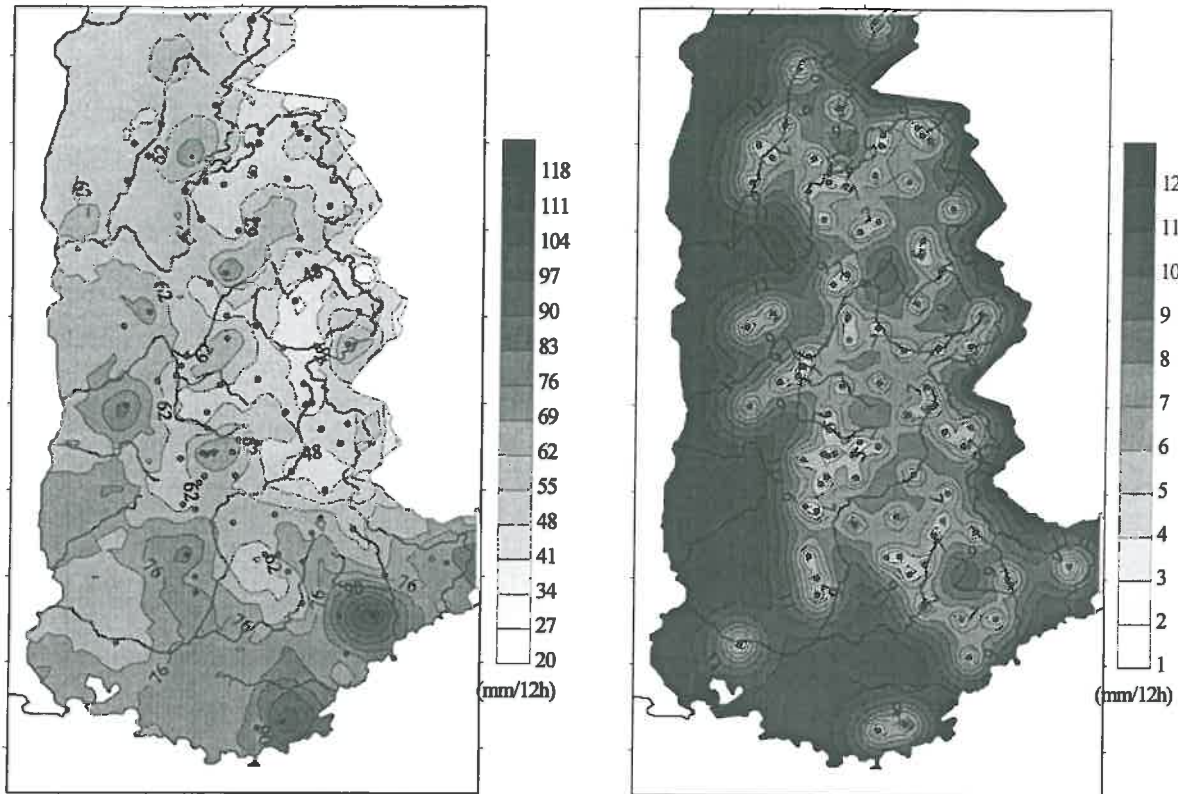


Pluies de 6 h et 10ans

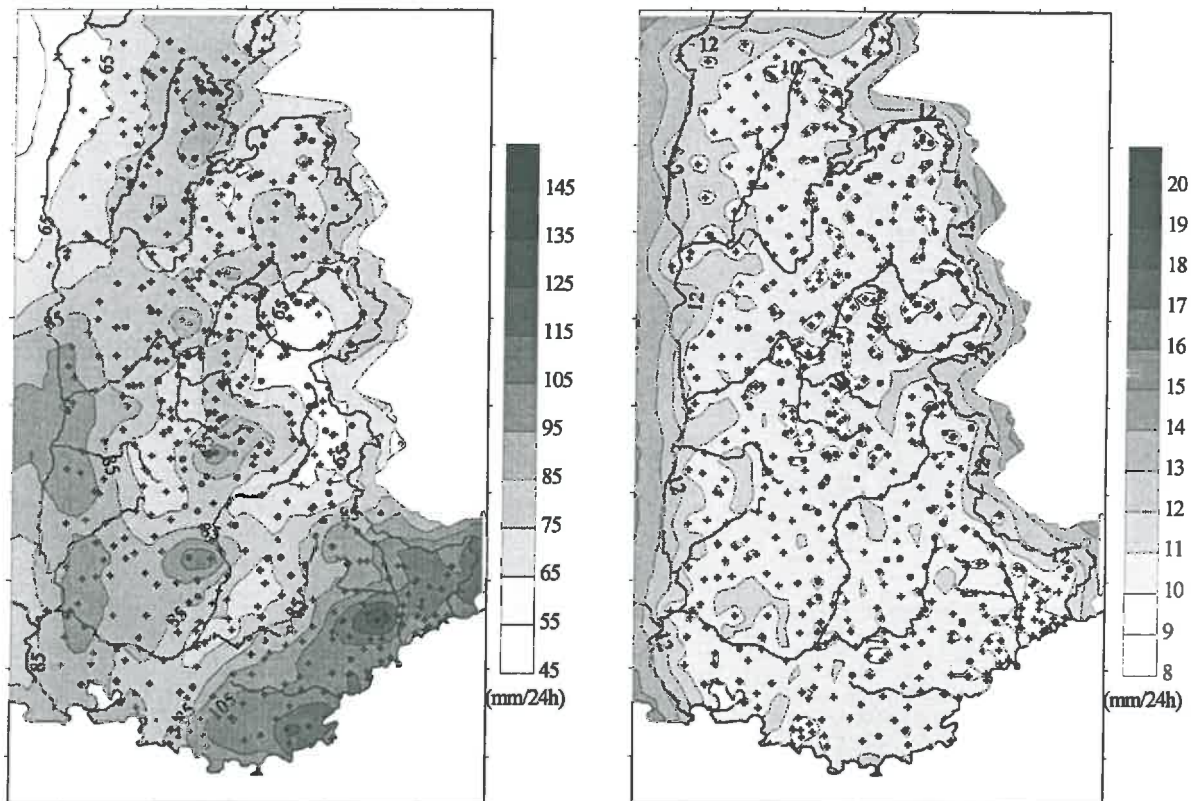


**Figure V 11 :** Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par cokrigage avec le relief : pluies de 3 h et 6 h et 10ans (pas de calcul : 5.25 km)

Pluies de 12 h et 10ans



Pluies de 24 h et 10ans



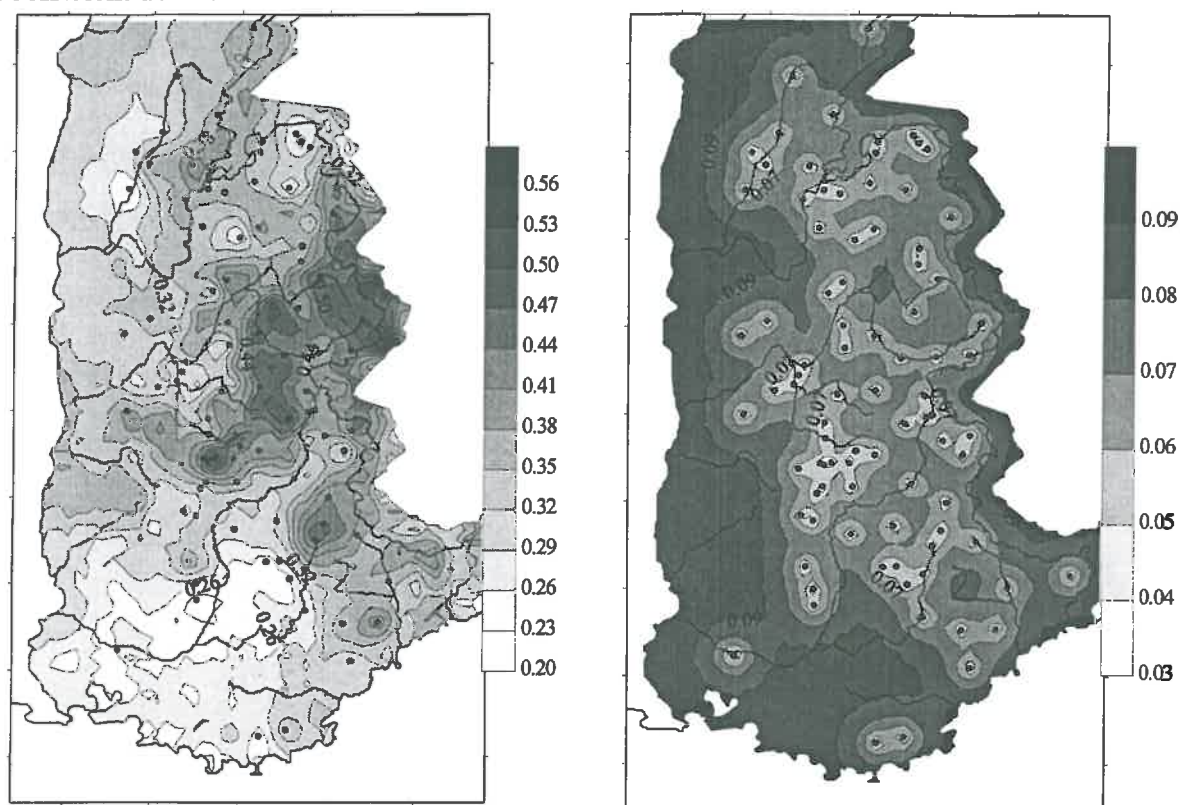
*Figure V 12 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par cokrigage avec le relief : pluies de 12 h et 24 h et 10ans (pas de calcul : 5.25 km)*



### V.3.2. Coefficient de Montana

Les cartes correspondant au coefficient de Montana mettent en évidence une répartition spatiale des coefficients "inverse" de celle des champs de pluies décennales : valeurs élevées au centre des Alpes et valeurs faibles dans l'ensemble des Pré-Alpes.

Coefficient de Montana



*Figure V 13 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par cokrigage avec le relief : coefficient de Montana (pas de calcul : 5.25 km)*

## **V.4.Conclusion**

Dans cette partie, nous avons étudié la possibilité d'interpoler par cokrigeage un champ pluviométrique à partir de la connaissance de celui-ci et d'une variable auxiliaire très liée : l'estimée de la variable par régression linéaire multiple grâce au relief.

Outre les données de la variable à cartographier et de la variable auxiliaire en un certain nombre de points, le système de cokrigeage nécessite la connaissance de la structure spatiale de la variable auxiliaire et de la co-fluctuation des deux variables, par le biais du variogramme croisé. C'est donc pour chaque paramètre pluviométrique, pluies décennales, centennales, gradex et coefficient de Montana, que le variogramme de la variable auxiliaire et le variogramme croisé correspondants ont été modélisés.

Enfin, les cartes obtenues montrent toujours les mêmes répartitions spatiales des différents paramètres. Elles sont plus chahutées que celles obtenues par krigeage, mais reflètent moins le relief que celles obtenues par la méthode du chapitre IV.



## CHAPITRE VI

# UTILISATION DE L'INFORMATION AU PAS DE TEMPS DE LA JOURNEE POUR L'AMELIORATION DE LA CARTOGRAPHIE



L'information pluviométrique disponible au pas de temps de la journée est beaucoup plus dense que l'information à pas de temps court : 463 pluviomètres, appareils de mesure au pas de temps de la journée, s'ajoutent aux 90 pluviographes, appareils de mesure à pas de temps fin. Les champs de pluies extrêmes sont donc mieux connus à **24 h**. Ainsi, l'idée consiste à prendre en compte une information à **24 h** dense pour l'interpolation de champs statistiques de pluies extrêmes à des pas de temps inférieurs à la journée.

D'abord, nous déterminerons l'existence de relations liant variables pluviométriques de pas de temps différents. En effet, les épisodes de pas de temps courts ne sont pas issus des mêmes situations météorologiques que les épisodes longs, les relations entre pas de temps différents ne sont donc pas évidentes a priori. Puis, quelques méthodes de cartographie, basées sur les relations éventuelles entre paramètres de pas de temps  $t$  et paramètres à **24 h**, seront passées en revue.

Dans un deuxième temps, nous étudierons deux méthodes de cartographie basées sur la répartition spatiale des champs d'extrêmes à **24 h** et n'intégrant pas directement l'information pluviométrique au pas de temps  $t$  dans le calcul. La première méthode est basée sur la loi de Montana, qui stipule que les pluies extrêmes sont fonction du pas de temps. Puis, une autre loi (LEBLOIS, 1997), exprimant les pluies extrêmes de durée  $t$  en fonction de celles à **1 h** et à **24 h**, sera utilisée.

Dans la suite,  $P(t)$  désigne une variable pluviométrique, pluies décennales, centennales ou gradex, de pas de temps  $t$ .

## **VI.1.Relations entre précipitations extrêmes journalières et précipitations extrêmes de durées inférieures à 24 h**

Avant de tenter d'intégrer l'information à 24 h dans la cartographie des champs à pas de temps courts, il faut d'abord s'interroger sur l'existence de relations entre un paramètre pluviométrique de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$  et ce même paramètre à **24 h**,  $P(24 h)$ . Les relations entre gradex journaliers et gradex de durées inférieures à 24 h ont déjà fait l'objet d'un article (KIEFFER et al., 1997). Cependant cette étude ne se basait que sur les 65 pluviographes alors

disponibles (EDF DTG-CEMAGREF, 1995). Le but de ce paragraphe est donc de mettre à jour les résultats avec les données actuelles.

### **VI.1.1.Relations entre variables pluviométriques de pas de temps différents**

On cherche à lier un paramètre pluviométrique de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , (par exemple la pluie décennale horaire) au même paramètre pluviométrique, mais de pas de temps  $t'$  différent,  $P(t')$  (par exemple, la pluie décennale de 2 h). Pour ce faire, différents types de relations simples entre les paramètres ont été testés :

$$\textcircled{1} \text{ relation linéaire : } P(t) = a \times P(t') + b \quad (VI - 1)$$

$$\textcircled{2} \text{ relation puissance : } P(t) = a \times P(t')^b \quad (VI - 2)$$

$$\textcircled{3} \text{ relation logarithmique : } P(t) = a \times \ln[P(t')] + b \quad (VI - 3)$$

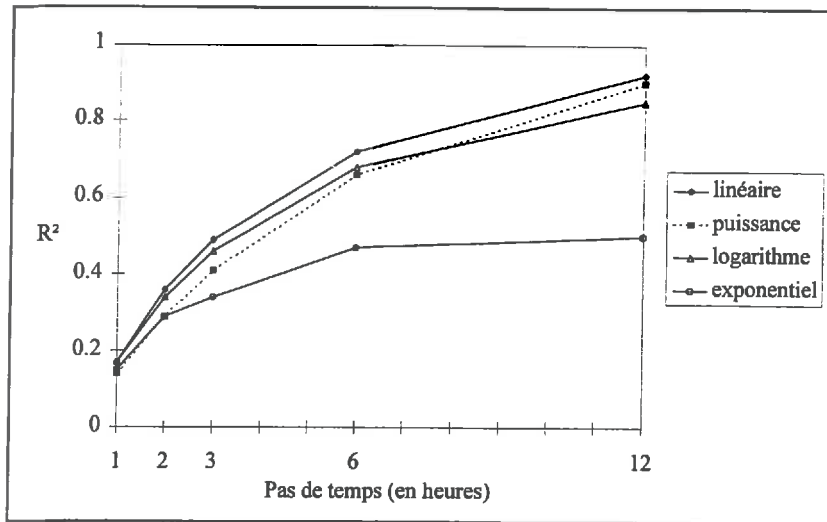
$$\textcircled{4} \text{ relation exponentielle : } P(t) = a \times \exp[P(t')] + b \quad (VI - 4)$$

Quel que soit le paramètre pluviométrique (pluie décennale, centennale ou gradex), nous avons trouvé que la relation linéaire est la plus pertinente pour lier  $P(t)$  et  $P(t')$ .

La Figure VI 1 donne l'exemple des résultats pour les liaisons entre gradex de pas de temps  $t$  et gradex **journalier** ( $t'=24$  h). L'évolution du coefficient de détermination  $R^2$  pour les 4 relations testées est représentée en fonction de  $t$ .

Les relations linéaire, puissance et logarithme ont des performances à peu près similaires pour tous les pas de temps, la relation linéaire étant toujours la meilleure. Pour des durées supérieures à 3 h, le modèle exponentiel est nettement moins bon que les autres.

Nous pouvons déjà constater que plus le pas de temps  $t$  augmente, donc devient proche de 24 h, meilleurs sont les pourcentages de variance expliquée.



**Figure VI 1 :** Evolution du coefficient de détermination  $R^2$  en fonction du pas de temps  $t$  pour différentes relations entre les gradex de pas de temps  $t$  et les gradex journaliers [statistiques sur 65 pluviographes] (extrait KIEFFER et al., 1997)

La relation linéaire ayant été retenue, nous avons évalué les coefficients de détermination  $R^2$  entre les variables de différents pas de temps avec le jeu de données actuel, constitué de 90 pluviographes.

Pour les trois paramètres pluviométriques étudiés : pluies décennales, centennales et gradex, les résultats sont équivalents (cf. exemple des pluies décennales, Tableau VI 1) : les pas de temps voisins sont bien corrélés entre eux et plus les pas de temps sont distincts, moins les relations linéaires sont bonnes.

| Pluies décennales |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| 1 h               | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h | 24 h |      |
| 1                 | 0.96 | 0.92 | 0.75 | 0.56 | 0.37 | 1 h  |
|                   | 1    | 0.97 | 0.84 | 0.66 | 0.46 | 2 h  |
|                   |      | 1    | 0.91 | 0.75 | 0.54 | 3 h  |
|                   |      |      | 1    | 0.92 | 0.77 | 6 h  |
|                   |      |      |      | 1    | 0.92 | 12 h |
|                   |      |      |      |      | 1    | 24 h |

**Tableau VI 1 :** Coefficients de détermination  $R^2$  entre les pluies décennales des différents pas de temps [statistiques sur 90 pluviographes]



En particulier, les paramètres pluviométriques de pas de temps faibles (1 h, 2 h, 3 h) sont mal corrélés avec ceux de 24 h. Par exemple, les pourcentages de variance expliquée sont compris entre 37 et 54 % pour les pluies décennales. Par contre, les pas de temps de 6 h et 12 h sont bien corrélés avec celui de 24 h, puisque les pourcentages de variance expliquée valent respectivement 77 et 92 % (exemple des pluies décennales).

### **VI.1.2.Relations linéaires simples entre précipitations extrêmes journalières et précipitations extrêmes de durées inférieures à 24 h**

Par régression linéaire simple, nous pouvons estimer une variable pluviométrique de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , en fonction de cette variable à 24 h,  $P(24\text{ h})$ , tout en sachant que les pas de temps faibles sont moins bien expliqués que ceux supérieurs à 6 h par l'information journalière. Pour les pluies décennales, centennales et les gradex, les équations de régression sont données dans les Tableau VI 2, Tableau VI 3 et Tableau VI 4.

Pour un pas de temps donné, les pourcentages de variance expliquée sont équivalents pour les pluies décennales, centennales et les gradex. Par exemple, la variable à 24 h explique 37 % de la variance des pluies décennales horaires, 38 % dans les cas des pluies centennales horaires et 39 % pour les gradex horaires. De plus, les coefficients de régression sont les mêmes pour une durée donnée et les trois variables ; c'est la constante de régression qui change d'une variable à l'autre.

### **VI.1.3.Conclusion**

Finalement, nous avons mis en évidence des relations simples liant les paramètres pluviométriques de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , aux paramètres à 24 h,  $P(24\text{ h})$  : ce sont des relations linéaires. Les durées proches de 24 h, c'est-à-dire supérieures à 6 h sont bien expliquées par l'information journalière. Ainsi, dans la suite, nous nous appuyerons sur ces constations pour améliorer l'estimation des précipitations extrêmes, de pas de temps inférieur à la journée, en un point non mesuré grâce à l'information à 24 h, plus dense que l'information pluviographique.

| Equation de régression simple                                                         | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| $P(1 \text{ h}, 10 \text{ ans}) = 0.21 \times P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans}) + 9.2$  | 0.37           |
| $P(2 \text{ h}, 10 \text{ ans}) = 0.27 \times P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans}) + 10.4$ | 0.46           |
| $P(3 \text{ h}, 10 \text{ ans}) = 0.33 \times P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans}) + 10.9$ | 0.54           |
| $P(6 \text{ h}, 10 \text{ ans}) = 0.50 \times P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans}) + 7.7$  | 0.77           |
| $P(12 \text{ h}, 10 \text{ ans}) = 0.67 \times P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans}) + 8.4$ | 0.92           |

*Tableau VI 2 : Régression linéaire simple - résultats finaux pour les pluies décennales  
(variable expliquée :  $P(t, 10 \text{ ans})$ , variable explicative :  $P(24 \text{ h}, 10 \text{ ans})$ , valeurs en mm par  
pas de temps) [statistiques sur 90 pluviographes]*

| Equation de régression simple                                                            | R <sup>2</sup> |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| $P(1 \text{ h}, 100 \text{ ans}) = 0.21 \times P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans}) + 12.9$  | 0.38           |
| $P(2 \text{ h}, 100 \text{ ans}) = 0.28 \times P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans}) + 14.1$  | 0.46           |
| $P(3 \text{ h}, 100 \text{ ans}) = 0.34 \times P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans}) + 14.9$  | 0.54           |
| $P(6 \text{ h}, 100 \text{ ans}) = 0.51 \times P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans}) + 10.0$  | 0.77           |
| $P(12 \text{ h}, 100 \text{ ans}) = 0.67 \times P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans}) + 11.5$ | 0.92           |

*Tableau VI 3 : Régression linéaire simple - résultats finaux pour les pluies centennales  
(variable expliquée :  $P(t, 100 \text{ ans})$ , variable explicative :  $P(24 \text{ h}, 100 \text{ ans})$ , valeurs en mm par  
pas de temps) [statistiques sur 90 pluviographes]*

| Equation de régression simple                          | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------------|----------------|
| $g(1 \text{ h}) = 0.22 \times g(24 \text{ h}) + 1.61$  | 0.39           |
| $g(2 \text{ h}) = 0.29 \times g(24 \text{ h}) + 1.64$  | 0.47           |
| $g(3 \text{ h}) = 0.34 \times g(24 \text{ h}) + 1.74$  | 0.53           |
| $g(6 \text{ h}) = 0.51 \times g(24 \text{ h}) + 1.06$  | 0.75           |
| $g(12 \text{ h}) = 0.67 \times g(24 \text{ h}) + 1.38$ | 0.91           |

*Tableau VI 4 : Régression linéaire simple - résultats finaux pour les gradex (variable  
expliquée :  $g(t)$ , variable explicative :  $g(24 \text{ h})$ , valeurs en mm par pas de temps) [statistiques  
sur 90 pluviographes]*

## **VI.2.Cokrigage à pas de temps inférieur à la journée à l'aide de l'information à 24 h**

Une première façon d'intégrer l'information à **24 h** pour l'interpolation des champs de pluie de durée inférieure à la journée peut être d'utiliser le cokrigage (cf. chapitre V). La variable à interpoler est alors une variable pluviométrique (pluies décennales, centennales, ou gradex) de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ . La variable auxiliaire est cette même variable pluviométrique à **24 h**,  $P(24\text{ h})$ .

### **VI.2.1.Variabilité spatiale des différents paramètres**

Si on note  $P(t)$  la variable pluviométrique à interpoler, avec  $t$  inférieur à **24 h**, il faut étudier trois variogrammes pour pouvoir appliquer le cokrigage :

- 2 variogrammes "directs" : celui de la variable à interpoler  $P(t)$  et celui de la variable à **24 h**,  $P(24\text{ h})$ ,
- et un variogramme croisé, traduisant la cofluctuation spatiale de  $P(t)$  et  $P(24\text{ h})$ .

Les variogrammes "directs" ont déjà été modélisés au chapitre III. Pour les pas de temps inférieurs à la journée, nous avons retenu des variogrammes sphériques, et à 24 h, un modèle puissance pépitique. C'est donc l'étude des variogrammes croisés qui nous intéresse dans cette partie. Les points considérés pour évaluer ces variogrammes sont ceux où on connaît à la fois la variable à cartographier  $P(t)$ , et la variable auxiliaire  $P(24\text{ h})$ , c'est-à-dire aux 90 pluviographes.

De manière générale, les variogrammes croisés ont une allure similaire à celle de la variable brute  $P(t)$ . Ainsi, ils ont été ajustés par des modèles sphériques. Leurs portées sont équivalentes à celles des variables  $P(t)$ .

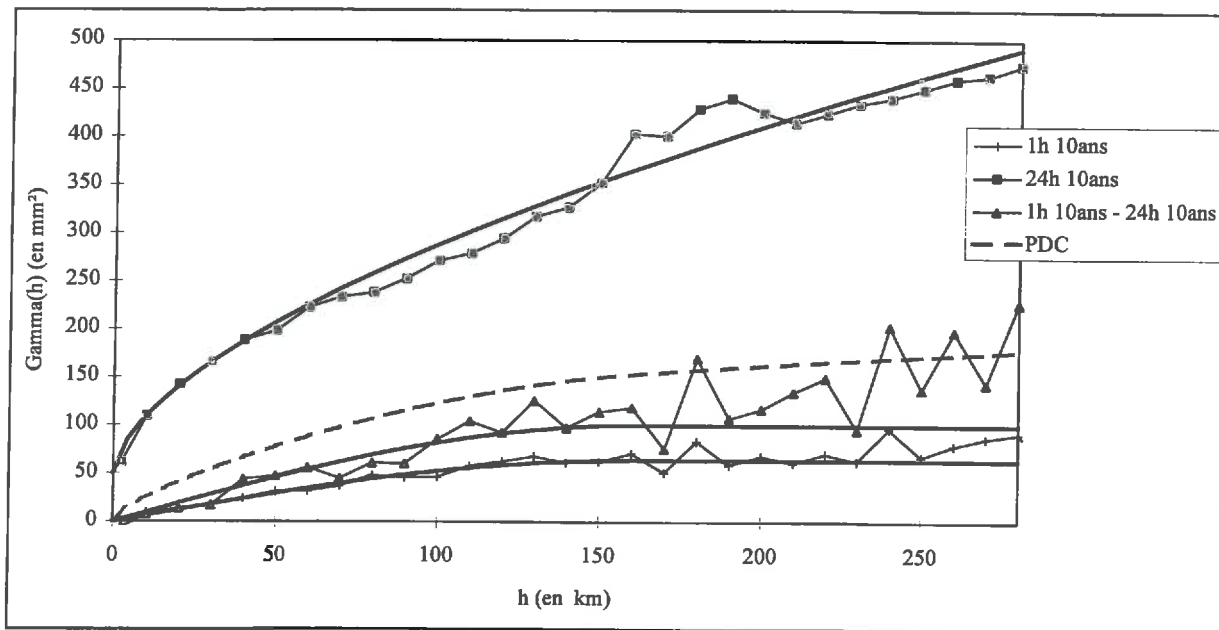
Pour les pas de temps de 1 h à 3 h, il n'y a pas de problème majeur pour la modélisation des variogrammes croisés, puisque ceux-ci respectent toujours la condition de Cauchy-Schwarz (cf. chapitre V) :

$$\gamma_{ij}(h) < \sqrt{\gamma_{ii}(h)\gamma_{jj}(h)} \quad (VI - 5)$$

où  $\gamma_{ij}(h)$  est le variogramme croisé des variables  $i$  et  $j$ ,

$\gamma_{ii}(h)$  et  $\gamma_{jj}(h)$  sont les variogrammes "directs" des variables  $i$  et  $j$ .

Si on note  $PDC = \sqrt{\gamma_{ii}(h)\gamma_{jj}(h)}$  (PDC : Positive Definite Condition), la condition (VI - 5) est vérifiée si la courbe représentant PDC est strictement supérieure à celle de  $\gamma_{ij}$  quelle que soit la distance  $h$ , ce qui est toujours le cas pour les pas de temps courts, c'est-à-dire, jusqu'à 3 h (cf. Figure VI 2, exemple des P(1 h, 10ans)).



*Figure VI 2 : Exemple des variogrammes expérimentaux et théoriques obtenus pour les pluies décennales horaires : variogrammes de P(24 h, 10 ans), de P(1 h, 10 ans), variogramme croisé et courbe PDC représentant la condition de Cauchy-Schwarz*

Pour le pas de temps de 6 h, la courbe représentant PDC est très proche du variogramme croisé expérimental (cf. Figure VI 3, exemple des P(6 h, 10ans)). Elle est même légèrement inférieure à ce variogramme jusqu'à une distance d'environ 60 km quelle que soit la variable (pluies décennales, centennales ou gradex).

Enfin, à 12 h, le variogramme croisé ne respecte jamais la condition de Cauchy-Schwarz, quelle que soit la distance considérée (cf. Figure VI 4, exemple de P(12 h, 10ans)).

Dans ces cas, les modèles ajustés aux variogrammes expérimentaux ne seront pas définis positifs (HEVESI et al., 1992). Ces « incohérences » peuvent s'expliquer par le faible nombre de stations connues pour évaluer les variogrammes.

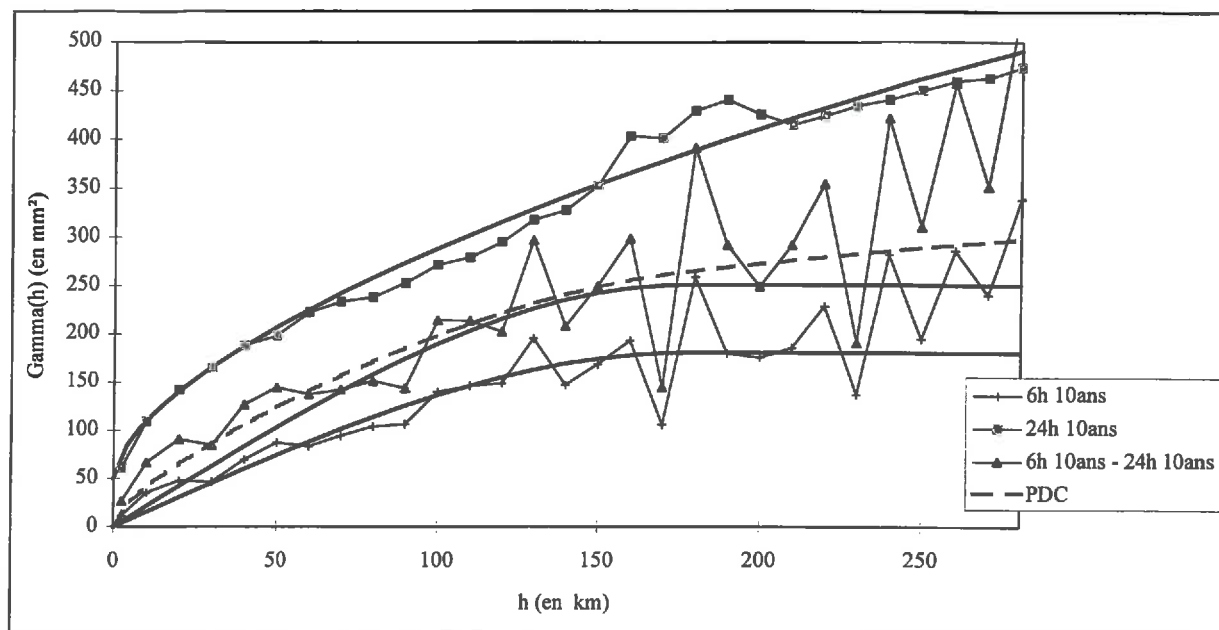


Figure VI 3 : Exemple des variogrammes expérimentaux et théoriques obtenus pour les pluies décennales de 6 h : variogrammes de  $P(24\text{ h}, 10\text{ ans})$ , de  $P(6\text{ h}, 10\text{ ans})$ , variogramme croisé et courbe PDC représentant la condition de Cauchy-Schwarz

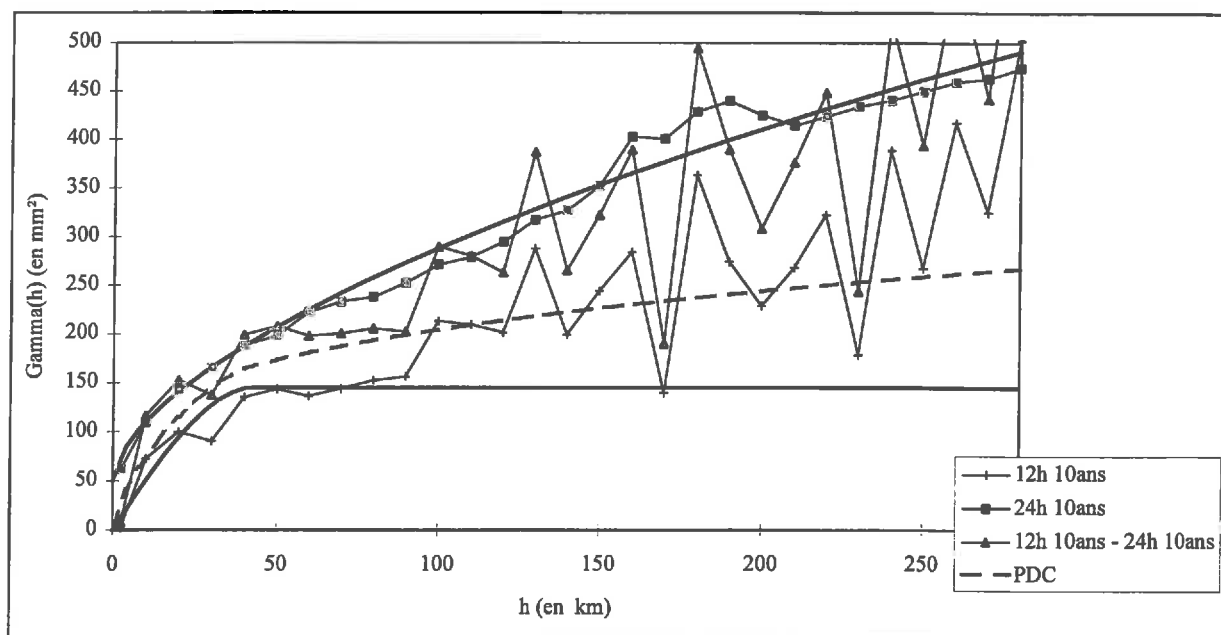


Figure VI 4 : Exemple des variogrammes expérimentaux et théoriques obtenus pour les pluies décennales de 12 h : variogrammes de  $P(24\text{ h}, 10\text{ ans})$ , de  $P(12\text{ h}, 10\text{ ans})$ , variogramme croisé et courbe PDC représentant la condition de Cauchy-Schwarz

Cependant, nous avons choisi de modéliser le variogramme croisé pour 6 h par un modèle sphérique qui ne respecte pas l'allure réelle à l'origine, mais respectant la condition de Cauchy-Schwarz, ce qui sous-estime le variogramme croisé jusqu'à environ 60 km (cf. Figure VI 6, Figure VI 7 et Figure VI 8). Cette modélisation ne conduit à aucun problème de calcul au niveau du cokrigage, et elle a donc été conservée, mais nous retenons qu'elle n'est pas tout à fait satisfaisante.

Par contre à 12 h, quelle que soit la méthode adoptée pour modéliser le variogramme croisé, des incohérences et problèmes de calculs apparaissent. En effet, la modélisation peut être faite :

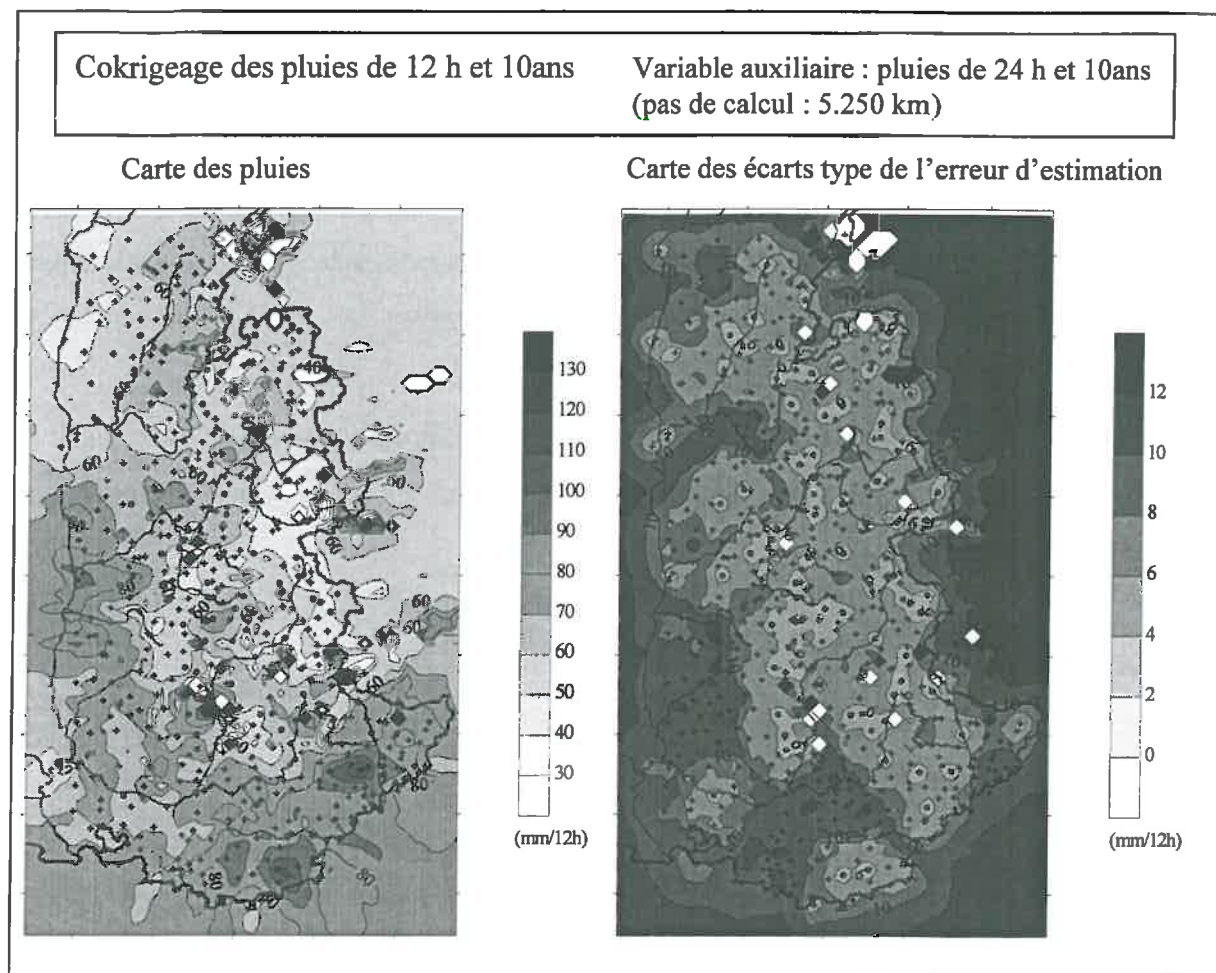
- soit sans tenir compte de la condition de Cauchy-Schwarz et en respectant l'allure du variogramme expérimental,
- soit en forçant le modèle à respecter la condition de Cauchy-Schwarz.

La Figure VI 5 donne l'exemple des cartes obtenues dans le deuxième cas. Les problèmes rencontrés sont les suivants :

- Les valeurs obtenues du champ sont parfois aberrantes : elles sortent de l'intervalle de valeurs que l'on peut envisager a priori. Sur la figure, les zones noires correspondent à des valeurs très fortes et les zones blanches à des valeurs négatives (!).
- De plus, les zones où les valeurs du champ sont aberrantes ont des écarts type aussi illogiques : des valeurs soit négatives, soit très fortes.

Ces essais nous ont conduit à abandonner définitivement le cokrigage des paramètres pluviométriques à 12 h à l'aide de ceux à 24 h.





**Figure VI 5 :** Cartes obtenues par cokrigage avec l'information à 24 h,  $P(24\text{ h}, 10\text{ans})$ , pour  $P(12\text{ h}, 10\text{ans})$  en « forçant » le variogramme croisé à respecter la condition de Cauchy-Schwarz (carte du champ (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite), pas de calcul : 5.25 km)

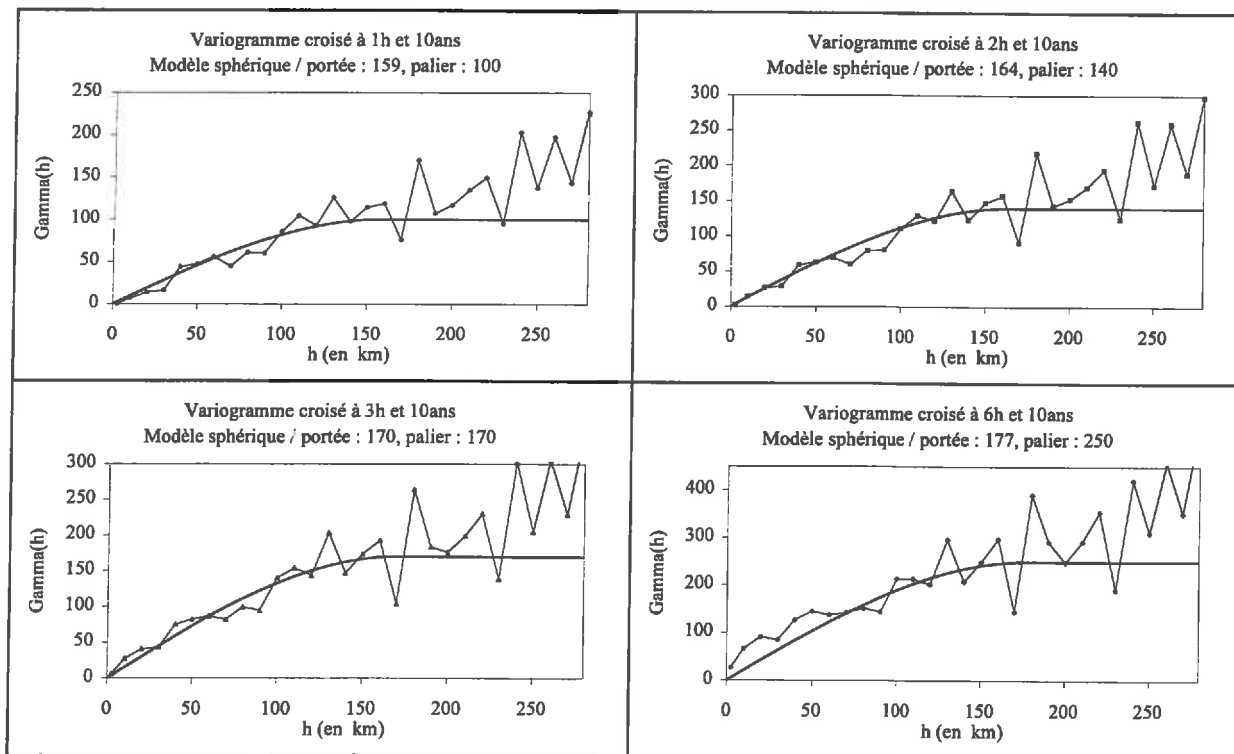
### VI.2.2. Modèles de variogrammes croisés adoptés

Finalement, les variogrammes croisés correspondant aux durées de 1 h à 6 h ont été modélisés. Les variogrammes théoriques sont sphériques non pépitiques (cf. Figure VI 6, Figure VI 7 et Figure VI 8). Les portées des différents variogrammes croisés sont les mêmes que celles des variables brutes  $P(t)$ .

D'autre part, les modèles vérifient tous la condition de Cauchy-Schwarz. Mais à 6 h, le modèle ajusté est inférieur au variogramme expérimental jusqu'à une distance d'environ 60 km. Avec ce modèle, l'application du cokrigage ne conduit pas à des résultats aberrants, donc, le cokrigage est appliqué jusqu'à ce pas de temps. Le paragraphe suivant donne des exemples de cartes obtenues par cette méthode.

|                           | Pluies décennales |     |     |     | Pluies centennales |     |     |     | Gradex |     |      |      |
|---------------------------|-------------------|-----|-----|-----|--------------------|-----|-----|-----|--------|-----|------|------|
| Pas de temps              | 1 h               | 2 h | 3 h | 6 h | 1 h                | 2 h | 3 h | 6 h | 1 h    | 2 h | 3 h  | 6 h  |
| Pépité (mm <sup>2</sup> ) | 0                 | 0   | 0   | 0   | 0                  | 0   | 0   | 0   | 0      | 0   | 0    | 0    |
| Portée (km)               | 159               | 164 | 170 | 177 | 160                | 170 | 183 | 158 | 174    | 200 | 223  | 235  |
| Palier (mm <sup>2</sup> ) | 100               | 140 | 170 | 250 | 220                | 300 | 400 | 550 | 5.0    | 7.5 | 10.0 | 15.0 |

*Tableau VI 5 : Caractéristiques des variogrammes croisés de  $P(t)$  et  $P(24 h)$  (modèles sphériques)*



*Figure VI 6 : Variogrammes croisés expérimentaux et théoriques pour les pluies décennales de pas de temps  $t$  et les pluies décennales à 24 h ( $Gamm(h)$  en mm<sup>2</sup>,  $h$  en km)*



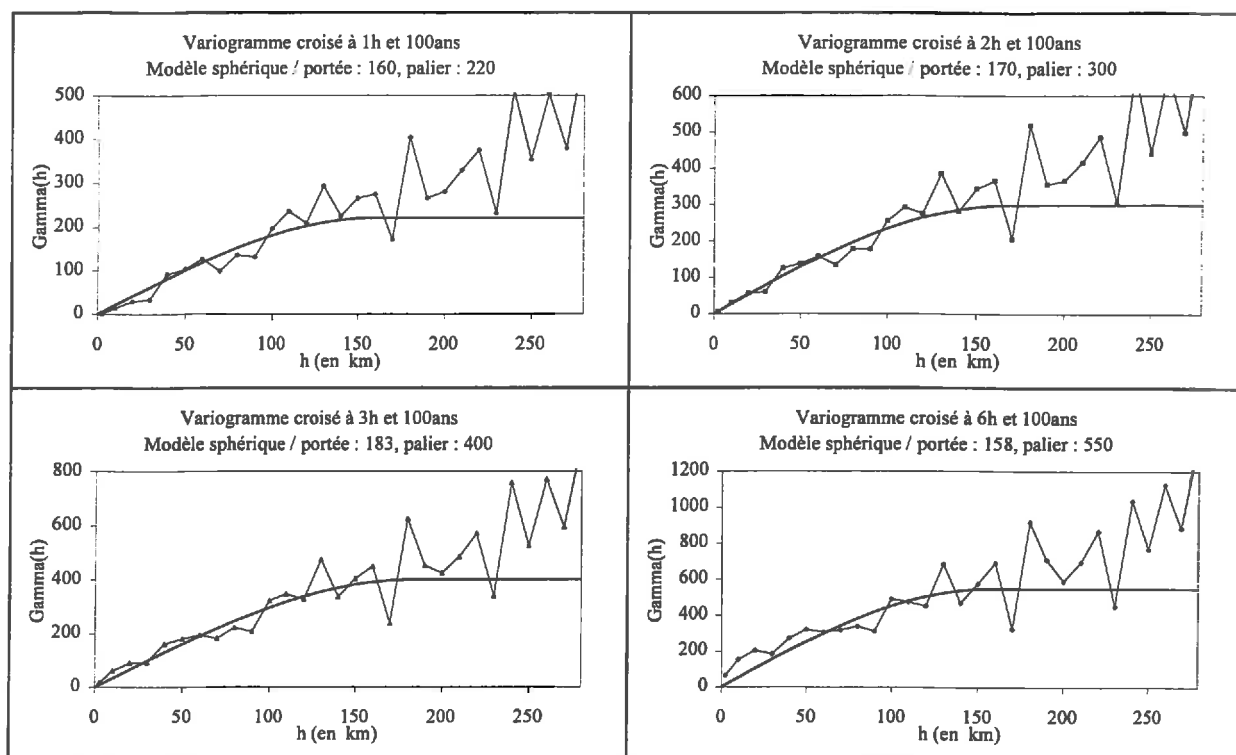


Figure VI 7 : Variogrammes croisés expérimentaux et théoriques pour les pluies centennales  
de pas de temps  $t$  et les pluies centennales à 24 h ( $Gamm(h)$  en  $mm^2$ ,  $h$  en km)

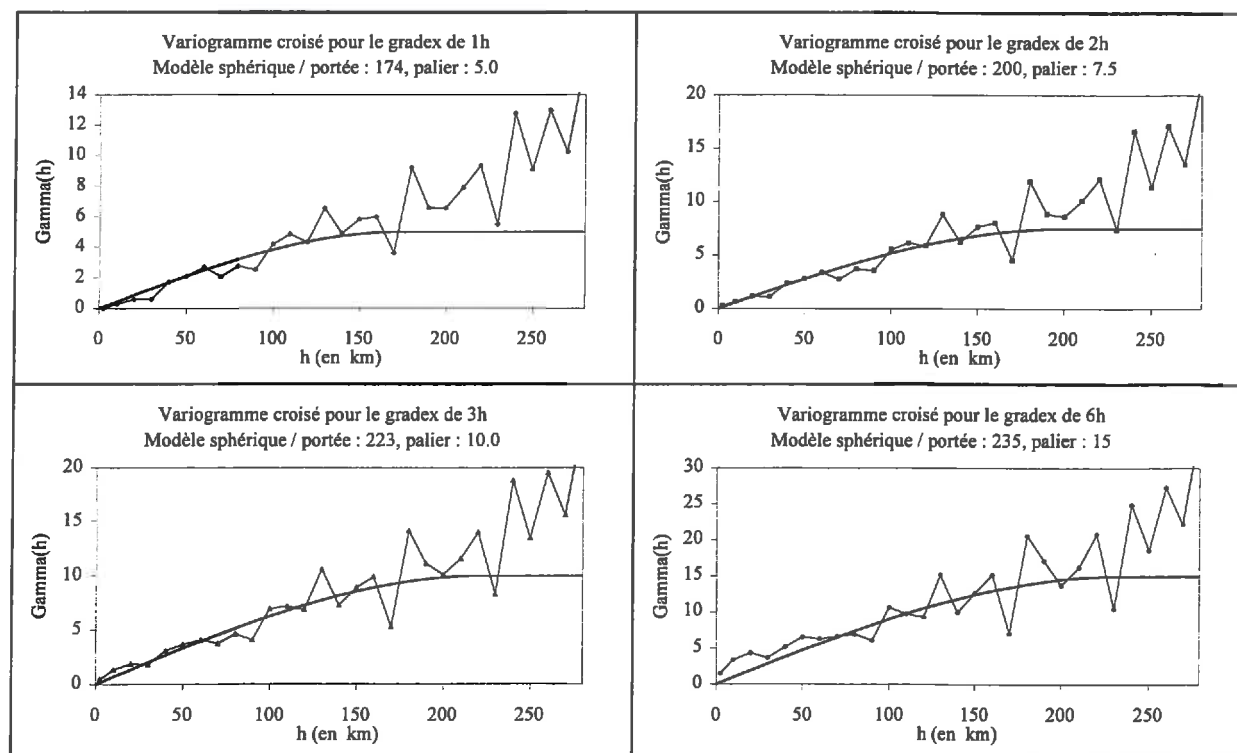


Figure VI 8 : Variogrammes croisés expérimentaux et théoriques pour les gradex de pas de  
temps  $t$  et les gradex à 24 h ( $Gamm(h)$  en  $mm^2$ ,  $h$  en km)

**VI.2.3. Conclusion : exemples de cartes obtenues par cokrigage à l'aide  
de l'information à 24 h**

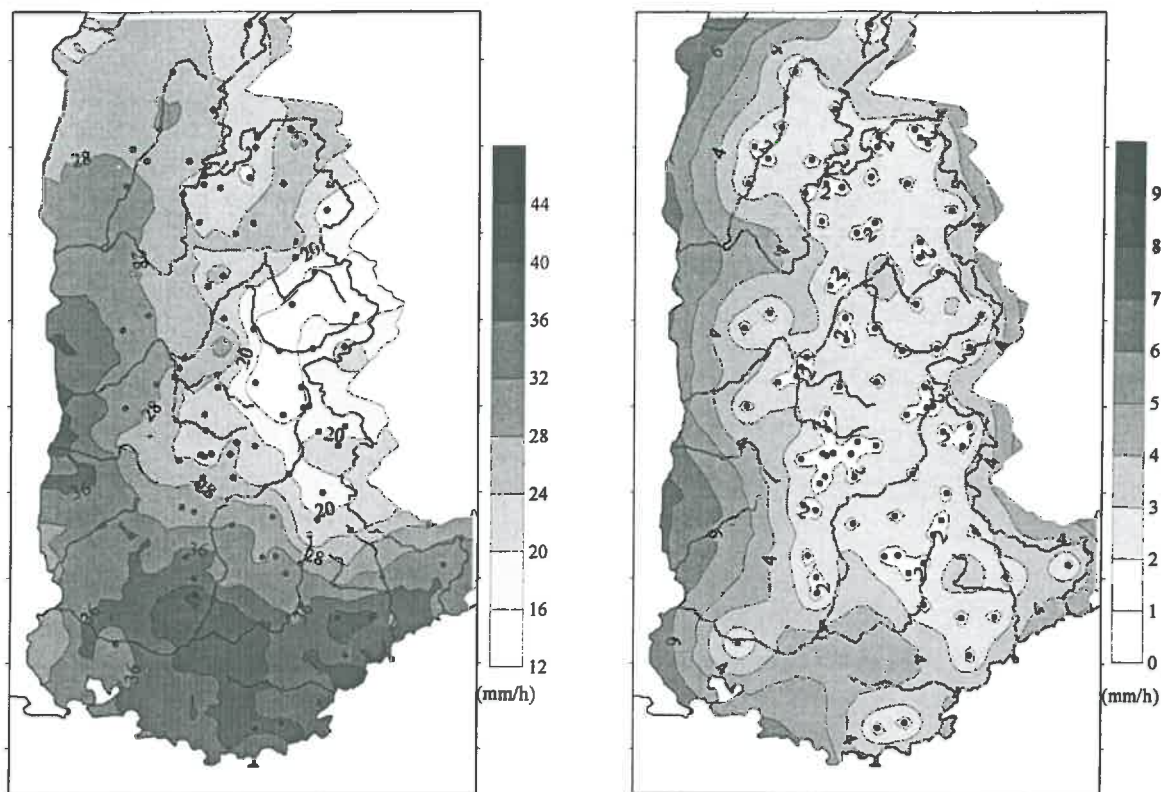
Le cokrigage est appliqué avec comme variable à cartographier la pluie décennale, centennale ou le gradex de pas de temps  $t$  inférieur à 6 h. Pour cette variable, 90 observations sont connues. La variable auxiliaire est la variable à 24 h, connue en 90 pluviographes et 463 pluviomètres. Les Figure VI 9 et Figure VI 10 donnent les exemples des cartes de pluies décennales de 1 h à 6 h évaluées par cokrigage avec l'information à 24 h, ainsi que des cartes des écarts type de l'erreur d'estimation.

Les cartes obtenues sont moins lisses que celles calculées par krigeage. C'était déjà le cas lorsque le relief était utilisé comme variable auxiliaire pour le cokrigage (cf. chapitre V). Cependant, les principales caractéristiques des champs sont toujours présentes :

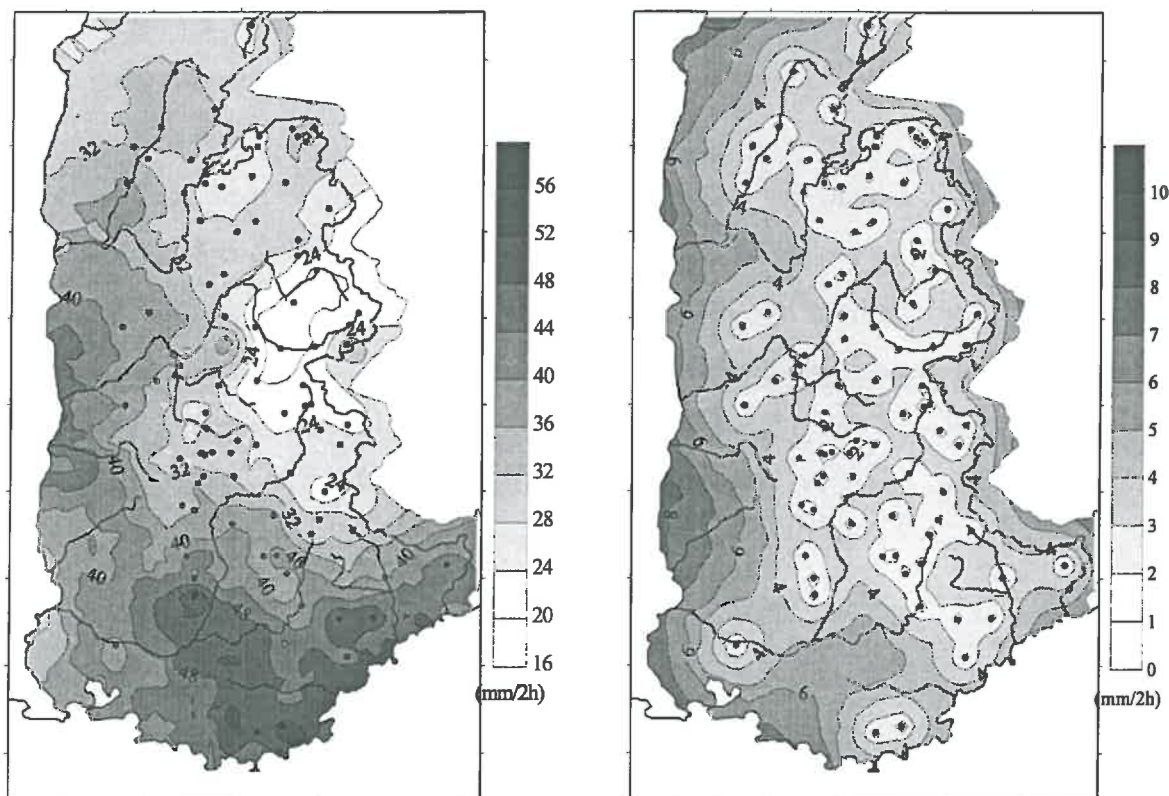
- effet d'abri croissant lorsqu'on pénètre à l'intérieur du massif, avec une zone de plus faibles valeurs au centre des Alpes (de la Tarentaise au Nord du Briançonnais),
- une zone de précipitations extrêmes les plus importantes au Sud Est (Var et Alpes Maritimes).

Pour conclure, l'étude des confluctuations entre variables pluviométriques de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , et celles du pas de temps de la journée,  $P(24\text{ h})$ , montre que seuls les pas de temps inférieurs à 6 h peuvent être cartographiés par cokrigage avec l'information à 24 h. Cette approche est donc assez décevante, puisque ce sont justement les pas de temps supérieurs à 6 h qui sont très liés à celui de 24 h. C'est ce qui nous a conduit à envisager d'autres méthodes pour intégrer l'information pluviométrique à 24 h.

Pluies de 1 h et 10 ans



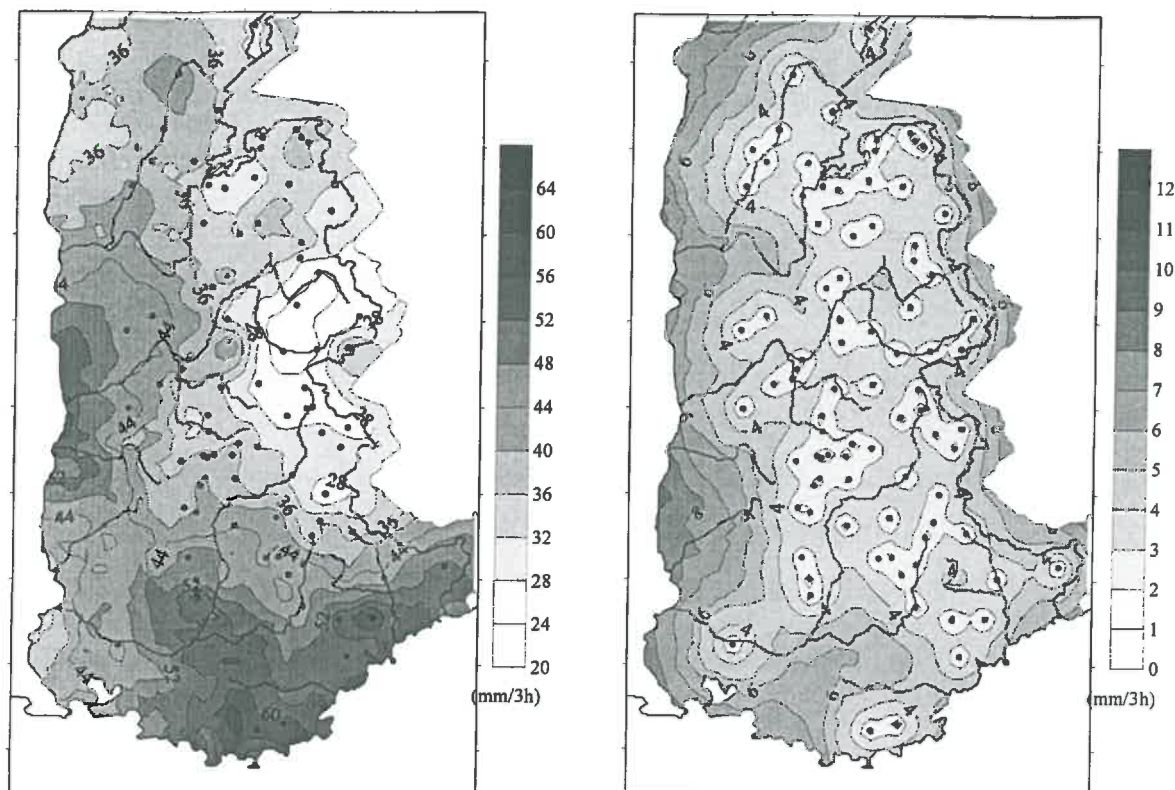
Pluies de 2 h et 10 ans



**Figure VI 9 :** Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par cokrigage avec l'information à 24 h (pluies décennales journalières) : pluies décennales de 1 h et 2 h (pas de calcul : 5.25 km)



Pluies de 3 h et 10 ans



Pluies de 6 h et 10 ans

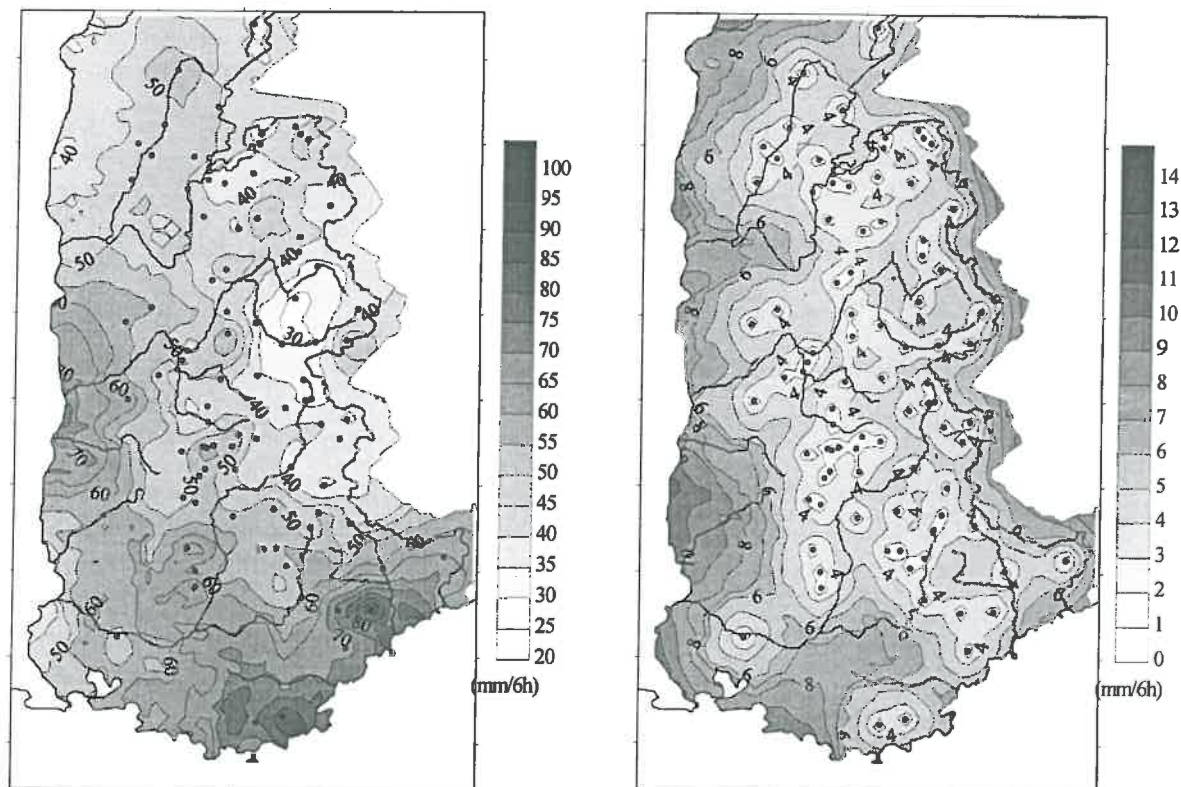


Figure VI 10 : Cartes des champs (gauche) et des écarts type de l'erreur d'estimation (droite) obtenues par cokrigage avec l'information à 24 h (pluies décennales journalières) : pluies décennales de 3 h et 6 h (pas de calcul : 5.25 km)

### VI.3. Cartographie à pas de temps inférieur à la journée à l'aide de l'information à 24 h, se basant sur les relations linéaires simples entre variables

Des relations linéaires simples entre paramètres de pas de temps  $t$  inférieurs à 24 h,  $P(t)$  et paramètres de durée 24 h ont été mises en évidence au § VI.1.2 (cf. Tableau VI 2, Tableau VI 3 et Tableau VI 4). Elles sont du type :  $P(t) = a \times P(24 \text{ h}) + b$ .

Dans cette partie, nous tentons d'utiliser directement ces relations pour la cartographie de  $P(t)$ . Deux méthodes différentes sont testées et comparées. La première méthode s'appuie uniquement sur les valeurs de  $P(24 \text{ h})$  connues aux pluviomètres, la deuxième s'appuie sur les champs à 24 h déjà obtenus par krigeage.

#### VI.3.1. Méthode s'appuyant sur la variabilité spatiale des estimées de pluies grâce au pas de temps journalier

Notre objectif est de cartographier la variable  $P(t)$ , de durée  $t$  inférieure à 24 h. Elle est connue en 90 pluviographes, avec une incertitude sur l'estimation du quantile (cf. chapitre II).

D'autre part, nous pouvons estimer  $P(t)$  en 463 pluviomètres grâce à la relation linéaire avec  $P(24 \text{ h})$  :  $P(t) = a \times P(24 \text{ h}) + b$ .

Alors, une nouvelle variable connue "exactement" en 90 pluviographes et estimée en 463 pluviomètres peut être construite :

$$\left[ \begin{array}{c} P_1(t) \\ \dots \\ P_{90}(t) \\ \hat{P}_{91}(t) = a \times P_{91}(24h) + b \\ \dots \\ \dots \\ \hat{P}_{553}(t) = a \times P_{553}(24h) + b \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{Valeurs du champ connues} \\ \text{en 90 pluviographes} \\ \text{Valeurs du champ estimées aux 463} \\ \text{pluviomètres grâce à } P(24 \text{ h}) \end{array} \right.$$

La méthode de cartographie proposée ici consiste à appliquer une méthode d'interpolation, le krigeage, avec comme donnée d'entrée la nouvelle variable. Ainsi,

l'interpolation ne se base pas seulement sur 90 valeurs connues "exactement", mais sur 553 valeurs, dont 463 sont entachées d'erreur d'estimation.

La première étape de cette méthode est l'étude de la variabilité spatiale de la nouvelle variable. Les Figure VI 11, Figure VI 12 et Figure VI 13 représentent les variogrammes correspondant pour les paramètres pluies décennales, centennales et gradex.

Ces variogrammes ont une allure semblable à celle des variables à **24 h** : ils présentent une allure de dérive. Ils ont donc été ajustés par un modèle puissance pépitique. Tous les  $\lambda$  ont été pris égaux à 0.6, comme à **24 h**.

Les modèles choisis s'ajustent bien aux variogrammes expérimentaux, sauf en ce qui concerne les gradex : pour cette variable, seules les faibles distances sont bien modélisées (jusqu'à 110 km environ). Cependant, cela ne pose pas de problème particulier pour le krigeage, puisque celui-ci ne s'appuie que sur les plus proches voisins pour le calcul de l'estimée en un point.

Finalement, le krigeage peut être appliqué pour tous les pas de temps inférieurs à **24 h** avec comme données d'entrée les valeurs de  $P(t)$  en 553 points (90 valeurs "exactes" et 463 valeurs estimées grâce à  $P(24\text{ h})$ ).

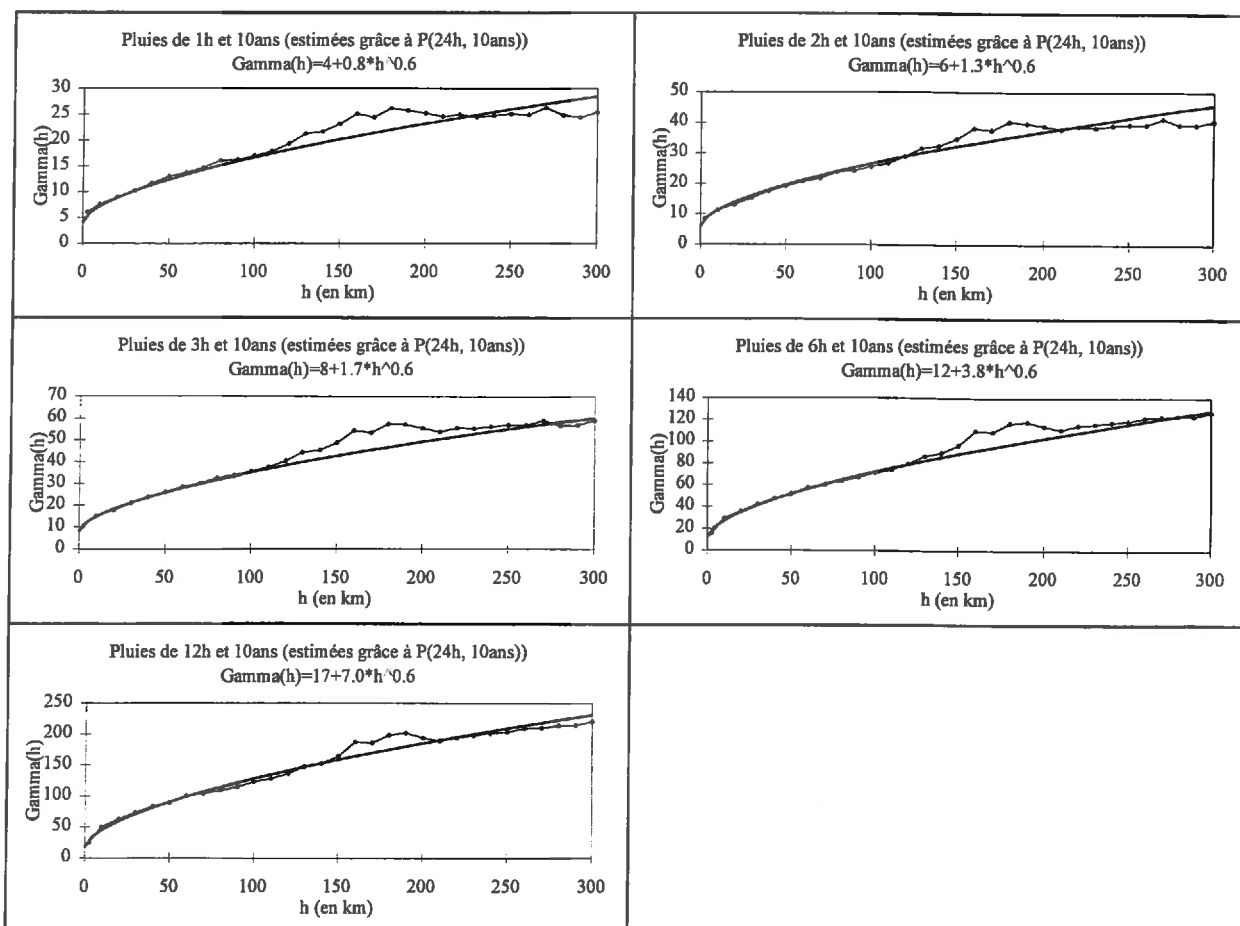
D'autre part, le krigeage fournit une carte de l'écart type de l'erreur d'estimation, mais celle-ci ne reflète pas l'incertitude réelle sur l'interpolation dans notre cas. En effet, elle suppose que les valeurs de départ sont connues exactement, ce qui n'est pas le cas :

- les quantiles de pluies et gradex sont entachés d'erreur (les annexes 3 et 4 donnent d'ailleurs un intervalle de confiance à 80 % sur ces estimations),
- l'incertitude sur les estimées de  $P(t)$  par régression linéaire s'appuyant sur  $P(24\text{ h})$  est due à l'incertitude sur les valeurs de  $P(24\text{ h})$  et à l'erreur d'estimation par régression.

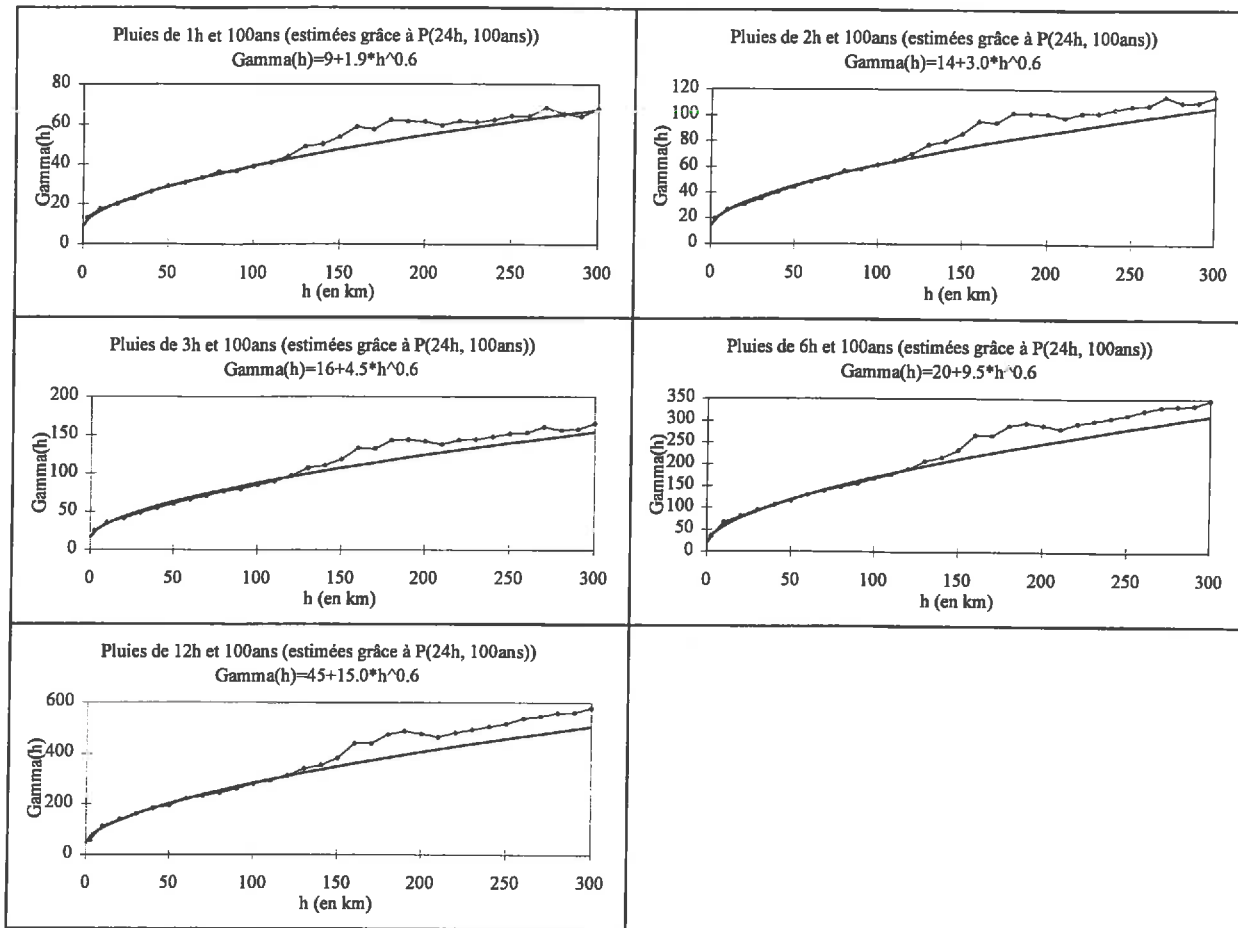
Nous n'avons jamais pris en compte les erreurs d'estimation sur les quantiles. Pour ce faire, il aurait fallu utiliser le krigeage avec erreur, c'est-à-dire prenant en compte les écarts type de la variable en chaque point de donnée (MEYLAN, 1986). C'est aussi cette technique qui aurait pu être appliquée dans le cas présent pour prendre en compte l'incertitude sur les estimées de  $P(t)$  aux pluviomètres.

|                                      | Pluies décennales |      |      |      |       | Pluies centennales |      |       |       |       |
|--------------------------------------|-------------------|------|------|------|-------|--------------------|------|-------|-------|-------|
| Pas de temps                         | 1 h               | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h  | 1 h                | 2 h  | 3 h   | 6 h   | 12 h  |
| Pépité (mm <sup>2</sup> )            | 4                 | 6    | 8    | 12   | 17    | 9                  | 14   | 16    | 20    | 45    |
| $\lambda$                            | 0.6               | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6   | 0.6                | 0.6  | 0.6   | 0.6   | 0.6   |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 0.8               | 1.3  | 1.7  | 3.8  | 7.0   | 1.9                | 3.0  | 4.5   | 9.5   | 15    |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 20.4              | 31.4 | 44.2 | 91.2 | 156.4 | 49.0               | 79.7 | 111.7 | 226.4 | 374.9 |

**Tableau VI 6 :** Caractéristiques des variogrammes des estimées des pluies décennales et des pluies centennales grâce à la pluie journalière -décennale ou centennale- (modèles puissances)



**Figure VI 11 :** Variogrammes expérimentaux et théoriques des estimées des pluies décennales par la pluie décennale journalière, pour les différentes durées (Gamma(h) en mm², h en km)

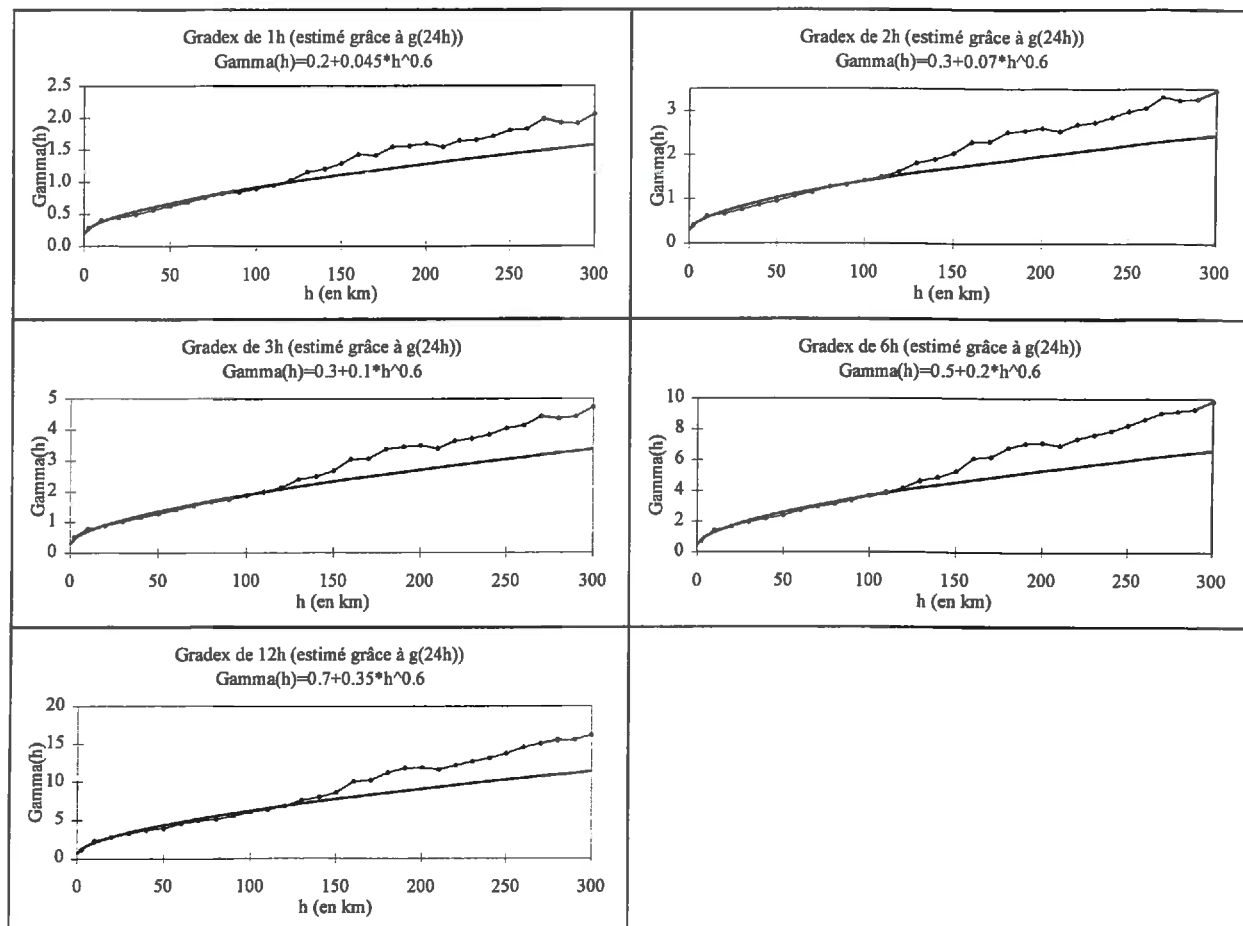


*Figure VI 12 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des estimées des pluies centennales par la pluie centennale journalière, pour les différentes durées ( $\Gamma(h)$  en  $\text{mm}^2$ ,  $h$  en km)*

| Pas de temps                        | Gradex |      |     |     |      |
|-------------------------------------|--------|------|-----|-----|------|
|                                     | 1 h    | 2 h  | 3 h | 6 h | 12 h |
| Pépite ( $\text{mm}^2$ )            | 0.2    | 0.3  | 0.3 | 0.5 | 0.7  |
| $\lambda$                           | 0.6    | 0.6  | 0.6 | 0.6 | 0.6  |
| Palier ( $\text{mm}^2$ )            | 0.045  | 0.07 | 0.1 | 0.2 | 0.35 |
| Variance du champ ( $\text{mm}^2$ ) | 1.2    | 2.0  | 2.7 | 5.4 | 9.0  |

*Tableau VI 7 : Caractéristiques des variogrammes des estimées des gradex grâce au gradex journalier (modèles puissances)*





**Figure VI 13 :** Variogrammes expérimentaux et théoriques des estimées des gradex par le gradex journalier, pour les différentes durées ( $\Gamma(h)$  en  $mm^2$ ,  $h$  en km)

Finalement, nous avons défini une première méthode de cartographie s'appuyant sur les relations linéaires entre paramètres de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , et paramètres à 24 h,  $P(24 h)$ . Elle permet de retrouver la valeur réelle de  $P(t)$  en des points connus, puisque le krigeage est un interpolateur exact. Cette méthode ne fournit cependant pas d'écart type de l'erreur d'estimation.

### VI.3.2.Méthode s'appuyant sur la répartition spatiale des pluies journalières et des résidus de régression

Une autre méthode pour prendre en compte les relations linéaires entre paramètres peut être d'utiliser le champ à 24 h, préalablement obtenu par krigeage à partir des 553 postes de

mesure de pluies. Dans ce cas, l'équation de régression entre  $P(t)$  et  $P(24\text{ h})$  est appliquée à ce champ.

En effet, chaque paramètre pluviométrique de pas de temps  $t$  est expliqué par le paramètre à  $24\text{ h}$ ,  $P(24\text{ h})$ . Il peut donc être considéré comme la somme de deux variables :

$$P(t) = f[P(24\text{ h})] + e = a \times P(24\text{ h}) + b + e \quad (VI - 6)$$

où  $f[P(24\text{ h})]$  est l'équation de régression qui explique  $P(t)$  par  $P(24\text{ h})$ ,

et  $e$  est le résidu de régression : la partie de  $P(t)$  non expliquée par  $P(24\text{ h})$ .

Les champs de  $P(24\text{ h})$  sont assez fiables, puisqu'ils ont été évalués à partir d'un échantillon important. Sur cette base, nous pouvons évaluer un champ de  $P(t)$  par la formule (VI - 6).

- L'équation de régression  $f[P(24\text{ h})]$  est appliquée en chaque point du domaine, ce qui conduit à une première estimation du champ obtenue par régression. En pratique, cela revient à appliquer l'équation en chaque noeud d'une grille obtenue par krigeage pour  $P(24\text{ h})$ .
- Le résidu  $e$  est connu en 90 pluviographes. L'interpolation de ce résidu sur l'ensemble du domaine, permet d'estimer une valeur de résidu en n'importe quel point.

La somme des deux champs ainsi calculés permet d'obtenir une estimation en tout point de  $P(t)$ . Cette méthode est similaire à celle mise au point au chapitre IV et qui s'appuyait sur la régression linéaire multiple avec le relief.

Il reste donc à étudier la variabilité spatiale des résidus de régression (par le biais du variogramme), ce qui nous permettra d'établir si la cartographie des résidus est possible dans notre cas, et par quelle méthode on peut l'envisager.

#### VI.3.2.1. Variogrammes expérimentaux des résidus de régression

Les variogrammes expérimentaux des différents résidus pluviométriques montrent que les phénomènes ont une bonne structure spatiale. Les hypothèses de stationnarité d'ordre 1 et d'ordre 2 sont respectées (cf. Figure VI 14, Figure VI 15 et Figure VI 16).

A 12 h, les variogrammes expérimentaux n'ont plus une allure de dérive comme pour les variables brutes (cf. chapitre III), au contraire, les modèles se rapprochent plutôt de pépites pures.

Dans tous les cas, nous avons ajusté aux variogrammes expérimentaux un modèle exponentiel pépitique (cf. Tableau VI 8 et Tableau VI 9). Les portées, plus faibles que celles des variables brutes, varient entre 35 et 45 km. Pour un pas de temps donné, elles sont égales pour les trois variables, pluies décennales, centennales et gradex.

Finalement, la bonne structure spatiale des résidus permet leur cartographie par krigeage ordinaire.

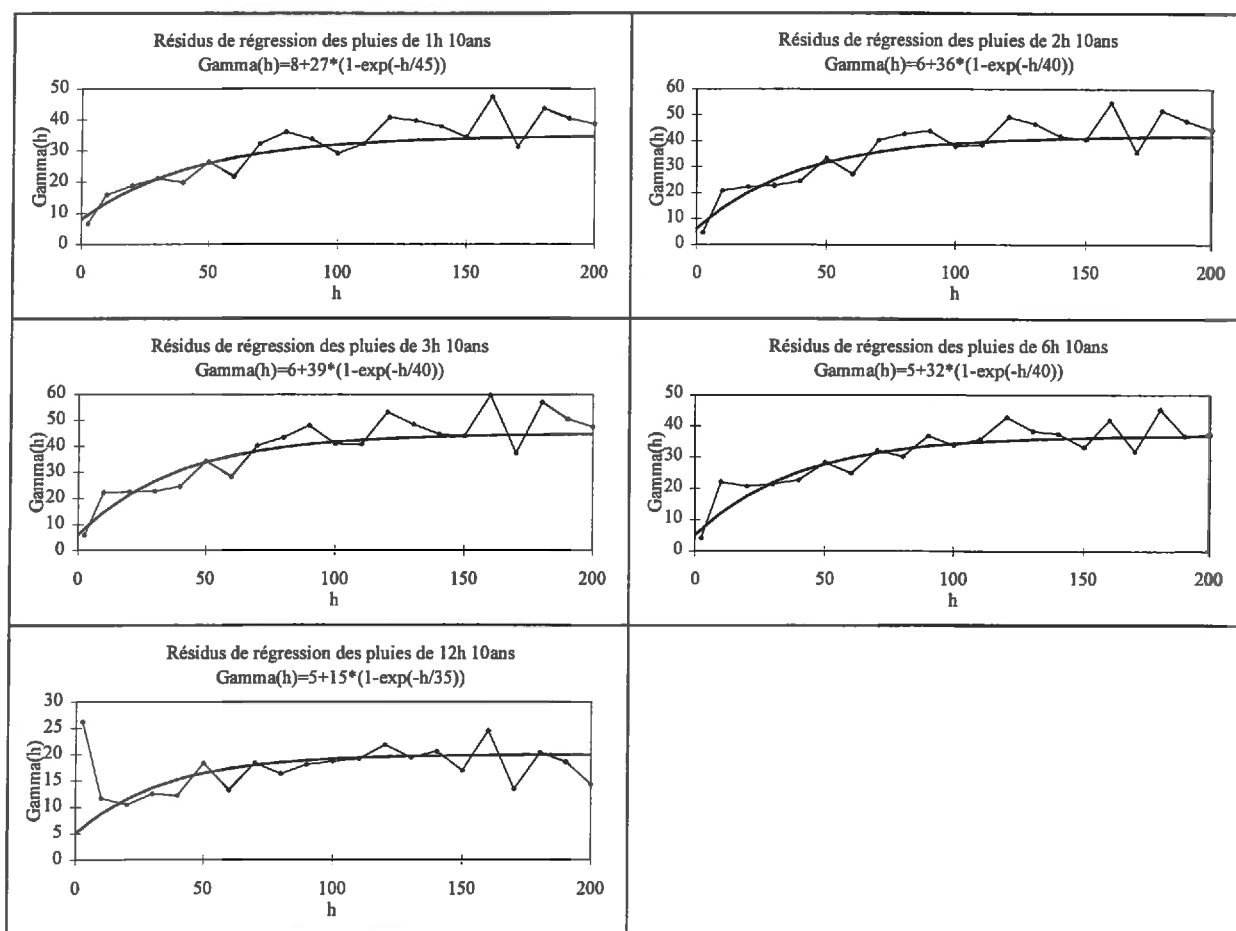
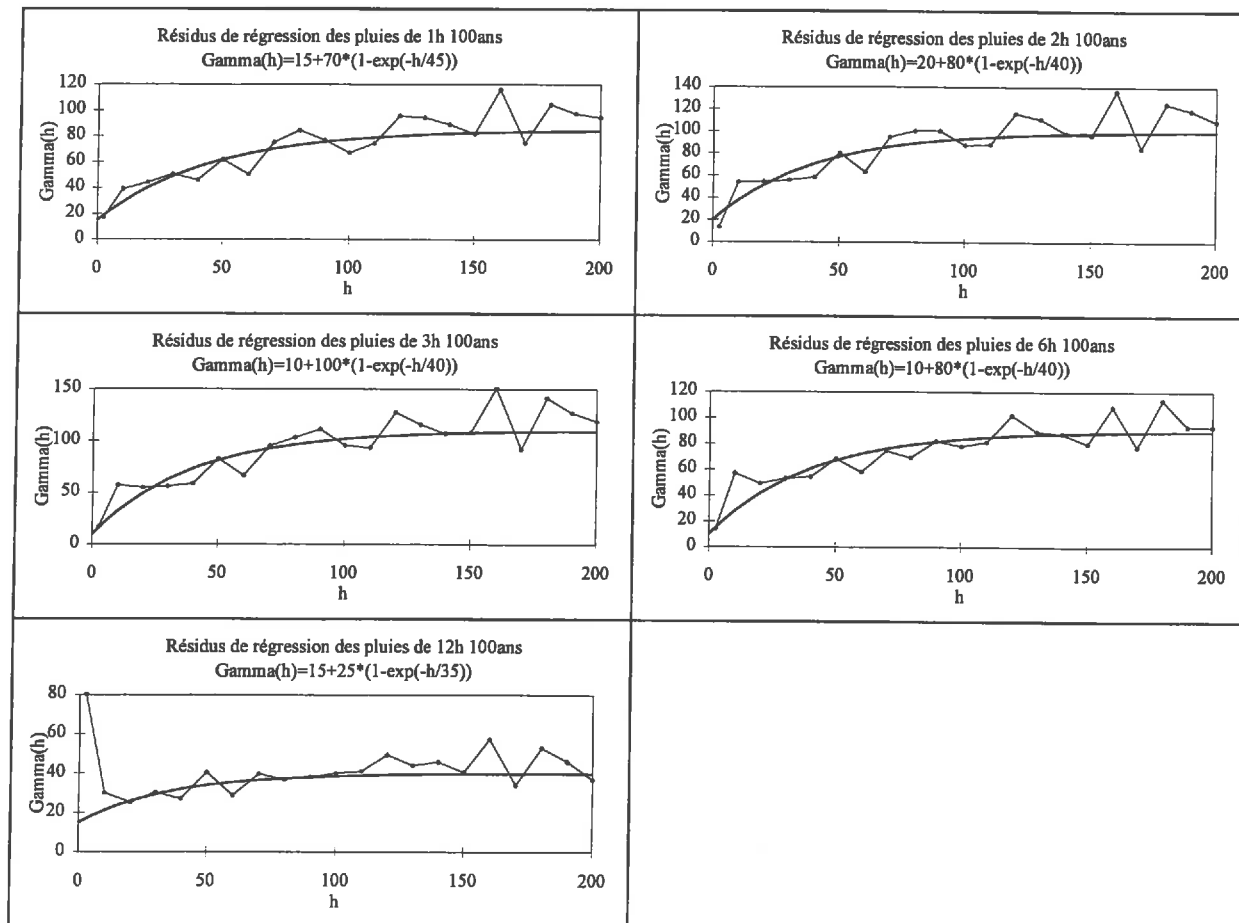


Figure VI 14 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des résidus de régression avec 24 h, pour les pluies décennales et les différentes durées ( $\text{Gamma}(h)$  en  $\text{mm}^2$ ,  $h$  en km)

| Pas de temps                         | Pluies décennales |      |      |      |      | Pluies centennales |      |       |      |      |
|--------------------------------------|-------------------|------|------|------|------|--------------------|------|-------|------|------|
|                                      | 1 h               | 2 h  | 3 h  | 6 h  | 12 h | 1 h                | 2 h  | 3 h   | 6 h  | 12 h |
| Pépite (mm <sup>2</sup> )            | 8                 | 6    | 6    | 5    | 5    | 15                 | 20   | 10    | 10   | 15   |
| Portée (km)                          | 45                | 40   | 40   | 40   | 35   | 45                 | 40   | 40    | 40   | 35   |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 27                | 36   | 39   | 32   | 15   | 70                 | 80   | 100   | 80   | 25   |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 33.3              | 40.0 | 43.1 | 34.4 | 17.7 | 79.2               | 96.1 | 105.2 | 83.1 | 41.4 |

**Tableau VI 8 :** *Caractéristiques des variogrammes des résidus de régression avec 24 h des pluies décennales et des pluies centennales (modèles exponentiels)*



**Figure VI 15 :** *Variogrammes expérimentaux et théoriques des résidus de régression avec 24 h, pour les pluies centennales et les différentes durées (Gamma(h) en mm<sup>2</sup>, h en km)*

|                                      | Gradex |     |     |     |      |
|--------------------------------------|--------|-----|-----|-----|------|
| Pas de temps                         | 1 h    | 2 h | 3 h | 6 h | 12 h |
| Pépite (mm <sup>2</sup> )            | 0.3    | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4  |
| Portée (km)                          | 45     | 40  | 40  | 40  | 35   |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 1.7    | 1.8 | 2.1 | 1.6 | 0.6  |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 1.8    | 2.2 | 2.5 | 2.1 | 1.1  |

Tableau VI 9 : Caractéristiques des variogrammes des résidus de régression avec 24 h des gradex  
(modèles exponentiels)

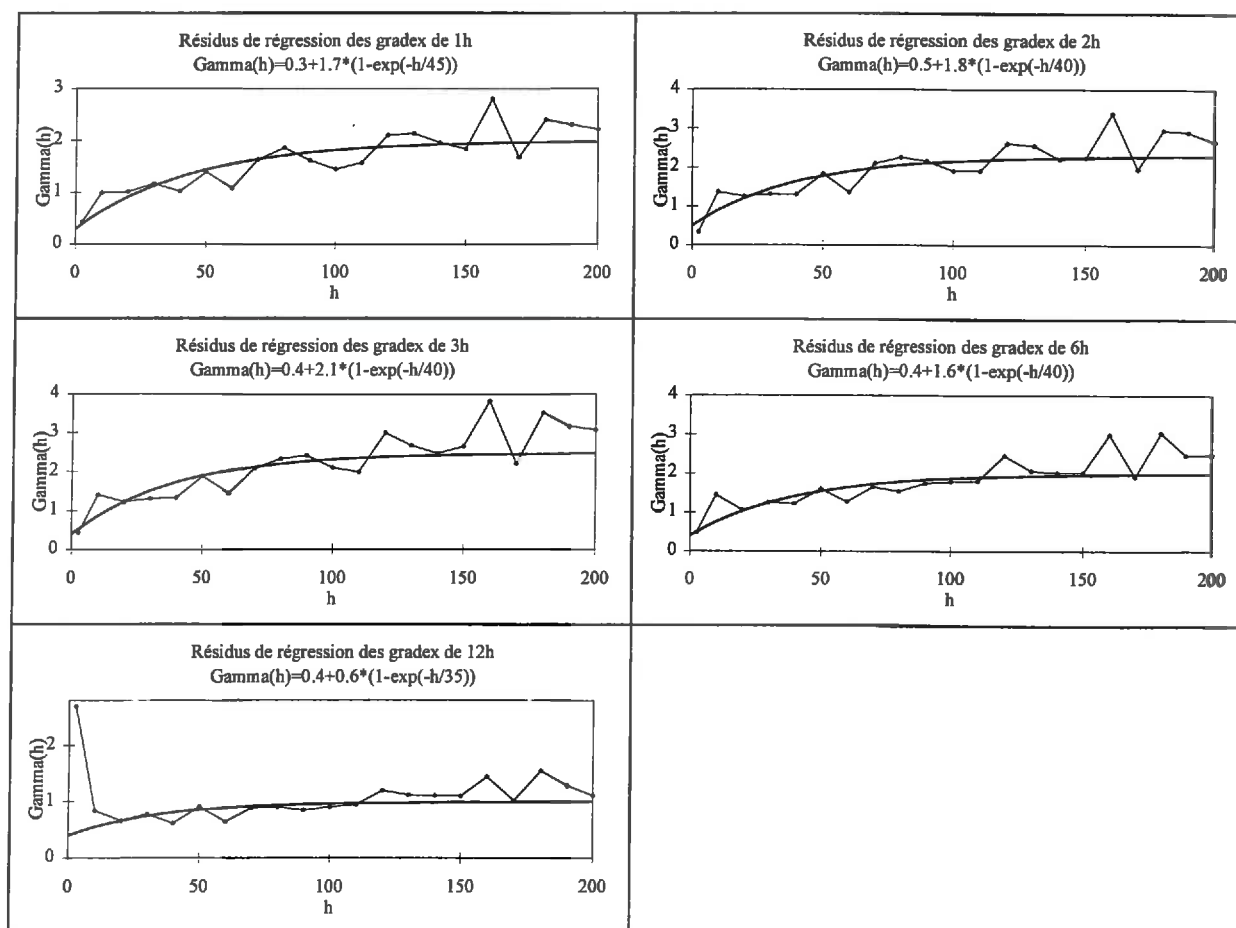


Figure VI 16 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des résidus de régression avec 24 h, pour les gradex et les différentes durées ( $\Gamma(h)$  en mm<sup>2</sup>, h en km)

VI.3.2.2. Estimation d'un écart type de l'erreur d'estimation pour la  
méthode de cartographie envisagée

Au chapitre IV, nous avons déterminé une manière d'évaluer un écart type de l'erreur d'estimation pour la méthode de cartographie alors proposée, qui intégrait le relief. Les champs de pluies finaux étaient la somme des deux champs obtenus par :

- application d'une équation de régression linéaire multiple avec 4 variables explicatives décrivant la topographie, donc supposées connues exactement,
- krigeage des résidus de régression avec le relief.

En tout point  $x_i$  du domaine, l'estimée de  $P$  par régression s'écrivait :

$$\hat{P}(x_i) = a_0 + a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + a_3 X_{3i} + a_4 X_{4i} + \hat{e}_i \quad (VI - 7)$$

où les  $a_j$  sont les estimées, à partir de l'échantillon, des coefficients  $\alpha_j$  de l'équation de régression ( $\alpha_j$  coefficients de régression pour la population),

$X_{ji}$  ( $j=1, 4$ ) désigne la valeur en  $x_i$  de la  $j^{\text{ème}}$  variable topographique,

$\hat{e}_i$  est l'estimée par krigeage du résidu de régression  $e_i$  ( $e_i$  est l'estimée sur un échantillon de l'erreur  $\varepsilon_i$  sur la population).

Ce qui avait conduit à l'expression de l'écart type de l'erreur d'estimation :

$$\sigma_P^2(x_i) = \sigma_{f(R)}^2(x_i) + \sigma_e^2(x_i) + 2 \sigma_{f(R)}(x_i) \sigma_e(x_i) \quad (VI - 8)$$

où  $\sigma_e^2(x_i)$  est l'écart type de l'erreur d'estimation sur  $e_i$  par krigeage,

et  $\sigma_{f(R)}^2(x_i)$  est l'erreur d'estimation par l'équation de régression, due uniquement à l'erreur d'estimation des coefficients de régression  $a_j$ , c'est-à-dire à une erreur d'échantillonnage :

$$\sigma_{f(R)}^2(x_i) = \hat{\sigma}_{a_0}^2 + \sum_{j=1}^4 X_{ji}^2 \hat{\sigma}_{a_j}^2 + 2 \sum_{j=1}^4 X_{ji} \text{cov}(a_j, a_0) + 2 \sum_{j=1}^4 \sum_{k>j}^4 X_{ji} X_{ki} \text{cov}(a_j, a_k) \quad (VI - 9)$$

Cette formulation repose sur le fait que les variable  $X_i$  sont connues exactement, ce qui n'est pas le cas pour  $P(24 \text{ h})$ . En effet, les champs à **24 h** sont obtenus par krigeage, et en

chaque point du domaine, nous disposons d'un écart type d'estimation. Cette différence nous empêche de donner une formulation de l'écart type d'estimation dans le cas présent.

### VI.3.2.3. Conclusion

Finalement, la deuxième méthode de cartographie de la variable  $P(t)$  intégrant les relations linéaires entre paramètres de durée  $t$ ,  $P(t)$ , et paramètres à 24 h,  $P(24 \text{ h})$ , consiste à :

- appliquer l'équation de régression entre  $P(t)$  et  $P(24 \text{ h})$  :  $P(t) = a \times P(24 \text{ h}) + b$   
à un champ de  $P(24 \text{ h})$  obtenu par krigeage,
- évaluer par krigeage un champ des résidus de régression.

La somme de ces deux champs constitue une estimation finale de  $P(t)$  en tout point.

Cette méthode permet de retrouver la valeur réelle de  $P(t)$  en des points connus, mais elle ne fournit pas d'écart type de l'erreur d'estimation

### VI.3.3. Comparaison des deux méthodes de cartographie définies

Nous avons défini deux méthodes de cartographie s'appuyant sur les relations linéaires entre une variable pluviométrique de pas de temps  $P(t)$  et cette même variable à  $P(24 \text{ h})$  :  
 $P(t) = a \times P(24 \text{ h}) + b$ . Dans la suite, nous appellerons :

- *méthode 1* (cf. § VI.3.1), le krigeage des variables :

$$\left[ \begin{array}{c} P_1(t) \\ \dots \\ P_{90}(t) \\ \hat{P}_{91}(t) = a \times P_{91}(24h) + b \\ \dots \\ \dots \\ \hat{P}_{553}(t) = a \times P_{553}(24h) + b \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{Valeurs du champ connues} \\ \text{en 90 pluviographes} \\ \text{Valeurs du champ estimées aux} \\ \text{463 pluviomètres grâce à } P(24 \text{ h}) \end{array} \right.$$

- *méthode 2* (cf. § VI.3.2), la somme des deux champs résultant
  - de l'application de l'équation de régression au champ de  $P(24 \text{ h})$ , estimé par krigeage
  - et du krigeage des résidus de régression.

Ces deux méthodes permettent de retrouver les valeurs connues aux points de mesure.

Le but de ce paragraphe est de comparer les méthodes, pour déterminer laquelle des deux est la plus appropriée pour la cartographie des variables pluviométriques, pluies décennales, centennales et gradex de pas de temps inférieur à la journée. Pour ce faire, la validation croisée (cf. introduction à la partie B, § 2, p106) est appliquée.

Dans un premier temps, l'évolution des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et valeurs interpolées est représentée en fonction du pas de temps (cf. Figure VI 17) pour les deux méthodes et les différentes variables pluies décennales, centennales et gradex.

Pour la méthode 1, les coefficients de détermination augmentent avec le pas de temps : on passe de 0.50 (1 h) à 0.59 (12 h) pour les pluies centennales, par exemple. Les coefficients pour la méthode 2 sont à peu près stables, avec une légère diminution à 12 h. Par exemple, ils varient entre 0.71 (1 h) et 0.65 (12 h) pour les pluies centennales.

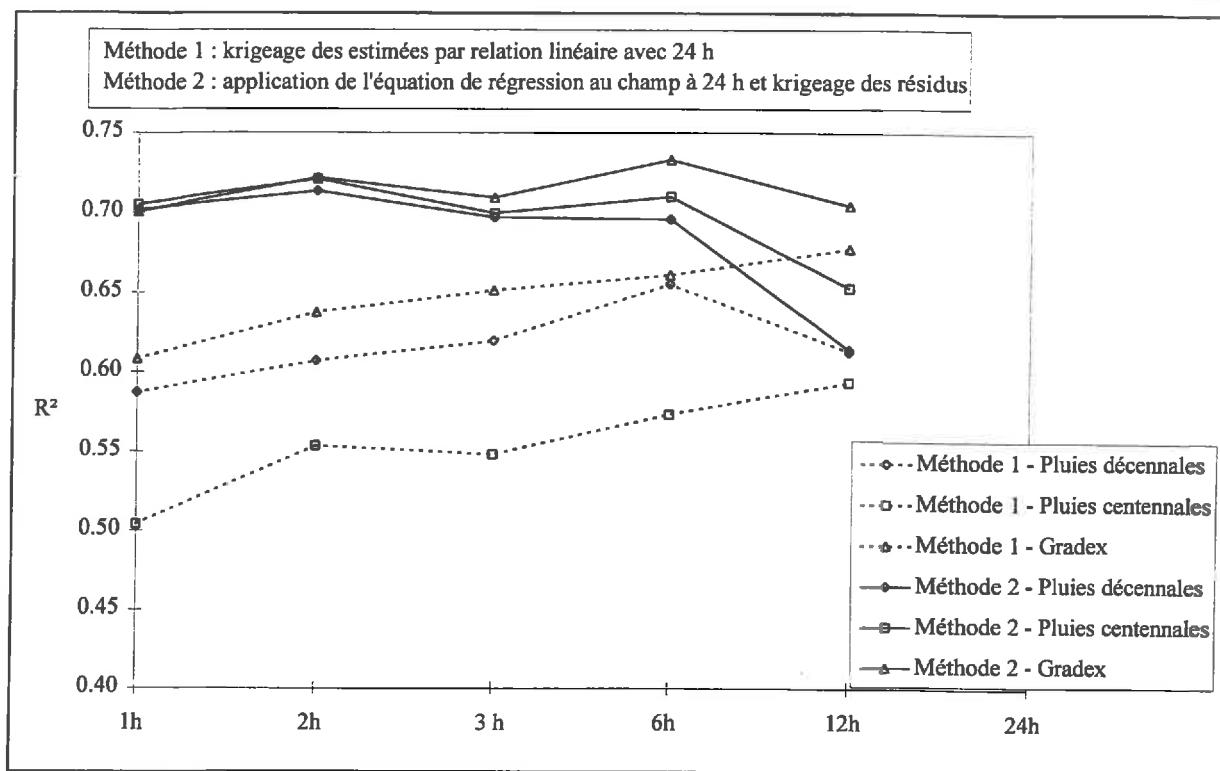
D'autre part, quelle que soit la variable (pluies décennales, centennales ou gradex), les coefficients de détermination sont toujours meilleurs pour la méthode 2. Par exemple, à 1 h, la différence est de 21 % de la variance expliquée pour les pluies centennales, et de 9 % pour les gradex. Cette différence va en s'amenuisant quand le pas de temps augmente.

Par ailleurs, le Tableau VI 10 permet la comparaison entre les moyennes et écarts type des valeurs réelles et les moyennes et écarts type des valeurs interpolées (exemple des pluies décennales).

Pour les deux méthodes, les moyennes sont proches des moyennes réelles. Par contre, elles sous-estiment toutes deux les écarts type. Cependant, c'est la méthode 2 qui donne les écarts type les plus forts, et donc les plus proches des écarts type réels. Le seul pas de temps où les résultats sont équivalents est celui de 12 h.

Finalement, c'est la méthode 2 qui est retenue. En effet, les résultats pour cette méthode sont meilleurs pour tous les critères : coefficients de détermination entre valeurs réelles et interpolées, moyennes et écarts type des valeurs interpolées.





**Figure VI 17 :** Comparaison par validation croisée de deux méthodes de cartographie s'appuyant sur les relations linéaires entre variable de durée  $t$  et variable à 24 h : évolution des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et interpolées en fonction du pas de temps (pas de la maille de calcul : 5.25 km)

|           | Echantillon de validation |            | Méthode 1 |            | Méthode 2 |            |
|-----------|---------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|           | Moyenne                   | Ecart type | Moyenne   | Ecart type | Moyenne   | Ecart type |
| 1h 10ans  | 25.7                      | 7.3        | 25.8      | 3.1        | 25.6      | 5.5        |
| 2h 10ans  | 32.1                      | 8.6        | 31.8      | 4.0        | 31.9      | 6.6        |
| 3h 10ans  | 37.3                      | 9.7        | 37.1      | 4.9        | 37.2      | 7.5        |
| 6h 10ans  | 47.9                      | 12.4       | 47.7      | 7.5        | 47.8      | 9.3        |
| 12h 10ans | 61.9                      | 15.1       | 61.9      | 10.1       | 61.7      | 10.5       |

**Tableau VI 10 :** Comparaison par validation croisée de deux méthodes de cartographie s'appuyant sur les relations linéaires entre variables de durée  $t$  et variable à 24 h : comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et interpolées (exemple des pluies décennales, valeurs en mm par pas de temps) (pas de la maille de calcul : 5.25 km)

#### **VI.3.4. Conclusion et exemples de cartes**

Pour conclure, la méthode de cartographie définie pour intégrer directement les relations linéaires entre un paramètre pluviométrique de pas de  $t$ ,  $P(t)$ , et ce même paramètre de pas de temps **24 h**,  $P(24\text{ h})$ , consiste à :

- appliquer l'équation de régression  $P(t) = a \times P(24\text{ h}) + b$  au champ à **24 h**, obtenu par krigeage,
- estimer un champ des résidus de régression par krigeage,
- ajouter les deux champs précédents pour obtenir le champ final de  $P(t)$ .

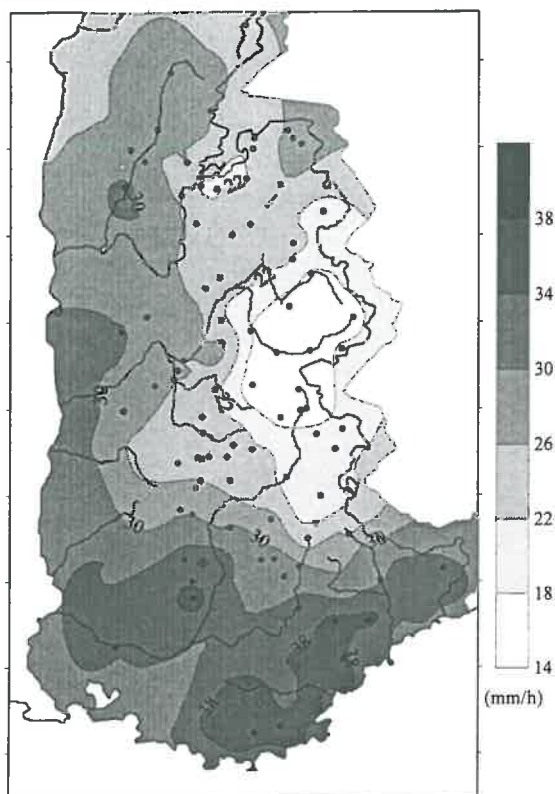
La Figure VI 18 donne des exemples de cartes de pluies décennales de 1 h à 12 h évaluées par cette méthode.

Ces cartes sont plus lisses que celles où l'on introduit une information morphométrique pour la cartographie (cf. Figure VI 9 et Figure VI 10), mais elles retracent toujours les principales caractéristiques des champs :

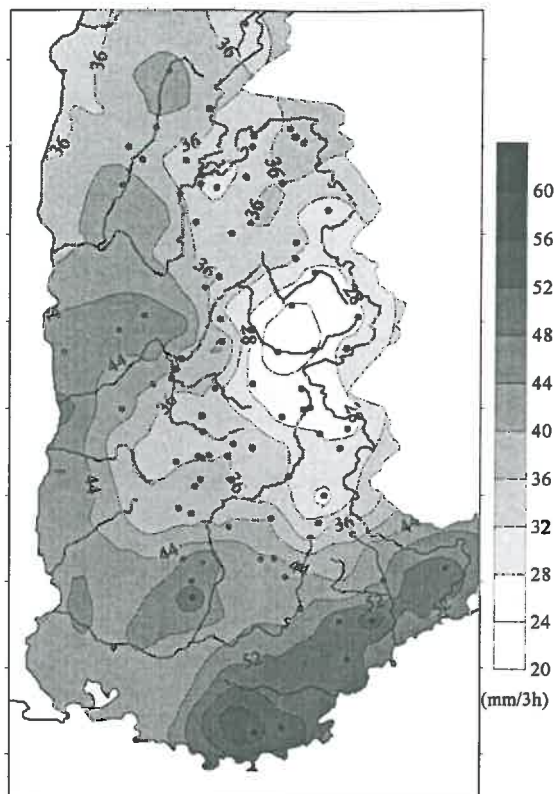
- effet d'abri croissant lorsqu'on pénètre à l'intérieur du massif, avec une zone de plus faibles valeurs au centre des Alpes (de la Tarentaise au Nord du Briançonnais),
- une zone de précipitations extrêmes les plus importantes au Sud Est (Var et Alpes Maritimes).

Pour conclure, nous avons mis en évidence une méthode de cartographie s'appuyant sur l'information pluviométrique à **24 h** par le biais des relations linéaires entre pas de temps fins et pas de temps journalier. Cette méthode permet d'obtenir des cartes des champs pour n'importe quel pas de temps inférieur à **24 h**.

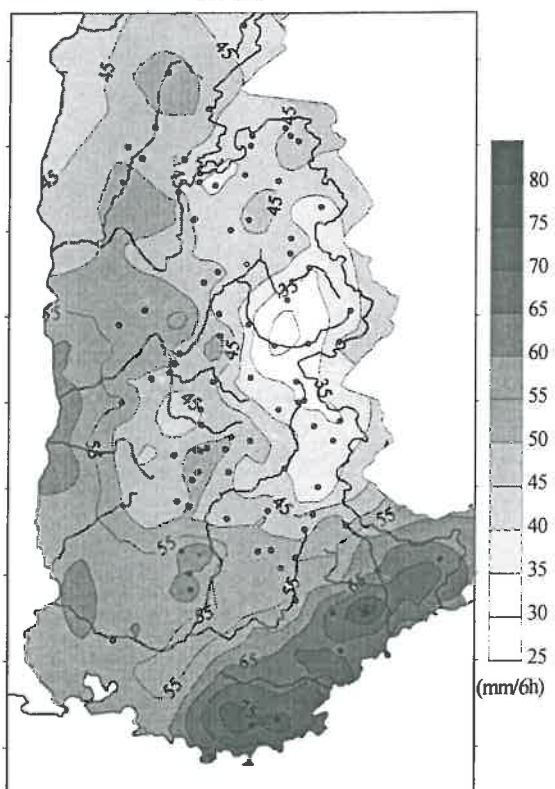
Pluies de 1 h et 10 ans



Pluies de 3 h et 10 ans



Pluies de 6 h et 10 ans



Pluies de 12 h et 10 ans

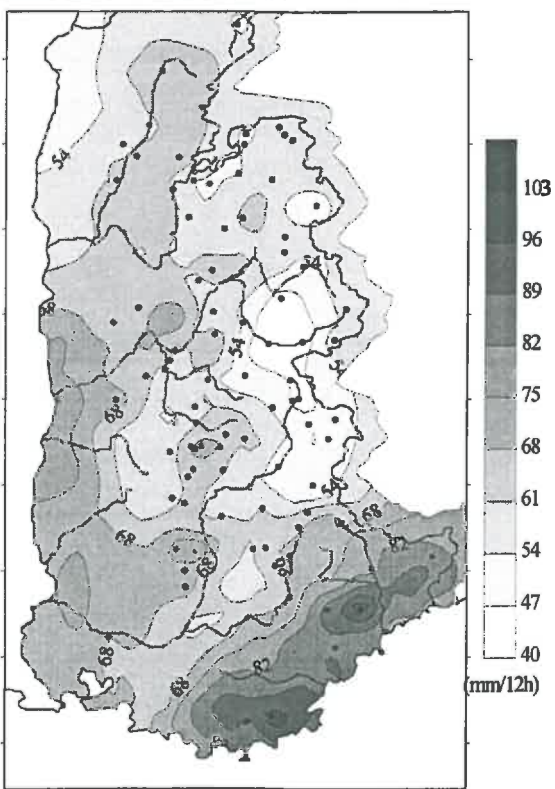


Figure VI 18 : Cartes des champs obtenues par régression avec le pas de temps de 24 h et  
krigeage des résidus : pluies décennales de 1 h, 3 h, 6 h et 12h (pas de calcul : 5.25 km)

#### **VI.4.Méthodes utilisant la répartition spatiale des champs à 24 h**

Les deux méthodes de cartographie envisagées ici s'appuient sur la répartition spatiale des champs à **24 h**. Les champs pluviométriques de pas de temps **t** sont estimés par des lois de type puissance :

$$P(t) = A \times B^c \quad (VI - 10)$$

La variable **A** est dans les deux cas une variable pluviométrique : **P(24 h)** dans le premier cas et **P(1 h)** dans le deuxième.

**B** est une variable adimensionnelle : un rapport de pas de temps ou de variables pluviométriques.

Enfin, **c** est un coefficient qui dépend du lieu et aussi du pas de temps **t** dans la deuxième méthode.

Dans la suite, les deux méthodes proposées sont expliquées de manière plus approfondie.

##### **VI.4.1.Méthode s'appuyant sur la répartition spatiale du coefficient de Montana**

La méthode envisagée ici s'appuie sur l'information à **24 h** et le coefficient de Montana. Cette approche a déjà été utilisée en Lorraine : ESTORGE et al. (1980) utilisent le gradex **journalier** pour déterminer ponctuellement le gradex de pas de temps **t** par une loi de Montana.

En effet, le coefficient de Montana permet d'exprimer le gradex **a** en fonction du pas de temps (cf. chapitre I) :

$$a(t) = \alpha \times t^n \quad (VI - 11)$$

où **n** est le coefficient de Montana,

et **a** est le gradex au pas de temps **t**.

Cette relation n'est pas théorique, mais expérimentale, et il ne faudrait pas l'appliquer pour des pas de temps très courts (inférieurs à 1 h).

Ainsi, les gradex de pas de temps  $t$  et  $t'$  sont liés par la formule :

$$\frac{a(t)}{a(t')} = \left( \frac{t}{t'} \right)^n \quad (VI - 12)$$

De même,  $n$  peut être utilisé pour déterminer l'évolution des pluies de temps de retour donné en fonction du pas de temps :

$$\frac{P(t, T)}{P(t', T)} = \left( \frac{t}{t'} \right)^n \quad (VI - 13)$$

En prenant  $t'=24$  h, (VI - 12) et (VI - 13) deviennent :

$$a(t) = a(24h) \times \left( \frac{t}{24} \right)^n \quad (VI - 14)$$

$$P(t, T) = P(24h, T) \times \left( \frac{t}{24} \right)^n \quad (VI - 15)$$

Ainsi, en un point où  $n$  et la variable pluviométrique à 24 h,  $P(24$  h), sont connus, le calcul de  $P(t)$  est possible.

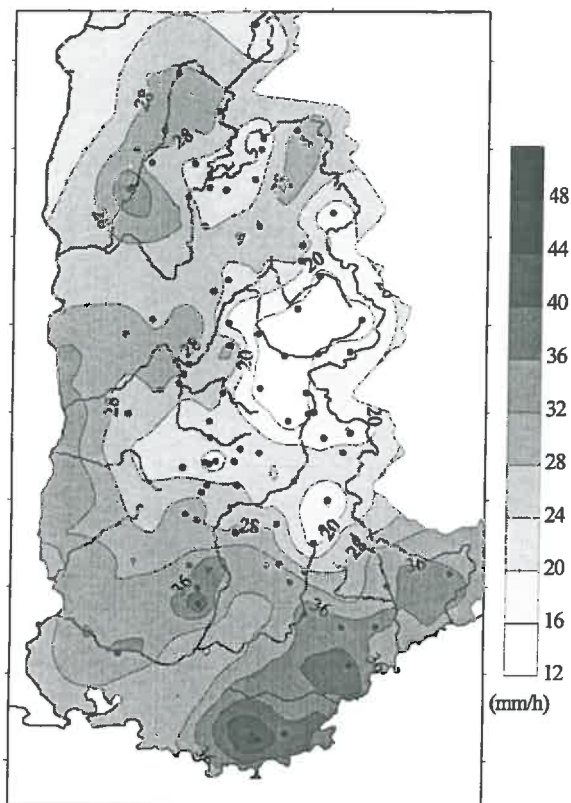
Or, les coefficients de Montana sont évalués avec précision au niveau des 90 pluviographes. Par krigeage, une estimation de ce champ peut être obtenue en tout point du domaine (cf. chapitre III).

D'autre part, chaque variable à 24 h (pluie décennale, centennale ou gradex) est bien connue au niveau de 553 points (pluviographes et pluviomètres), ce qui a permis d'obtenir des champs à 24 h fiables, par krigeage.

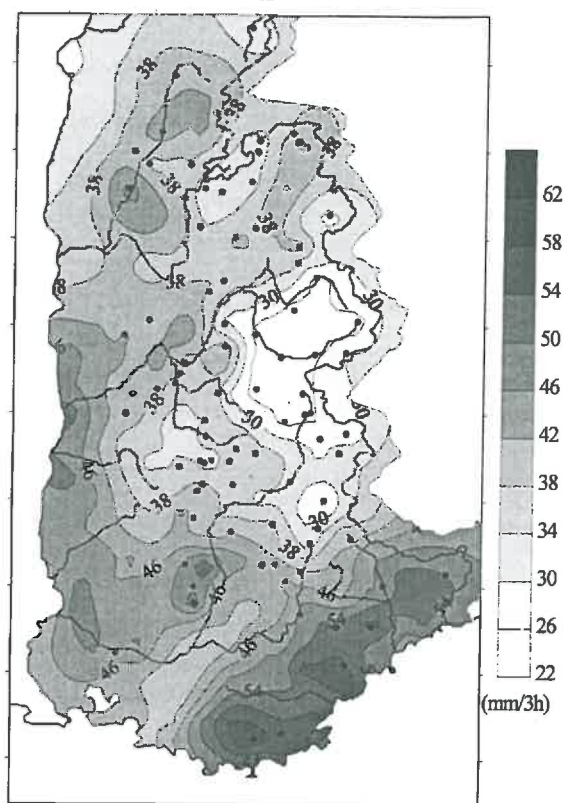
La méthode proposée ici est donc la suivante, en un point quelconque du domaine, la variable pluviométrique de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , peut être déterminée par une des formules (VI - 14) ou (VI - 15) à partir d'une estimation de  $P(24$  h) et de  $n$ , le coefficient de Montana, en ce point. Cette méthode peut être appliquée pour toute durée inférieure à 24 h.



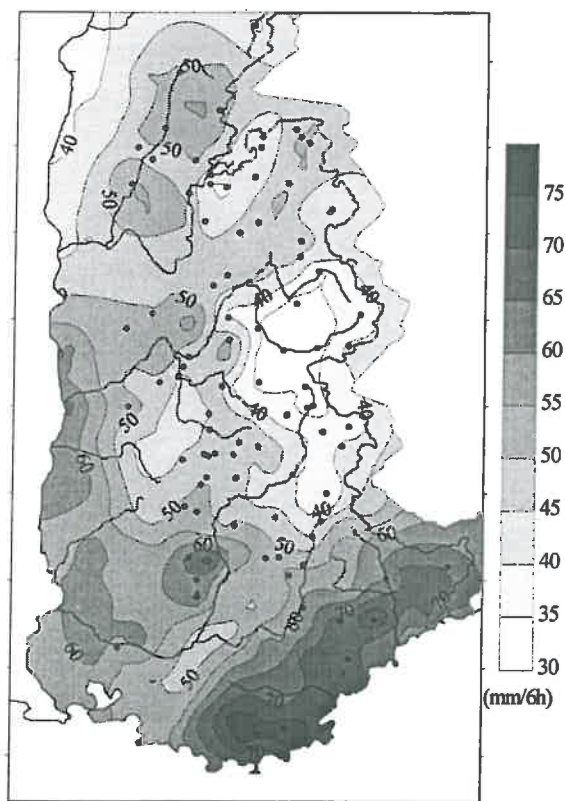
Pluies de 1 h et 10 ans



Pluies de 3 h et 10 ans



Pluies de 6 h et 10 ans



Pluies de 12 h et 10 ans

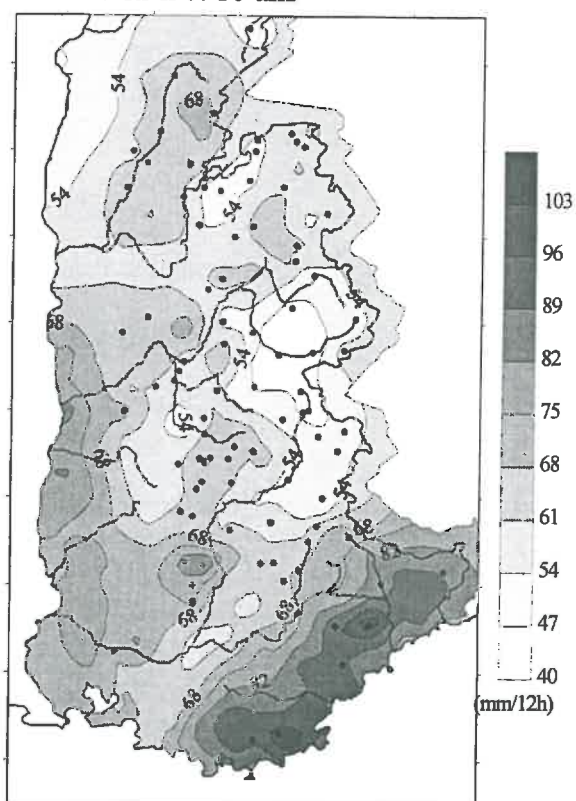


Figure VI 19 : Cartes des champs obtenues grâce au coefficient de Montana et à l'information  
à 24 h : pluies décennales de 1 h, 3 h, 6 h et 12h (pas de calcul : 5.25 km)

Cependant, il n'est pas possible d'obtenir une évaluation des écarts type de l'erreur d'estimation de façon simple. En effet, celle-ci est une combinaison des erreurs :

- sur l'estimation de  $P(24\text{ h})$  par krigeage,
- et sur l'estimation de  $n$  par krigeage.

Finalement, la Figure VI 19 donne des exemples des cartes obtenues pour les pluies décennales. Ces cartes, influencées par l'information à  $24\text{ h}$  présentent toujours les mêmes caractéristiques principales.

#### **VI.4.2. Cartographie se basant sur l'information horaire et journalière, pour des durées comprises entre 1 h et 24 h**

Cette méthode (LEBLOIS, 1997) s'appuie sur le fait que :

- les champs à  $24\text{ h}$  (pluies décennales, centennales et gradex) sont bien connus, vu le nombre important d'information pour ce pas de temps (553 postes en tout),
- les champs à  $1\text{ h}$  sont aussi assez bien connus, puisqu'ils ont une structure spatiale relativement simple, c'est ce que nous avons pu constater lors de la cartographie par krigeage.

Alors, chaque paramètre pluviométrique de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , peut être relié à ce même paramètre de pas temps de l'heure,  $P(1\text{ h})$ , et de la journée,  $P(24\text{ h})$ , par la formule :

$$P(t) = P(1h) \times \left( \frac{P(24h)}{P(1h)} \right)^{k(t)} \quad (VI - 16)$$

$k(t)$  est un coefficient qui est déterminé avec précision en chacun des 90 pluviographes :

$$k(t) = \frac{\ln\left(\frac{P(t)}{P(1h)}\right)}{\ln\left(\frac{P(24h)}{P(1h)}\right)} \quad (VI - 17)$$

Le coefficient  $k(t)$  est égal à 0 pour l'heure et à 1 pour 24 h. Dans la suite, nous étudions les propriétés des coefficients  $k(t)$  et leur répartition spatiale.

### VI.4.2.1. Propriétés des coefficients $k(t)$

Le Tableau VI 11 donne les moyennes et écarts type des coefficients  $k(t)$ , pour les différentes variables pluviométriques, pluies décennales, centennales et gradex.

De manière générale, les coefficients augmentent de 0 à 1 avec la durée, les écarts type étant relativement faibles devant les moyennes. Ces coefficients ont des caractéristiques similaires pour les pluies décennales et centennales. Pour les gradex, les écarts type sont légèrement plus élevés. Ces ordres de grandeur confirment les résultats trouvés par LEBLOIS (1997) sur la base d'un échantillon de 65 pluviographes des Alpes dépouillés dans le cadre du X<sup>e</sup> plan Etat Région (EDF DTG-CEMAGREF, 1995) et par WATREMEZ (1996) sur le TPG (Transect de Pluviographes pour l'analyse et la modélisation de Gradients d'intensités d'altitude) composé de 23 pluviographes des Pré-Alpes du Nord.

|                       |            | 1 h | 2 h   | 3 h   | 6 h   | 12 h  | 24 h |
|-----------------------|------------|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| Pluies<br>décennales  | Moyenne    | 0   | 0.200 | 0.337 | 0.554 | 0.782 | 1    |
|                       | Ecart type | 0   | 0.043 | 0.053 | 0.054 | 0.043 | 0    |
| Pluies<br>centennales | Moyenne    | 0   | 0.194 | 0.331 | 0.542 | 0.777 | 1    |
|                       | Ecart type | 0   | 0.047 | 0.059 | 0.060 | 0.043 | 0    |
| Gradex                | Moyenne    | 0   | 0.181 | 0.318 | 0.515 | 0.766 | 1    |
|                       | Ecart type | 0   | 0.059 | 0.078 | 0.083 | 0.057 | 0    |

*Tableau VI 11 : Moyennes et écarts type des coefficients  $k(t)$  [statistiques sur 90 pluviographes]*

Cependant, l'hypothèse de normalité des variables  $k(t)$ , avancée par les deux auteurs, n'est vérifiée sur notre échantillon que pour les pas de temps différents de 3 h. En effet, les tests classiques du Chi<sup>2</sup> et de Kolmogorov-Smirnoff (BAILLARGEON, 1989) rejettent l'hypothèse de normalité à 3 h, quelle que soit la variable (pluies décennales, centennales ou gradex). La représentation des valeurs observées de  $k(t)$  sur papier de Gauss vient confirmer cette affirmation (cf. Figure VI 20, exemple des  $k(t)$  pour les pluies décennales).



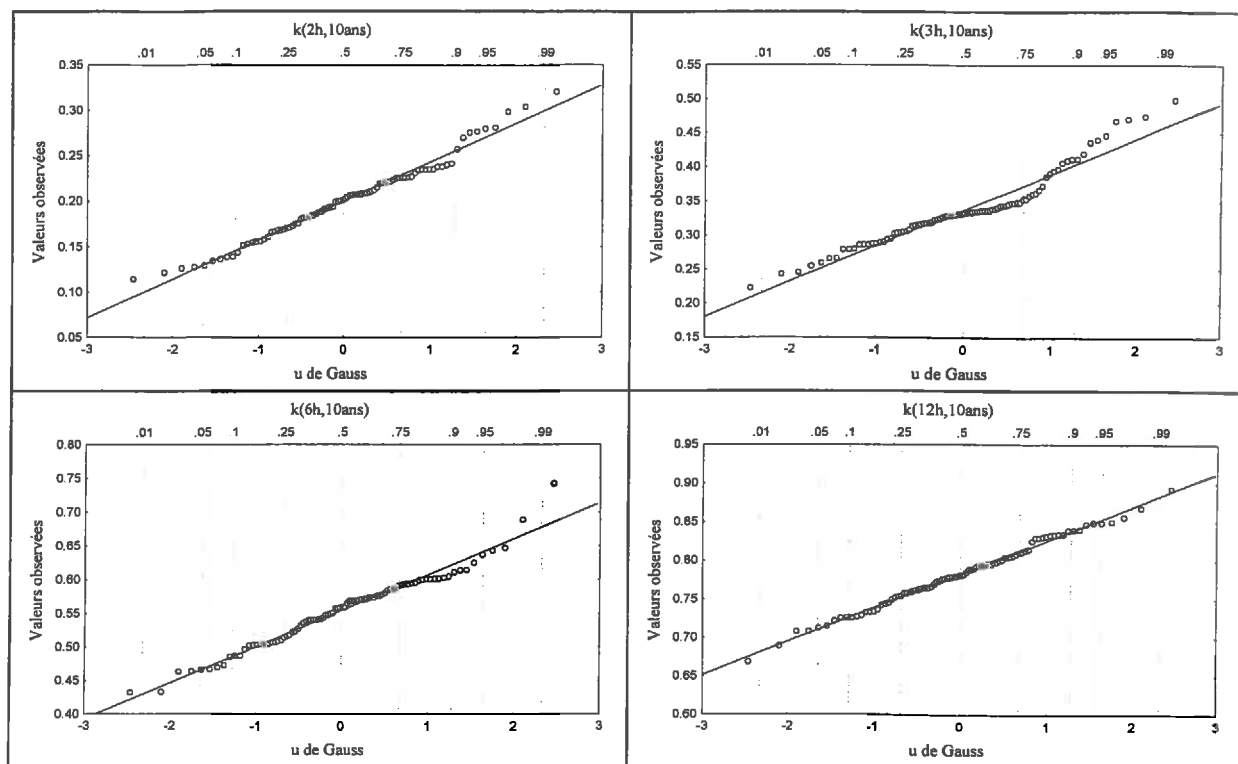


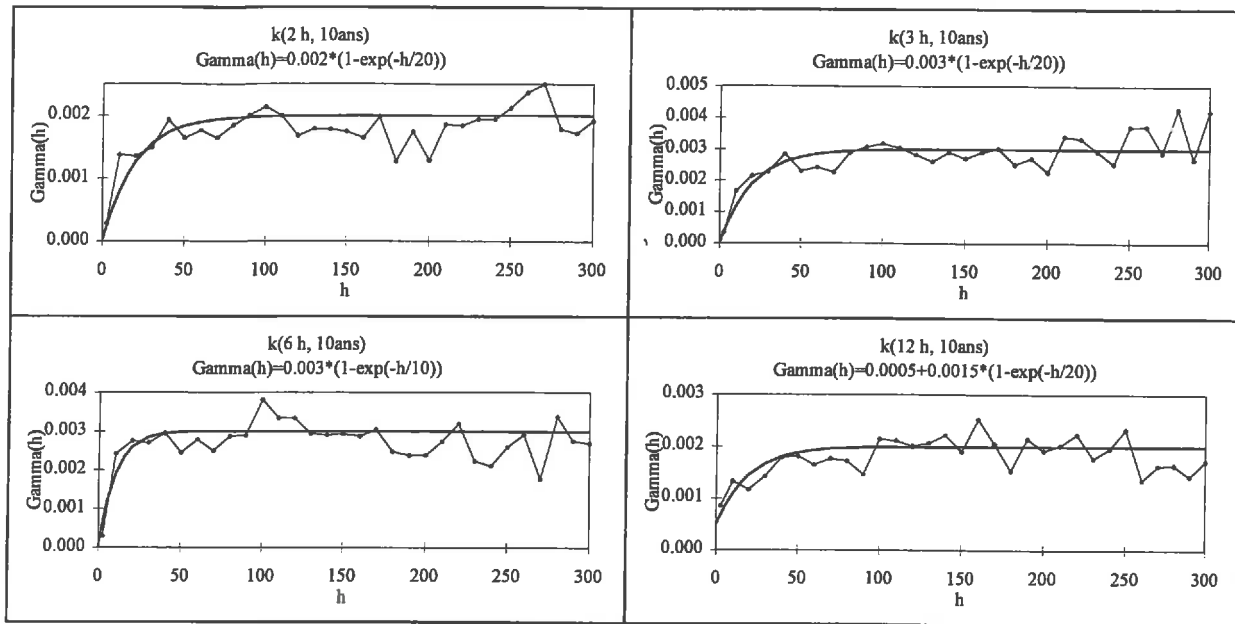
Figure VI 20 : Exemples de représentations des variables  $k(t)$  sur papier de Gauss :  $k(t)$  correspondant aux pluies décennales

#### VI.4.2.2. Variabilité spatiale des coefficients $k(t)$

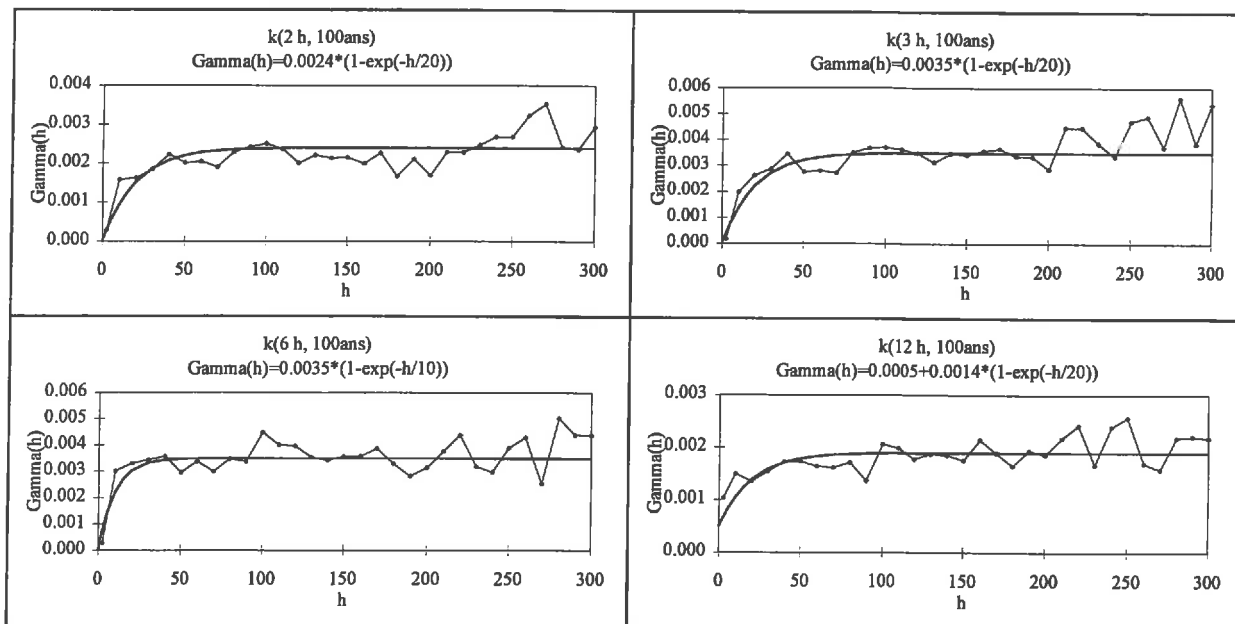
Les variogrammes expérimentaux des coefficients  $k(t)$  montrent que les phénomènes sont bien structurés dans l'espace. Les hypothèses de stationnarité d'ordre 1 et d'ordre 2 sont respectées (cf. Figure VI 21, Figure VI 22 et Figure VI 23). En effet, les allures sont du type exponentiel pépitique (cf. Tableau VI 12 et Tableau VI 13).

En général, les portées des phénomènes sont assez courtes (inférieures à 20 km), ce qui est significatif de phénomènes localisés dans l'espace. Les portées des variogrammes des coefficients  $k(t)$  correspondant aux pluies décennales et centennales sont les mêmes, on avait déjà vu que les caractéristiques statistiques des coefficients  $k(t)$  correspondant à ces variables étaient similaires. Par contre, pour les pas de temps inférieurs à 6 h, les portées des  $k(t)$  correspondant aux gradex sont différentes de celles des deux autres variables pluviométriques.

Finalement, la bonne structure spatiale des coefficients  $k(t)$  permet leur cartographie par krigeage ordinaire. Des exemples de cartes obtenues sont présentés en § VI.4.2.3



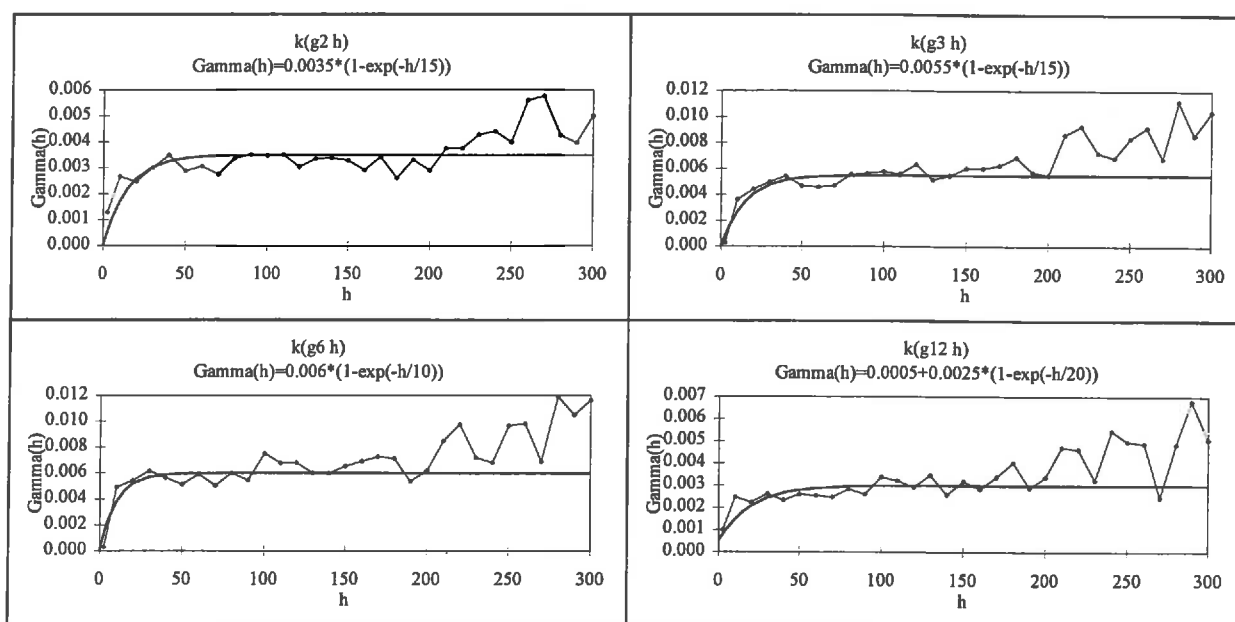
*Figure VI 21 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des coefficients  $k(t)$  pour les pluies décennales ( $h$  en km)*



*Figure VI 22 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des coefficients  $k(t)$  pour les pluies centennales ( $h$  en km)*

|                                      | Pluies décennales |        |        |        | Pluies centennales |        |        |        |
|--------------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|
| Pas de temps                         | 2 h               | 3 h    | 6 h    | 12 h   | 2 h                | 3 h    | 6 h    | 12 h   |
| Pépité (mm <sup>2</sup> )            | 0                 | 0      | 0      | 0.0005 | 0                  | 0      | 0      | 0.0005 |
| Portée (km)                          | 20                | 20     | 10     | 20     | 20                 | 20     | 10     | 20     |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 0.002             | 0.003  | 0.003  | 0.0015 | 0.0024             | 0.0035 | 0.0035 | 0.0014 |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 0.0018            | 0.0028 | 0.0029 | 0.0019 | 0.0022             | 0.0035 | 0.0036 | 0.0018 |

*Tableau VI 12 : Caractéristiques des variogrammes des coefficients  $k(t)$  pour les pluies décennales et centennales (modèles exponentiels)*



*Figure VI 23 : Variogrammes expérimentaux et théoriques des coefficients  $k(t)$  pour les gradex ( $h$  en km)*

|                                      | Gradex |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Pas de temps                         | 2 h    | 3 h    | 6 h    | 12 h   |
| Pépité (mm <sup>2</sup> )            | 0      | 0      | 0      | 0.0005 |
| Portée (km)                          | 15     | 15     | 10     | 20     |
| Palier (mm <sup>2</sup> )            | 0.0035 | 0.0055 | 0.006  | 0.0025 |
| Variance du champ (mm <sup>2</sup> ) | 0.0035 | 0.0061 | 0.0068 | 0.0032 |

*Tableau VI 13 : Caractéristiques des variogrammes des coefficients  $k(t)$  pour les gradex (modèles exponentiels)*

### VI.4.2.3. Conclusion : méthode envisagée et exemples de cartes de coefficients $k(t)$ et des champs pluviométriques

Pour une variable pluviométrique de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , strictement compris entre 1 h et 24 h, la méthode de cartographie repose sur les trois champs suivants :

- le champ de la variable à 1 h,  $P(1 \text{ h})$ ,
- le champ de la variable à 24 h,  $P(24 \text{ h})$ ,
- et le champ du coefficient  $k(t)$ .

Chacun de ces trois champs est déterminé par krigeage. En un point quelconque, une estimée de  $P(t)$  est obtenue par :

$$\hat{P}(t) = \hat{P}(1h) \times \left( \frac{\hat{P}(24h)}{\hat{P}(1h)} \right)^{\hat{k}(t)} \quad (VI - 18)$$

où  $\hat{P}(t)$  est l'estimée de  $P(t)$  par cette méthode,

$\hat{P}(1h)$  et  $\hat{P}(24h)$  sont les estimées de  $P(1 \text{ h})$  et de  $P(24 \text{ h})$  par krigeage,

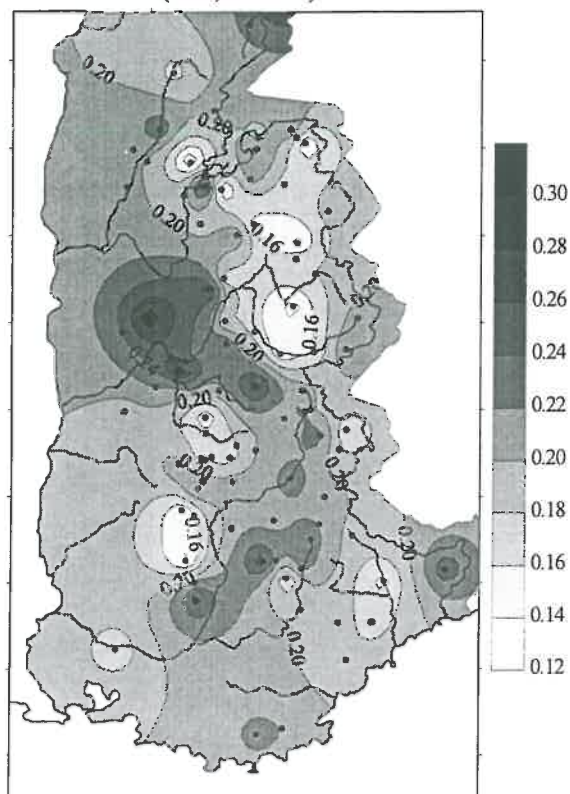
$\hat{k}(t)$  est l'estimée de  $k(t)$  par krigeage.

Cette méthode permet de retrouver en un pluviographe, la valeur réelle de  $P(t)$ , puisque le krigeage est un interpolateur exact (donc  $\hat{P}(1h)$ ,  $\hat{P}(24h)$  et  $\hat{k}(t)$  sont les valeurs réelles aux pluviographes).

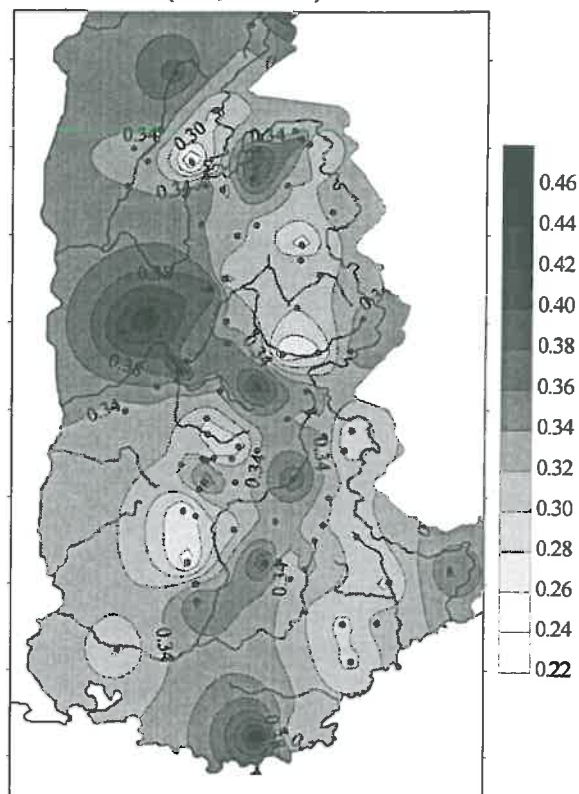
Par contre, il est difficile de donner un écart type de l'erreur d'estimation sur les valeurs estimées. En effet, cet écart type devrait intégrer les écarts type d'estimation par krigeage sur  $P(1 \text{ h})$ ,  $P(24 \text{ h})$  et  $k(t)$ .

La Figure VI 24 donne l'exemple des cartes des coefficients  $k(t)$  obtenues par krigeage pour les pluies décennales. Des exemples de cartes finales des champs sont représentés Figure VI 25 (exemples des pluies décennales). Ces cartes sont évidemment influencées par l'information à 24 h. Mais on retrouve toujours les caractéristiques principales des champs d'extrêmes déjà cités.

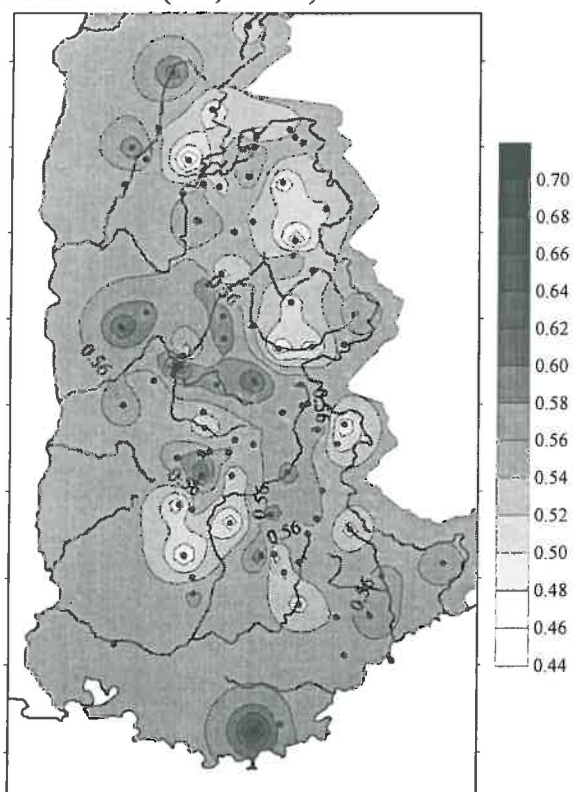
Coefficient  $k(2 \text{ h}, 10\text{ans})$



Coefficient  $k(3 \text{ h}, 10\text{ans})$



Coefficient  $k(6 \text{ h}, 10\text{ans})$



Coefficient  $k(12 \text{ h}, 10\text{ans})$

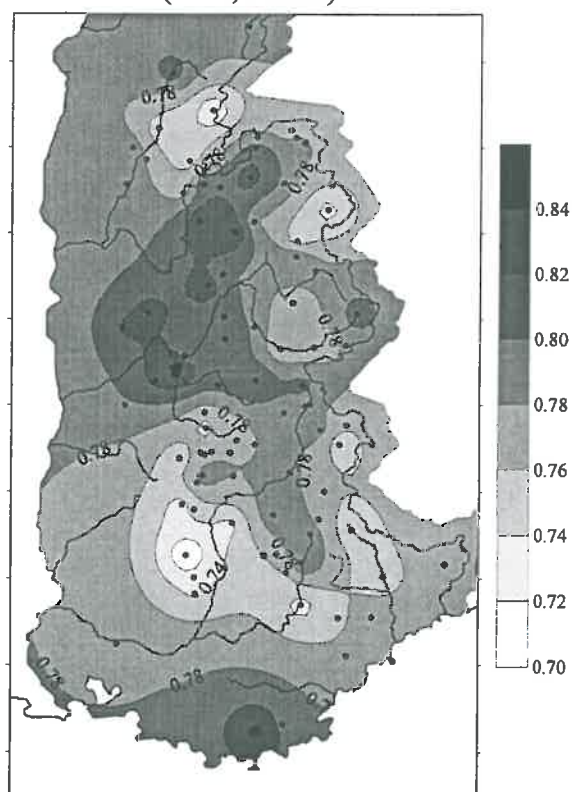
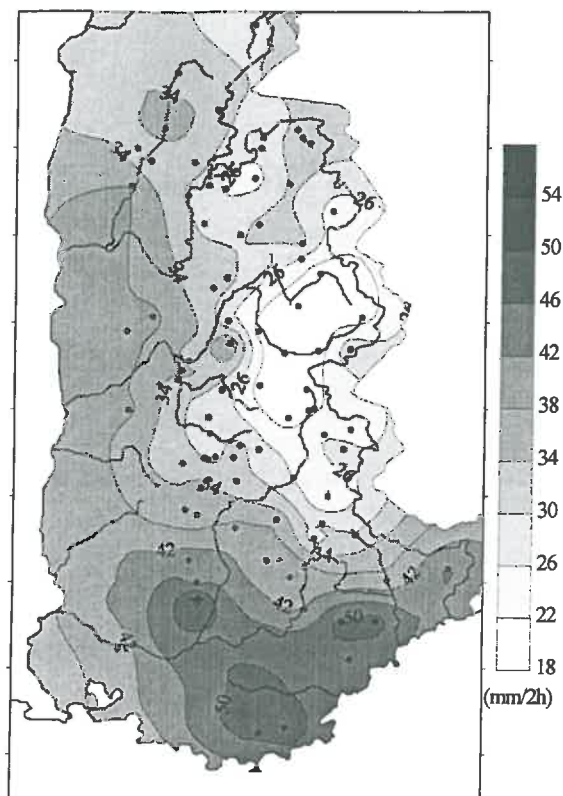


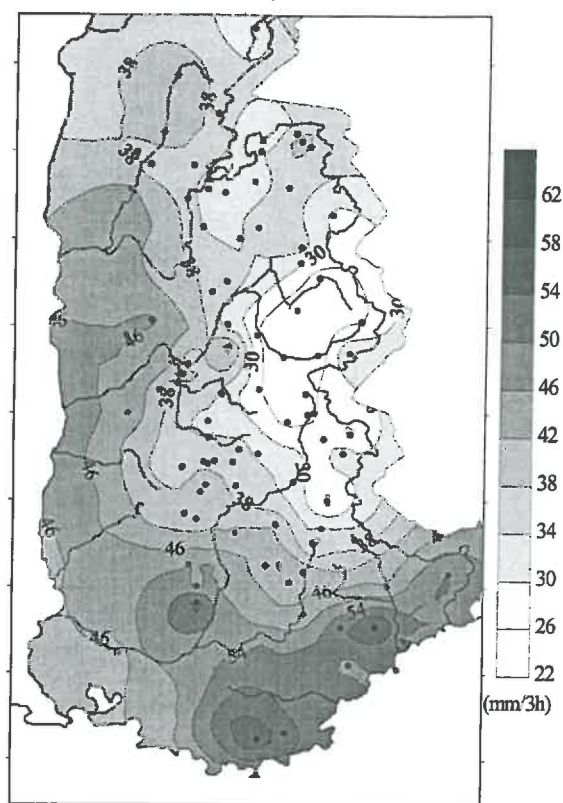
Figure VI 24 : Cartes des coefficients  $k(t)$  obtenues par krigeage pour les pluies décennales  
(pas de calcul : 5.25 km)



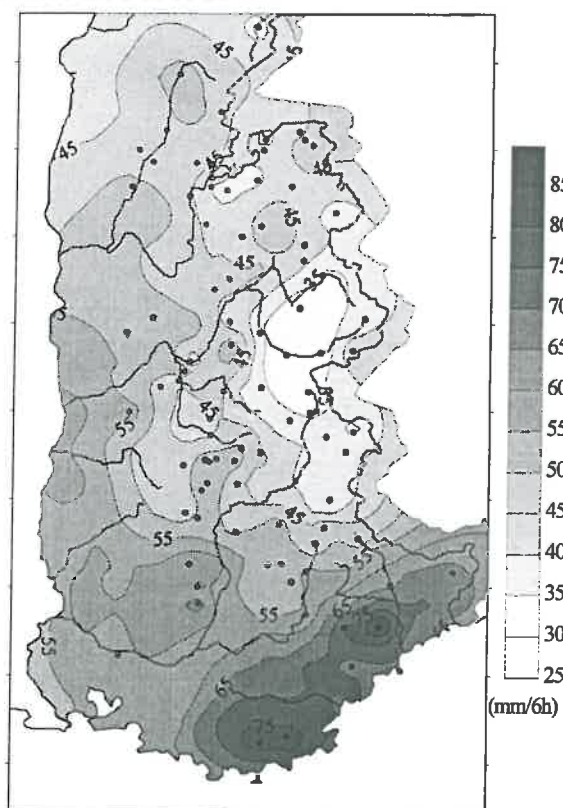
Pluies de 2 h et 10 ans



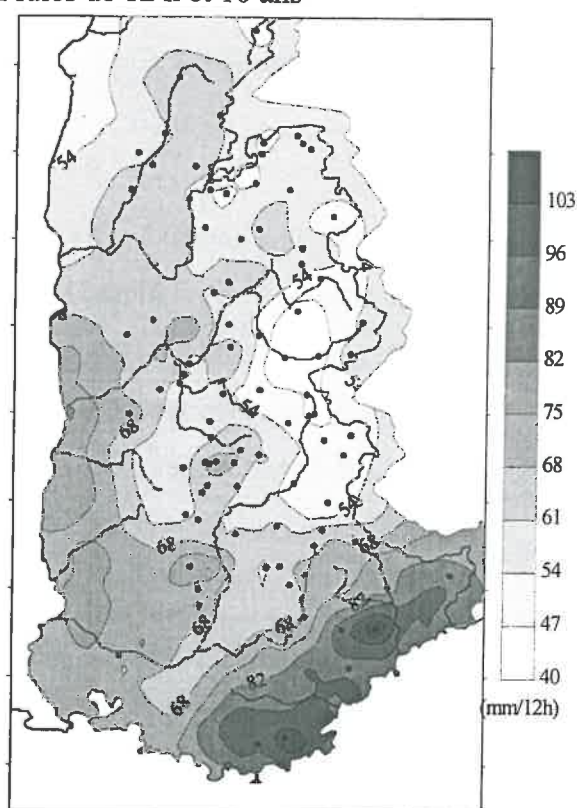
Pluies de 3 h et 10 ans



Pluies de 6 h et 10 ans



Pluies de 12 h et 10 ans



*Figure VI 25 : Cartes des champs obtenues grâce aux pas de temps horaire et journalier :  
pluies décennales de 2 h, 3 h, 6 h et 12 h (pas de calcul : 5.25 km)*

## **VI.5.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré différentes manières d'intégrer l'information pluviométrique disponible au pas de temps de la journée pour la cartographie de champs statistiques de pluies extrêmes à pas de temps inférieurs à 24 h.

D'abord, cette approche se base sur l'existence de relations simples liant les paramètres pluviométriques de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , aux paramètres à **24 h**,  $P(24\text{ h})$  : ce sont des relations linéaires. Seules les durées proches de **24 h**, c'est-à-dire supérieures à 6 h sont bien expliquées par l'information journalière.

Le cokrigage à l'aide de l'information à **24 h** est la première méthode de cartographie envisagée. Cependant, l'étude des cofluctuations entre variables pluviométriques de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , et celles du pas de temps de la journée,  $P(24\text{ h})$ , montre que seuls les pas de temps inférieurs à 6 h peuvent être cartographiés par cokrigage avec l'information à 24 h.

Ensuite, une méthode basée directement sur les relations linéaires entre paramètres de pas de temps  $t$  et paramètres à **24 h** a été définie. Elle consiste à appliquer l'équation de régression  $P(t) = a \times P(24\text{ h}) + b$  au champ à **24 h**, obtenu par krigeage, et à ajouter à ce champ celui des résidus de régression estimé par krigeage.

D'autre part, deux méthodes de cartographie basées sur la répartition spatiale des champs d'extrêmes à **24 h** sont envisagées. Elles utilisent des expressions de type puissance pour les variables  $P(t)$ .

La première est l'approche classique de type Montana, qui permet d'évaluer un champ de  $P(t)$  à partir du champ à **24 h** et du champ des coefficients de Montana.

La deuxième repose sur une expression de  $P(t)$  adaptée au cas des Alpes françaises. Dans ce cas,  $P(t)$  est fonction de  $P(1\text{ h})$  et  $P(24\text{ h})$  et d'un coefficient  $k(t)$ , lié au pas de temps (LEBLOIS, 1997).

Il reste donc à comparer les différentes méthodes de cartographie proposées.



## CHAPITRE VII

CONCLUSION A LA PARTIE B :

COMPARAISON DES DIFFERENTES  
METHODES DE CARTOGRAPHIE DES  
PLUIES EXTREMES



Ce dernier chapitre est destiné à conclure la partie B de ce rapport, qui concerne la cartographie des précipitations extrêmes dans les Alpes françaises. En effet, différentes méthodes de cartographie ont été envisagées dans les chapitres III à VI. Après avoir rappelé pour mémoire les principes de ces méthodes, nous nous attacherons à décrire la façon dont la validation croisée a été appliquée dans chaque cas. Cette technique nous permettra d'évaluer les performances de chaque méthode et enfin de les comparer pour la cartographie des différentes variables étudiées : pluies décennales, centennales, gradex et coefficients de Montana.

## **VII.1.Récapitulatif des méthodes de cartographie de champs statistiques d'extrêmes envisagées**

Dans les chapitres précédents, différentes méthodes de cartographie ont été introduites. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois grands ensembles, suivant l'information supplémentaire utilisée :

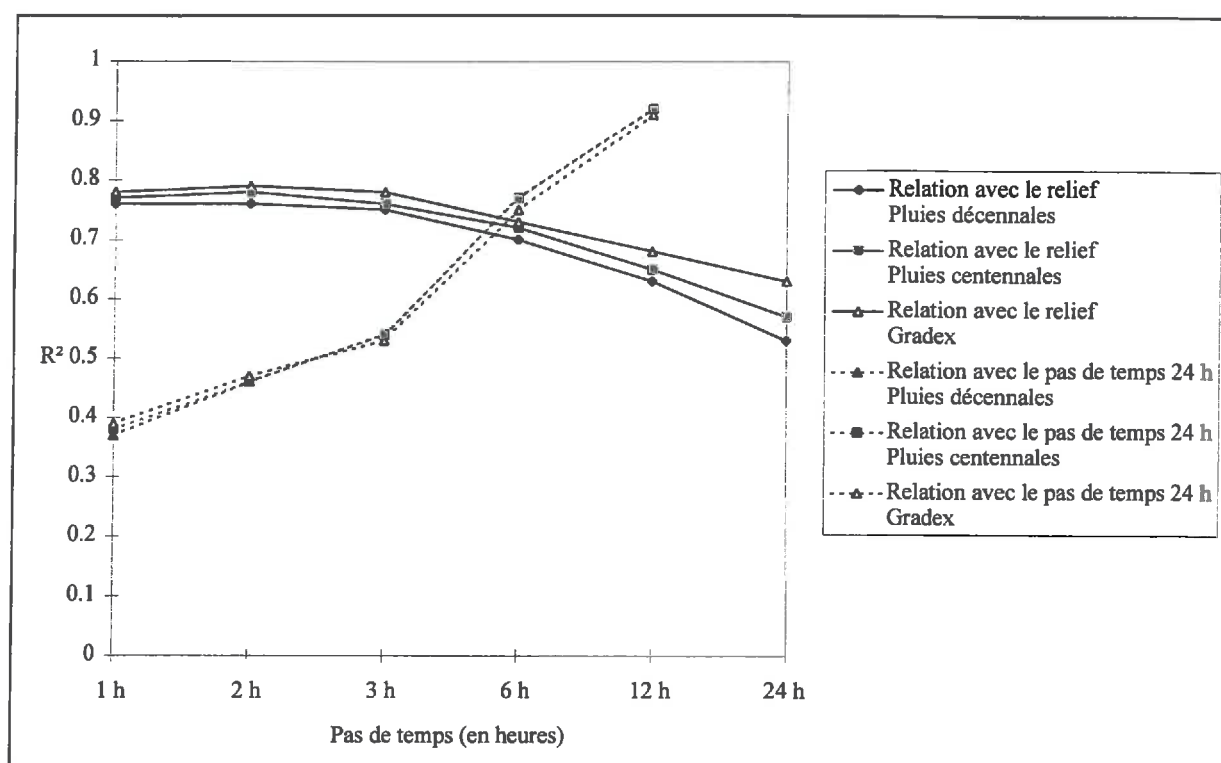
- dans le premier cas, on utilise *uniquement la structure spatiale des différentes variables pluviométriques* pour leur interpolation : c'est la cartographie par krigeage,
- ensuite, différentes méthodes intégrant *une information topographique* ont été définies,
- enfin, les dernières méthodes s'appuient sur les *relations entre paramètres pluviométriques de pas de temps  $t$  inférieur à 24 h et paramètres à 24 h*.

En effet, nous avons montré que les paramètres pluviométriques étaient assez bien expliqués par la topographie (cf. chapitre IV). En particulier, les pas de temps courts sont mieux expliqués que les pas de temps longs par les variables définies (cf. Figure VII 1).

D'autre part, des relations linéaires entre paramètres de pas de temps  $t$  et paramètres à 24 h ont été mises en évidence (cf. chapitre VII). Dans ce cas, ce sont les pas de temps proches de 24 h qui sont le mieux expliqués par celui de 24 h (cf. Figure VII 1), c'est-à-dire les pas de temps supérieurs à 6 h.

La comparaison des coefficients de détermination dans les deux cas montre d'ailleurs que ce sont les relations avec le relief qui expliquent mieux les paramètres pluviométriques de pas de temps inférieur à 6 h. Les relations avec le pas de temps de 24 h sont plus pertinentes pour des durées supérieures à 6 h (cf. Figure VII 1).

Le Tableau VII 1 rappelle, pour mémoire, les principales caractéristiques des 7 méthodes de cartographie proposées.



*Figure VII 1 : Evolution, en fonction du pas de temps, du coefficient de détermination  $R^2$  entre variables pluviométriques et variables topographiques d'une part et entre variables pluviométriques de pas de temps  $t$  et variable pluviométrique à 24 h d'autre part*

| Méthode                                                       | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Variables cartographiées                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①<br><i>Interpolation par krigeage</i>                        | Méthode utilisant la structure spatiale des variables<br><br><i>Carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Pour tous les pas de temps :<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul><br>Coefficient de Montana |
| ②<br><i>Régression avec le relief et krigeage des résidus</i> | Somme des champs obtenus par :<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• application -en tout point du domaine- de l'équation de régression multiple liant un paramètre pluviométrique et des paramètres topographiques</li> <li>• krigeage des résidus de régression</li> </ul><br><i>Information supplémentaire : relief</i><br><i>Carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i>                                                      | Pour tous les pas de temps :<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul><br>Coefficient de Montana |
| ③<br><i>Cokrigeage avec le relief</i>                         | Méthode utilisant<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• la structure spatiale du paramètre pluviométrique à cartographier et de la variable auxiliaire, tirée du relief (estimée de la variable pluviométrique par régression avec les paramètres topographiques)</li> <li>• et la cofluctuation de ces deux variables</li> </ul><br><i>Information supplémentaire : relief</i><br><i>Carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i> | Pour tous les pas de temps :<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul><br>Coefficient de Montana |
| ④<br><i>Cokrigeage avec l'information à 24 h</i>              | Méthode utilisant<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• la structure spatiale du paramètre pluviométrique à cartographier P(t) et de la variable auxiliaire : ce paramètre à 24 h, P(24 h)</li> <li>• et la cofluctuation de ces deux variables</li> </ul><br><i>Information supplémentaire : 553 postes à 24 h</i><br><i>Carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i>                                                             | Pour les pas de temps inférieurs à 6 h :<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul>               |

| Méthode                                                  | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Variables cartographiées                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ⑤<br><b>Régression avec 24 h et krigeage des résidus</b> | <p>Somme des champs obtenus par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• application -en tout point du domaine- de l'équation de régression liant <math>P(t)</math> et <math>P(24\text{ h})</math> au champ de <math>P(24\text{ h})</math> obtenu par krigeage</li> <li>• krigeage des résidus de régression</li> </ul> <p><i>Information supplémentaire : champ à 24 h</i><br/> <i>Pas de carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i></p> | <p>Pour les pas de temps inférieurs à 24 h</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul>           |
| ⑥<br><b>Coefficient de Montana</b>                       | <p>Application -en tout point du domaine- de l'équation : <math>P(t) = P(24\text{ h}) \times \left(\frac{t}{24}\right)^n</math> au champ de <math>P(24\text{ h})</math> et au champ des coefficients de Montana, <math>n</math>, obtenus par krigeage</p> <p><i>Information supplémentaire : champ à 24 h et champ des coefficients de Montana</i><br/> <i>Pas de carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i></p>                                | <p>Pour les pas de temps inférieurs à 24 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul>         |
| ⑦<br><b>Coefficients <math>k(t)</math></b>               | <p>Application -en tout point du domaine- de l'équation : <math>P(t) = P(1\text{ h}) \times \left(\frac{P(24\text{ h})}{P(1\text{ h})}\right)^{k(t)}</math> aux champs à 1 h et à 24 h obtenus par krigeage</p> <p><i>Information supplémentaire : champs à 24 h et à 1 h et champ des coefficients <math>k(t)</math></i><br/> <i>Pas de carte des écarts type de l'erreur d'estimation</i></p>                                                         | <p>Pour les pas de temps compris entre 1 h et 24 h :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pluies décennales</li> <li>• pluies centennales</li> <li>• gradex</li> </ul> |

Tableau VII 1 : Récapitulatif des différentes méthodes de cartographie envisagées ( $P(t)$  désigne une variable pluviométrique, pluies décennales, centennales ou gradex, de pas de temps  $t$ )

## **VII.2.Application de la validation croisée aux différentes méthodes de cartographie**

Ce paragraphe est destiné à préciser la manière dont la validation croisée a été appliquée à chacune des méthodes de cartographie. Le principe de cette étude est de comparer les différentes méthodes, c'est-à-dire leur capacité à reconstituer les champs. La validation croisée, telle que nous l'avons appliquée, consiste à séparer les données en deux sous réseaux et à utiliser un de ces deux sous réseaux pour le calcul et le deuxième pour la validation.

De manière générale, nous ne remettons pas en cause les "modèles" choisis, i.e. les variogrammes théoriques ajustés ou les équations de régression. Par exemple, le krigeage est appliqué avec les modèles théoriques de variogramme ajustés lors des études préliminaires et nous ne redéfinissons pas des variogrammes théoriques qui s'ajusteraient aux données d'un sous réseau. De même une équation de régression entre variables n'est pas remise en cause : elle est appliquée telle quelle, sans changer les coefficients de régression.

D'autre part, lorsque l'on cartographie une variable pluviométrique donnée, ce sont les informations se rapportant à cette variable qui sont supposées moins bien connues, et non pas les informations se rapportant à la variable auxiliaire.

Ainsi, les informations concernant le relief utilisées dans les méthodes ② et ③ sont données avec la même densité que pour les méthodes complètes.

De même, pour les méthodes utilisant l'information à 24 h (méthodes ④, ⑤, ⑥ et ⑦), on teste l'apport d'une information fournie par les pluviomètres. Pour la validation, les données concernant l'ensemble des pluviomètres sont toujours supposées connues et ce sont celles concernant les pluviographes qui sont divisées en deux (aussi bien au pas de temps  $t$  à cartographier qu'au pas de temps de 24 h ou de 1 h pour la méthode ⑦).

Le Tableau VII 2 résume les différentes modifications apportées aux procédures de calcul par rapport aux méthodes d'origine pour appliquer la validation croisée suivant ces principes.



| Méthode                                                       | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ① <i>Interpolation par krigeage</i>                           | Données d'entrée du krigeage : valeurs de la variable pluviométrique <i>sur un sous réseau</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ②<br><i>Régression avec le relief et krigeage des résidus</i> | <p>Somme des champs obtenus par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• application -en tout point du domaine- de l'équation de régression multiple liant un paramètre pluviométrique et des paramètres topographiques</li> <li>• krigeage des résidus de régression avec comme données d'entrée les valeurs des résidus <i>sur un sous réseau</i></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| ③<br><i>Cokrigeage avec le relief</i>                         | <p>Données d'entrée du cokrigeage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valeurs de la variable pluviométrique <i>sur un sous réseau</i></li> <li>• données concernant le relief, avec la densité initiale (pas de 10.5 km)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ④<br><i>Cokrigeage avec l'information à 24 h</i>              | <p>Données d'entrée du cokrigeage, pour la cartographie de P(t) avec <math>t &lt; 24</math> h :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valeurs de la variable pluviométrique P(t) <i>sur un sous réseau de pluviographes (45 postes)</i></li> <li>• données concernant P(24 h) <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ <i>sur un sous réseau de pluviographes</i></li> <li>◆ <i>et le réseau de pluviomètres (soit en <math>45+463=508</math> postes)</i></li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                 |
| ⑤<br><i>Régression avec 24 h et krigeage des résidus</i>      | <p>Somme des champs obtenus par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• application -en tout point du domaine- de l'équation de régression liant P(t) et P(24 h) au champ de P(24 h) <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ krigeage de P(24 h) avec comme données d'entrée les valeurs de P(24 h) <i>sur un sous réseau de pluviographes</i> et sur le réseau de pluviomètres <i>(soit en <math>45+463=508</math> postes)</i></li> </ul> </li> <li>• krigeage des résidus de régression avec comme données d'entrée les valeurs des résidus <i>sur un sous réseau de pluviographes (45 postes)</i></li> </ul> |
| ⑥<br><i>Coefficient de Montana</i>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• krigeage des coefficients de Montana avec comme données d'entrée les valeurs des coefficients <i>sur un sous réseau de pluviographes (45 postes)</i></li> <li>• krigeage de P(24 h) avec comme données d'entrée les valeurs de P(24 h) <i>sur un sous réseau de pluviographes</i> et sur le réseau de pluviomètres <i>(soit en <math>45+463=508</math> postes)</i></li> </ul>                                                                                                                                                                                                  |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | <p>Puis application -en tout point du domaine- de l'équation :</p> $P(t) = P(24h) \times \left(\frac{t}{24}\right)^n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <p>⑦<br/><i>Coefficients k(t)</i></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• krigeage des coefficients k(t) avec comme données d'entrée les valeurs de k(t) <i>sur un sous réseau de pluviographes (45 postes)</i></li> <li>• krigeage de P(1 h) avec comme données d'entrée les valeurs de P(1 h) <i>sur un sous réseau de pluviographes (45 postes)</i></li> <li>• krigeage de P(24 h) avec comme données d'entrée les valeurs de P(24 h) <i>sur un sous réseau de pluviographes</i> et sur le réseau de pluviomètres <i>(soit en 45+463=508 postes)</i></li> </ul> <p>Puis application -en tout point du domaine- de l'équation :</p> $P(t) = P(1h) \times \left(\frac{P(24h)}{P(1h)}\right)^{k(t)}$ |

*Tableau VII 2 : Application de la validation croisée pour chaque méthode de cartographie (ce qui change par rapport à la méthode initiale est noté en italique, P(t) désigne une variable pluviométrique, pluies décennales, centennales ou gradex, de pas de temps t)*

D'autre part, toutes les méthodes ont été comparées pour un pas de calcul de 5.25 km (multiple de 525 m, pas du MNT). Ce choix résulte de problèmes informatiques rencontrés lors de l'application du cokrigeage : c'était le pas le plus faible pour lequel les calculs étaient possibles avec le logiciel dont nous disposions. Pour pouvoir comparer les différentes méthodes de manière objective, nous avons donc utilisé ce pas pour tous les calculs.

Cependant, un pas de 5.25 km est tout à fait acceptable. En effet, SLIMANI (1985) utilisait un pas de 4 km pour la région cévenole. De plus, LABORDE (1984) montre que l'erreur résiduelle pour des pas de cette taille est plus faible que l'incertitude sur la connaissance des paramètres pluviométriques extrêmes. Il serait donc illusoire de vouloir améliorer la cartographie en utilisant un pas plus petit.

### **VII.3. Etude des performances des différentes méthodes de cartographie par validation croisée**

L'objet de cette partie est d'évaluer les performances, par validation croisée, de chaque méthode pour les variables pluies décennales, centennales et gradex (les résultats pour le coefficient de Montana font l'objet d'un paragraphe spécial, cf. § VII.5).

#### **VII.3.1. Comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et estimées**

Dans un premier temps, les moyennes et les écarts type des échantillons de valeurs réelles sont comparés aux moyennes et écarts type des échantillons des valeurs estimées (cf. Tableau VII 3, Tableau VII 4 et Tableau VII 5). Cette approche vise à repérer une méthode qui donnerait des résultats aberrants.

|                 | 1 h  |          | 2 h  |          | 3 h  |          | 6 h  |          | 12 h |          | 24 h |          |
|-----------------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
|                 | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ |
| Valeurs réelles | 25.7 | 7.3      | 32.1 | 8.6      | 37.3 | 9.7      | 47.9 | 12.4     | 61.9 | 15.1     | 83.7 | 18.5     |
| ①               | 25.7 | 6.4      | 32.2 | 7.6      | 37.5 | 8.8      | 48.3 | 11.2     | 61.6 | 9.2      | 83.6 | 14.7     |
| ②               | 26.3 | 6.4      | 33.3 | 7.3      | 38.8 | 8.2      | 50.8 | 10.9     | 63.8 | 12.6     | 84.9 | 14.7     |
| ③               | 26.0 | 6.7      | 32.5 | 7.9      | 37.8 | 8.9      | 48.6 | 11.1     | 61.5 | 11.3     | 84.1 | 14.9     |
| ④               | 25.6 | 6.5      | 32.0 | 7.7      | 37.3 | 8.8      | 48.1 | 11.2     |      |          |      |          |
| ⑤               | 25.6 | 5.5      | 31.9 | 6.6      | 37.2 | 7.5      | 47.8 | 9.3      | 61.7 | 10.5     |      |          |
| ⑥               | 25.3 | 6.9      | 32.4 | 7.9      | 37.5 | 8.6      | 48.1 | 10.0     | 61.9 | 11.7     |      |          |
| ⑦               |      |          | 32.2 | 7.4      | 37.6 | 8.2      | 48.0 | 9.5      | 62.1 | 11.0     |      |          |

**Tableau VII 3 :** Comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et estimées pour les pluies décennales (valeurs en mm par pas de temps, pas de la maille de calcul : 5.25 km)

|                 | 1 h  |          | 2 h  |          | 3 h  |          | 6 h  |          | 12 h |          | 24 h  |          |
|-----------------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|-------|----------|
|                 | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m     | $\sigma$ |
| Valeurs réelles | 37.2 | 11.3     | 46.1 | 13.4     | 53.6 | 15.1     | 68.4 | 19.0     | 89.1 | 23.1     | 121.0 | 28.6     |
| ①               | 37.3 | 10.0     | 46.3 | 11.9     | 54.0 | 13.7     | 69.2 | 17.4     | 88.8 | 18.7     | 121.1 | 23.7     |
| ②               | 38.1 | 9.9      | 48.0 | 11.5     | 55.9 | 13.0     | 73.9 | 16.9     | 94.8 | 20.1     | 122.5 | 22.9     |
| ③               | 37.6 | 10.4     | 46.7 | 12.3     | 54.4 | 14.0     | 69.7 | 17.5     | 89.4 | 18.9     | 121.9 | 23.7     |
| ④               | 37.1 | 10.1     | 46.1 | 12.0     | 53.7 | 13.8     | 68.7 | 17.6     |      |          |       |          |
| ⑤               | 36.7 | 8.6      | 45.6 | 10.1     | 53.0 | 11.8     | 67.7 | 14.4     | 88.0 | 16.2     |       |          |
| ⑥               | 36.3 | 10.2     | 46.4 | 11.9     | 53.7 | 12.9     | 69.0 | 15.1     | 88.7 | 18.0     |       |          |
| ⑦               |      |          | 46.2 | 11.5     | 53.8 | 12.8     | 68.2 | 14.6     | 88.7 | 17.2     |       |          |

*Tableau VII 4 : Comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et estimées pour les pluies centennales (valeurs en mm par pas de temps, pas de la maille de calcul : 5.25 km)*

|                 | 1 h |          | 2 h |          | 3 h |          | 6 h |          | 12 h |          | 24 h |          |
|-----------------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|------|----------|------|----------|
|                 | m   | $\sigma$ | m   | $\sigma$ | m   | $\sigma$ | m   | $\sigma$ | m    | $\sigma$ | m    | $\sigma$ |
| Valeurs réelles | 4.9 | 1.7      | 6.0 | 2.1      | 6.9 | 2.3      | 8.7 | 2.9      | 11.6 | 3.5      | 15.9 | 4.4      |
| ①               | 4.9 | 1.5      | 6.0 | 1.8      | 7.0 | 2.1      | 8.9 | 2.7      | 11.5 | 2.8      | 15.9 | 4.1      |
| ②               | 5.0 | 1.5      | 6.2 | 1.8      | 7.2 | 2.0      | 9.1 | 2.6      | 12.6 | 3.1      | 16.1 | 3.7      |
| ③               | 4.9 | 1.6      | 6.1 | 1.9      | 7.1 | 2.2      | 8.9 | 2.7      | 11.6 | 2.9      | 15.9 | 4.1      |
| ④               | 4.9 | 1.5      | 6.0 | 1.9      | 7.0 | 2.1      | 8.8 | 2.7      |      |          |      |          |
| ⑤               | 4.7 | 1.3      | 5.8 | 1.5      | 6.7 | 1.8      | 8.5 | 2.2      | 11.2 | 2.5      |      |          |
| ⑥               | 4.7 | 1.4      | 6.0 | 1.7      | 6.9 | 1.9      | 8.9 | 2.2      | 11.4 | 2.7      |      |          |
| ⑦               |     |          | 6.0 | 1.8      | 6.9 | 1.9      | 8.6 | 2.2      | 11.3 | 2.6      |      |          |

*Tableau VII 5 : Comparaison statistique descriptive des valeurs réelles et estimées pour les gradex (valeurs en mm par pas de temps, pas de la maille de calcul : 5.25 km)*

Les moyennes sont bien estimées par toutes les méthodes. Il n'y a que la méthode ② (régression avec le relief et krigeage des résidus) qui surestime légèrement la moyenne.

Les écarts type, quant à eux, sont systématiquement sous-estimés. C'est la méthode ⑤ (régression avec 24 h et krigeage des résidus) qui a toujours les écarts type les plus faibles. Les différentes méthodes géostatistiques (① krigeage, ③ cokrigeage avec le relief, ④

cokrigage avec l'information à 24 h) donnent les écarts type les plus proches des écarts type réels. Cependant, aucune méthode ne peut être éliminée parce qu'elle aurait des écarts type trop différents des écarts type réels.

### VII.3.2. Etude des coefficients de détermination $R^2$ pour chaque méthode

Les coefficients d'efficience  $E$  sont toujours du même ordre de grandeur que les coefficients de détermination  $R^2$ . Ces coefficients sont donc toujours compris entre 0 et 1, ce qui montre que les estimations ne présentent pas de "grosses erreurs" (cf. introduction à la partie B (§ 2, p106) et Tableau VII 6).

|            | ①    | ②    | ③    | ④    | ⑤    | ⑥    | ⑦    |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1h 10ans   | 0.67 | 0.74 | 0.67 | 0.65 | 0.69 | 0.64 |      |
| 2h 10ans   | 0.65 | 0.69 | 0.64 | 0.64 | 0.71 | 0.66 | 0.68 |
| 3h 10ans   | 0.59 | 0.63 | 0.59 | 0.59 | 0.69 | 0.68 | 0.66 |
| 6h 10ans   | 0.48 | 0.44 | 0.48 | 0.54 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 12h 10ans  | 0.38 | 0.41 | 0.39 |      | 0.61 | 0.62 | 0.59 |
| 24h 10ans  | 0.66 | 0.64 | 0.67 |      |      |      |      |
| 1h 100ans  | 0.68 | 0.75 | 0.68 | 0.66 | 0.70 | 0.67 |      |
| 2h 100ans  | 0.66 | 0.70 | 0.65 | 0.65 | 0.71 | 0.69 | 0.68 |
| 3h 100ans  | 0.61 | 0.65 | 0.61 | 0.60 | 0.70 | 0.70 | 0.67 |
| 6h 100ans  | 0.50 | 0.36 | 0.52 | 0.56 | 0.70 | 0.70 | 0.66 |
| 12h 100ans | 0.40 | 0.33 | 0.39 |      | 0.64 | 0.65 | 0.62 |
| 24h 100ans | 0.68 | 0.67 | 0.69 |      |      |      |      |
| gradex 1h  | 0.68 | 0.76 | 0.69 | 0.66 | 0.69 | 0.69 |      |
| gradex 2h  | 0.66 | 0.72 | 0.65 | 0.65 | 0.71 | 0.72 | 0.68 |
| gradex 3h  | 0.63 | 0.68 | 0.63 | 0.61 | 0.70 | 0.72 | 0.68 |
| gradex 6h  | 0.55 | 0.58 | 0.55 | 0.59 | 0.71 | 0.72 | 0.68 |
| gradex 12h | 0.50 | 0.28 | 0.47 |      | 0.68 | 0.70 | 0.67 |
| gradex 24h | 0.68 | 0.71 | 0.68 |      |      |      |      |

Tableau VII 6 : Coefficients d'efficience  $E$  pour les différentes méthodes et les variables pluies décennales, centennales et gradex

C'est finalement grâce aux coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et interpolées que nous jugeons des performances de chaque méthode pour les variables pluies

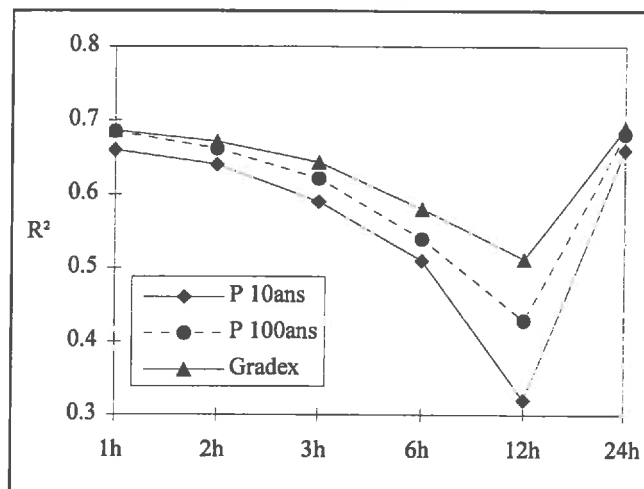
décennales, centennales et gradex. Ainsi, les coefficients de détermination sont représentés sous forme de graphique en fonction du pas de temps pour les trois variables.

### ① Interpolation par krigeage

Dans ce cas, les coefficients de détermination diminuent avec le pas de temps jusqu'à 12 h. Ils sont supérieurs à 0.6 jusqu'à 3 h, pour les trois variables.

A 24 h, le champ est bien reconstitué, ce qui s'explique par la densité d'information de pluie pour ce pas de temps.

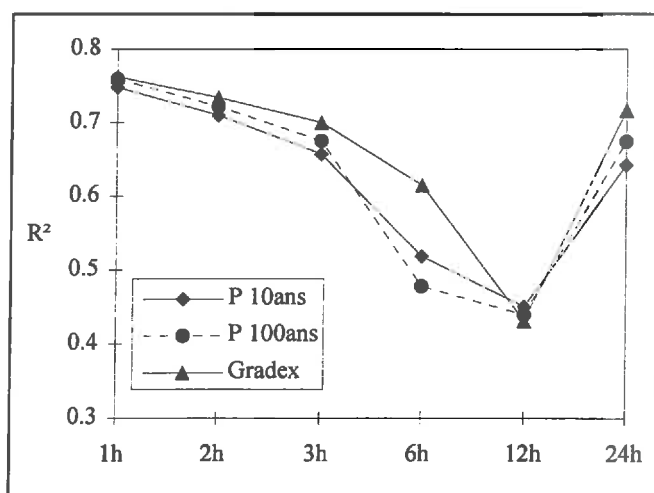
D'autre part, ce sont les gradex qui sont les mieux estimés et les pluies décennales le moins bien.



*Figure VII 2 : Résultats de validation croisée  
pour l'interpolation par krigeage*

### ② Régression avec le relief et krigeage des résidus

Cette méthode repose sur les relations entre paramètres pluviométriques et paramètres topographiques. Nous avons vu que le pourcentage de variance expliquée par les paramètres topographiques diminue avec le pas de temps (cf. Figure VII 1).

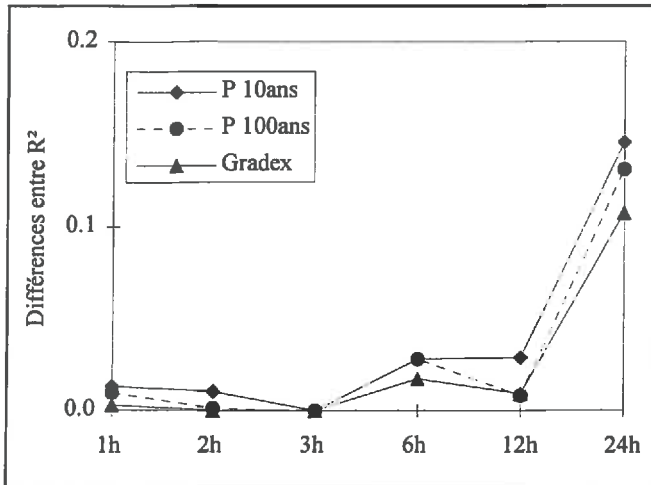


*Figure VII 3 : Résultats de validation croisée  
pour la méthode régression avec le relief et  
krigeage des résidus*

C'est aussi le cas pour l'application de la méthode : la validation croisée montre que la qualité des estimations diminue avec le pas de temps, jusqu'à 12 h.

Par contre, le champ à 24 h est bien reconstitué, ce qui s'explique à nouveau par la densité de l'information pluviométrique pour ce pas de temps.

Pour distinguer l'apport de la composante "relief" et de la composante "résidus de régression", nous avons appliqué la validation croisée sans ajouter le champ des résidus, c'est-à-dire aux champs obtenus par régression multiple avec le relief.

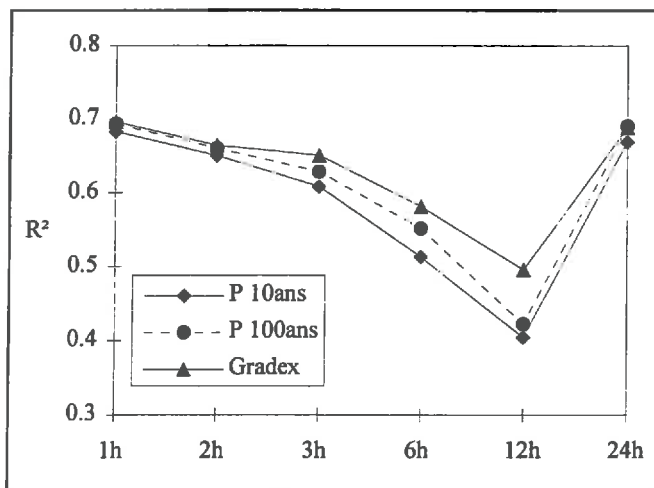


**Figure VII 4 :** Différences entre coefficients de détermination obtenus (i) pour la méthode régression avec le relief et krigeage des résidus, et (ii) pour cette même méthode mais sans ajout du champ des résidus

Cette étude montre que le champ des résidus n'apporte pas de réelle amélioration dans l'estimation des paramètres pour des pas de temps différents de 24 h. En effet, les différences entre coefficients  $R^2$  varient entre 0 et 0.03 (cf. Figure VII 4).

A 24 h par contre, le pourcentage de variance expliquée augmente de 11 % pour les gradex et de 15 % pour les pluies décennales, grâce à l'ajout du champ des résidus de régression.

### ③ Cokrigeage avec le relief



**Figure VII 5 :** Résultats de validation croisée pour le cokrigeage avec le relief

L'évolution des coefficients de détermination  $R^2$  a la même allure que pour les deux premières méthodes. Les  $R^2$  diminuent avec le pas de temps jusqu'à 12 h, pour les trois variables et le pas de temps de 24 h est bien reconstitué.

D'autre part, les meilleurs résultats sont obtenus pour les gradex.



#### ④ Cokrigage avec l'information à 24 h

Dans ce cas, les pourcentages de variance expliquée diminuent légèrement avec le pas de temps jusqu'à 6 h. Par exemple,  $R^2$  vaut 0.66 pour les pluies horaires décennales et 0.57 pour les pluies décennales de 6 h.

Les gradex sont à nouveau les variables les mieux expliquées pour toutes les durées.

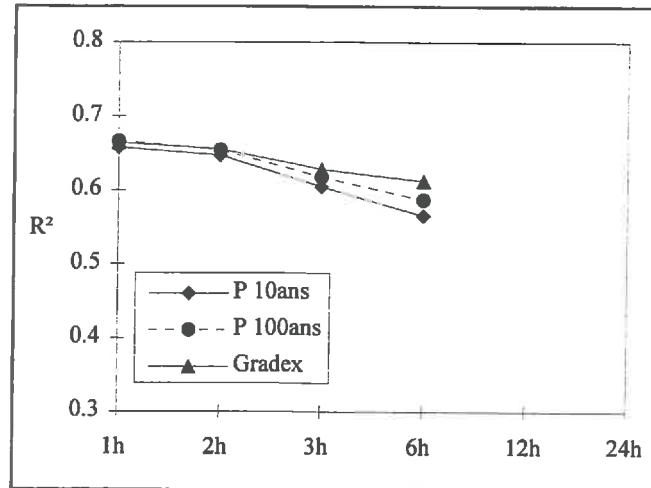


Figure VII 6 : Résultats de validation croisée pour le cokrigage avec l'information à 24 h

#### ⑤ Régression avec 24 h et krigage des résidus

Cette méthode s'appuie sur les relations entre paramètres pluviométriques de pas de temps  $t$  inférieur à 24 h et paramètres pluviométriques à 24 h. Nous avons vu que ces relations sont pertinentes pour des pas de temps proches de 24 h, i.e. supérieurs à 6 h, et plutôt mauvaises pour les pas de temps faibles (cf. Figure VII 1).

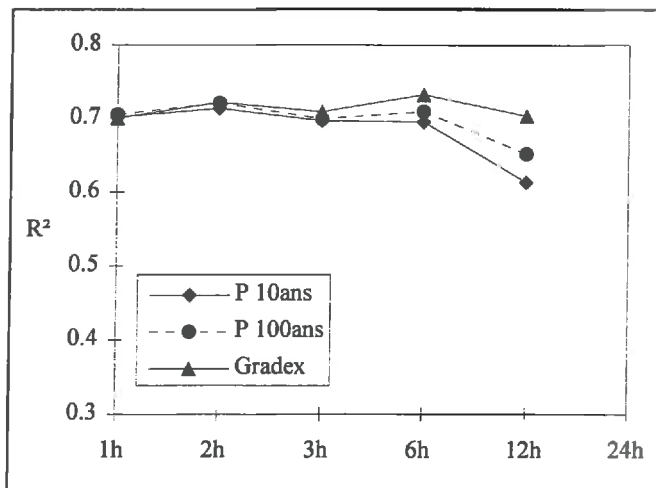


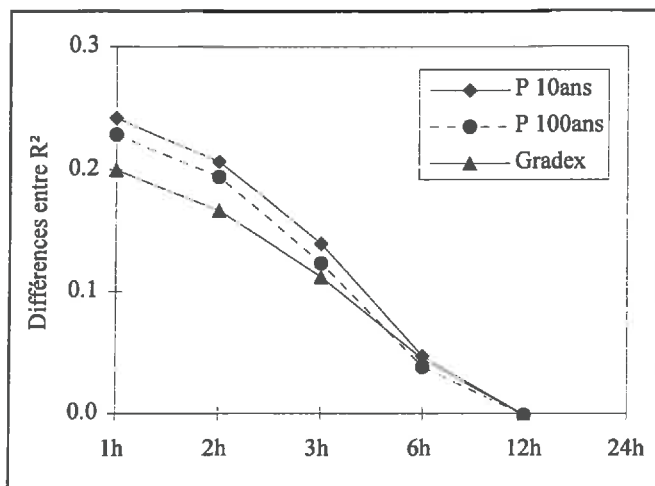
Figure VII 7 : Résultats de validation croisée pour la méthode régression avec 24 h et krigage des résidus

Les résultats de validation croisée montrent que, jusqu'à 6 h, les coefficients de détermination  $R^2$  sont relativement stables et sont toujours supérieurs à 0.7 pour les trois variables.

Pour le pas de temps de 12 h,  $R^2$  diminue pour les pluies décennales et centennales. Par exemple,  $R^2$  chute de 0.7 (6 h) à 0.61 (12 h), pour les pluies décennales.

Comme pour la méthode ②, la validation croisée a été appliquée sans ajouter les champs de résidus de régression, ce qui permet de distinguer l'apport de la composante "régression avec 24 h" et l'apport de la composante "résidus de régression" (cf. Figure VII 8).

Dans ce cas l'évolution des coefficients de régression ressemble à l'évolution des coefficients de détermination entre  $P(t)$  et  $P(24\text{ h})$  (cf. Figure VII 1). Les faibles pas de temps sont moins bien reconstitués que les pas de temps plus forts.



**Figure VII 8 :** Différences entre coefficients de détermination obtenus (i) pour la méthode régression avec 24 h et krigeage des résidus, et (ii) pour cette même méthode mais sans ajout du champ des résidus

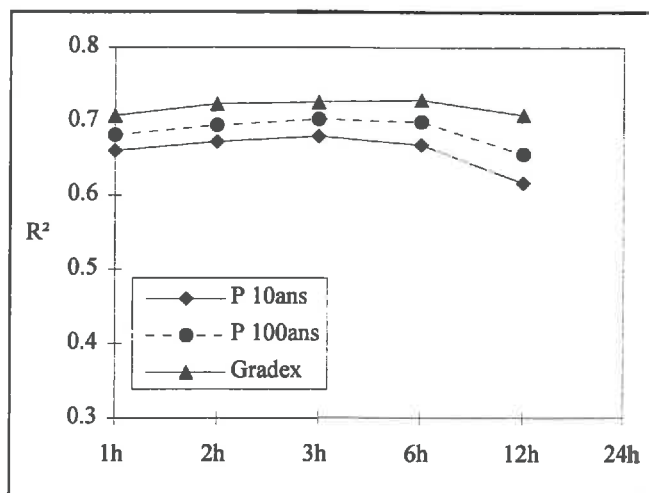
Cette approche montre que dans ce cas l'ajout du champ des résidus de régression est important pour la cartographie jusqu'à 6 h. Par exemple, cela permet de gagner entre 20 et 24 % de la variance pour le pas de temps de l'heure.

**Finalement, l'ajout des champs de résidus de régression permet à cette méthode d'avoir la même performance quel que soit le pas de temps.**

### ⑥ Coefficient de Montana

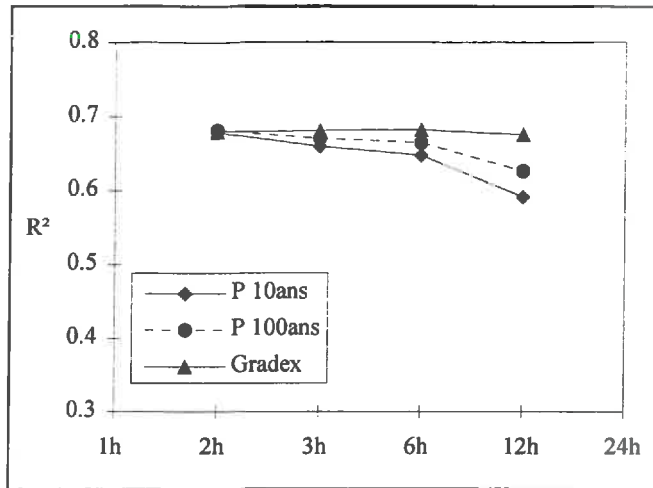
Dans ce cas, les pourcentages de variance expliquée sont relativement stables pour les différentes durées. Ils diminuent juste à 12 h pour les pluies décennales et centennales.

De plus, les  $R^2$  sont toujours supérieurs à 0.6 pour les pluies décennales et centennales et même à 0.7 pour les gradex.



**Figure VII 9 :** Résultats de validation croisée pour la méthode avec le coefficient de Montana

⑦ Coefficients  $k(t)$



Pour cette dernière méthode, les coefficients de détermination diminuent légèrement avec le pas de temps pour les pluies décennales et centennales : on passe de 0.68 (1 h) à 0.59 (12 h) pour les pluies décennales par exemple.

Pour les gradex, les pourcentages de variance expliquée sont stables :  $R^2$  vaut 0.68 jusqu'à 6 h et 0.67 à 12 h.

*Figure VII 10 : Résultats de validation croisée pour la méthode avec les coefficients  $k(t)$*

### VII.3.3. Conclusion

L'approche de validation croisée utilisée ici nous a permis d'apprécier les performances des différentes méthodes. De manière générale, la variable la mieux estimée est le gradex, alors que les pluies décennales sont les moins bien reconstituées.

De plus, deux grands groupes de méthodes peuvent se distinguer :

- les méthodes dont les performances varient avec le pas de temps :

En effet, les méthodes ① (krigeage), ② (régression avec le relief et krigeage des résidus), ③ (cokrigeage avec le relief) et ④ (cokrigeage avec l'information à 24 h) ont des performances qui diminuent avec le pas de temps jusqu'à 12 h.

- les méthodes dont les performances sont indépendantes du pas de temps :

Ce groupe comprend les méthodes ⑤ (régression avec 24 h et krigeage des résidus), ⑥ (coefficient de Montana) et ⑦ (coefficients  $k(t)$ ). Ces trois méthodes utilisent la répartition spatiale des champs à 24 h.

## **VII.4.Comparaison des différentes méthodes de cartographie par validation croisée pour les variables pluies décennales, centennales et gradex**

Après avoir apprécié les performances des différentes méthodes de cartographie, il reste à les comparer entre elles. Cela passe par la comparaison des coefficients de détermination  $R^2$  : les Figure VII 11, Figure VII 12 et Figure VII 13 représentent l'évolution, en fonction du pas de temps, des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs connues et interpolées pour les 7 méthodes. Les résultats sont similaires pour trois variables, pluies décennales, centennales et gradex.

### **VII.4.1.Pas de temps inférieurs à 24 h**

Les méthodes géostatistiques : krigeage ①, cokrigeage avec le relief ③ et cokrigeage avec l'information à 24 h ④, ont des performances assez similaires.

Le cokrigeage avec le relief ③ donne des résultats légèrement meilleurs que le krigeage, sauf à 12 h pour les pluies centennales et les gradex. Cela semble logique, puisque les relations entre paramètres pluviométriques et paramètres topographiques étaient surtout pertinentes pour les faibles pas de temps, et non pas à 12 h.

Pour les pluies décennales, les résultats du cokrigeage avec l'information à 24 h ④ sont toujours légèrement meilleurs que ceux du krigeage. Par contre, pour les pluies centennales et le gradex, le cokrigeage avec l'information à 24 h ④ n'est pas plus performant que le krigeage, sauf à 12 h. Cette "mauvaise" performance par rapport au krigeage s'explique par le fait que les relations entre paramètres de pas de temps  $t$  et paramètres à 24 h ne sont bonnes qu'à partir de 6 h.

Ainsi, l'utilisation du cokrigeage avec une variable auxiliaire n'a pas donné de résultats très satisfaisants, par rapport au krigeage, en matière de reconstitution des données. Par contre, des cartes de différences entre champs montre que les écarts type d'estimation par cokrigeage sont toujours meilleurs que ceux par krigeage. C'est donc dans ce sens que le

cokrigeage apporte une amélioration des résultats (HEVESI et al., 1992 ; PHILLIPS et al., 1992).

L'introduction du relief par la méthode ② (régression avec le relief et krigeage des résidus) apporte une amélioration importante par rapport aux résultats précédents, jusqu'à 3 h au moins. Pour le pas de temps horaire, c'est cette méthode qui est toujours la meilleure.

Cependant, les écarts type d'estimation par krigeage sont toujours légèrement inférieurs à ceux obtenus par la méthode ②. Les différences varient entre -4 et 0 mm/h dans le domaine d'intérêt pour les pluies décennales horaires, par exemple. Cela va à l'encontre des résultats de DINGMAN et al. (1988). En effet, le krigeage et une méthode type ② (régression avec l'altitude et krigeage des résidus de régression) sont appliqués à des pluies moyennes inter-annuelles en région à relief (New Hampshire et Vermont, USA). Dans ce cas, le krigeage est légèrement meilleur en validation croisée, mais c'est la seconde méthode qui donne les écarts type d'estimation les plus faibles.

Enfin, les méthodes qui utilisent l'information à 24 h ont systématiquement les meilleurs coefficients de détermination pour les pas de temps de 2 h à 12 h (régression avec 24h et krigeage des résidus ⑤, coefficients de Montana ⑥, et coefficients  $k(t)$  ⑦).

Pour les pluies décennales, c'est la méthode ⑤ (régression avec 24h et krigeage des résidus) qui donne les meilleurs résultats. A 12 h, par exemple, on passe d'un coefficient de détermination de 0.32 pour le krigeage ① à un coefficient de 0.61 pour la méthode ⑤.

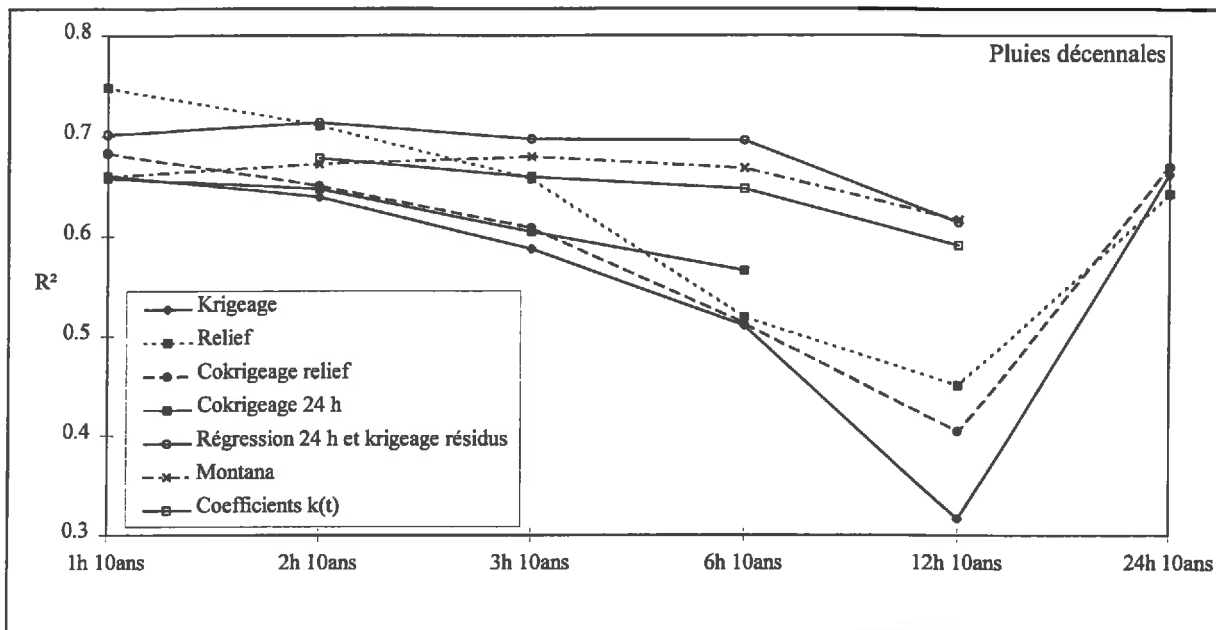
Pour les pluies centennales et les gradex, les deux méthodes régression avec 24h et krigeage des résidus ⑤ et coefficients de Montana ⑥ sont équivalentes.

#### **VII.4.2. Pas de temps de 24 h**

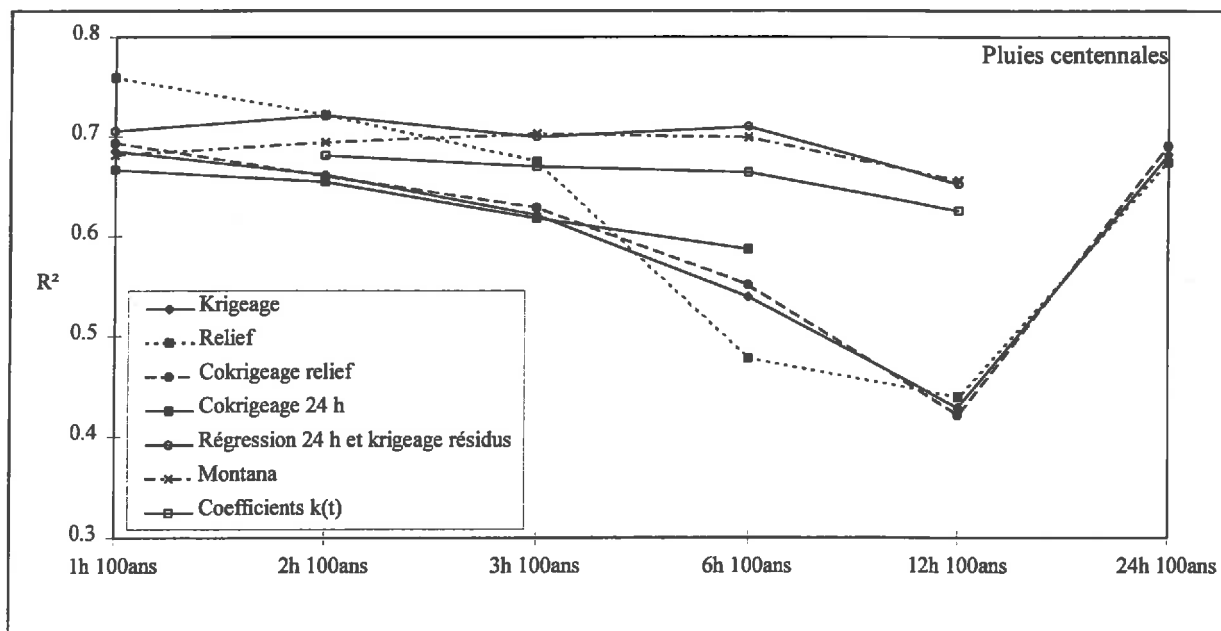
Pour les trois variables, le champ à 24 h a été cartographié par krigeage ① et par les méthodes s'appuyant sur le relief (② régression avec le relief et krigeage des résidus et ③ cokrigeage avec le relief).

Les résultats de validation croisée pour les méthodes sont équivalents. En fait pour ce pas de temps, les résultats sont bons surtout à cause de la densité d'information disponible.

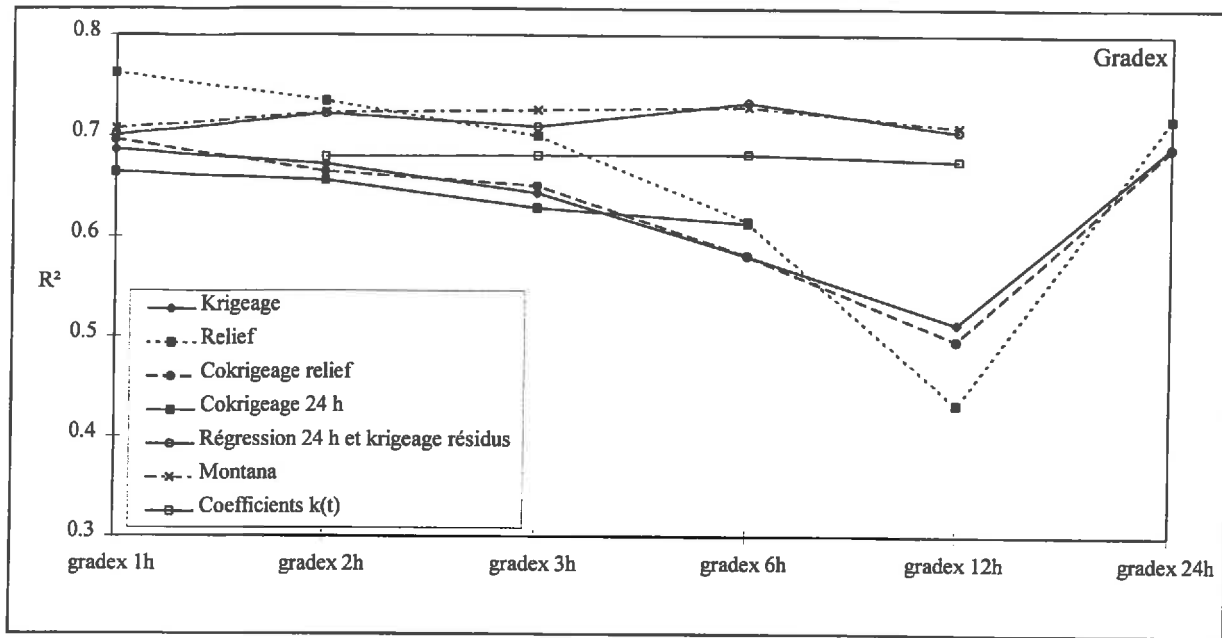
Ainsi, les différents critères ne permettent pas de distinguer une méthode meilleure que les autres.



*Figure VII 11 : Comparaison par validation croisée de méthodes de cartographie des pluies décennales : évolution des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et interpolées en fonction du pas de temps (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*



*Figure VII 12 : Comparaison par validation croisée de méthodes de cartographie des pluies centennales : évolution des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et interpolées en fonction du pas de temps (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*



*Figure VII 13 : Comparaison par validation croisée de méthodes de cartographie des gradex : évolution des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et interpolées en fonction du pas de temps (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*

### VII.4.3. Conclusion

Par validation croisée, nous avons pu comparer les différentes méthodes de cartographie des pluies extrêmes envisagées. Il n'y a pas une méthode toujours meilleure que les autres, mais il faut s'adapter au cas que l'on traite : suivant la variable étudiée et le pas de temps, la méthode la plus performante varie. Ainsi, le Tableau VII 7 récapitule pour chaque variable et chaque durée la ou les méthodes *préconisées*. Les résultats de validation croisée pour le krigeage sont aussi fournis, ce qui permet d'apprécier le gain de variance expliquée par la méthode choisie.



|                       |      | R <sup>2</sup> pour<br>l'interpolation<br>par krigeage ① | Méthode préconisée pour la cartographie |                                                                                                                                   |
|-----------------------|------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |      |                                                          | R <sup>2</sup>                          | Méthode                                                                                                                           |
| Pluies<br>décennales  | 1 h  | 0.66                                                     | 0.75                                    | ② Régression avec le relief et krigeage des résidus                                                                               |
|                       | 2 h  | 0.64                                                     | 0.71<br>0.71                            | ② Régression avec le relief et krigeage des résidus<br>⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus                             |
|                       | 3 h  | 0.59                                                     | 0.70                                    | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus                                                                                    |
|                       | 6 h  | 0.51                                                     | 0.70                                    | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus                                                                                    |
|                       | 12 h | 0.32                                                     | 0.61<br>0.62                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 24 h | 0.66                                                     | 0.66                                    | ① Interpolation par krigeage                                                                                                      |
| Pluies<br>centennales | 1 h  | 0.69                                                     | 0.76                                    | ② Régression avec le relief et krigeage des résidus                                                                               |
|                       | 2 h  | 0.66                                                     | 0.72<br>0.72                            | ② Régression avec le relief et krigeage des résidus<br>⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus                             |
|                       | 3 h  | 0.62                                                     | 0.70<br>0.70                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 6 h  | 0.54                                                     | 0.71<br>0.70                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 12 h | 0.43                                                     | 0.65<br>0.66                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 24 h | 0.68                                                     | 0.68                                    | ① Interpolation par krigeage                                                                                                      |
| Gradex                | 1 h  | 0.69                                                     | 0.76                                    | ② Régression avec le relief et krigeage des résidus                                                                               |
|                       | 2 h  | 0.67                                                     | 0.73<br>0.72<br>0.72                    | ② Régression avec le relief et krigeage des résidus<br>⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana |
|                       | 3 h  | 0.64                                                     | 0.71<br>0.73                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 6 h  | 0.58                                                     | 0.73<br>0.73                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 12 h | 0.51                                                     | 0.70<br>0.71                            | ⑤ Régression avec 24 h et krigeage des résidus<br>⑥ Coefficient de Montana                                                        |
|                       | 24 h | 0.69                                                     | 0.69                                    | ① Interpolation par krigeage                                                                                                      |

*Tableau VII 7 : Récapitulatif des méthodes de cartographie préconisées pour les différentes variables et les différents pas de temps et comparaison avec les performances du krigeage*

## **VII.5.Comparaison des différentes méthodes de cartographie par validation croisée pour le coefficient de Montana**

Trois méthodes de cartographie ont été envisagées pour le coefficient de Montana :

- l'interpolation par le krigeage ①,
- la régression avec le relief et krigeage des résidus ②,
- et le cokrigeage avec le relief ③.

Les résultats de cartographie pour le coefficient de Montana sont mauvais en général (cf. Tableau VII 8) : les coefficients de détermination entre valeurs réelles et valeurs estimées varient entre 0.39 et 0.47 pour les trois méthodes.

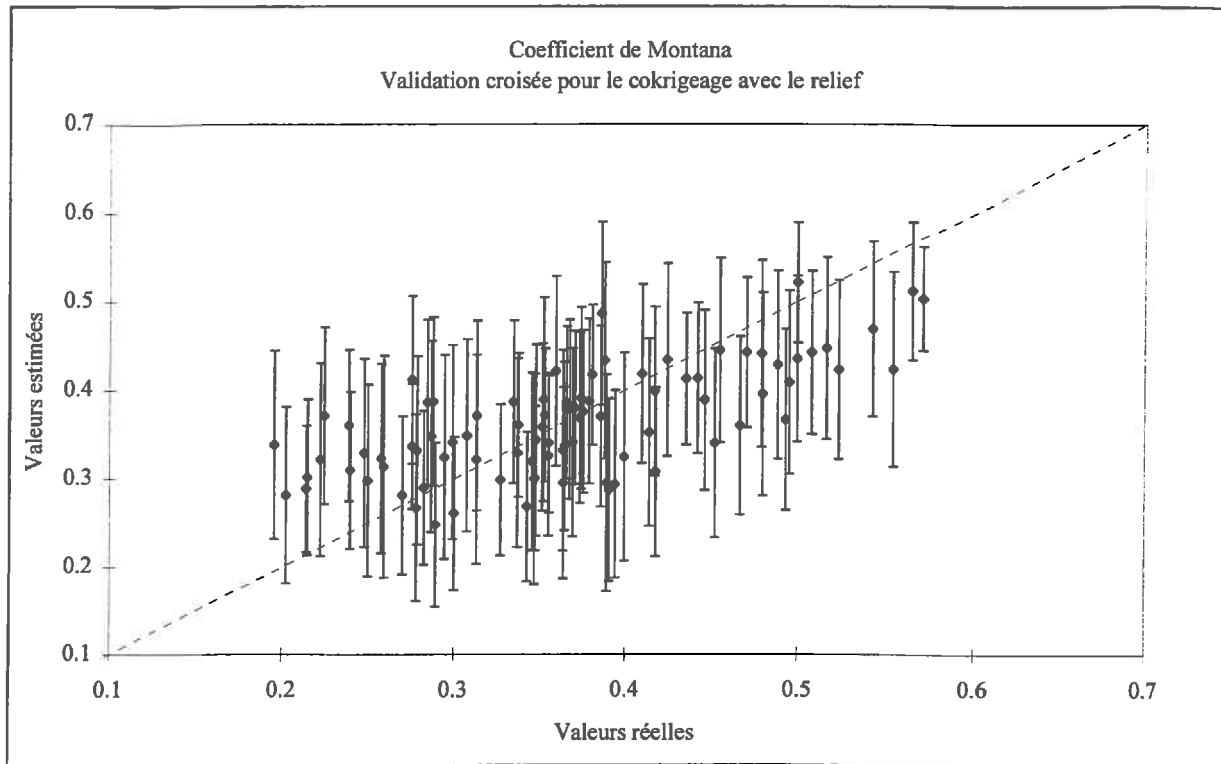
La méthode la plus appropriée est celle du cokrigeage avec le relief ③. En effet, c'est pour celle-ci que les coefficients  $R^2$  et E sont les meilleurs. De plus, la moyenne des valeurs estimées est plus proche de la moyenne réelle que pour la méthode ② (régression avec le relief et krigeage des résidus).

Enfin, la Figure VII 14 montre le graphe des valeurs réelles en fonction des valeurs estimées obtenu pour les coefficients de Montana pour la méthode ③.

|       | ①    | ②    | ③    |
|-------|------|------|------|
| $R^2$ | 0.39 | 0.46 | 0.47 |
| E     | 0.39 | 0.45 | 0.47 |

|          | Valeurs réelles | ①     | ②     | ③     |
|----------|-----------------|-------|-------|-------|
| m        | 0.367           | 0.367 | 0.358 | 0.364 |
| $\sigma$ | 0.091           | 0.058 | 0.064 | 0.060 |

*Tableau VII 8 : Comparaison par validation croisée des méthodes de cartographie du coefficient de Montana (pas de la maille de calcul : 5.25 km)*



*Figure VII 14 : Graphe des valeurs estimées avec un intervalle de confiance à 80 % en fonction des valeurs connues, validation croisée pour le cokrigeage avec le relief des coefficients de Montana*

## **VII.6.Conclusion**

Nous avons comparé par validation croisée différentes méthodes de cartographie des précipitations extrêmes. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois grands ensembles, suivant l'information supplémentaire utilisée :

- la cartographie par krigeage ① utilise *uniquement la structure spatiale des différentes variables pluviométriques*,
- ensuite, différentes méthodes intègrent *une information topographique* :
  - ② régression avec le relief et krigeage des résidus,
  - ③ cokrigeage avec le relief,
- enfin, les dernières méthodes s'appuient sur les *relations entre paramètres pluviométriques de pas de temps  $t$  inférieur à 24 h et paramètres à 24 h* :
  - ④ cokrigeage avec l'information à 24 h,
  - ⑤ régression avec 24 h et krigeage des résidus,
  - ⑥ coefficient de Montana,
  - ⑦ coefficients  $k(t)$ .

La validation croisée a montré que, en général, la variable la mieux estimée est le gradex, alors que les pluies décennales sont les moins bien reconstituées.

De plus, pour certaines méthodes, les performances varient avec le pas de temps. Les méthodes ① (krigeage), ② (régression avec le relief et krigeage des résidus), ③ (cokrigeage avec le relief) et ④ (cokrigeage avec l'information à 24 h) ont des coefficients de détermination  $R^2$  entre valeurs réelles et estimées qui diminuent avec le pas de temps jusqu'à 12 h.

Par contre, les méthodes ⑤ (régression avec 24 h et krigeage des résidus), ⑥ (coefficient de Montana) et ⑦ (coefficients  $k(t)$ ) ont des performances relativement indépendantes du pas de temps. Ces trois méthodes utilisent la répartition spatiale des champs à 24 h.

Finalement, pour chaque paramètre et chaque pas de temps, la méthode de cartographie préconisée est différente.

Pour les pas de temps faibles (i.e. jusqu'à 2 h), la méthode ② (régression avec le relief et krigeage des résidus) est la plus performante.

Pour des pas de temps plus forts, ce sont des méthodes s'appuyant sur la répartition spatiale des champs à 24 h qui seront utilisées. En particulier à 12 h, ces méthodes permettent d'obtenir des répartitions spatiales tout à fait satisfaisantes, ce qui n'était pas le cas avec les méthodes classiques de krigeage ou cokrigeage.

A 24 h, vu la densité d'information pluviométrique dont on dispose, la méthode classique de krigeage ① a des performances tout à fait similaires à celles de la régression avec le relief et krigeage des résidus ② ou du cokrigeage avec le relief ③.

Enfin, les résultats de cartographie des coefficients de Montana sont assez décevants : les coefficients de détermination entre valeurs réelles et valeurs estimées varient entre 0.39 et 0.47 pour les méthodes envisagées. La méthode la plus appropriée est celle du cokrigeage avec le relief ③.

## CONCLUSION GENERALE





## **1. Conclusions**

Le but de ce travail était l'étude ponctuelle, puis l'étude de la répartition spatiale des caractéristiques statistiques des précipitations extrêmes dans les Alpes françaises.

### **1.1. Etude ponctuelle des précipitations extrêmes**

Le jeu de données collecté est composé de 90 pluviographes (données de pluies pour des pas de temps de l'heure à la journée) et de 463 pluviomètres (données de pluies pour le pas de temps de la journée) répartis sur l'ensemble des Alpes françaises.

Sur cette base, une étude sur l'échantillon à prendre en compte pour l'évaluation statistique des pluies de fréquences rares et des gradex a conduit à définir des *saisons à plus forts risques pluvieux*. Une technique relativement automatique de détermination de cette saison a été mise au point, elle s'appuie sur l'évolution au cours de l'année des gradex mensuels et des moyennes mensuelles.

Ainsi, les caractéristiques des précipitations extrêmes : pluies décennales, centennales et gradex, ont été estimées dans les Alpes françaises pour des pas de temps allant de l'heure à la journée :

- par ajustement de Gumbel, par la méthode des moments -ou des moments pondérés, en cas de horsains-,
- sur les échantillons de maxima mensuels saisonniers.

### **1.2. Cartographie des précipitations extrêmes**

Dans un deuxième temps, diverses méthodes de cartographie des champs statistiques de précipitations extrêmes (pluies décennales, centennales et gradex) ont été envisagées et comparées par validation croisée.

### Interpolation par krigeage

La première méthode est l'interpolation par krigeage, qui utilise uniquement la variabilité spatiale de la variable à cartographier pour l'interpolation. Les performances de cette méthode diminuent avec le pas de temps jusqu'à 12 h pour les trois variables pluies décennales, centennales et gradex. Par contre, le champ à 24 h est bien reconstitué, ce qui s'explique par la densité de l'information pour ce pas de temps.

### Méthodes de cartographie intégrant une information topographique

Dans une zone montagneuse comme les Alpes françaises, il semble intéressant d'expliquer les précipitations extrêmes par des données décrivant le relief. Ainsi, nous avons défini différents paramètres caractérisant la situation d'un site (sa cote et son environnement proche, son exposition, l'encaissement et la pente) et sa situation générale dans les Alpes françaises.

Ensuite, des relations linéaires multiples ont été mises en évidence, liant paramètres pluviométriques et paramètres topographiques. Celles-ci modélisent bien les faibles pas de temps : en effet, 76 % de la variance des pluies horaires décennales est expliquée contre seulement 53 % de la variance des pluies journalières décennales.

Une première méthode de cartographie basée sur le relief a alors été définie :

- les champs sont d'abord estimés en appliquant en chaque point du domaine l'équation de régression correspondant à la variable ;
- les résidus de régression sont cartographiés par krigeage ;
- l'ajout des deux champs précédents conduit à l'estimation finale de la répartition spatiale de la variable.

Une autre technique pour intégrer la topographie dans l'interpolation des champs consiste à utiliser le cokrigeage avec comme variable auxiliaire une estimée de la variable à cartographier par régression linéaire multiple grâce au relief.

Ces deux méthodes ont des performances qui diminuent avec le pas de temps jusqu'à 12 h. Le cokrigeage donne des résultats similaires à ceux du krigeage. Par contre, la première

technique, qui s'appuie directement sur les relations linéaires entre paramètres pluviométriques et paramètres topographiques apporte une nette amélioration des résultats par rapport au krigeage jusqu'à 3 h.

De plus, l'interpolation à 24 h est toujours bonne, ce qui s'explique par la densité d'information pour ce pas temps. Mais les méthodes envisagées n'apportent pas une amélioration significative par rapport à l'interpolation par krigeage dans ce cas.

#### Méthodes de cartographie intégrant l'information à 24h

En dernier lieu, nous avons exploré différentes manières d'intégrer l'information pluviométrique disponible au pas de temps de la journée pour la cartographie de champs statistiques de pluies extrêmes à pas de temps inférieurs à 24 h.

Cette approche se base sur l'existence de relations linéaires plus ou moins pertinentes liant les paramètres pluviométriques de pas de temps  $t$ ,  $P(t)$ , aux paramètres à 24 h,  $P(24\text{ h})$ . Les durées proches de 24 h, c'est-à-dire supérieures à 6 h sont bien expliquées par l'information journalière. Par exemple, 92 % de la variance des pluies décennales de 12 h est expliquée par les pluies décennales journalières contre seulement 37 % à 1 h.

Sur la base de ces constatations, 4 méthodes différentes ont été définies.

D'abord, le cokrigeage à l'aide de l'information à 24 h est utilisé. Cependant, les performances de cette méthode sont similaires à celles du krigeage. De plus, seuls les pas de temps inférieurs à 6 h peuvent être cartographiés.

Ensuite, une méthode basée directement sur les relations linéaires entre paramètres de pas de temps  $t$  et paramètres à 24 h a été définie. Elle consiste à appliquer l'équation de régression  $P(t) = a \times P(24\text{ h}) + b$  au champ à 24 h, obtenu par krigeage, et à ajouter à ce champ celui des résidus de régression estimé par krigeage.

Ensuite, l'approche classique de type Montana permet d'évaluer un champ de  $P(t)$  à partir du champ à 24 h et du champ des coefficients de Montana.

Et enfin, une dernière méthode s'appuie sur une expression de  $P(t)$  spécifique aux Alpes françaises.  $P(t)$  est fonction de  $P(1\text{ h})$  et  $P(24\text{ h})$  et d'un coefficient  $k(t)$ , lié au pas de temps.

Ces trois dernières méthodes ont de bonnes performances, relativement indépendantes du pas de temps.

Comparaison des méthodes de cartographie par validation croisée

Finalement, toutes ces méthodes ont été comparées par validation croisée. Pour chaque paramètre et chaque pas de temps, la méthode de cartographie préconisée est différente.

Pour les pas de temps faibles (i.e. jusqu'à 2 h), la méthode qui utilise la régression avec le relief est la plus performante.

Pour des pas de temps plus forts, ce sont des méthodes s'appuyant sur la répartition spatiale des champs à 24 h qui seront utilisées. En particulier à 12 h, ces méthodes permettent d'obtenir des répartitions spatiales tout à fait satisfaisantes, ce qui n'était pas le cas avec les méthodes classiques de krigeage ou cokrigeage. Pour les pluies décennales de 12 h, on gagne 30 % de variance expliquée par rapport au krigeage, par exemple.

A 24 h, vu la densité d'information pluviométrique dont on dispose, la méthode classique de krigeage a des performances tout à fait similaires à celles utilisant le relief.

1.3. Conclusions sur la répartition spatiale des champs

Les différentes méthodes de cartographie mettent en évidence une répartition spatiale assez simple et lisse pour les durées courtes, alors que pour les pas de temps longs, les cartes sont plus chahutées.

Ainsi, pour les pas de temps relativement courts, *de 1 h à 3 h*, une zone de faibles valeurs de précipitations extrêmes est située au centre des Alpes, dans une région allant de la Tarentaise au Nord du Briançonnais.

Les précipitations sont plus importantes au Nord, à l'Ouest et au Sud. En particulier, c'est au Sud que les valeurs de précipitations les plus fortes sont enregistrées pour tous les pas de temps, ce qui s'explique par l'influence de la Méditerranée. Les cartes mettent donc en évidence un effet d'abri croissant lorsque l'on pénètre dans le massif alpin.

Pour les pas de temps longs, certains massifs montagneux se distinguent avec des intensités élevées (Jura, Chartreuse, Dévoluy et Baronnies). La zone des précipitations extrêmes les plus faibles est toujours celle du centre des Alpes (de la Tarentaise au Nord du

Briançonnais) : l'effet d'abri croissant lorsqu'on pénètre dans les Alpes et  
Enfin, la partie à précipitations les plus fortes est le Sud Est des Alpes  
Maritimes).

## 2. Perspectives

Le but final de ce travail est d'éditer un *Atlas expérimental des risques de pluies intenses* du même type que celui fait pour la région *Cévennes Vivarais* (BOIS et al., 1997).

Pour ce faire, des travaux sont actuellement engagés au LTHE pour cartographier les différents champs statistiques d'extrêmes au delà de la frontière italienne. En effet, un réseau très dense de pluviomètres (environ 270 appareils) et de pluviographes (environ 320 appareils) pour la Ligurie et le Piémont a été mis à disposition dans le cadre du projet INTEREG.

Cependant, il reste un travail important à faire pour étendre et confirmer les résultats trouvés sur les Alpes françaises : relations avec le relief et relations entre pas de temps courts et pas de temps de 24 h.

Par ailleurs, ce travail ne s'est intéressé qu'à l'analyse de valeurs ponctuelles et les résultats sont très encourageants. Mais il serait intéressant d'envisager, à partir des données brutes, des études similaires sur les pluies extrêmes sur des surfaces de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>.

Enfin, il est possible que d'ici quelques années des simulations à partir de modèles météorologiques permettent d'avoir une idée plus mécaniste des relations entre le relief et valeurs extrêmes.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES  
ET BIBLIOGRAPHIE





## Références bibliographiques

**ADJIZIAN-GERARD J. (1994)**

« *La variabilité spatiale des pluies dans le petit bassin versant du Ringelbach (Hautes-Vosges). Effet de la topographie et des types de temps.* »

Thèse Docteur, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, Strasbourg, 173p+annexes.

**BAILLARGEON G. (1989)**

« *Probabilités statistique et techniques de régression.* »

Les éditions SMG, 631p.

**BALSEINTE R. (1957)**

« *Les changements intervenus dans les régimes pluviométriques moyens des Alpes Françaises du nord pendant la période 1935-1950.* »

La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 185-189.

**BENEVENT E. (1926)**

« *Le climat des Alpes Françaises.* »

Thèse Docteur, Météorologie Nationale, Paris, Faculté des Lettres, Grenoble, 435p.

**BENICHO P., LE BRETON O. (1987)**

« *Prix Norbert Gerbier 1986. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques.* »

La Météorologie, 7° série, n° 19, pp. 23-34.

**BLANCHET G. (1990)**

« *Régimes météorologiques et diversité climatique dans l'espace Rhônalpin.* »

Revue de Géographie de Lyon, vol 65, n° 2, pp. 106-117.

**BLANCHET G. (1993)**

« *Variabilité des précipitations annuelles dans la région Rhône - Alpes : présentation cartographique.* »

Revue de Géographie de Lyon, vol 68, pp. 101-109.

**BOIRET P., GALEA G., SCHWARTZ J. (1982)**

« *Analyse des fortes pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes du Sud Est de la France (rive gauche du Rhône et extrême Sud Est).* »

CEMAGREF, Antony, 342p.

**BOIRET P., SCHWARTZ J., MICHEL C., OBERLIN J. (1984)**

« *Analyse des fortes pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes du Sud Est de la France (rive gauche du Rhône et extrême Sud Est).* »

Note interne, CEMAGREF, Bureau de l'eau, BRGM, 12p.

**BOIS Ph., OBLED Ch., DE SAINTIGNON F., MAILLOUX H. (1997)**

« *Atlas expérimental des risques de pluies intenses. Cévennes Vivarais.* »  
Pôle Grenoblois des risques naturels, LTHE, LAMA, EDF-DTG, 19p.

**BOUVARD, GARROS-BERTHET (1994)**

« *Les crues de projet des barrages : méthode du gradex.* »  
Bulletin du Comité Français des Grands Barrages, Barrages et Réservoirs. 18<sup>ième</sup> congrès  
CIGB / ICOLD - n° 2, 95p.

**BRAUD I. (1987)**

« *Recherche du nombre de facteurs significatifs dans une Analyse en Composantes Principales.* »  
Mémoire de DEA, Université Scientifique et Médicale de Grenoble - UER de Mécanique,  
85p+annexes.

**BURNS J.I. (1953)**

« *Small-scale topographic effects on precipitation distribution in San Dimas experimental forest.* »  
Transactions, American Geophysical Union, vol 34, n°5, pp. 761-768.

**CADEZ M. (1957)**

« *Sur une classification des types de temps.* »  
La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 317-323.

**CANELLAS C., MERLIER C. (14-16 septembre 1994)**

« *Evaluation et cartographie de valeurs extrêmes de précipitations.* »  
Publications S.H.F. « Crues et inondations », Tome 1, 23<sup>ème</sup> journées de l'hydraulique,  
Congrès de la Société Hydrotechnique de France, Nîmes, pp. 131-136.

**CEMAGREF, LAMP (1996)**

« *Interaction pluies/reliefs à l'échelle temporelle des intensités. Guide pratique des données pluviographiques d'un transect préalpin, le « TPG » (période 1987-1995). Premiers résultats et perspectives.* »  
Rapport, 115p+annexes.

**CHAMPEAUX J.L., TAMBURINI A. (1995)**

« *Zonage climatique de la France à partir des séries de précipitations (1971-1990) du réseau climatologique d'état.* »  
Note de Centre du Groupe de météorologie à moyenne échelle, n°33, METEO FRANCE,  
Centre National de Recherches Météorologiques, 177p.

**CHASSAGNEUX P., DEBLAERE J.C., THEBAULT E. (1992)**

« *Atlas Agroclimatique Rhône Alpes.* »  
Edition : Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace /  
Direction de la Météorologie Nationale, pp. 8-29.

**CLERC (1988)**

« *Etude du gradex des précipitations journalières maximales annuelles sur de longues séries.* »

Rapport de stage effectué à EDF, ENSHMG Grenoble, 35p+annexes.

**CREUTIN J.D., OBLED C. (1982)**

« *Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison.* »

Water Resources Research, vol. 18, n°2, pp. 413-431.

**CUNNANE C. (1978)**

« *Unbiased plotting position - A review.* »

Journal of Hydrology, 37, pp. 205-222.

**CUNNANE C. (1989)**

« *Statistical distributions for flood frequency analysis.* »

World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report No. 33, 61p+annexes.

**DELHOMME J-P. (1978)**

« *Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau.* »

Bulletin du B.R.G.M. (deuxième série), Section III, n°4, pp. 341-375.

**DESBORDES M., MASSON J.M. (14-15-16 septembre 1994)**

« *Fortes précipitations dans le sud de la France.* »

Publications S.H.F. « Crues et inondations », Tome 1, 23ème journées de l'hydraulique, Congrès de la Société Hydrotechnique de France, Nîmes, pp. 59-66.

**DESUROSNE I. (1992)**

« *Gradients d'intensités de pluie en zone à relief : expérimentations et premières modélisations des données d'un réseau Rhonalpin, le TPG.* »

Thèse Docteur, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 255p.

**DINGMAN S.L., SEELY-REYNOLDS D.M., REYNOLDS III R.C. (1988)**

« *Application of kriging to estimating mean annual precipitation in a region of orographic influence.* »

Water Resources Bulletin, vol. 24, n°2, pp. 329-339.

**Direction de la Météorologie Nationale, Service d'Exploitation Météorologique (1988)**

« *Précipitations en France.* »

2<sup>ème</sup> édition, Paris (cartes).

**DOUGUEDROIT A. (1987)**

« *La diversité des moyennes montagnes françaises (de 500 à 1200m d'altitude).* »

Dans « Agrométéorologie des régions en moyenne montagne. », Ed. INRA, Paris (Les colloques de l'INRA n°39), 443p.

**EDF DTG (Electricité de France, Division Technique Générale) - CEMAGREF (1995)**

« *Etude des courbes Intensité - Durée - Fréquence de précipitations dans les Alpes. Résultats provisoires.* »

Contrat de Plan Etat-Région 1989-1993, 65p.

**ESTORGE J. L., LABORDE J-P., ZUMSTEIN J. F. (1980)**

« *Mise en évidence des relations entre le gradex des pluies journalières et les gradex des pluies de durées inférieures à 24h en Lorraine.* »

La Météorologie, VI série, n° 20-21, pp. 139-149.

**FIorentino M., GABRIELE S. (1984)**

« *A correction for the biais of maximum-likelihood estimators of Gumbel parameters.* »

Journal of Hydrology, vol. 73, pp. 39-49.

**FREI C., SCHÄRC C. (1997)**

« *A precipitation climatology of the Alps from high resolution rain-gauge observations.* »

Soumis à International Journal of climatology, 33p+tableaux et figures.

**GRARD R., MATHEVET P. (1968)**

« *Extension des précipitations « de Lombardie » sur les Alpes françaises.* »

Xème Congrès de Météorologie Alpine, Grenoble, 6p+figures.

**GRARD R., DUBAND D. (1969)**

« *Evaluation des risques de fortes précipitations sur les régions alpines françaises selon la saison - Utilisation du gradex.* »

La Météorologie, V série, n°10-11, pp. 217-227.

**GRUNOW J. (1957)**

« *Erfassung des Winterlichen Niederschlags in Gebirge.* »

La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 117-126.

**HEVESI J.A., ISTOCK J.I., FLINT A.L. (1992)**

« *Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I : structural analysis.* »

Journal of Applied Meteorology, vol 31, n°7, pp. 661-676.

**HEVESI J.A., ISTOCK J.I., FLINT A.L. (1992)**

« *Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part II : isohyetal maps.* »

Journal of Applied Meteorology, vol 31, n°7, pp. 677-688.

**HUMBERT J., PERRIN J.L., PERRON L. (1993)**

« *Etude méthodologique de quantification spatiale des précipitations appliquée à la France du Nord - Est. Secteur test : versant oriental des Hautes Vosges.* »

Agence de l'Eau Rhin Meuse, CEREG, Strasbourg, 47p.

**HUMBERT J., PERRON L., PERRIN J.L. (1994)**

« *Precipitation mapping in mountainous area. Comparison of two statistical models.* »  
Annual report n°4, FRIEND AMHY Group, UNESCO, Paris, pp. 70-75.

**HUMBERT J., MAHR N., SIEFERT N. (1997)**

« *Quantification spatiale des précipitations du bassin Rhin Meuse. Secteur oriental - Période 1971-1990. Rapport final.* »  
Agence de l'Eau Rhin Meuse, CEREg, Strasbourg, 26p+annexes.

**JACQ V. (1994)**

« *Inventaire des situations à précipitations diluviennes Languedoc-Roussillon / Paca / Corse.* »  
Ministère de l'Environnement, Service Central d'Exploitation de la Météorologie, Direction interrégionale Sud Est, 44p.

**JOURNEL A.G. (1977)**

« *Géostatistique minière.* » (Tomes I et II)  
Centre de Géostatistique, Paris, 737p.

**JOURNEL A.G., ROSSI M.E. (1989)**

« *When do we need a trend model in kriging ?* »  
Mathematical Geology, vol 21, n°7, pp. 715-739.

**KIEFFER A. (1995)**

« *Etude des pluies de fréquence rare à faibles pas de temps sur les Alpes françaises. Relation avec le relief (premiers essais).* »  
Mémoire de DEA, UJF, Grenoble, 54p+annexes.

**KIEFFER A., BOIS Ph. (1997)**

« *Variabilité des caractéristiques statistiques des pluies extrêmes dans les Alpes françaises.* »  
Revue des Sciences de l'Eau, 2, pp. 199-216.

**KRAVCHENKO A., ZHANG R., TUNG Y-T. (1996)**

« *Estimation of mean annual precipitation in Wyoming using geostatistical analysis.* »  
16th Hydroly Day 1996, Hydrology Days Publication, Hubert J. Morel-Seytoux, pp. 271-282.

**LABORDE J-P. (1984)**

« *Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : éléments d'hydrologie Lorraine.* »  
Thèse Docteur d'Etat, INPL, Nancy, 484p.

**LEBLOIS E. (1997)**

« *Crues en rivières et inondations en vallée. Sous projet CV1 : Modèles synthétiques et cartographies en régionalisation des risques de crues rares et extrêmes. Contribution au thème CV11b « pluies rares ».* »

Rapport final de la convention n°M07314.92.05. CEMAGREF, LTHE, groupes NWE et AMHY de Friend (dans le cadre du X<sup>ème</sup> Contrat de Plan Etat Région), 37p+annexes.

**LEEYAVANIJA U. (1992)**

« *Apports de la télédétection et de l'information géographique numérique à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens.* »

Thèse Docteur, Université de Montpellier II, Montpellier (annexes)

**LLASAT M., PUIGGERVER M. (1992)**

« *Pluies extrêmes en Catalogne, influence orographique et caractéristiques synoptiques.* »

Hydrologie Continentale, vol. 7, n° 2, pp. 99-115.

**LLASAT M.C. (1997)**

« *Heavy Rains. Short introduction.* »

Cemagref Ed., Antony, « FRIEND. Third Report : 1994-1997 », pp. 253-254.

**MASSON J.M. (1992)**

« *Un problème parmi d'autres dans l'analyse des distributions des variables hydrologiques : les horsains (outliers).* »

« *Seminfor 5 - Statistique impliquée* », Editions de l'ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, pp. 303-311.

**MATHERON G. (1962)**

« *Traité de géostatistique appliquée. Tome I.* »

Paris, Ed. Technip, Collection Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 333p.

**MATHERON G. (1965)**

« *Les variables régionalisées et leur estimation.* »

Masson Ed., Paris, 305p.

**MERTZ J. (1957)**

« *Essai de classification des types de temps sur les Alpes d'après la disposition des isohyètes à 500mb.* »

La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 305-315.

**MEYLAN P. (1986)**

« *Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage. Application à la pluviométrie.* »

Hydrologie Continentale, vol.1, n°1, pp. 25-34.



**MYERS D.E. (1982)**

« *Matrix formulation of co-kriging.* »  
Mathematical Geology, vol. 14, n°3, pp. 249-257.

**NEPPEL L. (1997)**

« *Le risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique.* »  
Thèse Docteur, Université de Montpellier II, Montpellier, 272p.

**OTTEN A., VAN MONTFORT M.A.J. (1980)**

« *Maximum-likelihood estimation of the general extreme-value distribution parameters.* »  
Journal of Hydrology, vol. 47, pp. 187-192.

**PHILLIPS D.L., DOLPH J., MARKS D. (1992)**

« *A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain.* »  
Agricultural and Forest Meteorology, vol. 58, n°1-2, pp. 119-141.

**RHAM R. (1928)**

« *Le climat des Alpes méridionales. Essai d'utilisation des divers éléments météorologiques pour l'évaluation des débits de la Haute Durance.* »  
La Météorologie, n°43, pp. 433-508.

**RONCHAIL J., LECOMPTE M. (1981)**

« *Essais de climatologie dynamique dans les Alpes internes françaises.* »  
La Météorologie, Série VI, n° 26, pp. 57-91.

**SAIDI BOUOUDINA S. (1996)**

« *Etude des précipitations extrêmes dans la région des Alpes françaises et leur relation avec la topographie.* »  
Thèse Docteur, LTHE - INPG, Grenoble, 188p.

**SCHERER J.C. (1977)**

« *Une méthode d'extrapolation dans l'espace de données pluviométriques moyennes. Application à une partie des Vosges et de leur bordure.* »  
Recherches Géographiques n°4, Strasbourg, Université Louis Pasteur, U.E.R. de Géographie, pp. 69-85.

**SCHERMERHORN V.P. (1967)**

« *Relations between topography and annual precipitation in western Oregon and Washington.* »  
Water Resources Research, vol 3, n°3, pp. 707-711.

**SCHNEIDER-CARIUS K. (1957)**

« *Grundsätzliches zur Definition der Niederschlagshöhe bei Niederschlagsmessungen im Gebirge.* »  
La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 111-115.



**SCHUEPP M. (1957)**

« *Klassifikationsschema, Beispiele und Probleme des Alpenwetterstatistik.* »  
La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 291-296.

**SLIMANI M. (1985)**

« *Etude des pluies de fréquence rare à faibles pas de temps sur la région Cévennes-Vivarais : estimation, relation avec le relief et cartographie synthétique.* »  
Thèse Docteur, LTHE - INPG, Grenoble, 292p+annexes.

**SMIRNOV V. (1970)**

« *Cours de mathématiques supérieures. Tome II* »  
Editions MIR, Moscou, 672p (pp. 406-453).

**SPREEN W. C. (1947)**

« *A determination of the effect of topography upon precipitation* »  
Transactions, American Geophysical Union, vol. 28, n°2, pp. 285-290.

**TABIOS II G.Q., SALAS J.D. (1985)**

« *A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation* »  
Water Resources Bulletin, vol. 21, n°3, pp. 365-380.

**THAO T.P. (1993)**

« *Analyse statistique des valeurs extrêmes de précipitation. Application dans la région Cévennes-Vivarais.* »  
Thèse Docteur, LTHE - INPG, Grenoble, 180p.

**TRIPLÉ J. P. et ROCHE G. (1986)**

« *Météorologie générale.* »  
Ecole Nationale de la Météorologie, 3ième édition, 317p.

**VEYRET P. et G. (1979)**

« *Atlas et géographie de la France moderne. Les Alpes françaises.* »  
Ed Flammarion, 316p.

**VIGIER M. (1981)**

« *Méthodes d'assurance qualité - fiabilité et d'expérimentation.* »  
Collection Université de Compiègne, 398p.

**WATREMEZ S. (1996)**

« *Analyse fine de l'évolution spatio-temporelle des intensités de précipitation dans les Pré-Alpes du nord. Actualisation des premiers résultats au vu des nouvelles données 1992-1995.* »  
Rapport de stage de maîtrise, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, 83p+annexes.

**WEISS L.L. (1964)**

« *Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall.* »  
Journal of the Hydraulic Division of ASCE, vol. 90, pp77-82.

**ZWAHLEN F. (1981)**

*« Contribution à l'étude hydrologique du bassin de la Mentue. Problème de la cartographie des éléments du bilan hydrique. Chapitre III : Modèles des précipitations saisonnières. »*

Thèse Docteur, Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne, Lausanne, pp. 42-56.

## Bibliographie

**ALPERT P. (1986)**

« *Mesoscale indexing of the distribution of orographic precipitation over high mountains.* »

Journal of climate and applied meteorology, vol. 25, pp. 532-545.

**ANSELMO V., GALEATI G., PALMIERI S., ROSSI U., TODINI E. (1996)**

« *Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modelling approach : a case study.* »

Journal of Hydrology, 175, pp. 533-554.

**BENECH B., BRUNET H., JACQ V., PAYEN M., RIVRAIN J.-C., SANTURETTE P. (1993)**

« *La catastrophe de Vaison-La-Romaine et les violentes précipitations de septembre 1992 : aspects météorologiques.* »

La Météorologie, 8<sup>e</sup> série, n° 1, pp. 72-90.

**BOGAERT P., MAHAU P., BECKERS F. (1995)**

« *The spatial interpolation of agro-climatic data. Cokriging software and source code. User's manual.* »

FAO Agrometeorology Series, n°12, 60p.

**CANNAROZZO M., D'ASARO F., FERRO V. (1995)**

« *Regional rainfall and flood frequency analysis for Sicily using the two component extreme value distribution.* »

Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques, 40, pp. 19-42.

**CAO C. (1974)**

« *A contribution to statistical depth-duration-frequency analysis.* »

Journal of Hydrology, 22, pp. 109-129.

**CHUA S.H., BRAS R.L. (1982)**

« *Optimal estimators of mean areal precipitation in regions of orographic influence.* »

Journal of Hydrology, 57, pp. 23-48.

**CORRADINI C. (1985)**

« *Analysis of the effects of orography on surface rainfall by a parameterized numerical model.* »

Journal of Hydrology, 77, pp. 19-30.

**CREUTIN J.D. (1979)**

« *Méthodes d'interpolation optimale de champs hydrométéorologiques. Comparaison et application à une série d'épisodes pluvieux Cévenols.* »

Thèse de Docteur-Ingénieur, USG-INPG, Grenoble, 163p.

**DAVY L. (1989)**

« Une catastrophe naturelle : l'averse nîmoise du 3 octobre 1988 et ses conséquences hydrologiques. »

Hydrologie continentale, vol. 4, n°2, pp. 75-92.

**DESUROSNE I, OBERLIN G., RIBOT-BRUNO J. (1991)**

« Intensités des pluies en zone à relief : premiers résultats sur un transect alpin de forte intensité. »

Extraits de la Houille Blanche n°5, pp. 365-371.

**DESUROSNE I, OBERLIN G., RIBOT-BRUNO J. (1991)**

« Corrélogrammes spatio-climatiques des intensités de pluie en montagne. »

Hydrol. continent., vol. 6, pp. 91-107.

**DESUROSNE I, LEBLOIS E., OBERLIN G. (10-16 sept 1994)**

« Precipitation intensities in the french Alps. Regional trends and local effects. »

FRIEND-AMHY, High Tatras, Slovakia, 6p.

**DESUROSNE I, LEBLOIS E. (1997)**

« Rain intensities in the french Alps. »

Cemagref Ed., Antony, « FRIEND. Third Report : 1994-1997 », pp. 255-262.

**DROGE G. (1997)**

« Apports des outils de modélisation spatiale aux problèmes de distribution, de validation spatialisée et d'agrégation en hydro-climatologie. Application aux champs physiographiques et pluviométriques (bassin de la Fecht en amont de Turckheim, Haut-Rhin). »

Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur Strasbourg I - UFR de Géographie, 129p+annexes.

**DUNN M.R. (1983)**

« A simple sufficient condition for a variogram model to yield positive variances under restrictions. »

Mathematical Geology, vol. 15, n°4, pp. 553-564.

**DUNN M.R. (1984)**

« Conditions for a variogram model to yield positive variances under restrictions : reply. »

Mathematical Geology, vol. 16, n°4, pp. 433-434.

**FERRER J. (1997)**

« Mapping of statistical characterization of heavy rains at national scale. »

Cemagref Ed., Antony, « FRIEND. Third Report : 1994-1997 », pp. 277-283.

**FOUFOULA-GEORGIU E. (1989)**

« A probabilistic storm transposition approach for estimating exceedance probabilities of extreme precipitation depths. »

Water Ressources Research, vol. 25, n°5, pp. 799-815.

**GARCON R., TOURASSE R. (11-13 septembre 1995)**

« *Etude du risque de précipitations extrêmes de faibles pas de temps dans les Alpes.* »  
Conférence internationale en l'honneur de Jacques BERNIER : "Méthodes statistiques et bayésiennes en hydrologie", UNESCO, PARIS, (communication et poster).

**HUDSON G., WACKERNAGEL H. (1993)**

« *Kriging temperature in Scotland using the external drift method.* »  
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre de Géostatistique, 27p.

**HUFF F.A. (1967)**

« *Time distribution of rainfall in heavy storms.* »  
Water Resources Research, vol. 3, n°4, pp. 1007-1019.

**HUMBERT J., PERRIN J. L. (1993)**

« *Précipitations et relief. Le cas du versant oriental des Hautes Vosges.* »  
L'Eau, la Terre et les Hommes, ouvrage en hommage à R. Frecaut. Presses Universitaires de Nancy, pp. 147-154.

**JALU R., PRUVOST J-M. (1957)**

« *Le temps sur les Alpes.* »  
La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 23-41.

**KITE G. W. (1979)**

« *Frequency and risk analyses in hydrology.* »  
Water Resources Publications, 224p.

**KRAJEWSKI W.F., CREUTIN J.D. (1992)**

« *Modélisation mathématique des champs de pluie. Quelques types d'approches et leurs applications.* »  
La Météorologie, Série VII, n°41, pp. 4-15.

**LANG M., DESUROSNE I. (14-16 septembre 1994)**

« *Esquisse des risques de crues à l'échelle Euro-méditerranéenne : les premiers résultats du programme FRIEND-AHMY exploitant les modèles AGREGEE et TPG.* »  
Congrès de la Société Hydrotechnique de France, Nîmes, pp. 123-130.

**LEBEL Th. (1984)**

« *Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes.* »  
Thèse Docteur Ingénieur, INPG, Grenoble, 339p.

**LEHUCHER P-M. (1986)**

« *Etude des épisodes pluvieux intenses sur la région Provence - Cote d'Azur - Riviera Italienne (1974-1982). Cartographie et reconstitution de séries horaires sur les bassins du Real Collobrier et du Paillon.* »  
Thèse Docteur, INPG, Grenoble, 199p.

**LEJEUNE C., DE SAINTIGNON M. F. (1970)**

« *Les précipitations anormales de février à avril 1970 dans le Nord des Alpes Françaises.* »

Revue de Géographie de Lyon, pp. 215-242.

**LLASAT M.C. (1997)**

« *Meteorological conditions of heavy rains.* »

Cemagref Ed., Antony, « FRIEND. Third Report : 1994-1997 », pp. 269-276.

**LOUP J. (1974)**

« *Les climats de montagne.* »

Cours polycopié Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 55p.

**MICHEL C. (2-3 mai 1984)**

« *Estimation régionale des pluies exceptionnelles : recherche d'un gradex régional.* »

CEMAGREF, Division Hydrologie-Hydraulique, S.H.F. - Section Pluviométrie, Journées d'Etudes sur les Précipitations Atmosphériques, 16p.

**MIMIKOU M.A., NIADAS I.A., HADJISSAVVA P.S., KOUVOPOULOS Y.S. (1994)**

« *Regional techniques for extreme rainfall and runoff prediction.* »

Hydrologie Continentale, vol. 9, n° 1, pp. 25-32.

**MYERS D.E. (1984)**

« *Letters to the editor. Conditions for a variogram model to yield positive variances under restrictions : comment.* »

Mathematical Geology, vol. 16, n°4, pp. 431-432.

**MYERS D.E. (1984)**

« *Co-kriging : new developments.* »

Geostatistics for Natural Resources Characterization, vol. 122, pp. 295-305.

**MYERS D.E. (1992)**

« *Spatial temporal geostatistical modeling in hydrology* »

« *Geostatistical Methods : recent developments and applications in surface and subsurface hydrology* », UNESCO, Paris, pp. 154-161.

**OBLED Ch. (1996)**

« *Cours d'initiation à la géostatistique en vue des applications en hydrologie, hydrométéorologie et hydrogéologie.* »

Cours ENSHMG, Grenoble, 107p.

**RASMUSSEN P.F., BOBEE B., BERNIER J. (1994)**

« *Une méthodologie générale de comparaison de modèles d'estimation régionale de crue.* »

Revue des Sciences de l'Eau, 7, pp. 23-41.

**REED D.W., STEWART E.J. (4-6 septembre 1989)**

« *Focus on rainfall growth estimation.* »

Second National Hydrology Symposium, University of Sheffield, Sheffield, pp. 3.57-3.65.

**SERRA L. (1957)**

« *La représentation des facteurs climatologiques par des couches d'égales probabilités.* »

La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 177-183.

**STRUPCZEWSKI W.G., MITOSEK H.T. (1992)**

« *Rainfall surface built on topography* »

« Geostatistical Methods : recent developments and applications in surface and subsurface hydrology », UNESCO, Paris, pp. 154-161.

**VAN HAME T. (1992)**

« *La pluie et le topoclimat.* »

Hydrologie Continentale, vol. 7, n°1, pp. 51-73.

**VANI M. (1957)**

« *Mesure des précipitations et emploi des nivopluviomètres en haute montagne.* »

La Météorologie, Série VI, n°45-46, pp. 127-131.

**YATES S.R., WARRICK A.W., MYERS D.E. (1986)**

« *Disjunctive kriging. 1. Overview of estimation and conditional probability.* »

Water Ressources Research, vol. 22, n°5, pp. 615-621.

**YATES S.R., WARRICK A.W., MYERS D.E. (1986)**

« *Disjunctive kriging. 2. Examples.* »

Water Ressources Research, vol. 22, n°5, pp. 623-630.

**YATES S.R., WARRICK A.W., MYERS D.E. (1986)**

« *Disjunctive kriging. 3. Cokriging.* »

Water Ressources Research, vol. 22, n°10, pp. 1371-1376.

**ZHANG R., KRAVCHENKO A., TUNG Y-T. (1996)**

« *Spatial and temporal distributions of precipitation in Wyoming.* »

16th Hydroly Day 1996, Hydrology Days Publication, Hubert J. Morel-Seytoux, pp. 377-388.

## **Annexe 1 :**

### **Liste des pluviographes disponibles**

Les coordonnées X et Y -en Lambert II étendu- ont été vérifiées à la main sur des cartes IGN à l'échelle 1/25000.



|    | Nom du pluviographe          | Provenance       | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km)  |
|----|------------------------------|------------------|----------|-----------|----------------|--------|---------|
| 1  | Abondance Froggy (74)        | EDF 1316         | 1000     | 1961-1990 | 30             | 938.50 | 2152.10 |
| 2  | Abries Ristolas (05)         | EDF 2430         | 1540     | 1952-1989 | 38             | 963.30 | 1988.10 |
| 3  | Aillon Le Jeune (73)         | EDF 1422         | 900      | 1960-1990 | 31             | 891.75 | 2075.30 |
| 4  | Allevard (38)                | EDF 1706         | 495      | 1980-1990 | 11             | 892.43 | 2050.81 |
| 5  | Allos (04)                   | EDF 2606         | 1450     | 1981-1993 | 13             | 942.90 | 1925.05 |
| 6  | Arvieux (05)                 | EDF 2436         | 1550     | 1984-1995 | 12             | 948.17 | 1985.12 |
| 7  | Avrieux (73)                 | EDF 1624         | 1100     | 1960-1990 | 31             | 944.32 | 2033.28 |
| 8  | Bas Thorenc Andon (06)       | EDF 2814         | 1170     | 1981-1995 | 15             | 959.30 | 1876.68 |
| 9  | Belleville Hauteluze (73)    | EDF 1580         | 1215     | 1960-1990 | 31             | 934.42 | 2095.00 |
| 10 | Bonneval Tralenta (73)       | EDF 1610         | 1830     | 1984-1995 | 12             | 969.20 | 2052.70 |
| 11 | Bons (74)                    | SRAE Rhône Alpes | 557      | 1970-1983 | 14             | 910.50 | 2149.35 |
| 12 | Bourg St Maurice (73)        | EDF 1514         | 895      | 1960-1989 | 30             | 945.00 | 2077.63 |
| 13 | Bouvante Forêt de Lente (26) | EDF 1954         | 1080     | 1986-1995 | 10             | 835.80 | 1999.38 |
| 14 | Briançon (05)                | EDF 2414         | 1324     | 1952-1990 | 39             | 939.05 | 1999.00 |
| 15 | Castillon Demandolx (04)     | EDF 2626         | 900      | 1968-1990 | 23             | 937.85 | 1884.15 |
| 16 | Cernon Vouglans (39)         | EDF 1230         | 515      | 1962-1990 | 29             | 854.87 | 2160.70 |
| 17 | Chalain Marigny (39)         | EDF 1220         | 465      | 1959-1990 | 32             | 862.55 | 2193.00 |
| 18 | Challes Les Eaux (73)        | Meteo France     | 291      | 1963-1987 | 25             | 883.62 | 2069.30 |
| 19 | Chamonix (74)                | EDF 1344         | 1035     | 1959-1990 | 32             | 952.00 | 2113.40 |
| 20 | Champoleon Les Borels (05)   | EDF 1804         | 1270     | 1959-1990 | 32             | 910.88 | 1976.66 |
| 21 | Charavines Les Vannes (38)   | EDF 1911         | 510      | 1962-1990 | 29             | 848.88 | 2053.20 |
| 22 | Chateauneuf Miravail (04)    | EDF 2539         | 670      | 1982-1995 | 14             | 871.30 | 1912.60 |
| 23 | Chezery (01)                 | EDF 1272         | 580      | 1961-1990 | 30             | 872.32 | 2141.80 |
| 24 | Clamensane (04)              | EDF 2531         | 700      | 1986-1995 | 10             | 897.45 | 1931.30 |
| 25 | Clans Bancairon (06)         | EDF 2834         | 330      | 1961-1990 | 30             | 985.20 | 1900.78 |
| 26 | Cluses Pressy (74)           | EDF 1365         | 475      | 1969-1990 | 22             | 926.75 | 2128.60 |
| 27 | Coursegoules (06)            | EDF 2816         | 1000     | 1953-1990 | 38             | 978.68 | 1877.18 |
| 28 | Draix Laval (04)             | Cemagref         | 847      | 1984-1995 | 11             | 923.40 | 1913.00 |

# Liste des pluviographes disponibles

| N° | Nom du pluviographe       | Provenance   | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km)  |
|----|---------------------------|--------------|----------|-----------|----------------|--------|---------|
| 29 | Embrun (05)               | EDF 2452     | 870      | 1952-1990 | 39             | 931.05 | 1960.43 |
| 30 | Eybens (38)               | Meteo France | 220      | 1952-1967 | 16             | 867.00 | 2022.30 |
| 31 | Fond de France (38)       | EDF 1702     | 1085     | 1984-1995 | 12             | 893.30 | 2037.90 |
| 32 | Forcalquier (04)          | EDF 2558     | 535      | 1982-1995 | 14             | 876.60 | 1890.40 |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | EDF 2474     | 1660     | 1984-1995 | 12             | 947.60 | 1933.70 |
| 34 | Gap (05)                  | EDF 2511     | 735      | 1983-1995 | 13             | 898.20 | 1958.50 |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | EDF 1280     | 335      | 1978-1991 | 14             | 868.80 | 2122.77 |
| 36 | Gran Scala (73)           | EDF 1604     | 1720     | 1976-1990 | 15             | 962.70 | 2034.40 |
| 37 | La Chaup (26)             | SRAE PACA    | 1390     | 1977-1990 | 14             | 879.60 | 1971.90 |
| 38 | La Condamine (04)         | EDF 2468     | 1310     | 1952-1993 | 42             | 950.65 | 1949.72 |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | SRAE PACA    | 1616     | 1977-1990 | 14             | 881.95 | 1970.80 |
| 40 | Lambruisse (04)           | EDF 2620     | 1125     | 1981-1995 | 15             | 929.30 | 1902.67 |
| 41 | Lassera                   | DDA          | 325      | 1969-1989 | 21             | 839.60 | 2149.40 |
| 42 | Le Chatelard (73)         | EDF 1633     | 740      | 1983-1990 | 8              | 924.87 | 2032.10 |
| 43 | Le Chazelet (05)          | EDF 1732     | 1780     | 1956-1990 | 35             | 911.00 | 2013.60 |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | EDF 1664     | 545      | 1960-1990 | 31             | 909.80 | 2044.62 |
| 45 | Les Rousses (39)          | EDF 1240     | 1115     | 1959-1990 | 32             | 885.87 | 2171.20 |
| 46 | Liebvilliers (25)         | EDF 1122     | 365      | 1983-1990 | 8              | 937.00 | 2267.60 |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | EDF 2520     | 1035     | 1963-1990 | 28             | 867.25 | 1968.75 |
| 48 | Mallemort (13)            | EDF 2575     | 150      | 1973-1990 | 18             | 831.43 | 1861.35 |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | EDF 2582     | 700      | 1978-1992 | 16             | 915.80 | 1912.40 |
| 50 | Molines (05)              | EDF 1814     | 1240     | 1953-1990 | 38             | 899.90 | 1979.00 |
| 51 | Montmaur (05)             | EDF 2523     | 900      | 1980-1995 | 16             | 880.90 | 1958.60 |
| 52 | Nevache (05)              | EDF 2402     | 1590     | 1953-1990 | 38             | 937.73 | 2011.10 |
| 53 | Pellafof Le Sautet (38)   | EDF 1844     | 800      | 1963-1990 | 28             | 882.53 | 1986.05 |
| 54 | Pelvoux Les Claus (05)    | EDF 2420     | 1250     | 1952-1990 | 39             | 927.38 | 1994.83 |
| 55 | Planche                   | DDA          | 275      | 1969-1989 | 21             | 836.05 | 2128.15 |
| 56 | Pont Escoffier (38)       | EDF 1178     | 770      | 1961-1990 | 30             | 889.31 | 2011.10 |

|    | Nom du pluviographe        | Provenance       | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km)  | Y (km)  |
|----|----------------------------|------------------|----------|-----------|----------------|---------|---------|
| 57 | Pontarlier (25)            | EDF 1108         | 840      | 1980-1990 | 11             | 906.20  | 2220.25 |
| 58 | Real 64                    | Cemagref         | 645      | 1966-1994 | 29             | 927.46  | 1815.18 |
| 59 | Real 74                    | Cemagref         | 80       | 1966-1994 | 29             | 912.29  | 1811.74 |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | EDF 1571         | 1580     | 1985-1995 | 11             | 934.00  | 2086.00 |
| 61 | Scientrier (74)            | SRAE Rhône Alpes | 460      | 1970-1983 | 14             | 907.10  | 2132.20 |
| 62 | Sciez (74)                 | SRAE Rhône Alpes | 413      | 1970-1983 | 14             | 911.40  | 2155.50 |
| 63 | Serres (05)                | EDF 2526         | 670      | 1963-1990 | 28             | 868.73  | 1941.88 |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | EDF 2500         | 1210     | 1983-1995 | 13             | 921.40  | 1936.00 |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | SRAE Rhône Alpes | 785      | 1970-1983 | 14             | 890.00  | 2126.20 |
| 66 | St Bonnet (05)             | EDF 1812         | 1020     | 1984-1995 | 12             | 896.30  | 1971.90 |
| 67 | St Dalmes de Tende (06)    | EDF 2854         | 650      | 1984-1995 | 12             | 1021.00 | 1907.90 |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | EDF 2822         | 1140     | 1961-1990 | 30             | 966.75  | 1927.50 |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | EDF 1832         | 1265     | 1959-1990 | 32             | 885.80  | 1972.32 |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | EDF 2560         | 690      | 1963-1990 | 28             | 876.15  | 1899.93 |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | EDF 1945         | 384      | 1967-1987 | 21             | 834.15  | 2044.60 |
| 72 | St Genis Jubee (05)        | SRAE PACA        | 880      | 1974-1990 | 17             | 875.70  | 1939.00 |
| 73 | St Jorioz (74)             | SRAE Rhône Alpes | 450      | 1974-1983 | 10             | 898.85  | 2099.85 |
| 74 | St Martin D'Heres (38)     | Meteo France     | 210      | 1968-1989 | 22             | 870.00  | 2027.88 |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | SRAE Rhône Alpes | 880      | 1970-1983 | 14             | 930.70  | 2159.85 |
| 76 | St Véran (05)              | EDF 2432         | 2010     | 1984-1995 | 12             | 959.30  | 1976.80 |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | EDF 2897         | 75       | 1966-1990 | 25             | 963.90  | 1854.80 |
| 78 | Thones (74)                | EDF 1406         | 625      | 1959-1990 | 32             | 909.50  | 2105.75 |
| 79 | Thorame (04)               | EDF 2608         | 1160     | 1983-1995 | 13             | 937.80  | 1908.60 |
| 80 | Trablettes (01)            | EDF 1252         | 430      | 1959-1990 | 32             | 847.65  | 2142.48 |
| 81 | Vacheresse (74)            | SRAE Rhône Alpes | 800      | 1970-1983 | 14             | 933.75  | 2155.30 |
| 82 | Vachette (05)              | SRAE PACA        | 1370     | 1976-1990 | 15             | 942.35  | 2000.10 |
| 83 | Valbonnais (38)            | EDF 1857         | 785      | 1963-1990 | 28             | 881.93  | 1995.23 |
| 84 | Valleiry Haut (01)         | SRAE Rhône Alpes | 530      | 1970-1983 | 14             | 880.70  | 2128.13 |

# Liste des pluviographes disponibles

|    | Nom du pluviographe   | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km)  |
|----|-----------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|---------|
| 85 | Vallières (74)        | EDF 1432   | 310      | 1961-1990 | 30             | 878.10 | 2106.50 |
| 86 | Varces Rochefort (38) | EDF 1886   | 250      | 1957-1990 | 34             | 864.32 | 2016.90 |
| 87 | Veynes (05)           | SRAE PACA  | 820      | 1971-1990 | 20             | 877.80 | 1954.53 |
| 88 | Vignotat (73)         | EDF 1548   | 600      | 1959-1990 | 32             | 932.20 | 2058.92 |
| 89 | Villard De Lans (38)  | EDF 1940   | 1050     | 1960-1990 | 31             | 853.55 | 2013.43 |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | EDF 1110   | 950      | 1985-1995 | 11             | 928.30 | 2239.30 |

## **Annexe 2 :**

# Liste des pluviomètres disponibles

Les coordonnées X et Y sont en Lambert II étendu.

Pour la provenance :

- les numéros à 7 ou 8 chiffres correspondent à des pluviomètres issus de la « banque pluvio » (de Météo France),
- les numéros à 4 chiffres correspondent à des pluviomètres gérés par EDF.

| Département                | Nom du pluviomètre            | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|----------------------------|-------------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 01 Ain                     | 1 ANGLEFORT                   | 1010001    | 280      | 1950 1985 | 31             | 866.0  | 2105.7 |
|                            | 2 BALAN                       | 1027001    | 197      | 1968 1991 | 24             | 813.3  | 2096.2 |
|                            | 3 BELLEY                      | 1034001    | 277      | 1933 1995 | 59             | 860.6  | 2089.4 |
|                            | 4 BOURG-EN-BRESSE             | 1053001    | 240      | 1928 1992 | 59             | 822.6  | 2138.1 |
|                            | 5 CHANAY                      | 1082001    | 480      | 1964 1995 | 32             | 867.2  | 2117.4 |
|                            | 6 CHATILLON-LA-PALUD          | 1092001    | 260      | 1959 1995 | 37             | 825.9  | 2111.9 |
|                            | 7 DIVONNE-LES-BAINS           | 1143001    | 500      | 1946 1995 | 50             | 893.7  | 2160.0 |
|                            | 8 GIRON                       | 1174001    | 980      | 1959 1995 | 35             | 865.1  | 2142.1 |
|                            | 9 HAUTEVILLE-LOMPNES          | 1185001    | 820      | 1963 1988 | 26             | 853.1  | 2113.9 |
|                            | 10 LABALME                    | 1200001    | 596      | 1957 1982 | 26             | 843.3  | 2126.5 |
|                            | 11 LHUIS                      | 1216001    | 225      | 1928 1989 | 55             | 848.7  | 2086.4 |
|                            | 12 MARLIEUX                   | 1235001    | 280      | 1959 1995 | 37             | 809.1  | 2119.6 |
|                            | 13 MIJOUX                     | 1247003    | 1012     | 1934 1995 | 55             | 883.2  | 2159.8 |
|                            | 14 MONTAGNIEU                 | 1255001    | 220      | 1949 1975 | 27             | 843.5  | 2092.9 |
|                            | 15 MONTLUEL                   | 1262001    | 195      | 1929 1983 | 36             | 811.1  | 2098.2 |
|                            | 16 NURIEUX-VOLOGNAT           | 1267001    | 450      | 1947 1968 | 22             | 845.3  | 2137.7 |
|                            | 17 NANTUA                     | 1269001    | 479      | 1928 1995 | 55             | 852.1  | 2133.5 |
|                            | 18 NEUVILLE-SUR-AIN           | 1273001    | 275      | 1934 1995 | 55             | 835.3  | 2125.2 |
|                            | 19 SAINT-JULIEN-SUR-REYSSOUZE | 1367001    | 189      | 1928 1982 | 48             | 813.7  | 2157.5 |
|                            | 20 SALAVRE                    | 1391001    | 240      | 1956 1995 | 40             | 831.5  | 2156.0 |
|                            | 21 TENAY                      | 1416001    | 345      | 1933 1995 | 59             | 846.0  | 2106.9 |
|                            | 22 VILLEREVERSURE             | 1447001    | 299      | 1953 1977 | 25             | 834.8  | 2136.1 |
|                            | 23 VIRIEU-LE-GRAND            | 1452001    | 284      | 1950 1986 | 37             | 857.3  | 2097.9 |
|                            | 24 VONNAS                     | 1457001    | 190      | 1947 1992 | 46             | 804.7  | 2138.8 |
|                            | 25 GRON                       | 1274       | 980      | 1959 1994 | 36             | 865.2  | 2142.4 |
|                            | 26 HAUTEVILLE LA LECHERE      | 1262       | 800      | 1947 1994 | 48             | 852.7  | 2114.0 |
|                            | 27 TENAY                      | 1264       | 350      | 1959 1994 | 36             | 845.9  | 2107.8 |
|                            | 1 BANON                       | 4018001    | 780      | 1940 1995 | 48             | 864.2  | 1898.5 |
| 04 Alpes de Haute Provence |                               |            |          |           |                |        |        |



Liste des pluviomètres disponibles

| Département                | Nom du pluviomètre             | Provenance | Cote (m) | Période | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|----------------------------|--------------------------------|------------|----------|---------|----------------|--------|--------|
| 04 Alpes de Haute Provence | 2 BARCELONNETTE                | 4019001    | 1135     | 1928    | 1995           | 941.9  | 1941.8 |
|                            | 3 BARREME                      | 4022001    | 720      | 1966    | 1995           | 924    | 1891.5 |
|                            | 4 BEAUJEU                      | 4024001    | 1050     | 1934    | 1995           | 921.4  | 1923   |
|                            | 5 (LE)CASTELLARD-MELAN         | 4040001    | 1199     | 1934    | 1990           | 903    | 1916.7 |
|                            | 6 (LE)CASTELLET                | 4041001    | 473      | 1958    | 1995           | 892.6  | 1888.6 |
|                            | 7 CHATEAU-ARNOUX-SAINT-AUBAN   | 4049001    | 457      | 1954    | 1995           | 892.9  | 1902.4 |
|                            | 8 COLMARS                      | 4061001    | 1250     | 1934    | 1974           | 943    | 1918.4 |
|                            | 9 DIGNE-LES-BAINS              | 4070008    | 585      | 1950    | 1995           | 911.5  | 1905.7 |
|                            | 10 ENTRAGES                    | 4074001    | 600      | 1961    | 1995           | 914.2  | 1898.4 |
|                            | 11 ENTREVAUX                   | 4076001    | 475      | 1966    | 1995           | 959.8  | 1893.4 |
|                            | 12 GREOUX-LES-BAINS            | 4094001    | 298      | 1962    | 1993           | 885.9  | 1868.1 |
|                            | 13 MANOSQUE                    | 4112001    | 390      | 1967    | 1995           | 877.9  | 1876.6 |
|                            | 14 (LES)MEES                   | 4116001    | 375      | 1958    | 1995           | 888.3  | 1893.8 |
|                            | 15 MISON                       | 4123001    | 560      | 1953    | 1995           | 884    | 1922.1 |
|                            | 16 MOUSTIERS-SAINTE-MARIE      | 4135001    | 610      | 1970    | 1993           | 912.6  | 1878.9 |
|                            | 17 QUINSON                     | 4158001    | 380      | 1971    | 1995           | 898.7  | 1862.5 |
|                            | 18 REILLANNE                   | 4160002    | 560      | 1928    | 1979           | 867.3  | 1881.1 |
|                            | 19 SAINT-ETIENNE-LES-ORGUES    | 4178001    | 700      | 1928    | 1995           | 875.9  | 1899.7 |
|                            | 20 SAINT-JURS                  | 4184001    | 890      | 1962    | 1995           | 910.6  | 1885   |
|                            | 21 SAINT-MICHEL-L'OBSERVATOIRE | 4192001    | 650      | 1950    | 1995           | 871.5  | 1887.1 |
|                            | 22 SAINT-PAUL                  | 4193002    | 1903     | 1971    | 1995           | 951    | 1955.8 |
|                            | 23 UVERNET-FOURS               | 4226001    | 1660     | 1954    | 1995           | 947.6  | 1933.9 |
|                            | 24 VALENTOLE                   | 4230001    | 589      | 1958    | 1995           | 893.7  | 1877.8 |
|                            | 25 VERGONS                     | 4236001    | 1035     | 1934    | 1974           | 941.5  | 1888.7 |
|                            | 26 ALLEMAGNE EN PROVENCE       | 2656       | 450      | 1951    | 1975           | 895.7  | 1871.5 |
|                            | 27 CASTELLANE                  | 2628       | 735      | 1959    | 1994           | 934.7  | 1880.7 |
|                            | 28 JAUZIERS LANS LE SERRET     | 2470       | 1500     | 1961    | 1994           | 952.0  | 1943.6 |
|                            | 29 LA BRILLANNE                | 2554       | 377      | 1948    | 1994           | 884.5  | 1886.6 |

| Département                | Nom du puyomètre            | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|----------------------------|-----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 04 Alpes de Haute Provence | 30 LA MOTTE DU CAIRE        | 2516       | 690      | 1961 1986 | 26             | 894.5  | 1931.7 |
|                            | 31 LE LAUZET-CHAMPANASTAIS  | 2476       | 930      | 1958 1972 | 15             | 926.5  | 1944.8 |
|                            | 32 SISTERON                 | 2542       | 480      | 1948 1978 | 31             | 888.3  | 1917.0 |
|                            | 33 ST ANDRE LES ALPES       | 2622       | 895      | 1948 1994 | 47             | 934.4  | 1894.0 |
|                            | 34 ST PAUL SUR UBAYE        | 2460       | 1903     | 1959 1994 | 36             | 957.0  | 1964.7 |
|                            | 35 ST PONS DE BARCELONNETTE | 2472       | 1135     | 1958 1972 | 15             | 940.6  | 1941.0 |
|                            | 36 STE CROIX                | 2651       | 500      | 1976 1994 | 19             | 905.3  | 1866.8 |
|                            | 37 STE TULLE                | 2573       | 290      | 1973 1994 | 22             | 876.1  | 1871.0 |
|                            | 38 VALBELLE                 | 2540       | 580      | 1948 1972 | 25             | 883.2  | 1912.0 |
|                            | 1 CHATEAU-VILLE-VIEILLE     | 5038001    | 1355     | 1928 1995 | 68             | 953.2  | 1983.2 |
| 05 Hautes Alpes            | 2 MONTGENEVRE               | 5085001    | 1850     | 1939 1995 | 41             | 946.4  | 2002.1 |
|                            | 3 MONTJAY                   | 5086001    | 815      | 1938 1974 | 35             | 860.6  | 1934.2 |
|                            | 4 PUY-SAINT-VINCENT         | 5110001    | 1380     | 1955 1995 | 40             | 928.8  | 1989.7 |
|                            | 5 ROSANS                    | 5126001    | 665      | 1971 1995 | 25             | 849.2  | 1937.0 |
|                            | 6 SAINT-JEAN-SAINT-NICOLAS  | 5145001    | 1120     | 1935 1975 | 37             | 907.7  | 1970.6 |
|                            | 7 (LA)SAULCE                | 5162001    | 580      | 1950 1975 | 25             | 892.3  | 1942.9 |
|                            | 8 VARS                      | 5177001    | 1810     | 1936 1971 | 32             | 945.3  | 1966.1 |
|                            | 9 VILLAR-LOUBIERE           | 5182001    | 1033     | 1928 1995 | 68             | 901.0  | 1987.7 |
|                            | 10 AGNIERES EN DEVOLUY      | 1830       | 1245     | 1959 1975 | 17             | 881.0  | 1972.5 |
|                            | 11 ANCELLE                  | 1808       | 1360     | 1959 1994 | 36             | 906.8  | 1965.7 |
|                            | 12 BARCILLONNETTE           | 2514       | 850      | 1959 1994 | 36             | 884.5  | 1943.7 |
|                            | 13 CEILLAC                  | 2438       | 1640     | 1958 1994 | 33             | 951.3  | 1973.1 |
|                            | 14 CERVIERES                | 2416       | 1640     | 1958 1972 | 15             | 946.3  | 1995.3 |
|                            | 15 CHAMPCELLA               | 2426       | 1100     | 1948 1994 | 47             | 934.6  | 1978.7 |
|                            | 16 CHATEAU QUEYRAS          | 2434       | 1345     | 1959 1994 | 36             | 952.0  | 1982.8 |
|                            | 17 FRESSINIERES VIOLLINS    | 2424       | 1305     | 1959 1994 | 36             | 929.2  | 1980.4 |
|                            | 18 GUILLESTRE               | 2442       | 980      | 1958 1972 | 15             | 942.0  | 1971.5 |
|                            | 19 LA CHAPELLE VALGAUDEMAR  | 1820       | 1265     | 1948 1994 | 47             | 904.7  | 1986.4 |



Liste des pluviomètres disponibles

| Département        | Nom du pluviomètre        | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|--------------------|---------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 05 Hautes Alpes    | 20 LARAGNE                | 2530       | 575      | 1933 1994 | 61             | 877.8  | 1930.0 |
|                    | 21 LE MONETIER LES BAINS  | 2412       | 1430     | 1958 1994 | 24             | 929.0  | 2005.8 |
|                    | 22 LES ORRES LE MELEZET   | 2454       | 1445     | 1948 1994 | 47             | 934.5  | 1953.8 |
|                    | 23 ORCIERES               | 1802       | 1440     | 1948 1994 | 47             | 915.5  | 1972.7 |
|                    | 24 REALLON                | 2456       | 1410     | 1959 1994 | 36             | 919.0  | 1963.1 |
|                    | 25 ROUSSET SERRE PONCON   | 2502       | 675      | 1959 1994 | 36             | 912.2  | 1948.6 |
|                    | 26 ST FIRMIN              | 1824       | 940      | 1959 1994 | 36             | 891.3  | 1982.6 |
|                    | 27 ST JULIEN EN BEAUCHENE | 2522       | 922      | 1959 1975 | 17             | 867.9  | 1963.0 |
| 06 Alpes Maritimes | 28 ST PIERRE D'ARGENCON   | 2524       | 780      | 1959 1975 | 17             | 867.1  | 1952.0 |
|                    | 1 ANTIBES                 | 6004005    | 30       | 1966 1995 | 30             | 986.2  | 1855.9 |
|                    | 2 (L)BAR-SUR-LOUP         | 6010001    | 330      | 1966 1995 | 30             | 974.8  | 1866.4 |
|                    | 3 BEUIL                   | 6016001    | 1465     | 1928 1995 | 60             | 972.2  | 1910.9 |
|                    | 4 (LA)BOLLENE-VESUBIE     | 6020001    | 650      | 1932 1970 | 39             | 1000.9 | 1900.6 |
|                    | 5 BOUYON                  | 6022001    | 745      | 1950 1986 | 37             | 983.4  | 1880   |
|                    | 6 BREIL-SUR-ROYA          | 6023001    | 320      | 1931 1995 | 37             | 1014.7 | 1894.9 |
|                    | 7 CANNES                  | 6029001    | 3        | 1949 1995 | 47             | 973.2  | 1847.8 |
|                    | 8 CARROS                  | 6033001    | 63       | 1967 1995 | 29             | 991.8  | 1874.9 |
|                    | 9 (LA)COLLE-SUR-LOUP      | 6044001    | 44       | 1950 1995 | 46             | 981.5  | 1866.8 |
|                    | 10 COLOMARS               | 6046001    | 305      | 1953 1990 | 37             | 993.3  | 1874.2 |
|                    | 11 CONTES                 | 6048001    | 188      | 1966 1995 | 30             | 1001   | 1879.2 |
|                    | 12 ENTRAUNES              | 6056001    | 1250     | 1928 1995 | 68             | 952.9  | 1919   |
|                    | 13 (L')ESCARENE           | 6057001    | 380      | 1931 1995 | 60             | 1003.3 | 1884.9 |
|                    | 14 EZE                    | 6059001    | 420      | 1966 1995 | 30             | 1005.5 | 1872   |
|                    | 15 FONTAN                 | 6062001    | 425      | 1932 1971 | 30             | 1018.4 | 1903.1 |
|                    | 16 GRASSE                 | 6069001    | 175      | 1956 1995 | 39             | 971.1  | 1860.6 |
|                    | 17 GREOLIERES             | 6070001    | 1380     | 1966 1995 | 22             | 972.6  | 1881.2 |
|                    | 18 GUILLAUMES             | 6071001    | 780      | 1931 1995 | 63             | 961.9  | 1909.3 |
|                    | 19 ISOLA                  | 6073001    | 870      | 1931 1995 | 55             | 976.9  | 1920.7 |

| Département        | Nom du pluviomètre         | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|--------------------|----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 06 Alpes Maritimes | 20 LANTOSQUE               | 6074002    | 485      | 1932 1975 | 43             | 999.4  | 1898.7 |
|                    | 21 LEVENS                  | 6075001    | 530      | 1950 1995 | 46             | 993.2  | 1885.4 |
|                    | 22 LUCERAM                 | 6077001    | 1410     | 1953 1995 | 42             | 1003.9 | 1888.7 |
|                    | 23 MENTON                  | 6083001    | 16       | 1956 1995 | 38             | 1018.4 | 1880.3 |
|                    | 24 MOULINET                | 6086001    | 780      | 1950 1995 | 45             | 1007.9 | 1896.4 |
|                    | 25 PEILLE                  | 6091002    | 1000     | 1966 1995 | 30             | 1011.7 | 1879.9 |
|                    | 26 PEILLON                 | 6092001    | 145      | 1950 1995 | 46             | 1005.1 | 1877.6 |
|                    | 27 PEONE                   | 6094001    | 1659     | 1951 1995 | 44             | 968.2  | 1910.6 |
|                    | 28 PUGET-THENIERS          | 6099001    | 420      | 1948 1995 | 48             | 966.5  | 1893.8 |
|                    | 29 ROQUEBRUNE-CAP-MARTIN   | 6104002    | 40       | 1966 1995 | 30             | 1014.6 | 1876.4 |
|                    | 30 (LA)ROQUETTE-SUR-VAR    | 6109001    | 260      | 1966 1991 | 26             | 992.8  | 1880.5 |
|                    | 31 SAINT-AUBAN             | 6116001    | 1050     | 1930 1995 | 66             | 953.7  | 1881.9 |
|                    | 32 SAINT-DALMAS-LE-SELVAGE | 6119001    | 1500     | 1931 1995 | 61             | 960.3  | 1930.6 |
|                    | 33 SAINT-JEAN-CAP-FERRAT   | 6121001    | 138      | 1901 1995 | 79             | 1001.9 | 1864.4 |
|                    | 34 SAINT-MARTIN-DU-VAR     | 6126001    | 111      | 1966 1986 | 21             | 990.1  | 1880.4 |
|                    | 35 SAINT-SAUVEUR-SUR-TINEE | 6129001    | 508      | 1932 1995 | 60             | 982    | 1909.5 |
|                    | 36 SAINT-VALLIER-DE-THIEY  | 6130001    | 715      | 1950 1995 | 45             | 962.6  | 1867.6 |
|                    | 37 SIGALE                  | 6135001    | 620      | 1961 1995 | 35             | 970.9  | 1886.6 |
|                    | 38 THEOULE-SUR-MER         | 6138001    | 15       | 1966 1990 | 25             | 973.4  | 1844.1 |
|                    | 39 (LA)TRINITE             | 6149001    | 310      | 1966 1995 | 30             | 1000.2 | 1869.8 |
|                    | 40 (LA)TURBIE              | 6150001    | 486      | 1967 1995 | 29             | 1008   | 1874.1 |
|                    | 41 UTELLE                  | 6151002    | 279      | 1950 1992 | 41             | 996.1  | 1891.9 |
|                    | 42 VALBONNE                | 6152001    | 190      | 1965 1991 | 27             | 980.5  | 1861.2 |
|                    | 43 VALDEBLORE              | 6153001    | 1050     | 1936 1995 | 56             | 990    | 1908.2 |
|                    | 44 VALLAURIS               | 6155001    | 110      | 1966 1987 | 22             | 981    | 1853.8 |
|                    | 45 VENANSON                | 6156001    | 1130     | 1928 1972 | 38             | 994.2  | 1907.1 |
|                    | 46 VILLARS-SUR-VAR         | 6158001    | 420      | 1966 1995 | 30             | 982.6  | 1892.9 |
|                    | 47 ENTRAUMES LE CLOT       | 2802       | 1250     | 1959 1994 | 36             | 951.9  | 1919.2 |

Liste des pluviomètres disponibles

| Département         | Nom du pluviomètre       | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|---------------------|--------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 06 Alpes Maritimes  | 48 GUILLAUMES            | 2804       | 780      | 1959 1994 | 36             | 960.9  | 1908.9 |
|                     | 49 ISOLA                 | 2826       | 870      | 1959 1994 | 36             | 976.0  | 1920.5 |
|                     | 50 ST MARTIN VESUBIE     | 2840       | 1000     | 1959 1994 | 36             | 993.2  | 1908.3 |
| 13 Bouches Du Rhône | 1 AIX-EN-PROVENCE        | 13001001   | 173      | 1949 1987 | 39             | 850.0  | 1841.3 |
|                     | 2 AUBAGNE                | 13005001   | 127      | 1928 1990 | 51             | 862.4  | 1815.3 |
|                     | 3 BERRE-L'ETANG          | 13014001   | 1        | 1928 1982 | 38             | 871.7  | 1818.6 |
|                     | 4 CABRIES                | 13019001   | 163      | 1928 1995 | 47             | 841.3  | 1835.8 |
|                     | 5 CARRY-LE-ROUET         | 13021001   | 4        | 1950 1995 | 32             | 828.6  | 1818.3 |
|                     | 6 CASSIS                 | 13022001   | 50       | 1928 1995 | 53             | 861.8  | 1807.2 |
|                     | 7 CHATEAURENARD          | 13027001   | 43       | 1928 1995 | 54             | 802.6  | 1879.0 |
|                     | 8 (LA)CIOTAT             | 13028001   | 316      | 1948 1995 | 48             | 863.7  | 1802.3 |
|                     | 9 CUGES-LES-PINS         | 13030001   | 210      | 1948 1995 | 48             | 873.3  | 1813.9 |
|                     | 10 EYGUIERES             | 13035001   | 93       | 1928 1995 | 46             | 817.3  | 1858.7 |
|                     | 11 (LA)FARE-LES-OLIVIERS | 13037001   | 53       | 1928 1995 | 50             | 831.0  | 1842.8 |
|                     | 12 GARDANNE              | 13041001   | 283      | 1955 1989 | 35             | 831.6  | 1842.8 |
|                     | 13 GEMENOS               | 13042001   | 130      | 1960 1995 | 36             | 866.7  | 1815.1 |
|                     | 14 ISTRES                | 13047001   | 23       | 1933 1995 | 53             | 811.2  | 1840.8 |
|                     | 15 LAMBESC               | 13050001   | 220      | 1928 1995 | 54             | 836.1  | 1854.5 |
|                     | 16 MARIGNANE             | 13054001   | 6        | 1931 1995 | 51             | 834.2  | 1830.9 |
|                     | 17 MARSEILLE             | 13055003   | 6        | 1930 1992 | 47             | 849.0  | 1807.0 |
|                     | 18 MARTIGUES             | 13056001   | 6        | 1928 1976 | 36             | 820.3  | 1818.3 |
|                     | 19 MEYRARGUES            | 13059001   | 210      | 1961 1995 | 26             | 858.0  | 1854.4 |
|                     | 20 (LES)PENNES-MIRABEAU  | 13071001   | 80       | 1965 1995 | 31             | 842.0  | 1827.6 |
|                     | 21 PORT-DE-BOUC          | 13077002   | 4        | 1928 1977 | 36             | 814.5  | 1826.5 |
|                     | 22 ROGNÈS                | 13082001   | 186      | 1961 1995 | 35             | 843.8  | 1860.8 |
|                     | 23 ROQUEFORT-LA-BEDOULE  | 13085002   | 276      | 1928 1974 | 32             | 867.2  | 1811.0 |
|                     | 24 ROQUEVAIRE            | 13086001   | 167      | 1967 1995 | 29             | 865.3  | 1821.8 |
|                     | 25 ROUSSET               | 13087001   | 235      | 1928 1995 | 54             | 867.3  | 1836.4 |

| Département         | Nom du pluviomètre         | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|---------------------|----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 13 Bouches Du Rhône | 26 SAINT-ANDIOL            | 13089001   | 54       | 1973 1995 | 23             | 812.1  | 1873.2 |
|                     | 27 SAINT-CHAMAS            | 13092001   | 10       | 1928 1995 | 53             | 818.6  | 1842.3 |
|                     | 28 SAINT-MARTIN-DE-CRAU    | 13097002   | 21       | 1928 1995 | 46             | 799.8  | 1851.7 |
|                     | 29 SAINT-PAUL-LES-DURANCE  | 13099001   | 296      | 1961 1995 | 35             | 876.4  | 1862.2 |
|                     | 30 SAINT-REMY-DE-PROVENCE  | 13100001   | 58       | 1928 1981 | 39             | 801.0  | 1867.8 |
|                     | 31 SALON-DE-PROVENCE       | 13103002   | 65       | 1930 1995 | 47             | 816.6  | 1852.7 |
|                     | 32 TRET'S                  | 13110001   | 249      | 1928 1983 | 42             | 871.3  | 1833.1 |
| 25 Doubs            | 1 JOUGNE                   | 25318001   | 1000     | 1943 1995 | 53             | 909.4  | 2203.7 |
|                     | 2 LABERGEMENT-SAINTE-MARIE | 25320001   | 851      | 1943 1995 | 53             | 900.6  | 2206.2 |
|                     | 3 GRANGES STE MARIE        | 1102       | 850      | 1959 1994 | 36             | 901.4  | 2204.9 |
|                     | 4 LES FOURGS               | 1106       | 1100     | 1960 1974 | 15             | 910.3  | 2211.7 |
|                     | 5 MOUTHE                   | 1100       | 935      | 1960 1974 | 15             | 894.4  | 2197.2 |
| 26 Drôme            | 1 BEAUFORT-SUR-GERVANNE    | 26035001   | 370      | 1947 1995 | 49             | 822.0  | 1979.6 |
|                     | 2 BELLEGARDE-EN-DIOIS      | 26047001   | 943      | 1962 1995 | 34             | 844.8  | 1953.5 |
|                     | 3 BOURDEAUX                | 26056001   | 420      | 1961 1995 | 35             | 822.0  | 1957.7 |
|                     | 4 BOURG-LES-VALENCE        | 26058001   | 120      | 1963 1986 | 23             | 801.6  | 1996.9 |
|                     | 5 BUIS-LES-BARONNIES       | 26063001   | 379      | 1950 1988 | 35             | 834.4  | 1923.6 |
|                     | 6 CHATILLON-EN-DIOIS       | 26086003   | 565      | 1929 1995 | 53             | 849.4  | 1970.8 |
|                     | 7 CREST                    | 26108001   | 186      | 1929 1984 | 40             | 810.2  | 1973.0 |
|                     | 8 DIE                      | 26113001   | 418      | 1929 1990 | 50             | 839.9  | 1977.3 |
|                     | 9 DIEULEFIT                | 26114001   | 430      | 1952 1983 | 31             | 816.8  | 1950.6 |
|                     | 10 GLANDAGE                | 26142001   | 1000     | 1967 1995 | 29             | 859.9  | 1969.2 |
|                     | 11 MARSANNE                | 26176001   | 280      | 1957 1995 | 39             | 801.1  | 1963.5 |
|                     | 12 MARSAZ                  | 26177001   | 218      | 1971 1995 | 25             | 805.1  | 2015.9 |
|                     | 13 MOLLANS-SUR-OUVEZE      | 26188001   | 280      | 1974 1995 | 22             | 828.1  | 1919.3 |
|                     | 14 MONTAUBAN-SUR-L'OUVEZE  | 26189001   | 700      | 1929 1995 | 53             | 851.4  | 1924.7 |
|                     | 15 MONTJOUX                | 26202001   | 540      | 1962 1995 | 34             | 819.6  | 1949.3 |
|                     | 16 MONTLAUR-EN-DIOIS       | 26204001   | 530      | 1950 1977 | 22             | 845.2  | 1963.7 |

Liste des pluviomètres disponibles

| Département | Nom du pluviomètre          | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------|-----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 26 Drôme    | 17 MONTRIGAUD               | 26210001   | 480      | 1959 1982 | 24             | 819.3  | 2028.2 |
|             | 18 MONTSEGUR-SUR-LAUZON     | 26211001   | 150      | 1950 1995 | 46             | 801.0  | 1932.5 |
|             | 19 NYONS                    | 26220003   | 250      | 1971 1992 | 22             | 823.2  | 1932.6 |
|             | 20 PUY-SAINT-MARTIN         | 26258001   | 211      | 1970 1995 | 26             | 809.0  | 1961.3 |
|             | 21 REMUZAT                  | 26264001   | 450      | 1964 1992 | 29             | 840.7  | 1939.3 |
|             | 22 SAINT-BARTHELEMY-DE-VALS | 26295001   | 198      | 1959 1995 | 37             | 801.7  | 2022.1 |
|             | 23 SAINT-JEAN-EN-ROYANS     | 26307001   | 280      | 1929 1995 | 51             | 832.9  | 2005.2 |
|             | 24 SAINT-JULIEN-EN-QUINT    | 26308001   | 550      | 1961 1986 | 26             | 833.5  | 1985.9 |
|             | 25 SAINT-MARCEL-LES-VALENCE | 26313001   | 190      | 1965 1995 | 31             | 804.5  | 2001.2 |
|             | 26 SAINT-SORLIN-EN-VALLOIRE | 26330001   | 245      | 1949 1995 | 47             | 803.4  | 2033.4 |
|             | 27 SEDERON                  | 26340001   | 815      | 1964 1995 | 32             | 855.9  | 1916.1 |
|             | 28 VALDROME                 | 26361001   | 860      | 1965 1995 | 31             | 857.8  | 1950.2 |
|             | 29 CHATUZANGE PIZANCON      | 1925       | 165      | 1959 1994 | 36             | 816.7  | 2008.1 |
|             | 30 LUC EN DIOS              | 2110       | 560      | 1948 1981 | 34             | 847.0  | 1962.0 |
|             | 31 STE EULALIE-PT EN ROYANS | 1952       | 205      | 1948 1994 | 47             | 836.4  | 2011.1 |
| 38 Isere    | 1 AUTRANS                   | 38021001   | 1090     | 1950 1995 | 46             | 852.5  | 2024.9 |
|             | 2 BEAUREPAIRE               | 38034001   | 260      | 1949 1995 | 47             | 813    | 2040.8 |
|             | 3 BOURGOIN-JALLIEU          | 38053001   | 254      | 1947 1995 | 49             | 829.4  | 2069.9 |
|             | 4 CHANTELOUVE               | 38073001   | 1000     | 1947 1995 | 48             | 885.5  | 2003.1 |
|             | 5 CHAPAREILLAN              | 38075001   | 270      | 1949 1995 | 46             | 885.2  | 2058   |
|             | 6 CHATEAU-BERNARD           | 38090001   | 800      | 1948 1990 | 39             | 855.1  | 2002.3 |
|             | 7 CHATELUS                  | 38092001   | 309      | 1952 1978 | 26             | 839.2  | 2010.9 |
|             | 8 CHICHILIANNE              | 38103001   | 990      | 1962 1995 | 34             | 856.4  | 1984   |
|             | 9 CHIRENS                   | 38105001   | 463      | 1949 1995 | 47             | 852.9  | 2053.2 |
|             | 10 CLELLES                  | 38113001   | 815      | 1955 1995 | 39             | 859.6  | 1985.7 |
|             | 11 CORENC                   | 38126001   | 227      | 1963 1988 | 25             | 869.2  | 2030.3 |
|             | 12 CORPS                    | 38128001   | 935      | 1947 1995 | 46             | 885.5  | 1986.1 |
|             | 13 (LA)COTE-SAINT-ANDRE     | 38130001   | 340      | 1947 1995 | 48             | 828.8  | 2044.5 |



| Département | Nom du pignonnière            | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------|-------------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 38 Isere    | 14 FAVERGES-DE-LA-TOUR        | 38162001   | 394      | 1948 1995 | 47             | 848.4  | 2070.7 |
|             | 15 (LA)FERRIERE               | 38163002   | 904      | 1955 1995 | 41             | 893.5  | 2042.4 |
|             | 16 FONTANIL-CORNILLON         | 38170001   | 204      | 1953 1995 | 43             | 861.2  | 2033.9 |
|             | 17 (LA)GARDE                  | 38177001   | 1080     | 1948 1974 | 27             | 892    | 2014.3 |
|             | 18 GRESSE-EN-VERCORS          | 38186001   | 1220     | 1950 1995 | 41             | 855.1  | 1994   |
|             | 19 LALLEY                     | 38204001   | 850      | 1969 1995 | 27             | 864.3  | 1978.4 |
|             | 20 LAVALDENS                  | 38207001   | 1110     | 1950 1995 | 43             | 879.5  | 2007.3 |
|             | 21 LEYRIEU                    | 38210001   | 210      | 1956 1980 | 25             | 827    | 2088.4 |
|             | 22 MENS                       | 38226002   | 780      | 1950 1995 | 45             | 869.9  | 1985.4 |
|             | 23 MOIRANS                    | 38239001   | 196      | 1948 1978 | 30             | 853.2  | 2041.5 |
|             | 24 (LA)MOTTE-D'AVEILLANS      | 38265001   | 937      | 1949 1994 | 45             | 868.6  | 2001.1 |
|             | 25 (LE)PIN                    | 38305001   | 530      | 1950 1977 | 27             | 847.8  | 2055.8 |
|             | 26 POMMIER-DE-BEAUREPAIRE     | 38311001   | 480      | 1970 1995 | 26             | 818.3  | 2049.1 |
|             | 27 (LE)PONT-DE-BEAUVOISIN     | 38315001   | 230      | 1948 1989 | 38             | 860.2  | 2064.7 |
|             | 28 PROVEYSIEUX                | 38325001   | 600      | 1961 1995 | 34             | 864.3  | 2036.1 |
|             | 29 ROISSARD                   | 38342001   | 770      | 1949 1995 | 43             | 860.9  | 1992.4 |
|             | 30 ROYBON                     | 38347001   | 640      | 1956 1995 | 40             | 829.2  | 2028.4 |
|             | 31 SAINT-GERVAIS              | 38390001   | 249      | 1950 1981 | 31             | 847.1  | 2027.3 |
|             | 32 SAINT-LAURENT-DU-PONT      | 38412001   | 415      | 1949 1995 | 45             | 865.9  | 2049.2 |
|             | 33 SAINT-MARCELLIN            | 38416001   | 281      | 1948 1986 | 39             | 834.8  | 2020.8 |
|             | 34 SAINT-PIERRE-DE-CHARTREUSE | 38442001   | 945      | 1947 1995 | 48             | 870.8  | 2046.2 |
|             | 35 SAINT-PIERRE-D'ENTREMONT   | 38446001   | 644      | 1948 1995 | 46             | 874.9  | 2052   |
|             | 36 (LA)SALETTE-FALLAVALUX     | 38469001   | 1770     | 1970 1995 | 26             | 887.8  | 1991   |
|             | 37 TENCIN                     | 38501001   | 236      | 1950 1995 | 45             | 884    | 2040.9 |
|             | 38 (LA)TERRASSE               | 38503001   | 234      | 1949 1976 | 27             | 881.7  | 2042.6 |
|             | 39 THEYS                      | 38504001   | 615      | 1949 1995 | 46             | 886.8  | 2040.1 |
|             | 40 (LA)TOUR-DU-PIN            | 38509001   | 339      | 1949 1991 | 42             | 843.3  | 2067.5 |
|             | 41 TREMINIS                   | 38514001   | 900      | 1948 1969 | 21             | 871.7  | 1977.6 |

# Liste des pluviomètres disponibles

| Département | Nom du pluviomètre          | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------|-----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 38 Isère    | 42 TULLINS                  | 38517001   | 190      | 1950 1995 | 44             | 847    | 2038   |
|             | 43 VALJOUFFREY              | 38522001   | 980      | 1950 1995 | 45             | 890.8  | 1993.3 |
|             | 44 VAUJANY                  | 38527001   | 772      | 1949 1995 | 46             | 891.7  | 2023.4 |
|             | 45 (LE)VERSOUD              | 38538001   | 220      | 1973 1995 | 23             | 876.4  | 2029.6 |
|             | 46 ALLEMOND LE RIVIER       | 1750       | 1270     | 1959 1994 | 36             | 891.0  | 2029.5 |
|             | 47 BESSE                    | 1736       | 1470     | 1923 1994 | 71             | 901.9  | 2015.4 |
|             | 48 BOURG D'OISANS           | 1740       | 720      | 1907 1989 | 82             | 891.3  | 2012.9 |
|             | 49 BOURNE                   | 1943       | 670      | 1979 1994 | 16             | 843.1  | 2011.6 |
|             | 50 ENGIN'S                  | 1900       | 850      | 1959 1994 | 35             | 857.4  | 2025.0 |
|             | 51 ENTRAIGUES               | 1856       | 810      | 1959 1994 | 36             | 884.7  | 1995.7 |
|             | 52 GRANDE CHARTREUSE        | 1460       | 945      | 1948 1994 | 47             | 870.3  | 2046.4 |
|             | 53 LE VERNEY                | 1752       | 770      | 1948 1994 | 47             | 891.8  | 2023.4 |
|             | 54 MONESTIER DE CLERMONT    | 1870       | 810      | 1948 1994 | 47             | 860.1  | 1996.9 |
|             | 55 MONT DE LANS LE CHAM BON | 1734       | 1050     | 1959 1975 | 17             | 898.9  | 2011.2 |
|             | 56 MONTAUD VIF DE LA CLE    | 1916       | 800      | 1948 1994 | 47             | 852.8  | 2033.6 |
|             | 57 ORNÔN LA PALUD           | 1744       | 950      | 1959 1994 | 36             | 887.7  | 2012.4 |
|             | 58 REVEL                    | 1724       | 630      | 1958 1994 | 37             | 877.0  | 2026.8 |
|             | 59 ST CHRISTOPHE EN OISANS  | 1772       | 1560     | 1950 1994 | 45             | 904.0  | 2001.3 |
|             | 60 ST HILLAIRE DU TOUVET    | 1722       | 910      | 1948 1994 | 45             | 878.7  | 2042.5 |
|             | 61 ST JEAN DE BOURNAY       | 1918       | 370      | 1958 1994 | 37             | 819.0  | 2059.4 |
| 39 Jura     | 1 ARINTHOD                  | 39016001   | 455      | 1949 1995 | 47             | 848.5  | 2159.8 |
|             | 2 BEAUFORT                  | 39043001   | 248      | 1949 1995 | 47             | 837.4  | 2179.6 |
|             | 3 BELLEFONTAINE             | 39047001   | 1028     | 1950 1994 | 45             | 885.8  | 2179.7 |
|             | 4 BESAIN                    | 39050001   | 535      | 1950 1995 | 46             | 864.1  | 2204.1 |
|             | 5 CERNIEBAUD                | 39085002   | 970      | 1978 1995 | 18             | 888.9  | 2199.7 |
|             | 6 CHARCIER                  | 39107001   | 521      | 1957 1990 | 34             | 861.1  | 2186.2 |
|             | 7 CHASSAL                   | 39113001   | 360      | 1977 1995 | 19             | 866.7  | 2157.6 |
|             | 8 CHATEL-DE-JOUX            | 39118001   | 760      | 1949 1995 | 47             | 865.3  | 2175.5 |

| Département       | Nom du pluviomètre            | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------------|-------------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 39 Jura           | 9 CLAIRVAUX-LES-LACS          | 39154001   | 535      | 1946 1994 | 49             | 861.6  | 2180.9 |
|                   | 10 CRANCOT                    | 39177001   | 509      | 1951 1995 | 43             | 854.0  | 2192.8 |
|                   | 11 DOMBLANS                   | 39199001   | 253      | 1951 1995 | 45             | 849.0  | 2201.0 |
|                   | 12 (LE)FRASNOIS               | 39240001   | 800      | 1962 1995 | 34             | 872.4  | 2188.0 |
|                   | 13 LEZAT                      | 39294001   | 705      | 1967 1995 | 29             | 876.0  | 2172.5 |
|                   | 14 LONS-LE-SAUNIER            | 39300001   | 255      | 1901 1972 | 42             | 845.8  | 2190.7 |
|                   | 15 MARNY                      | 39313001   | 464      | 1946 1995 | 50             | 862.6  | 2193.1 |
|                   | 16 MONTAIGU                   | 39348001   | 485      | 1970 1995 | 26             | 848.0  | 2188.7 |
|                   | 17 MONTMOROT                  | 39362001   | 280      | 1973 1995 | 23             | 842.8  | 2192.6 |
|                   | 18 MORBIER                    | 39367001   | 928      | 1946 1993 | 48             | 882.2  | 2179.8 |
|                   | 19 PIMORIN                    | 39420001   | 510      | 1969 1995 | 27             | 843.1  | 2171.9 |
|                   | 20 POLIGNY                    | 39434001   | 321      | 1947 1970 | 24             | 857.0  | 2209.3 |
|                   | 21 SAINT-AMOUR                | 39475001   | 250      | 1950 1995 | 46             | 831.0  | 2164.2 |
|                   | 22 SAINT-CLAUDE               | 39478001   | 434      | 1948 1995 | 36             | 871.1  | 2160.3 |
|                   | 23 SAINT-JULIEN               | 39485001   | 365      | 1952 1995 | 44             | 839.5  | 2159.1 |
|                   | 24 SAINT-LAURENT-EN-GRANDVAUX | 39487001   | 910      | 1946 1995 | 50             | 876.9  | 2181.3 |
|                   | 25 THOIRETTE                  | 39530001   | 296      | 1949 1995 | 47             | 846.0  | 2146.0 |
|                   | 26 BOURG DE SIROD             | 1207       | 540      | 1964 1994 | 31             | 876.5  | 2195.3 |
|                   | 27 LAMOURA                    | 1246       | 1155     | 1959 1994 | 36             | 878.5  | 2161.0 |
|                   | 28 MORBIER                    | 1244       | 930      | 1959 1994 | 36             | 883.9  | 2181.7 |
|                   | 29 PORTE-SACHET               | 1249       | 360      | 1948 1994 | 47             | 866.6  | 2157.6 |
| 69 Rhône          | 1 VILLEURBANNE                | 1063       | 182      | 1959 1994 | 36             | 800.7  | 2088.4 |
|                   | 2 LYON BRON                   | 1062       | 200      | 1946 1993 | 48             | 800.2  | 2084.7 |
|                   | 3 ST GENIS LAVAL              | 1061       | 300      | 1901 1973 | 73             | 790.6  | 2080.1 |
| 71 Saone et Loire | 1 BEAUREPAIRE-EN-BRESSE       | 71027001   | 200      | 1975 1995 | 21             | 833.0  | 2189.5 |
|                   | 2 BELLEVESVRE                 | 71029001   | 191      | 1930 1995 | 55             | 830.9  | 2208.7 |
|                   | 3 LESSARD-EN-BRESSE           | 71256001   | 210      | 1975 1995 | 21             | 809.7  | 2198.6 |
|                   | 4 LOUHANS                     | 71263001   | 181      | 1928 1976 | 42             | 820.9  | 2184.7 |



Liste des pluviomètres disponibles

| Département       | Nom du pluviomètre         | Provenance | Cote (m) | Période | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------------|----------------------------|------------|----------|---------|----------------|--------|--------|
| 71 Saone et Loire | 5 ROMENAY                  | 71373001   | 210      | 1975    | 1995           | 808.2  | 2169.6 |
|                   | 6 VARENNES-SAINT-SAUVEUR   | 71558001   | 200      | 1975    | 1995           | 823.5  | 2170.6 |
|                   | 7 CHALON                   | 1030       | 178      | 1960    | 1994           | 793.9  | 2201.9 |
|                   | 8 MACON                    | 1050       | 216      | 1962    | 1994           | 792.1  | 2147.2 |
| 73 Savoie         | 1 AIGUEBELETTE-LE-LAC      | 73001001   | 400      | 1941    | 1966           | 871.4  | 2067.2 |
|                   | 2 AIX-LES-BAINS            | 73008001   | 365      | 1947    | 1971           | 878.1  | 2083.4 |
|                   | 3 ARGENTINE                | 73019001   | 419      | 1948    | 1973           | 910.7  | 2062.6 |
|                   | 4 BEAUFORT                 | 73034002   | 1030     | 1950    | 1995           | 929.4  | 2084.9 |
|                   | 5 BESSANS                  | 73040005   | 1715     | 1951    | 1995           | 965.5  | 2045.5 |
|                   | 6 BONNEVAL-SUR-ARC         | 73047001   | 1830     | 1948    | 1977           | 968.5  | 2052.0 |
|                   | 7 BOZEL                    | 73055001   | 865      | 1957    | 1995           | 937.1  | 2057.4 |
|                   | 8 BRIDES-LES-BAINS         | 73057001   | 580      | 1950    | 1995           | 930.4  | 2059.0 |
|                   | 9 CHAMPAGNY-EN-VANNOISE    | 73071001   | 1460     | 1950    | 1971           | 940.5  | 2059.8 |
|                   | 10 CHAVANNE(LA)            | 73082001   | 318      | 1959    | 1995           | 892.0  | 2061.7 |
|                   | 11 DESERTS(LES)            | 73098001   | 1030     | 1947    | 1995           | 886.2  | 2075.5 |
|                   | 12 LANSLEBOURG-MONT-CENIS  | 73143003   | 2000     | 1952    | 1995           | 961.6  | 2034.7 |
|                   | 13 MONTGELLAFREY           | 73167001   | 1080     | 1950    | 1995           | 911.6  | 2051.3 |
|                   | 14 MOTTE-SERVOLEX(LA)      | 73179001   | 300      | 1959    | 1995           | 875.1  | 2072.4 |
|                   | 15 LECHERE(LA)             | 73187002   | 1345     | 1958    | 1995           | 935.7  | 2070.6 |
|                   | 16 NOVALAISE               | 73191001   | 450      | 1955    | 1995           | 867.9  | 2071.9 |
|                   | 17 ROCHETTE(LA)            | 73215001   | 350      | 1949    | 1995           | 895.0  | 2057.1 |
|                   | 18 STE-FOY-TARENTEAISE     | 73232001   | 1230     | 1948    | 1995           | 954.4  | 2077.8 |
|                   | 19 ST-JEAN-D ARVES         | 73242001   | 1285     | 1949    | 1995           | 910.1  | 2029.0 |
|                   | 20 STE-MARIE-DE-CUINES     | 73255001   | 543      | 1948    | 1995           | 910.1  | 2044.4 |
|                   | 21 ST-MARTIN-D ARC         | 73256001   | 740      | 1973    | 1995           | 924.9  | 2032.2 |
|                   | 22 ST-MARTIN-DE-BELLEVILLE | 73257001   | 1500     | 1952    | 1995           | 926.4  | 2049.7 |
|                   | 23 ST-MARTIN-DE-LA-PORTE   | 73258001   | 820      | 1950    | 1995           | 922.7  | 2035.0 |
|                   | 24 ST-MICHEL-DE-MAURIENNE  | 73261001   | 1360     | 1949    | 1995           | 926.0  | 2033.5 |

| Département | Nom du pluviomètre        | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------|---------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 73 Savoie   | 25 ST-OFFENGE-DESSOUS     | 73263001   | 600      | 1949 1972 | 23             | 885.1  | 2088.2 |
|             | 26 TIGNES                 | 73296002   | 1560     | 1951 1995 | 44             | 958.4  | 2067.5 |
|             | 27 VERRENS-ARVEY          | 73312001   | 523      | 1959 1995 | 37             | 910.3  | 2080.4 |
|             | 28 VOGLANS                | 73329001   | 235      | 1973 1995 | 23             | 875.5  | 2076.5 |
|             | 29 YENNE                  | 73330001   | 230      | 1947 1995 | 44             | 865.9  | 2083.9 |
|             | 30 ALBERTVILLE            | 1532       | 350      | 1958 1994 | 37             | 915.1  | 2082.9 |
|             | 31 ARECHES BEAUFORT       | 1572       | 1030     | 1958 1994 | 37             | 929.5  | 2085.3 |
|             | 32 AUSSOIS                | 1622       | 1490     | 1935 1994 | 60             | 945.8  | 2035.3 |
|             | 33 ST JEAN D'ARVE         | 1652       | 1285     | 1948 1994 | 47             | 910.2  | 2028.9 |
|             | 34 LE BOURGET EN HUILE    | 1710       | 890      | 1958 1972 | 15             | 901.9  | 2062.1 |
|             | 35 LES BREVIERES          | 1508       | 1560     | 1948 1994 | 47             | 958.2  | 2066.8 |
|             | 36 LESCHERAINES           | 1424       | 590      | 1959 1994 | 36             | 893.6  | 2086.7 |
|             | 37 MONT CENIS             | 1602       | 2000     | 1959 1994 | 36             | 961.8  | 2035.4 |
|             | 38 MONT PASCAL            | 1656       | 1420     | 1959 1988 | 30             | 914.8  | 2045.9 |
|             | 39 MONT SOPEY             | 1684       | 1050     | 1958 1972 | 15             | 912.7  | 2065.7 |
|             | 40 MOUTIERS               | 1524       | 480      | 1948 1994 | 47             | 928.1  | 2062.6 |
|             | 41 PEISEY NANCROIX        | 1520       | 1350     | 1958 1994 | 37             | 945.0  | 2076.4 |
|             | 42 PRAGNOLAN              | 1540       | 1420     | 1948 1994 | 47             | 943.4  | 2052.0 |
|             | 43 ST ALBAN D'HURTIERES   | 1680       | 620      | 1949 1982 | 33             | 906.9  | 2060.8 |
|             | 44 ST ALBAN DES VILLARDS  | 1660       | 1100     | 1958 1992 | 35             | 905.5  | 2040.1 |
|             | 45 ST JEAN DE BELLEVILLE  | 1552       | 1060     | 1948 1994 | 47             | 924.5  | 2055.8 |
|             | 46 ST MARCEL BELLEVILLE   | 1550       | 1480     | 1959 1994 | 36             | 927.1  | 2049.7 |
|             | 47 ST SORLIN D'ARVE       | 1650       | 1550     | 1959 1994 | 34             | 905.8  | 2032.1 |
|             | 48 STE FOY LE MIROIR      | 1510       | 1225     | 1936 1994 | 59             | 954.8  | 2077.1 |
|             | 49 TERMIGNON              | 1616       | 1280     | 1958 1982 | 25             | 951.1  | 2040.6 |
|             | 50 UGINE                  | 1562       | 425      | 1959 1994 | 36             | 915.9  | 2092.1 |
|             | 51 VALLOIRE               | 1638       | 1435     | 1949 1994 | 46             | 922.0  | 2027.5 |
|             | 52 VALMEINIER LES MELEZES | 1636       | 1470     | 1958 1972 | 15             | 925.6  | 2029.0 |

Liste des pluviomètres disponibles

| Département     | Nom du pluviomètre         | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-----------------|----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 73 Savoie       | 53 VERSOYE LES GRANGES     | 1512       | 1330     | 1958 1994 | 37             | 947.2  | 2083.8 |
| 74 Haute Savoie | 1 ALBY-SUR-CHERAN          | 74002001   | 422      | 1947 1980 | 34             | 886.2  | 2097.4 |
|                 | 2 AYSE                     | 74024001   | 450      | 1948 1995 | 48             | 916.5  | 2128.2 |
|                 | 3 BONNEVAUX                | 74041001   | 800      | 1950 1982 | 33             | 933.3  | 2153.2 |
|                 | 4 CERCIER                  | 74051001   | 580      | 1948 1992 | 44             | 887.2  | 2120.7 |
|                 | 5 CHATEL                   | 74063002   | 1210     | 1972 1995 | 16             | 946.9  | 2150.6 |
|                 | 6 COMBLOUX                 | 74083001   | 990      | 1950 1982 | 33             | 933.9  | 2108.7 |
|                 | 7 (LES)CONTAMINES-MONTJOIE | 74085001   | 1200     | 1947 1995 | 49             | 941.0  | 2100.6 |
|                 | 8 CONTAMINE-SUR-ARVE       | 74087001   | 450      | 1949 1995 | 46             | 909.2  | 2133.0 |
|                 | 9 CUSY                     | 74097001   | 550      | 1959 1980 | 11             | 887.0  | 2091.8 |
|                 | 10 FAVERGES                | 74123001   | 516      | 1950 1976 | 27             | 907.8  | 2090.6 |
|                 | 11 GROISY                  | 74137001   | 670      | 1963 1995 | 33             | 897.2  | 2119.8 |
|                 | 12 MEYTHET                 | 74182001   | 452      | 1970 1995 | 15             | 891.6  | 2109.8 |
|                 | 13 MONTMIN                 | 74187001   | 1045     | 1948 1995 | 46             | 905.1  | 2096.8 |
|                 | 14 MORZINE                 | 74191001   | 960      | 1955 1995 | 41             | 937.3  | 2140.2 |
|                 | 15 PERS-JUSSY              | 74211001   | 580      | 1948 1995 | 47             | 903.6  | 2130.5 |
|                 | 16 RUMILLY                 | 74225001   | 345      | 1950 1995 | 46             | 880.8  | 2100.7 |
|                 | 17 SAINT-GERVAIS-LES-BAINS | 74236001   | 810      | 1950 1976 | 26             | 939.6  | 2108.0 |
|                 | 18 SAINT-GINGOLPH          | 74237001   | 940      | 1947 1995 | 47             | 942.3  | 2161.8 |
|                 | 19 SALLANCHES              | 74256001   | 545      | 1947 1995 | 49             | 932.9  | 2113.6 |
|                 | 20 SAMOËNS                 | 74258002   | 720      | 1947 1995 | 49             | 938.9  | 2130.2 |
|                 | 21 SEYSSSEL                | 74269001   | 370      | 1947 1979 | 33             | 872.2  | 2113.1 |
|                 | 22 THONON-LES-BAINS        | 74281001   | 375      | 1947 1995 | 41             | 916.7  | 2160.2 |
|                 | 23 USINENS                 | 74285001   | 417      | 1951 1995 | 45             | 871.2  | 2118.2 |
|                 | 24 ANNECY                  | 1414       | 450      | 1933 1993 | 61             | 893.1  | 2107.1 |
|                 | 25 ANNEMASSE ROMAGNY       | 1334       | 450      | 1959 1994 | 36             | 897.7  | 2138.0 |
|                 | 26 LA CLUSAZ               | 1402       | 1150     | 1949 1993 | 45             | 917.4  | 2106.9 |
|                 | 27 LE BIOT                 | 1312       | 690      | 1959 1994 | 36             | 930.1  | 2150.9 |

| Département     | Nom du pnyomètre           | Provenance | Cote (m) | Periode   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-----------------|----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 74 Haute Savoie | 28 LE GRAND BORNAND        | 1371       | 1300     | 1966 1994 | 27             | 918.2  | 2115.9 |
|                 | 29 LE REPOSOIR             | 1366       | 975      | 1953 1986 | 34             | 925.0  | 2121.0 |
|                 | 30 LES CONTAMINES          | 1350       | 1200     | 1959 1994 | 36             | 941.1  | 2100.9 |
|                 | 31 LES GETS                | 1382       | 1200     | 1959 1994 | 34             | 933.6  | 2138.2 |
|                 | 32 MEGEVE                  | 1560       | 1110     | 1958 1989 | 32             | 931.4  | 2107.8 |
|                 | 33 TANINGES                | 1384       | 630      | 1909 1977 | 69             | 927.8  | 2132.0 |
|                 | 1 (LES)ADRETS-DE-L'ESTEREL | 83001001   | 310      | 1957 1995 | 39             | 962.3  | 1846.1 |
| 83 Var          | 2 AIGUINES                 | 83002001   | 800      | 1952 1995 | 38             | 914.8  | 1871.4 |
|                 | 3 (LES)ARCS                | 83004001   | 100      | 1947 1993 | 46             | 935.5  | 1837.6 |
|                 | 4 AUPS                     | 83007001   | 500      | 1947 1982 | 35             | 913.9  | 1855.1 |
|                 | 5 BAGNOLS-EN-FORET         | 83008001   | 320      | 1972 1995 | 24             | 952.9  | 1847.1 |
|                 | 6 BANDOL                   | 83009001   | 50       | 1950 1989 | 38             | 878.3  | 1798.7 |
|                 | 7 BARJOLS                  | 83012001   | 270      | 1964 1995 | 32             | 896.7  | 1846.3 |
|                 | 8 (LE)BEAUSSET             | 83016001   | 170      | 1970 1995 | 26             | 882.1  | 1805.7 |
|                 | 9 BORMES-LES-MIMOSAS       | 83019002   | 93       | 1973 1995 | 23             | 928.7  | 1807.2 |
|                 | 10 BRIGNOLES               | 83023001   | 215      | 1950 1995 | 45             | 902.2  | 1829.8 |
|                 | 11 CABASSE                 | 83026001   | 171      | 1968 1995 | 28             | 914.4  | 1834.7 |
|                 | 12 CALLAS                  | 83028002   | 380      | 1950 1972 | 23             | 939.5  | 1852.6 |
|                 | 13 (LE)CANNET-DES-MAURES   | 83031001   | 79       | 1946 1995 | 50             | 928.6  | 1828.6 |
|                 | 14 (LE)CASTELLET           | 83035001   | 417      | 1969 1995 | 17             | 880.4  | 1811.7 |
|                 | 15 CAVALAIRE-SUR-MER       | 83036001   | 10       | 1950 1982 | 32             | 941.5  | 1805.8 |
|                 | 16 CHATEAUVIEUX            | 83040002   | 1040     | 1947 1968 | 22             | 941.6  | 1873.2 |
|                 | 17 COTIGNAC                | 83046001   | 372      | 1957 1995 | 39             | 906.8  | 1846.5 |
|                 | 18 CUERS                   | 83049001   | 185      | 1950 1975 | 25             | 903.0  | 1809.0 |
|                 | 19 DRAGUIGNAN              | 83050011   | 185      | 1964 1979 | 16             | 934.5  | 1845.1 |
|                 | 20 FREJUS                  | 83061001   | 2        | 1946 1995 | 50             | 957.1  | 1834.0 |
|                 | 21 GONFARON                | 83067001   | 160      | 1947 1995 | 47             | 920.9  | 1820.9 |
|                 | 22 GRIMAUD                 | 83068001   | 75       | 1965 1995 | 31             | 940.1  | 1816.8 |

Liste des pluviomètres disponibles

| Département | Nom du pluviomètre              | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------|---------------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 83 Var      | 23 HYERES                       | 83069002   | 143      | 1948 1995 | 48             | 917.8  | 1796.0 |
|             | 24 LORGUES                      | 83072001   | 250      | 1947 1995 | 46             | 925.7  | 1840.8 |
|             | 25 PLAN-D'AUPS-SAINTE-BAUME     | 83093001   | 679      | 1961 1993 | 33             | 879.0  | 1821.0 |
|             | 26 POURRIERES                   | 83097001   | 275      | 1952 1973 | 22             | 874.3  | 1839.3 |
|             | 27 RAMATUELLE                   | 83101001   | 110      | 1901 1995 | 57             | 953.0  | 1809.5 |
|             | 28 RIAN                         | 83104001   | 381      | 1951 1995 | 44             | 876.7  | 1850.8 |
|             | 29 ROQUEBRUNE-SUR-ARGENS        | 83107001   | 15       | 1965 1985 | 21             | 948.4  | 1836.1 |
|             | 30 (LA)ROQUEBRUSSANNE           | 83108001   | 380      | 1966 1995 | 30             | 895.7  | 1821.9 |
|             | 31 SAINTE-MAXIME                | 83115001   | 13       | 1950 1995 | 44             | 949.2  | 1821.7 |
|             | 32 SAINT-MAXIMIN-LA-SAINTE-BAUM | 83116001   | 310      | 1949 1995 | 45             | 885.6  | 1833.8 |
|             | 33 SAINT-RAPHAEL                | 83118002   | 126      | 1966 1995 | 30             | 966.2  | 1834.1 |
|             | 34 TOULON                       | 83137001   | 24       | 1946 1995 | 50             | 893.1  | 1795.7 |
|             | 35 TRIGANCE                     | 83142001   | 723      | 1947 1982 | 35             | 930.9  | 1870.8 |
|             | 36 SAINT-MANDRIER-SUR-MER       | 83153001   | 126      | 1968 1995 | 28             | 894.0  | 1793.0 |
|             | 37 AIGUINES                     | 2642       | 830      | 1961 1994 | 34             | 915.0  | 1865.8 |
|             | 38 AUPS                         | 2880       | 500      | 1948 1993 | 46             | 914.0  | 1855.3 |
|             | 39 COMPS SUR ARTUBY             | 2636       | 885      | 1907 1994 | 87             | 935.7  | 1865.1 |
|             | 40 LES ADRETS DE L'ESTEREL      | 2894       | 310      | 1948 1994 | 47             | 963.3  | 1846.5 |
|             | 41 MONS                         | 2890       | 815      | 1963 1994 | 32             | 953.0  | 1866.4 |
|             | 42 PLAN DE CANJUERS             | 2640       | 950      | 1963 1994 | 32             | 926.3  | 1862.9 |
|             | 43 REGUSSE                      | 2882       | 542      | 1948 1993 | 46             | 906.2  | 1857.7 |
|             | 44 TOURRETTES                   | 2892       | 366      | 1948 1994 | 47             | 952.8  | 1870.3 |
|             | 45 VERIGNON                     | 2646       | 840      | 1964 1994 | 31             | 916.7  | 1858.5 |
|             | 46 VINON                        | 2659       | 279      | 1975 1994 | 20             | 880.7  | 1864.3 |
| 84 Vaucluse | 1 APT                           | 84003001   | 234      | 1901 1983 | 49             | 847.2  | 1879.8 |
|             | 2 AVIGNON                       | 84007002   | 32       | 1949 1995 | 37             | 804.2  | 1882.7 |
|             | 3 (LA)BASTIDE-DES-JOURDANS      | 84009001   | 500      | 1949 1987 | 30             | 865.8  | 1870.3 |
|             | 4 BEDOIN                        | 84017001   | 1912     | 1901 1969 | 38             | 835.2  | 1912.4 |



| Département | Nom du pluviomètre         | Provenance | Cote (m) | Période   | Durée (années) | X (km) | Y (km) |
|-------------|----------------------------|------------|----------|-----------|----------------|--------|--------|
| 84 Vaucluse | 5 BRANTES                  | 84021001   | 650      | 1948 1983 | 36             | 840.3  | 1915.1 |
|             | 6 CARPENTRAS               | 84031001   | 99       | 1963 1995 | 33             | 818.2  | 1901.7 |
|             | 7 GORDES                   | 84050001   | 160      | 1959 1987 | 29             | 828.2  | 1880.0 |
|             | 8 JONQUERETTES             | 84055001   | 62       | 1975 1995 | 21             | 808.5  | 1886.6 |
|             | 9 LOURMARIN                | 84068001   | 224      | 1974 1995 | 22             | 844.1  | 1867.4 |
|             | 10 MALAUCENE               | 84069001   | 340      | 1948 1995 | 48             | 822.6  | 1911.4 |
|             | 11 ORANGE                  | 84087001   | 53       | 1952 1995 | 44             | 801.5  | 1907.5 |
|             | 12 SAINT-CHRISTOL          | 84107001   | 850      | 1958 1995 | 38             | 853.1  | 1897.2 |
|             | 13 SAINT-PIERRE-DE-VASSOLS | 84115001   | 290      | 1959 1995 | 37             | 826.3  | 1902.4 |
|             | 14 SARRIANS                | 84122002   | 32       | 1969 1995 | 27             | 810.5  | 1900.6 |
|             | 15 SAULT                   | 84123001   | 792      | 1959 1995 | 37             | 846.3  | 1904.1 |
|             | 16 VAISON-LA-ROMAINE       | 84137001   | 240      | 1974 1995 | 22             | 817.9  | 1921.2 |
|             | 17 VALREAS                 | 84138001   | 238      | 1959 1995 | 37             | 811.9  | 1934.3 |
|             | 18 VIENS                   | 84144001   | 620      | 1959 1995 | 37             | 791.5  | 1882.5 |
| Italie      | 1 PIETRAPORZIO (ITALIE)    | 7006       | 1250     | 1975 1991 | 17             | 980.2  | 1938.2 |

## **Annexe 3 :**

**Valeurs de pluies extrêmes pour les pluviographes et intervalles de confiance à 80 % correspondants.**

Pas de temps : 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h et 24 h.

Temps de retour de 10 ans et 100 ans, gradex et mode, coefficient de Montana.



| NOMS DES STATIONS |                              | Pluies décennales (mm/h) |      |           | Pluies centennales (mm/h) |      |           | Gradex (mm/h) | Mode (mm/h) |
|-------------------|------------------------------|--------------------------|------|-----------|---------------------------|------|-----------|---------------|-------------|
|                   |                              | borne inf                | P    | borne sup | borne inf                 | P    | borne sup |               |             |
| 1                 | Abondance Froggy (74)        | 25.6                     | 26.8 | 28.3      | 35.4                      | 37.6 | 40.4      | 4.6           | 9.0         |
| 2                 | Abries Ristolas (05)         | 16.3                     | 17.1 | 18.1      | 23.9                      | 25.5 | 27.3      | 3.5           | 3.4         |
| 3                 | Aillon Le Jeune (73)         | 24.0                     | 25.1 | 26.4      | 33.2                      | 35.2 | 37.7      | 4.3           | 8.5         |
| 4                 | Allevard (38)                | 19.9                     | 21.2 | 23.0      | 26.4                      | 28.8 | 32.3      | 3.2           | 8.7         |
| 5                 | Allos (04)                   | 18.0                     | 19.2 | 20.8      | 24.7                      | 26.9 | 30.1      | 3.3           | 6.5         |
| 6                 | Arvieux (05)                 | 18.7                     | 20.2 | 22.2      | 26.5                      | 29.3 | 33.2      | 3.9           | 5.1         |
| 7                 | Avrieux (73)                 | 16.0                     | 16.8 | 17.8      | 22.8                      | 24.3 | 26.2      | 3.2           | 4.4         |
| 8                 | Bas Thorenc Andon (06)       | 39.3                     | 42.3 | 46.4      | 56.7                      | 62.3 | 69.9      | 8.5           | 9.5         |
| 9                 | Belleville Hauteluce (73)    | 25.4                     | 26.7 | 28.2      | 36.0                      | 38.4 | 41.3      | 5.0           | 7.4         |
| 10                | Bonneval Tralenta (73)       | 13.2                     | 14.2 | 15.7      | 18.6                      | 20.5 | 23.3      | 2.7           | 3.9         |
| 11                | Bons (74)                    | 19.6                     | 21.1 | 23.0      | 27.3                      | 29.9 | 33.6      | 3.8           | 6.6         |
| 12                | Bourg St Maurice (73)        | 13.7                     | 14.3 | 15.1      | 18.9                      | 20.0 | 21.5      | 2.4           | 5.0         |
| 13                | Bouvante Forêt de Lente (26) | 29.3                     | 31.6 | 34.9      | 40.1                      | 44.3 | 50.5      | 5.4           | 10.7        |
| 14                | Briançon (05)                | 14.8                     | 15.5 | 16.2      | 20.8                      | 22.0 | 23.4      | 2.8           | 4.7         |
| 15                | Castillon Demandolx (04)     | 32.6                     | 34.7 | 37.2      | 47.4                      | 51.2 | 56.0      | 7.0           | 7.5         |
| 16                | Cernon Vouglans (39)         | 26.9                     | 28.2 | 29.8      | 37.4                      | 39.8 | 42.8      | 5.0           | 9.0         |
| 17                | Chalain Marigny (39)         | 26.1                     | 27.4 | 28.8      | 36.7                      | 39.0 | 41.8      | 4.9           | 8.3         |
| 18                | Challes Les Eaux (73)        | 22.1                     | 23.3 | 24.8      | 31.3                      | 33.5 | 36.4      | 4.3           | 6.6         |
| 19                | Chamonix (74)                | 17.4                     | 18.2 | 19.1      | 23.8                      | 25.2 | 26.9      | 3.0           | 6.6         |
| 20                | Champoleon Les Borels (05)   | 19.8                     | 20.7 | 21.8      | 27.5                      | 29.2 | 31.3      | 3.6           | 6.7         |
| 21                | Charavines Les Vannes (38)   | 27.5                     | 29.0 | 30.8      | 39.4                      | 42.1 | 45.5      | 5.6           | 7.5         |
| 22                | Chateauneuf Miravail (04)    | 35.7                     | 38.5 | 42.4      | 52.0                      | 57.3 | 64.6      | 8.0           | 7.7         |
| 23                | Chezery (01)                 | 26.7                     | 28.0 | 29.6      | 37.5                      | 39.9 | 42.9      | 5.1           | 8.5         |
| 24                | Clamensane (04)              | 30.1                     | 32.7 | 36.5      | 42.9                      | 47.8 | 55.0      | 6.4           | 8.0         |
| 25                | Clans Bancairon (06)         | 30.8                     | 32.5 | 34.5      | 44.7                      | 47.8 | 51.6      | 6.5           | 7.4         |
| 26                | Cluses Pressy (74)           | 24.4                     | 25.7 | 27.4      | 33.8                      | 36.3 | 39.4      | 4.5           | 8.3         |

|    | NOMS DES STATIONS         | Pluies décennales (mm/h) |      |           | Pluies centennales (mm/h) |      |           | Gradex (mm/h) | Mode (mm/h) |
|----|---------------------------|--------------------------|------|-----------|---------------------------|------|-----------|---------------|-------------|
|    |                           | borne inf                | P    | borne sup | borne inf                 | P    | borne sup |               |             |
| 27 | Coursegoules (06)         | 39.1                     | 41.9 | 45.3      | 59.2                      | 64.3 | 70.9      | 9.6           | 9.9         |
| 28 | Draix Laval (04)          | 32.5                     | 35.3 | 39.2      | 46.5                      | 51.6 | 59.0      | 6.9           | 8.5         |
| 29 | Embrun (05)               | 18.7                     | 19.5 | 20.5      | 26.5                      | 28.0 | 29.9      | 3.6           | 5.6         |
| 30 | Eybens (38)               | 28.5                     | 30.6 | 33.3      | 40.8                      | 44.7 | 50.0      | 6.0           | 7.3         |
| 31 | Fond de France (38)       | 29.0                     | 31.3 | 34.5      | 41.1                      | 45.5 | 51.6      | 6.0           | 8.1         |
| 32 | Forcalquier (04)          | 43.5                     | 47.2 | 52.4      | 64.0                      | 71.0 | 80.7      | 10.1          | 8.3         |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 21.4                     | 22.9 | 25.1      | 29.6                      | 32.5 | 36.6      | 4.1           | 7.2         |
| 34 | Gap (05)                  | 22.9                     | 24.7 | 27.1      | 32.3                      | 35.6 | 40.3      | 4.7           | 6.7         |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 21.6                     | 23.1 | 25.2      | 30.0                      | 32.9 | 36.8      | 4.2           | 7.1         |
| 36 | Gran Scala (73)           | 21.0                     | 22.5 | 24.5      | 29.5                      | 32.3 | 36.2      | 4.2           | 6.3         |
| 37 | La Chaup (26)             | 21.9                     | 23.6 | 26.0      | 31.1                      | 34.2 | 38.6      | 4.5           | 6.2         |
| 38 | La Condamine (04)         | 15.0                     | 15.6 | 16.4      | 21.1                      | 22.2 | 23.6      | 2.8           | 4.9         |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 20.4                     | 22.1 | 24.6      | 28.7                      | 31.9 | 36.6      | 4.2           | 6.1         |
| 40 | Lambruisse (04)           | 32.2                     | 34.6 | 37.7      | 46.1                      | 50.5 | 56.4      | 6.8           | 8.5         |
| 41 | Lassera                   | 24.8                     | 26.3 | 28.1      | 34.9                      | 37.6 | 41.0      | 4.8           | 7.7         |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 14.1                     | 15.5 | 17.8      | 19.7                      | 22.4 | 26.6      | 2.9           | 4.3         |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 12.3                     | 12.9 | 13.5      | 17.3                      | 18.3 | 19.6      | 2.3           | 3.9         |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 14.9                     | 15.5 | 16.4      | 20.4                      | 21.7 | 23.3      | 2.6           | 5.5         |
| 45 | Les Rousses (39)          | 23.8                     | 24.8 | 26.1      | 32.7                      | 34.6 | 37.0      | 4.2           | 8.8         |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 24.1                     | 26.4 | 29.9      | 33.9                      | 38.2 | 44.7      | 5.0           | 7.1         |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 23.4                     | 24.5 | 26.0      | 32.8                      | 34.9 | 37.6      | 4.4           | 7.4         |
| 48 | Mallermort (13)           | 31.2                     | 33.6 | 36.7      | 46.1                      | 50.5 | 56.4      | 7.2           | 5.8         |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 28.1                     | 30.2 | 33.0      | 40.3                      | 44.2 | 49.4      | 5.9           | 7.3         |
| 50 | Molines (05)              | 23.5                     | 24.5 | 25.7      | 33.0                      | 34.9 | 37.2      | 4.4           | 7.4         |
| 51 | Montmaur (05)             | 24.6                     | 26.2 | 28.2      | 34.1                      | 37.0 | 40.9      | 4.6           | 8.4         |
| 52 | Nevache (05)              | 15.1                     | 15.8 | 16.7      | 21.8                      | 23.2 | 24.9      | 3.1           | 3.8         |

| NOMS DES STATIONS |                            | Pluies décennales (mm/h) |      |           | Pluies centennales (mm/h) |      |           | Gradex (mm/h) | Mode (mm/h) |
|-------------------|----------------------------|--------------------------|------|-----------|---------------------------|------|-----------|---------------|-------------|
|                   |                            | borne inf                | P    | borne sup | borne inf                 | P    | borne sup |               |             |
| 53                | Pellafol Le Sautet (38)    | 22.7                     | 23.9 | 25.3      | 32.3                      | 34.5 | 37.3      | 4.5           | 6.4         |
| 54                | Pelvoux Les Claux (05)     | 13.7                     | 14.3 | 14.9      | 18.9                      | 20.0 | 21.3      | 2.4           | 4.8         |
| 55                | Planche                    | 29.8                     | 31.8 | 34.3      | 43.1                      | 46.8 | 51.5      | 6.4           | 7.2         |
| 56                | Pont Escoffier (38)        | 21.1                     | 22.1 | 23.3      | 29.5                      | 31.3 | 33.7      | 4.0           | 6.8         |
| 57                | Pontarlier (25)            | 18.8                     | 20.1 | 21.9      | 25.3                      | 27.8 | 31.2      | 3.3           | 7.5         |
| 58                | Real 64                    | 38.0                     | 40.6 | 43.9      | 57.0                      | 61.9 | 68.1      | 9.0           | 7.7         |
| 59                | Real 74                    | 38.1                     | 40.8 | 44.3      | 57.5                      | 62.7 | 69.2      | 9.3           | 7.0         |
| 60                | Roselend Beaufort (73)     | 18.3                     | 19.8 | 21.8      | 25.4                      | 28.1 | 32.0      | 3.5           | 6.1         |
| 61                | Scientrier (74)            | 17.2                     | 18.4 | 20.1      | 23.7                      | 26.0 | 29.1      | 3.2           | 6.0         |
| 62                | Sciez (74)                 | 19.9                     | 21.3 | 23.2      | 27.6                      | 30.2 | 33.8      | 3.8           | 6.7         |
| 63                | Serres (05)                | 29.1                     | 30.7 | 32.7      | 42.0                      | 45.0 | 48.8      | 6.1           | 7.1         |
| 64                | Seyne Les Alpes (04)       | 28.9                     | 31.1 | 34.0      | 40.9                      | 44.9 | 50.6      | 5.9           | 8.3         |
| 65                | St Blaise Mont Sion (74)   | 20.6                     | 22.1 | 24.1      | 29.0                      | 31.8 | 35.6      | 4.1           | 6.1         |
| 66                | St Bonnet (05)             | 23.7                     | 25.6 | 28.1      | 33.4                      | 36.8 | 41.7      | 4.8           | 7.0         |
| 67                | St Dalmes de Tende (06)    | 31.6                     | 34.4 | 38.2      | 45.5                      | 50.6 | 57.9      | 6.9           | 7.7         |
| 68                | St Etienne De Tinée (04)   | 22.0                     | 23.2 | 24.6      | 31.7                      | 33.8 | 36.6      | 4.5           | 5.7         |
| 69                | St Etienne En Devoluy (26) | 21.4                     | 22.4 | 23.7      | 30.1                      | 32.0 | 34.3      | 4.1           | 6.8         |
| 70                | St Etienne Les Orgues (04) | 32.9                     | 34.8 | 37.0      | 47.7                      | 51.1 | 55.4      | 6.9           | 8.0         |
| 71                | St Etienne St Geoirs (38)  | 29.7                     | 31.5 | 33.9      | 42.4                      | 45.8 | 50.2      | 6.1           | 8.1         |
| 72                | St Genis Jubee (05)        | 28.2                     | 30.2 | 33.0      | 40.7                      | 44.5 | 49.7      | 6.1           | 6.7         |
| 73                | St Jorioz (74)             | 21.7                     | 23.7 | 26.6      | 31.5                      | 35.3 | 40.9      | 4.9           | 4.6         |
| 74                | St Martin D'Heres (38)     | 21.5                     | 22.8 | 24.4      | 30.4                      | 32.7 | 35.7      | 4.2           | 6.6         |
| 75                | St Paul En Chablais (74)   | 22.9                     | 24.5 | 26.6      | 31.3                      | 34.2 | 38.2      | 4.1           | 8.5         |
| 76                | St Véran (05)              | 22.2                     | 24.2 | 27.0      | 32.5                      | 36.2 | 41.5      | 5.1           | 4.4         |
| 77                | Tanneron St Cassien (83)   | 36.5                     | 38.8 | 41.7      | 54.0                      | 58.3 | 63.7      | 8.3           | 6.9         |
| 78                | Thones (74)                | 24.7                     | 25.8 | 27.1      | 33.8                      | 35.8 | 38.3      | 4.3           | 9.3         |

|    | NOMS DES STATIONS     | Pluies décennales (mm/h) |      |           | Pluies centennales (mm/h) |      |           | Gradex (mm/h) | Mode (mm/h) |
|----|-----------------------|--------------------------|------|-----------|---------------------------|------|-----------|---------------|-------------|
|    |                       | borne inf                | P    | borne sup | borne inf                 | P    | borne sup |               |             |
| 79 | Thorame (04)          | 29.1                     | 31.3 | 34.2      | 41.0                      | 45.0 | 50.6      | 5.8           | 8.8         |
| 80 | Trablettes (01)       | 22.6                     | 23.5 | 24.7      | 30.8                      | 32.6 | 34.8      | 3.8           | 8.7         |
| 81 | Vacheresse (74)       | 28.9                     | 31.0 | 33.9      | 40.3                      | 44.2 | 49.6      | 5.6           | 9.3         |
| 82 | Vachette (05)         | 15.6                     | 16.8 | 18.4      | 22.2                      | 24.5 | 27.5      | 3.3           | 4.2         |
| 83 | Valbonnais (38)       | 22.1                     | 23.3 | 24.8      | 31.1                      | 33.4 | 36.2      | 4.3           | 6.7         |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 18.3                     | 19.6 | 21.5      | 26.0                      | 28.6 | 32.1      | 3.8           | 4.9         |
| 85 | Vallières (74)        | 22.4                     | 23.5 | 24.9      | 31.5                      | 33.6 | 36.2      | 4.3           | 7.0         |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 22.4                     | 23.4 | 24.7      | 31.5                      | 33.4 | 35.9      | 4.3           | 6.9         |
| 87 | Veynes (05)           | 27.6                     | 29.3 | 31.6      | 39.1                      | 42.4 | 46.6      | 5.6           | 7.8         |
| 88 | Vignotat (73)         | 14.5                     | 15.2 | 16.0      | 20.2                      | 21.4 | 22.9      | 2.6           | 5.0         |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 27.5                     | 28.9 | 30.7      | 39.3                      | 41.9 | 45.3      | 5.5           | 7.6         |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 31.0                     | 33.8 | 37.7      | 45.0                      | 50.2 | 57.7      | 7.0           | 6.8         |

|    | NOMS DES STATIONS            | Pluies décennales (mm/2h) |      |           | Pluies centennales (mm/2h) |      |           | Gradex (mm/2h) | Mode (mm/2h) |
|----|------------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                              | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 1  | Abondance Froggy (74)        | 29.3                      | 30.6 | 32.2      | 39.8                       | 42.2 | 45.1      | 4.9            | 11.6         |
| 2  | Abries Ristolas (05)         | 20.5                      | 21.4 | 22.4      | 29.3                       | 31.0 | 32.9      | 4.1            | 4.8          |
| 3  | Aillon Le Jeune (73)         | 30.9                      | 32.2 | 33.9      | 42.5                       | 45.1 | 48.3      | 5.5            | 11.1         |
| 4  | Alleverd (38)                | 24.3                      | 25.9 | 28.1      | 32.1                       | 35.0 | 39.2      | 3.9            | 10.8         |
| 5  | Allos (04)                   | 25.4                      | 27.2 | 29.6      | 35.2                       | 38.5 | 43.1      | 4.8            | 8.6          |
| 6  | Arvieux (05)                 | 24.6                      | 26.5 | 29.1      | 34.6                       | 38.1 | 43.1      | 4.9            | 7.4          |
| 7  | Avrieux (73)                 | 19.3                      | 20.3 | 21.4      | 27.4                       | 29.1 | 31.3      | 3.8            | 5.8          |
| 8  | Bas Thorenc Andon (06)       | 48.6                      | 52.3 | 57.3      | 70.1                       | 77.0 | 86.4      | 10.5           | 11.8         |
| 9  | Belleville Hauteluce (73)    | 29.9                      | 31.3 | 33.0      | 41.5                       | 44.1 | 47.3      | 5.4            | 10.3         |
| 10 | Bonneval Tralenta (73)       | 18.5                      | 19.9 | 21.9      | 26.0                       | 28.7 | 32.5      | 3.7            | 5.5          |
| 11 | Bons (74)                    | 25.6                      | 27.5 | 30.2      | 35.9                       | 39.4 | 44.4      | 5.1            | 8.0          |
| 12 | Bourg St Maurice (73)        | 18.1                      | 18.9 | 19.8      | 24.5                       | 25.9 | 27.7      | 3.0            | 7.2          |
| 13 | Bouvante Forêt de Lente (26) | 37.5                      | 40.3 | 44.2      | 50.7                       | 55.9 | 63.5      | 6.7            | 14.5         |
| 14 | Briançon (05)                | 20.1                      | 21.0 | 22.0      | 28.2                       | 29.8 | 31.8      | 3.8            | 6.4          |
| 15 | Castillon Demandolx (04)     | 38.8                      | 41.2 | 44.1      | 56.1                       | 60.5 | 66.1      | 8.2            | 9.4          |
| 16 | Cernon Vouglans (39)         | 33.7                      | 35.3 | 37.2      | 46.7                       | 49.6 | 53.3      | 6.1            | 11.8         |
| 17 | Chalain Marigny (39)         | 31.1                      | 32.5 | 34.3      | 43.2                       | 45.9 | 49.1      | 5.7            | 10.7         |
| 18 | Challes Les Eaux (73)        | 28.5                      | 30.0 | 31.9      | 40.1                       | 42.9 | 46.5      | 5.5            | 8.8          |
| 19 | Chamonix (74)                | 23.1                      | 24.1 | 25.3      | 31.5                       | 33.3 | 35.6      | 3.9            | 8.9          |
| 20 | Champoleon Les Borels (05)   | 25.4                      | 26.6 | 27.9      | 35.2                       | 37.3 | 39.8      | 4.6            | 9.0          |
| 21 | Charavines Les Vannes (38)   | 37.9                      | 40.0 | 42.5      | 54.8                       | 58.6 | 63.4      | 7.9            | 9.3          |
| 22 | Chateauneuf Miravail (04)    | 41.8                      | 45.0 | 49.4      | 60.2                       | 66.2 | 74.4      | 9.0            | 10.3         |
| 23 | Chezery (01)                 | 31.3                      | 32.7 | 34.5      | 43.0                       | 45.7 | 49.0      | 5.5            | 11.4         |
| 24 | Clamensane (04)              | 36.7                      | 39.9 | 44.6      | 52.3                       | 58.4 | 67.2      | 7.8            | 9.6          |
| 25 | Clans Bancairon (06)         | 36.3                      | 38.3 | 40.7      | 52.5                       | 56.1 | 60.6      | 7.6            | 8.9          |
| 26 | Cluses Pressy (74)           | 28.3                      | 29.7 | 31.6      | 38.7                       | 41.5 | 45.0      | 5.0            | 10.4         |

|    | NOMS DES STATIONS         | Pluies décennales (mm/2h) |      |           | Pluies centennales (mm/2h) |      |           | Gradex (mm/2h) | Mode (mm/2h) |
|----|---------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                           | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 27 | Coursegoules (06)         | 49.8                      | 53.3 | 57.7      | 75.4                       | 81.9 | 90.3      | 12.2           | 12.4         |
| 28 | Draix Laval (04)          | 39.8                      | 43.2 | 47.9      | 56.9                       | 63.1 | 72.1      | 8.5            | 10.5         |
| 29 | Embrun (05)               | 23.7                      | 24.8 | 26.0      | 33.5                       | 35.4 | 37.7      | 4.5            | 7.2          |
| 30 | Eybens (38)               | 37.7                      | 40.5 | 44.2      | 54.2                       | 59.4 | 66.4      | 8.0            | 9.6          |
| 31 | Fond de France (38)       | 36.7                      | 39.5 | 43.5      | 51.5                       | 56.8 | 64.3      | 7.4            | 11.1         |
| 32 | Forcalquier (04)          | 53.5                      | 58.2 | 64.6      | 79.0                       | 87.6 | 99.8      | 12.5           | 9.8          |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 29.7                      | 31.9 | 34.9      | 41.3                       | 45.3 | 51.1      | 5.7            | 9.8          |
| 34 | Gap (05)                  | 29.5                      | 31.8 | 35.0      | 41.6                       | 45.9 | 51.9      | 6.0            | 8.7          |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 27.0                      | 28.8 | 31.3      | 37.0                       | 40.4 | 45.2      | 4.9            | 9.7          |
| 36 | Gran Scala (73)           | 29.0                      | 31.4 | 34.9      | 41.5                       | 46.1 | 52.6      | 6.2            | 8.8          |
| 37 | La Chaup (26)             | 28.0                      | 30.1 | 33.0      | 39.4                       | 43.3 | 48.7      | 5.6            | 8.4          |
| 38 | La Condamine (04)         | 19.8                      | 20.6 | 21.5      | 27.6                       | 29.0 | 30.8      | 3.6            | 6.7          |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 27.9                      | 30.3 | 33.7      | 39.2                       | 43.6 | 50.0      | 5.7            | 8.5          |
| 40 | Lambruisse (04)           | 36.5                      | 39.1 | 42.5      | 51.6                       | 56.3 | 62.8      | 7.3            | 10.7         |
| 41 | Lassera                   | 30.1                      | 31.8 | 33.9      | 41.9                       | 45.0 | 49.1      | 5.6            | 10.1         |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 17.5                      | 19.2 | 21.8      | 24.1                       | 27.3 | 32.3      | 3.4            | 5.9          |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 18.9                      | 19.8 | 20.8      | 26.8                       | 28.4 | 30.4      | 3.7            | 5.6          |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 19.2                      | 20.1 | 21.2      | 26.2                       | 27.8 | 29.9      | 3.3            | 7.3          |
| 45 | Les Rousses (39)          | 30.5                      | 31.9 | 33.5      | 41.9                       | 44.4 | 47.4      | 5.3            | 11.3         |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 26.6                      | 28.9 | 32.4      | 36.6                       | 40.9 | 47.6      | 5.1            | 9.2          |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 29.7                      | 31.2 | 33.0      | 41.6                       | 44.4 | 47.8      | 5.6            | 9.5          |
| 48 | Mallermort (13)           | 35.6                      | 38.2 | 41.7      | 52.3                       | 57.2 | 63.7      | 8.1            | 7.0          |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 35.0                      | 37.6 | 41.0      | 50.0                       | 54.8 | 61.2      | 7.3            | 9.4          |
| 50 | Molines (05)              | 30.1                      | 31.4 | 32.9      | 41.9                       | 44.3 | 47.2      | 5.5            | 10.1         |
| 51 | Montmaur (05)             | 30.9                      | 32.8 | 35.4      | 42.8                       | 46.4 | 51.3      | 5.8            | 10.5         |
| 52 | Nevache (05)              | 19.8                      | 20.8 | 22.0      | 28.7                       | 30.6 | 32.8      | 4.1            | 4.8          |



|    | NOMS DES STATIONS          | Pluies décennales (mm/2h) |      |           | Pluies centennales (mm/2h) |      |           | Gradex (mm/2h) | Mode (mm/2h) |
|----|----------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                            | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 53 | Pellafol Le Sautet (38)    | 27.7                      | 29.1 | 30.9      | 39.1                       | 41.7 | 45.0      | 5.3            | 8.5          |
| 54 | Pelvoux Les Claux (05)     | 19.2                      | 19.9 | 20.9      | 26.5                       | 28.0 | 29.8      | 3.4            | 6.7          |
| 55 | Planche                    | 34.7                      | 36.9 | 39.8      | 49.6                       | 53.7 | 59.1      | 7.2            | 9.4          |
| 56 | Pont Escoffier (38)        | 26.7                      | 27.9 | 29.4      | 37.0                       | 39.3 | 42.2      | 4.8            | 9.2          |
| 57 | Pontarlier (25)            | 24.6                      | 26.2 | 28.5      | 32.9                       | 35.9 | 40.3      | 4.1            | 10.3         |
| 58 | Real 64                    | 50.4                      | 53.8 | 58.1      | 75.1                       | 81.4 | 89.5      | 11.7           | 11.2         |
| 59 | Real 74                    | 46.1                      | 49.4 | 53.5      | 69.3                       | 75.4 | 83.2      | 11.1           | 9.1          |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | 22.6                      | 24.3 | 26.8      | 30.9                       | 34.0 | 38.6      | 4.1            | 8.4          |
| 61 | Scientrier (74)            | 21.5                      | 23.0 | 25.1      | 29.6                       | 32.4 | 36.3      | 4.0            | 7.6          |
| 62 | Sciez (74)                 | 24.7                      | 26.4 | 28.8      | 34.2                       | 37.4 | 42.0      | 4.7            | 8.3          |
| 63 | Serres (05)                | 32.6                      | 34.3 | 36.4      | 46.5                       | 49.7 | 53.7      | 6.6            | 9.0          |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | 35.2                      | 37.8 | 41.4      | 49.5                       | 54.3 | 61.0      | 7.0            | 10.8         |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | 23.6                      | 25.3 | 27.5      | 32.9                       | 36.0 | 40.2      | 4.6            | 7.7          |
| 66 | St Bonnet (05)             | 29.7                      | 31.9 | 34.9      | 41.3                       | 45.3 | 51.1      | 5.7            | 9.8          |
| 67 | St Dalme de Tende (06)     | 42.1                      | 45.8 | 50.9      | 60.8                       | 67.7 | 77.4      | 9.3            | 9.8          |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | 28.0                      | 29.4 | 31.2      | 39.8                       | 42.5 | 45.9      | 5.6            | 7.8          |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | 27.9                      | 29.2 | 30.9      | 39.2                       | 41.7 | 44.8      | 5.3            | 8.7          |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | 40.4                      | 42.7 | 45.4      | 58.5                       | 62.6 | 67.9      | 8.5            | 9.9          |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | 36.6                      | 38.8 | 41.6      | 52.0                       | 56.1 | 61.5      | 7.4            | 10.3         |
| 72 | St Genis Jubee (05)        | 33.3                      | 35.6 | 38.7      | 47.5                       | 51.8 | 57.6      | 6.9            | 9.0          |
| 73 | St Jorioz (74)             | 26.0                      | 28.4 | 31.7      | 37.4                       | 41.8 | 48.1      | 5.7            | 6.4          |
| 74 | St Martin D'Heres (38)     | 27.9                      | 29.4 | 31.5      | 39.0                       | 42.0 | 45.8      | 5.3            | 8.8          |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | 28.7                      | 30.6 | 33.2      | 39.1                       | 42.6 | 47.6      | 5.1            | 10.9         |
| 76 | St Véran (05)              | 26.6                      | 28.9 | 32.0      | 38.1                       | 42.3 | 48.3      | 5.7            | 6.7          |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | 43.5                      | 46.2 | 49.6      | 64.2                       | 69.3 | 75.7      | 9.8            | 8.3          |
| 78 | Thones (74)                | 30.1                      | 31.3 | 32.8      | 40.6                       | 42.9 | 45.7      | 4.9            | 12.3         |



Valeurs des précipitations de 2h, intervalle de confiance à 80%, gradex et mode

|    | NOMS DES STATIONS     | Pluies décennales (mm/2h) |      |           | Pluies centennales (mm/2h) |      |           | Gradex (mm/2h) | Mode (mm/2h) |
|----|-----------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                       | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 79 | Thorame (04)          | 37.4                      | 40.2 | 43.9      | 52.6                       | 57.8 | 64.9      | 7.5            | 11.3         |
| 80 | Trablettes (01)       | 28.7                      | 29.9 | 31.3      | 39.0                       | 41.2 | 44.0      | 4.8            | 11.2         |
| 81 | Vacheresse (74)       | 33.4                      | 35.7 | 38.8      | 45.8                       | 50.1 | 56.0      | 6.1            | 12.1         |
| 82 | Vachette (05)         | 19.7                      | 21.2 | 23.2      | 27.8                       | 30.5 | 34.2      | 3.9            | 6.0          |
| 83 | Valbonnais (38)       | 25.7                      | 27.1 | 28.7      | 36.0                       | 38.5 | 41.7      | 4.9            | 8.2          |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 25.0                      | 26.9 | 29.4      | 35.5                       | 38.9 | 43.7      | 5.1            | 7.1          |
| 85 | Vallières (74)        | 27.2                      | 28.5 | 30.2      | 37.9                       | 40.4 | 43.6      | 5.1            | 8.9          |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 28.0                      | 29.3 | 30.8      | 39.2                       | 41.6 | 44.5      | 5.2            | 9.1          |
| 87 | Veynes (05)           | 34.8                      | 37.0 | 39.7      | 49.0                       | 53.0 | 58.3      | 6.8            | 10.6         |
| 88 | Vignotan (73)         | 17.1                      | 17.9 | 18.8      | 23.4                       | 24.8 | 26.5      | 3.0            | 6.5          |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 33.7                      | 35.4 | 37.5      | 47.6                       | 50.8 | 54.8      | 6.6            | 10.1         |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 38.7                      | 42.2 | 47.2      | 56.3                       | 62.9 | 72.3      | 8.8            | 8.3          |

|    | NOMS DES STATIONS            | Pluies décennales (mm/3h) |      |           | Pluies centennales (mm/3h) |      |           | Gradex (mm/3h) | Mode (mm/3h) |
|----|------------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                              | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 1  | Abondance Froggy (74)        | 33.8                      | 35.3 | 37.1      | 46.0                       | 48.8 | 52.3      | 5.8            | 13.1         |
| 2  | Abries Ristolas (05)         | 23.5                      | 25.1 | 27.1      | 35.0                       | 38.0 | 41.9      | 5.5            | 6.7          |
| 3  | Aillon Le Jeune (73)         | 37.0                      | 38.4 | 40.1      | 50.3                       | 53.0 | 56.3      | 6.2            | 13.3         |
| 4  | Allevard (38)                | 28.6                      | 30.4 | 33.1      | 38.0                       | 41.5 | 46.5      | 4.7            | 12.3         |
| 5  | Allos (04)                   | 29.8                      | 31.9 | 34.8      | 41.5                       | 45.5 | 51.0      | 5.8            | 9.7          |
| 6  | Arvieux (05)                 | 28.3                      | 30.4 | 33.4      | 39.5                       | 43.5 | 49.1      | 5.6            | 9.0          |
| 7  | Avrieux (73)                 | 22.1                      | 23.0 | 24.2      | 30.8                       | 32.5 | 34.6      | 4.0            | 6.7          |
| 8  | Bas Thorenc Andon (06)       | 55.1                      | 59.3 | 65.0      | 79.5                       | 87.3 | 98.0      | 11.9           | 13.4         |
| 9  | Belleville Hauteluce (73)    | 34.9                      | 36.4 | 38.0      | 47.8                       | 50.5 | 53.7      | 6.0            | 12.1         |
| 10 | Bonneval Tralenta (73)       | 22.8                      | 24.7 | 27.2      | 32.4                       | 35.8 | 40.7      | 4.8            | 6.3          |
| 11 | Bons (74)                    | 31.5                      | 33.9 | 37.2      | 44.4                       | 48.8 | 55.1      | 6.3            | 9.5          |
| 12 | Bourg St Maurice (73)        | 22.4                      | 23.2 | 24.3      | 30.2                       | 31.8 | 33.8      | 3.7            | 8.4          |
| 13 | Bouvante Forêt de Lente (26) | 44.7                      | 48.1 | 52.9      | 60.8                       | 67.1 | 76.2      | 8.1            | 17.0         |
| 14 | Briançon (05)                | 23.2                      | 24.1 | 25.3      | 32.4                       | 34.2 | 36.4      | 4.3            | 7.5          |
| 15 | Castillon Demandolx (04)     | 43.0                      | 45.6 | 48.8      | 61.8                       | 66.6 | 72.7      | 8.9            | 11.0         |
| 16 | Cernon Vouglans (39)         | 37.4                      | 39.1 | 41.2      | 51.4                       | 54.5 | 58.5      | 6.6            | 13.6         |
| 17 | Chalain Marigny (39)         | 39.3                      | 41.2 | 43.5      | 55.5                       | 58.9 | 63.2      | 7.6            | 12.1         |
| 18 | Challes Les Eaux (73)        | 32.6                      | 34.3 | 36.5      | 45.8                       | 49.0 | 53.2      | 6.3            | 10.1         |
| 19 | Chamonix (74)                | 28.4                      | 29.6 | 31.1      | 38.9                       | 41.2 | 44.0      | 4.9            | 10.6         |
| 20 | Champoleon Les Borels (05)   | 30.4                      | 31.8 | 33.4      | 42.2                       | 44.8 | 48.0      | 5.6            | 10.3         |
| 21 | Charavines Les Vannes (38)   | 45.8                      | 48.4 | 51.5      | 66.8                       | 71.5 | 77.5      | 9.9            | 10.4         |
| 22 | Chateauneuf Miravail (04)    | 48.3                      | 52.0 | 57.1      | 69.7                       | 76.7 | 86.3      | 10.5           | 11.5         |
| 23 | Chezery (01)                 | 36.5                      | 37.9 | 39.7      | 49.8                       | 52.5 | 55.9      | 6.2            | 12.8         |
| 24 | Clamensane (04)              | 40.6                      | 44.2 | 49.3      | 57.7                       | 64.3 | 73.9      | 8.6            | 11.1         |
| 25 | Clans Bancairon (06)         | 41.9                      | 44.1 | 46.9      | 60.6                       | 64.8 | 70.0      | 8.8            | 10.1         |
| 26 | Cluses Pressy (74)           | 32.0                      | 33.6 | 35.6      | 43.5                       | 46.5 | 50.4      | 5.5            | 12.4         |

Valeurs des précipitations de 3h, intervalle de confiance à 80%, gradex et mode

|    | NOMS DES STATIONS         | Pluies décennales (mm/3h) |      |           | Pluies centennales (mm/3h) |       |           | Gradex (mm/3h) | Mode (mm/3h) |
|----|---------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|-------|-----------|----------------|--------------|
|    |                           | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P     | borne sup |                |              |
| 27 | Coursegoules (06)         | 63.3                      | 67.0 | 71.5      | 94.3                       | 101.2 | 109.7     | 14.6           | 14.1         |
| 28 | Draix Laval (04)          | 44.1                      | 47.9 | 53.2      | 63.2                       | 70.2  | 80.3      | 9.5            | 11.2         |
| 29 | Embrun (05)               | 28.5                      | 29.7 | 31.1      | 40.1                       | 42.4  | 45.2      | 5.4            | 8.8          |
| 30 | Eybens (38)               | 43.0                      | 46.1 | 50.3      | 61.6                       | 67.5  | 75.4      | 9.1            | 11.1         |
| 31 | Fond de France (38)       | 41.4                      | 44.6 | 48.9      | 57.7                       | 63.5  | 71.6      | 8.1            | 13.5         |
| 32 | Forcalquier (04)          | 58.6                      | 63.7 | 70.5      | 86.0                       | 95.3  | 108.3     | 13.5           | 11.7         |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 34.6                      | 37.1 | 40.7      | 48.1                       | 52.9  | 59.6      | 6.7            | 11.2         |
| 34 | Gap (05)                  | 33.8                      | 36.4 | 40.0      | 47.6                       | 52.4  | 59.3      | 6.8            | 10.2         |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 32.8                      | 35.1 | 38.3      | 45.5                       | 49.8  | 55.8      | 6.2            | 11.1         |
| 36 | Gran Scala (73)           | 35.4                      | 38.0 | 41.5      | 50.3                       | 55.1  | 61.8      | 7.3            | 9.8          |
| 37 | La Chaup (26)             | 35.3                      | 38.0 | 41.7      | 50.0                       | 55.1  | 62.2      | 7.3            | 9.9          |
| 38 | La Condamine (04)         | 22.9                      | 23.8 | 24.9      | 31.9                       | 33.6  | 35.7      | 4.2            | 7.8          |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 35.8                      | 38.9 | 43.4      | 50.6                       | 56.4  | 64.9      | 7.5            | 10.1         |
| 40 | Lambruisse (04)           | 41.8                      | 44.8 | 48.7      | 59.3                       | 64.8  | 72.3      | 8.5            | 11.8         |
| 41 | Lassera                   | 34.0                      | 35.9 | 38.3      | 47.1                       | 50.6  | 55.1      | 6.2            | 11.8         |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 20.9                      | 22.7 | 25.4      | 28.7                       | 32.0  | 37.2      | 4.0            | 6.7          |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 24.8                      | 25.8 | 27.1      | 35.0                       | 36.9  | 39.3      | 4.7            | 6.7          |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 24.6                      | 25.6 | 26.8      | 33.5                       | 35.4  | 37.8      | 4.2            | 8.6          |
| 45 | Les Rousses (39)          | 33.7                      | 35.1 | 36.8      | 45.7                       | 48.3  | 51.6      | 5.6            | 13.4         |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 29.9                      | 32.5 | 36.4      | 41.0                       | 45.8  | 53.3      | 5.7            | 10.6         |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 34.1                      | 35.8 | 37.9      | 47.8                       | 50.9  | 54.9      | 6.4            | 11.0         |
| 48 | Mallemort (13)            | 39.7                      | 42.7 | 46.6      | 58.5                       | 64.0  | 71.4      | 9.1            | 7.5          |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 39.6                      | 42.6 | 46.5      | 56.7                       | 62.2  | 69.6      | 8.4            | 10.3         |
| 50 | Molines (05)              | 34.5                      | 36.0 | 37.7      | 47.9                       | 50.6  | 53.9      | 6.2            | 11.9         |
| 51 | Montmaur (05)             | 37.4                      | 39.8 | 42.9      | 52.0                       | 56.4  | 62.4      | 7.1            | 12.4         |
| 52 | Nevache (05)              | 23.9                      | 25.1 | 26.5      | 34.6                       | 36.8  | 39.5      | 5.0            | 5.8          |

|    | NOMS DES STATIONS          | Pluies décennales (mm/3h) |      |           | Pluies centennales (mm/3h) |      |           | Gradex (mm/3h) | Mode (mm/3h) |
|----|----------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                            | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 53 | Pellafol Le Sautet (38)    | 31.4                      | 33.0 | 35.0      | 44.1                       | 47.0 | 50.7      | 5.9            | 10.1         |
| 54 | Pelvoux Les Claux (05)     | 24.4                      | 25.3 | 26.4      | 33.6                       | 35.3 | 37.3      | 4.3            | 8.1          |
| 55 | Planche                    | 38.3                      | 40.7 | 43.7      | 54.3                       | 58.7 | 64.5      | 7.7            | 10.9         |
| 56 | Pont Escoffier (38)        | 30.8                      | 32.2 | 33.9      | 42.5                       | 45.1 | 48.3      | 5.5            | 11.0         |
| 57 | Pontarlier (25)            | 27.6                      | 29.4 | 31.9      | 36.6                       | 39.9 | 44.6      | 4.5            | 12.2         |
| 58 | Real 64                    | 58.2                      | 62.1 | 67.0      | 86.4                       | 93.7 | 102.9     | 13.4           | 13.3         |
| 59 | Real 74                    | 58.1                      | 62.3 | 67.6      | 87.9                       | 95.8 | 105.9     | 14.3           | 10.4         |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | 26.5                      | 28.3 | 30.9      | 36.1                       | 39.5 | 44.3      | 4.8            | 9.1          |
| 61 | Scientrier (74)            | 26.7                      | 28.6 | 31.2      | 37.0                       | 40.6 | 45.6      | 5.1            | 8.9          |
| 62 | Sciez (74)                 | 28.9                      | 31.0 | 33.8      | 40.2                       | 44.0 | 49.4      | 5.5            | 9.6          |
| 63 | Serres (05)                | 35.7                      | 37.5 | 39.8      | 50.7                       | 54.2 | 58.5      | 7.1            | 10.2         |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | 40.1                      | 43.0 | 47.1      | 56.3                       | 61.8 | 69.5      | 8.0            | 12.1         |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | 28.5                      | 30.5 | 33.1      | 39.7                       | 43.4 | 48.5      | 5.5            | 9.2          |
| 66 | St Bonnet (05)             | 36.2                      | 38.9 | 42.7      | 50.7                       | 55.8 | 63.0      | 7.2            | 11.3         |
| 67 | St Dalme de Tende (06)     | 48.9                      | 53.2 | 59.2      | 70.7                       | 78.7 | 90.0      | 10.8           | 11.4         |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | 32.2                      | 33.9 | 35.9      | 45.7                       | 48.8 | 52.6      | 6.4            | 9.3          |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | 34.6                      | 36.3 | 38.3      | 49.0                       | 52.1 | 56.1      | 6.8            | 10.2         |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | 44.9                      | 47.3 | 50.4      | 64.7                       | 69.3 | 75.1      | 9.4            | 11.2         |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | 43.6                      | 46.2 | 49.6      | 61.9                       | 66.8 | 73.1      | 8.7            | 12.5         |
| 72 | St Genis Jubeo (05)        | 37.7                      | 40.4 | 43.9      | 53.8                       | 58.8 | 65.4      | 7.8            | 10.2         |
| 73 | St Jorioz (74)             | 28.6                      | 31.1 | 34.7      | 40.7                       | 45.3 | 52.1      | 6.0            | 7.8          |
| 74 | St Martin D'Heres (38)     | 31.6                      | 33.3 | 35.5      | 43.9                       | 47.2 | 51.4      | 5.9            | 10.5         |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | 31.7                      | 33.7 | 36.6      | 42.8                       | 46.7 | 52.0      | 5.5            | 12.5         |
| 76 | St Véran (05)              | 29.5                      | 32.0 | 35.4      | 42.1                       | 46.6 | 53.1      | 6.3            | 7.8          |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | 48.0                      | 51.0 | 54.8      | 70.8                       | 76.4 | 83.5      | 10.8           | 9.3          |
| 78 | Thones (74)                | 36.7                      | 38.0 | 39.7      | 49.7                       | 52.2 | 55.4      | 6.0            | 13.6         |

|    | NOMS DES STATIONS     | Pluies décennales (mm/3h) |      |           | Pluies centennales (mm/3h) |      |           | Gradex (mm/3h) | Mode (mm/3h) |
|----|-----------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                       | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 79 | Thorame (04)          | 42.4                      | 45.6 | 49.9      | 59.9                       | 65.8 | 74.0      | 8.6            | 12.4         |
| 80 | Trablettes (01)       | 33.5                      | 35.0 | 36.7      | 45.8                       | 48.5 | 51.8      | 5.8            | 12.8         |
| 81 | Vacheresse (74)       | 40.1                      | 43.0 | 46.8      | 55.5                       | 60.7 | 68.0      | 7.6            | 13.8         |
| 82 | Vachette (05)         | 23.5                      | 25.2 | 27.5      | 32.9                       | 36.1 | 40.5      | 4.6            | 7.3          |
| 83 | Valbonnais (38)       | 30.8                      | 32.5 | 34.6      | 43.5                       | 46.5 | 50.5      | 6.0            | 9.4          |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 27.9                      | 29.9 | 32.7      | 39.4                       | 43.1 | 48.3      | 5.6            | 8.3          |
| 85 | Vallières (74)        | 31.8                      | 33.4 | 35.3      | 44.4                       | 47.4 | 51.0      | 6.0            | 10.4         |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 31.2                      | 32.6 | 34.4      | 43.5                       | 46.1 | 49.3      | 5.7            | 10.6         |
| 87 | Veynes (05)           | 39.0                      | 41.4 | 44.4      | 54.6                       | 59.0 | 64.8      | 7.5            | 12.4         |
| 88 | Vignotat (73)         | 21.4                      | 22.3 | 23.3      | 29.2                       | 30.7 | 32.6      | 3.6            | 7.7          |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 38.4                      | 40.3 | 42.6      | 53.9                       | 57.5 | 61.9      | 7.3            | 12.1         |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 43.7                      | 47.7 | 53.2      | 63.4                       | 70.7 | 81.2      | 9.8            | 9.8          |

| NOMS DES STATIONS |                              | Pluies décennales (mm/6h) |      |           | Pluies centennales (mm/6h) |       |           | Gradex (mm/6h) | Mode (mm/6h) |
|-------------------|------------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|-------|-----------|----------------|--------------|
|                   |                              | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P     | borne sup |                |              |
| 1                 | Abondance Froggy (74)        | 42.8                      | 44.9 | 47.6      | 58.3                       | 62.2  | 67.2      | 7.4            | 18.1         |
| 2                 | Abries Ristolas (05)         | 31.4                      | 33.5 | 36.2      | 46.7                       | 50.7  | 55.8      | 7.3            | 9.0          |
| 3                 | Aillon Le Jeune (73)         | 49.9                      | 51.9 | 54.3      | 68.5                       | 72.2  | 76.7      | 8.6            | 17.0         |
| 4                 | Allevard (38)                | 38.5                      | 41.1 | 44.9      | 51.7                       | 56.7  | 63.8      | 6.6            | 15.6         |
| 5                 | Allos (04)                   | 41.3                      | 43.9 | 47.3      | 56.9                       | 61.8  | 68.3      | 7.6            | 13.1         |
| 6                 | Arvieux (05)                 | 38.8                      | 41.4 | 45.0      | 54.0                       | 58.9  | 65.6      | 7.4            | 11.4         |
| 7                 | Avrieux (73)                 | 28.5                      | 29.8 | 31.3      | 40.0                       | 42.4  | 45.2      | 5.3            | 8.2          |
| 8                 | Bas Thorenc Andon (06)       | 73.3                      | 78.3 | 84.8      | 105.0                      | 114.3 | 126.7     | 15.3           | 16.3         |
| 9                 | Belleville Hauteluce (73)    | 42.9                      | 44.6 | 46.5      | 57.9                       | 60.9  | 64.6      | 6.9            | 16.5         |
| 10                | Bonneval Tralenta (73)       | 33.8                      | 36.3 | 39.7      | 48.2                       | 52.9  | 59.4      | 7.1            | 7.7          |
| 11                | Bons (74)                    | 38.2                      | 41.6 | 46.4      | 54.4                       | 60.7  | 69.8      | 8.1            | 12.1         |
| 12                | Bourg St Maurice (73)        | 30.5                      | 31.7 | 33.1      | 41.4                       | 43.6  | 46.3      | 5.1            | 11.3         |
| 13                | Bouvante Forêt de Lente (26) | 61.4                      | 65.2 | 70.2      | 82.5                       | 89.4  | 99.0      | 10.3           | 21.8         |
| 14                | Briançon (05)                | 32.1                      | 33.3 | 34.7      | 44.8                       | 47.1  | 49.8      | 5.9            | 9.6          |
| 15                | Castillon Demandolx (04)     | 50.9                      | 53.6 | 56.8      | 72.0                       | 76.9  | 83.0      | 9.9            | 13.5         |
| 16                | Cernon Vouglans (39)         | 45.0                      | 46.8 | 48.9      | 61.1                       | 64.4  | 68.5      | 7.5            | 16.4         |
| 17                | Chalain Marigny (39)         | 50.1                      | 52.1 | 54.6      | 69.6                       | 73.5  | 78.2      | 9.1            | 15.4         |
| 18                | Challes Les Eaux (73)        | 39.4                      | 41.5 | 44.0      | 55.0                       | 58.8  | 63.7      | 7.4            | 12.9         |
| 19                | Chamonix (74)                | 37.0                      | 38.4 | 40.1      | 50.3                       | 52.9  | 56.1      | 6.2            | 13.5         |
| 20                | Champoleon Les Borels (05)   | 40.2                      | 41.8 | 43.7      | 55.3                       | 58.3  | 62.0      | 7.1            | 13.3         |
| 21                | Charavines Les Vannes (38)   | 52.7                      | 55.5 | 59.0      | 75.9                       | 81.2  | 87.8      | 10.9           | 13.2         |
| 22                | Chateauneuf Miravail (04)    | 63.9                      | 68.3 | 74.1      | 91.3                       | 99.5  | 110.4     | 13.3           | 14.7         |
| 23                | Chezery (01)                 | 48.4                      | 50.4 | 52.7      | 66.3                       | 69.9  | 74.4      | 8.3            | 16.7         |
| 24                | Clamensane (04)              | 47.6                      | 51.2 | 56.2      | 66.7                       | 73.4  | 82.9      | 9.5            | 13.0         |
| 25                | Clans Bancairon (06)         | 57.0                      | 59.7 | 63.0      | 82.2                       | 87.3  | 93.6      | 11.8           | 12.2         |
| 26                | Cluses Pressy (74)           | 36.4                      | 38.4 | 41.1      | 49.4                       | 53.2  | 58.3      | 6.3            | 15.5         |



Valeurs des précipitations de 6h, intervalle de confiance à 80%, gradex et mode

|    | NOMS DES STATIONS         | Pluies décennales (mm/6h) |      |           | Pluies centennales (mm/6h) |       |           | Gradex (mm/6h) | Mode (mm/6h) |
|----|---------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|-------|-----------|----------------|--------------|
|    |                           | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P     | borne sup |                |              |
| 27 | Coursegoules (06)         | 92.0                      | 97.5 | 104.1     | 137.7                      | 147.9 | 160.5     | 21.5           | 19.4         |
| 28 | Draix Laval (04)          | 52.4                      | 56.2 | 61.5      | 73.8                       | 81.0  | 91.0      | 10.5           | 13.6         |
| 29 | Embrun (05)               | 34.9                      | 36.2 | 37.7      | 48.4                       | 50.8  | 53.7      | 6.3            | 10.9         |
| 30 | Eybens (38)               | 54.7                      | 58.6 | 63.8      | 78.0                       | 85.3  | 95.2      | 11.4           | 14.8         |
| 31 | Fond de France (38)       | 51.9                      | 55.7 | 61.0      | 71.8                       | 78.8  | 88.8      | 9.9            | 17.7         |
| 32 | Forcalquier (04)          | 67.6                      | 72.6 | 79.2      | 97.4                       | 106.7 | 119.2     | 14.5           | 14.0         |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 50.0                      | 53.4 | 57.9      | 69.6                       | 75.9  | 84.5      | 9.6            | 14.7         |
| 34 | Gap (05)                  | 42.3                      | 45.2 | 49.0      | 58.8                       | 64.1  | 71.4      | 8.1            | 12.6         |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 42.0                      | 44.6 | 48.0      | 57.7                       | 62.5  | 69.0      | 7.6            | 13.8         |
| 36 | Gran Scala (73)           | 48.3                      | 51.5 | 55.6      | 68.0                       | 73.9  | 81.8      | 9.5            | 12.9         |
| 37 | La Chaup (26)             | 51.9                      | 55.6 | 60.6      | 74.0                       | 81.0  | 90.4      | 10.8           | 12.0         |
| 38 | La Condamine (04)         | 31.8                      | 33.0 | 34.3      | 44.3                       | 46.5  | 49.1      | 5.8            | 9.6          |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 56.1                      | 60.7 | 67.2      | 79.9                       | 88.5  | 100.8     | 11.8           | 12.9         |
| 40 | Lambruisse (04)           | 49.3                      | 52.3 | 56.1      | 68.5                       | 74.1  | 81.4      | 9.3            | 14.8         |
| 41 | Lassera                   | 44.4                      | 46.6 | 49.3      | 61.2                       | 65.3  | 70.5      | 8.0            | 14.4         |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 28.8                      | 31.3 | 35.0      | 39.6                       | 44.3  | 51.4      | 5.5            | 9.0          |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 33.7                      | 35.2 | 36.9      | 47.8                       | 50.5  | 53.7      | 6.5            | 8.8          |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 33.8                      | 35.2 | 37.0      | 46.6                       | 49.3  | 52.6      | 6.0            | 11.1         |
| 45 | Les Rousses (39)          | 43.2                      | 44.8 | 46.7      | 58.2                       | 61.1  | 64.7      | 7.0            | 16.6         |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 34.9                      | 37.9 | 42.2      | 47.4                       | 52.8  | 61.1      | 6.3            | 13.4         |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 46.2                      | 48.3 | 50.9      | 64.9                       | 68.8  | 73.6      | 8.7            | 13.2         |
| 48 | Mallemort (13)            | 49.1                      | 52.4 | 56.5      | 71.5                       | 77.5  | 85.3      | 10.7           | 9.0          |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 45.8                      | 48.7 | 52.5      | 64.5                       | 69.9  | 77.1      | 9.0            | 12.2         |
| 50 | Molines (05)              | 50.1                      | 52.1 | 54.3      | 69.9                       | 73.6  | 77.9      | 9.1            | 15.1         |
| 51 | Montmaur (05)             | 49.7                      | 52.6 | 56.3      | 68.9                       | 74.3  | 81.4      | 9.3            | 15.1         |
| 52 | Nevache (05)              | 32.1                      | 33.5 | 35.2      | 45.9                       | 48.5  | 51.7      | 6.4            | 7.6          |



|    | NOMS DES STATIONS          | Pluies décennales (mm/6h) |      |           | Pluies centennales (mm/6h) |       |           | Gradex (mm/6h) | Mode (mm/6h) |
|----|----------------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|-------|-----------|----------------|--------------|
|    |                            | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P     | borne sup |                |              |
| 53 | Pellafol Le Sautet (38)    | 40.5                      | 42.3 | 44.5      | 56.5                       | 59.9  | 64.1      | 7.5            | 12.1         |
| 54 | Pelvoux Les Claux (05)     | 34.8                      | 36.2 | 37.7      | 48.5                       | 51.0  | 53.9      | 6.3            | 10.7         |
| 55 | Planche                    | 44.9                      | 47.3 | 50.2      | 62.3                       | 66.7  | 72.3      | 8.3            | 13.9         |
| 56 | Pont Escoffier (38)        | 41.8                      | 43.5 | 45.6      | 57.6                       | 60.8  | 64.7      | 7.4            | 13.7         |
| 57 | Pontarlier (25)            | 34.2                      | 36.3 | 39.3      | 45.0                       | 49.0  | 54.6      | 5.4            | 15.6         |
| 58 | Real 64                    | 79.3                      | 84.7 | 91.4      | 118.2                      | 128.2 | 141.0     | 18.5           | 17.3         |
| 59 | Real 74                    | 68.3                      | 73.2 | 79.4      | 102.9                      | 112.0 | 123.7     | 16.5           | 13.1         |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | 35.1                      | 37.5 | 40.8      | 47.8                       | 52.3  | 58.7      | 6.3            | 12.0         |
| 61 | Scientrier (74)            | 32.0                      | 34.7 | 38.4      | 44.8                       | 49.7  | 56.7      | 6.4            | 11.5         |
| 62 | Sciez (74)                 | 34.6                      | 37.4 | 41.3      | 48.3                       | 53.5  | 61.0      | 6.9            | 12.4         |
| 63 | Serres (05)                | 42.9                      | 44.8 | 47.2      | 60.1                       | 63.7  | 68.1      | 8.0            | 12.4         |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | 51.6                      | 55.0 | 59.6      | 72.2                       | 78.6  | 87.3      | 10.1           | 14.3         |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | 36.0                      | 38.5 | 41.9      | 50.2                       | 54.9  | 61.4      | 7.0            | 11.5         |
| 66 | St Bonnet (05)             | 51.4                      | 54.9 | 59.7      | 71.9                       | 78.6  | 87.6      | 10.1           | 14.3         |
| 67 | St Dalmes de Tende (06)    | 61.3                      | 66.0 | 72.3      | 87.4                       | 96.0  | 108.0     | 12.8           | 14.3         |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | 41.3                      | 43.2 | 45.3      | 57.8                       | 61.2  | 65.4      | 7.7            | 12.1         |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | 51.8                      | 54.2 | 57.0      | 73.7                       | 78.1  | 83.5      | 10.2           | 12.9         |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | 53.5                      | 56.1 | 59.2      | 76.2                       | 81.0  | 86.8      | 10.6           | 13.3         |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | 52.0                      | 55.1 | 59.0      | 73.5                       | 79.3  | 86.8      | 10.3           | 15.3         |
| 72 | St Genis Jubee (05)        | 50.4                      | 53.6 | 57.8      | 71.8                       | 77.7  | 85.6      | 10.3           | 12.1         |
| 73 | St Jorioz (74)             | 34.7                      | 37.6 | 41.7      | 48.6                       | 54.0  | 61.9      | 7.0            | 10.6         |
| 74 | St Martin D'Herès (38)     | 37.3                      | 39.3 | 41.9      | 51.7                       | 55.5  | 60.4      | 6.9            | 12.9         |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | 38.1                      | 40.8 | 44.6      | 51.1                       | 56.1  | 63.4      | 6.5            | 17.0         |
| 76 | St Véran (05)              | 36.7                      | 39.3 | 42.8      | 51.3                       | 56.1  | 62.7      | 7.2            | 10.4         |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | 61.6                      | 65.0 | 69.1      | 89.7                       | 96.0  | 103.8     | 13.2           | 11.6         |
| 78 | Thones (74)                | 48.8                      | 50.6 | 52.9      | 66.4                       | 69.9  | 74.1      | 8.2            | 17.5         |

|    | NOMS DES STATIONS     | Pluies décennales (mm/6h) |      |           | Pluies centennales (mm/6h) |      |           | Gradex (mm/6h) | Mode (mm/6h) |
|----|-----------------------|---------------------------|------|-----------|----------------------------|------|-----------|----------------|--------------|
|    |                       | borne inf                 | P    | borne sup | borne inf                  | P    | borne sup |                |              |
| 79 | Thorame (04)          | 54.0                      | 57.5 | 62.2      | 75.2                       | 81.8 | 90.7      | 10.4           | 15.7         |
| 80 | Trablettes (01)       | 45.1                      | 46.8 | 48.9      | 61.4                       | 64.7 | 68.7      | 7.6            | 16.1         |
| 81 | Vacheresse (74)       | 45.5                      | 49.0 | 53.9      | 62.6                       | 69.0 | 78.3      | 8.5            | 18.1         |
| 82 | Vachette (05)         | 30.9                      | 32.9 | 35.7      | 43.4                       | 47.3 | 52.5      | 6.1            | 8.2          |
| 83 | Valbonnais (38)       | 40.1                      | 42.1 | 44.4      | 56.4                       | 60.0 | 64.5      | 7.6            | 11.3         |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 34.8                      | 37.3 | 40.7      | 48.9                       | 53.6 | 60.0      | 6.9            | 10.5         |
| 85 | Vallières (74)        | 40.9                      | 42.9 | 45.4      | 57.1                       | 60.9 | 65.7      | 7.7            | 13.4         |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 39.4                      | 41.2 | 43.4      | 55.2                       | 58.5 | 62.7      | 7.4            | 12.8         |
| 87 | Veynes (05)           | 50.4                      | 53.2 | 56.7      | 70.4                       | 75.6 | 82.2      | 9.5            | 14.7         |
| 88 | Vignotan (73)         | 27.5                      | 28.5 | 29.8      | 37.4                       | 39.4 | 41.8      | 4.6            | 9.8          |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 45.3                      | 47.5 | 50.2      | 63.2                       | 67.3 | 72.4      | 8.4            | 14.9         |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 48.4                      | 52.5 | 58.2      | 68.9                       | 76.5 | 87.4      | 10.2           | 13.0         |

|    | NOMS DES STATIONS            | Pluies décennales (mm/12h) |       |           | Pluies centennales (mm/12h) |       |           | Gradex (mm/12h) |  | Mode (mm/12h) |
|----|------------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|--|---------------|
|    |                              | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |  |               |
| 1  | Abondance Froggy (74)        | 54.4                       | 56.5  | 58.9      | 72.9                        | 76.7  | 81.4      | 8.6             |  | 21.6          |
| 2  | Abries Ristolas (05)         | 48.5                       | 51.4  | 54.8      | 72.0                        | 77.3  | 83.9      | 11.0            |  | 11.3          |
| 3  | Aillon Le Jeune (73)         | 75.7                       | 78.6  | 81.9      | 103.6                       | 108.8 | 115.2     | 12.9            |  | 24.5          |
| 4  | Allevard (38)                | 48.5                       | 51.6  | 55.9      | 65.6                        | 71.3  | 79.4      | 8.4             |  | 17.8          |
| 5  | Allos (04)                   | 59.5                       | 64.1  | 70.3      | 84.5                        | 93.0  | 104.8     | 12.3            |  | 16.6          |
| 6  | Arvieux (05)                 | 49.5                       | 53.3  | 58.6      | 69.7                        | 76.8  | 86.9      | 10.0            |  | 14.7          |
| 7  | Avrieux (73)                 | 39.8                       | 41.5  | 43.4      | 56.1                        | 59.1  | 62.8      | 7.5             |  | 10.0          |
| 8  | Bas Thorenc Andon (06)       | 93.0                       | 100.3 | 110.0     | 135.3                       | 148.8 | 167.2     | 20.6            |  | 20.7          |
| 9  | Belleville Hauteluze (73)    | 60.2                       | 62.3  | 64.9      | 81.1                        | 85.0  | 89.8      | 9.7             |  | 21.8          |
| 10 | Bonneval Tralenta (73)       | 49.5                       | 53.8  | 59.8      | 72.1                        | 80.2  | 91.5      | 11.2            |  | 10.6          |
| 11 | Bons (74)                    | 50.3                       | 53.6  | 58.1      | 69.9                        | 76.1  | 84.6      | 9.6             |  | 14.9          |
| 12 | Bourg St Maurice (73)        | 46.7                       | 48.5  | 50.7      | 64.1                        | 67.5  | 71.5      | 8.1             |  | 14.7          |
| 13 | Bouvante Forêt de Lente (26) | 81.3                       | 86.5  | 93.4      | 110.4                       | 120.0 | 133.2     | 14.3            |  | 26.6          |
| 14 | Briançon (05)                | 41.7                       | 43.5  | 45.7      | 59.1                        | 62.6  | 66.7      | 8.1             |  | 12.2          |
| 15 | Castillon Demandolx (04)     | 60.3                       | 63.9  | 68.5      | 86.6                        | 93.3  | 101.9     | 12.5            |  | 15.7          |
| 16 | Cernon Vouglans (39)         | 53.2                       | 55.9  | 59.3      | 73.2                        | 78.3  | 84.8      | 9.5             |  | 21.2          |
| 17 | Chalain Marigny (39)         | 61.2                       | 64.4  | 68.4      | 86.2                        | 92.2  | 99.8      | 11.8            |  | 21.4          |
| 18 | Challes Les Eaux (73)        | 49.4                       | 51.7  | 54.5      | 68.3                        | 72.6  | 77.9      | 8.9             |  | 15.7          |
| 19 | Chamonix (74)                | 49.1                       | 51.3  | 54.0      | 68.2                        | 72.4  | 77.5      | 9.0             |  | 16.7          |
| 20 | Champoleon Les Borels (05)   | 53.0                       | 55.5  | 58.4      | 73.9                        | 78.5  | 84.1      | 9.8             |  | 17.7          |
| 21 | Charavines Les Vannes (38)   | 68.5                       | 71.8  | 75.9      | 98.6                        | 104.8 | 112.5     | 14.0            |  | 15.1          |
| 22 | Chateauneuf Miravail (04)    | 81.5                       | 88.0  | 96.8      | 118.5                       | 130.6 | 147.2     | 18.1            |  | 18.1          |
| 23 | Chezery (01)                 | 72.7                       | 75.9  | 79.7      | 100.9                       | 106.9 | 114.1     | 13.2            |  | 22.6          |
| 24 | Clamensane (04)              | 60.2                       | 65.5  | 73.0      | 85.7                        | 95.5  | 109.9     | 12.8            |  | 16.2          |
| 25 | Clans Bancairon (06)         | 66.9                       | 70.5  | 75.0      | 97.6                        | 104.5 | 113.0     | 14.4            |  | 14.8          |
| 26 | Cluses Pressy (74)           | 48.3                       | 50.5  | 53.2      | 65.3                        | 69.4  | 74.5      | 8.1             |  | 17.9          |

|    | NOMS DES STATIONS         | Pluies décennales (mm/12h) |       |           | Pluies centennales (mm/12h) |       |           | Gradex (mm/12h) | Mode (mm/12h) |
|----|---------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|---------------|
|    |                           | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |               |
| 27 | Coursegoules (06)         | 120.9                      | 128.0 | 136.7     | 180.8                       | 194.1 | 210.5     | 28.1            | 25.8          |
| 28 | Draix Laval (04)          | 65.9                       | 71.5  | 79.4      | 94.4                        | 104.9 | 119.9     | 14.2            | 16.7          |
| 29 | Embrun (05)               | 42.2                       | 44.0  | 46.1      | 59.2                        | 62.5  | 66.5      | 7.9             | 13.5          |
| 30 | Eybens (38)               | 62.9                       | 66.9  | 72.0      | 88.6                        | 96.0  | 105.7     | 12.4            | 16.9          |
| 31 | Fond de France (38)       | 65.7                       | 70.0  | 75.9      | 90.3                        | 98.4  | 109.4     | 12.1            | 21.3          |
| 32 | Forcalquier (04)          | 75.6                       | 81.8  | 90.2      | 109.2                       | 120.7 | 136.6     | 16.5            | 18.0          |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 66.9                       | 72.2  | 79.5      | 94.7                        | 104.4 | 118.2     | 13.7            | 19.3          |
| 34 | Gap (05)                  | 57.9                       | 62.5  | 68.7      | 81.8                        | 90.2  | 102.0     | 11.8            | 16.9          |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 51.7                       | 56.0  | 61.9      | 72.6                        | 80.5  | 91.8      | 10.4            | 18.0          |
| 36 | Gran Scala (73)           | 68.5                       | 73.1  | 79.1      | 97.0                        | 105.6 | 117.0     | 13.8            | 17.3          |
| 37 | La Chaup (26)             | 68.8                       | 74.6  | 82.6      | 100.2                       | 111.0 | 126.1     | 15.5            | 14.9          |
| 38 | La Condamine (04)         | 41.4                       | 43.2  | 45.3      | 58.9                        | 62.2  | 66.1      | 8.1             | 11.9          |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 70.5                       | 77.1  | 86.5      | 101.4                       | 113.6 | 131.4     | 15.5            | 17.2          |
| 40 | Lambruisse (04)           | 59.6                       | 63.7  | 69.2      | 83.8                        | 91.4  | 101.8     | 11.8            | 18.2          |
| 41 | Lassera                   | 51.8                       | 55.3  | 59.9      | 73.6                        | 80.1  | 88.7      | 10.5            | 17.0          |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 42.9                       | 46.7  | 52.2      | 59.4                        | 66.4  | 76.9      | 8.4             | 11.4          |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 45.6                       | 47.4  | 49.5      | 64.0                        | 67.3  | 71.2      | 8.5             | 11.9          |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 49.6                       | 51.7  | 54.1      | 68.8                        | 72.6  | 77.2      | 8.9             | 14.3          |
| 45 | Les Rousses (39)          | 54.6                       | 57.3  | 60.6      | 75.1                        | 80.0  | 86.3      | 9.7             | 22.1          |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 43.8                       | 48.2  | 55.0      | 60.3                        | 68.4  | 81.4      | 8.6             | 16.9          |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 55.0                       | 57.8  | 61.3      | 77.8                        | 83.1  | 89.7      | 10.8            | 16.2          |
| 48 | Malmort (13)              | 58.9                       | 63.3  | 69.1      | 86.8                        | 95.1  | 106.0     | 13.5            | 11.2          |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 51.0                       | 54.6  | 59.3      | 72.1                        | 78.8  | 87.9      | 10.3            | 14.7          |
| 50 | Molines (05)              | 67.2                       | 70.3  | 74.0      | 95.8                        | 101.5 | 108.5     | 13.3            | 19.0          |
| 51 | Montmaur (05)             | 59.0                       | 62.8  | 67.8      | 82.0                        | 89.1  | 98.6      | 11.2            | 19.5          |
| 52 | Nevache (05)              | 43.7                       | 46.0  | 48.7      | 64.0                        | 68.2  | 73.3      | 9.4             | 9.5           |

|    | NOMS DES STATIONS          | Pluies décennales (mm/12h) |       |           | Pluies centennales (mm/12h) |       |           | Gradex (mm/12h) | Mode (mm/12h) |
|----|----------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|---------------|
|    |                            | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |               |
| 53 | Pellafol Le Sautet (38)    | 52.5                       | 55.2  | 58.6      | 74.6                        | 79.7  | 86.1      | 10.4            | 15.0          |
| 54 | Pelvoux Les Claux (05)     | 51.7                       | 53.5  | 55.6      | 71.4                        | 74.8  | 78.7      | 9.1             | 15.5          |
| 55 | Planche                    | 53.5                       | 57.1  | 61.8      | 75.6                        | 82.2  | 91.1      | 10.7            | 18.2          |
| 56 | Pont Escoffier (38)        | 52.6                       | 55.1  | 58.1      | 73.3                        | 77.9  | 83.7      | 9.7             | 17.5          |
| 57 | Pontarlier (25)            | 46.2                       | 50.0  | 55.5      | 63.2                        | 70.1  | 80.5      | 8.6             | 18.9          |
| 58 | Real 64                    | 106.3                      | 111.6 | 118.1     | 152.9                       | 162.8 | 175.1     | 21.8            | 23.4          |
| 59 | Real 74                    | 79.8                       | 84.0  | 89.1      | 116.2                       | 124.0 | 133.6     | 17.0            | 15.3          |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | 47.3                       | 50.5  | 55.0      | 65.3                        | 71.3  | 79.7      | 8.9             | 13.4          |
| 61 | Scientrier (74)            | 42.9                       | 45.6  | 49.3      | 59.3                        | 64.5  | 71.5      | 8.0             | 13.2          |
| 62 | Sciez (74)                 | 48.0                       | 51.0  | 55.1      | 66.1                        | 71.8  | 79.6      | 8.9             | 15.3          |
| 63 | Serres (05)                | 52.0                       | 54.7  | 58.0      | 73.7                        | 78.7  | 85.0      | 10.2            | 15.2          |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | 62.2                       | 67.0  | 73.4      | 88.2                        | 97.1  | 109.3     | 12.8            | 17.5          |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | 49.2                       | 52.4  | 56.5      | 68.7                        | 74.6  | 82.4      | 9.4             | 14.2          |
| 66 | St Bonnet (05)             | 66.8                       | 72.1  | 79.4      | 94.6                        | 104.4 | 118.2     | 13.7            | 19.1          |
| 67 | St Dalmes de Tende (06)    | 75.7                       | 82.3  | 91.4      | 109.3                       | 121.5 | 138.7     | 16.7            | 17.9          |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | 54.0                       | 56.8  | 60.2      | 77.2                        | 82.4  | 88.9      | 10.9            | 14.8          |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | 74.1                       | 78.1  | 83.0      | 108.1                       | 115.6 | 124.8     | 15.9            | 16.5          |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | 64.1                       | 67.6  | 72.0      | 92.4                        | 99.0  | 107.2     | 13.3            | 16.2          |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | 62.2                       | 65.5  | 69.6      | 87.2                        | 93.4  | 101.1     | 11.9            | 17.4          |
| 72 | St Genis Jubeo (05)        | 62.1                       | 66.8  | 72.9      | 90.1                        | 98.7  | 110.4     | 13.6            | 14.2          |
| 73 | St Jorioz (74)             | 44.9                       | 48.2  | 52.7      | 62.2                        | 68.3  | 76.9      | 8.6             | 13.5          |
| 74 | St Martin D'Herès (38)     | 49.7                       | 52.2  | 55.3      | 69.1                        | 73.8  | 79.7      | 9.2             | 15.0          |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | 48.4                       | 51.2  | 54.9      | 65.0                        | 70.2  | 77.2      | 8.1             | 18.6          |
| 76 | St Véran (05)              | 45.1                       | 48.8  | 54.1      | 64.2                        | 71.1  | 81.1      | 9.5             | 12.2          |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | 75.3                       | 79.9  | 85.8      | 110.8                       | 119.6 | 130.6     | 16.9            | 14.9          |
| 78 | Thones (74)                | 65.2                       | 67.5  | 70.2      | 88.5                        | 92.9  | 98.1      | 10.8            | 22.2          |

|    | NOMS DES STATIONS     | Pluies décennales (mm/12h) |      |           | Pluies centennales (mm/12h) |       |           | Gradex (mm/12h) | Mode (mm/12h) |
|----|-----------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|---------------|
|    |                       | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |               |
| 79 | Thorame (04)          | 70.4                       | 75.8 | 83.2      | 100.0                       | 110.0 | 123.9     | 14.6            | 19.7          |
| 80 | Trablettes (01)       | 56.8                       | 59.7 | 63.3      | 78.9                        | 84.2  | 91.0      | 10.4            | 21.7          |
| 81 | Vacheresse (74)       | 55.8                       | 59.1 | 63.5      | 75.3                        | 81.4  | 89.7      | 9.5             | 20.7          |
| 82 | Vachette (05)         | 38.6                       | 41.6 | 45.6      | 55.3                        | 60.8  | 68.5      | 8.2             | 9.9           |
| 83 | Valbonnais (38)       | 50.8                       | 53.7 | 57.3      | 72.8                        | 78.2  | 85.0      | 10.4            | 13.4          |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 47.6                       | 50.8 | 55.1      | 67.6                        | 73.5  | 81.5      | 9.7             | 11.8          |
| 85 | Vallières (74)        | 53.6                       | 56.0 | 58.9      | 74.5                        | 79.0  | 84.4      | 9.8             | 16.5          |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 50.9                       | 53.0 | 55.5      | 71.1                        | 75.1  | 79.8      | 9.4             | 15.0          |
| 87 | Veynes (05)           | 61.6                       | 65.5 | 70.6      | 87.5                        | 94.8  | 104.4     | 12.4            | 17.5          |
| 88 | Vignotan (73)         | 37.9                       | 39.3 | 41.0      | 52.2                        | 54.9  | 58.1      | 6.6             | 11.5          |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 59.3                       | 61.9 | 65.0      | 82.4                        | 87.2  | 93.0      | 10.8            | 18.4          |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 55.7                       | 61.1 | 69.0      | 79.7                        | 89.7  | 104.7     | 12.2            | 16.8          |



| NOMS DES STATIONS |                              | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------------|------------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|---------------|
|                   |                              | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |               |
| 1                 | Abondance Frogly (74)        | 67.2                       | 69.8  | 72.9      | 90.4                        | 95.3  | 101.2     | 10.9            | 25.9          |
| 2                 | Abries Ristolas (05)         | 68.2                       | 72.3  | 77.4      | 102.5                       | 110.2 | 119.8     | 16.1            | 13.7          |
| 3                 | Aillon Le Jeune (73)         | 102.3                      | 106.6 | 111.8     | 142.0                       | 150.1 | 160.0     | 18.5            | 31.7          |
| 4                 | Allevard (38)                | 58.9                       | 64.0  | 71.5      | 82.1                        | 91.7  | 106.0     | 11.8            | 21.2          |
| 5                 | Allos (04)                   | 80.9                       | 87.0  | 95.3      | 114.3                       | 125.6 | 141.3     | 16.4            | 23.6          |
| 6                 | Arvieux (05)                 | 62.7                       | 67.5  | 74.0      | 87.8                        | 96.6  | 109.1     | 12.4            | 19.6          |
| 7                 | Avrieux (73)                 | 52.3                       | 54.8  | 57.8      | 75.3                        | 80.0  | 85.7      | 10.7            | 11.5          |
| 8                 | Bas Thorenc Andon (06)       | 123.5                      | 133.0 | 145.8     | 179.0                       | 196.8 | 221.0     | 27.1            | 28.3          |
| 9                 | Belleville Hauteluce (73)    | 83.8                       | 87.2  | 91.4      | 115.2                       | 121.6 | 129.5     | 14.6            | 28.1          |
| 10                | Bonneval Tralenta (73)       | 65.1                       | 70.6  | 78.1      | 94.9                        | 105.1 | 119.3     | 14.7            | 11.2          |
| 11                | Bons (74)                    | 61.2                       | 65.3  | 70.8      | 85.3                        | 92.9  | 103.3     | 11.8            | 17.8          |
| 12                | Bourg St Maurice (73)        | 63.7                       | 66.6  | 70.2      | 90.2                        | 95.7  | 102.4     | 12.4            | 16.6          |
| 13                | Bouvante Forêt de Lente (26) | 104.4                      | 111.3 | 120.5     | 143.0                       | 155.7 | 173.1     | 18.9            | 32.0          |
| 14                | Briançon (05)                | 56.9                       | 59.3  | 62.0      | 81.0                        | 85.4  | 90.6      | 11.1            | 14.3          |
| 15                | Castillon Demandolx (04)     | 77.5                       | 82.2  | 88.0      | 111.1                       | 119.7 | 130.7     | 16.0            | 20.5          |
| 16                | Cernon Vouglans (39)         | 69.5                       | 72.1  | 75.1      | 94.1                        | 98.9  | 104.7     | 11.4            | 24.2          |
| 17                | Chalain Marigny (39)         | 73.9                       | 76.5  | 79.7      | 100.5                       | 105.5 | 111.4     | 12.3            | 24.9          |
| 18                | Challes Les Eaux (73)        | 56.2                       | 59.6  | 63.9      | 79.1                        | 85.4  | 93.7      | 11.0            | 19.6          |
| 19                | Chamonix (74)                | 74.6                       | 77.9  | 81.9      | 105.2                       | 111.4 | 119.0     | 14.3            | 20.2          |
| 20                | Champoleon Les Borels (05)   | 69.9                       | 73.2  | 77.2      | 98.1                        | 104.3 | 111.8     | 13.2            | 22.2          |
| 21                | Charavines Les Vannes (38)   | 80.3                       | 85.4  | 92.0      | 118.1                       | 127.7 | 140.1     | 18.0            | 20.0          |
| 22                | Chateauneuf Miravail (04)    | 122.5                      | 132.6 | 146.1     | 179.6                       | 198.3 | 223.9     | 28.0            | 24.6          |
| 23                | Chezery (01)                 | 104.3                      | 109.1 | 114.8     | 146.5                       | 155.4 | 166.2     | 19.7            | 29.5          |
| 24                | Clamensane (04)              | 78.4                       | 85.6  | 95.8      | 112.9                       | 126.3 | 145.7     | 17.3            | 18.8          |
| 25                | Clans Bancairon (06)         | 89.5                       | 94.5  | 100.6     | 131.2                       | 140.5 | 152.1     | 19.6            | 18.8          |
| 26                | Cluses Pressy (74)           | 57.5                       | 60.1  | 63.3      | 78.0                        | 82.9  | 89.1      | 9.7             | 20.8          |



|    | NOMS DES STATIONS         | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|----|---------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|---------------|
|    |                           | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |               |
| 27 | Coursegoules (06)         | 164.1                      | 174.0 | 186.1     | 247.1                       | 265.5 | 288.4     | 39.0            | 32.3          |
| 28 | Draix Laval (04)          | 81.5                       | 88.9  | 99.2      | 118.7                       | 132.4 | 152.1     | 18.5            | 17.4          |
| 29 | Embrun (05)               | 52.3                       | 54.5  | 57.2      | 73.8                        | 78.1  | 83.2      | 10.0            | 15.9          |
| 30 | Eybens (38)               | 67.8                       | 73.5  | 81.4      | 98.1                        | 108.8 | 123.8     | 15.0            | 19.0          |
| 31 | Fond de France (38)       | 75.8                       | 82.3  | 91.7      | 105.7                       | 117.8 | 135.6     | 15.1            | 27.4          |
| 32 | Forcalquier (04)          | 93.0                       | 100.6 | 110.9     | 134.5                       | 148.6 | 168.1     | 20.4            | 21.8          |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 93.3                       | 101.0 | 111.6     | 133.8                       | 148.1 | 168.2     | 20.0            | 23.6          |
| 34 | Gap (05)                  | 75.6                       | 81.5  | 89.7      | 106.7                       | 117.6 | 133.0     | 15.4            | 22.2          |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 70.8                       | 75.0  | 80.4      | 97.4                        | 105.2 | 115.5     | 12.9            | 21.0          |
| 36 | Gran Scala (73)           | 95.1                       | 101.8 | 110.6     | 136.7                       | 149.2 | 165.9     | 20.2            | 20.3          |
| 37 | La Chaup (26)             | 92.9                       | 100.6 | 111.1     | 134.4                       | 148.7 | 168.6     | 20.5            | 21.5          |
| 38 | La Condamine (04)         | 57.4                       | 59.9  | 63.0      | 82.8                        | 87.6  | 93.4      | 11.8            | 14.5          |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 108.0                      | 119.0 | 135.0     | 158.8                       | 179.2 | 209.5     | 25.6            | 20.2          |
| 40 | Lambruisse (04)           | 72.9                       | 77.9  | 84.5      | 102.2                       | 111.5 | 124.1     | 14.3            | 22.5          |
| 41 | Lassera                   | 64.0                       | 66.8  | 70.3      | 86.6                        | 91.9  | 98.6      | 10.7            | 22.0          |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 62.7                       | 69.3  | 79.3      | 89.5                        | 101.8 | 120.9     | 13.8            | 13.4          |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 58.3                       | 60.9  | 63.9      | 82.9                        | 87.7  | 93.4      | 11.4            | 14.8          |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 67.2                       | 70.4  | 74.2      | 94.7                        | 100.6 | 107.9     | 12.9            | 18.4          |
| 45 | Les Rousses (39)          | 80.6                       | 83.6  | 87.0      | 109.9                       | 115.3 | 121.8     | 13.5            | 26.8          |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 50.5                       | 55.5  | 63.3      | 69.3                        | 78.6  | 93.5      | 9.8             | 19.7          |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 75.0                       | 79.0  | 84.0      | 107.5                       | 115.0 | 124.4     | 15.3            | 20.0          |
| 48 | Mallermort (13)           | 71.6                       | 76.8  | 83.6      | 104.6                       | 114.3 | 127.2     | 16.0            | 15.1          |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 61.8                       | 66.0  | 71.7      | 86.9                        | 94.8  | 105.6     | 12.3            | 18.7          |
| 50 | Molines (05)              | 92.9                       | 97.3  | 102.4     | 133.6                       | 141.7 | 151.5     | 18.9            | 24.2          |
| 51 | Montmaur (05)             | 72.8                       | 77.5  | 83.7      | 101.5                       | 110.2 | 122.0     | 13.9            | 23.7          |
| 52 | Nevache (05)              | 54.5                       | 57.0  | 60.0      | 79.0                        | 83.7  | 89.3      | 11.4            | 11.1          |

|    | NOMS DES STATIONS          | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|----|----------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|-----------------|---------------|
|    |                            | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |                 |               |
| 53 | Pellafol Le Sautet (38)    | 70.1                       | 73.8  | 78.5      | 100.4                       | 107.4 | 116.2     | 14.3            | 18.7          |
| 54 | Pelvoux Les Claux (05)     | 72.5                       | 75.4  | 78.8      | 102.1                       | 107.5 | 114.0     | 13.7            | 20.2          |
| 55 | Planche                    | 63.3                       | 66.4  | 70.2      | 87.9                        | 93.6  | 100.8     | 11.6            | 17.7          |
| 56 | Pont Escoffier (38)        | 64.7                       | 67.7  | 71.4      | 89.9                        | 95.5  | 102.5     | 11.9            | 22.0          |
| 57 | Pontarlier (25)            | 57.6                       | 62.4  | 69.5      | 79.4                        | 88.4  | 101.9     | 11.1            | 22.2          |
| 58 | Real 64                    | 139.4                      | 146.5 | 155.1     | 201.3                       | 214.4 | 230.6     | 28.9            | 29.6          |
| 59 | Real 74                    | 90.8                       | 95.4  | 101.1     | 131.2                       | 139.9 | 150.6     | 18.9            | 18.9          |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | 56.6                       | 60.9  | 66.8      | 78.2                        | 86.1  | 97.4      | 10.8            | 17.4          |
| 61 | Scientrier (74)            | 50.5                       | 53.7  | 58.0      | 69.6                        | 75.6  | 83.7      | 9.3             | 16.1          |
| 62 | Sciez (74)                 | 61.4                       | 65.4  | 70.8      | 85.5                        | 93.1  | 103.3     | 11.8            | 18.0          |
| 63 | Serres (05)                | 66.0                       | 69.4  | 73.6      | 93.4                        | 99.7  | 107.7     | 12.9            | 19.6          |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | 74.5                       | 80.1  | 87.7      | 105.2                       | 115.7 | 130.2     | 15.1            | 21.6          |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | 58.9                       | 63.9  | 70.8      | 84.2                        | 93.4  | 106.6     | 12.6            | 18.2          |
| 66 | St Bonnet (05)             | 89.8                       | 96.9  | 106.7     | 127.2                       | 140.4 | 159.1     | 18.5            | 25.3          |
| 67 | St Dalmes de Tende (06)    | 96.5                       | 105.0 | 116.8     | 140.1                       | 155.9 | 178.3     | 21.6            | 21.5          |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | 75.6                       | 79.6  | 84.6      | 109.4                       | 117.0 | 126.4     | 15.9            | 18.2          |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | 103.4                      | 109.2 | 116.3     | 152.6                       | 163.5 | 176.9     | 23.1            | 20.1          |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | 81.7                       | 86.2  | 91.6      | 117.5                       | 125.8 | 136.1     | 16.9            | 21.1          |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | 70.8                       | 75.8  | 82.3      | 101.9                       | 111.2 | 123.7     | 15.1            | 20.9          |
| 72 | St Genis Jubeo (05)        | 79.8                       | 85.7  | 93.6      | 115.0                       | 126.1 | 141.1     | 17.2            | 19.5          |
| 73 | St Jorioz (74)             | 49.1                       | 53.7  | 60.5      | 68.7                        | 77.2  | 90.1      | 10.0            | 17.3          |
| 74 | St Martin D'Heres (38)     | 62.2                       | 66.6  | 72.3      | 90.0                        | 98.1  | 108.9     | 13.4            | 17.8          |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | 62.2                       | 65.9  | 70.9      | 84.2                        | 91.1  | 100.5     | 10.7            | 22.6          |
| 76 | St Véran (05)              | 58.7                       | 63.5  | 70.4      | 83.3                        | 92.3  | 105.3     | 12.3            | 16.2          |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | 94.6                       | 100.4 | 107.6     | 138.7                       | 149.5 | 163.1     | 20.9            | 19.9          |
| 78 | Thones (74)                | 88.1                       | 91.7  | 96.1      | 121.8                       | 128.6 | 136.8     | 15.7            | 28.4          |

|    | NOMS DES STATIONS     | Pluies décennales (mm/24h) |      | Pluies centennales (mm/24h) |           |       | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|----|-----------------------|----------------------------|------|-----------------------------|-----------|-------|-----------------|---------------|
|    |                       | borne inf                  | P    | borne sup                   | borne inf | P     | borne sup       |               |
| 79 | Thorame (04)          | 84.4                       | 90.9 | 99.8                        | 120.2     | 132.3 | 149.2           | 17.6          |
| 80 | Trablettes (01)       | 75.4                       | 78.2 | 81.4                        | 103.0     | 108.2 | 114.3           | 12.8          |
| 81 | Vacheresse (74)       | 65.6                       | 69.4 | 74.4                        | 88.0      | 95.0  | 104.5           | 10.9          |
| 82 | Vachette (05)         | 49.9                       | 53.8 | 59.0                        | 71.4      | 78.6  | 88.5            | 10.6          |
| 83 | Valbonnais (38)       | 65.9                       | 69.7 | 74.5                        | 94.8      | 101.9 | 110.8           | 13.7          |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 55.8                       | 60.9 | 68.0                        | 81.8      | 91.2  | 104.8           | 12.9          |
| 85 | Vallières (74)        | 61.3                       | 64.8 | 69.3                        | 86.6      | 93.2  | 101.7           | 12.1          |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 58.0                       | 61.3 | 65.3                        | 83.3      | 89.3  | 97.0            | 11.9          |
| 87 | Veynes (05)           | 77.5                       | 82.6 | 89.2                        | 111.0     | 120.5 | 133.1           | 16.1          |
| 88 | Vignotan (73)         | 51.7                       | 54.0 | 56.7                        | 72.9      | 77.2  | 82.4            | 9.9           |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 68.4                       | 72.4 | 77.5                        | 97.9      | 105.5 | 115.1           | 14.1          |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 64.2                       | 70.3 | 79.1                        | 91.0      | 102.2 | 118.9           | 13.6          |
|    |                       |                            |      |                             |           |       |                 | 20.9          |

|    | NOMS DES STATIONS            | Coefficient de Montana |
|----|------------------------------|------------------------|
| 1  | Abondance Frogly (74)        | 0.28                   |
| 2  | Abries Ristolas (05)         | 0.49                   |
| 3  | Aillon Le Jeune (73)         | 0.47                   |
| 4  | Allevard (38)                | 0.41                   |
| 5  | Allos (04)                   | 0.51                   |
| 6  | Arvieux (05)                 | 0.37                   |
| 7  | Avrieux (73)                 | 0.39                   |
| 8  | Bas Thorenc Andon (06)       | 0.37                   |
| 9  | Belleville Hauteluze (73)    | 0.33                   |
| 10 | Bonneval Tralenta (73)       | 0.56                   |
| 11 | Bons (74)                    | 0.36                   |
| 12 | Bourg St Maurice (73)        | 0.52                   |
| 13 | Bouvante Forêt de Lente (26) | 0.40                   |
| 14 | Briancon (05)                | 0.44                   |
| 15 | Castillon Demandolx (04)     | 0.25                   |
| 16 | Cernon Vouglans (39)         | 0.26                   |
| 17 | Chalain Marigny (39)         | 0.31                   |
| 18 | Challes Les Eaux (73)        | 0.28                   |
| 19 | Chamonix (74)                | 0.48                   |
| 20 | Champoleon Les Borels (05)   | 0.41                   |
| 21 | Charavines Les Vannes (38)   | 0.35                   |
| 22 | Chateauneuf Miravail (04)    | 0.39                   |
| 23 | Chezery (01)                 | 0.45                   |
| 24 | Clamensane (04)              | 0.30                   |
| 25 | Clans Bancairon (06)         | 0.35                   |
| 26 | Cluses Pressy (74)           | 0.25                   |

|    | NOMS DES STATIONS         | Coefficient de Montana |
|----|---------------------------|------------------------|
| 27 | Coursegoules (06)         | 0.45                   |
| 28 | Draix Laval (04)          | 0.30                   |
| 29 | Embrun (05)               | 0.31                   |
| 30 | Eybens (38)               | 0.28                   |
| 31 | Fond de France (38)       | 0.29                   |
| 32 | Forcalquier (04)          | 0.20                   |
| 33 | Fours Saint Laurent (04)  | 0.50                   |
| 34 | Gap (05)                  | 0.37                   |
| 35 | Genissiat Injoux (01)     | 0.37                   |
| 36 | Gran Scala (73)           | 0.48                   |
| 37 | La Chaup (26)             | 0.50                   |
| 38 | La Condamine (04)         | 0.46                   |
| 39 | La Joue Du Loup (26)      | 0.57                   |
| 40 | Lambruisse (04)           | 0.24                   |
| 41 | Lassera                   | 0.28                   |
| 42 | Le Chatelard (73)         | 0.50                   |
| 43 | Le Chazelet (05)          | 0.49                   |
| 44 | Le Glandon Ste Marie (73) | 0.52                   |
| 45 | Les Rousses (39)          | 0.36                   |
| 46 | Liebvilliers (25)         | 0.23                   |
| 47 | Lus La Croix Haute (26)   | 0.39                   |
| 48 | Mallemort (13)            | 0.26                   |
| 49 | Marcoux St Martin (04)    | 0.21                   |
| 50 | Molines (05)              | 0.47                   |
| 51 | Montmaur (05)             | 0.35                   |
| 52 | Nevache (05)              | 0.42                   |

|    | NOMS DES STATIONS          | Coefficient de Montana |
|----|----------------------------|------------------------|
| 53 | Pellafol Le Sautet (38)    | 0.37                   |
| 54 | Pelvoux Les Claux (05)     | 0.54                   |
| 55 | Planche                    | 0.20                   |
| 56 | Pont Escoffier (38)        | 0.36                   |
| 57 | Pontarlier (25)            | 0.39                   |
| 58 | Real 64                    | 0.36                   |
| 59 | Real 74                    | 0.22                   |
| 60 | Roselend Beaufort (73)     | 0.37                   |
| 61 | Scientrier (74)            | 0.35                   |
| 62 | Sciez (74)                 | 0.35                   |
| 63 | Serres (05)                | 0.24                   |
| 64 | Seyne Les Alpes (04)       | 0.31                   |
| 65 | St Blaise Mont Sion (74)   | 0.36                   |
| 66 | St Bonnet (05)             | 0.44                   |
| 67 | St Dalmes de Tende (06)    | 0.35                   |
| 68 | St Etienne De Tinée (04)   | 0.39                   |
| 69 | St Etienne En Devoluy (26) | 0.57                   |
| 70 | St Etienne Les Orgues (04) | 0.27                   |
| 71 | St Etienne St Geoirs (38)  | 0.28                   |
| 72 | St Genis Jubee (05)        | 0.34                   |
| 73 | St Jorioz (74)             | 0.22                   |
| 74 | St Martin D'Heres (38)     | 0.35                   |
| 75 | St Paul En Chablais (74)   | 0.29                   |
| 76 | St Véran (05)              | 0.28                   |
| 77 | Tanneron St Cassien (83)   | 0.29                   |
| 78 | Thones (74)                | 0.42                   |

|    | NOMS DES STATIONS     | Coefficient de Montana |
|----|-----------------------|------------------------|
| 79 | Thorame (04)          | 0.35                   |
| 80 | Trablettes (01)       | 0.39                   |
| 81 | Vacheresse (74)       | 0.21                   |
| 82 | Vachette (05)         | 0.38                   |
| 83 | Valbonnais (38)       | 0.38                   |
| 84 | Valleiry Haut (01)    | 0.38                   |
| 85 | Vallières (74)        | 0.34                   |
| 86 | Varces Rochefort (38) | 0.33                   |
| 87 | Veynes (05)           | 0.34                   |
| 88 | Vignotan (73)         | 0.42                   |
| 89 | Villard De Lans (38)  | 0.29                   |
| 90 | Villers Le Lac (25)   | 0.20                   |



## **Annexe 4 :**

Valeurs de pluies extrêmes pour les pluviomètres et intervalles de confiance à 80 % correspondants.

Temps de retour de 10 ans et 100 ans, gradex et mode.

| Département | Nom du pluviomètre            | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                               | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 01 Ain      | 1 ANGLEFORT                   | 82.9                       | 86.3 | 90.4      | 112.3                       | 118.6 | 126.4     |
|             | 2 BALAN                       | 62.5                       | 65.7 | 69.7      | 87.8                        | 93.8  | 101.3     |
|             | 3 BELLEY                      | 74.0                       | 76.0 | 78.4      | 102.2                       | 106.1 | 110.5     |
|             | 4 BOURG-EN-BRESSE             | 72.0                       | 74.3 | 76.9      | 101.3                       | 105.7 | 110.6     |
|             | 5 CHANAY                      | 90.7                       | 94.1 | 98.1      | 124.3                       | 130.6 | 138.3     |
|             | 6 CHATILLON-LA-PALUD          | 74.7                       | 77.7 | 81.1      | 104.5                       | 110.0 | 116.5     |
|             | 7 DIVONNE-LES-BAINS           | 71.6                       | 73.9 | 76.5      | 98.8                        | 103.1 | 108.0     |
|             | 8 GIRON                       | 78.6                       | 81.3 | 84.5      | 106.9                       | 112.0 | 118.1     |
|             | 9 HAUTEVILLE-LOMPNES          | 81.0                       | 84.3 | 88.2      | 110.4                       | 116.5 | 123.9     |
|             | 10 LABALME                    | 80.5                       | 84.0 | 88.1      | 110.8                       | 117.2 | 125.1     |
|             | 11 LHUIS                      | 67.0                       | 68.9 | 71.1      | 92.6                        | 96.3  | 100.4     |
|             | 12 MARLIEUX                   | 66.0                       | 68.6 | 71.7      | 92.4                        | 97.2  | 103.0     |
|             | 13 MIJOUX                     | 90.4                       | 92.9 | 95.8      | 124.0                       | 128.7 | 134.2     |
|             | 14 MONTAGNIEU                 | 69.8                       | 72.7 | 76.3      | 96.4                        | 101.9 | 108.7     |
|             | 15 MONTLUEL                   | 71.1                       | 74.0 | 77.4      | 99.4                        | 104.8 | 111.4     |
|             | 16 NURIEUX-VOLOGNAT           | 77.2                       | 80.6 | 84.8      | 105.1                       | 111.5 | 119.4     |
|             | 17 NANTUA                     | 78.1                       | 80.4 | 83.2      | 107.9                       | 112.3 | 117.5     |
|             | 18 NEUVILLE-SUR-AIN           | 74.6                       | 76.8 | 79.3      | 103.8                       | 107.9 | 112.6     |
|             | 19 SAINT-JULIEN-SUR-REYSSOUZE | 59.1                       | 61.2 | 63.5      | 82.2                        | 86.0  | 90.4      |
|             | 20 SALAVRE                    | 67.2                       | 69.4 | 72.1      | 92.4                        | 96.6  | 101.6     |
|             | 21 TENAY                      | 86.9                       | 89.2 | 91.9      | 119.0                       | 123.4 | 128.4     |
|             | 22 VILLEREVERSURE             | 76.1                       | 79.7 | 84.0      | 105.4                       | 112.0 | 120.2     |
|             | 23 VIRIEU-LE-GRAND            | 73.0                       | 75.4 | 78.2      | 98.8                        | 103.3 | 108.5     |
|             | 24 VONNAS                     | 63.0                       | 65.3 | 68.0      | 88.9                        | 93.3  | 98.4      |
|             | 25 GIRON                      | 80.4                       | 83.1 | 86.4      | 109.9                       | 115.0 | 121.1     |
|             | 26 HAUTEVILLE LA LECHERE      | 85.8                       | 88.3 | 91.3      | 117.5                       | 122.3 | 127.9     |

| Département                          |    | Nom du pluviomètre          | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|--------------------------------------|----|-----------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|                                      |    |                             | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 01 Ain<br>04 Alpes de Haute Provence | 27 | TENAY                       | 83.7                       | 86.6 | 89.9      | 114.3                       | 119.7 | 126.0     |
|                                      | 1  | BANON                       | 87.1                       | 91.5 | 96.7      | 127.1                       | 135.2 | 145.2     |
|                                      | 2  | BARCELONNETTE               | 59.7                       | 61.9 | 64.4      | 84.8                        | 88.8  | 93.6      |
|                                      | 3  | BARREME                     | 65.5                       | 68.8 | 72.7      | 92.3                        | 98.3  | 105.8     |
|                                      | 4  | BEAUJEU                     | 68.5                       | 71.0 | 73.8      | 95.6                        | 100.1 | 105.5     |
|                                      | 5  | (LE)CASTELLARD-MELAN        | 83.1                       | 86.5 | 90.5      | 118.0                       | 124.3 | 132.0     |
|                                      | 6  | (LE)CASTELLET               | 70.4                       | 73.7 | 77.7      | 100.5                       | 106.7 | 114.3     |
|                                      | 7  | CHATEAU-ARNOUX-SAINT-AUBAN  | 67.6                       | 70.4 | 73.8      | 95.8                        | 101.2 | 107.6     |
|                                      | 8  | COLMARS                     | 83.0                       | 86.7 | 91.0      | 117.2                       | 124.0 | 132.2     |
|                                      | 9  | DIGNE-LES-BAINS             | 69.8                       | 72.8 | 76.2      | 99.9                        | 105.4 | 111.9     |
|                                      | 10 | ENTRAGES                    | 69.3                       | 72.6 | 76.5      | 98.7                        | 104.8 | 112.3     |
|                                      | 11 | ENTREVAUX                   | 86.1                       | 90.6 | 96.1      | 123.0                       | 131.4 | 141.8     |
|                                      | 12 | GREOUX-LES-BAINS            | 65.7                       | 70.2 | 76.0      | 95.4                        | 103.8 | 114.9     |
|                                      | 13 | MANOSQUE                    | 68.3                       | 72.6 | 77.9      | 98.7                        | 106.6 | 116.7     |
|                                      | 14 | (LES)MEES                   | 69.1                       | 72.3 | 76.1      | 98.3                        | 104.2 | 111.4     |
|                                      | 15 | MISON                       | 76.5                       | 79.9 | 83.8      | 109.7                       | 115.9 | 123.4     |
|                                      | 16 | MOUSTIERS-SAINTE-MARIE      | 66.8                       | 70.9 | 76.1      | 95.7                        | 103.4 | 113.2     |
|                                      | 17 | QUINSON                     | 75.5                       | 80.8 | 87.5      | 110.6                       | 120.3 | 133.1     |
|                                      | 18 | REILLANNE                   | 80.4                       | 85.1 | 90.9      | 118.4                       | 127.1 | 138.0     |
|                                      | 19 | SAINT-ETIENNE-LES-ORGUES    | 88.1                       | 92.0 | 96.5      | 128.3                       | 135.5 | 144.1     |
|                                      | 20 | SAINT-JURS                  | 67.1                       | 70.3 | 74.3      | 95.9                        | 102.0 | 109.6     |
|                                      | 21 | SAINT-MICHEL-L'OBSERVATOIRE | 80.8                       | 84.8 | 89.6      | 116.8                       | 124.3 | 133.5     |
|                                      | 22 | SAINT-PAUL                  | 63.0                       | 66.3 | 70.6      | 88.2                        | 94.5  | 102.5     |
|                                      | 23 | UVERNET-FOURS               | 90.9                       | 95.0 | 99.9      | 131.4                       | 139.2 | 148.5     |
|                                      | 24 | VALENSOLE                   | 77.4                       | 81.1 | 85.6      | 112.0                       | 119.0 | 127.5     |
|                                      | 25 | VERGONS                     | 93.8                       | 99.2 | 105.9     | 134.2                       | 144.3 | 157.0     |

| Département                | Nom du pluviomètre          | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|                            |                             | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 04 Alpes de Haute Provence | 26 ALLEMAGNE EN PROVENCE    | 58.5                       | 62.1  | 66.7      | 82.6                        | 89.3  | 98.0      |
|                            | 27 CASTELLANE               | 83.7                       | 87.6  | 92.3      | 119.5                       | 126.8 | 135.7     |
|                            | 28 JAUIERS LANS LE SERRET   | 56.8                       | 59.5  | 62.8      | 80.9                        | 85.9  | 92.1      |
|                            | 29 LA BRILLANNE             | 74.2                       | 77.3  | 81.0      | 107.0                       | 112.9 | 119.9     |
|                            | 30 LA MOTTE DU CAIRE        | 60.1                       | 63.2  | 67.1      | 84.4                        | 90.3  | 97.6      |
|                            | 31 LE LAUZET-CHAMPANASTAIS  | 63.9                       | 68.2  | 73.9      | 88.8                        | 96.7  | 107.5     |
|                            | 32 SISTERON                 | 96.4                       | 101.7 | 108.1     | 140.5                       | 150.3 | 162.4     |
|                            | 33 ST ANDRE LES ALPES       | 75.9                       | 79.0  | 82.6      | 108.3                       | 114.1 | 121.0     |
|                            | 34 ST PAUL SUR UBAYE        | 63.0                       | 65.7  | 69.1      | 88.3                        | 93.5  | 99.8      |
|                            | 35 ST PONS DE BARCELONNETTE | 57.7                       | 61.7  | 66.9      | 80.8                        | 88.2  | 98.2      |
|                            | 36 STE CROIX                | 73.7                       | 79.7  | 87.7      | 108.1                       | 119.2 | 134.3     |
|                            | 37 STE TULLE                | 68.9                       | 74.0  | 80.6      | 101.3                       | 110.7 | 123.3     |
|                            | 38 VALBELLE                 | 133.5                      | 141.6 | 151.7     | 195.0                       | 210.1 | 229.3     |
| 05 Hautes Alpes            | 1 CHATEAU-VILLE-VIEILLE     | 54.5                       | 56.3  | 58.4      | 77.2                        | 80.6  | 84.6      |
|                            | 2 MONTGENEVRE               | 56.6                       | 58.8  | 61.5      | 79.4                        | 83.6  | 88.7      |
|                            | 3 MONTJAY                   | 72.9                       | 76.9  | 82.0      | 104.7                       | 112.3 | 121.8     |
|                            | 4 PUY-SAINT-VINCENT         | 70.8                       | 73.9  | 77.5      | 99.8                        | 105.5 | 112.5     |
|                            | 5 ROSANS                    | 65.0                       | 69.2  | 74.7      | 92.1                        | 100.0 | 110.4     |
|                            | 6 SAINT-JEAN-SAINT-NICOLAS  | 75.5                       | 78.9  | 83.1      | 106.3                       | 112.7 | 120.6     |
|                            | 7 (LA)SAULCE                | 67.8                       | 71.6  | 76.4      | 96.1                        | 103.2 | 112.2     |
|                            | 8 VARS                      | 68.7                       | 72.5  | 77.0      | 98.8                        | 105.7 | 114.4     |
|                            | 9 VILLAR-LOUBIERE           | 88.2                       | 91.1  | 94.5      | 124.7                       | 130.2 | 136.5     |
|                            | 10 AGNIERES EN DEVOLUY      | 79.0                       | 84.1  | 90.8      | 111.1                       | 120.7 | 133.4     |
|                            | 11 ANCELLE                  | 63.4                       | 66.1  | 69.4      | 88.4                        | 93.5  | 99.7      |
|                            | 12 BARCILLONNETTE           | 77.9                       | 81.4  | 85.6      | 109.8                       | 116.3 | 124.3     |
|                            | 13 CEILLAC                  | 54.2                       | 56.7  | 59.7      | 75.7                        | 80.3  | 86.0      |

| Département        |    | Nom du pluviomètre      | Pluies décennales (mm/24h) |       | Pluies centennales (mm/24h) |       |
|--------------------|----|-------------------------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|                    |    |                         | borne inf                  | P     | borne sup                   | P     |
| 05 Hautes Alpes    | 14 | CERVIERES               | 53.7                       | 57.3  | 62.0                        | 82.0  |
|                    | 15 | CHAMPCELLA              | 73.8                       | 76.9  | 80.5                        | 111.7 |
|                    | 16 | CHATEAU QUEYRAS         | 52.8                       | 55.2  | 58.0                        | 78.9  |
|                    | 17 | FRESSINIERES VIOLLINS   | 76.1                       | 79.4  | 83.5                        | 112.9 |
|                    | 18 | GUILLESTRE              | 52.6                       | 56.2  | 60.9                        | 79.9  |
|                    | 19 | LA CHAPELLE VALGAUDEMAR | 96.1                       | 99.9  | 104.5                       | 143.6 |
|                    | 20 | LARAGNE                 | 74.9                       | 77.7  | 80.9                        | 112.4 |
|                    | 21 | LE MONETIER LES BAINS   | 70.1                       | 73.6  | 77.9                        | 104.5 |
|                    | 22 | LES ORRES LE MELEZET    | 64.5                       | 67.0  | 70.0                        | 95.6  |
|                    | 23 | ORCIERES                | 94.4                       | 98.2  | 102.7                       | 141.2 |
|                    | 24 | REALLON                 | 75.0                       | 78.2  | 82.1                        | 110.6 |
| 06 Alpes Maritimes | 25 | ROUSSET SERRE PONCON    | 54.6                       | 57.0  | 59.8                        | 80.6  |
|                    | 26 | ST FIRMIN               | 78.2                       | 81.7  | 86.0                        | 117.4 |
|                    | 27 | ST JULIEN EN BEAUCHENE  | 73.1                       | 77.7  | 83.8                        | 110.9 |
|                    | 28 | ST PIERRE D'ARGENCON    | 66.5                       | 70.7  | 76.2                        | 100.6 |
|                    | 1  | ANTIBES                 | 111.9                      | 118.3 | 126.2                       | 164.7 |
|                    | 2  | (LE)BAR-SUR-LOUP        | 106.0                      | 111.7 | 118.7                       | 152.6 |
|                    | 3  | BEUIL                   | 102.6                      | 106.6 | 111.3                       | 148.8 |
|                    | 4  | (LA)BOLLENE-VESUBIE     | 104.8                      | 109.7 | 115.7                       | 151.3 |
|                    | 5  | BOUYON                  | 142.2                      | 149.4 | 158.1                       | 208.4 |
|                    | 6  | BREIL-SUR-ROYA          | 117.2                      | 123.4 | 131.1                       | 171.4 |
|                    | 7  | CANNES                  | 100.8                      | 105.2 | 110.3                       | 146.4 |
|                    | 8  | CARROS                  | 110.0                      | 116.5 | 124.7                       | 161.8 |
|                    | 9  | (LA)COLLE-SUR-LOUP      | 110.9                      | 115.9 | 121.7                       | 161.0 |
|                    | 10 | COLOMARS                | 106.9                      | 112.3 | 118.8                       | 156.6 |
|                    | 11 | CONTES                  | 102.3                      | 108.3 | 115.5                       | 150.6 |
|                    |    |                         |                            |       |                             | 161.6 |
|                    |    |                         |                            |       |                             | 175.4 |

| Département        |    | Nom du pluviomètre       | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|--------------------|----|--------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|                    |    |                          | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 06 Alpes Maritimes | 12 | ENTRAUNES                | 101.3                      | 105.0 | 109.1     | 146.1                       | 152.9 | 160.9     |
|                    | 13 | (L')ESCARENE             | 104.8                      | 109.4 | 114.6     | 156.5                       | 164.9 | 174.8     |
|                    | 14 | EZE                      | 100.3                      | 106.0 | 113.0     | 147.5                       | 158.2 | 171.5     |
|                    | 15 | FONTAN                   | 118.5                      | 125.4 | 133.9     | 171.4                       | 184.2 | 200.3     |
|                    | 16 | GRASSE                   | 106.6                      | 111.7 | 117.8     | 154.2                       | 163.8 | 175.4     |
|                    | 17 | GREOLIERES               | 133.6                      | 142.8 | 154.7     | 194.0                       | 211.2 | 233.7     |
|                    | 18 | GUILLAUMES               | 90.7                       | 94.1  | 98.1      | 131.5                       | 137.9 | 145.4     |
|                    | 19 | ISOLA                    | 109.4                      | 114.0 | 119.3     | 159.6                       | 168.2 | 178.2     |
|                    | 20 | LANTOSQUE                | 116.2                      | 121.8 | 128.4     | 169.6                       | 180.0 | 192.6     |
|                    | 21 | LEVENS                   | 110.7                      | 115.6 | 121.4     | 160.9                       | 170.1 | 181.0     |
|                    | 22 | LUCERAM                  | 126.7                      | 132.9 | 140.3     | 186.3                       | 197.8 | 211.8     |
|                    | 23 | MENTON                   | 89.5                       | 94.0  | 99.4      | 130.0                       | 138.4 | 148.6     |
|                    | 24 | MOULINET                 | 116.0                      | 121.3 | 127.7     | 168.7                       | 178.6 | 190.6     |
|                    | 25 | PEILLE                   | 122.7                      | 129.8 | 138.5     | 180.0                       | 193.2 | 209.7     |
|                    | 26 | PEILLON                  | 117.4                      | 123.0 | 129.5     | 173.6                       | 184.0 | 196.3     |
|                    | 27 | PEONE                    | 95.8                       | 100.2 | 105.4     | 139.7                       | 147.9 | 157.8     |
|                    | 28 | PUGET-THENIERS           | 92.8                       | 96.7  | 101.4     | 133.9                       | 141.3 | 150.1     |
|                    | 29 | ROQUEBRUNE-CAP-MARTIN    | 90.2                       | 95.2  | 101.3     | 131.0                       | 140.4 | 152.0     |
|                    | 30 | (LA)ROQUETTE-SUR-VAR     | 114.1                      | 121.1 | 129.9     | 168.0                       | 181.1 | 197.8     |
|                    | 31 | SAINT-AUBAN              | 106.2                      | 110.0 | 114.4     | 152.6                       | 159.8 | 168.0     |
|                    | 32 | SAINT-DALMAS-LE-SEL VAGE | 108.6                      | 112.9 | 117.9     | 158.5                       | 166.6 | 176.0     |
|                    | 33 | SAINT-JEAN-CAP-FERRAT    | 81.1                       | 84.2  | 87.7      | 117.9                       | 123.7 | 130.4     |
|                    | 34 | SAINT-MARTIN-DU-VAR      | 119.0                      | 127.5 | 138.4     | 176.3                       | 192.2 | 212.9     |
|                    | 35 | SAINT-SAUVEUR-SUR-TINEE  | 104.5                      | 108.8 | 113.8     | 153.1                       | 161.2 | 170.6     |
|                    | 36 | SAINT-VALLIER-DE-THIEY   | 116.9                      | 122.1 | 128.3     | 168.8                       | 178.5 | 190.1     |
|                    | 37 | SIGALE                   | 104.9                      | 110.2 | 116.6     | 152.1                       | 162.0 | 174.0     |

| Département         | Nom du pluviomètre       | Pluies décennales (mm/24h) |       | Pluies centennales (mm/24h) |       |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|                     |                          | borne inf                  | P     | borne inf                   | P     |
| 06 Alpes Maritimes  | 38 THEOULE-SUR-MER       | 109.1                      | 115.0 | 122.3                       | 168.4 |
|                     | 39 (LA)TRINITE           | 91.8                       | 96.9  | 103.1                       | 143.1 |
|                     | 40 (LA)TURBIE            | 104.1                      | 110.1 | 117.6                       | 164.2 |
|                     | 41 UTELLE                | 110.8                      | 116.1 | 122.4                       | 171.5 |
|                     | 42 VALBONNE              | 103.9                      | 109.9 | 117.4                       | 161.8 |
|                     | 43 VALDEBLORE            | 95.1                       | 98.9  | 103.4                       | 145.1 |
|                     | 44 VALLAURIS             | 99.1                       | 105.6 | 114.0                       | 156.5 |
|                     | 45 VENANSON              | 121.0                      | 127.2 | 134.7                       | 187.5 |
|                     | 46 VILLARS-SUR-VAR       | 109.9                      | 116.2 | 124.0                       | 173.7 |
|                     | 47 ENTRAUMES LE CLOT     | 101.0                      | 105.9 | 111.9                       | 155.3 |
|                     | 48 GUILLAUMES            | 81.5                       | 85.3  | 89.9                        | 123.7 |
|                     | 49 ISOLA                 | 103.4                      | 108.5 | 114.7                       | 159.7 |
|                     | 50 ST MARTIN VESUBIE     | 113.8                      | 119.5 | 126.3                       | 176.0 |
| 13 Bouches Du Rhône | 1 AIX-EN-PROVENCE        | 67.2                       | 71.8  | 77.6                        | 109.1 |
|                     | 2 AUBAGNE                | 80.9                       | 85.7  | 91.6                        | 128.5 |
|                     | 3 BERRE-L'ETANG          | 87.7                       | 94.2  | 102.6                       | 145.7 |
|                     | 4 CABRIES                | 84.5                       | 90.3  | 97.6                        | 129.5 |
|                     | 5 CARRY-LE-ROUET         | 78.5                       | 84.6  | 92.6                        | 118.8 |
|                     | 6 CASSIS                 | 81.3                       | 86.1  | 91.9                        | 120.9 |
|                     | 7 CHATEAURENARD          | 92.5                       | 97.1  | 102.6                       | 146.1 |
|                     | 8 (LA)CIOTAT             | 75.8                       | 80.7  | 86.8                        | 125.3 |
|                     | 9 CUGES-LES-PINS         | 94.3                       | 97.9  | 102.2                       | 142.3 |
|                     | 10 EYGUIERES             | 91.1                       | 97.4  | 105.3                       | 138.6 |
|                     | 11 (LA)FARE-LES-OLIVIERS | 72.8                       | 77.4  | 83.2                        | 110.7 |
|                     | 12 GARDANNE              | 84.5                       | 90.7  | 98.8                        | 127.1 |
|                     | 13 GEMENOS               | 82.6                       | 88.6  | 96.3                        | 134.8 |



| Département         |    | Nom du pluviomètre       | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|---------------------|----|--------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|                     |    |                          | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 13 Bouches Du Rhône | 14 | ISTRES                   | 82.8                       | 87.8  | 93.9      | 125.7                       | 135.1 | 146.7     |
|                     | 15 | LAMBESC                  | 71.7                       | 76.1  | 81.4      | 107.4                       | 115.5 | 125.6     |
|                     | 16 | MARIGNANE                | 74.5                       | 79.2  | 84.9      | 113.6                       | 122.4 | 133.2     |
|                     | 17 | MARSEILLE                | 72.2                       | 77.1  | 83.1      | 109.8                       | 118.9 | 130.3     |
|                     | 18 | MARTIGUES                | 93.8                       | 100.7 | 109.5     | 141.8                       | 154.7 | 171.4     |
|                     | 19 | MEYRARGUES               | 166.8                      | 79.1  | 212.8     | -15.7                       | 118.2 | 133.0     |
|                     | 20 | (LES) PENNES-MIRABEAU    | 191.1                      | 93.1  | 241.2     | -28.5                       | 142.9 | 164.4     |
|                     | 21 | PORT-DE-BOUC             | 81.3                       | 87.5  | 95.6      | 122.0                       | 133.6 | 148.8     |
|                     | 22 | ROGNES                   | 92.2                       | 98.0  | 105.2     | 137.3                       | 148.1 | 161.7     |
|                     | 23 | ROQUEFORT-LA-BEDOULE     | 93.5                       | 100.3 | 109.1     | 137.9                       | 150.6 | 167.2     |
|                     | 24 | ROQUEVAIRE               | 67.0                       | 72.6  | 80.0      | 100.4                       | 110.8 | 124.9     |
|                     | 25 | ROUSSET                  | 71.5                       | 75.6  | 80.6      | 106.5                       | 114.2 | 123.7     |
|                     | 26 | SAINT-ANDIOL             | 97.0                       | 104.1 | 113.4     | 142.8                       | 156.1 | 173.7     |
|                     | 27 | SAINT-CHAMAS             | 81.6                       | 86.5  | 92.4      | 122.2                       | 131.3 | 142.5     |
|                     | 28 | SAINT-MARTIN-DE-CRAU     | 85.2                       | 91.0  | 98.1      | 129.4                       | 140.1 | 153.5     |
|                     | 29 | SAINT-PAUL-LES-DURANCE   | 68.5                       | 72.7  | 77.8      | 100.1                       | 107.9 | 117.7     |
|                     | 30 | SAINT-REMY-DE-PROVENCE   | 87.7                       | 93.7  | 101.3     | 130.3                       | 141.5 | 155.8     |
|                     | 31 | SALON-DE-PROVENCE        | 91.3                       | 97.4  | 105.1     | 137.8                       | 149.3 | 163.9     |
|                     | 32 | TRETS                    | 72.8                       | 77.6  | 83.7      | 108.3                       | 117.3 | 128.7     |
| 25 Doubs            | 1  | JOUGNE                   | 71.0                       | 73.1  | 75.5      | 97.7                        | 101.7 | 106.2     |
|                     | 2  | LABERGEMENT-SAINTE-MARIE | 71.1                       | 73.1  | 75.5      | 97.3                        | 101.1 | 105.5     |
|                     | 3  | GRANGES STE MARIE        | 69.0                       | 71.4  | 74.2      | 94.4                        | 98.9  | 104.1     |
|                     | 4  | LES FOURGS               | 62.2                       | 65.6  | 70.0      | 85.3                        | 91.7  | 100.0     |
|                     | 5  | MOUTHE                   | 76.2                       | 80.2  | 85.4      | 103.2                       | 110.6 | 120.4     |
| 26 Drôme            | 1  | BEAUFORT-SUR-GERVANNE    | 78.8                       | 82.6  | 87.2      | 114.2                       | 121.3 | 130.0     |
|                     | 2  | BELLEGARDE-EN-DIOIS      | 68.8                       | 72.5  | 77.1      | 97.9                        | 104.8 | 113.4     |

| Département | Nom du pluviomètre          | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                             | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 26 Drôme    | 3 BOURDEAUX                 | 85.2                       | 90.0  | 95.8      | 123.1                       | 132.0 | 143.0     |
|             | 4 BOURG-LES-VALENCE         | 102.1                      | 110.0 | 120.3     | 152.3                       | 167.1 | 186.7     |
|             | 5 BUIS-LES-BARONNIES        | 82.5                       | 87.5  | 93.7      | 120.8                       | 130.1 | 141.8     |
|             | 6 CHATILLON-EN-DIOIS        | 64.8                       | 67.7  | 71.3      | 92.5                        | 98.1  | 104.7     |
|             | 7 CREST                     | 89.3                       | 94.2  | 100.2     | 130.9                       | 140.1 | 151.4     |
|             | 8 DIE                       | 66.8                       | 69.7  | 73.3      | 94.6                        | 100.1 | 106.8     |
|             | 9 DIEULEFIT                 | 93.7                       | 99.4  | 106.6     | 136.5                       | 147.3 | 160.9     |
|             | 10 GLANDAGE                 | 65.5                       | 69.3  | 74.1      | 92.6                        | 99.6  | 108.8     |
|             | 11 MARSANNE                 | 104.3                      | 110.4 | 117.8     | 155.0                       | 166.3 | 180.3     |
|             | 12 MARSAZ                   | 82.6                       | 88.3  | 95.5      | 121.1                       | 131.7 | 145.4     |
|             | 13 MOLLANS-SUR-OUVEZE       | 87.0                       | 93.7  | 102.5     | 129.4                       | 141.9 | 158.5     |
|             | 14 MONTAUBAN-SUR-L'OUVEZE   | 76.0                       | 79.5  | 83.5      | 108.7                       | 115.1 | 122.8     |
|             | 15 MONTJOUX                 | 90.8                       | 95.8  | 102.0     | 130.5                       | 139.9 | 151.6     |
|             | 16 MONTLAUR-EN-DIOIS        | 62.8                       | 66.8  | 72.0      | 87.5                        | 94.9  | 104.9     |
|             | 17 MONTRIGAUD               | 76.9                       | 82.0  | 88.5      | 110.6                       | 120.1 | 132.6     |
|             | 18 MONTSEGUR-SUR-LAUZON     | 89.0                       | 93.6  | 99.1      | 130.5                       | 139.1 | 149.6     |
|             | 19 NYONS                    | 80.6                       | 86.5  | 94.3      | 118.0                       | 129.1 | 143.8     |
|             | 20 PUY-SAINT-MARTIN         | 99.8                       | 106.5 | 115.1     | 146.6                       | 159.2 | 175.4     |
|             | 21 REMUZAT                  | 73.2                       | 77.6  | 83.2      | 105.0                       | 113.2 | 123.8     |
|             | 22 SAINT-BARTHELEMY-DE-VALS | 93.9                       | 99.3  | 105.9     | 138.3                       | 148.3 | 160.8     |
|             | 23 SAINT-JEAN-EN-ROYANS     | 80.1                       | 83.8  | 88.1      | 115.5                       | 122.3 | 130.5     |
|             | 24 SAINT-JULIEN-EN-QUINT    | 71.2                       | 75.6  | 81.2      | 100.8                       | 109.0 | 119.7     |
|             | 25 SAINT-MARCEL-LES-VALENCE | 109.1                      | 116.3 | 125.3     | 163.7                       | 177.1 | 194.1     |
|             | 26 SAINT-SORLIN-EN-VALLOIRE | 100.2                      | 105.5 | 111.8     | 148.8                       | 158.6 | 170.5     |
|             | 27 SEDERON                  | 84.3                       | 89.2  | 95.3      | 121.9                       | 131.0 | 142.5     |
|             | 28 VALDROME                 | 68.4                       | 72.3  | 77.2      | 97.5                        | 104.8 | 114.0     |

| Département | Nom du pluviomètre          | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                             | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 26 Drôme    | 29 CHATUZANGE PIZANCON      | 84.7                       | 89.5 | 95.4      | 124.0                       | 132.9 | 144.1     |
|             | 30 LUC EN DIOS              | 68.4                       | 72.2 | 76.9      | 98.7                        | 105.8 | 114.7     |
|             | 31 STE EULALIE-PT EN ROYANS | 71.8                       | 75.1 | 79.0      | 102.4                       | 108.5 | 116.0     |
| 38 Isere    | 1 AUTRANS                   | 81.8                       | 85.4 | 89.8      | 115.7                       | 122.5 | 130.9     |
|             | 2 BEAUREPAIRE               | 78.5                       | 82.5 | 87.3      | 115.0                       | 122.5 | 131.6     |
|             | 3 BOURGOIN-JALLIEU          | 73.7                       | 77.1 | 81.2      | 106.2                       | 112.6 | 120.4     |
|             | 4 CHANTELOUVE               | 84.5                       | 87.8 | 91.7      | 119.1                       | 125.3 | 132.7     |
|             | 5 CHAPAREILLAN              | 69.2                       | 71.6 | 74.4      | 95.7                        | 100.2 | 105.5     |
|             | 6 CHATEAU-BERNARD           | 73.9                       | 77.4 | 81.8      | 104.1                       | 110.8 | 119.0     |
|             | 7 CHATELUS                  | 69.2                       | 73.2 | 78.5      | 97.0                        | 104.6 | 114.5     |
|             | 8 CHICHILIANNE              | 74.7                       | 78.7 | 83.6      | 106.2                       | 113.6 | 122.9     |
|             | 9 CHIRENS                   | 71.3                       | 74.4 | 78.0      | 99.9                        | 105.6 | 112.6     |
|             | 10 CLELLES                  | 65.2                       | 68.5 | 72.5      | 93.2                        | 99.3  | 107.0     |
|             | 11 CORENC                   | 66.3                       | 70.6 | 76.1      | 94.3                        | 102.3 | 112.8     |
|             | 12 CORPS                    | 90.9                       | 94.7 | 99.1      | 129.6                       | 136.6 | 145.0     |
|             | 13 (LA)COTE-SAINT-ANDRE     | 70.1                       | 73.4 | 77.2      | 100.8                       | 106.9 | 114.2     |
|             | 14 FAVERGES-DE-LA-TOUR      | 72.3                       | 75.6 | 79.7      | 103.3                       | 109.5 | 117.1     |
|             | 15 (LA)FERRIERE             | 68.7                       | 71.6 | 75.2      | 94.5                        | 100.1 | 106.9     |
|             | 16 FONTANIL-CORNILLON       | 75.2                       | 78.8 | 83.1      | 106.8                       | 113.5 | 121.7     |
|             | 17 (LA)GARDE                | 62.7                       | 66.4 | 71.0      | 88.1                        | 94.9  | 103.6     |
|             | 18 GRESSE-EN-VERCORS        | 72.2                       | 75.6 | 79.8      | 101.8                       | 108.2 | 116.0     |
|             | 19 LALLEY                   | 73.0                       | 77.3 | 82.8      | 103.1                       | 111.1 | 121.4     |
|             | 20 LAVALDENS                | 71.4                       | 74.7 | 78.6      | 99.9                        | 106.0 | 113.4     |
|             | 21 LEYRIEU                  | 74.0                       | 77.6 | 82.1      | 104.3                       | 111.1 | 119.5     |
|             | 22 MENS                     | 57.7                       | 60.1 | 62.8      | 81.2                        | 85.5  | 90.7      |
|             | 23 MOIRANS                  | 76.4                       | 80.8 | 86.5      | 108.2                       | 116.5 | 127.2     |

| Département | Nom du pluviomètre            | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                               | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 38 Isere    | 24 (LA)MOTTE-D'AVEILLANS      | 61.2                       | 64.1 | 67.6      | 86.8                        | 92.2  | 98.8      |
|             | 25 (LE)PIN                    | 76.9                       | 81.4 | 87.1      | 107.7                       | 116.1 | 127.0     |
|             | 26 POMMIER-DE-BEAUREPAIRE     | 78.6                       | 83.8 | 90.4      | 114.2                       | 123.9 | 136.4     |
|             | 27 (LE)PONT-DE-BEAUVOISIN     | 76.4                       | 80.6 | 85.7      | 109.6                       | 117.4 | 127.1     |
|             | 28 PROVEYSIEUX                | 80.9                       | 85.1 | 90.4      | 113.9                       | 121.8 | 131.7     |
|             | 29 ROISSARD                   | 56.3                       | 58.9 | 62.1      | 79.7                        | 84.6  | 90.7      |
|             | 30 ROYBON                     | 84.0                       | 88.3 | 93.6      | 120.9                       | 129.0 | 139.0     |
|             | 31 SAINT-GERVAIS              | 73.6                       | 77.6 | 82.6      | 103.2                       | 110.6 | 120.1     |
|             | 32 SAINT-LAURENT-DU-PONT      | 85.8                       | 89.6 | 94.3      | 120.5                       | 127.7 | 136.5     |
|             | 33 SAINT-MARCELLIN            | 72.0                       | 75.7 | 80.2      | 103.1                       | 109.9 | 118.5     |
|             | 34 SAINT-PIERRE-DE-CHARTREUSE | 95.5                       | 99.4 | 104.2     | 132.9                       | 140.3 | 149.3     |
|             | 35 SAINT-PIERRE-D'ENTREMONT   | 87.5                       | 91.4 | 95.9      | 122.6                       | 129.7 | 138.4     |
|             | 36 (LA)SALETTE-FALLAVALX      | 73.7                       | 77.7 | 82.6      | 104.2                       | 111.7 | 121.0     |
|             | 37 TENCIN                     | 62.6                       | 65.5 | 69.0      | 88.0                        | 93.4  | 100.0     |
|             | 38 (LA)TERRASSE               | 63.0                       | 66.6 | 71.2      | 88.3                        | 95.0  | 103.6     |
|             | 39 THEYS                      | 67.6                       | 70.5 | 74.0      | 94.2                        | 99.6  | 106.2     |
|             | 40 (LA)TOUR-DU-PIN            | 74.0                       | 77.7 | 82.2      | 106.1                       | 113.0 | 121.4     |
|             | 41 TREMINIS                   | 74.1                       | 79.1 | 85.6      | 106.1                       | 115.3 | 127.6     |
|             | 42 TULLINS                    | 67.7                       | 70.8 | 74.6      | 95.8                        | 101.7 | 108.8     |
|             | 43 VALJOUFFREY                | 79.6                       | 82.8 | 86.7      | 111.6                       | 117.7 | 125.0     |
|             | 44 VAUJANY                    | 80.8                       | 84.7 | 89.3      | 116.1                       | 123.2 | 131.9     |
|             | 45 (LE)VERSOUD                | 70.2                       | 75.0 | 81.3      | 100.0                       | 109.0 | 120.9     |
|             | 46 ALLEMOND LE RIVIER         | 88.5                       | 92.9 | 98.3      | 124.5                       | 132.7 | 142.9     |
|             | 47 BESSE                      | 70.4                       | 72.5 | 74.8      | 99.5                        | 103.4 | 107.9     |
|             | 48 BOURG D'OISANS             | 68.1                       | 70.5 | 73.3      | 97.7                        | 102.3 | 107.5     |
|             | 49 BOURNE                     | 71.3                       | 76.4 | 83.3      | 98.8                        | 108.2 | 121.3     |

| Département | Nom du pluviomètre         | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|----------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                            | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 38 Isere    | 50 ENGINS                  | 77.5                       | 81.5 | 86.4      | 109.1                       | 116.6 | 125.9     |
|             | 51 ENTRAIGUES              | 79.5                       | 83.1 | 87.5      | 112.6                       | 119.4 | 127.6     |
|             | 52 GRANDE CHARTREUSE       | 95.9                       | 99.9 | 104.7     | 133.6                       | 141.1 | 150.2     |
|             | 53 LE VERNEY               | 80.2                       | 84.0 | 88.4      | 115.0                       | 121.9 | 130.4     |
|             | 54 MONESTIER DE CLERMONT   | 64.8                       | 67.7 | 71.2      | 91.8                        | 97.2  | 103.8     |
|             | 55 MONT DE LANS LE CHAMBON | 53.5                       | 56.7 | 60.7      | 74.3                        | 80.1  | 87.7      |
|             | 56 MONTAUD VIF DE LA CLE   | 89.8                       | 93.8 | 98.6      | 127.0                       | 134.4 | 143.4     |
|             | 57 ORNON LA PALUD          | 82.0                       | 86.2 | 91.3      | 116.1                       | 123.9 | 133.6     |
|             | 58 REVEL                   | 67.1                       | 70.4 | 74.5      | 94.5                        | 100.7 | 108.3     |
|             | 59 ST CHRISTOPHE EN OISANS | 66.5                       | 69.1 | 72.1      | 92.9                        | 97.7  | 103.5     |
|             | 60 ST HILLAIRE DU TOUVET   | 75.8                       | 79.1 | 83.2      | 105.9                       | 112.1 | 119.7     |
|             | 61 ST JEAN DE BOURNAY      | 74.8                       | 78.8 | 83.7      | 108.0                       | 115.5 | 124.8     |
|             | 1 ARINTHOD                 | 77.8                       | 80.2 | 83.0      | 107.3                       | 111.8 | 117.0     |
|             | 2 BEAUFORT                 | 66.9                       | 69.2 | 71.8      | 92.9                        | 97.1  | 102.1     |
| 39 Jura     | 3 BELLEFONTAINE            | 90.5                       | 93.2 | 96.3      | 122.8                       | 127.9 | 133.8     |
|             | 4 BESAIN                   | 74.8                       | 77.1 | 79.6      | 101.6                       | 105.8 | 110.6     |
|             | 5 CERNIEBAUD               | 80.3                       | 84.1 | 88.9      | 108.4                       | 115.5 | 124.5     |
|             | 6 CHARCIER                 | 74.2                       | 76.9 | 80.1      | 101.8                       | 106.8 | 112.8     |
|             | 7 CHASSAL                  | 82.1                       | 85.9 | 90.7      | 111.5                       | 118.6 | 127.7     |
|             | 8 CHATEL-DE-JOUX           | 87.3                       | 89.9 | 92.9      | 118.8                       | 123.7 | 129.3     |
|             | 9 CLAIRVAUX-LES-LACS       | 76.5                       | 78.7 | 81.3      | 104.3                       | 108.5 | 113.4     |
|             | 10 CRANCOT                 | 74.7                       | 77.4 | 80.5      | 103.4                       | 108.4 | 114.3     |
|             | 11 DOMBLANS                | 72.3                       | 75.0 | 78.0      | 101.2                       | 106.1 | 111.8     |
|             | 12 (LE)FRASNOIS            | 80.6                       | 83.5 | 86.9      | 109.9                       | 115.3 | 121.8     |
|             | 13 LEZAT                   | 90.6                       | 94.0 | 98.1      | 123.3                       | 129.7 | 137.4     |
|             | 14 LONS-LE-SAUNIER         | 82.9                       | 87.3 | 92.7      | 116.1                       | 124.2 | 134.5     |

| Département       | Nom du pluviomètre            | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------------|-------------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|                   |                               | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 39 Jura           | 15 MARGNY                     | 78.3                       | 80.6 | 83.3      | 106.9                       | 111.3 | 116.3     |
|                   | 16 MONTAIGU                   | 71.5                       | 74.8 | 78.8      | 99.3                        | 105.4 | 112.9     |
|                   | 17 MONTMOROT                  | 70.8                       | 74.3 | 78.6      | 98.8                        | 105.3 | 113.4     |
|                   | 18 MORBIER                    | 84.2                       | 86.6 | 89.4      | 113.7                       | 118.2 | 123.4     |
|                   | 19 PIMORIN                    | 70.9                       | 73.7 | 77.0      | 96.3                        | 101.6 | 107.9     |
|                   | 20 POLIGNY                    | 73.8                       | 77.5 | 82.0      | 102.6                       | 109.4 | 118.0     |
|                   | 21 SAINT-AMOUR                | 70.0                       | 72.4 | 75.2      | 97.2                        | 101.7 | 107.0     |
|                   | 22 SAINT-CLAUDE               | 75.4                       | 78.0 | 81.0      | 102.3                       | 107.1 | 112.8     |
|                   | 23 SAINT-JULIEN               | 74.9                       | 77.3 | 80.1      | 103.0                       | 107.5 | 112.7     |
|                   | 24 SAINT-LAURENT-EN-GRANDVAUX | 82.6                       | 85.0 | 87.8      | 112.9                       | 117.4 | 122.7     |
| 69 Rhône          | 25 THOIRETTE                  | 79.9                       | 82.5 | 85.4      | 109.6                       | 114.4 | 120.1     |
|                   | 26 BOURG DE SIROD             | 76.7                       | 79.4 | 82.6      | 103.4                       | 108.5 | 114.6     |
|                   | 27 LAMOURA                    | 95.9                       | 99.2 | 103.0     | 130.8                       | 137.0 | 144.2     |
|                   | 28 MORBIER                    | 81.9                       | 84.6 | 87.7      | 110.2                       | 115.2 | 121.1     |
|                   | 29 PORTE-SACHET               | 80.8                       | 83.2 | 86.0      | 110.4                       | 114.9 | 120.2     |
|                   | 1 VILLEURBANNE                | 67.1                       | 69.8 | 73.0      | 94.1                        | 99.2  | 105.2     |
|                   | 2 LYON BRON                   | 68.8                       | 71.3 | 74.1      | 97.3                        | 102.0 | 107.3     |
| 71 Saone et Loire | 3 ST GENIS LAVAL              | 67.9                       | 69.9 | 72.2      | 96.5                        | 100.3 | 104.6     |
|                   | 1 BEAUREPAIRE-EN-BRESSE       | 67.9                       | 71.5 | 76.0      | 95.0                        | 101.7 | 110.2     |
|                   | 2 BELLEVESVRE                 | 62.2                       | 64.3 | 66.8      | 87.5                        | 91.4  | 96.0      |
|                   | 3 LESSARD-EN-BRESSE           | 56.1                       | 59.1 | 62.8      | 78.6                        | 84.2  | 91.2      |
|                   | 4 LOUHANS                     | 60.9                       | 63.4 | 66.3      | 87.1                        | 91.7  | 97.3      |
|                   | 5 ROMENAY                     | 63.9                       | 67.2 | 71.3      | 88.7                        | 94.8  | 102.5     |
|                   | 6 VARENNES-SAINT-SAUVEUR      | 54.9                       | 57.5 | 60.9      | 75.2                        | 80.2  | 86.5      |
|                   | 7 CHALON                      | 54.1                       | 56.7 | 59.8      | 75.7                        | 80.5  | 86.3      |
|                   | 8 MACON                       | 55.5                       | 58.1 | 61.2      | 76.6                        | 81.4  | 87.4      |

| Département | Nom du pluviomètre         | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|----------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                            | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 73 Savoie   | 1 AIGUEBELETTE-LE-LAC      | 66.2                       | 70.6 | 76.8      | 89.6                        | 97.9  | 109.6     |
|             | 2 AIX-LES-BAINS            | 63.7                       | 67.3 | 71.9      | 87.5                        | 94.2  | 102.9     |
|             | 3 ARGENTINE                | 69.3                       | 72.6 | 76.6      | 96.5                        | 102.6 | 110.2     |
|             | 4 BEAUFORT                 | 80.3                       | 83.2 | 86.4      | 111.9                       | 117.2 | 123.4     |
|             | 5 BESSANS                  | 62.2                       | 64.5 | 67.3      | 88.1                        | 92.5  | 97.7      |
|             | 6 BONNEVAL-SUR-ARC         | 79.8                       | 84.2 | 89.5      | 114.7                       | 122.7 | 132.9     |
|             | 7 BOZEL                    | 55.5                       | 57.6 | 60.1      | 77.1                        | 81.1  | 85.9      |
|             | 8 BRIDES-LES-BAINS         | 53.9                       | 55.9 | 58.2      | 74.9                        | 78.6  | 83.0      |
|             | 9 CHAMPAGNY-EN-VANNOISE    | 57.2                       | 60.2 | 64.1      | 79.8                        | 85.6  | 92.9      |
|             | 10 CHAVANNE(LA)            | 69.2                       | 72.0 | 75.2      | 96.6                        | 101.8 | 108.0     |
|             | 11 DESERTS(LES)            | 85.7                       | 88.6 | 92.0      | 118.1                       | 123.5 | 129.9     |
|             | 12 LANSLEBOURG-MONT-CENIS  | 73.3                       | 76.7 | 80.7      | 106.1                       | 112.4 | 120.0     |
|             | 13 MONTGELLAFREY           | 63.7                       | 65.9 | 68.5      | 88.4                        | 92.6  | 97.6      |
|             | 14 MOTTE-SERVOLEX(LA)      | 71.6                       | 75.6 | 80.7      | 99.7                        | 107.1 | 116.8     |
|             | 15 LECHERE(LA)             | 72.8                       | 75.7 | 79.1      | 101.0                       | 106.3 | 112.7     |
|             | 16 NOVALAISE               | 72.0                       | 75.3 | 79.2      | 100.5                       | 106.6 | 114.1     |
|             | 17 ROCHETTE(LA)            | 63.1                       | 65.2 | 67.7      | 86.8                        | 90.7  | 95.3      |
|             | 18 STE-FOY-TARENTEAISE     | 67.0                       | 69.3 | 72.0      | 93.1                        | 97.5  | 102.5     |
|             | 19 ST-JEAN-D ARVES         | 54.6                       | 56.5 | 58.8      | 75.5                        | 79.0  | 83.2      |
|             | 20 STE-MARIE-DE-CUINES     | 71.8                       | 74.4 | 77.5      | 101.3                       | 106.2 | 112.0     |
|             | 21 ST-MARTIN-D ARC         | 57.3                       | 60.3 | 64.0      | 80.0                        | 85.6  | 92.6      |
|             | 22 ST-MARTIN-DE-BELLEVILLE | 53.6                       | 55.5 | 57.8      | 74.3                        | 77.9  | 82.1      |
|             | 23 ST-MARTIN-DE-LA-PORTE   | 54.0                       | 56.0 | 58.4      | 75.6                        | 79.3  | 83.8      |
|             | 24 ST-MICHEL-DE-MAURIENNE  | 60.9                       | 63.1 | 65.6      | 85.0                        | 89.0  | 93.7      |
|             | 25 ST-OFFENGE-DESSOUS      | 65.6                       | 69.4 | 74.5      | 89.8                        | 96.9  | 106.5     |
|             | 26 TIGNES                  | 73.0                       | 75.7 | 78.9      | 102.4                       | 107.4 | 113.3     |



| Département |    | Nom du pluviomètre     | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|----|------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |    |                        | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 73 Savoie   | 27 | VERRENS-ARVEY          | 91.2                       | 94.8 | 99.0      | 126.8                       | 133.5 | 141.4     |
|             | 28 | VOGLANS                | 71.4                       | 75.8 | 81.5      | 100.1                       | 108.3 | 119.2     |
|             | 29 | YENNE                  | 70.5                       | 73.7 | 77.6      | 99.1                        | 105.2 | 112.6     |
|             | 30 | ALBERTVILLE            | 70.4                       | 73.0 | 76.1      | 96.6                        | 101.5 | 107.3     |
|             | 31 | ARECHES BEAUFORT       | 80.7                       | 83.8 | 87.6      | 112.5                       | 118.4 | 125.5     |
|             | 32 | AUSOIS                 | 53.8                       | 55.6 | 57.5      | 75.9                        | 79.2  | 82.9      |
|             | 33 | ST JEAN D'ARVE         | 53.4                       | 55.2 | 57.3      | 73.8                        | 77.2  | 81.2      |
|             | 34 | LE BOURGET EN HUILE    | 69.5                       | 73.6 | 79.0      | 94.9                        | 102.5 | 112.7     |
|             | 35 | LES BREVIERES          | 73.6                       | 76.2 | 79.2      | 103.3                       | 108.3 | 114.0     |
|             | 36 | LESCHERAINES           | 67.7                       | 70.2 | 73.3      | 93.2                        | 98.0  | 103.8     |
|             | 37 | MONT CENIS             | 73.3                       | 76.6 | 80.6      | 106.2                       | 112.4 | 119.9     |
|             | 38 | MONTPASCAL             | 59.9                       | 62.4 | 65.4      | 82.5                        | 87.2  | 92.9      |
|             | 39 | MONTSOPEY              | 72.2                       | 76.5 | 82.1      | 98.8                        | 106.8 | 117.5     |
|             | 40 | MOUTIERS               | 61.0                       | 63.1 | 65.6      | 85.1                        | 89.1  | 93.7      |
|             | 41 | PEISEY NANCROIX        | 59.4                       | 61.7 | 64.4      | 82.6                        | 87.0  | 92.2      |
|             | 42 | PRAGNOLAN              | 61.3                       | 63.4 | 65.9      | 85.5                        | 89.5  | 94.2      |
|             | 43 | ST ALBAN D'HURTIERES   | 75.8                       | 79.0 | 82.7      | 105.1                       | 110.9 | 117.9     |
|             | 44 | ST ALBAN DES VILLARDS  | 77.5                       | 80.7 | 84.5      | 108.9                       | 114.9 | 122.1     |
|             | 45 | ST JEAN DE BELLEVILLE  | 63.6                       | 65.8 | 68.4      | 88.8                        | 93.0  | 97.8      |
|             | 46 | ST MARCEL BELLEVILLE   | 54.2                       | 56.3 | 58.8      | 74.8                        | 78.8  | 83.5      |
|             | 47 | ST SORLIN D'ARVE       | 69.8                       | 72.7 | 76.2      | 97.7                        | 103.2 | 109.9     |
|             | 48 | STE FOY LE MIROIR      | 68.0                       | 70.1 | 72.5      | 94.9                        | 98.9  | 103.5     |
|             | 49 | TERMIGNON              | 55.8                       | 58.6 | 62.2      | 79.1                        | 84.4  | 91.1      |
|             | 50 | UGINE                  | 75.5                       | 78.3 | 81.6      | 103.2                       | 108.4 | 114.7     |
|             | 51 | VALLOIRE               | 55.8                       | 57.8 | 60.2      | 78.4                        | 82.1  | 86.6      |
|             | 52 | VALMEINIER LES MELEZES | 53.5                       | 56.9 | 61.5      | 74.9                        | 81.4  | 90.0      |

| Département     | Nom du pluviomètre         | Pluies décennales (mm/24h) |      |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|                 |                            | borne inf                  | P    | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 73 Savoie       | 53 VERSOYE LES GRANGES     | 83.3                       | 86.6 | 90.4      | 116.0                       | 122.2 | 129.5     |
| 74 Haute Savoie | 1 ALBY-SUR-CHERAN          | 65.5                       | 68.9 | 73.0      | 91.4                        | 97.7  | 105.5     |
|                 | 2 AYSE                     | 70.0                       | 72.3 | 75.0      | 96.5                        | 100.8 | 105.8     |
|                 | 3 BONNEVAUX                | 69.8                       | 72.3 | 75.2      | 93.4                        | 98.0  | 103.6     |
|                 | 4 CERCIER                  | 58.0                       | 60.5 | 63.5      | 80.3                        | 85.0  | 90.7      |
|                 | 5 CHATEL                   | 66.5                       | 70.2 | 75.0      | 88.6                        | 95.4  | 104.5     |
|                 | 6 COMBLOUX                 | 75.2                       | 78.3 | 82.0      | 104.7                       | 110.5 | 117.6     |
|                 | 7 (LES)CONTAMINES-MONTJOIE | 76.1                       | 78.7 | 81.7      | 106.3                       | 111.2 | 116.9     |
|                 | 8 CONTAMINE-SUR-ARVE       | 69.9                       | 72.4 | 75.2      | 97.5                        | 102.1 | 107.5     |
|                 | 9 CUSY                     | 71.8                       | 78.5 | 88.5      | 100.1                       | 112.5 | 131.5     |
|                 | 10 FAVERGES                | 63.8                       | 66.7 | 70.2      | 88.0                        | 93.3  | 100.0     |
|                 | 11 GROISY                  | 65.2                       | 68.4 | 72.4      | 90.4                        | 96.4  | 103.9     |
|                 | 12 MEYTHET                 | 61.3                       | 65.8 | 72.1      | 84.7                        | 93.1  | 104.9     |
|                 | 13 MONTMIN                 | 148.0                      | 78.6 | 175.0     | -13.0                       | 109.3 | 115.9     |
|                 | 14 MORZINE                 | 73.2                       | 75.7 | 78.7      | 99.6                        | 104.4 | 110.0     |
|                 | 15 PERS-JUSSY              | 67.2                       | 69.4 | 71.9      | 92.3                        | 96.4  | 101.1     |
|                 | 16 RUMILLY                 | 66.0                       | 68.8 | 72.2      | 92.1                        | 97.4  | 103.9     |
|                 | 17 SAINT-GERVAIS-LES-BAINS | 53.2                       | 55.7 | 58.7      | 73.5                        | 78.2  | 83.9      |
|                 | 18 SAINT-GINGOLPH          | 80.5                       | 83.0 | 85.8      | 108.5                       | 113.1 | 118.5     |
|                 | 19 SALLANCHES              | 65.3                       | 67.5 | 70.1      | 90.6                        | 94.7  | 99.5      |
|                 | 20 SAMOENS                 | 70.9                       | 73.0 | 75.4      | 95.4                        | 99.4  | 104.0     |
|                 | 21 SEYSEL                  | 66.5                       | 69.0 | 71.8      | 91.2                        | 95.8  | 101.2     |
|                 | 22 THONON-LES-BAINS        | 64.2                       | 66.5 | 69.2      | 88.6                        | 92.9  | 98.1      |
|                 | 23 USINENS                 | 72.9                       | 75.2 | 77.9      | 101.0                       | 105.4 | 110.6     |
|                 | 24 ANNECY                  | 64.7                       | 67.1 | 70.0      | 90.2                        | 94.7  | 100.0     |
|                 | 25 ANNEMASSE ROMAGNY       | 60.0                       | 62.4 | 65.1      | 83.3                        | 87.7  | 92.9      |

ent par les moments pondérés

| Département     | Nom du pluviomètre         | Pluies décennales (mm/24h) |       | Pluies centennales (mm/24h) |       |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|                 |                            | borne inf                  | P     | borne sup                   | P     |
| 74 Haute Savoie | 26 LA CLUSAZ               | 84.1                       | 86.9  | 90.3                        | 121.2 |
|                 | 27 LE BIOT                 | 75.3                       | 78.0  | 81.1                        | 107.1 |
|                 | 28 LE GRAND BORNAND        | 85.1                       | 88.8  | 93.3                        | 123.5 |
|                 | 29 LE REPOSOIR             | 82.0                       | 85.2  | 89.1                        | 118.9 |
|                 | 30 LES CONTAMINES          | 73.6                       | 76.6  | 80.1                        | 108.4 |
|                 | 31 LES GETS                | 77.8                       | 80.7  | 84.3                        | 112.2 |
|                 | 32 MEGEVE                  | 70.1                       | 73.0  | 76.4                        | 101.3 |
|                 | 33 TANNINGES               | 68.3                       | 70.0  | 72.0                        | 95.9  |
|                 | 1 (LES)ADRETS-DE-L'ESTEREL | 114.8                      | 119.8 | 125.8                       | 173.8 |
|                 | 2 AIGUINES                 | 89.5                       | 94.0  | 99.5                        | 129.4 |
| 83 Var          | 3 (LES)ARCS                | 105.5                      | 109.6 | 114.4                       | 150.6 |
|                 | 4 AUPS                     | 90.7                       | 95.2  | 100.6                       | 130.6 |
|                 | 5 BAGNOLS-EN-FORET         | 106.8                      | 112.7 | 120.0                       | 152.8 |
|                 | 6 BANDOL                   | 93.7                       | 98.0  | 103.1                       | 134.8 |
|                 | 7 BARJOLS                  | 96.1                       | 100.8 | 106.4                       | 138.6 |
|                 | 8 (LE)BEAUSSET             | 95.3                       | 100.5 | 107.0                       | 138.0 |
|                 | 9 BORMES-LES-MIMOSAS       | 119.1                      | 125.7 | 133.9                       | 170.5 |
|                 | 10 BRIGNOLES               | 109.6                      | 113.9 | 118.8                       | 156.1 |
|                 | 11 CABASSE                 | 100.2                      | 105.2 | 111.4                       | 143.1 |
|                 | 12 CALLAS                  | 120.8                      | 127.6 | 136.2                       | 172.0 |
|                 | 13 (LE)CANNET-DES-MAURES   | 100.3                      | 104.1 | 108.5                       | 143.9 |
|                 | 14 (LE)CASTELLET           | 98.5                       | 105.5 | 114.8                       | 141.2 |
|                 | 15 CAVALAIRE-SUR-MER       | 123.5                      | 129.3 | 136.4                       | 176.0 |
|                 | 16 CHATEAUVIEUX            | 86.1                       | 91.1  | 97.5                        | 120.6 |
|                 | 17 COTIGNAC                | 95.8                       | 99.9  | 104.7                       | 137.6 |
|                 | 18 CUERS                   | 116.9                      | 123.0 | 130.6                       | 165.8 |
|                 |                            |                            |       |                             | 177.3 |
|                 |                            |                            |       |                             | 185.1 |
|                 |                            |                            |       |                             | 148.2 |
|                 |                            |                            |       |                             | 167.4 |
|                 |                            |                            |       |                             | 149.2 |
|                 |                            |                            |       |                             | 177.6 |
|                 |                            |                            |       |                             | 152.3 |
|                 |                            |                            |       |                             | 147.3 |
|                 |                            |                            |       |                             | 158.0 |
|                 |                            |                            |       |                             | 159.9 |
|                 |                            |                            |       |                             | 198.2 |
|                 |                            |                            |       |                             | 173.4 |
|                 |                            |                            |       |                             | 164.2 |
|                 |                            |                            |       |                             | 200.9 |
|                 |                            |                            |       |                             | 159.1 |
|                 |                            |                            |       |                             | 171.9 |
|                 |                            |                            |       |                             | 200.4 |
|                 |                            |                            |       |                             | 142.0 |
|                 |                            |                            |       |                             | 154.5 |
|                 |                            |                            |       |                             | 191.6 |

| Département | Nom du pluviomètre             | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|--------------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |                                | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 83 Var      | 19 DRAGUIGNAN                  | 89.8                       | 95.8  | 103.7     | 127.6                       | 138.8 | 153.7     |
|             | 20 FREJUS                      | 96.9                       | 100.5 | 104.6     | 138.5                       | 145.1 | 152.9     |
|             | 21 GONFARON                    | 108.1                      | 112.2 | 117.0     | 154.4                       | 162.1 | 171.2     |
|             | 22 GRIMAUD                     | 118.1                      | 123.8 | 130.6     | 168.4                       | 179.0 | 191.9     |
|             | 23 HYERES                      | 80.2                       | 83.4  | 87.0      | 115.4                       | 121.2 | 128.1     |
|             | 24 LORGUES                     | 101.1                      | 105.2 | 109.9     | 145.0                       | 152.5 | 161.5     |
|             | 25 PLAN-D'AUPS-SAINT-BAUME     | 105.7                      | 110.5 | 116.4     | 151.1                       | 160.3 | 171.3     |
|             | 26 POURRIERES                  | 69.7                       | 76.1  | 85.0      | 102.4                       | 114.3 | 131.1     |
|             | 27 RAMATUELLE                  | 88.7                       | 92.0  | 95.9      | 127.2                       | 133.4 | 140.8     |
|             | 28 RIAN                        | 68.3                       | 72.5  | 77.6      | 99.9                        | 107.6 | 117.4     |
|             | 29 ROQUEBRUNE-SUR-ARGENS       | 107.6                      | 114.2 | 122.7     | 152.0                       | 164.2 | 180.2     |
|             | 30 (LA)ROQUEBRUSSANNE          | 119.8                      | 125.6 | 132.7     | 171.1                       | 182.0 | 195.3     |
|             | 31 SAINTE-MAXIME               | 123.9                      | 128.9 | 134.9     | 178.1                       | 187.6 | 198.8     |
|             | 32 SAINT-MAXIMIN-LA-SAINT-BAUM | 89.9                       | 93.4  | 97.5      | 127.1                       | 133.6 | 141.3     |
|             | 33 SAINT-RAPHAEL               | 115.3                      | 121.1 | 128.1     | 167.2                       | 178.0 | 191.2     |
|             | 34 TOULON                      | 87.5                       | 90.9  | 94.7      | 126.2                       | 132.4 | 139.6     |
|             | 35 TRIGANCE                    | 81.4                       | 85.2  | 89.8      | 114.7                       | 121.8 | 130.4     |
|             | 36 SAINT-MANDRIER-SUR-MER      | 97.9                       | 103.1 | 109.5     | 142.6                       | 152.4 | 164.5     |
|             | 37 AIGUINES                    | 92.7                       | 97.1  | 102.3     | 133.5                       | 141.7 | 151.6     |
|             | 38 AUPS                        | 91.9                       | 95.8  | 100.5     | 132.2                       | 139.5 | 148.4     |
|             | 39 COMPS SUR ARTUBY            | 99.3                       | 102.5 | 106.0     | 143.8                       | 149.7 | 156.4     |
|             | 40 LES ADRETS DE L'ESTEREL     | 120.8                      | 125.5 | 131.0     | 173.7                       | 182.5 | 192.9     |
|             | 41 MONS                        | 101.8                      | 107.0 | 113.4     | 146.6                       | 156.4 | 168.5     |
|             | 42 PLAN DE CANJUEURS           | 82.4                       | 86.7  | 91.9      | 117.9                       | 125.9 | 135.8     |
|             | 43 REGUSSE                     | 81.7                       | 85.3  | 89.5      | 118.4                       | 125.1 | 133.0     |
|             | 44 TOURRETTES                  | 113.4                      | 118.5 | 124.4     | 165.5                       | 175.0 | 186.2     |

| Département |    | Nom du pluviomètre       | Pluies décennales (mm/24h) |       |           | Pluies centennales (mm/24h) |       |           |
|-------------|----|--------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|-----------|
|             |    |                          | borne inf                  | P     | borne sup | borne inf                   | P     | borne sup |
| 83 Var      | 45 | VERIGNON                 | 91.9                       | 96.8  | 102.8     | 132.7                       | 141.8 | 153.0     |
|             | 46 | VINON                    | 60.4                       | 64.9  | 70.7      | 87.0                        | 95.2  | 106.3     |
| 84 Vaucluse | 1  | APT                      | 83.3                       | 88.4  | 94.7      | 123.1                       | 132.6 | 144.5     |
|             | 2  | AVIGNON                  | 97.1                       | 102.8 | 109.9     | 143.7                       | 154.4 | 167.8     |
|             | 3  | (LA)BASTIDE-DES-JOURDANS | 73.3                       | 77.7  | 83.2      | 105.6                       | 113.8 | 124.3     |
|             | 4  | BEDOIN                   | 80.2                       | 85.5  | 92.3      | 114.8                       | 124.7 | 137.7     |
|             | 5  | BRANTES                  | 95.2                       | 100.9 | 108.1     | 140.2                       | 150.9 | 164.4     |
|             | 6  | CARPENTRAS               | 91.2                       | 97.0  | 104.3     | 136.7                       | 147.6 | 161.4     |
|             | 7  | GORDES                   | 83.5                       | 89.0  | 95.8      | 122.3                       | 132.4 | 145.4     |
|             | 8  | JONQUERETTES             | 100.3                      | 108.1 | 118.4     | 148.8                       | 163.3 | 182.8     |
|             | 9  | LOURMARIN                | 92.3                       | 99.6  | 109.1     | 136.4                       | 149.8 | 167.9     |
|             | 10 | MALAUCENE                | 95.9                       | 100.9 | 106.9     | 141.0                       | 150.4 | 161.8     |
|             | 11 | ORANGE                   | 82.9                       | 87.2  | 92.3      | 121.3                       | 129.3 | 139.0     |
|             | 12 | SAINT-CHRISTOL           | 88.0                       | 92.9  | 98.8      | 127.2                       | 136.3 | 147.6     |
|             | 13 | SAINT-PIERRE-DE-VASSOLS  | 80.2                       | 84.9  | 90.8      | 117.2                       | 126.0 | 137.1     |
|             | 14 | SARRIANS                 | 105.3                      | 112.7 | 122.2     | 157.7                       | 171.6 | 189.6     |
| Italie      | 15 | SAULT                    | 85.0                       | 89.4  | 94.9      | 121.7                       | 129.9 | 140.2     |
|             | 16 | VAISON-LA-ROMAINE        | 94.8                       | 102.1 | 111.6     | 140.9                       | 154.4 | 172.4     |
|             | 17 | VALREAS                  | 86.9                       | 91.8  | 97.8      | 126.8                       | 135.9 | 147.4     |
|             | 18 | VIENS                    | 72.4                       | 76.2  | 80.8      | 103.2                       | 110.3 | 119.1     |
|             | 1  | PIETRAPORZIO (ITALIE)    | 71.1                       | 76.0  | 82.5      | 100.5                       | 109.7 | 122.0     |

| Département | Nom du pluviomètre            | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|-------------------------------|-----------------|---------------|
| 01 Ain      | 1 ANGLEFORT                   | 13.8            | 28.6          |
|             | 2 BALAN                       | 11.9            | 17.4          |
|             | 3 BELLEY                      | 12.8            | 22.4          |
|             | 4 BOURG-EN-BRESSE             | 13.4            | 20.3          |
|             | 5 CHANAY                      | 15.6            | 28.8          |
|             | 6 CHATILLON-LA-PALUD          | 13.8            | 22.1          |
|             | 7 DIVONNE-LES-BAINS           | 12.4            | 21.8          |
|             | 8 GIRON                       | 13.1            | 26.6          |
|             | 9 HAUTEVILLE-LOMPNES          | 13.7            | 26.8          |
|             | 10 LABALME                    | 14.1            | 24.6          |
|             | 11 LHUIS                      | 11.6            | 20.0          |
|             | 12 MARLIEUX                   | 12.2            | 19.4          |
|             | 13 MIJOUX                     | 15.2            | 29.0          |
|             | 14 MONTAGNIEU                 | 12.4            | 20.6          |
|             | 15 MONTLUEL                   | 13.1            | 20.9          |
|             | 16 NURIEUX-VOGNAT             | 13.1            | 25.5          |
|             | 17 NANTUA                     | 13.6            | 23.5          |
|             | 18 NEUVILLE-SUR-AIN           | 13.2            | 21.4          |
|             | 19 SAINT-JULIEN-SUR-REYSSOUZE | 10.6            | 18.4          |
|             | 20 SALAVRE                    | 11.6            | 20.9          |
|             | 21 TENAY                      | 14.5            | 28.2          |
|             | 22 VILLEREVERSURE             | 13.8            | 21.9          |
|             | 23 VIRIEU-LE-GRAND            | 11.9            | 25.6          |
|             | 24 VONNAS                     | 11.9            | 17.3          |
|             | 25 GIRON                      | 13.6            | 26.2          |
|             | 26 HAUTEVILLE LA LECHERE      | 14.4            | 27.7          |

| Département                          | Nom du pluviomètre             | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|
| 01 Ain<br>04 Alpes de Haute Provence | 27 TENAY                       | 14.1            | 27.5          |
|                                      | 1 BANON                        | 18.6            | 23.7          |
|                                      | 2 BARCELONNETTE                | 11.4            | 17.7          |
|                                      | 3 BARREME                      | 12.6            | 20.2          |
|                                      | 4 BEAUJEU                      | 12.4            | 23.1          |
|                                      | 5 (LE)CASTELLARD-MELAN         | 16.1            | 24.4          |
|                                      | 6 (LE)CASTELLET                | 14.1            | 19.3          |
|                                      | 7 CHATEAU-ARNOUX-SAINT-AUBAN   | 13.1            | 19.9          |
|                                      | 8 COLMARS                      | 15.9            | 25.4          |
|                                      | 9 DIGNE-LES-BAINS              | 13.9            | 19.2          |
|                                      | 10 ENTRAGES                    | 13.7            | 19.6          |
|                                      | 11 ENTREVAUX                   | 17.3            | 23.7          |
|                                      | 12 GREOUX-LES-BAINS            | 14.3            | 18.2          |
|                                      | 13 MANOSQUE                    | 14.5            | 19.9          |
|                                      | 14 (LES)MEES                   | 13.6            | 19.9          |
|                                      | 15 MISON                       | 15.4            | 20.6          |
|                                      | 16 MOUSTIERS-SAINTE-MARIE      | 13.8            | 17.5          |
|                                      | 17 QUINSON                     | 16.8            | 19.5          |
|                                      | 18 REILLANNE                   | 17.9            | 20.1          |
|                                      | 19 SAINT-ETIENNE-LES-ORGUES    | 18.5            | 24.6          |
|                                      | 20 SAINT-JURS                  | 13.5            | 18.3          |
|                                      | 21 SAINT-MICHEL-L'OBSERVATOIRE | 16.8            | 23.6          |
|                                      | 22 SAINT-PAUL                  | 12              | 20.1          |
|                                      | 23 UVERNET-FOURS               | 18.8            | 22.4          |
|                                      | 24 VALENSOLE                   | 16.1            | 18.9          |
|                                      | 25 VERGONS                     | 19.2            | 25.2          |



| Département                | Nom du pluviomètre          | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------|
| 04 Alpes de Haute Provence | 26 ALLEMAGNE EN PROVENCE    | 11.6            | 20.1          |
|                            | 27 CASTELLANE               | 16.7            | 23.3          |
|                            | 28 JAUZIERS LANS LE SERRET  | 11.2            | 16.1          |
|                            | 29 LA BRILLANNE             | 15.1            | 18.9          |
|                            | 30 LA MOTTE DU CAIRE        | 11.5            | 18.8          |
|                            | 31 LE LAUZET-CHAMPANASTAIS  | 12.1            | 21.3          |
|                            | 32 SISTERON                 | 20.7            | 21.9          |
|                            | 33 ST ANDRE LES ALPES       | 14.9            | 21.3          |
|                            | 34 ST PAUL SUR UBAYE        | 11.8            | 20.2          |
|                            | 35 ST PONS DE BARCELONNETTE | 11.3            | 18.1          |
|                            | 36 STE CROIX                | 16.8            | 18.6          |
|                            | 37 STE TULLE                | 15.6            | 17.1          |
|                            | 38 VALBELLE                 | 29.2            | 29.0          |
| 05 Hautes Alpes            | 1 CHATEAU-VILLE-VIEILLE     | 10.3            | 16.4          |
|                            | 2 MONTGENEVRE               | 10.5            | 16.2          |
|                            | 3 MONTJAY                   | 15              | 22.3          |
|                            | 4 PUY-SAINT-VINCENT         | 13.5            | 21.8          |
|                            | 5 ROSANS                    | 13.1            | 21.7          |
|                            | 6 SAINT-JEAN-SAINT-NICOLAS  | 14.4            | 23.4          |
|                            | 7 (LA)SAULCE                | 13.4            | 19.7          |
|                            | 8 VARS                      | 14.1            | 17.9          |
|                            | 9 VILLAR-LOUBIERE           | 16.6            | 26.9          |
|                            | 10 AGNIERES EN DEVOLUY      | 15.6            | 24.0          |
|                            | 11 ANCELLE                  | 11.6            | 21.1          |
|                            | 12 BARCILLONNETTE           | 14.9            | 24.0          |
|                            | 13 CEILLAC                  | 10.1            | 17.9          |

| Département        | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|--------------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 05 Hautes Alpes    | 14 CERVIERES               | 10.5            | 14.9          |
|                    | 15 CHAMPCELLA              | 14.8            | 19.7          |
|                    | 16 CHATEAU QUEYRAS         | 10.1            | 16.3          |
|                    | 17 FRESSINIERES VIOLLINS   | 14.2            | 24.5          |
|                    | 18 GUILLESTRE              | 10.1            | 17.2          |
|                    | 19 LA CHAPELLE VALGAUDEMAR | 18.6            | 28.2          |
|                    | 20 LARAGNE                 | 14.8            | 20.6          |
|                    | 21 LE MONETIER LES BAINS   | 13.2            | 20.4          |
|                    | 22 LES ORRES LE MELEZET    | 12.2            | 20.0          |
|                    | 23 ORCIERES                | 18.3            | 27.6          |
|                    | 24 REALLON                 | 13.8            | 25.0          |
| 06 Alpes Maritimes | 25 ROUSSET SERRE PONCON    | 10.1            | 18.2          |
|                    | 26 ST FIRMIN               | 15.2            | 23.1          |
|                    | 27 ST JULIEN EN BEAUCHENE  | 14.1            | 23.3          |
|                    | 28 ST PIERRE D'ARGENCON    | 12.8            | 21.5          |
|                    | 1 ANTIBES                  | 24.8            | 22.5          |
|                    | 2 (LE)BAR-SUR-LOUP         | 21.9            | 27.0          |
|                    | 3 BEUIL                    | 21.2            | 24.9          |
|                    | 4 (LA)BOLLENE-VESUBIE      | 21.6            | 26.3          |
|                    | 5 BOUYON                   | 30.8            | 30.4          |
|                    | 6 BREIL-SUR-ROYA           | 25.4            | 25.4          |
|                    | 7 CANNES                   | 21              | 24.0          |
|                    | 8 CARROS                   | 24.5            | 22.1          |
|                    | 9 (LA)COLLE-SUR-LOUP       | 23.1            | 26.6          |
|                    | 10 COLOMARS                | 23.1            | 23.1          |
|                    | 11 CONTES                  | 22.7            | 20.6          |

| Département        | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|--------------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 06 Alpes Maritimes | 12 ENTRAUNES               | 20.4            | 26.2          |
|                    | 13 (L')ESCARENE            | 23.6            | 18.1          |
|                    | 14 EZE                     | 22.2            | 20.3          |
|                    | 15 FONTAN                  | 25              | 28.9          |
|                    | 16 GRASSE                  | 22.2            | 26.2          |
|                    | 17 GREOLIERES              | 29.1            | 30.5          |
|                    | 18 GUILLAUMES              | 18.6            | 22.2          |
|                    | 19 ISOLA                   | 23.1            | 25.0          |
|                    | 20 LANTOSQUE               | 24.8            | 26.0          |
|                    | 21 LEVENS                  | 23.2            | 26.1          |
|                    | 22 LUCERAM                 | 27.6            | 26.3          |
|                    | 23 MENTON                  | 18.9            | 21.1          |
|                    | 24 MOULINET                | 24.4            | 27.2          |
|                    | 25 PEILLE                  | 27              | 25.7          |
|                    | 26 PEILLON                 | 26              | 22.7          |
|                    | 27 PEONE                   | 20.3            | 21.8          |
|                    | 28 PUGET-THENIERS          | 19              | 23.6          |
|                    | 29 ROQUEBRUNE-CAP-MARTIN   | 19.2            | 21.0          |
|                    | 30 (LA)ROQUETTE-SUR-VAR    | 25.5            | 22.5          |
|                    | 31 SAINT-AUBAN             | 21.2            | 28.2          |
|                    | 32 SAINT-DALMAS-LE-SELVAGE | 22.8            | 24.8          |
|                    | 33 SAINT-JEAN-CAP-FERRAT   | 16.8            | 19.2          |
|                    | 34 SAINT-MARTIN-DU-VAR     | 27.5            | 21.2          |
|                    | 35 SAINT-SAUVEUR-SUR-TINEE | 22.3            | 22.8          |
|                    | 36 SAINT-VALLIER-DE-THIEY  | 24              | 29.5          |
|                    | 37 SIGALE                  | 22              | 25.2          |

| Département         | Nom du pluviomètre       | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|---------------------|--------------------------|-----------------|---------------|
| 06 Alpes Maritimes  | 38 THEOULE-SUR-MER       | 22.7            | 23.3          |
|                     | 39 (LA)TRINITE           | 19.7            | 21.0          |
|                     | 40 (LA)TURBIE            | 23              | 21.3          |
|                     | 41 UTELLE                | 23.6            | 25.1          |
|                     | 42 VALBONNE              | 22.1            | 24.7          |
|                     | 43 VALDEBLORE            | 19.7            | 23.1          |
|                     | 44 VALLAURIS             | 21.7            | 22.0          |
|                     | 45 VENANSON              | 25.7            | 28.2          |
|                     | 46 VILLARS-SUR-VAR       | 24.5            | 21.7          |
|                     | 47 ENTRAUMES LE CLOT     | 21              | 24.8          |
|                     | 48 GUILLAUMES            | 16.3            | 22.3          |
|                     | 49 ISOLA                 | 21.8            | 24.5          |
|                     | 50 ST MARTIN VESUBIE     | 24              | 26.6          |
| 13 Bouches Du Rhône | 1 AIX-EN-PROVENCE        | 15.9            | 18.5          |
|                     | 2 AUBAGNE                | 18.2            | 24.7          |
|                     | 3 BERRE-L'ETANG          | 21.9            | 20.9          |
|                     | 4 CABRIES                | 21.3            | 19.1          |
|                     | 5 CARRY-LE-ROUET         | 19.5            | 19.5          |
|                     | 6 CASSIS                 | 18.6            | 23.8          |
|                     | 7 CHATEAURENARD          | 20.9            | 21.3          |
|                     | 8 (LA)CIOTAT             | 19              | 17.3          |
|                     | 9 CUGES-LES-PINS         | 18.9            | 21.6          |
|                     | 10 EYGUIERES             | 22.6            | 21.8          |
|                     | 11 (LA)FARE-LES-OLIVIERS | 17.8            | 17.7          |
|                     | 12 GARDANNE              | 20.5            | 22.2          |
|                     | 13 GEMENOS               | 19.7            | 22.8          |

| Département         | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|---------------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 13 Bouches Du Rhône | 14 ISTRES                  | 20.1            | 20.4          |
|                     | 15 LAMBESC                 | 16.8            | 20.0          |
|                     | 16 MARIGNANE               | 18.4            | 17.6          |
|                     | 17 MARSEILLE               | 17.8            | 17.6          |
|                     | 18 MARTIGUES               | 23              | 23.8          |
|                     | 19 MEYRARGUES              | 16.6            | 18.7          |
|                     | 20 (LES) PENNES-MIRABEAU   | 21.2            | 22.1          |
|                     | 21 PORT-DE-BOUC            | 19.6            | 22.0          |
|                     | 22 ROGNES                  | 21.3            | 20.5          |
|                     | 23 ROQUEFORT-LA-BEDOULE    | 21.4            | 28.7          |
|                     | 24 ROQUEVAIRE              | 16.3            | 18.1          |
|                     | 25 ROUSSET                 | 16.4            | 20.7          |
|                     | 26 SAINT-ANDIOL            | 22.1            | 23.6          |
|                     | 27 SAINT-CHAMAS            | 19.1            | 22.6          |
|                     | 28 SAINT-MARTIN-DE-CRAU    | 20.9            | 20.9          |
|                     | 29 SAINT-PAUL-LES-DURANCE  | 15              | 18.1          |
|                     | 30 SAINT-REMY-DE-PROVENCE  | 20.3            | 25.7          |
|                     | 31 SALON-DE-PROVENCE       | 22.1            | 23.5          |
|                     | 32 TRET'S                  | 16.9            | 21.1          |
| 25 Doubs            | 1 JOUGNE                   | 12.1            | 22.2          |
|                     | 2 LABERGEMENT-SAINTE-MARIE | 11.9            | 23.2          |
|                     | 3 GRANGES STE MARIE        | 11.7            | 22.4          |
|                     | 4 LES FOURGS               | 11.1            | 19.0          |
|                     | 5 MOUTHE                   | 12.9            | 25.9          |
| 26 Drôme            | 1 BEAUFORT-SUR-GERVANNE    | 16.5            | 22.6          |
|                     | 2 BELLEGARDE-EN-DIOIS      | 13.7            | 22.5          |

| Département | Nom du pluviomètre          | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|-----------------------------|-----------------|---------------|
| 26 Drôme    | 3 BOURDEAUX                 | 17.9            | 25.0          |
|             | 4 BOURG-LES-VALENCE         | 24.3            | 21.7          |
|             | 5 BUIS-LES-BARONNIES        | 18.1            | 21.6          |
|             | 6 CHATILLON-EN-DIOIS        | 12.9            | 20.8          |
|             | 7 CREST                     | 19.5            | 23.2          |
|             | 8 DIE                       | 12.9            | 22.7          |
|             | 9 DIEULEFIT                 | 20.4            | 25.4          |
|             | 10 GLANDAGE                 | 12.9            | 22.3          |
|             | 11 MARSANNE                 | 23.8            | 23.8          |
|             | 12 MARSAZ                   | 18.5            | 21.1          |
|             | 13 MOLLANS-SUR-OUVEZE       | 20.5            | 19.1          |
|             | 14 MONTAUBAN-SUR-L'OUVEZE   | 15.1            | 24.4          |
|             | 15 MONTJOUX                 | 18.8            | 27.6          |
|             | 16 MONTLAUR-EN-DIOIS        | 12              | 23.2          |
|             | 17 MONTRIGAUD               | 16.2            | 23.0          |
|             | 18 MONTSEGUR-SUR-LAUZON     | 19.4            | 23.0          |
|             | 19 NYONS                    | 18.1            | 20.7          |
|             | 20 PUY-SAINT-MARTIN         | 22.4            | 25.1          |
|             | 21 REMUZAT                  | 15.2            | 22.5          |
|             | 22 SAINT-BARTHELEMY-DE-VALS | 20.9            | 23.3          |
|             | 23 SAINT-JEAN-EN-ROYANS     | 16.4            | 24.2          |
|             | 24 SAINT-JULIEN-EN-QUINT    | 14.2            | 23.9          |
|             | 25 SAINT-MARCEL-LES-VALENCE | 25.9            | 22.2          |
|             | 26 SAINT-SORLIN-EN-VALLOIRE | 22.6            | 23.2          |
|             | 27 SEDERON                  | 17.8            | 24.5          |
|             | 28 VALDROME                 | 13.8            | 22.1          |

| Département | Nom du pluviomètre          | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|-----------------------------|-----------------|---------------|
| 26 Drôme    | 29 CHATUZANGE PIZANCON      | 18.5            | 22.3          |
|             | 30 LUC EN DIOS              | 14.3            | 20.2          |
|             | 31 STE EULALIE-PT EN ROYANS | 14.2            | 23.3          |
| 38 Isere    | 1 AUTRANS                   | 15.8            | 28.0          |
|             | 2 BEAUREPAIRE               | 17              | 20.6          |
|             | 3 BOURGOIN-JALLIEU          | 15.1            | 22.1          |
|             | 4 CHANTELOUVE               | 15.9            | 26.3          |
|             | 5 CHAPAREILLAN              | 12.2            | 22.4          |
|             | 6 CHATEAU-BERNARD           | 14.2            | 25.8          |
|             | 7 CHATELUS                  | 13.3            | 24.8          |
|             | 8 CHICHILIANNE              | 14.9            | 24.6          |
|             | 9 CHIRENS                   | 13.3            | 26.0          |
|             | 10 CLELLES                  | 13.1            | 20.7          |
|             | 11 CORENC                   | 13.5            | 21.5          |
|             | 12 CORPS                    | 17.9            | 25.7          |
|             | 13 (LA)COTE-SAINT-ANDRE     | 14.3            | 21.5          |
|             | 14 FAVERGES-DE-LA-TOUR      | 14.4            | 23.2          |
|             | 15 (LA)FERRIERE             | 12.1            | 27.6          |
|             | 16 FONTANIL-CORNILLON       | 14.8            | 25.0          |
|             | 17 (LA)GARDE                | 12.1            | 22.2          |
|             | 18 GRESSE-EN-VERCORS        | 13.8            | 25.3          |
|             | 19 LALLEY                   | 14.4            | 25.1          |
|             | 20 LAVALDENS                | 13.3            | 26.3          |
|             | 21 LEYRIEU                  | 14.2            | 20.1          |
|             | 22 MENS                     | 10.9            | 18.2          |
|             | 23 MOIRANS                  | 15.2            | 25.6          |



| Département | Nom du pluviomètre            | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|-------------------------------|-----------------|---------------|
| 38 Isère    | 24 (LA)MOTTE-D'AVEILLANS      | 11.9            | 20.6          |
|             | 25 (LE)PIN                    | 14.8            | 27.6          |
|             | 26 POMMIER-DE-BEAUREPAIRE     | 17.1            | 21.7          |
|             | 27 (LE)PONT-DE-BEAUVOISIN     | 15.7            | 23.6          |
|             | 28 PROVEYSIEUX                | 15.6            | 28.4          |
|             | 29 ROISSARD                   | 10.9            | 19.1          |
|             | 30 ROYBON                     | 17.3            | 25.3          |
|             | 31 SAINT-GERVAIS              | 14.1            | 26.4          |
|             | 32 SAINT-LAURENT-DU-PONT      | 16.2            | 30.7          |
|             | 33 SAINT-MARCELLIN            | 14.6            | 22.7          |
|             | 34 SAINT-PIERRE-DE-CHARTREUSE | 17.4            | 36.2          |
|             | 35 SAINT-PIERRE-D'ENTREMONT   | 16.3            | 31.9          |
|             | 36 (LA)SALETTE-FALLAVAL       | 14.4            | 21.9          |
|             | 37 TENCIN                     | 11.9            | 22.4          |
|             | 38 (LA)TERRASSE               | 12.1            | 22.8          |
|             | 39 THEYS                      | 12.4            | 25.5          |
|             | 40 (LA)TOUR-DU-PIN            | 15              | 23.1          |
|             | 41 TREMINIS                   | 15.4            | 19.6          |
|             | 42 TULLINS                    | 13.1            | 23.1          |
|             | 43 VALJOUFFREY                | 14.9            | 25.5          |
|             | 44 VAUJANY                    | 16.4            | 24.9          |
|             | 45 (LE)VERSOUD                | 14.5            | 22.4          |
|             | 46 ALLEMOND LE RIVIER         | 16.9            | 31.3          |
|             | 47 BESSE                      | 13.2            | 19.3          |
|             | 48 BOURG D'OISANS             | 13.5            | 21.4          |
|             | 49 BOURNE                     | 13.6            | 27.1          |

| Département | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 38 Isere    | 50 ENGINS                  | 14.9            | 27.2          |
|             | 51 ENTRAIGUES              | 15.4            | 23.5          |
|             | 52 GRANDE CHARTREUSE       | 17.5            | 36.2          |
|             | 53 LE VERNEY               | 16.2            | 25.2          |
|             | 54 MONESTIER DE CLERMONT   | 12.5            | 22.1          |
|             | 55 MONT DE LANS LE CHAMBON | 10              | 16.4          |
|             | 56 MONTAUD VIF DE LA CLE   | 17.3            | 31.0          |
|             | 57 ORNON LA PALUD          | 16              | 27.8          |
|             | 58 REVEL                   | 12.9            | 23.6          |
|             | 59 ST CHRISTOPHE EN OISANS | 12.2            | 22.0          |
|             | 60 ST HILLAIRE DU TOUVET   | 14              | 28.1          |
| 39 Jura     | 61 ST JEAN DE BOURNAY      | 15.6            | 22.0          |
|             | 1 ARINTHOD                 | 13.4            | 23.9          |
|             | 2 BEAUFORT                 | 11.9            | 21.2          |
|             | 3 BELLEFONTAINE            | 14.8            | 31.2          |
|             | 4 BESAIN                   | 12.2            | 25.8          |
|             | 5 CERNIEBAUD               | 13.4            | 28.1          |
|             | 6 CHARCIER                 | 12.7            | 23.6          |
|             | 7 CHASSAL                  | 13.9            | 27.5          |
|             | 8 CHATEL-DE-JOUX           | 14.4            | 29.6          |
|             | 9 CLAIRVAUX-LES-LACS       | 12.7            | 25.5          |
|             | 10 CRANCOT                 | 13.2            | 24.1          |
|             | 11 DOMBLANS                | 13.3            | 21.4          |
|             | 12 (LE)FRASNOIS            | 13.5            | 26.7          |
|             | 13 LEZAT                   | 15.2            | 30.4          |
|             | 14 LONS-LE-SAUNIER         | 15.7            | 23.7          |

| Département       | Nom du pluviomètre            | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------------|-------------------------------|-----------------|---------------|
| 39 Jura           | 15 MARIIGNY                   | 13              | 26.0          |
|                   | 16 MONTAIGU                   | 13              | 22.1          |
|                   | 17 MONTMOROT                  | 13.2            | 20.9          |
|                   | 18 MORBIER                    | 13.4            | 30.2          |
|                   | 19 PIMORIN                    | 11.9            | 23.9          |
|                   | 20 POLIGNY                    | 13.6            | 22.5          |
|                   | 21 SAINT-AMOUR                | 12.5            | 22.0          |
|                   | 22 SAINT-CLAUDE               | 12.4            | 26.1          |
|                   | 23 SAINT-JULIEN               | 12.8            | 23.5          |
|                   | 24 SAINT-LAURENT-EN-GRANDVAUX | 13.8            | 27.2          |
| 69 Rhône          | 25 THOIRETTE                  | 13.6            | 25.3          |
|                   | 26 BOURG DE SIROD             | 12.4            | 27.4          |
|                   | 27 LAMOURA                    | 16.1            | 31.7          |
|                   | 28 MORBIER                    | 13              | 29.9          |
|                   | 29 PORTE-SACHET               | 13.5            | 26.5          |
|                   | 1 VILLEURBANNE                | 12.5            | 19.2          |
|                   | 2 LYON BRON                   | 13.1            | 18.6          |
| 71 Saone et Loire | 3 ST GENIS LAVAL              | 12.9            | 17.6          |
|                   | 1 BEAUREPAIRE-EN-BRESSE       | 12.9            | 19.5          |
|                   | 2 BELLEVESVRE                 | 11.5            | 17.8          |
|                   | 3 LESSARD-EN-BRESSE           | 10.7            | 16.0          |
|                   | 4 LOUHANS                     | 12.1            | 14.6          |
|                   | 5 ROMENAY                     | 11.7            | 19.7          |
|                   | 6 VARENNES-SAINT-SAUVEUR      | 9.6             | 18.6          |
|                   | 7 CHALON                      | 10.1            | 15.7          |
|                   | 8 MACON                       | 9.9             | 17.9          |

| Département | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 73 Savoie   | 1 AIGUEBELETTE-LE-LAC      | 11.6            | 28.4          |
|             | 2 AIX-LES-BAINS            | 11.5            | 25.6          |
|             | 3 ARGENTINE                | 12.8            | 21.0          |
|             | 4 BEAUFORT                 | 14.5            | 24.7          |
|             | 5 BESSANS                  | 11.9            | 16.3          |
|             | 6 BONNEVAL-SUR-ARC         | 16.4            | 17.8          |
|             | 7 BOZEL                    | 10              | 17.2          |
|             | 8 BRIDES-LES-BAINS         | 9.6             | 16.9          |
|             | 9 CHAMPAGNY-EN-VANNOISE    | 10.8            | 16.7          |
|             | 10 CHAVANNE(LA)            | 12.7            | 20.7          |
|             | 11 DESERTS(LES)            | 14.9            | 28.4          |
|             | 12 LANSLEBOURG-MONT-CENIS  | 15.2            | 15.1          |
|             | 13 MONTGELLAFREY           | 11.4            | 20.0          |
|             | 14 MOTTE-SERVOLEX(LA)      | 13.4            | 26.9          |
|             | 15 LECHERE(LA)             | 13              | 23.0          |
|             | 16 NOVALAISE               | 13.4            | 26.7          |
|             | 17 ROCHETTE(LA)            | 10.9            | 21.4          |
|             | 18 STE-FOY-TARENTAISE      | 12              | 20.8          |
|             | 19 ST-JEAN-D ARVES         | 9.6             | 17.8          |
|             | 20 STE-MARIE-DE-CUINES     | 13.5            | 19.7          |
|             | 21 ST-MARTIN-D ARC         | 10.8            | 16.8          |
|             | 22 ST-MARTIN-DE-BELLEVILLE | 9.5             | 17.1          |
|             | 23 ST-MARTIN-DE-LA-PORTE   | 9.9             | 16.0          |
|             | 24 ST-MICHEL-DE-MAURIENNE  | 11              | 18.5          |
|             | 25 ST-OFFENGE-DESSOUS      | 11.7            | 26.8          |
|             | 26 TIGNES                  | 13.5            | 21.3          |

| Département | Nom du pluviomètre        | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|---------------------------|-----------------|---------------|
| 73 Savoie   | 27 VERRENS-ARVEY          | 16.5            | 28.2          |
|             | 28 VOGLANS                | 13.9            | 25.4          |
|             | 29 YENNE                  | 13.4            | 25.1          |
|             | 30 ALBERTVILLE            | 12.1            | 24.1          |
|             | 31 ARECHES BEAUFORT       | 14.7            | 24.4          |
|             | 32 AUSSOIS                | 10.1            | 14.9          |
|             | 33 ST JEAN D'ARVE         | 9.4             | 17.4          |
|             | 34 LE BOURGET EN HUILE    | 12.3            | 24.0          |
|             | 35 LES BREVIERES          | 13.6            | 21.0          |
|             | 36 LESCHERAINES           | 11.8            | 22.5          |
|             | 37 MONT CENIS             | 15.2            | 15.0          |
|             | 38 MONTPASCAL             | 10.5            | 19.8          |
|             | 39 MONTSOPEY              | 12.9            | 24.3          |
|             | 40 MOUTIERS               | 11.1            | 18.4          |
|             | 41 PEISEY NANCROIX        | 10.8            | 18.2          |
|             | 42 PRAGNOLAN              | 11.1            | 18.6          |
|             | 43 ST ALBAN D'HURTIERES   | 13.6            | 24.1          |
|             | 44 ST ALBAN DES VILLARDS  | 14.6            | 21.9          |
|             | 45 ST JEAN DE BELLEVILLE  | 11.6            | 19.1          |
|             | 46 ST MARCEL BELLEVILLE   | 9.6             | 17.5          |
|             | 47 ST SORLIN D'ARVE       | 13              | 20.2          |
|             | 48 STE FOY LE MIROIR      | 12.3            | 20.5          |
|             | 49 TERMIGNON              | 11              | 14.2          |
|             | 50 UGINE                  | 12.8            | 26.4          |
|             | 51 VALLOIRE               | 10.4            | 16.0          |
|             | 52 VALMEINIER LES MELEZES | 10.4            | 15.0          |

| Département     | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-----------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 73 Savoie       | 53 VERSOYE LES GRANGES     | 15.2            | 25.3          |
| 74 Haute Savoie | 1 ALBY-SUR-CHERAN          | 12.3            | 24.4          |
|                 | 2 AYSE                     | 12.1            | 23.4          |
|                 | 3 BONNEVAUX                | 11              | 28.0          |
|                 | 4 CERCIER                  | 10.4            | 22.6          |
|                 | 5 CHATEL                   | 10.7            | 26.8          |
|                 | 6 COMBLOUX                 | 13.7            | 22.9          |
|                 | 7 (LES)CONTAMINES-MONTJOIE | 13.8            | 22.8          |
|                 | 8 CONTAMINE-SUR-ARVE       | 12.6            | 21.4          |
|                 | 9 CUSY                     | 14.5            | 25.8          |
|                 | 10 FAVERGES                | 11.4            | 20.8          |
|                 | 11 GROISY                  | 11.9            | 25.2          |
|                 | 12 MEYTHET                 | 11.6            | 23.7          |
|                 | 13 MONTMIN                 | 13.1            | 25.8          |
|                 | 14 MORZINE                 | 12.2            | 26.5          |
|                 | 15 PERS-JUSSY              | 11.5            | 23.0          |
|                 | 16 RUMILLY                 | 12.2            | 24.6          |
|                 | 17 SAINT-GERVAIS-LES-BAINS | 9.6             | 16.9          |
|                 | 18 SAINT-GINGOLPH          | 12.8            | 31.1          |
|                 | 19 SALLANCHES              | 11.6            | 20.9          |
|                 | 20 SAMOENS                 | 11.2            | 27.6          |
|                 | 21 SEYSSEL                 | 11.4            | 21.1          |
|                 | 22 THONON-LES-BAINS        | 11.3            | 21.0          |
|                 | 23 USINENS                 | 12.9            | 21.3          |
|                 | 24 ANNECY                  | 11.7            | 24.5          |
|                 | 25 ANNEMASSE ROMAGNY       | 10.8            | 18.8          |

ent par les moments pondérés

| Département     | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-----------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 74 Haute Savoie | 26 LA CLUSAZ               | 14.6            | 28.1          |
|                 | 27 LE BIOT                 | 12.4            | 28.0          |
|                 | 28 LE GRAND BORNAND        | 14.8            | 29.1          |
|                 | 29 LE REPOSOIR             | 14.3            | 27.3          |
|                 | 30 LES CONTAMINES          | 13.5            | 21.9          |
|                 | 31 LES GETS                | 13.4            | 26.6          |
|                 | 32 MEGEVE                  | 12.1            | 24.2          |
| 83 Var          | 33 TANINGES                | 11              | 25.6          |
|                 | 1 (LES)ADRETS-DE-L'ESTEREL | 23              | 27.0          |
|                 | 2 AIGUINES                 | 18.6            | 22.0          |
|                 | 3 (LES)ARCS                | 20.7            | 25.7          |
|                 | 4 AUPS                     | 18.6            | 23.4          |
|                 | 5 BAGNOLS-EN-FORET         | 21.7            | 24.9          |
|                 | 6 BANDOL                   | 19              | 21.0          |
|                 | 7 BARJOLS                  | 19.8            | 20.8          |
|                 | 8 (LE)BEAUSSET             | 20.1            | 19.3          |
|                 | 9 BORMES-LES-MIMOSAS       | 24.3            | 27.5          |
|                 | 10 BRIGNOLES               | 21.4            | 27.5          |
|                 | 11 CABASSE                 | 20.1            | 23.9          |
|                 | 12 CALLAS                  | 24.3            | 29.5          |
|                 | 13 (LE)CANNET-DES-MAURES   | 19.9            | 23.6          |
|                 | 14 (LE)CASTELLET           | 20.8            | 21.7          |
|                 | 15 CAVALAIRE-SUR-MER       | 24.5            | 30.2          |
|                 | 16 CHATEAUVIEUX            | 16.5            | 27.3          |
|                 | 17 COTIGNAC                | 19.4            | 21.7          |
|                 | 18 CUERS                   | 23.1            | 29.8          |



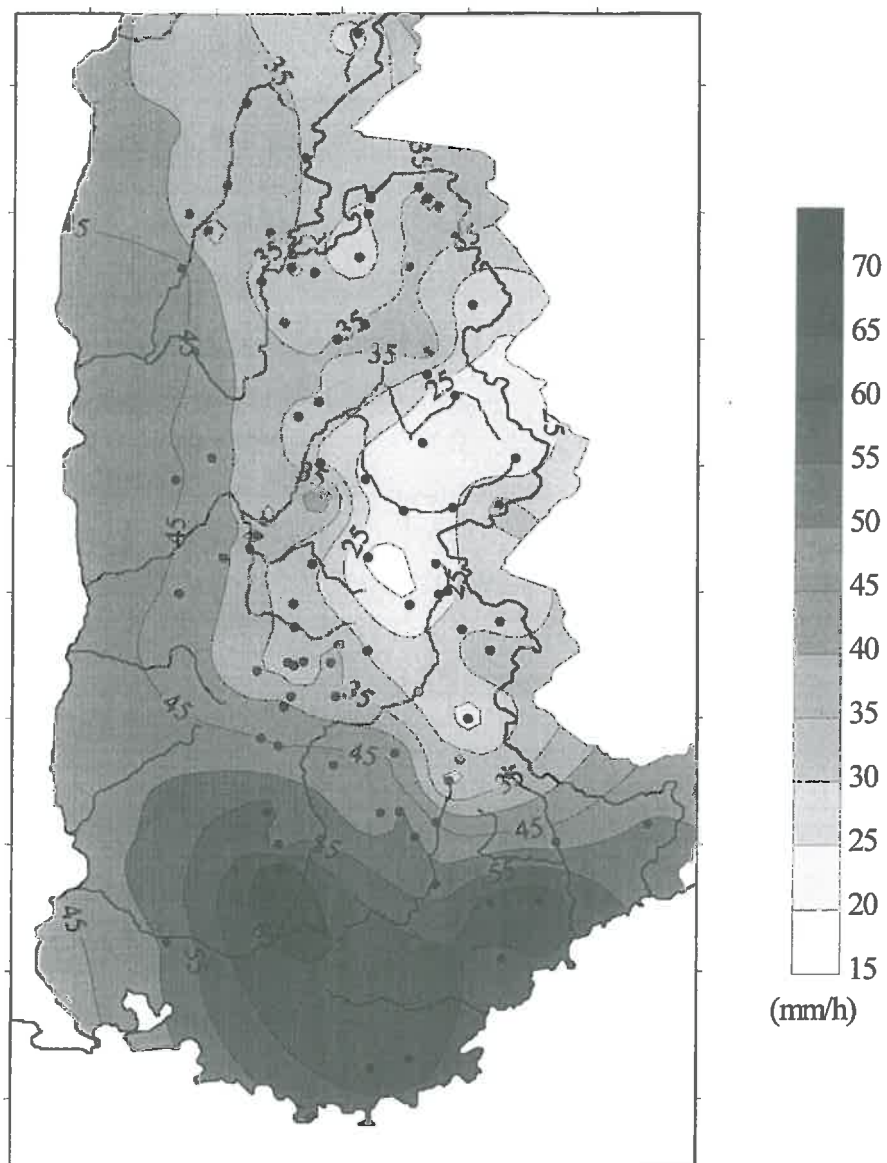
| Département | Nom du pluviomètre              | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|---------------------------------|-----------------|---------------|
| 83 Var      | 19 DRAGUIGNAN                   | 18.3            | 21.9          |
|             | 20 FREJUS                       | 19              | 23.6          |
|             | 21 GONFARON                     | 21.2            | 26.5          |
|             | 22 GRIMAUD                      | 23.5            | 28.9          |
|             | 23 HYERES                       | 16.1            | 18.2          |
|             | 24 LORGUES                      | 20.2            | 23.7          |
|             | 25 PLAN-D'AUPS-SAINTE-BAUME     | 21.2            | 25.0          |
|             | 26 POURRIERES                   | 16.3            | 21.7          |
|             | 27 RAMATUELLE                   | 17.6            | 20.8          |
|             | 28 RIAN                         | 14.9            | 22.5          |
|             | 29 ROQUEBRUNE-SUR-ARGENS        | 21.3            | 28.2          |
|             | 30 (LA)ROQUEBRUSSANNE           | 24              | 28.7          |
|             | 31 SAINTE-MAXIME                | 25              | 28.1          |
|             | 32 SAINT-MAXIMIN-LA-SAINTE-BAUM | 17.1            | 24.3          |
|             | 33 SAINT-RAPHAEL                | 24.2            | 23.3          |
|             | 34 TOULON                       | 17.7            | 19.5          |
|             | 35 TRIGANCE                     | 15.6            | 25.1          |
|             | 36 SAINT-MANDRIER-SUR-MER       | 21              | 18.4          |
|             | 37 AIGUINES                     | 19              | 20.3          |
|             | 38 AUPS                         | 18.6            | 24.0          |
|             | 39 COMPS SUR ARTUBY             | 20.1            | 24.9          |
|             | 40 LES ADRETS DE L'ESTEREL      | 24.2            | 27.6          |
|             | 41 MONS                         | 21              | 25.9          |
|             | 42 PLAN DE CANJUERS             | 16.7            | 22.3          |
|             | 43 REGUSSE                      | 16.9            | 20.0          |
|             | 44 TOURRETTES                   | 24              | 25.6          |

| Département | Nom du pluviomètre         | Gradex (mm/24h) | Mode (mm/24h) |
|-------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| 83 Var      | 45 VERIGNON                | 19.1            | 22.9          |
|             | 46 VINON                   | 12.9            | 17.9          |
| 84 Vaucluse | 1 APT                      | 18.8            | 20.0          |
|             | 2 AVIGNON                  | 21.9            | 23.1          |
|             | 3 (LA)BASTIDE-DES-JOURDANS | 15.4            | 21.8          |
|             | 4 BEDOIN                   | 16.7            | 24.8          |
|             | 5 BRANTES                  | 21.3            | 23.5          |
|             | 6 CARPENTRAS               | 21.5            | 18.7          |
|             | 7 GORDES                   | 18.5            | 21.8          |
|             | 8 JONQUERETTES             | 23.5            | 22.6          |
|             | 9 LOURMARIN                | 21.4            | 21.8          |
|             | 10 MALAUCENE               | 21              | 24.3          |
|             | 11 ORANGE                  | 17.9            | 22.0          |
|             | 12 SAINT-CHRISTOL          | 18.5            | 25.6          |
|             | 13 SAINT-PIERRE-DE-VASSOLS | 17.5            | 21.3          |
|             | 14 SARRIANS                | 25              | 21.7          |
|             | 15 SAULT                   | 17.2            | 26.8          |
|             | 16 VAISON-LA-ROMAINE       | 22.3            | 21.1          |
|             | 17 VALREAS                 | 18.8            | 23.4          |
|             | 18 VIENS                   | 14.5            | 23.4          |
| Italie      | 1 PIETRAPORZIO (ITALIE)    | 14.3            | 20.8          |

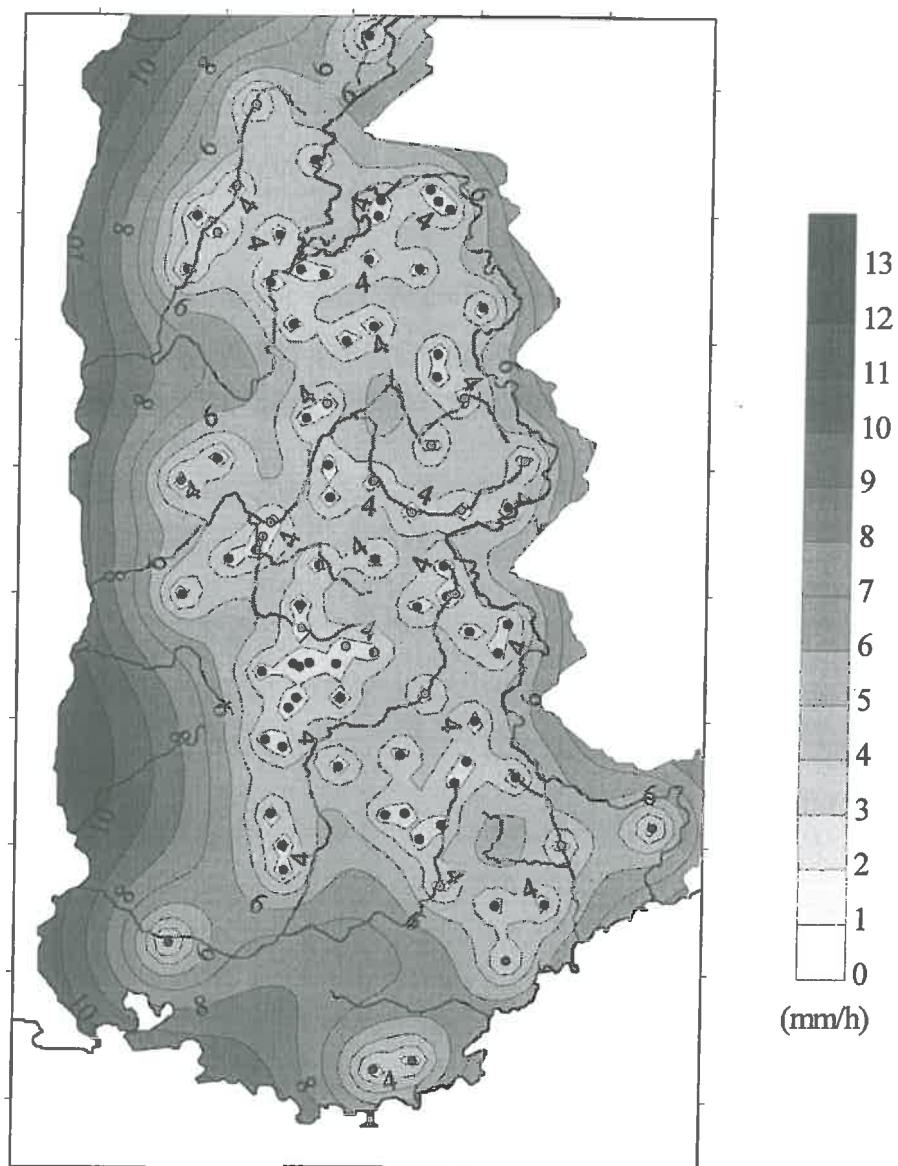
## **Annexe 5 :**

Cartes des champs de pluies centennales  
et des gradex obtenues par krigeage

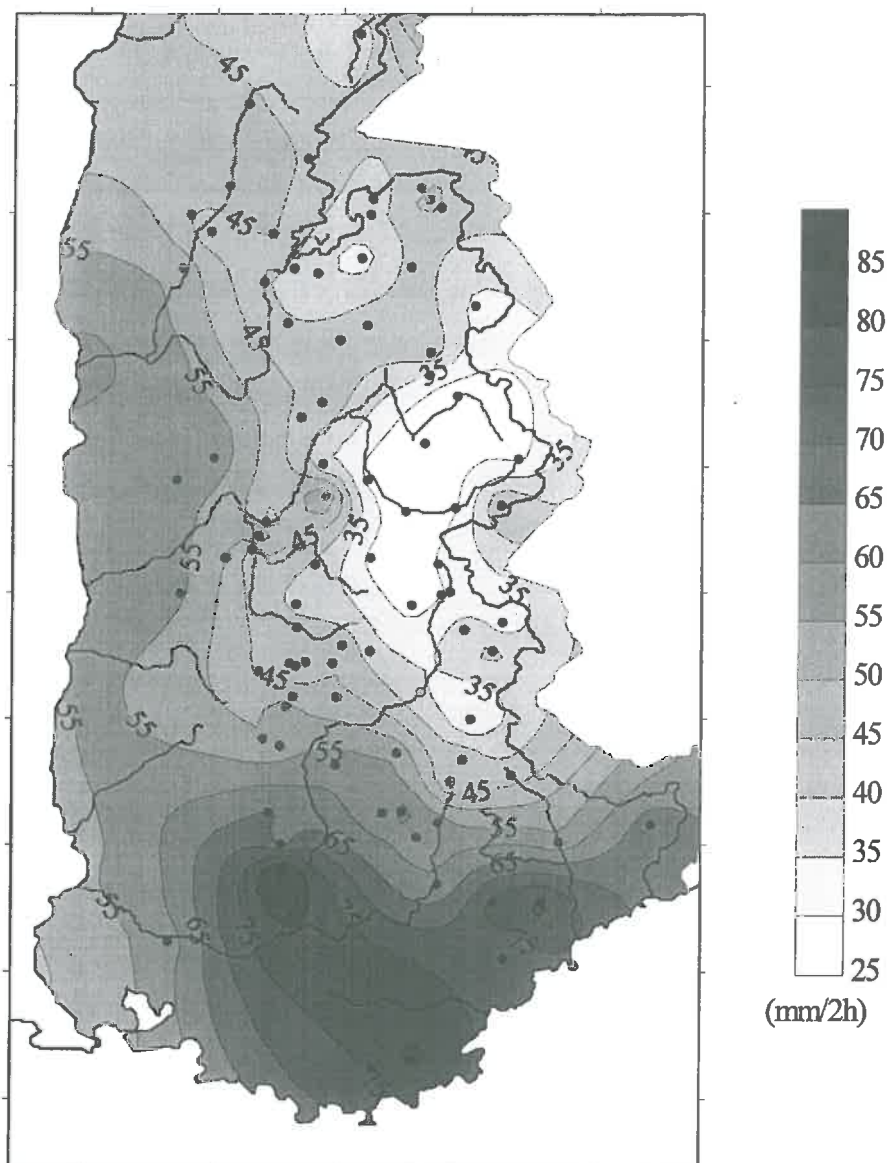
Carte des pluies de 1h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



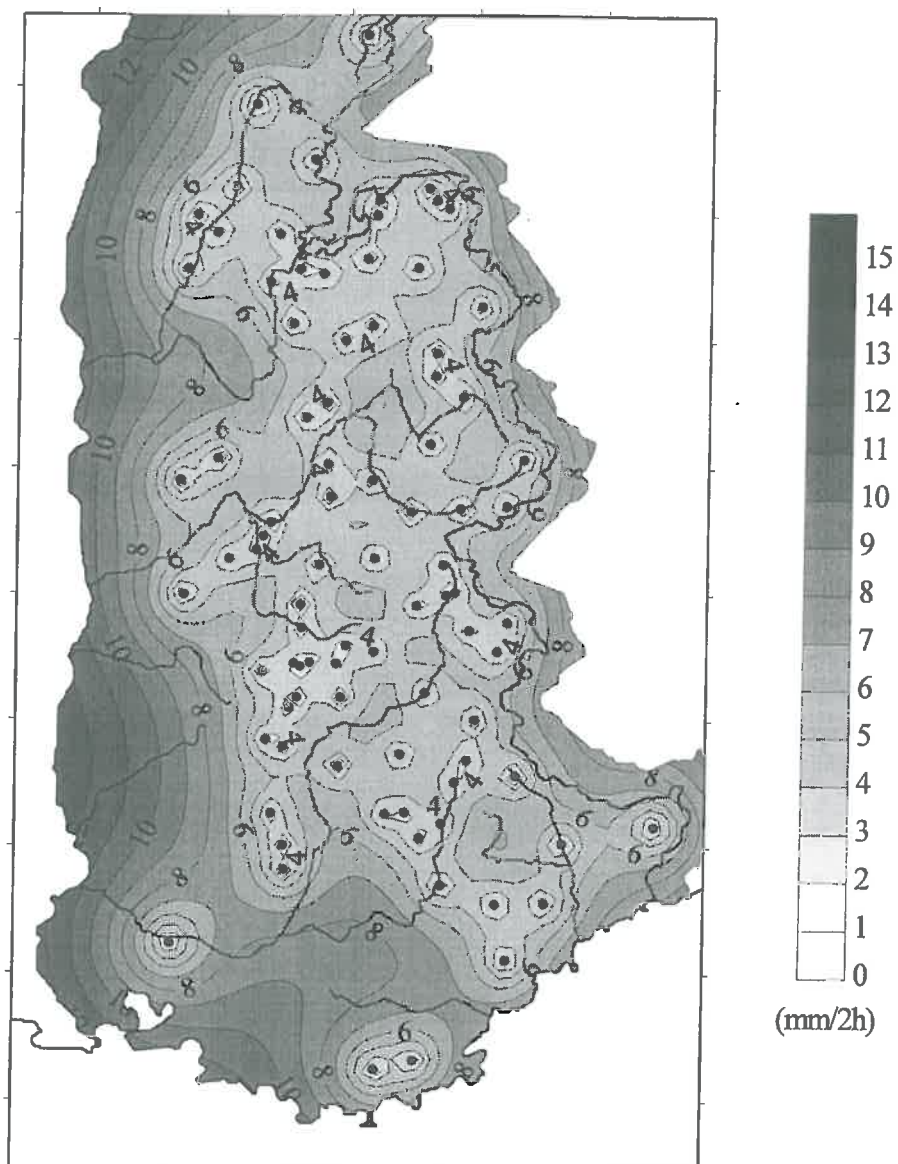
Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les pluies de 1h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



Carte des pluies de 2h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

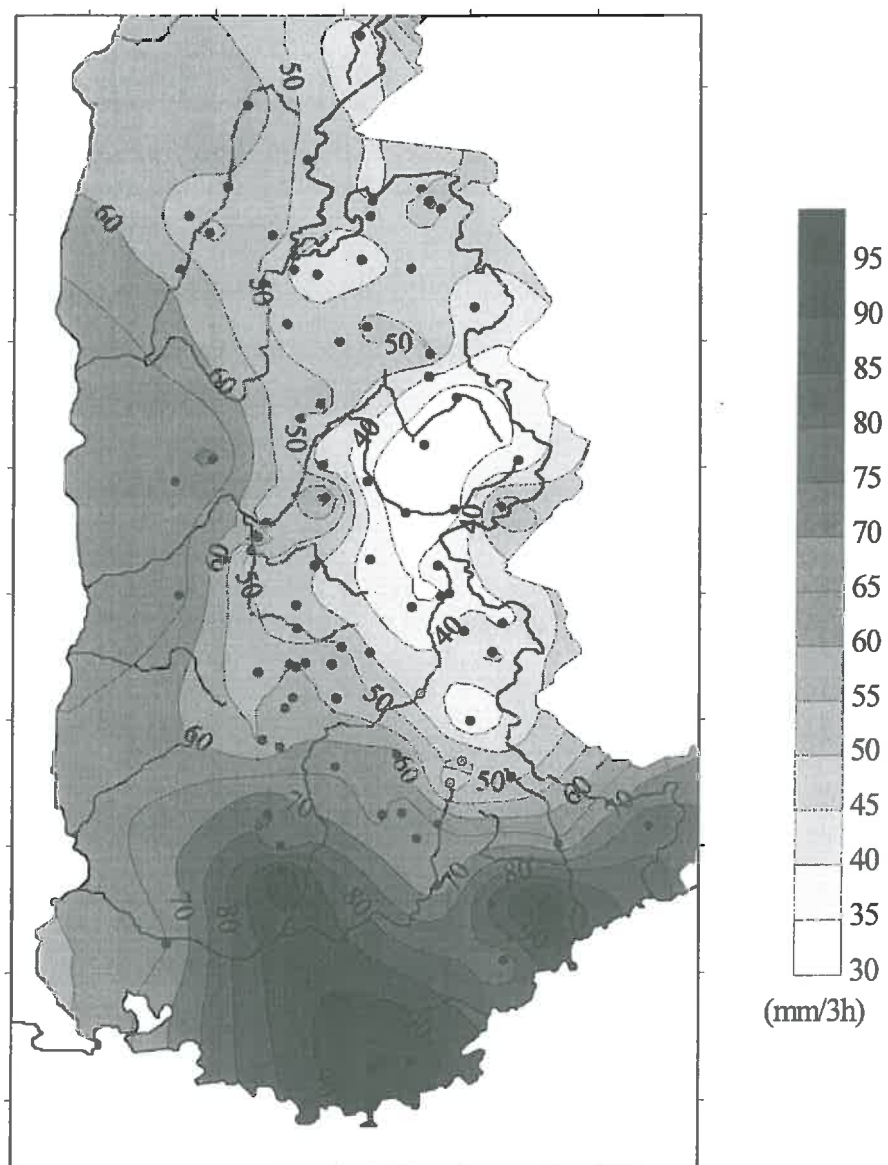


Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les pluies de 2h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

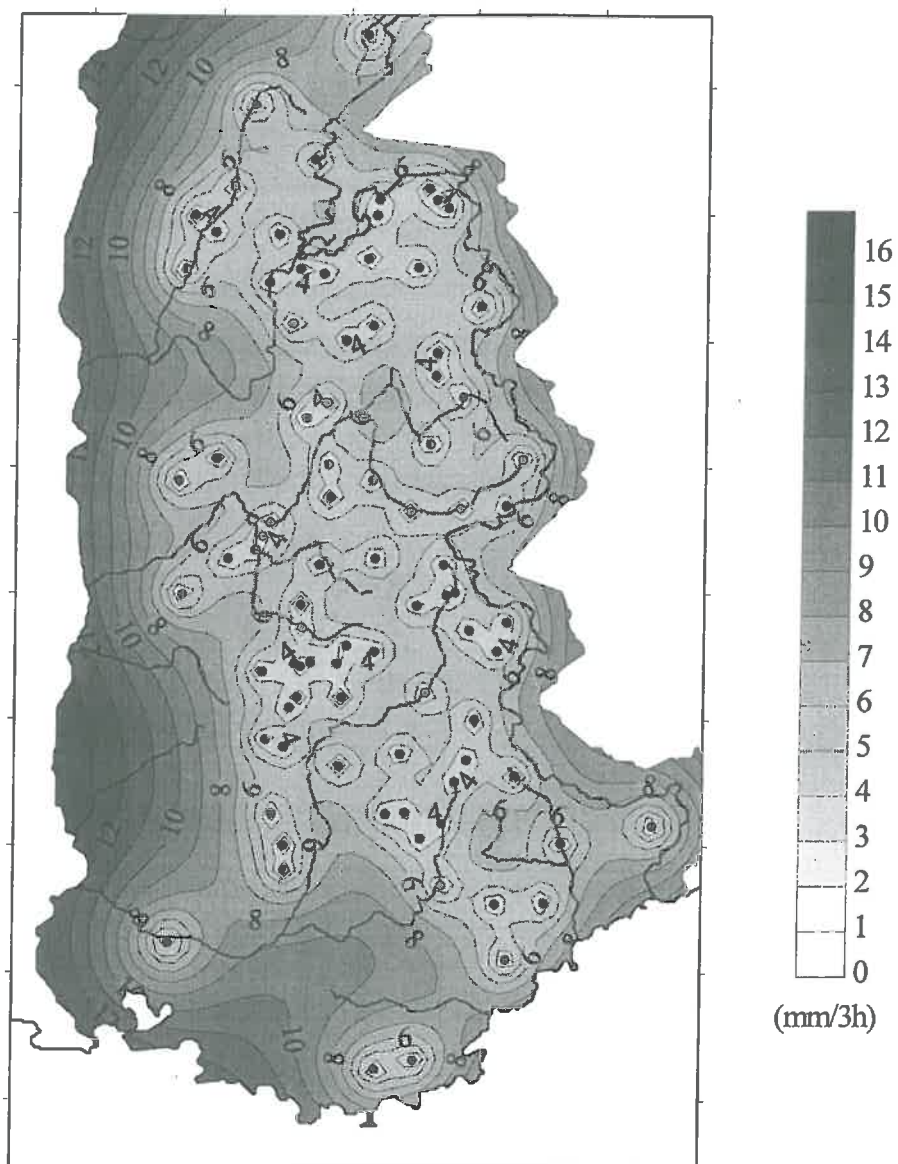




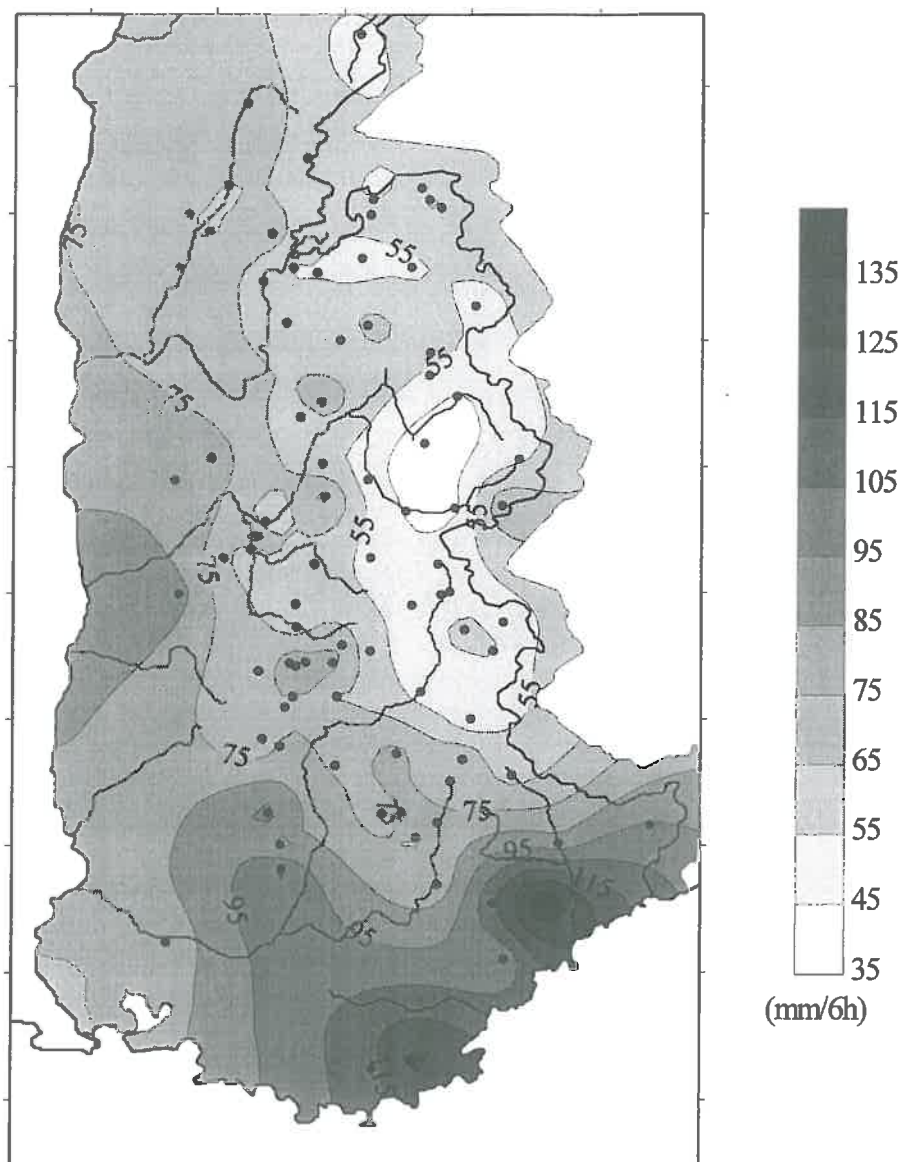
Carte des pluies de 3h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



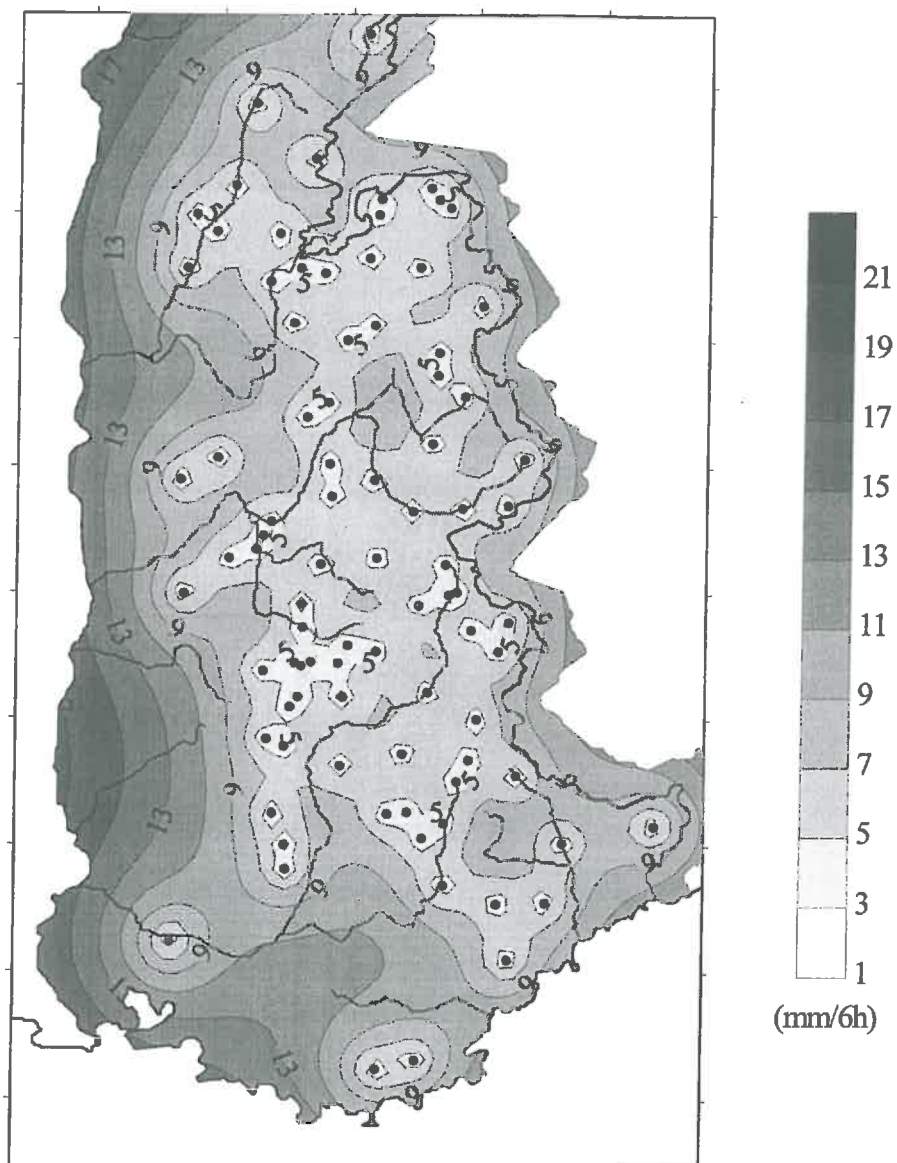
Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les pluies de 3h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



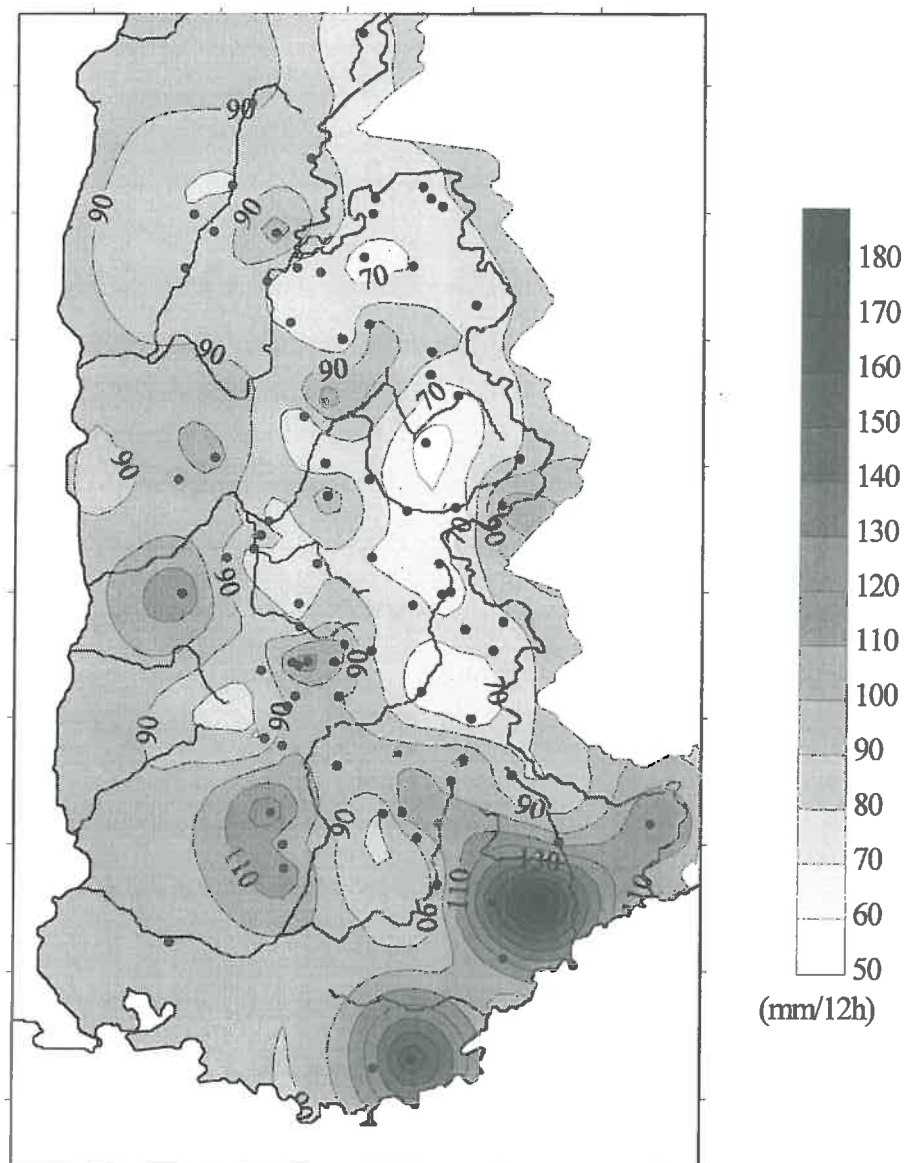
Carte des pluies de 6h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les pluies de 6h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

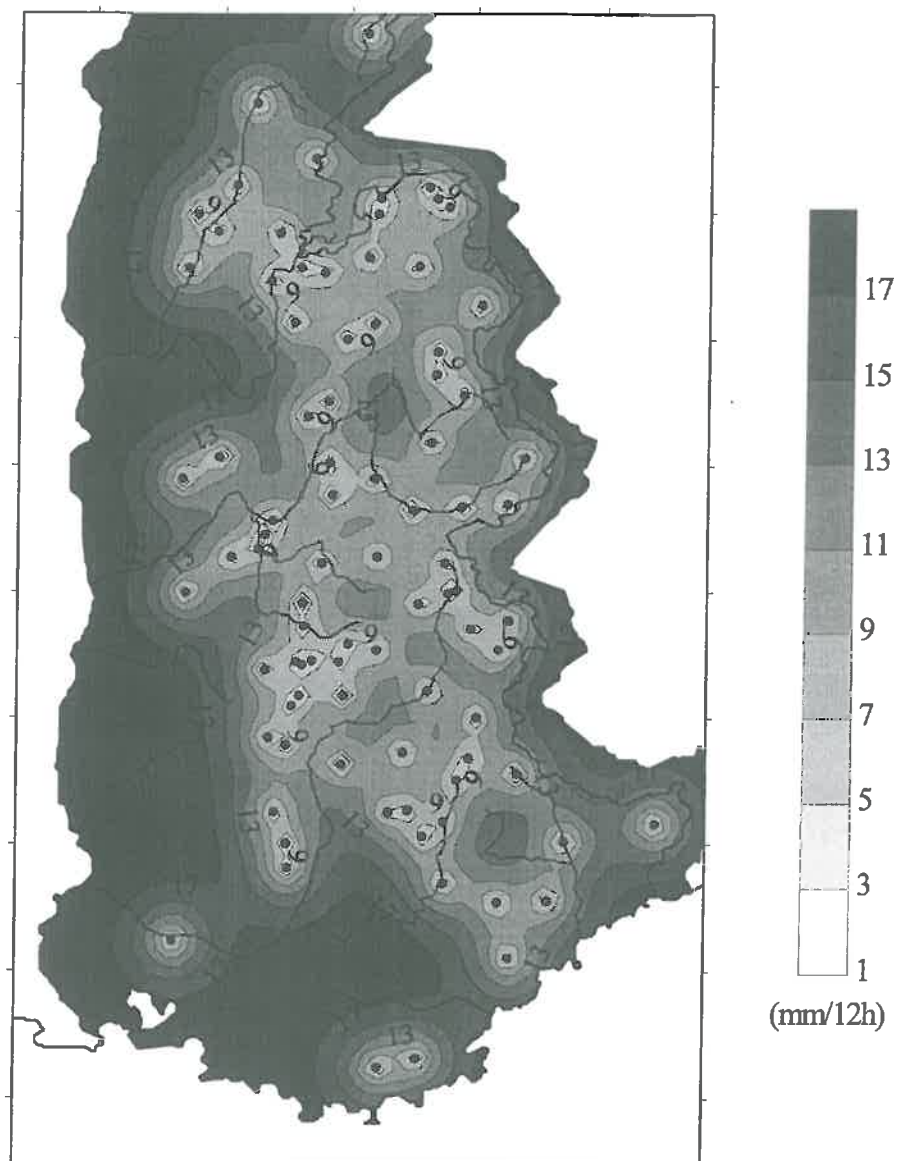


Carte des pluies de 12h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

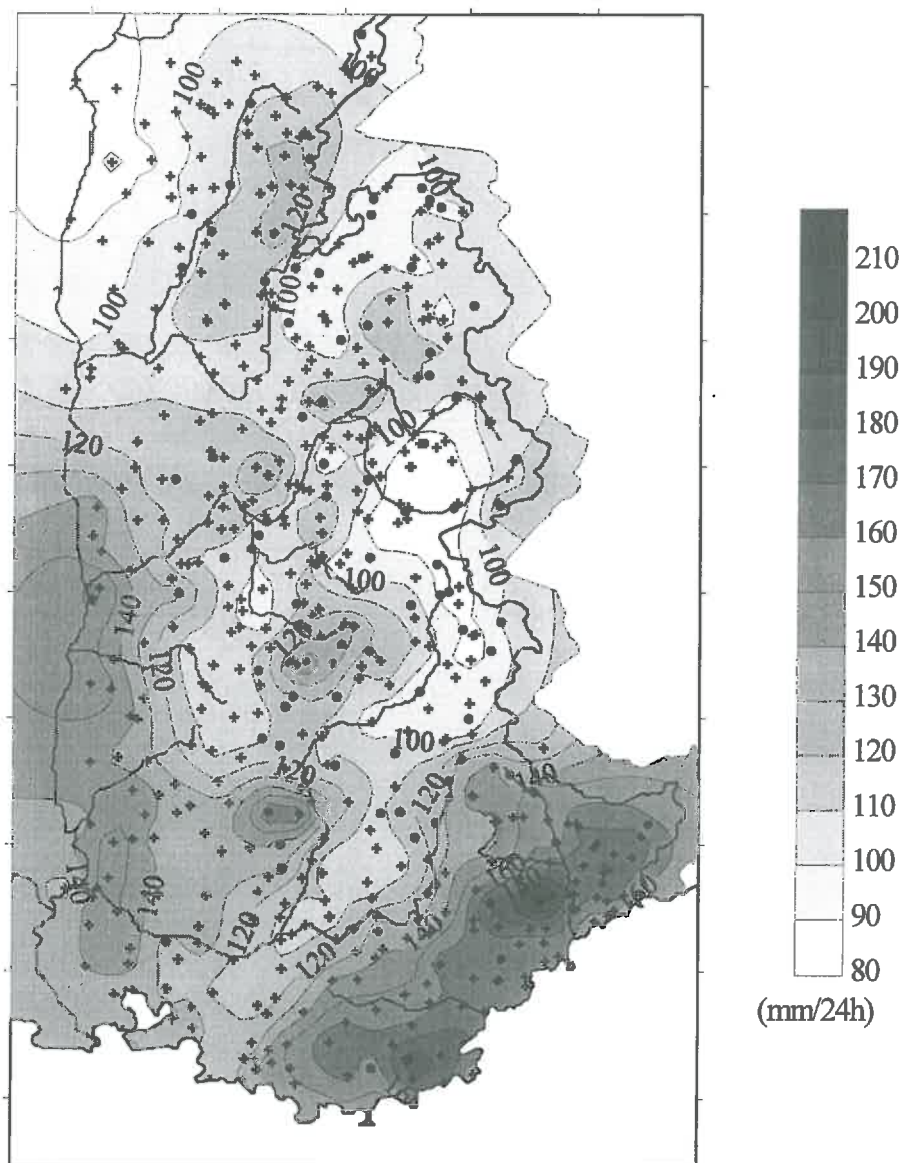




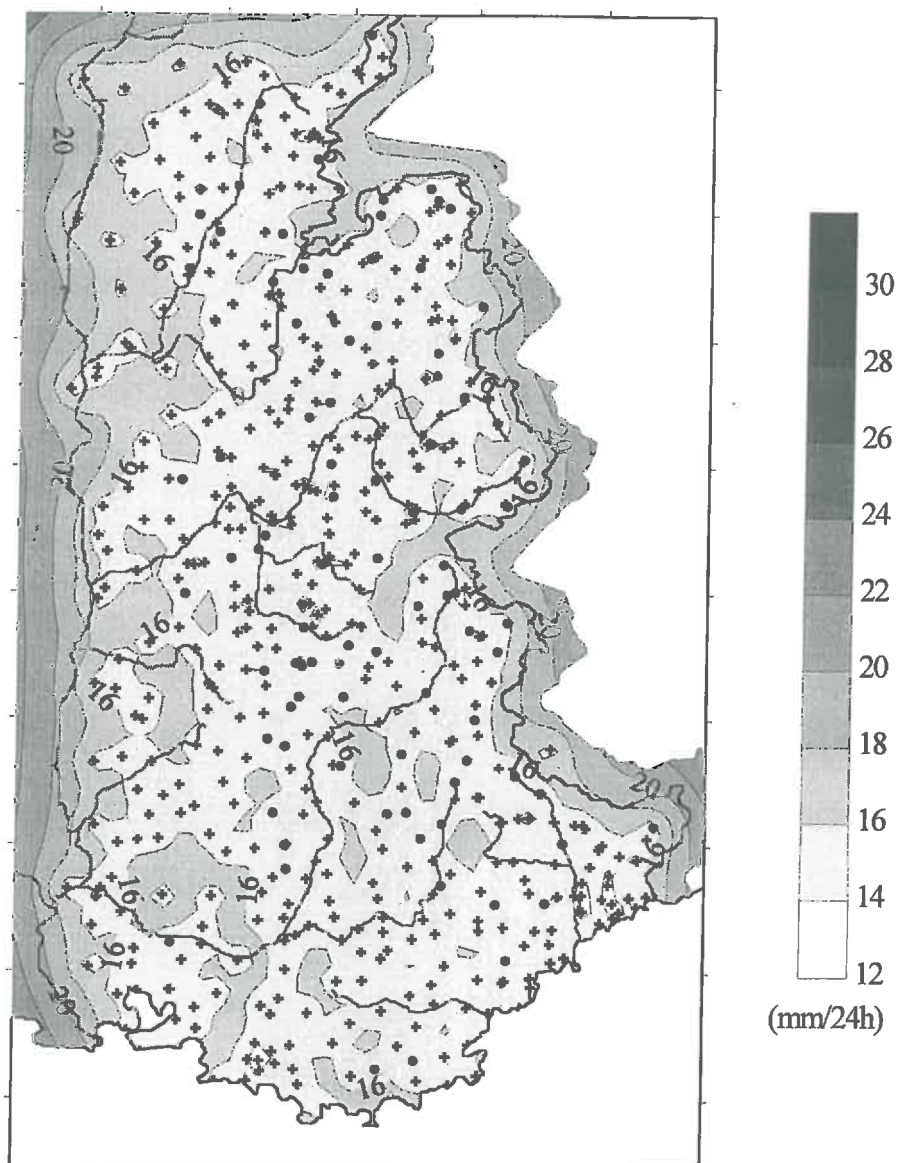
Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les pluies de 12h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



Carte des pluies de 24h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

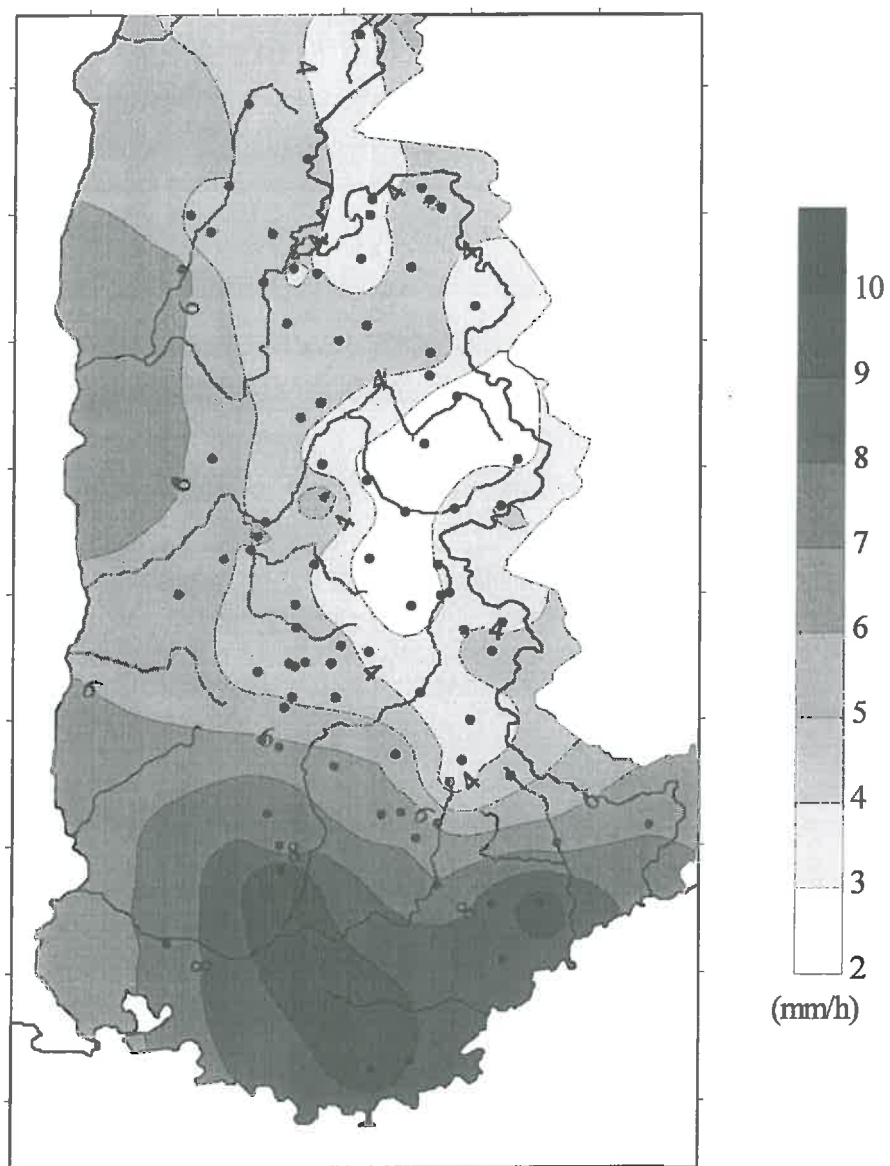


Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les pluies de 24h et 100ans  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

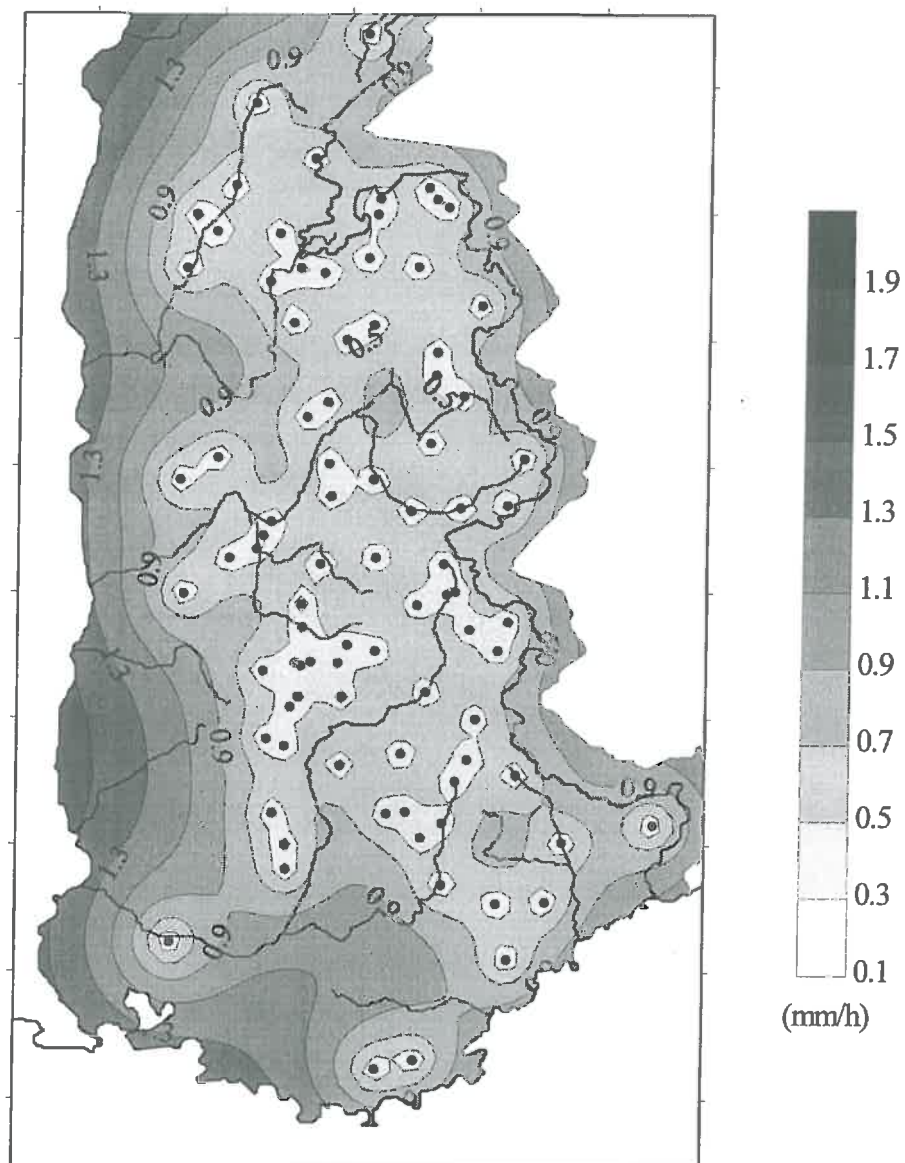




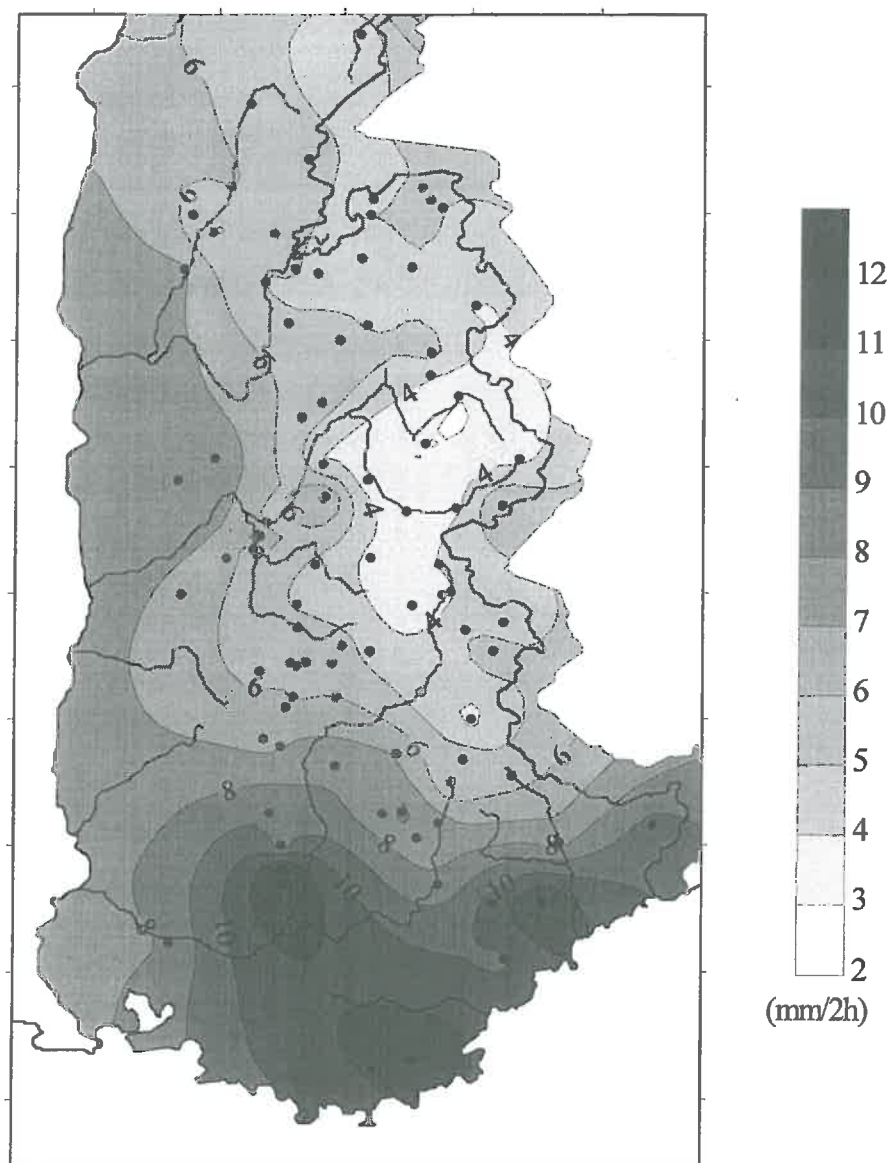
Carte des gradex de 1h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



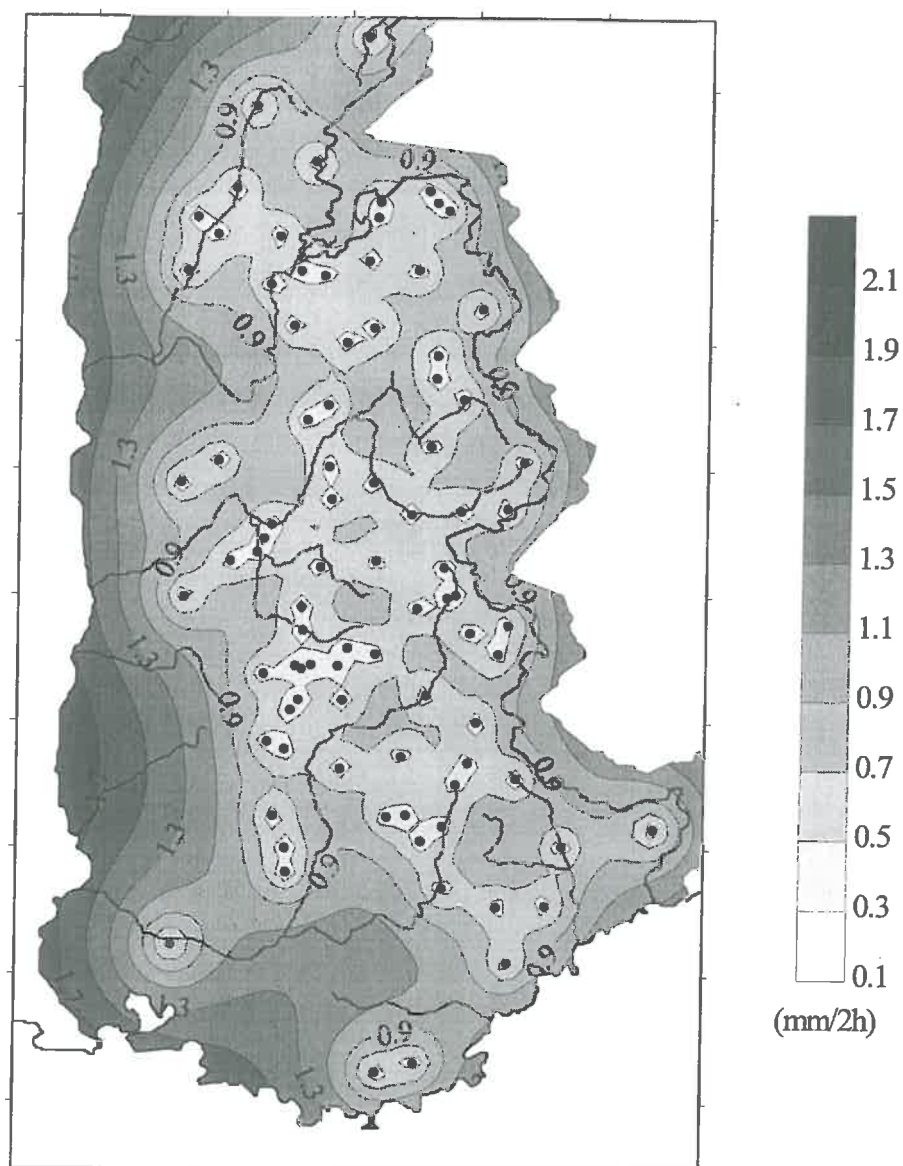
Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les gradex de 1h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



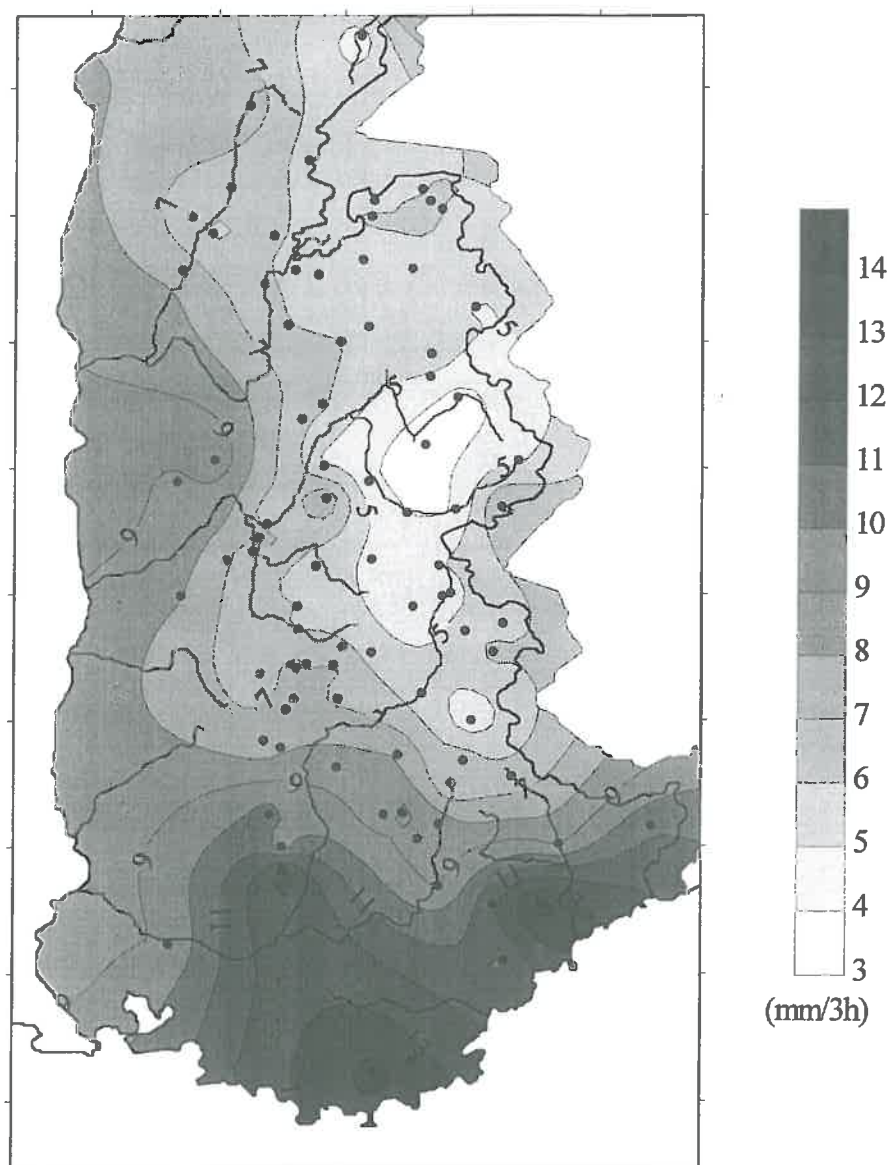
Carte des gradex de 2h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



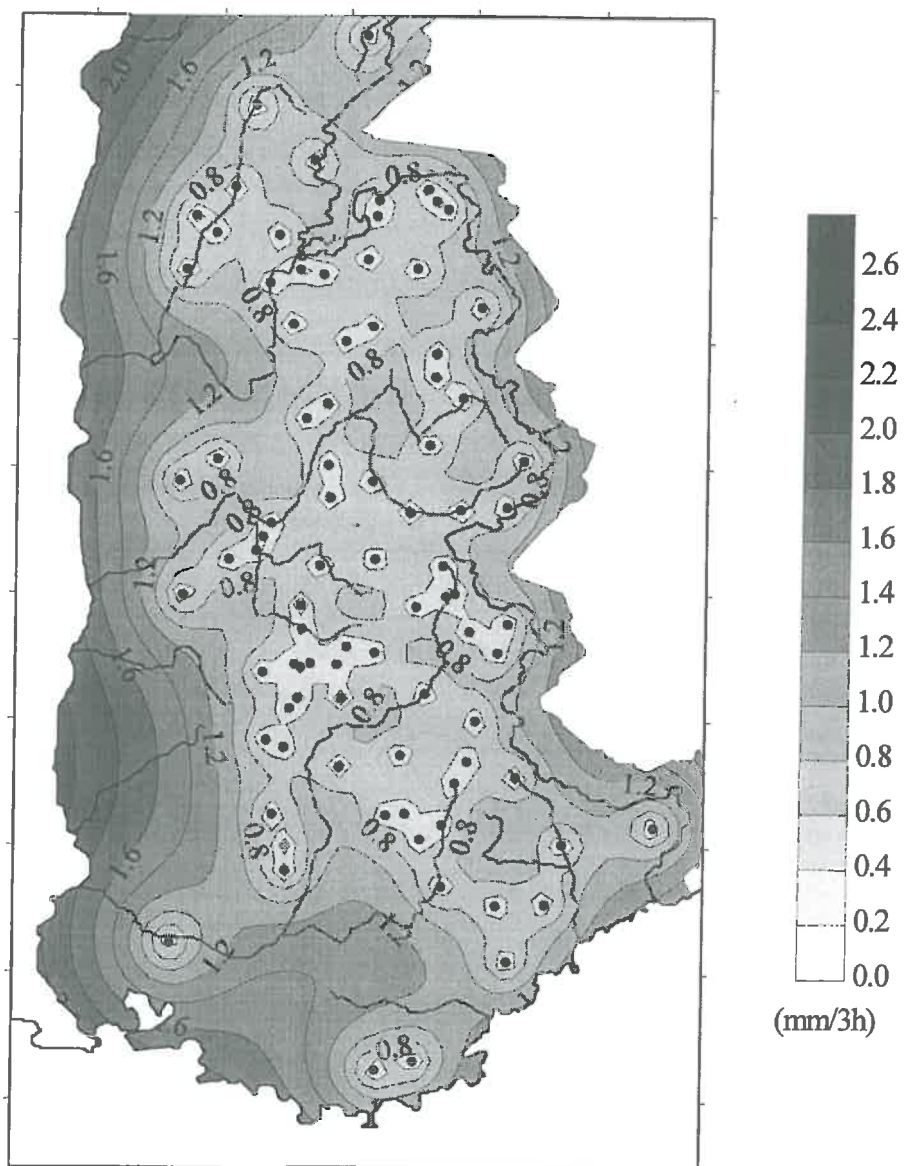
Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les gradex de 2h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



Carte des gradex de 3h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

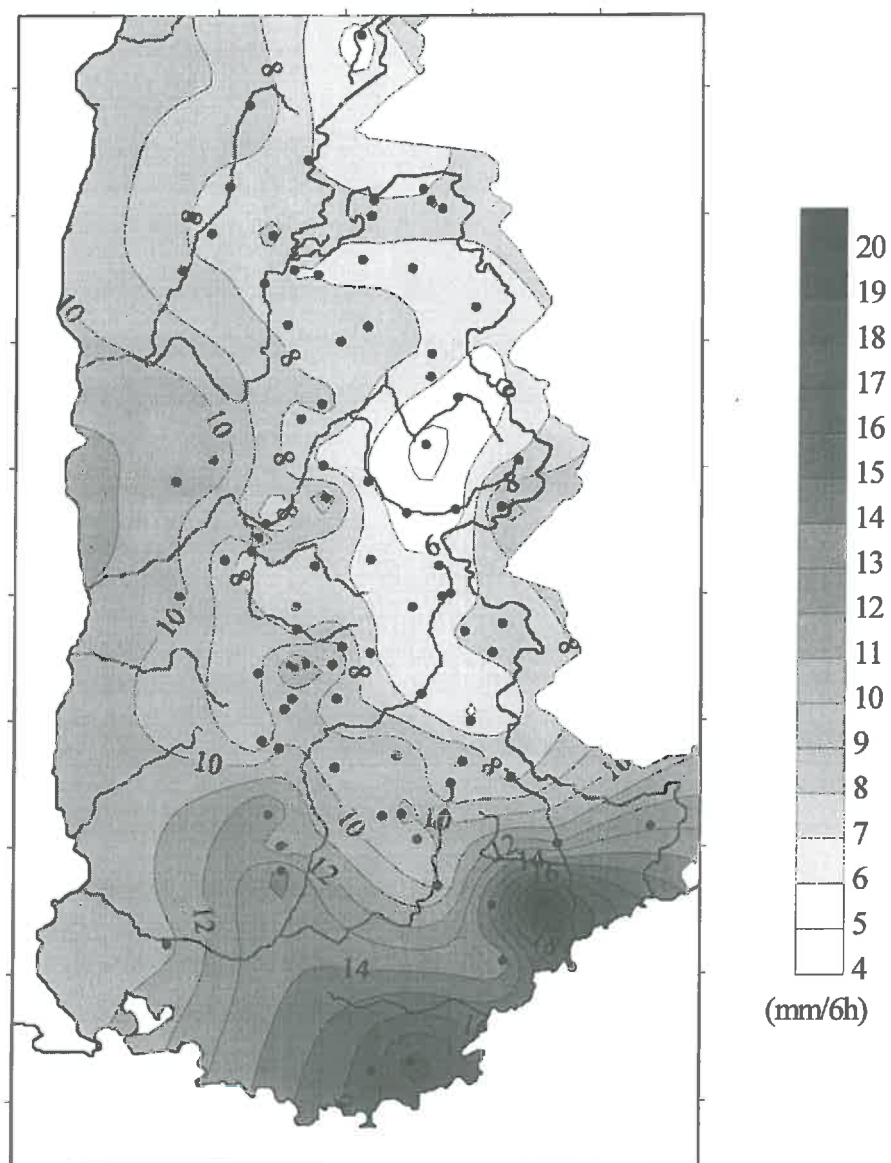


Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les gradex de 3h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



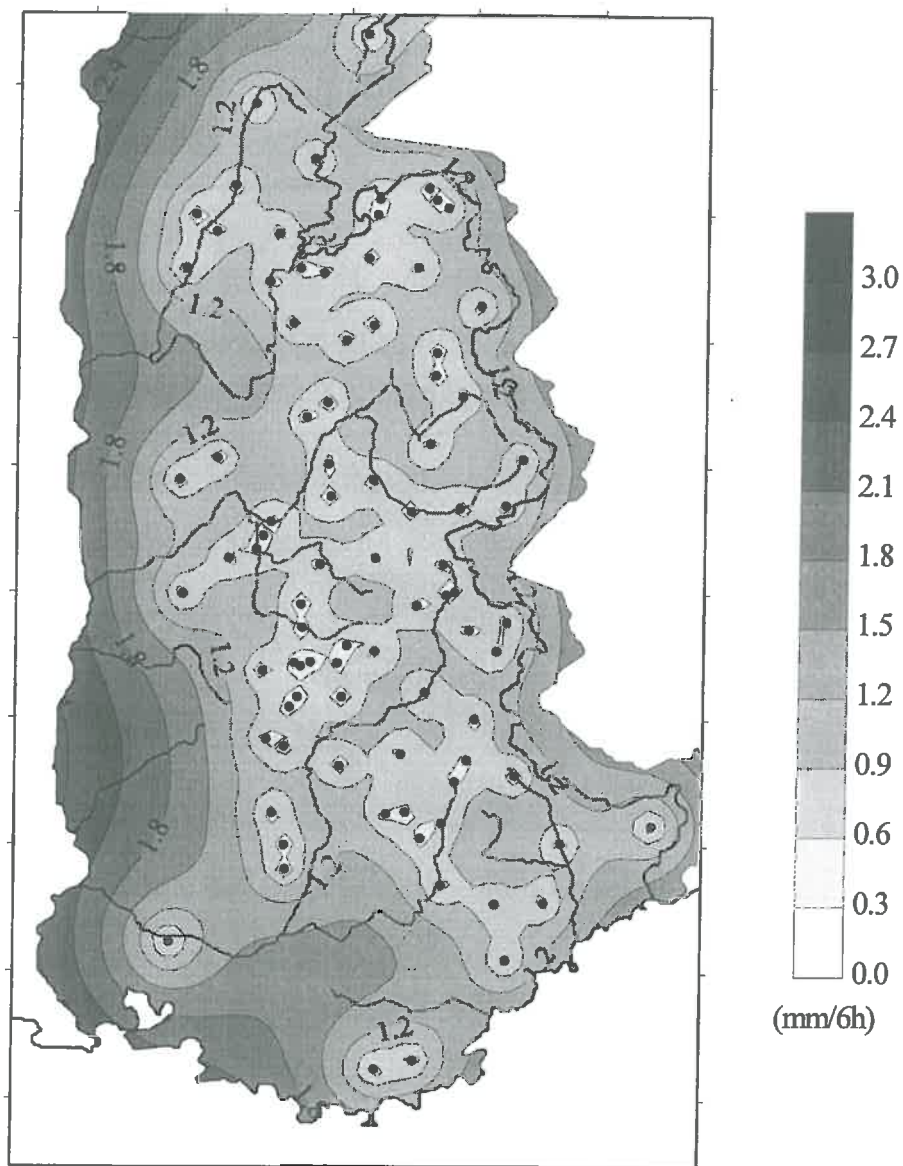


Carte des gradex de 6h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

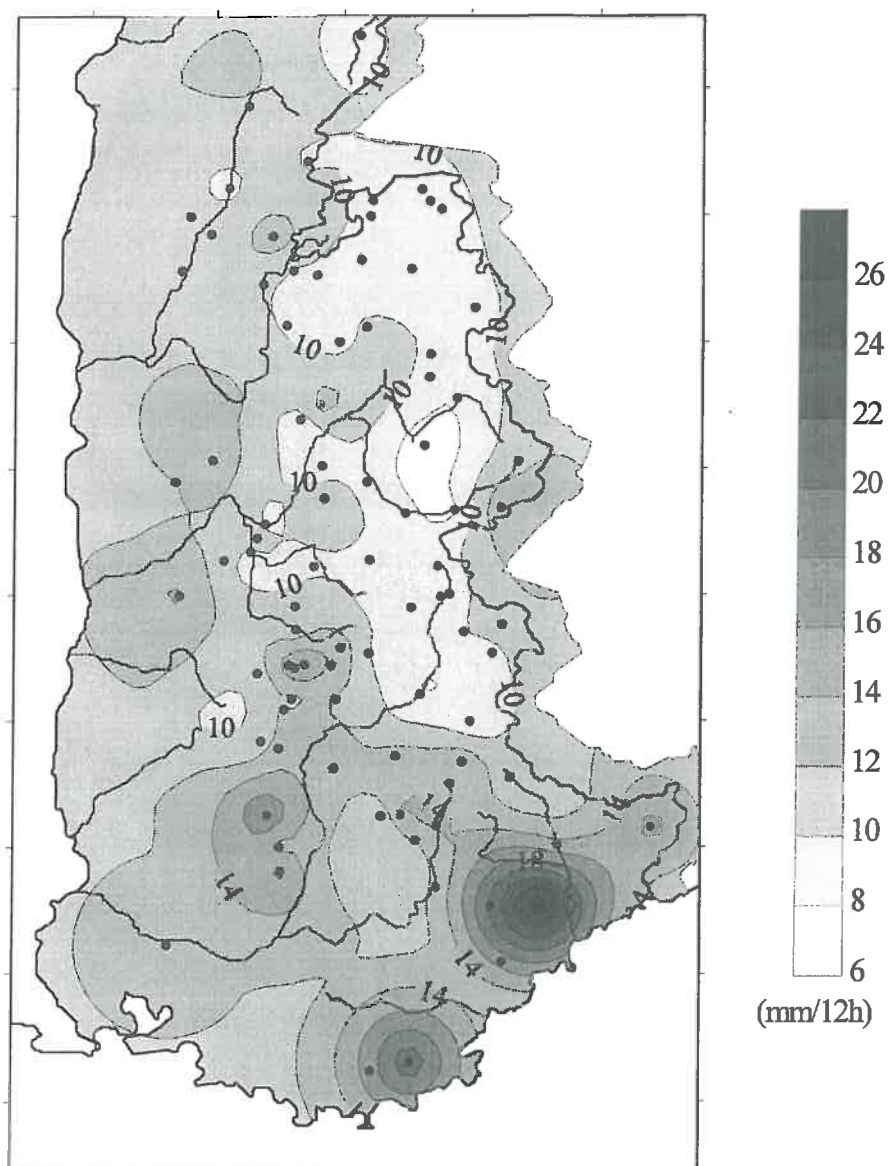




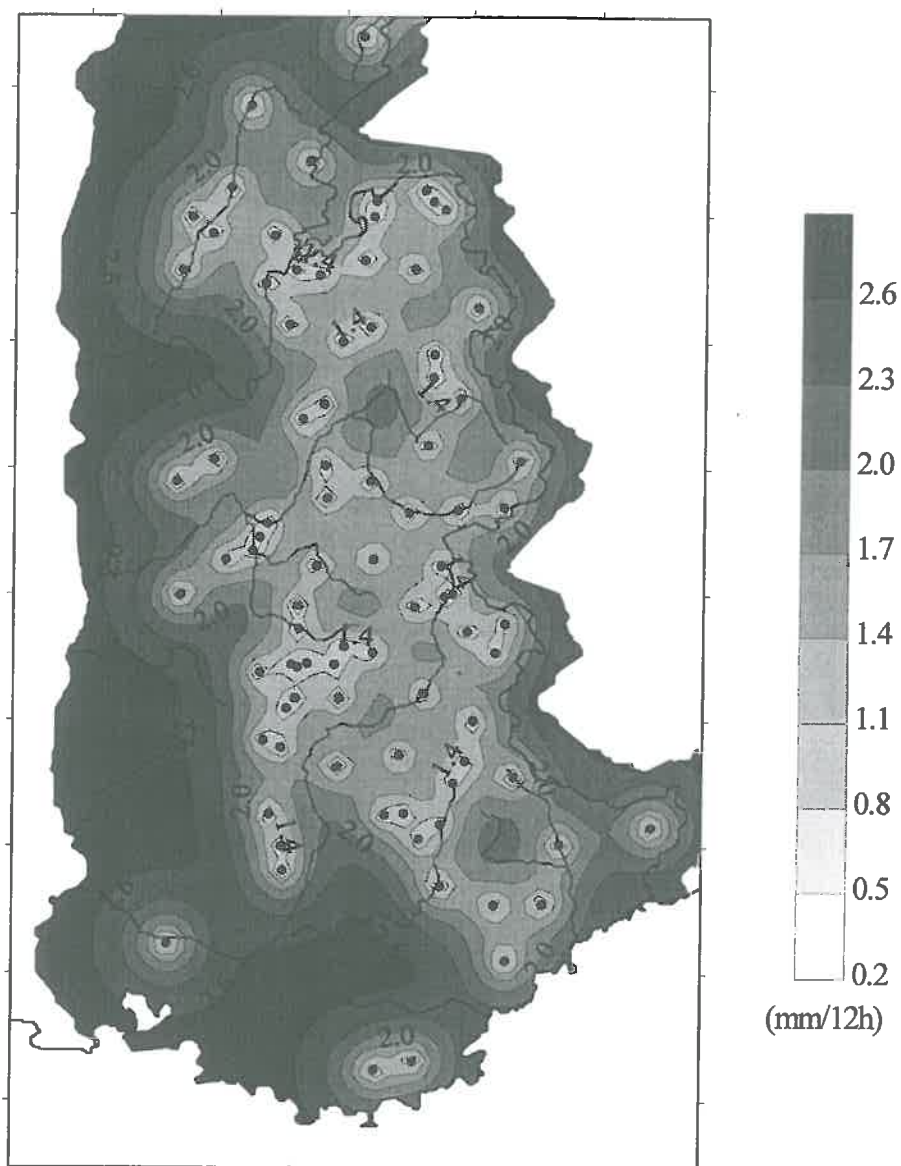
Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les gradex de 6h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



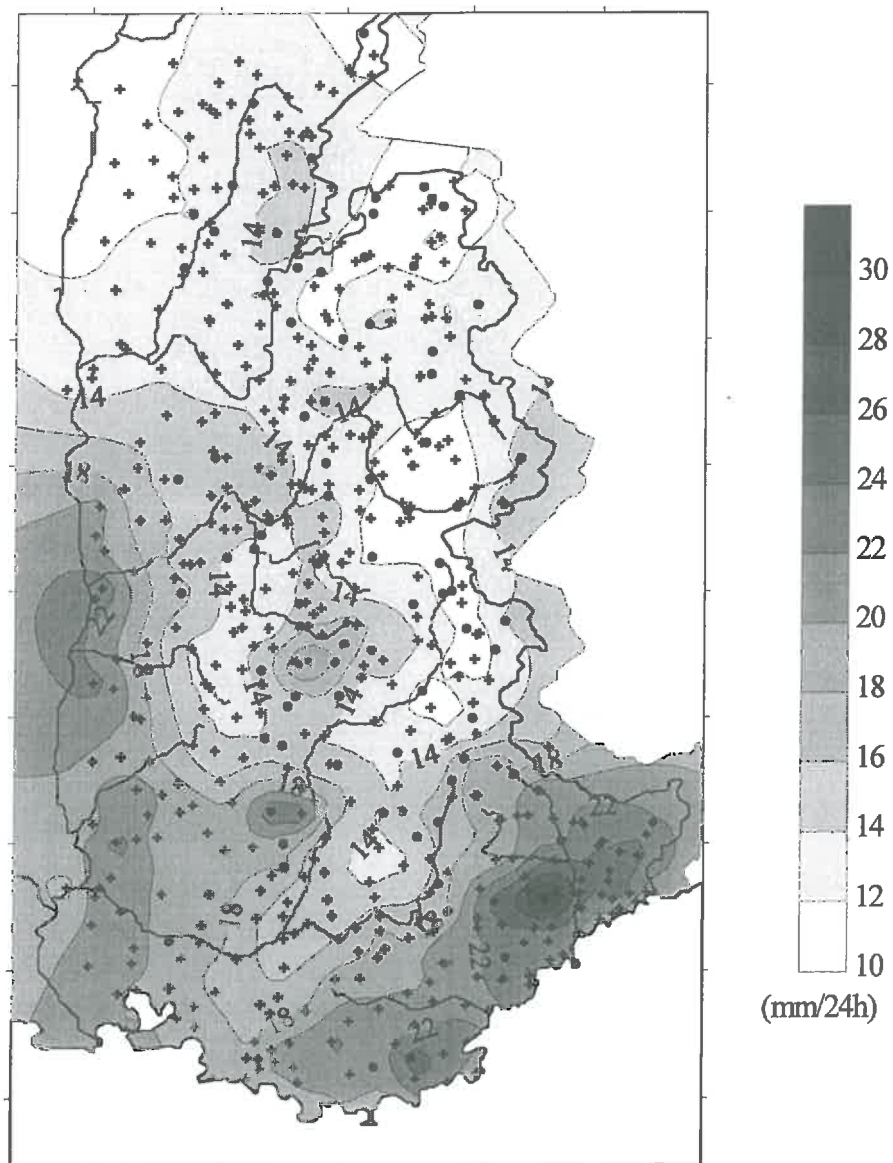
Carte des gradex de 12h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les gradex de 12h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

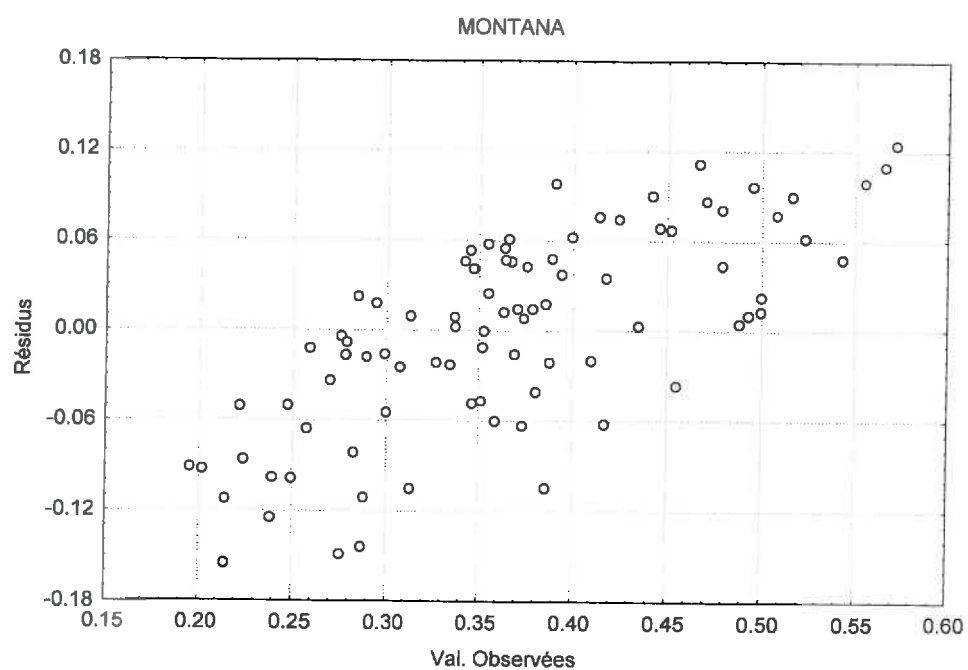
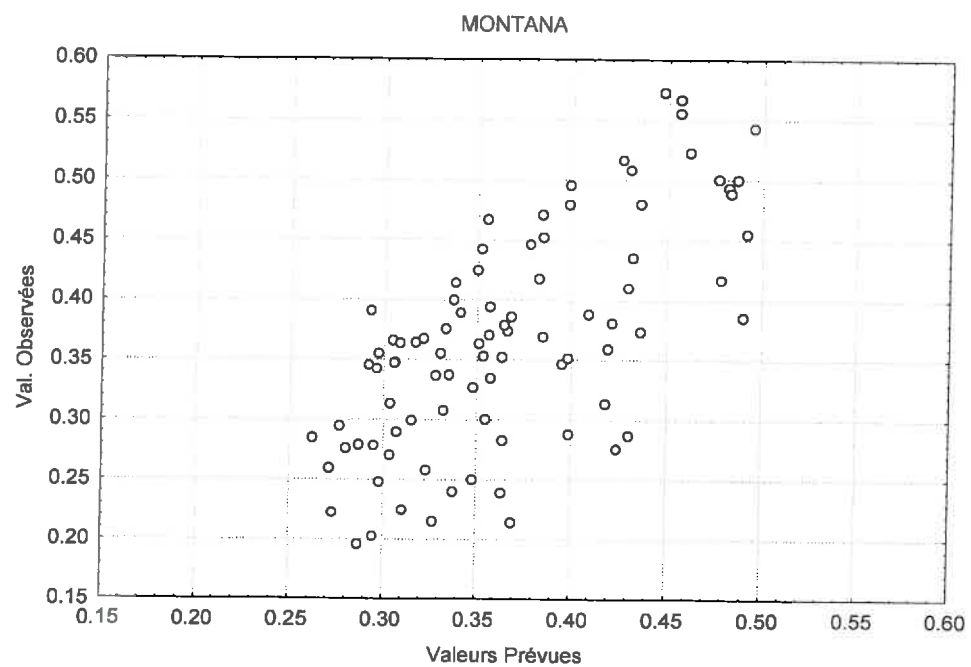


Carte des gradex de 24h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)



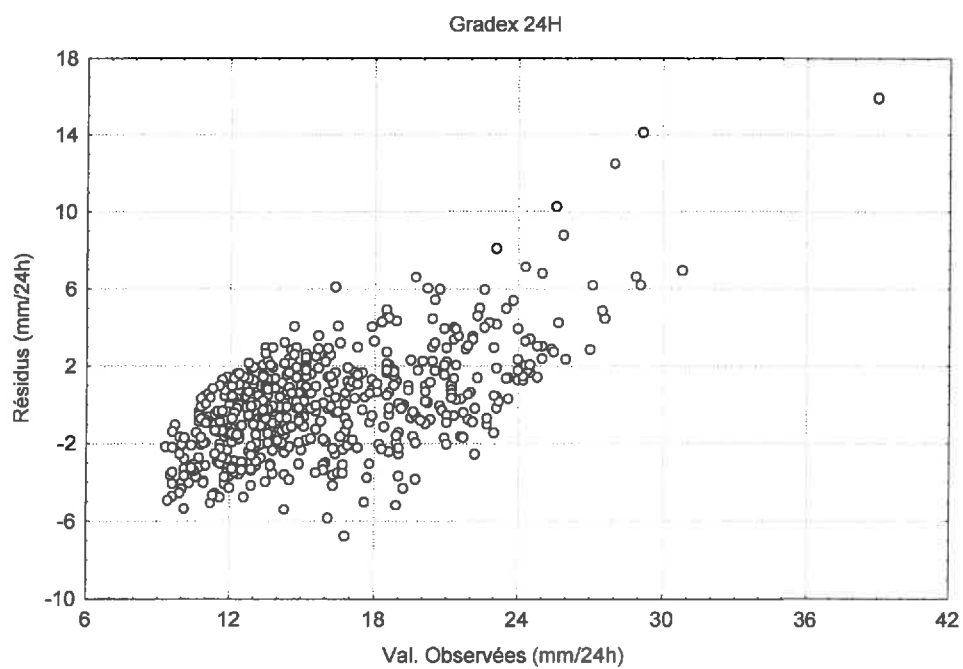
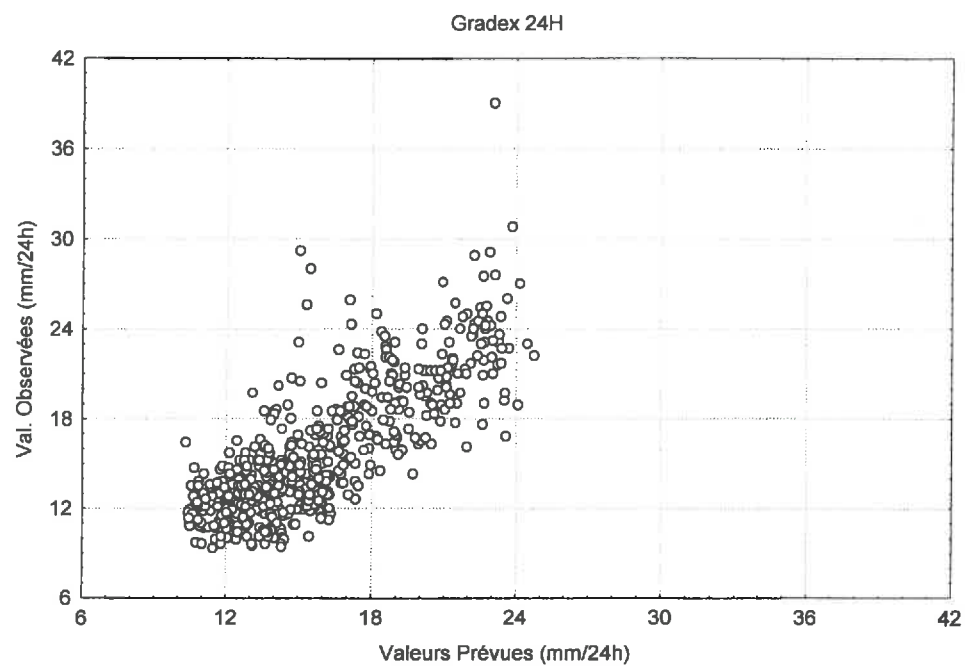
Coefficient de Montana  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.47$

---



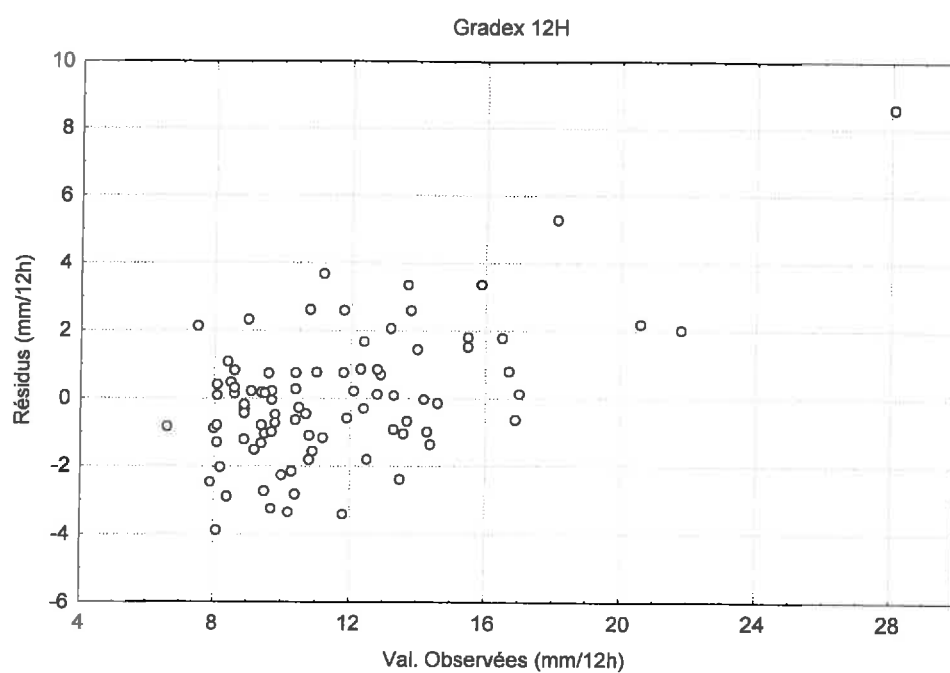
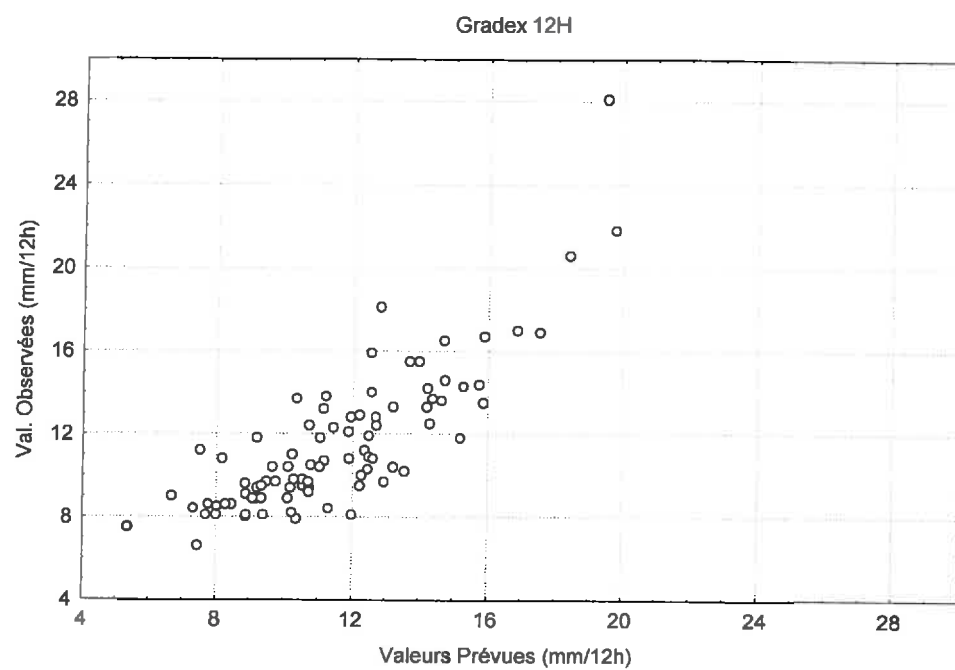
Gradex de 24h  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.63$

---



Gradex de 12h  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.67$

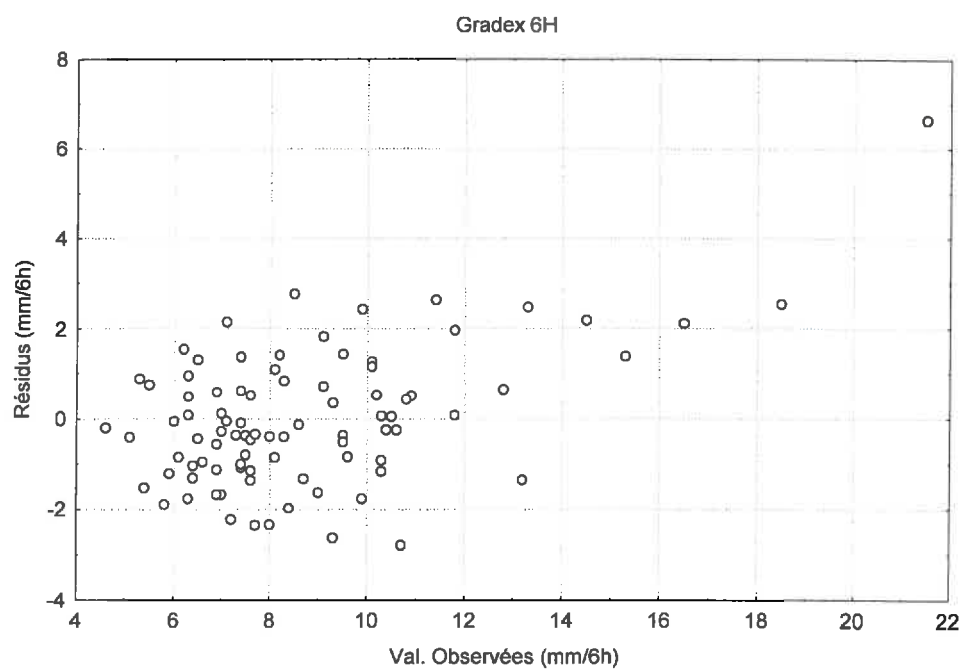
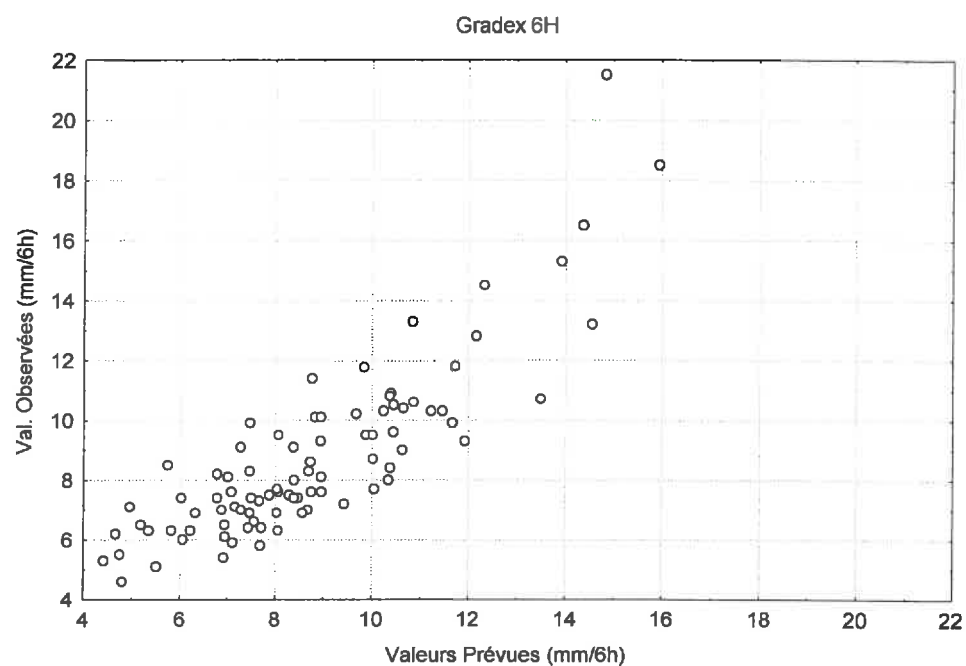
---





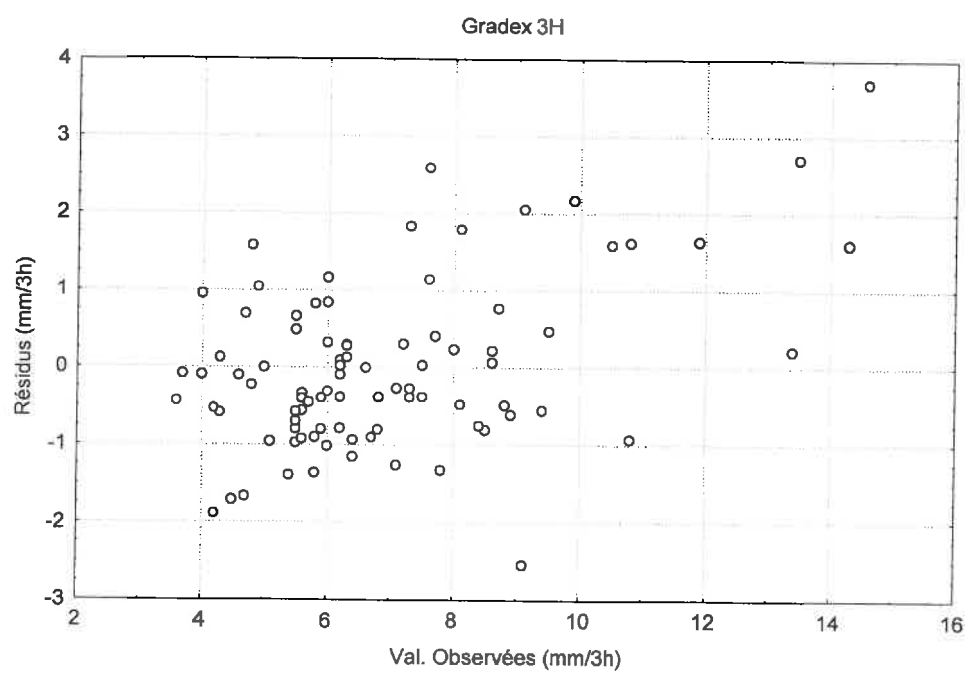
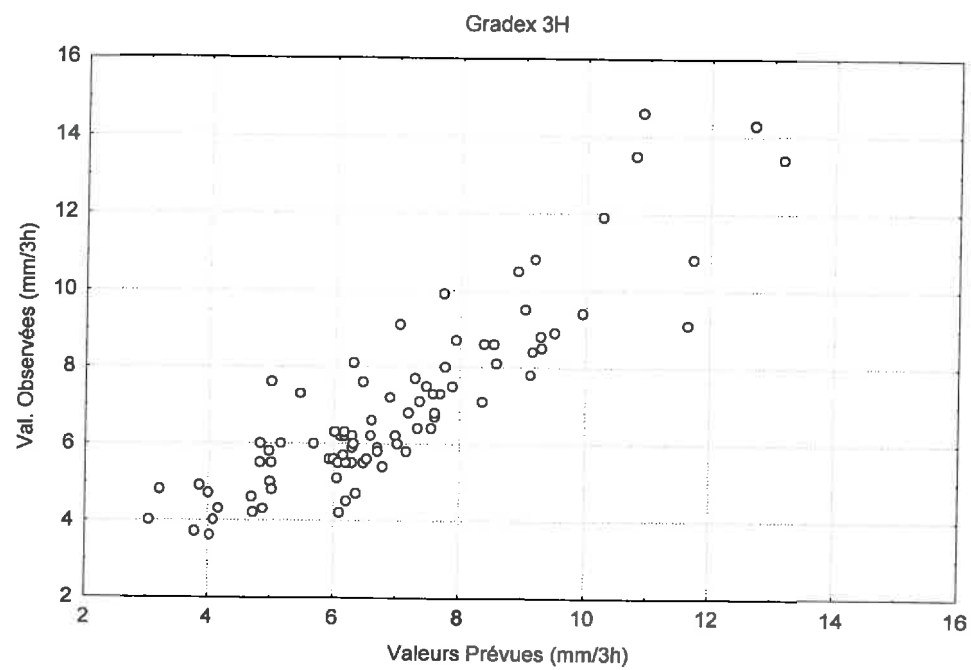
Gradex de 6h  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.73$

---



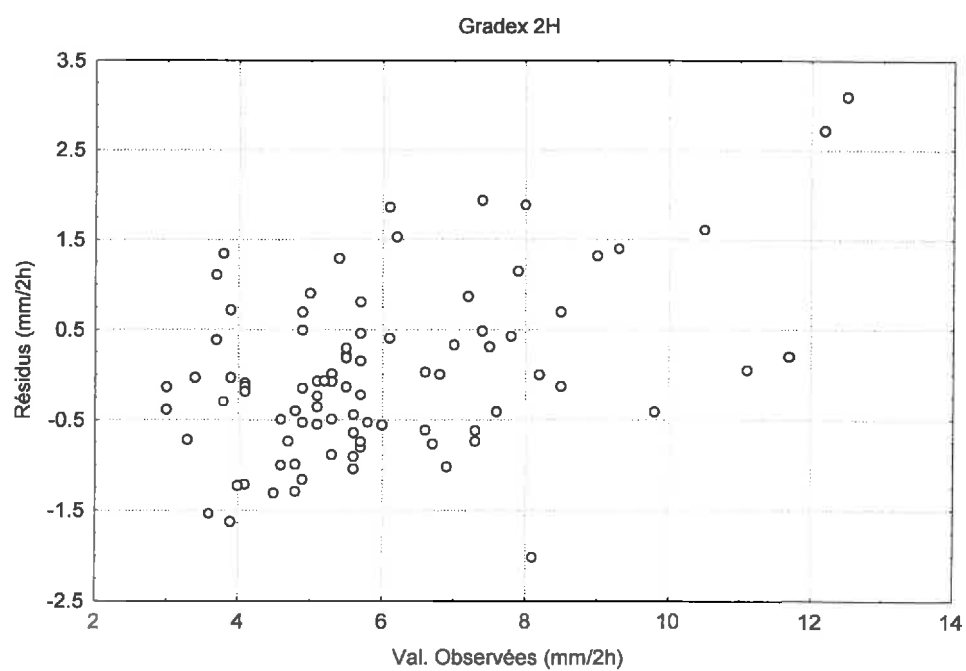
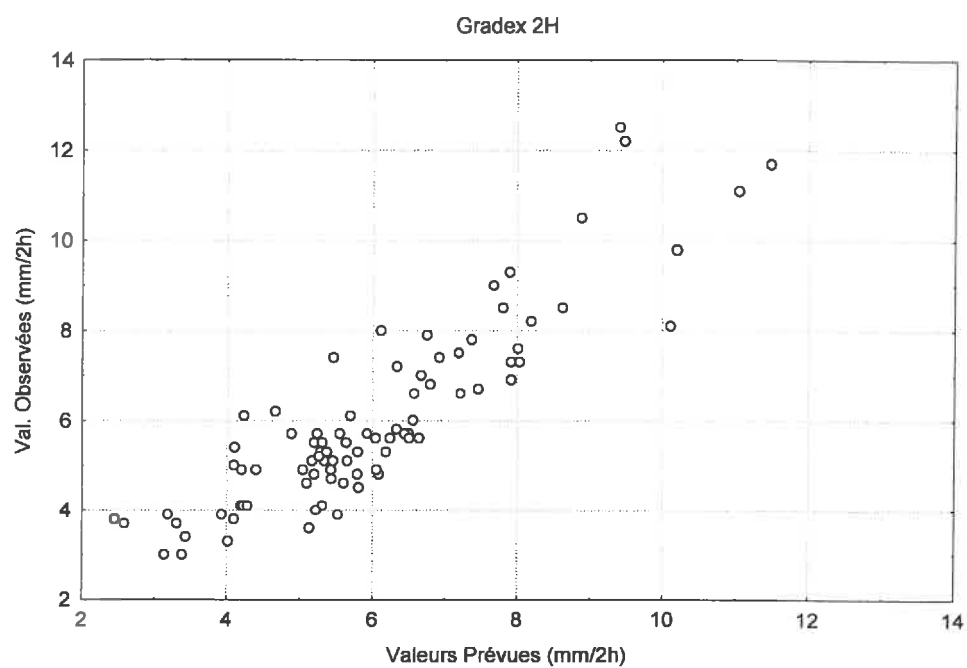
Gradex de 3h  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.78$

---



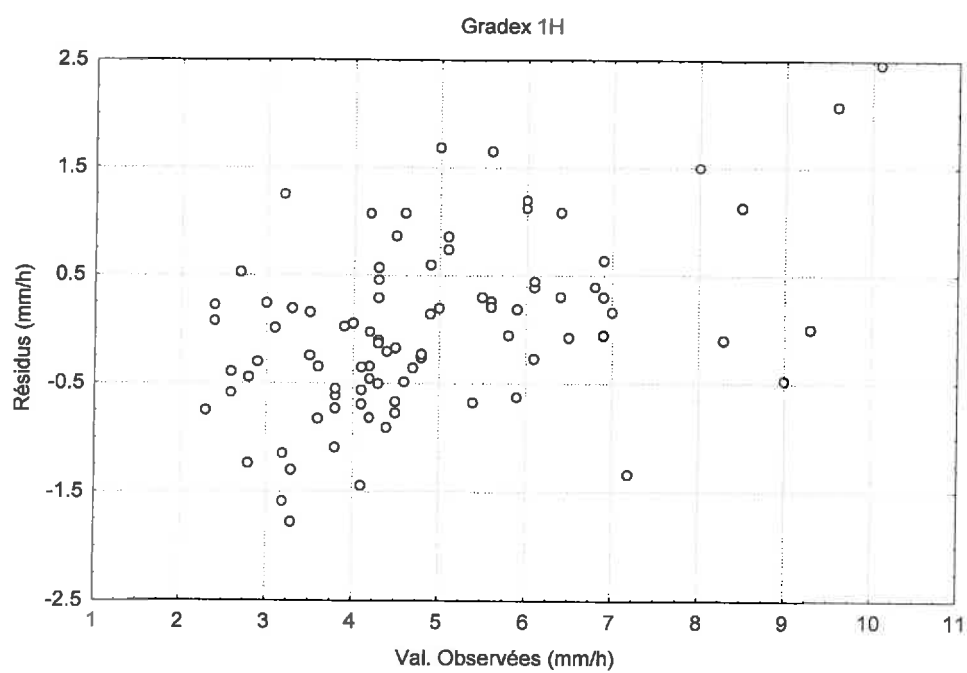
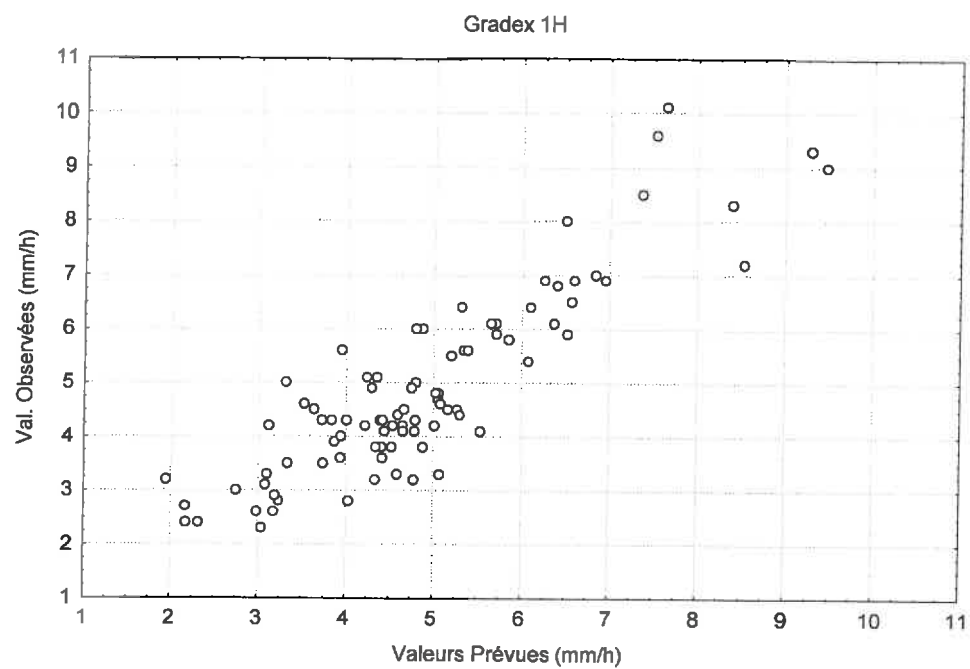
Gradex de 2h  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.79$

---



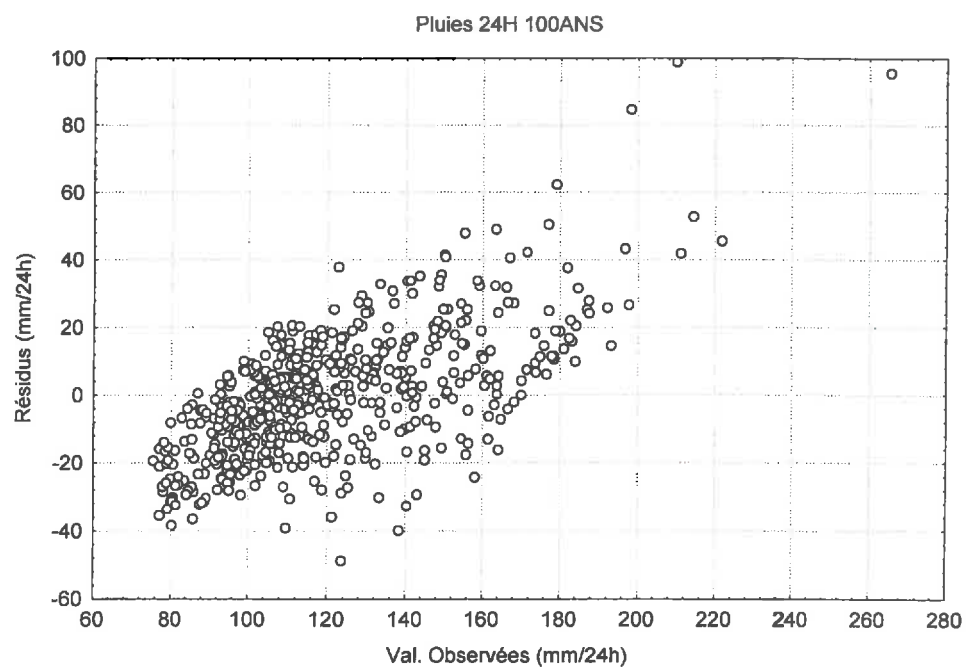
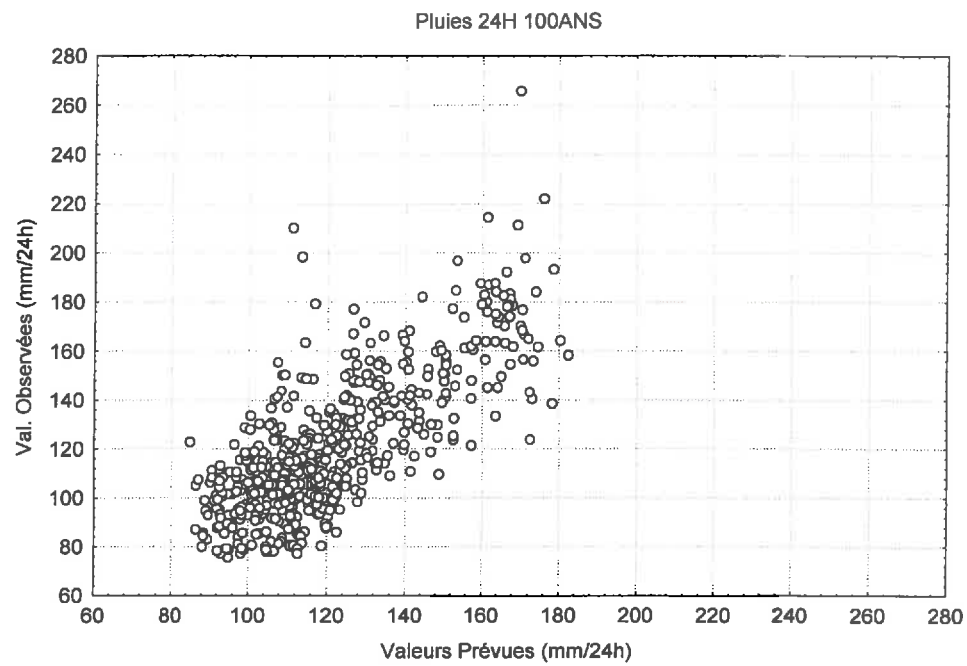
Gradex de 1h  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.78$

---



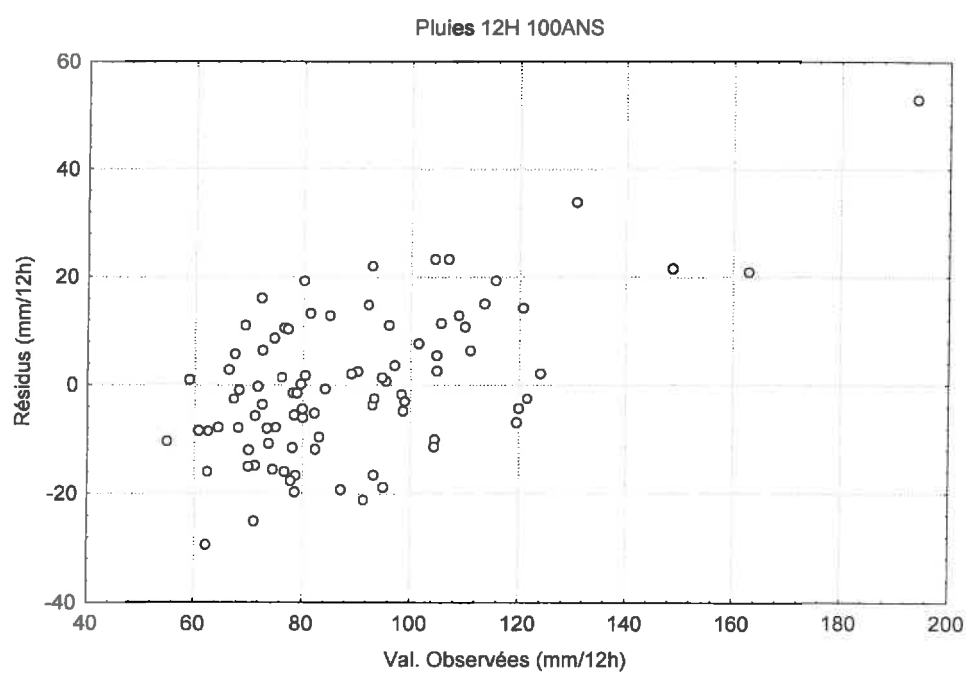
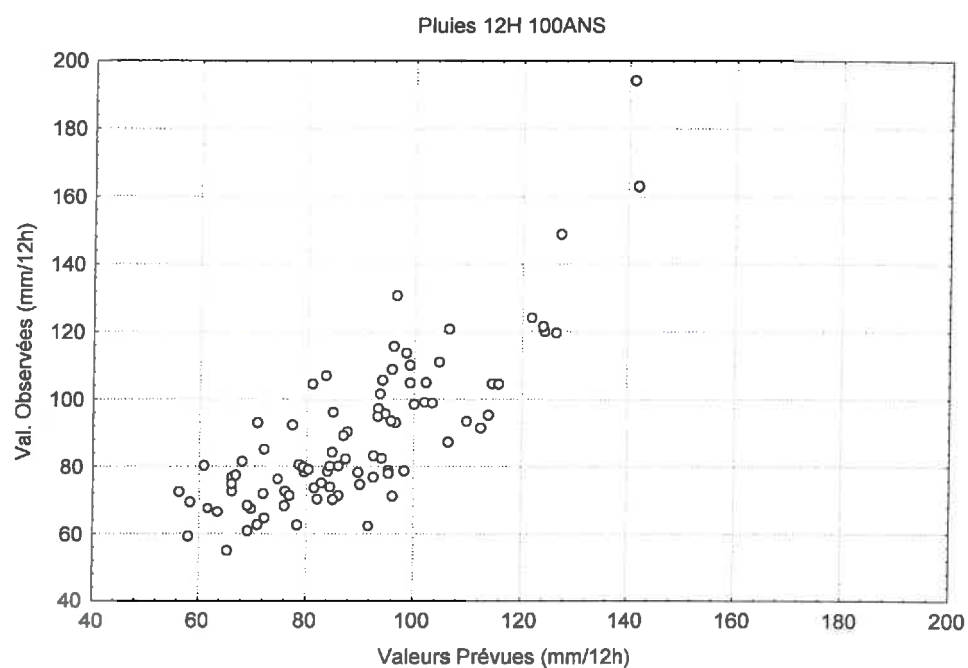
Pluies de 24h et 100ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.57$

---



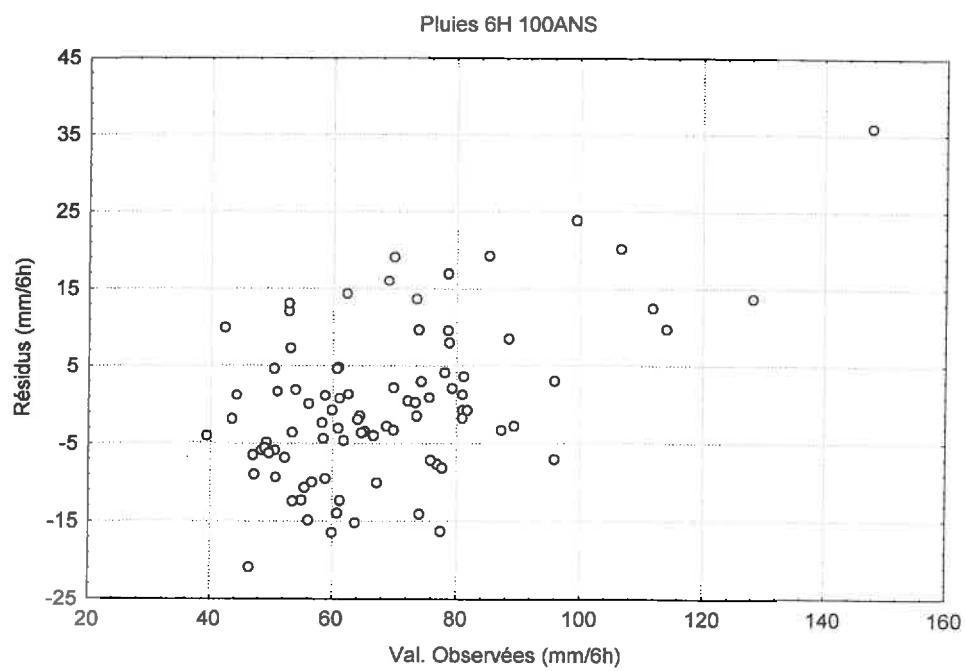
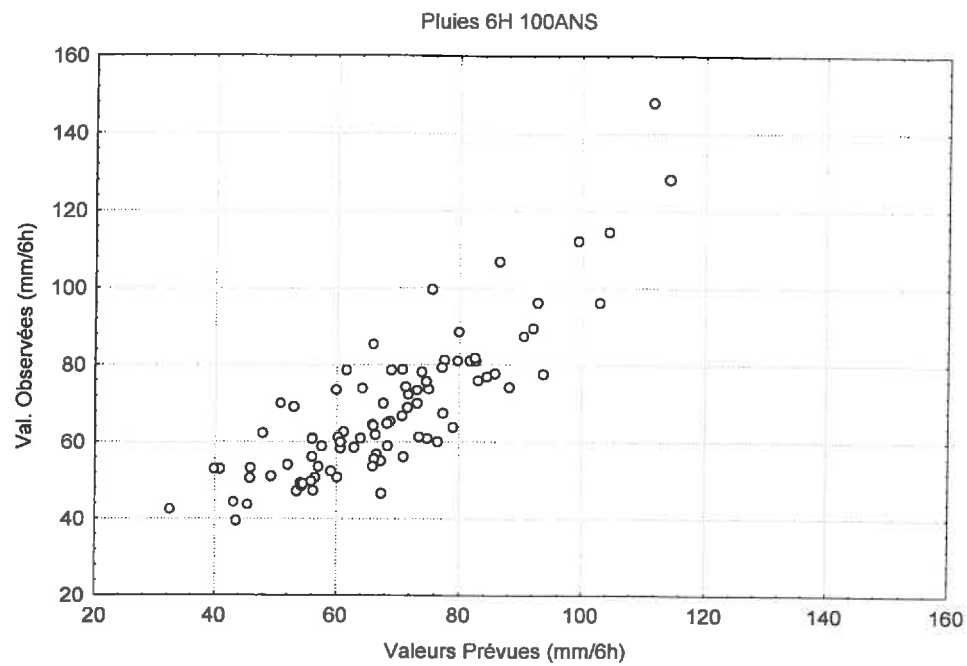
Pluies de 12h et 100ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.65$

---



Pluies de 6h et 100 ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.72$

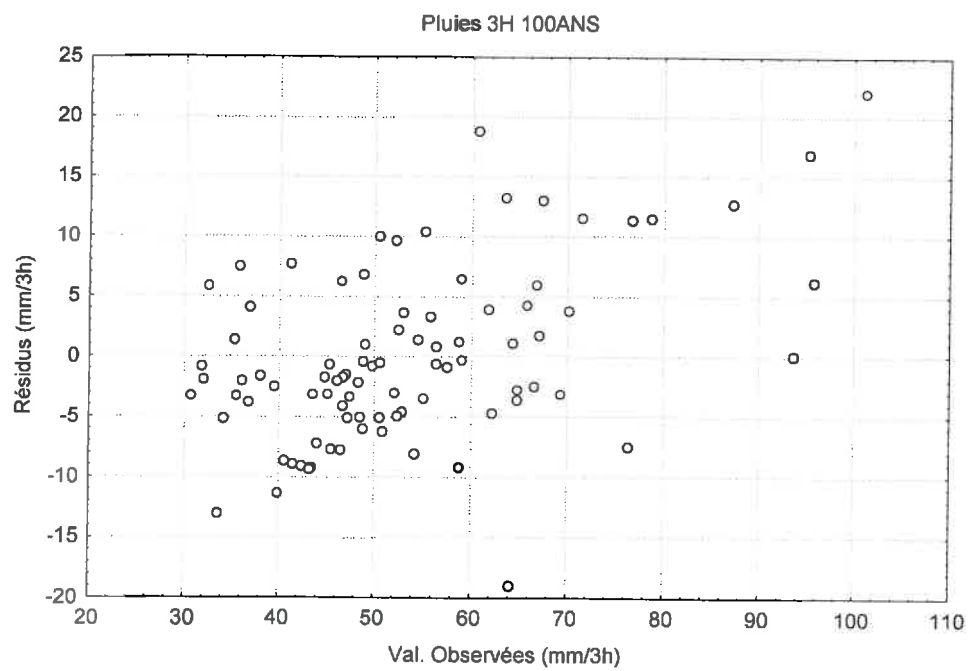
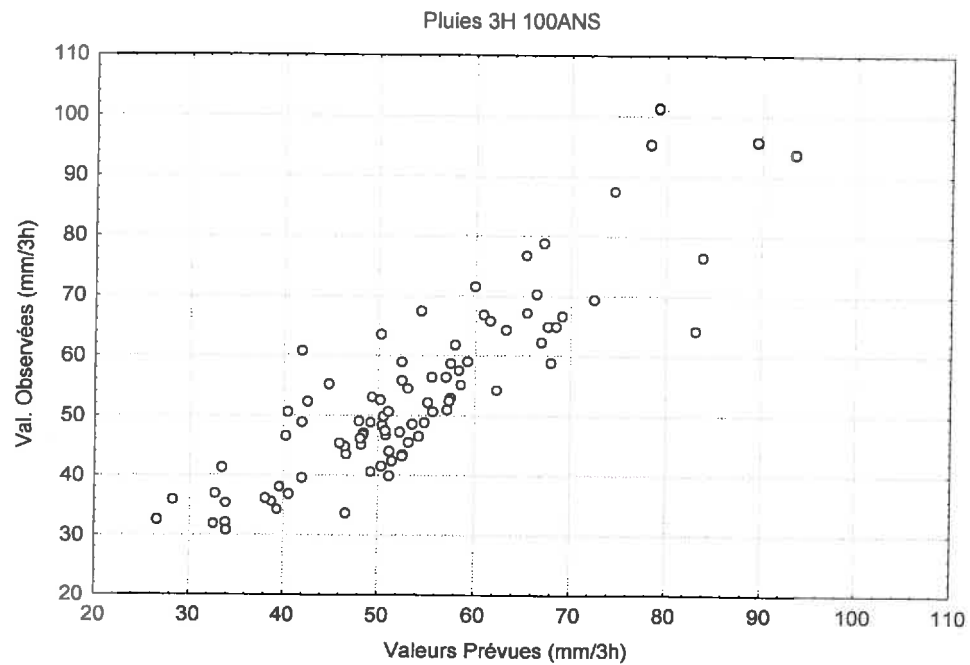
---





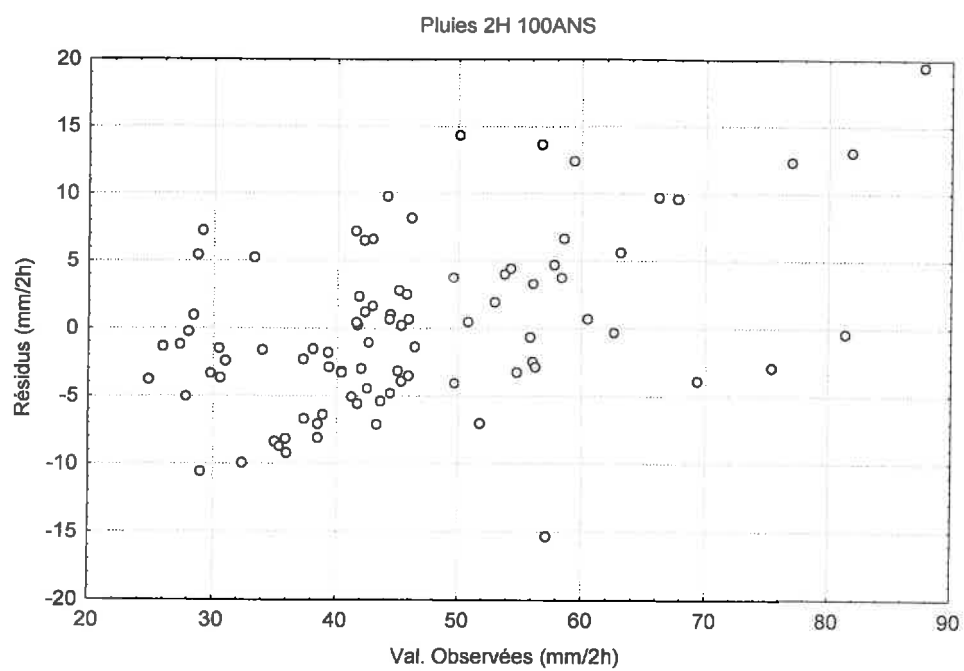
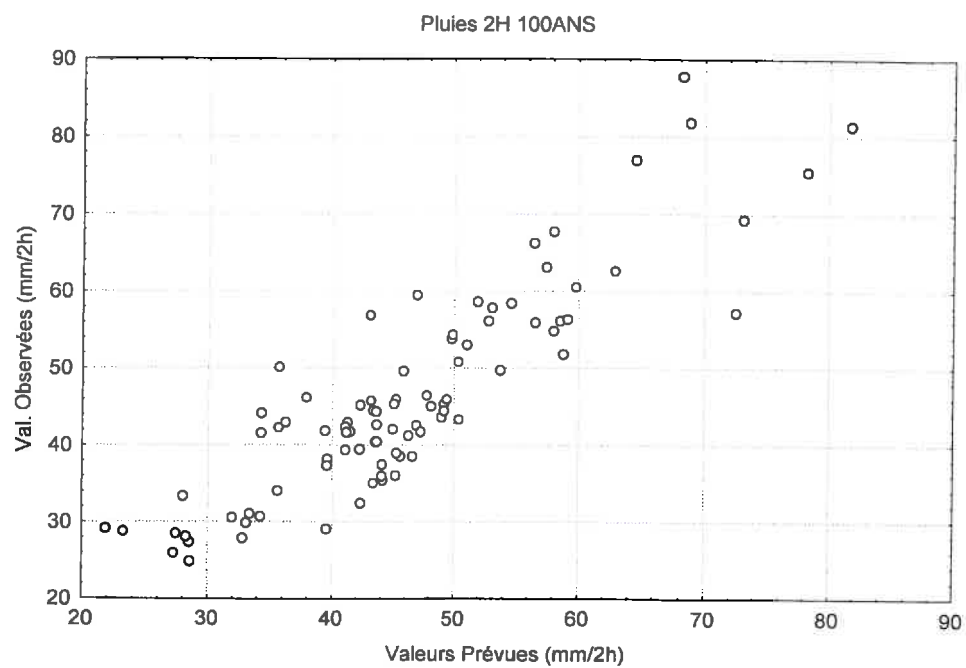
Pluies de 3h et 100 ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.76$

---



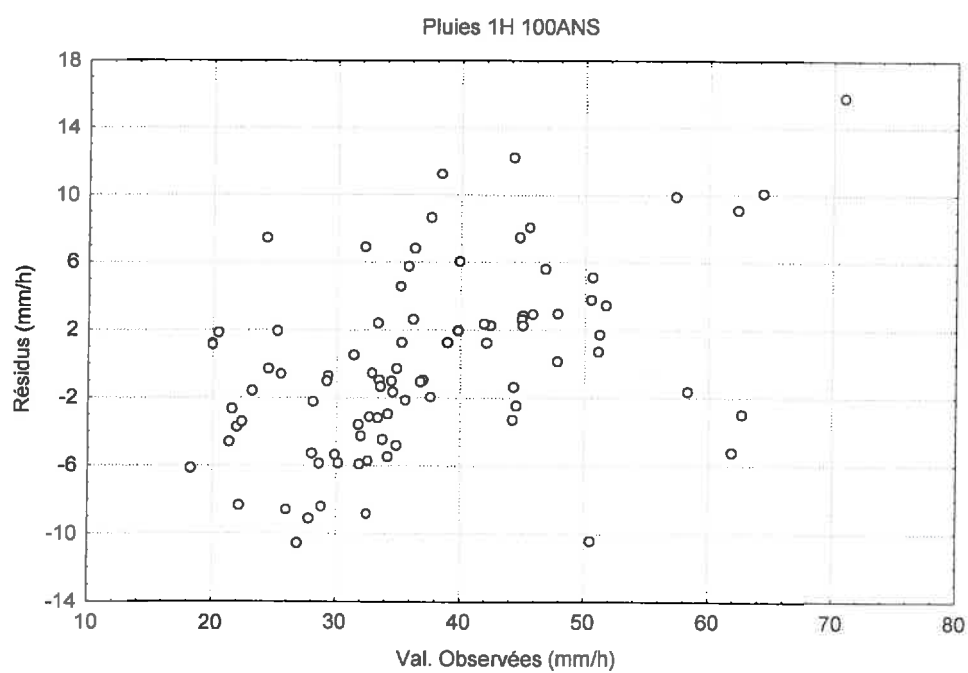
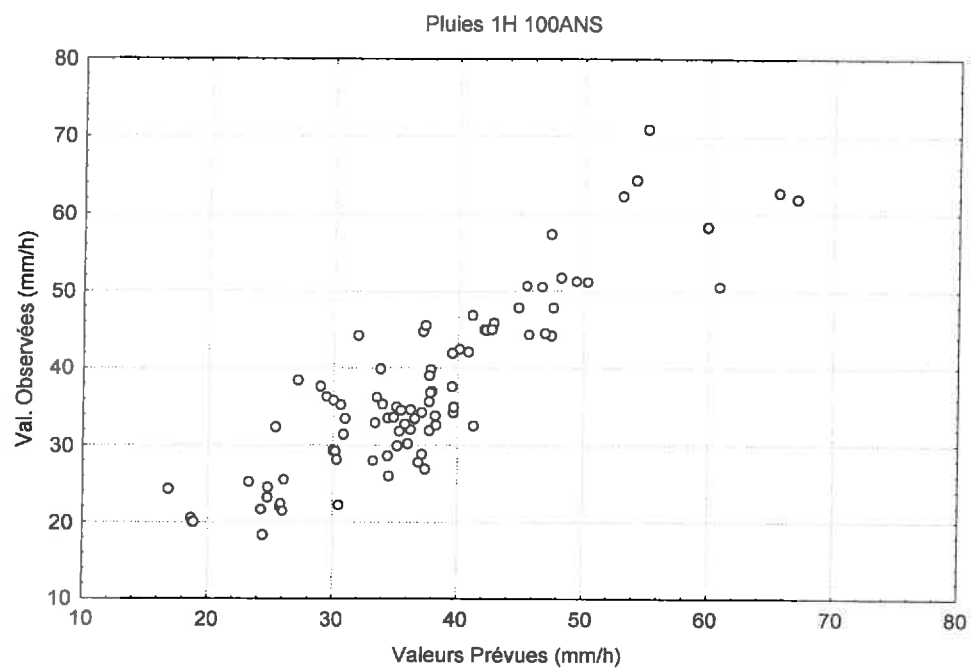
Pluies de 2h et 100ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.78$

---



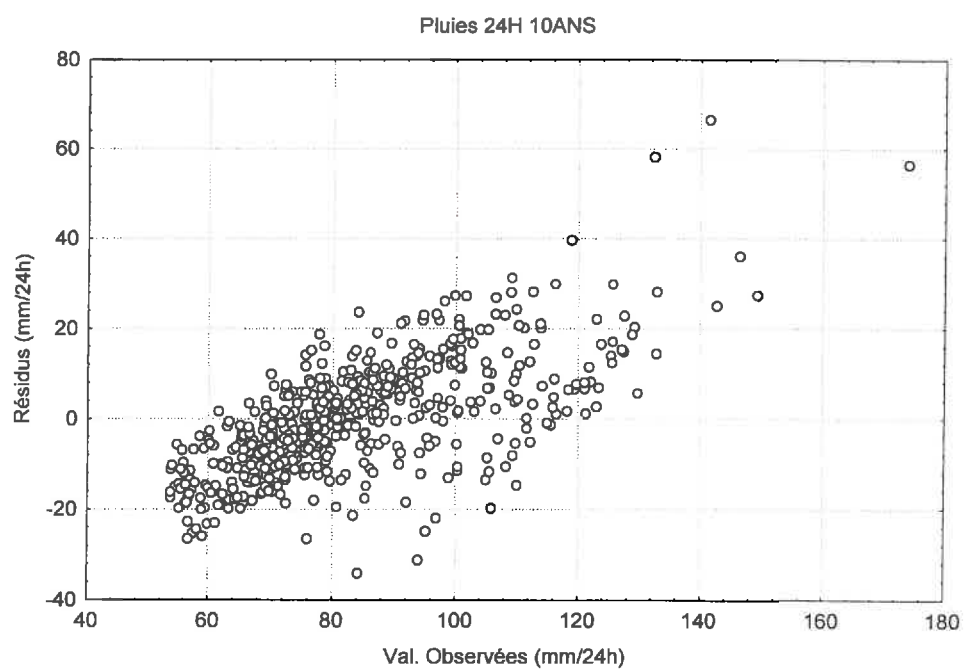
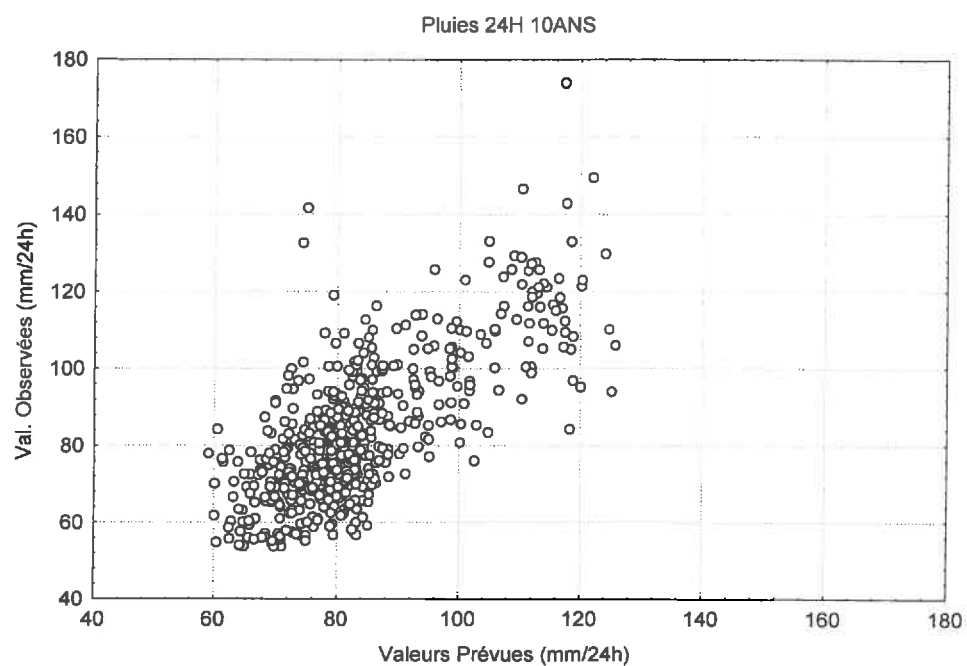
Pluies de 1h et 100 ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.77$

---



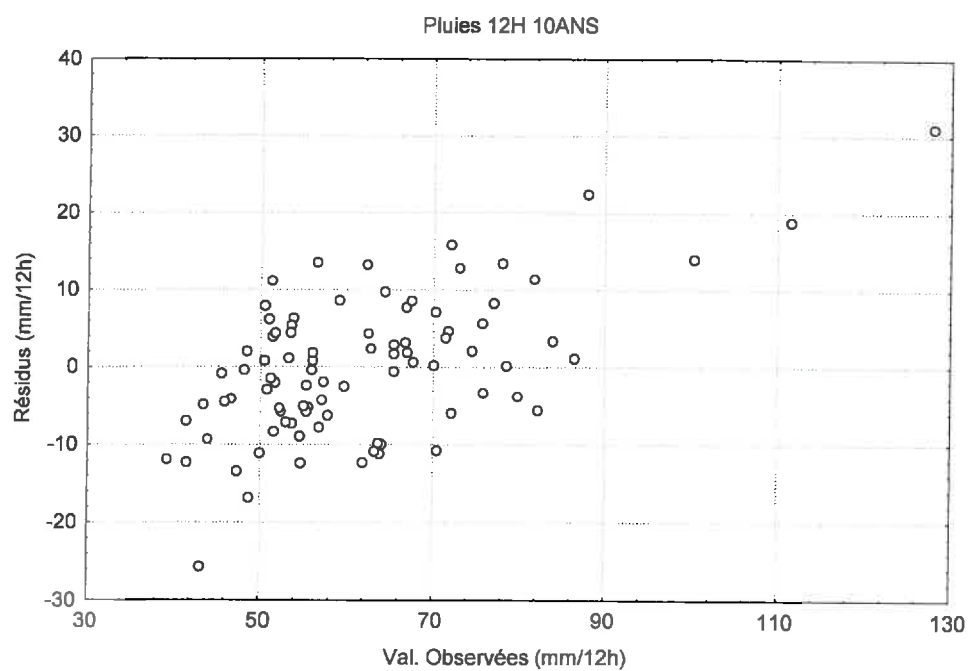
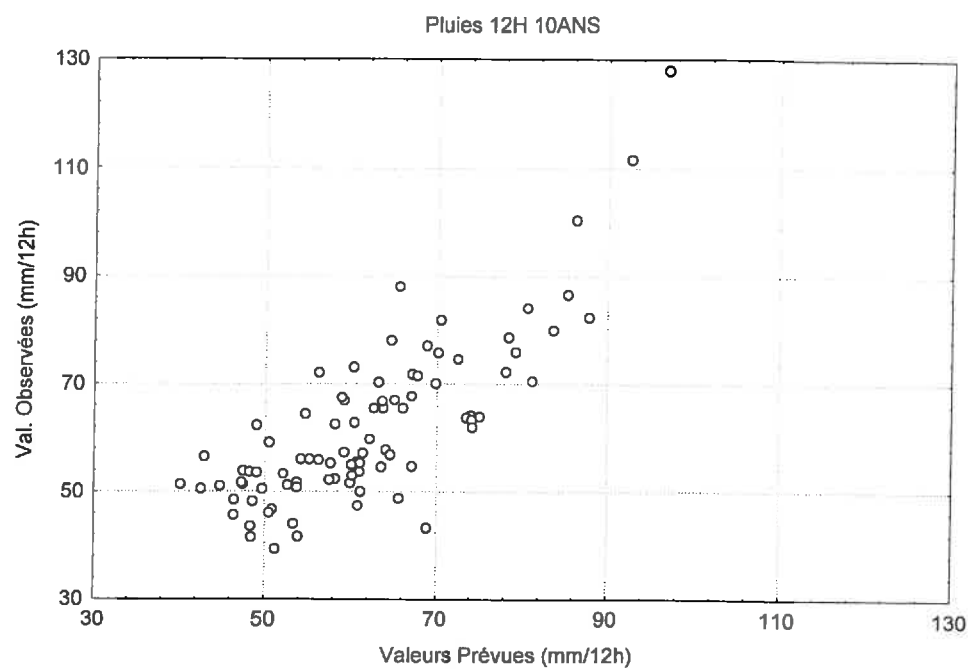
Pluies de 24h et 10ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.53$

---



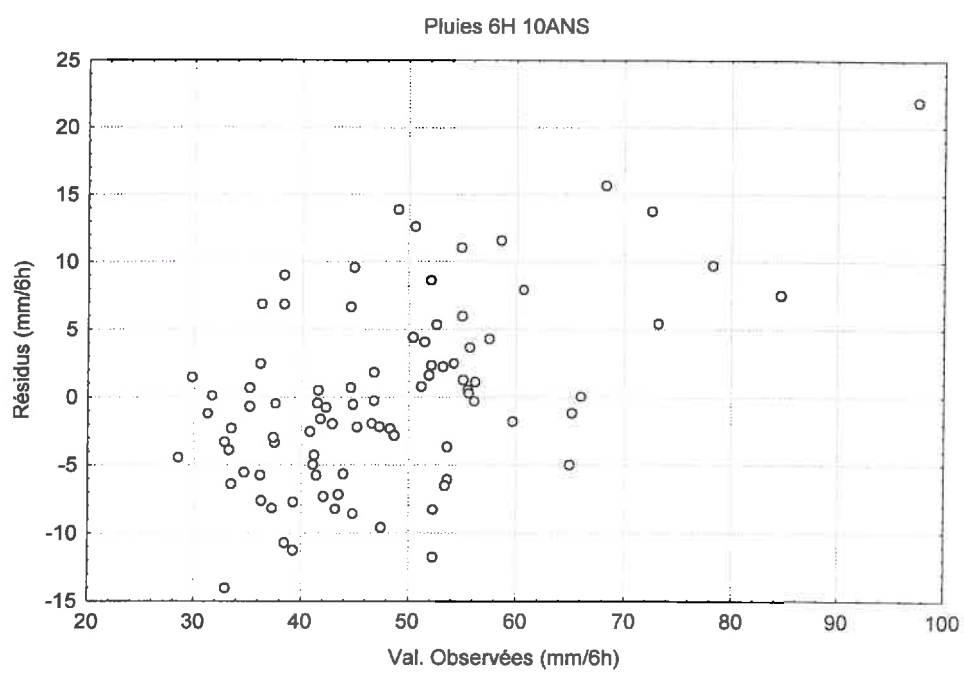
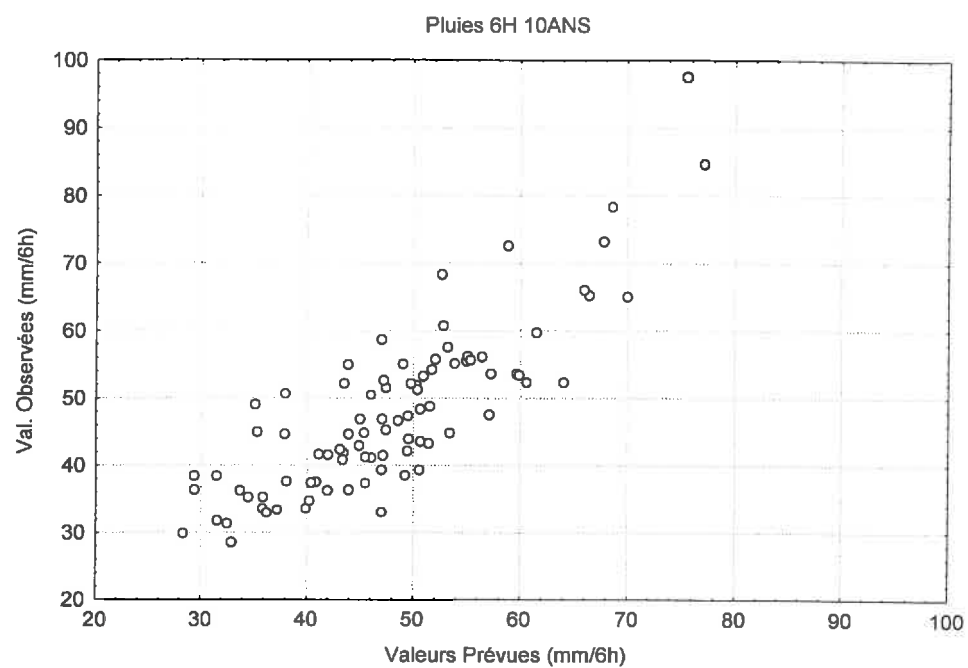
Pluies de 12h et 10ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.63$

---



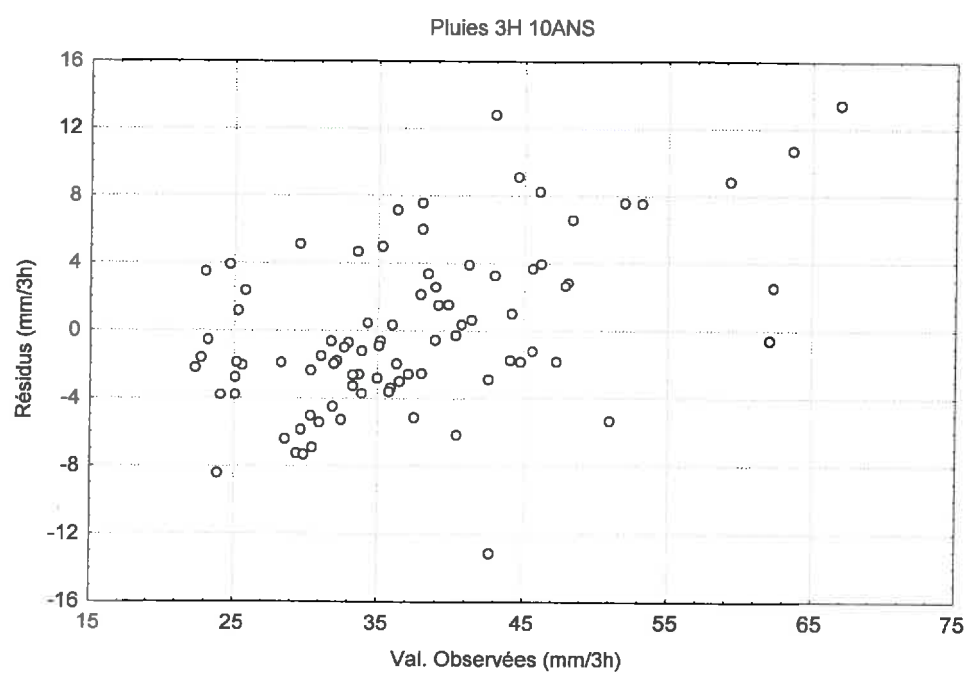
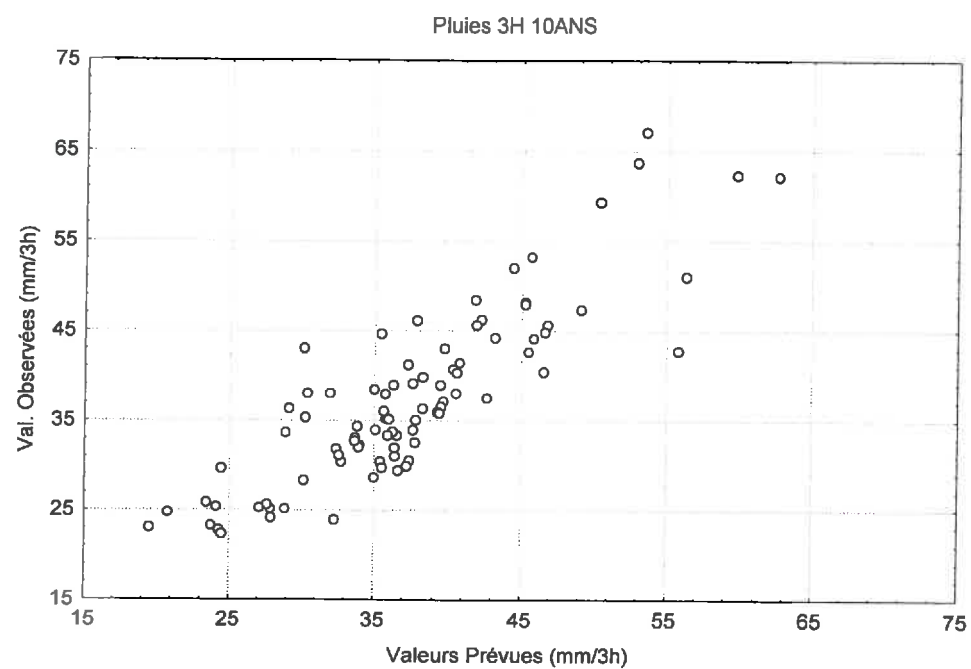
Pluies de 6h et 10 ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.70$

---



Pluies de 3h et 10 ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.75$

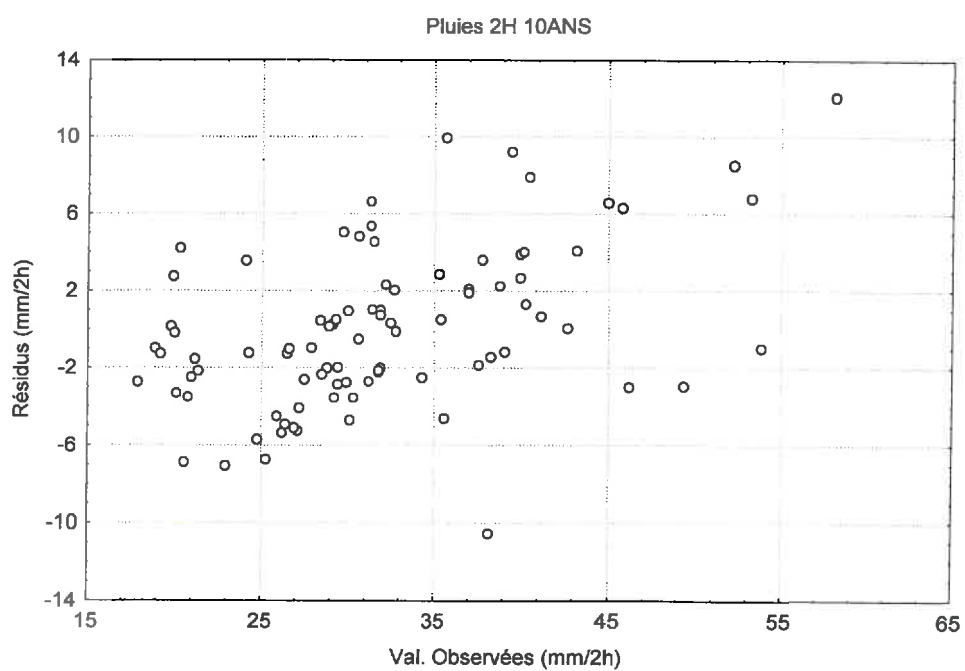
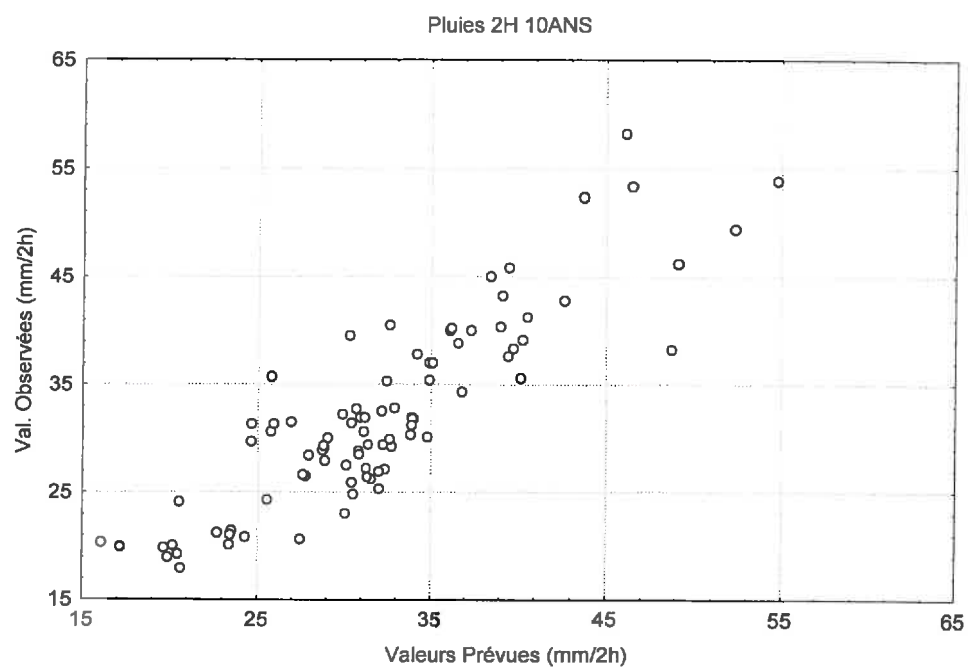
---





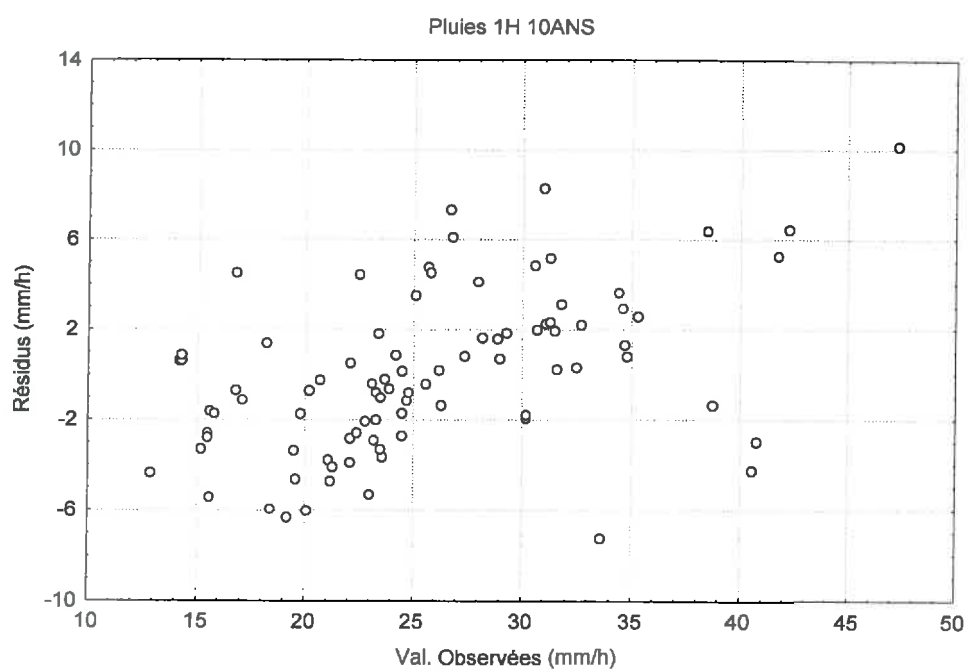
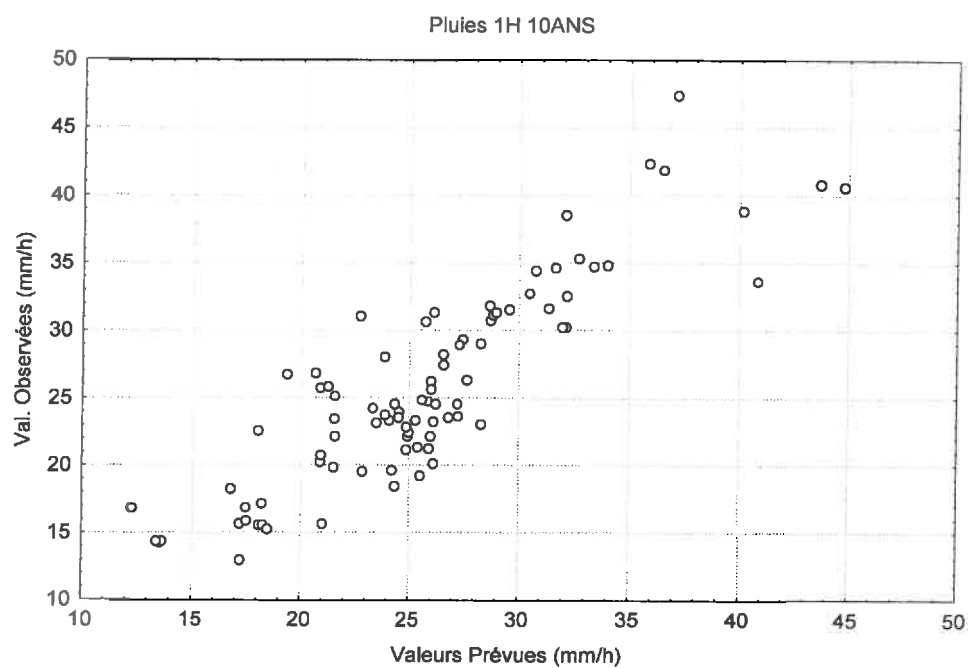
Pluies de 2h et 10ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.76$

---



Pluies de 1h et 10 ans  
(équation à 4 paramètres)  $R^2=0.76$

---



## **Annexe 7 :**

Régression linéaire multiple entre les  
paramètres pluviométriques et les  
paramètres morphométriques :

Graphes des valeurs observées en fonction des valeurs estimées

Graphes des résidus en fonction des valeurs observées

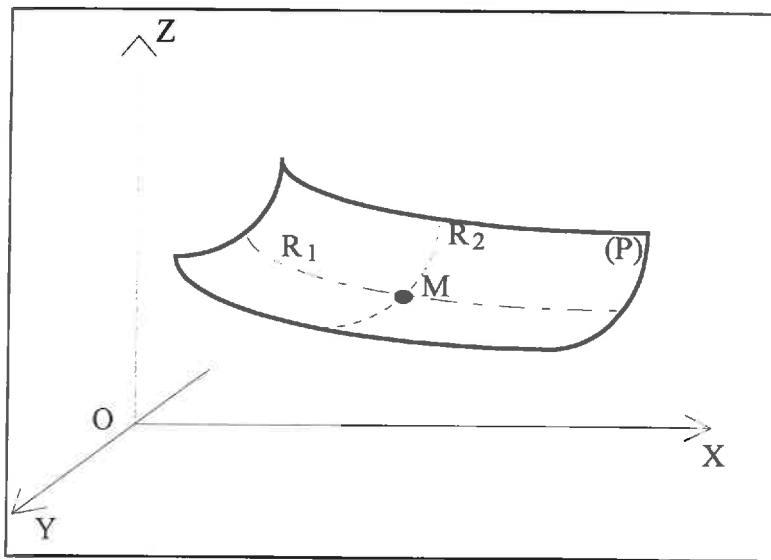
$$L = \frac{r}{\sqrt{1+p^2+q^2}}, \quad M = \frac{s}{\sqrt{1+p^2+q^2}}, \quad N = \frac{t}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \text{ (coefficients de Gauss)} \quad (10)$$

Les courbures des sections principales normales (i.e.  $\frac{1}{R_1}$  et  $\frac{1}{R_2}$ ) sont obtenues en résolvant une équation du second degré :

$$(EG - F^2)\frac{1}{R^2} + (2FM - EN - GL)\frac{1}{R} + (LN - M^2) = 0 \quad (11)$$

- convexe (rayons de courbure positif), la station est sur une bosse.

Ce sont les rayons de courbure principale qui ont été évalués. En effet, en chaque point d'une surface, il existe deux directions perpendiculaires entre elles dans le plan tangent pour lesquelles la courbure  $\frac{1}{R}$  admet un maximum et un minimum. On note  $\frac{1}{R_1}$  et  $\frac{1}{R_2}$  les valeurs de la courbure correspondant à ces directions (cf. Figure 6).



*Figure 6 : Schéma représentant les directions des rayons de courbure principale au point M de la surface P*

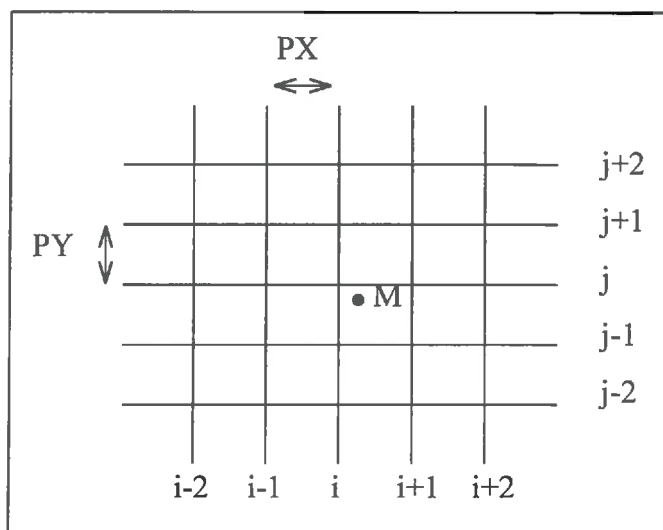
Les rayons de courbure ont été évalués à partir des surfaces  $P_i(X,Y)$ . Nous obtenons 10 variables estimées pour les différents pas de MNT et notées **RMINi** et **RMAXi** ( $i=1, 5$ ).

Dans ce qui suit, nous rappelons rapidement comment évaluer les rayons de courbure, lorsque l'on connaît l'équation d'une surface dans l'espace (SMIRNOV, 1970).

On considère l'équation d'une surface dans l'espace par rapport aux axes de coordonnées X, Y et Z sous la forme explicite  $Z=f(X,Y)$ . On note :

$$p = \frac{\partial f}{\partial X}, \quad q = \frac{\partial f}{\partial Y}, \quad r = \frac{\partial^2 f}{\partial^2 X}, \quad s = \frac{\partial^2 f}{\partial X \partial Y}, \quad t = \frac{\partial^2 f}{\partial^2 Y}$$

et  $E = 1 + p^2, \quad F = p \times q, \quad G = 1 + q^2,$



On peut alors définir les tangentes des angles  $\theta$  et  $\phi$  dans les deux cas :

$$\tan(\theta) = \sqrt{DX^2 + DY^2} \quad \text{avec } 0^\circ < \theta < 90^\circ \quad (8)$$

$$\tan(\phi) = \frac{DX}{DY} \quad \text{avec } 0^\circ < \phi < 360^\circ \text{ selon le signe de } DX \text{ et } DY \quad (9)$$

Ces deux tangentes ont été calculées pour 5 pas de MNT et pour 9 et 25 points environnants, ce qui fournit 20 variables. Les variables sont notées : **TAN\_PHI1i** et **TAN\_TETA1i** lorsque l'estimation se fait sur 9 points ( $i=1, 5$ ) et **TAN\_PHI2i** et **TAN\_TETA2i** lorsque l'estimation se fait sur 25 points.

Le problème rencontré lorsque l'on évalue la tangente d'un angle est que les valeurs prises deviennent très grandes lorsque l'angle s'approche de  $90^\circ$ , alors que les valeurs de tangentes sont en général faibles ( $\tan(45^\circ)=1$ ,  $\tan(80^\circ)=5.67\dots$ ). Pour notre échantillon de postes de mesure, les variables calculées ont une moyenne et un écart type faibles mais quelques valeurs sont très fortes.

## 5. Les rayons de courbure principale et leurs directions

Les rayons de courbure principale quantifient le fait que le site soit :

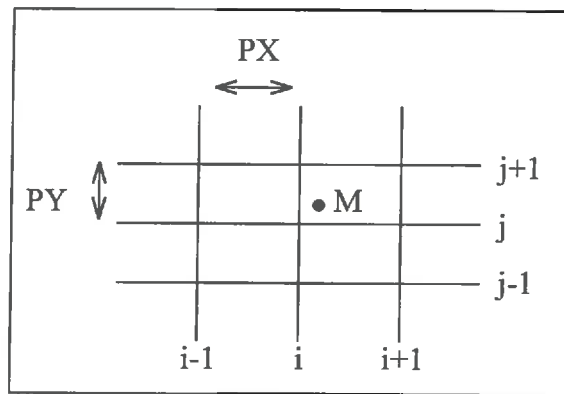
- concave (rayons de courbure négatif), la station est dans un creux,

① Voisinage de 9 points

$$DX = \frac{Z(i+1, j-1) - Z(i-1, j-1) + 2 \times (Z(i+1, j) - Z(i-1, j)) + Z(i+1, j+1) - Z(i-1, j+1)}{8 \times PX}$$

$$DY = \frac{Z(i-1, j+1) - Z(i-1, j-1) + 2 \times (Z(i, j+1) - Z(i, j-1)) + Z(i+1, j+1) - Z(i+1, j-1)}{8 \times PY}$$

(5)



② Voisinage de 25 points

Le gradient sur un voisinage 5\*5 s'écrit comme la différence des colonnes i-1 et i+1 et i-2 et i+2 :

$$DX = \frac{1}{2} \left\{ \frac{DC(i+1) - DC(i-1)}{9 \times 2 \times PX} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{DC(i+2) - DC(i-2)}{9 \times 4 \times PX} \right\}$$

avec  $DC(i) = Z(i, j+2) + 2 \times Z(i, j+1) + 3 \times Z(i, j) + 2 \times Z(i, j-1) + Z(i, j-2)$  (6)

Le calcul de DY est identique à l'aide d'une fonction DL(j) :

$$DY = \frac{1}{2} \left\{ \frac{DL(j+1) - DL(j-1)}{9 \times 2 \times PY} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{DL(j+2) - DL(j-2)}{9 \times 4 \times PY} \right\}$$

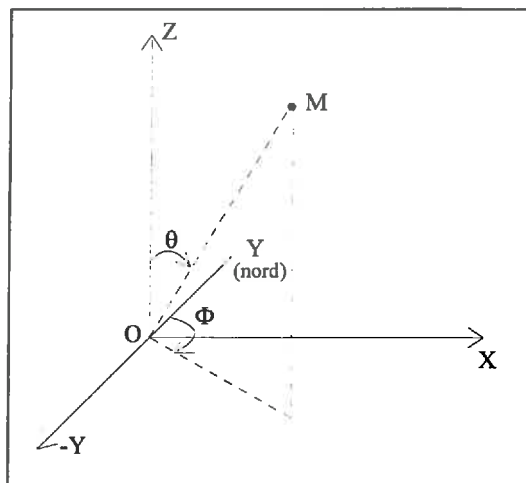
avec  $DL(j) = Z(i-2, j) + 2 \times Z(i-1, j) + 3 \times Z(i, j) + 2 \times Z(i+1, j) + Z(i+2, j)$  (7)

## 4. Pentes et azimuts

On introduit ici une autre définition de la pente et de l'orientation inspirée de LEEYANANIJA (1992). Elle s'appuie sur les 9 ou 25 altitudes des points environnant le point M. Ces altitudes sont prises en compte pour évaluer des gradients de hauteur suivant les axes X et Y.

On peut déterminer en chaque point M deux angles caractérisant la normale à la surface (cf. Figure 5) :

- $\theta$  : angle par rapport à la verticale (il représente la pente),
- $\phi$  : angle par rapport au nord (il représente l'azimut).

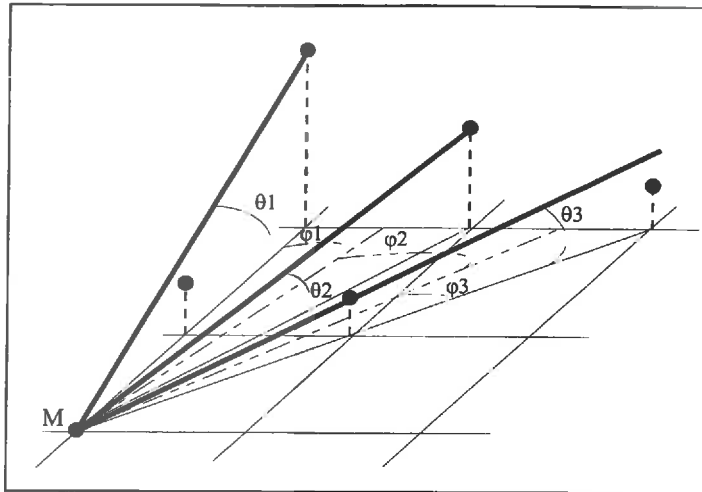


*Figure 5 : Définition des angles  $\theta$  (pente) et  $\phi$  (azimut par rapport au nord)*

Le vecteur normal à la surface  $Z(X,Y)$  peut être obtenu par le produit vectoriel de deux vecteurs non colinéaires du plan tangent. Si DX et DY sont les gradients de hauteur suivant les axes X et Y de la grille du MNT, les vecteurs  $(1,0,DX)$  et  $(0,1,DY)$  sont deux vecteurs parallèles au plan tangent, et leur produit vectoriel  $N1=(-DX,-DY,1)$  sera un vecteur normal à la surface.

Les formules de calcul de DX et DY sont données dans la suite pour 9 ou 25 points environnants. PX et PY sont les pas de la grille du MNT suivant les axes X et Y, et les  $Z(i,j)$  sont les altitudes des points voisins du poste.

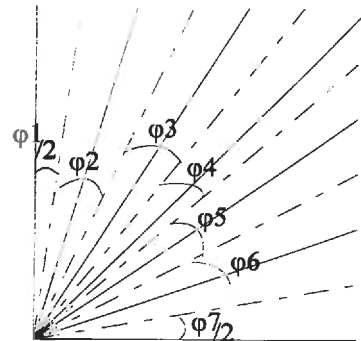




*Figure 4 : Calcul de TG sur un angle de  $\pi/4$  (extrait LABORDE, 1984)*

Nous avons évalué différentes tangentes :

- tangente Nord-Est (TNE) :  $k_1=1$  et  $k_2=7$
- tangente Nord-Ouest (TNO) :  $k_1=19$  et  $k_2=1$
- tangente Sud-Est (TSE) :  $k_1=7$  et  $k_2=13$
- tangente Sud-Ouest (TSO) :  $k_1=13$  et  $k_2=19$
- tangente sur tout l'horizon (TT) :  $k_1=1$  et  $k_2=24$
- une tangente maximale **TMAX** qui est la valeur maximale des  $\tan\theta_i$ ,
- une tangente minimale **TMIN** qui est la valeur minimale des  $\tan\theta_i$ .



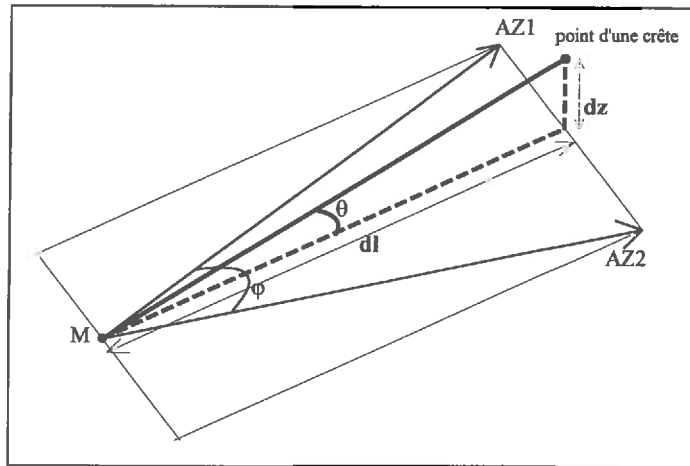
La tangente totale **TT** permet de caractériser un horizon qui peut être « en moyenne bouché » ou « ouvert ». Les tangentes **TNE**, **TNO**, **TSO** et **TSE** ont le même rôle pour des portions d'horizon. **TMAX** et **TMIN** repèrent respectivement le point le plus haut et le point le plus bas du relief environnant la station.

Comme pour les paramètres altimétriques, nous avons utilisé 5 pas de MNT ; ce qui nous conduit à définir 35 variables dans ce cas (**TNE<sub>i</sub>**, **TNO<sub>i</sub>**, ...,  $i=1, 5$ ).

### 3. Caractérisation de l'encaissement d'un site

Pour comprendre pourquoi les variables suivantes ont été définies, supposons que nous nous trouvions en un point M à l'abri d'une crête montagneuse (cf. Figure 3). L'influence de cette crête est d'autant plus forte qu'elle est élevée par rapport à M (dénivelée dz) et qu'elle en est proche (distance dl). Pour tenir compte de ces deux aspects, on fait intervenir la tangente de l'angle  $\theta$  :  $\tan \theta = dz/dl$ .

De plus, l'encaissement d'un site ou son exposition aux vents dominants peut se caractériser par l'angle solide sous lequel on voit l'horizon entre deux azimuts limites AZ1 et AZ2.



*Figure 3 : Définition des angles  $\theta$  et  $\varphi$  à partir desquels on caractérise un site M par l'angle solide sous lequel on voit l'horizon (extrait LABORDE, 1984)*

Pour quantifier ces aspects, LABORDE (1984) a défini la fonction tangente. A partir des 25 noeuds voisins du point M (cf. Figure 4), les tangentes moyennes par quadrant sont calculées suivant la formule :

$$TG = \frac{\left[ \frac{\varphi_i}{2} \times \tan(\theta_i) \right]_{k_1} + \left[ \sum_{i=k_1+1}^{k_2-1} \varphi_i \times \tan(\theta_i) \right] + \left[ \frac{\varphi_i}{2} \times \tan(\theta_i) \right]_{k_2}}{\left[ \frac{\varphi_i}{2} \right]_{k_1} + \left[ \sum_{i=k_1+1}^{k_2-1} \varphi_i \right] + \left[ \frac{\varphi_i}{2} \right]_{k_2}} \text{ avec } \tan(\theta_i) = \frac{dz_i}{l_i} \quad (4)$$

## 2. Paramètres d'exposition liés aux altitudes lissées

L'évaluation des altitudes **FA**, **FB** et **FC** nécessite la définition de l'équation de surfaces  $P_1(X,Y)$ ,  $P_2(X,Y)$  et  $P_3(X,Y)$ . Pour caractériser l'exposition d'un point M, nous évaluons les dérivées par rapport à X et à Y de  $P_1(X,Y)$ ,  $P_2(X,Y)$  et  $P_3(X,Y)$  (SLIMANI, 1985) :

- $\frac{\partial P_1(X,Y)}{\partial X}$ ,  $\frac{\partial P_1(X,Y)}{\partial Y}$ , noté **x\_exp\_FA** et **y\_exp\_FA**,
- $\frac{\partial P_2(X,Y)}{\partial X}$ ,  $\frac{\partial P_2(X,Y)}{\partial Y}$ , noté **x\_exp\_FB** et **y\_exp\_FB**,
- $\frac{\partial P_3(X,Y)}{\partial X}$ ,  $\frac{\partial P_3(X,Y)}{\partial Y}$ , noté **x\_exp\_FC** et **y\_exp\_FC**.

Ces dérivées sont des tangentes à la surface  $P_i(X,Y)$  : tangentes suivant OX et OY. Elles dépendent du choix initial de l'orientation des axes (OX, OY) : ce sont en fait les projections par rapport à X et à Y de la normale N à la surface  $P_i(X,Y)$  (respectivement  $P_2(X,Y)$  et de  $P_3(X,Y)$ ).

En utilisant les différents pas de MNT, nous obtenons 30 dérivées, notées :

**x\_exp\_FAi, y\_exp\_FAi, x\_exp\_FBi, y\_exp\_FBi, x\_exp\_FCi, y\_exp\_FCi** (i=1, 5).

Les signes des valeurs prises par ces dérivées en chaque point sont liés à l'orientation du repère choisi. Dans notre cas, les X croissent positivement vers l'Est et les Y croissent positivement vers le Nord. Alors :

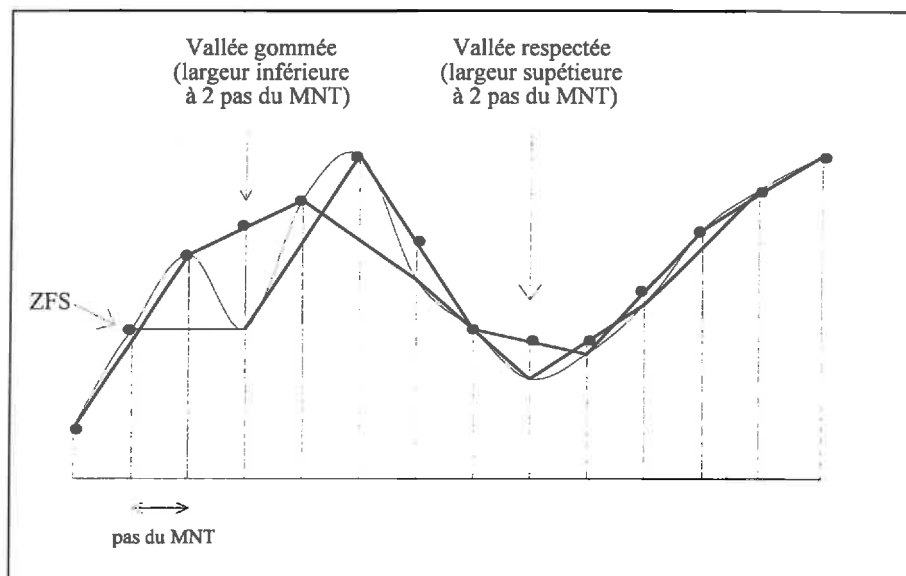
- si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial X} < 0$ , le site est exposé à l'Est,
- si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial X} > 0$ , le site est exposé à l'Ouest,
- si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial Y} < 0$ , le site est exposé au Nord,
- si  $\frac{\partial P_i(X,Y)}{\partial Y} > 0$ , le site est exposé au Sud.

déplacement des masses d'air. Les pluies considérées étaient les hauteurs de pluies moyennes annuelles dans les Vosges.

La définition de cette altitude est la suivante. Pour calculer l'altitude ZFS en M, on se ramène au noeud de la grille le plus proche et on retient la valeur maximale parmi :

- la cote réelle à ce noeud,
- les quatre cotes obtenues par interpolation linéaire à partir des huit autres noeuds les plus proches.

Comme le montre la Figure 2, cela revient à supprimer les vallées dont la largeur est inférieure à 2 fois le pas du MNT.



*Figure 2 : Effet de l'emploi de la cote ZFS pour des vallées de largeur supérieure ou inférieure à 2 fois le pas du MNT (extrait LABORDE, 1984)*

Cette cote a été calculée pour différents pas de MNT (525 m, 1050 m, 1575 m, 2100 m et 2625 m), ce qui permettra d'évaluer la largeur des vallées qui affectent les pluies extrêmes dans notre cas. On a donc 5 valeurs de ZFS : ZFS1, ZFS2, ZFS3, FZS4 et ZFS5.

Finalement, les 31 paramètres altimétriques définis permettent de voir à quelle distance l'altitude environnant la station peut éventuellement avoir un effet. De plus, comme le degré de précision diminue quand le pas du MNT augmente, nous pourrions apprécier l'influence du relief. En effet, le relief peut intervenir dans ses détails les plus fins ou non.

la fonction  $Z(X,Y)$  est approchée par une fonction polynomiale  $P_2(X,Y)$  dont le degré est 16. Cela s'écrit :

$$P_2(X,Y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k b_{ij} X^i Y^j \text{ avec } k < 4$$

$$\text{avec } \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \left[ P_2(X_i, Y_j) - Z(X_i, Y_j) \right]^2 \text{ minimale} \quad (3)$$

Comme précédemment, l'altitude **FB** en M est la valeur de  $P_2(X,Y)$  au point M.

#### 1.4. Altitude FC

Cette altitude est une approximation de Lagrange basée sur les 49 noeuds les plus proches de M. Dans ce cas, la surface sera notée  $P_3(X,Y)$ .

Les altitudes **FA<sub>9</sub>**, **FA<sub>25</sub>**, **FA<sub>49</sub>**, **FB** et **FC** sont évaluées à partir de différents pas de MNT : 525 m, 1050 m, 1575 m, 2100 m et 2625 m. Ainsi, nous avons 5 valeurs pour chaque paramètre, par exemple **FB1**, **FB2**, **FB3**, **FB4** et **FB5**. **FB<sub>i</sub>** est la valeur de **FB** obtenue par interpolation de Lagrange basée sur les 25 noeuds les plus proches de la station pour un MNT de pas  $i \times 525$  m.

25 variables représentent des altitudes lissées, elles sont notées :

**FA<sub>9</sub>1**, **FA<sub>9</sub>2**, **FA<sub>9</sub>3**, **FA<sub>9</sub>4**, **FA<sub>9</sub>5**, **FA<sub>25</sub>1**, **FA<sub>25</sub>2**, **FA<sub>25</sub>3**, **FA<sub>25</sub>4**, **FA<sub>25</sub>5**,  
**FA<sub>49</sub>1**, **FA<sub>49</sub>2**, **FA<sub>49</sub>3**, **FA<sub>49</sub>4**, **FA<sub>49</sub>5**, **FB1**, **FB2**, **FB3**, **FB4**, **FB5**, **FC1**, **FC2**, **FC3**, **FC4**, **FC5**.

#### 1.5. Altitude ZFS

Cette altitude est définie à partir d'une étude purement pluviométrique. La définition s'appuie sur le fait que ce sont les sommets environnant un point qui entraînent les déplacements verticaux de l'air, c'est-à-dire ceux générateurs de pluies orographiques. Ainsi, SCHERER (1977) a appliqué une méthode de lissage des altitudes qui lui a permis de conclure que seules les vallées dont la largeur est de l'ordre de 5 km et plus, affectent le

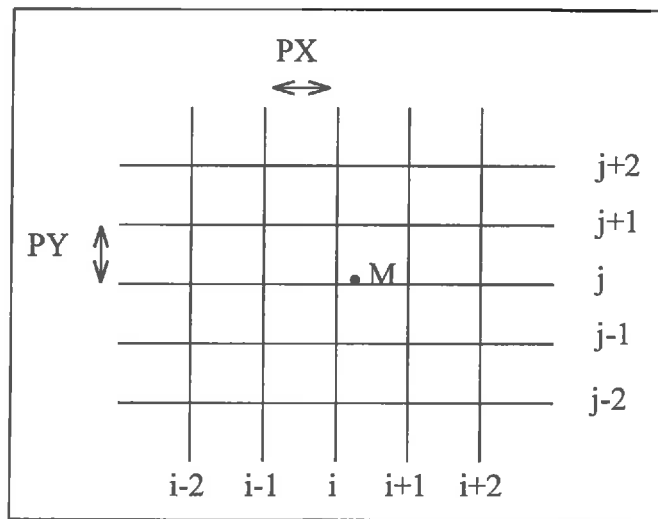
Les coefficients  $a_{ij}$  de ce polynôme de degré 4 en X et Y sont obtenus en égalant les altitudes des points de la grille aux équations de  $(P_1)$  en ces points :

$$P_1(X_m, Y_n) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 a_{ij} X_m^i Y_n^j = Z(X_m, Y_n) \text{ pour } m \text{ et } n \text{ variant de } 1 \text{ à } 4 \quad (2)$$

L'altitude du point M sera alors la valeur prise par  $(P_1)$  en M. Dans le cas général où M n'est pas confondu avec un noeud du réseau,  $FA_{25}$  est légèrement lissée par rapport à sa cote réelle Z.

Le calcul a aussi été fait en considérant :

- les 9 noeuds les plus proches de M (variable notée  $FA_9$ )
- et les 49 noeuds les plus proches de M (variable notée  $FA_{49}$ ).



*Figure 1 : Points utilisés pour le calcul de  $FA_{25}$*

### **1.3. Altitude FB**

Cette altitude est une approximation de Lagrange basée sur les 25 noeuds les plus proches de M. Nous n'imposons plus à la surface de passer par les différents points sélectionnés, mais de s'en approcher le plus possible au sens des moindres carrés. Dans ce cas,

Dans les calculs qui suivent, la position de chaque point M est assimilée à celle du noeud de la grille de MNT le plus proche. Ainsi, l'erreur commise augmente avec le pas du MNT.

## 1. Paramètres altimétriques

Lorsque la pluviométrie est liée à l'altitude, l'altitude à prendre en compte n'est pas forcément celle des points. On peut définir des altitudes fictives, liées à l'environnement proche, aux altitudes des sommets environnants... Ces altitudes fictives peuvent être :

- inférieures à l'altitude du point si l'environnement est plutôt bas,
- supérieures à l'altitude du point si l'environnement est plutôt élevé,
- égales à l'altitude du point si l'environnement est assez plat.

Les 5 définitions retenues pour l'altitude font plus ou moins intervenir les altitudes environnantes. Elles sont décrites par ordre de « lissage » croissant.

### 1.1. Altitude « réelle » Z (notée $z_{réelle}$ )

C'est une valeur ponctuelle lue sur une carte IGN.

### 1.2. Altitude FA

Cette altitude ainsi que les deux suivantes **FB** et **FC** ont été utilisées par LABORDE (1984) et SLIMANI (1985).

On approche la surface topographique  $Z(X,Y)$  autour d'un point M par une fonction polynomiale  $P_1(X,Y)$ . Pour l'évaluation de  $P_1(X,Y)$ , les 25 noeuds de la grille les plus proches voisins de M sont pris en compte (cf. Figure 1). Nous cherchons à caler sur les 25 points une surface ( $P_1$ ) d'équation :

$$P_1(X, Y) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 a_{ij} X^i Y^j \quad (1)$$

## **Annexe 6 :**

**Paramètres morphométriques locaux  
caractérisant un site**



Carte des écarts type de l'erreur d'estimation  
pour les gradex de 24h  
obtenue par krigeage (pas de calcul 5.250km)

