

Variabilité des caractéristiques statistiques des pluies extrêmes dans les Alpes françaises

Variability of the statistical characteristics of extreme rainfall values in the French Alps

A. KIEFFER¹ et P. BOIS¹

Reçu le 21 février 1996, accepté le 13 mars 1997*.

SUMMARY

For many development projects, it is important to have some idea of the magnitude of extreme precipitation events that may occur for different probability levels and for time steps of less than 24 hours. Unfortunately most existing raingauge networks measure precipitation only on a daily basis.

In the French Alps, 65 raingauge stations provide precipitation data over short time steps (1 to 24 hours). This very divers network, managed jointly by the French electrical utility (Electricité de France), the national weather office (Météorologie Nationale) and the regional water resources service (SRAE), provides a valuable basis for investigating possible relationships between the characteristics of extreme precipitation for 24-hour periods and those for shorter time periods. The results of such a study, although of course valid only for the investigated area, should provide an indication on whether or not it is possible to calculate the characteristics of rainfall over short time steps from much denser 24-hour raingauge networks.

A statistical analysis was carried out to estimate extreme rainfall values for return periods of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years and for time steps of 1, 2, 3, 6, 12 and 24 hours. Each station is therefore associated with 36 precipitation values as a function of return period and duration.

A variable referred to as the *gradex* (gradient of the exponential) is defined, reflecting the change in precipitation values as a function of the return period for each time step and each station. The definition of this variable is based on the fact that Gumbel's law is used to represent the frequency distribution of extreme rainfalls over time intervals extending from 1 hour up to several days, which is equivalent to assuming an exponentially decreasing frequency distribution for extreme rainfalls for a given time step and a given location. When

1. Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (INPG, UJF, CNRS, URA 1512), BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 décembre 1997.

plotted on Gumbel paper, the right-hand part of this distribution has a slope equal to the parameter "a" of *Gumbel's law*:

$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left\{ -\frac{x - x_0}{a} \right\} \right\}$$

where $F(x)$ is the probability of occurrence of a value less than x . The parameter "a" is the *gradex*, and has the same dimensions as x . It can be determined with the method of moments:

$$a(t) = 0.78 \times \sigma_x$$

where σ_x is the standard deviation of the sample.

This definition is equivalent to taking the slope of the line passing through the points corresponding to $T = 20$ and 100 years on a Gumbel plot. For each of the stations, we can evaluate six *gradex* values, *i.e.* one for each time step. In this way, for each of the 65 stations and for each time step, we obtain the *gradex* values and estimated precipitation values for return periods from 2 to 100 years.

Several types of curves were tested in order to determine possible relations between the *gradex* values for different time steps, including linear, power law, exponential and logarithmic relationships. For the French Alps, the best fit was obtained with a linear relationship and we calculated the corresponding correlation coefficients. We found that the *gradex* values were well correlated for adjacent time steps, but not for those that were very different. In particular, it would appear to be impossible to deduce *gradex* values for very small time steps (1 to 6 hours) from the 24-hour *gradex*. The 24-hour *gradex* accounts for only 17% of the variance of the 1-hour *gradex*, while it accounts for 92% of the 12-hour *gradex*. Using a linear relationship, the only *gradex* values that can be estimated to any degree of accuracy from the 24-hour value are those corresponding to time steps greater than 6 hours.

To check these results, we carried out a similar study after dividing the test area into four regions. The extreme precipitation values for these regions presented similar characteristics (same order of magnitude of precipitation and *gradex* values). For each region, we looked for significant linear relationships between the *gradex* values for the different time steps. The conclusions were the same as when we considered the entire area, *i.e.* the relationship between the *gradex* values of short time steps and the 24-hour values is very poor.

We have shown that no simple relationship exists to deduce values for short time steps from those measured for long time steps. The problem we posed at the outset therefore appears to have no straight-forward solution. A network of raingauges measuring daily precipitation values cannot be used to determine the statistical characteristics of the precipitation for much shorter time steps, *i.e.* less than 6 hours. The only solution would be to use devices capable of measuring the precipitation over short time intervals, for instance recording raingauges or automatic stations linked to data acquisition systems. Unfortunately such devices have not been in use for a long time and provide records for periods rarely exceeding ten years.

In conclusion, this study reveals the limits for the extrapolation of extreme daily rainfall characteristics to shorter time steps.

Key-words: extreme rainfall, *gradex*, time step, return period.

RÉSUMÉ

Le but de cet article est la recherche de liaisons entre les précipitations extrêmes de pas de temps de 1 à 24 heures dans les Alpes Françaises. En particulier, il semble important de pouvoir déduire les valeurs pour de faibles pas de temps (1 h, 2 h...) de celles de forts pas de temps, 24 h en particulier. En effet, nous disposons actuellement de peu d'enregistrements historiques à pas de temps fin. En fait, le réseau de pluviographes utilisé est constitué de seulement 65 stations. Par contre, l'existence d'un réseau très dense de pluviomètres permet de déterminer les caractéristiques de pas de temps 24 h.

Pour ce faire, nous définissons une variable traduisant l'évolution des précipitations en fonction du temps de retour pour chaque pas de temps et chaque station : le *gradex*. Nous avons testé plusieurs types de relations pour lier les *gradex* des différents pas de temps entre eux : relation linéaire, puissance, exponentielle, logarithmique ; c'est la relation linéaire qui est la meilleure dans les Alpes Françaises. L'étude des relations entre les *gradex* des différents pas de temps montre que les pas de temps voisins sont bien corrélés entre eux, ce qui n'est plus le cas lorsque les pas de temps deviennent très distincts. Ces résultats sont confirmés par la définition de 4 régions homogènes par rapport aux précipitations extrêmes sur lesquelles nous testons l'éventualité de relations linéaires entre les *gradex* des différents pas de temps.

Finalement, nous avons mis en évidence l'absence de relations simples permettant de passer de pas de temps longs à des pas de temps faibles. Par contre, on peut passer sans trop d'erreur d'un pas de temps de 24 heures à celui de 12 heures ou 6 heures, résultat déjà fort intéressant.

Mots clés : précipitations extrêmes, *gradex*, pas de temps, temps de retour.

1 – INTRODUCTION

Dans le cadre d'un travail de recherche visant à quantifier les effets du relief sur la pluviométrie extrême des Alpes françaises, nous avons été amenés à étudier la variabilité des caractéristiques statistiques des pluies extrêmes en fonction du pas de temps dans cette région. Les pluies extrêmes dans les Cévennes et les Alpes ont fait l'objet de certaines études statistiques ou cartographiques (BLANCHET G. (1993), BOIS PH. *et al.* (1995), DESUROSNE I. (1992), THAO T.P. (1993)). D'autres travaux de recherche sur les relations entre la morphométrie et la pluviométrie extrême ont déjà été réalisés pour la Lorraine par LABORDE J.P. (1984), pour les Cévennes par SLIMANI M. (1985)... Dans notre cas, les pas de temps s'étendent de 1 heure à 24 heures, ce qui pose problème pour trouver un ensemble de données suffisant. Les relations entre caractéristiques des pluies extrêmes selon les pas de temps ont déjà été étudiées dans certaines régions, notamment en Lorraine par ESTORGE J.L. *et al.* (1980).

Pendant, cette étude est d'importance, puisque les précipitations extrêmes de courte durée sont la cause principale des crues brutales et catastrophiques qui peuvent se produire sur un bon nombre de petits bassins versants du Massif alpin français. Elles jouent également un rôle très significatif dans le déclenchement des laves torrentielles et peuvent ainsi être à l'origine d'autres phénomènes dangereux, notamment en hiver, lorsqu'elles tombent sous forme de neige.

Actuellement, le réseau de mesure des pluies à pas de temps fin dont nous disposons est constitué seulement de 65 stations de durée significative. Pour un domaine aussi important que les Alpes Françaises, ce nombre est faible (la superficie du domaine est de plus de cent mille km²).

Cependant, nous pouvons disposer d'une information beaucoup plus dense en prenant en compte les pluviomètres situés sur le domaine. Les mesures associées permettent de déduire les caractéristiques statistiques pour un pas de temps de 24 heures. Ainsi, le problème du manque de données peut être aisément pallié pour ce pas de temps de 24 heures. Malgré tout, il reste entier pour des pas de temps inférieurs à 24 heures, et en particulier pour les petits pas de temps (1 h, 2 h...). Ainsi, nous sommes amenés à nous interroger sur les relations qui peuvent exister entre les caractéristiques statistiques caractérisant le pas de temps de 24 heures et les pas de temps inférieurs.

Après une présentation du réseau de stations actuellement pris en compte dans notre étude, nous nous attacherons à décrire les données le concernant, ainsi que les principales caractéristiques statistiques que l'on peut en déduire, à savoir le gradex. Enfin, nous étudierons les relations entre le gradex de 24 h et ceux de pas de temps inférieurs. Pour ce faire, et après avoir mené cette étude sur l'ensemble du domaine, nous diviserons la région en zones homogènes par rapport au phénomène des précipitations extrêmes.

2 – PRÉSENTATION DU RÉSEAU DE STATIONS, DES DONNÉES FOURNIES ET DÉFINITION D'UN GRADEX DES PLUIES

2.1 Réseau de stations

Le réseau de stations de mesure des pluies à pas de temps fin dont nous disposons actuellement est constitué par 65 stations réparties sur l'ensemble des Alpes Françaises (*fig. 1*). Ces stations sont gérées par EDF, Météo Nationale et SRAE (Service Régional d'Aménagement des Eaux).

Un histogramme de répartition des stations en fonction de leur altitude (*fig. 2a*), montre que la gamme d'altitudes recouverte s'étend de 75 m à 1 780 m. Cependant, la plupart des stations ont entre 250 et 1 250 m d'altitude, ce qui ne traduit pas la répartition réelle des altitudes sur les Alpes (*fig. 2b*). Cela s'explique par le fait que les stations sont en général à proximité, voire dans les villages, donc en fond de vallées. On notera le manque de stations pour des altitudes supérieures à 2 000m.

2.2 Présentation des données fournies par EDF [Electricité De France-Division Technique Générale] et 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]

Dans le cadre du Contrat de Plan 1989-1993 entre l'État et la Région Rhône-Alpes, un programme d'étude et de recherche sur les risques naturels liés à la montagne a été mis en place avec pour thèmes principaux retenus les risques

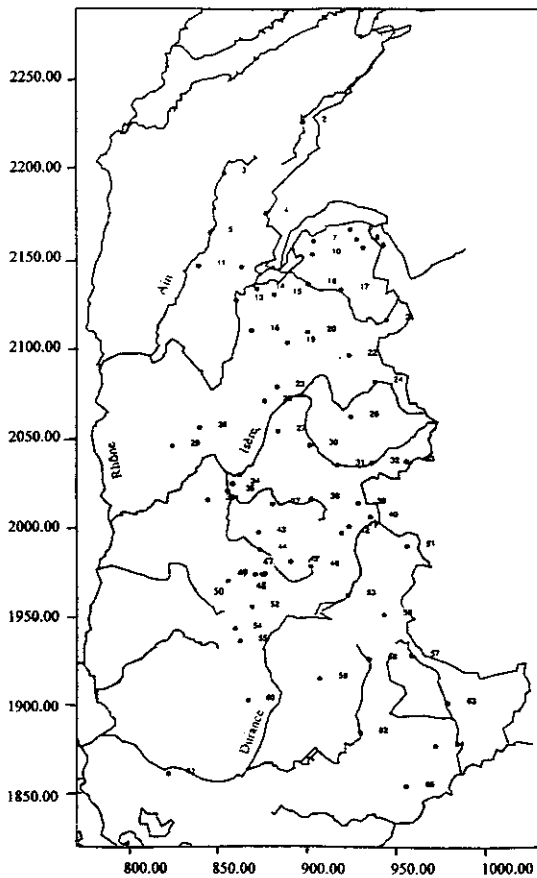


Figure 1 Carte de localisation des stations
(coordonnées en Lambert II étendu et en km).
Map showing the locations of the rain gauges.

liés aux mouvements de terrains, les risques de crues de rivière et de crues torrentielles, le risque sismique ainsi que le droit et la sociologie des risques. Ce programme a permis d'engager différentes actions de recherche dont celle de l'étude des courbes Intensités-Durée-Fréquence des précipitations de 1 à 24 heures dans les Alpes par EDF-DTG et CEMAGREF. Ainsi, l'ensemble du travail de dépouillement des enregistrements historiques a été effectué conjointement par EDF et CEMAGREF. Le traitement des chroniques a ensuite été assuré par EDF-DTG. La description de ces étapes est faite dans le rapport de contrat de Plan Etat-Région (Electricité de France (Division Technique Générale) / Région Rhône-Alpes (Préfecture de Région), 1993) et par GARCON R. et TOUTRASSE (1995).

Finalement, les données disponibles sous forme de tableaux sont les valeurs des précipitations (en mm) et les intensités horaires (en mm/h), pour des temps de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, et pour des durées de 1 h, 2 h, 3 h, 6 h,

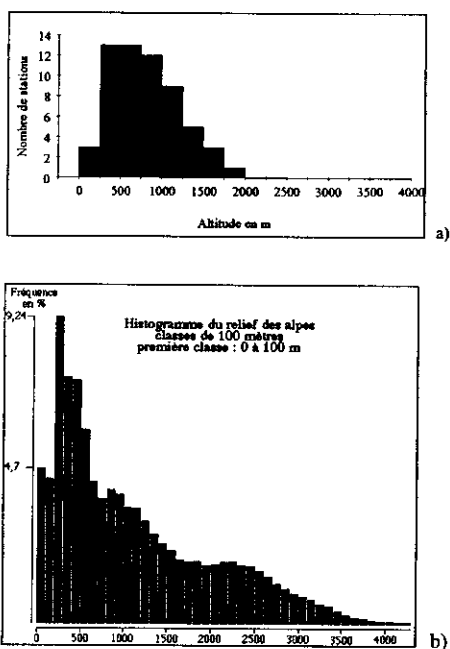


Figure 2 a) Histogramme de répartition des stations en fonction de leur altitude (classes de 250 m).
 b) Histogramme de répartition du relief sur les Alpes (classes de 100 m).
 a) Histogram showing the distribution of the stations with respect to elevation (250 m intervals).
 b) Histogram showing the distribution of relief throughout the Alps (100 m intervals).

12 h et 24 h. Ainsi, chaque station est caractérisée par 36 paramètres, c'est-à-dire 36 valeurs de précipitations ou d'intensités horaires en fonction du pas de temps et du temps de retour.

À partir de ces données, nous pouvons tracer sur papier de Gumbel les valeurs de précipitations extrêmes : nous obtenons une courbe pour chaque pas de temps t représentant les variations des précipitations en fonction du temps de retour T . La figure 3 montre un exemple de courbes obtenues pour une station.

2.3 Définition d'un gradex à partir des données disponibles

À partir des données disponibles, nous avons défini une variable traduisant l'augmentation des précipitations extrêmes en fonction du temps de retour pour un pas de temps et une station donnés (BULLETIN DU COMITÉ FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES, 1994). Cette variable est appelée *gradex* (gradient de l'exponentielle).

La définition de cette variable est basée sur le fait que l'on adopte la loi de Gumbel pour représenter la distribution fréquentielle des pluies extrêmes de durée 1 h à quelques jours, ce qui revient à admettre l'hypothèse de décrois-

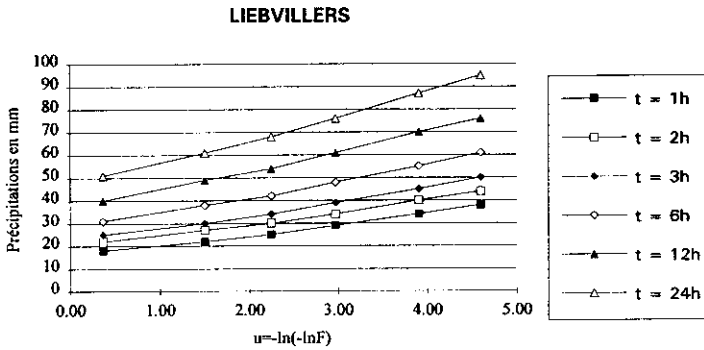


Figure 3 Représentation sur papier de Gumbel des valeurs des pluies aux temps de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour les différents pas de temps t et pour la station de Liebvillers, située en bordure des Alpes (u : variable réduite de Gumbel, F : probabilité au non-dépassement).

Gumbel plot of the 2, 5, 10, 20, 50 and 100 year rainfall values for different time steps t at the Liebvillers station, located on the edge of the Alps (u is the reduced Gumbel variable and F the probability of a value not being exceeded).

Remarque : $T = 2$ ans correspond à $u = 0.37$; $T = 5$ ans correspond à $u = 1.50$; $T = 10$ ans correspond à $u = 2.25$; $T = 20$ ans correspond à $u = 2.97$; $T = 50$ ans correspond à $u = 3.90$; $T = 100$ ans correspond à $u = 4.60$.

sance exponentielle de la fonction de répartition des précipitations extrêmes en un pas de temps fixé et pour un lieu donné. En effet, les fonctions de répartition des 65 stations ont dans l'ensemble un comportement assez bien exponentiel. La partie droite de cette distribution sur papier de Gumbel a une pente égale au paramètre a de la loi de Gumbel :

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left\{-\frac{x - x_0}{a}\right\}\right\} \tag{1}$$

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

Le paramètre a est le *gradex*, il a la même dimension que x . Il peut être déterminé, par exemple, par la méthode des moments :

$$a(t) = 0.78 \times \sigma_x \tag{2}$$

où σ_x est l'écart type de l'échantillon considéré (pluies maximales de pas de temps t).

On définit aussi le temps de retour T :

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \tag{3}$$

2.4 Variabilité spatiale du gradex selon les pas de temps

Pour une durée de 1 h, le gradex varie entre 1,8 mm/h (Vignotan, station 26 sur la figure 1) et 10,4 mm/h (Coursegoules, station 64 sur la figure 1), avec une moyenne de 5,0 mm/h ; ceux de 24 h varient entre 9,8 mm/24 h (Embrun, station 53 sur la figure 1) et 47,8 mm/24 h (Coursegoules, station 64 sur la figure 1), avec

une moyenne de 16,2 mm/24 h. Nous pouvons ainsi signaler la diversité importante des valeurs (rapport de 1 à 5 environ).

Nous avons réalisé par krigeage (DELHOMME J.P., 1978) des cartes des gradex aux différents pas de temps à partir des données des 65 stations (fig. 4 : exemple de carte obtenue).

Ces cartes mettent en évidence un noyau de stations au Centre-Est. Ce noyau est situé sur les parties les plus hautes des Alpes : de Bourg-St-Maurice (station 24 sur la figure 1) à La Condamine (station 56 sur la figure 1), à peu près. Il est formé par les isocourbes de valeurs faibles de gradex, pour tous les pas de temps.

Les valeurs de gradex augmentent lorsque l'on se déplace vers l'Ouest, le Nord et le Sud. Le Nord du domaine, peu doté en stations, correspond à des valeurs moyennes assez homogènes. Enfin, la partie Sud de la zone enregistre toujours les valeurs les plus fortes.

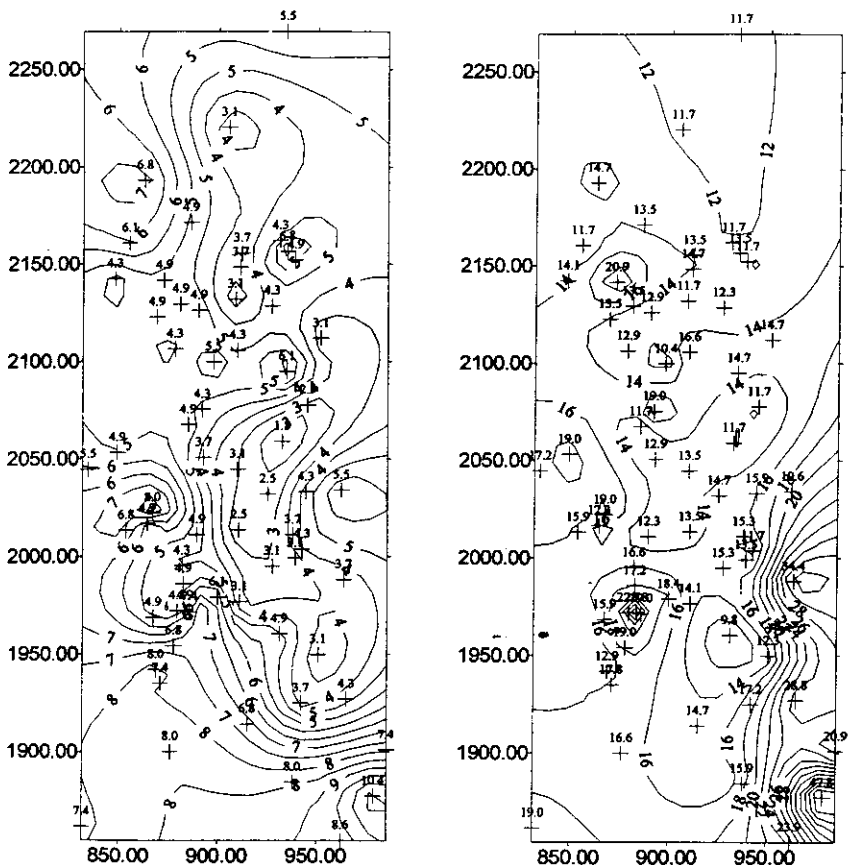


Figure 4 Cartes de krigeage des gradex de pas de temps 1 h (gauche) et 24 h (droite) (coordonnées en Lambert II étendu et en km).

Kriging map of gradex values for 1-hour time step (left) and 24 hours time-step (right).

Ces caractéristiques se retrouvent sur toutes les cartes. Cependant, pour les pas de temps longs, c'est-à-dire supérieurs à 6 h, certaines stations montrent des valeurs localement fortes. Ceci est probablement dû à des effets de site.

L'interprétation climatique sera faite lorsque des relations avec le relief seront mises en évidence. En ce qui concerne le pas de temps de 24 h, l'ajout de pluviomètres permettra une interprétation plus complète.

3 – VARIABILITÉ DES GRADEX EN FONCTION DU PAS DE TEMPS

Dans cette partie, nous cherchons à déterminer les liaisons entre les gradex aux différents pas de temps par des relations simples.

Dans un premier temps, nous analysons la pertinence de ces relations lorsque l'on considère l'ensemble du domaine d'étude. Dans un deuxième temps, ce domaine est divisé en 4 zones : 4 régions homogènes vis-à-vis des précipitations extrêmes. Alors, la meilleure relation obtenue sur l'ensemble du domaine est testée sur chacune des régions.

Nous étudierons en particulier les liaisons entre les gradex de 24 h et ceux de pas de temps inférieurs puisqu'il est possible d'obtenir une masse de données importante concernant les précipitations extrêmes au pas de temps de 24 heures grâce aux pluviomètres. Il serait donc intéressant de pouvoir déduire de ces données les caractéristiques du phénomène aux pas de temps plus faibles.

3.1 Variabilité des gradex sur l'ensemble de la zone des Alpes, en fonction du pas de temps

Nous avons étudié la variabilité en fonction du pas de temps des gradex sur l'ensemble du domaine étudié. Les statistiques sont effectuées sur les 65 stations dont nous disposons. Plusieurs modèles sont successivement envisagés : modèle linéaire, puissance, exponentiel, logarithmique, et ce en particulier de manière à déterminer l'existence d'une relation permettant de déduire des gradex de 24 h ceux de pas de temps différents.

3.1.1 Modèle linéaire

Dans un premier temps, nous cherchons à déterminer des relations linéaires entre les gradex des différents pas de temps, c'est-à-dire du type : $a(t') = \alpha(t, t')$ $a(t) + \beta(t, t')$; $a(t)$ est le gradex de pas de temps t et $a(t')$ le gradex de pas de temps t' . Pour x et y , nous disposons de 65 observations, c'est-à-dire les valeurs à t et t' des gradex aux 65 stations de mesure. Ainsi, nous avons déterminé l'ensemble des coefficients de corrélation entre les gradex des différents pas de temps (*tabl. 1*).

De manière générale, les pas de temps voisins sont bien corrélés entre eux et plus les pas de temps sont distincts, moins les relations linéaires sont bonnes.

En particulier, les gradex de pas de temps faibles (1 h, 2 h, 3 h) sont très mal corrélés avec ceux de 24 h. Les pourcentages de variance expliquée sont com-

Tableau 1 Coefficients de détermination R^2 entre les gradex des différents pas de temps.

Table 1 Determination coefficients R^2 for the correlation between the gradex values of different time steps.

t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 6 h	t = 12 h	t = 24 h	$R^2[a(t), a(t')]$
1	0,89	0,81	0,59	0,36	0,17	$t' = 1$ h
	1	0,94	0,82	0,60	0,36	$t' = 2$ h
		1	0,91	0,72	0,49	$t' = 3$ h
			1	0,91	0,73	$t' = 6$ h
				1	0,92	$t' = 12$ h
					1	$t' = 24$ h

pris entre 17 et 49, dans ce cas. 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 73 et 92.

Nous avons représenté les gradex de pas de temps 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h en fonction des gradex de 24 h, ainsi que les équations de corrélation linéaire obtenues dans ces cas (fig. 5). Comme le laissaient présager les coefficients de corrélation, les nuages de points obtenus sont de plus en plus dispersés quand le pas de temps représenté en fonction de celui de 24 h diminue.

Sur chacun des graphes, nous pouvons observer qu'un point se trouve toujours éloigné du reste du nuage. Il correspond à la station de Coursegoules (sud-est du domaine, station 64 sur la figure 1), où nous pensons qu'il existe des effets de site entraînant des intensités de précipitations très fortes. Ainsi, le point correspondant à cette station se distingue-t-il systématiquement des autres, ce qui a pour effet d'augmenter le coefficient de détermination entre les gradex, puisqu'il allonge le nuage de points. Le tableau 2 donne les coefficients de détermination entre les gradex des différents pas de temps et celui de 24 h, lorsque l'on élimine la station de Coursegoules des observations. Nous pouvons bien observer l'impact de cette station : par exemple, le gradex de 24 h explique 17 % de la variance du gradex de 1 h, alors que sans la station de Coursegoules, seul 5 % sont expliqués dans le même cas. Ceci vient appuyer la conclusion selon laquelle les gradex des faibles pas de temps sont mal liés à ceux de 24 h par une simple relation linéaire.

Finalement, il semble évident qu'une simple relation linéaire n'est pertinente que pour lier entre eux les gradex de pas de temps assez voisins.

3.1.2 Autres modèles

Dans un deuxième temps, nous nous sommes demandés si d'autres relations simples ne seraient pas plus pertinentes pour déterminer des liens entre les différents gradex et celui de pas de temps 24 h, en particulier.

Les relations testées sont des relations du type :

$$y = \alpha \times x^\beta \quad (1)$$

$$y = \alpha \times \ln(x) + \beta \quad (2)$$

$$y = \alpha \times \exp(x) + \beta \quad (3)$$

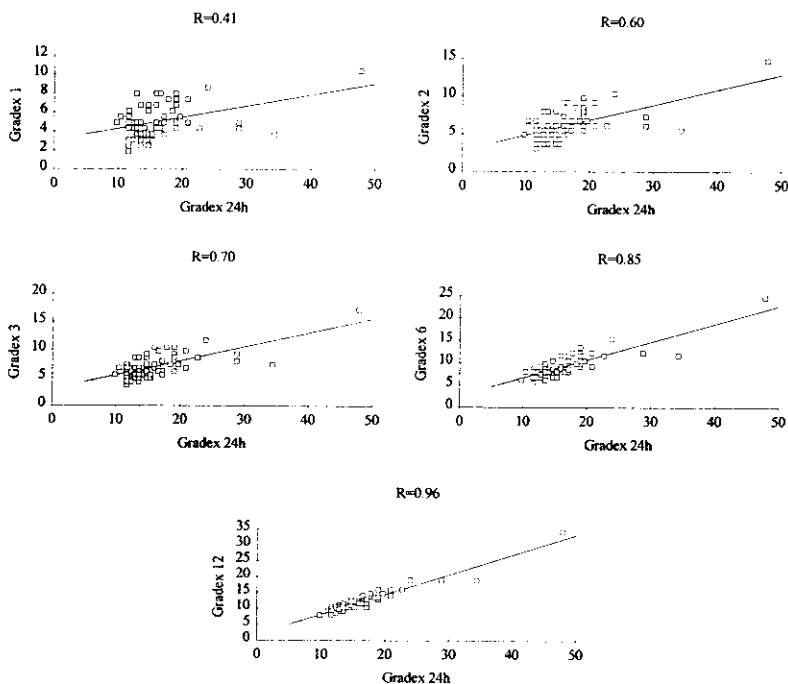


Figure 5 Tracé des gradex de pas de temps 1 h (mm/h), 2 h (mm/2 h), 3 h (mm/3 h), 6 h (mm/6 h), 12 h (mm/12 h) en fonction des gradex de 24 h (mm/24 h) et des droites de corrélation linéaire dans chacun des cas (R est le coefficient de corrélation linéaire associé).

Plots of the gradex values for time steps of 1 hour (mm/h), 2 hours (mm/2 h), 3 hours (mm/3 h), 6 hours (mm/6 h) and 12 hours (mm/12 h) as a function of the 24-hour gradex values (mm/24 h) and the linear correlation lines for each case (R is the corresponding linear correlation coefficient).

Tableau 2 Coefficients de détermination R^2 entre le gradex de pas de temps 24 h et les gradex des différents pas de temps, dans le cas où on exclut la station de Coursegoules (station 64 sur la figure 1) des statistiques.

Determination coefficients R^2 for the correlation between the gradex values of the 24-hour time step and those of the other shorter time steps, with the Coursegoules station (station number 64 from the figure 1) excluded from the statistics.

$R^2a(t), a(t')$	t = 1 h	t = 2 h	t = 3 h	t = 6 h	t = 12 h	t = 24 h
t' = 24 h	0,05	0,15	0,26	0,53	0,86	1

Dans chaque cas, la variable à expliquer y est un gradex de pas de temps t inférieur à 24 h et la variable x est le gradex de 24 h.

Pour comparer les résultats obtenus, nous avons représenté les coefficients de détermination obtenus dans chacun des cas. Pour chacune des relations, l'évolution de ce coefficient en fonction du pas de temps est tracée (fig. 6). Nous

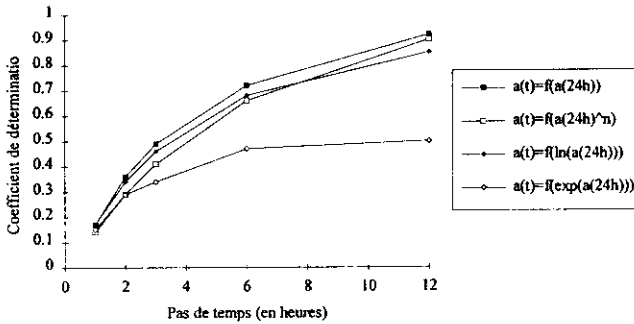


Figure 6 Évolution du coefficient de détermination en fonction du pas de temps, pour différentes relations entre les gradex de pas de temps t (soit $a(t)$) et celui de 24 h (soit $a(24h)$).

Determination coefficient versus time step, for various types of relations between the gradex values of the different time steps t (i.e. $a(t)$) and the 24-hour gradex (i.e. $a(24h)$).

pouvons observer que quel que soit le type de relation envisagée, une simple relation linéaire explique toujours plus de variance de la variable à expliquer que les autres relations. Ces relations ne sont donc pas meilleures que la relation linéaire.

3.1.3 Conclusion

Dans cette partie, où nous considérons la région des Alpes dans sa totalité, nous avons vu que les gradex de pas de temps proches sont bien corrélés entre eux. Ce n'est plus le cas lorsque les pas de temps deviennent très différents. En particulier, nous avons mis en évidence le fait qu'il est difficile de déduire, par de simples relations, des gradex de pas de temps inférieurs à 3 h de ceux de 24 h. Par contre, il est possible de déterminer des gradex de pas de temps supérieurs : 6 h ou plus, à partir de ceux de 24 h, sans trop d'imprécision. Dans ce cas, le meilleur type de relation que nous avons mis en évidence est le modèle linéaire.

3.2 Variabilité des gradex dans 4 régions définies sur les Alpes, en fonction du pas de temps

En vue de confirmer ou éventuellement d'infirmer les conclusions précédentes, nous avons cherché à définir des zones homogènes par rapport au phénomène des précipitations extrêmes. Sur chacune de ces zones, nous étudions ensuite les liaisons linéaires entre les gradex des différents pas de temps. Seul le modèle linéaire a été envisagé, puisque c'est celui qui s'est révélé être le meilleur quand nous travaillions sur le domaine complet.

Grâce à la cartographie des précipitations et des gradex, nous avons mis en évidence 4 groupes de stations homogènes sur la région étudiée (fig. 7). De plus, nous avons appliqué une Analyse Factorielle Discriminante (AFD) à ce problème (KIEFFER, 1995). Une description détaillée de cette méthode est faite par BOIS PH. (1976). Les variables sont l'intensité de pas de temps 1 h et de temps de retour 20 ans, le gradex de pas de temps 1 h et le coefficient de Montana. En effet, ces

trois variables suffisent à décrire les caractéristiques des pluies extrêmes pour les différents pas de temps avec une loi de Gumbel.

Pour une station donnée, le coefficient de Montana traduit la variation du gradex en fonction du pas de temps t . Ce coefficient est défini par la formule suivante à deux paramètres :

$$a = \alpha t^n \tag{4}$$

où n est le coefficient de Montana,
 a est le gradex de pas de temps t ,
 α et n sont deux paramètres à déterminer.

Les coefficients α et n sont calculés par la méthode des moindres carrés, par corrélation linéaire entre $\ln(a)$ et $\ln(\alpha)$. Cette formule s'est avérée valable pour l'ensemble des stations.

Les observations de chacune de ces variables sont leurs valeurs aux stations de mesure. Cette AFD donne dans ce cas 74,2 % des stations bien classées, soit 49 sur 65. L'AFD montre que les groupes 1 et 3 sont particulièrement bien distincts.

Le premier groupe correspond au noyau des stations sud-est. Celui-ci est caractérisé par de faibles valeurs de précipitations et de gradex. Le groupe 3 correspond à une « classe méditerranéenne », où les valeurs de précipitations et de gradex sont toujours les plus fortes. Les groupes 2 et 4 sont des groupes de transition, ou de valeurs moyennes par rapport aux deux autres.

Tableaux 3 Coefficients de détermination R^2 entre les gradex les différents pas de temps, pour les 4 groupes.

Tables 3 Determination coefficients R^2 between the gradex values of the different time steps for the 4 groups.

Groupe 1						Groupe 2						R^2
1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	
1	0,74	0,67	0,47	0,30	0,12	1	0,79	0,56	0,19	0,02	0,01	1 h
	1	0,84	0,73	0,60	0,34		1	0,84	0,57	0,23	0,05	2 h
		1	0,84	0,77	0,55			1	0,80	0,47	0,21	3 h
			1	0,93	0,79				1	0,81	0,54	6 h
				1	0,92					1	0,88	12 h
					1						1	24 h

Groupe 3						Groupe 4						R^2
1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	
1	0,95	0,95	0,93	0,90	0,87	1	0,71	0,65	0,34	0,04	0,001	1 h
	1	0,98	0,97	0,95	0,94		1	0,79	0,56	0,16	0,01	2 h
		1	0,97	0,95	0,93			1	0,74	0,24	0,05	3 h
			1	0,99	0,98				1	0,65	0,36	6 h
				1	0,99					1	0,84	12 h
					1						1	24 h

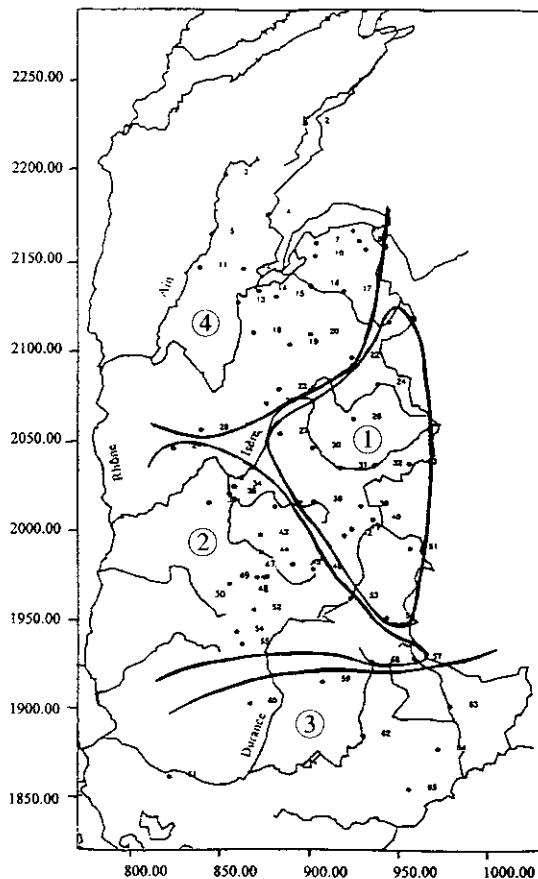


Figure 7 Carte des régions définies sur les Alpes (coordonnées en Lambert II étendu et en km).

Map of the regions defined in the Alps.

Pour chacun des groupes, nous évaluons la pertinence de modèles linéaires pour lier les gradex des différents pas de temps entre eux. Ainsi, x est le gradex de pas de temps t et y le gradex de pas de temps t' de la station considérée. Pour chaque région, ces variables sont définies par les valeurs aux stations situées dans la région.

Ainsi, nous retrouvons que les pas de temps voisins sont bien corrélés entre eux et plus les pas de temps sont distincts, moins les relations linéaires seront bonnes. C'est ce que montrent les tableaux 3 donnant pour chaque groupe les coefficients de détermination entre les gradex des différents pas de temps.

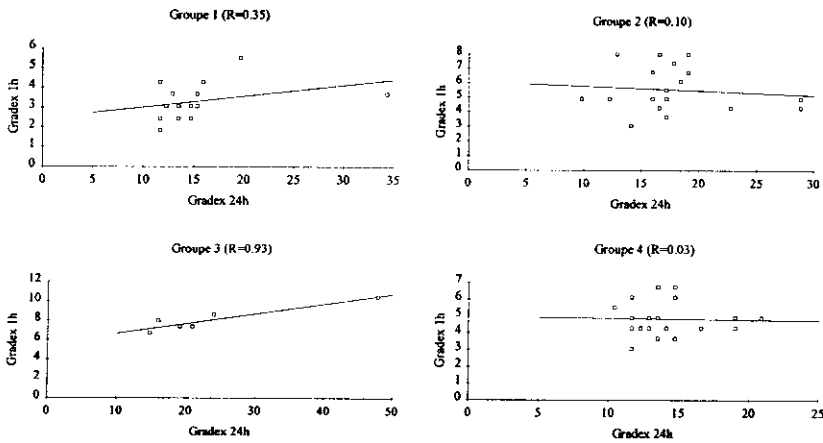
De manière générale, nous avons observé que les coefficients de détermination obtenus étaient moins bons que dans le cas où nous considérons l'ensemble des Alpes. Les seules exceptions sont obtenues pour les groupe 1 et 3.

En effet, pour le *groupe 1*, les relations entre les gradex de pas de temps 3 h et ceux de pas de temps supérieurs sont meilleures que dans le cas global. De

même, les relations entre les gradex de 6 h et ceux de pas de temps supérieurs, ou ceux de 12 h et ceux de pas de temps supérieurs sont meilleures.

En ce qui concerne le *groupe 3*, les coefficients de détermination obtenus sont pratiquement toujours supérieurs à 0,90. Ces valeurs élevées sont tout à fait fallacieuses et s'expliquent d'une part par le faible nombre de stations dans ce groupe. En effet, il n'en comprend que 7. D'autre part, la station de Coursegoules se trouve dans ce groupe, et contribue donc de façon importante à l'augmentation artificielle des coefficients de détermination.

Enfin, nous avons représenté pour chaque groupe les gradex de pas de temps 1 h en fonction des gradex de 24 h, ainsi que les équations de corrélation linéaire obtenues (*fig. 8*). Ces graphes confirment que même par groupe les relations linéaires entre ces deux gradex sont très mauvaises.



Figures 8 Tracé des gradex de pas de temps 1 h (mm/h) en fonction des gradex de 24 h (mm/24 h) et des droites de corrélation linéaire pour chacun des 4 groupes (R est le coefficient de corrélation linéaire associé).

1-hour gradex (mm/h) versus 24-hour gradex (mm/24 h) and the linear correlation lines for each of the 4 groups (R is the corresponding linear correlation coefficient).

Finalement, nous avons établi que, même par groupe, il serait prétentieux de vouloir déduire des gradex de faible pas de temps de ceux de 24 h par une simple relation linéaire.

3.3 Données déduites du gradex de pas de temps 24 h

Nous avons vu que les gradex de pas de temps 6 h et 12 h sont bien corrélés avec celui de 24 h : les coefficients de corrélation sont respectivement de 0,73 et 0,92, lorsque l'on considère l'ensemble du domaine d'étude. Ainsi les relations linéaires sont-elles pertinentes dans ces cas. Nous donnons dans cette partie les équations correspondantes.

Relation entre le gradex de pas de temps 6 h et celui de pas de temps 24 h :

$$a_{(6h)} = 0,40 \times a_{(24h)} + 2,65(\text{mm}/6 \text{ h}) \quad R^2 = 0,73 \quad (5)$$

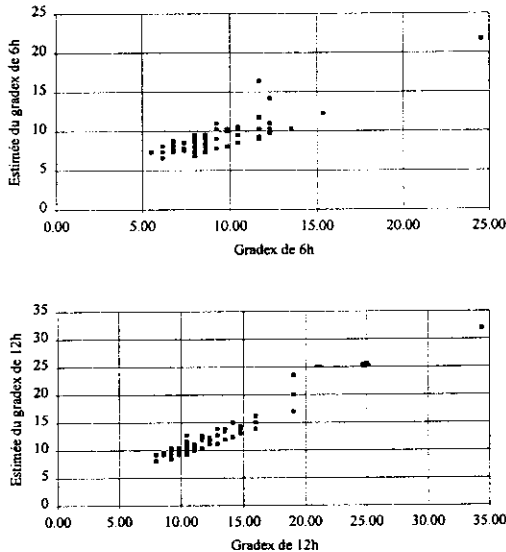
Relation entre le gradex de pas de temps 12 h et celui de pas de temps 24 h :

$$a_{(12h)} = 0,63 \times a_{(24h)} + 1,89(\text{mm}/12 \text{ h}) \quad R^2 = 0,92 \quad (6)$$

Dans ces équations, les gradex de pas de temps t , $a_{(t)}$, sont exprimés en mm/th.

Pour chaque station, nous avons calculé les gradex de pas de temps 6 h et 12 h grâce aux formules (5) et (6) respectivement. Les figures 9 montrent les nuages de points obtenus lorsque l'on représente les valeurs estimées des gradex en fonction des valeurs réelles aux stations. Les nuages de corrélation obtenus sont assez fins, ce qui confirme la pertinence des relations. D'autre part, nous retrouvons le point correspondant à la station de Coursegoules, puisqu'il se distingue du nuage.

En fait pour le pas de temps de 6 h, l'erreur maximale d'estimation est de 40 %, mais pour 90 % des stations, cette erreur est inférieure à 25 %. Pour le pas de temps de 12 h, les résultats sont meilleurs, puisque l'erreur maximale commise est de 23 % seulement. 94 % des stations ont leur gradex de 12 h reconstitué avec une erreur inférieure à 15 %.



Figures 9

Graphes des valeurs estimées par les modèles linéaires en fonction des valeurs réelles pour les gradex de 6 h (mm/6 h) et les gradex de 12 h (mm/12 h).

Values estimated by the linear models versus the real values for the 6-hour (mm/6 h) and 12-hour (mm/12 h) gradex values.

4 – CONCLUSIONS

Nous avons utilisé une variable traduisant la variation des précipitations en fonction du temps de retour pour un pas de temps donné : le *gradex*. Ce sont les variations de cette variable en fonction du pas de temps que nous avons étudiées ici, grâce à des données de précipitations extrêmes à pas de temps fin sur les Alpes françaises, en cherchant en particulier des liens entre les *gradex* des différents pas de temps.

De manière générale, nous avons vu que les *gradex* de pas de temps proches sont bien corrélés entre eux, ce qui n'est plus le cas quand les pas de temps deviennent distincts.

Plus précisément, nous avons montré que sur l'ensemble du domaine, il est difficile de déduire, par de simples relations, des *gradex* de pas de temps inférieurs à 3 h de ceux de 24 h. Les *gradex* de pas de temps supérieurs à 3 h se déduisent quant à eux bien de celui de 24 h. Le meilleur type de relation que nous ayons mis en évidence reste le modèle linéaire pour lier les *gradex* entre eux. De plus, une étude par région a confirmé le fait qu'il est prétentieux de vouloir déduire des *gradex* de pas de temps courts de celui de 24 h par de simples relations linéaires.

Ainsi, le problème que nous nous sommes posé au départ reste sans solution simple : ce n'est pas à partir d'un réseau de pluviomètres que nous pourrions déduire les statistiques des précipitations à pas de temps fin (inférieur à 6 h). La seule solution sûre réside dans les appareils de mesure des pluies à pas de temps fin : les pluviographes (enregistrements sur papier), les stations automatiques (centrales d'acquisition)... Malheureusement ce type d'appareil n'est en général pas en service depuis longtemps : une dizaine d'années tout au plus. Cette étude conforte ainsi l'intérêt de tels réseaux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les services d'EDF et ceux de CEMAGREF pour avoir mis les données concernant le réseau à leur disposition, ainsi que le LAMA (Laboratoire de la Montagne Alpine). Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un plan État-Région : « Risques Naturels en Montagne » et du Programme National Risques Naturels 1994 de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLANCHET, G. (1993). Variabilité des précipitations annuelles dans la région Rhône – Alpes : présentation cartographique. *Revue de Géographie de Lyon*, vol 68 2-3/93 (p. 101-109).
- BOIS, Ph., MAILLOUX, H., OBLED Ch., DE SAINTIGNON F. (mai 1995). Atlas expérimental des risques de pluies intenses dans la région Cévennes Vivarais. *Pôle Grenoblois des risques naturels*. (LAMA BP53 38041 GRENOBLE Cedex).
- BOIS, Ph. (1976). Contribution à l'analyse et à la prévision de variables hydrométéorologiques. Application à la prévision des débits du Niger et des avalanches à Davos. *Partie III,1 : Rappels sur l'analyse discriminante linéaire* (p. 171-183). *Thèse Docteur d'Etat*, INPG, Grenoble .
- BULLETIN DU COMITÉ FRANÇAIS DES GRANDS BARRAGES (novembre 1994). Les crues de projet des barrages : méthode du gradex. *Barrages et Réservoirs*. 18^e congrès CIGB / ICOLD – n° 2.
- 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, p.341-375.
- 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 de l'Université Louis Pasteur*, Strasbourg.
- ELECTRICITÉ DE FRANCE (Division Technique Générale) / Région Rhône Alpes (Préfecture de Région) (1993). Etude des courbes Intensité – Durée – Fréquence de précipitations dans les Alpes. Contrat de Plan Etat-Région 1989-1993. Action conjointe EDF – DTG – CEMAGREF.
- 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 durée inférieures à 24 h en Lorraine. *La Météorologie*, Série VI, numéro spécial 20-21, « Précipitations et Hydrologie », p. 139-149.
- GARCON, R., TOURASSE, P. (11-13 septembre 1995). Etude du risque de précipitations extrêmes de faibles pas de temps dans les Alpes. (communication et poster). *Conférence internationale en l'honneur de Jacques BERNIER : « Méthodes statistiques et bayésiennes en hydrologie »*, UNESCO, PARIS.
- KIEFFER, A. (1995). Etude des pluies de fréquence rare à faibles pas de temps sur les Alpes Françaises. Relation avec le relief (premiers essais). DEA, UJF, Grenoble.
- LABORDE, J-P. (1984). Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : éléments d'hydrologie Lorraine. *Thèse Docteur d'Etat*, INPL, Nancy.
- 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 Ingénieur*, LTHE – INPG, Grenoble.
- THAO, T.P. (1993). Analyse statistique des valeurs extrêmes de précipitation. Application dans la région Cévennes-Vivarais. *Thèse Docteur d'Université*, LTHE – INPG, Grenoble.