

RAPPORTS ENTRE PLUIE EXTRÊME OBSERVÉE ET PLUIE MAXIMALE PROBABLE. APPLICATION A UN CAS REEL : VERSILIA 1996

P. POINSOTTE⁽¹⁾ ET S. CAVAZZA⁽²⁾

(1) Centre de Recherches de Climatologie, UWR5080 CNRS -
Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon - France - E-mail : p.poinsotte@infol.it

(2) Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile,
Via Gabba 22, 56100 Pisa - Italia - E-mail : s.cavazza@ing-unipi.it

Résumé

La pluie maximale probable (PMP) est définie comme l'intensité maximale de la pluie qu'il serait physiquement possible de mesurer si les principaux paramètres impliqués dans l'intensité des pluies convectives atteignaient leurs valeurs maximales. Ainsi, la détermination de la PMP de durée 24 heures dans un secteur très exposé aux précipitations torrentielles et aux crues éclair permet une meilleure connaissance du potentiel de l'atmosphère.

Nous comparerons les résultats de la PMP avec l'événement pluviométrique le plus intense jamais mesuré dans les Alpes Apuane, puis, une analyse statistique des résultats nous permettra d'élaborer, analytiquement, une échelle d'intensité de la pluie dans cette région.

Abstract

Probable maximum precipitation (PMP) is defined as the greatest depth of precipitation that is physically possible when the major parameters imply in the convective storm, reach their maximum values. Then, calculation of PMP for a 24 hours duration, in an area very exposed to heavy rainfall and flash flood lead to a better knowledge of the potentiality of the atmosphere.

A comparison of the PMP with the greatest extreme rainfall measured in the Apuane Alps, and a statistical analysis of the results, will lead to elaborate a rainfall intensity scale in this area.

Mots-clés : risque hydrométéorologique, événement pluviométrique extrême, pluie maximale probable, Toscane.

Key words : hydro-meteorological hazard, extreme rainfall event, probable maximum precipitation, Tuscany.

Introduction

Les Alpes Apuane se situent dans la partie septentrionale de la Toscane, à la limite sud du golfe de Gênes. Sa topographie très accidentée (Fig. 1) se caractérise par la succession de deux lignes de crêtes parallèles, disposées perpendiculairement aux flux perturbés de SW, culminant à 2000 mètres d'altitude ; la ligne de crête la plus à l'ouest, où l'on distingue le bassin versant du fleuve Versilia se situe à une quinzaine de kilomètres de la mer. Cette configuration confère à cette région la pluviosité la plus élevée de la péninsule italienne (les précipitations annuelles sont supérieures à 3000 mm) et une très forte exposition aux précipitations intenses dont l'intensité est supérieure ou égale à 120 mm en 24 heures.

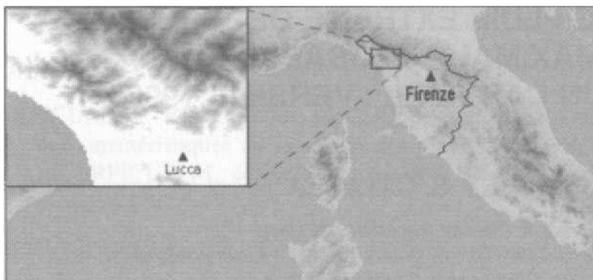


Figure 1 : Localisation des Alpes Apuane.

L'étude s'articule de la façon suivante : tout d'abord, nous procéderons à la maximisation des principaux paramètres impliqués, à l'échelle journalière, dans l'intensité de la pluie (l'humidité de la masse d'air et la convergence dans les basses couches de l'atmosphère) pour ensuite maximiser l'événement pluviométrique de référence. Puis, nous analyserons statistiquement les résultats obtenus qui nous permettront de construire une échelle d'intensité de la pluie dans les Alpes Apuane.

1. Le concept de Pluie Maximale Probable

Le concept de Pluie Maximale Probable fut introduit en hydrométéorologie il y a une trentaine d'année dans la littérature anglo-saxonne dans le but de définir une limite supérieure physique à la hauteur d'une pluie d'une certaine durée, à une certaine période de l'année. Il s'agit donc de définir une limite supérieure aux distributions probabilistes utilisées dans l'étude des précipitations extrêmes comme les lois de Gumbel, Generalize Extrême Values et TCEV. Ce concept est aujourd'hui couramment utilisé aux Etats-Unis et au Canada pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et des infrastructures destinées à la protection des personnes et des biens.

Les recherches menées sur les mécanismes pluviogènes et sur les facteurs qui les déterminent nous conduisent à évaluer leurs limites supérieures sur la base des mesures réalisées dans les stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la zone étudiées. Nous postulons l'existence d'un maximum possible à une précipitation en nous appuyant sur le fait que les cellules orageuses ont un potentiel énergétique limité car la quantité de vapeur d'eau qui converge dans une cellule n'est pas infinie, limitant par là même l'énergie du phénomène. Nous pouvons ainsi raisonnablement nous attendre à ce que la quantité et l'intensité des précipitations relatives aux cellules orageuses aient, elles aussi, une limite. Pour l'instant, les paramètres relatifs à « l'efficacité dynamique » de la pluie ne sont pas directement exprimables ; ils le sont seulement au travers de leurs effets induits sur l'événement pluviométrique. Par contre, le paramètre essentiel à considérer, la quantité d'eau précipitable, liée à la température de l'air et à son taux d'humidité, apparaît susceptible d'être limité supérieurement.

2. Méthodologie de la PMP

2.1. Maximisation de l'humidité

2.1.1. Calcul de la température du point de rosée (td)

Etant donné le niveau d'échelle spatiale auquel nous travaillons, il n'est guère possible de disposer de radiosondages décrivant la structure verticale de l'atmosphère. Dans la pratique ce problème peut être contourné car l'ensemble des stations météorologiques italiennes mesurent, en surface, la température et l'humidité relative de l'air, deux paramètres permettant de déterminer la température du point de rosée, en degrés Celsius.

Le calcul de la température du point de rosée nous a permis d'identifier deux adiabatiques saturées, l'une représentative de l'air convergent à la base de la cellule orageuse, l'autre correspondant au taux d'humidité maximal relatif au site étudié. Ces deux adiabatiques saturées permettront d'effectuer un diagnostic de la distribution verticale de la température et de l'humidité atmosphérique le jour de l'événement de référence mais également dans des conditions d'humidité maximale.

2.1.2. Calcul de la quantité d'eau précipitable (W)

L'eau précipitable est définie comme la quantité d'eau recueillie à la base d'une colonne d'air si la totalité de la vapeur contenue dans cette dernière se condense puis précipite. Etant donné que nous avons préalablement déterminé la température du point de rosée, nous sommes donc en mesure de calculer, à tous les niveaux, l'humidité spécifique de la masse d'air (q), paramètre à partir duquel il est possible de déduire la quantité d'eau précipitable en appliquant :

$$q_z = 0,622 \times \frac{e}{P} \quad (1)$$

avec :

$$e = 611 \exp\left(\frac{17,27 \times T_z}{237,3 + T_z}\right) \quad (2)$$

e : pression de vapeur saturante en kPa

T_z : température de l'air au niveau z en °C

paramètre à partir duquel nous avons déterminé la quantité d'eau précipitable (w) en calculant, entre deux niveaux atmosphériques z_1 et z_2 , la masse d'eau précipitable, en kg, en appliquant :

$$W = \bar{q}_{(z_1, z_2)} \times \bar{\rho}_{(z_1, z_2)} \times A \times \Delta z \quad (3)$$

$\bar{q}_{(z_1, z_2)}$: valeur moyenne de l'humidité spécifique entre deux niveaux atmosphériques

avec : $\bar{\rho}_{(z_1, z_2)}$: valeur moyenne de la densité de l'air entre deux niveaux atmosphériques

A : superficie de la base de la colonne d'air (1 m^2)

Δz : épaisseur des couches atmosphériques (500 m)

2.1.3. Calcul du coefficient de maximisation

La dernière étape de la procédure de maximisation de l'humidité de l'air consiste à calculer un coefficient issu du rapport entre la quantité maximale possible d'eau précipitable calculée, c'est à dire l'évaluation de la capacité évaporatoire maximale de l'atmosphère sur le site, et la quantité d'eau précipitable effective, celle qui caractérise la masse d'air convergent dans la cellule orageuse, telle que :

$$C_m = \frac{W_m}{W_e} \quad (4)$$

avec : C_m : coefficient de maximisation de la pluie

W_m : eau précipitable maximale

W_e : eau précipitable effective

2.2. Maximisation de la convergence

Dans l'introduction, nous avons dit que l'intensité d'une précipitation est due essentiellement à deux facteurs : le premier est le contenu de la masse d'air en vapeur d'eau et le second est lié à l'efficacité de l'orage, facteur dépendant de la vigueur des mouvements de convergence dans les basses couches de l'atmosphère. Jusqu'à présent nous nous sommes principalement intéressés à la maximisation de l'humidité et si nous voulons réellement trouver une limite supérieure à une pluie nous devons faire de telle sorte que les deux facteurs soient maximisés.

Ainsi, nous avons procédé à un inventaire de l'ensemble des perturbations qui ont intéressé le site étudié et sélectionné, sur la base du cumul de pluie mesuré en 24h, l'événement le plus intense que les Alpes Apuane ont connu. L'événement pluviométrique retenu est l'orage du 19 juin 1996, événement au cours duquel l'intensité de la pluie a atteint des valeurs très élevées. Les stations les plus touchées ont enregistré 477 mm et 423 mm en 24 heures.

L'analyse des cartes météorologiques montre, en surface, la présence d'un front froid orienté WSW/ENE, s'étendant du Sud de la France à la Pologne en passant par le versant Nord des Alpes. L'influence de cette zone frontale combinée à une advection chaude et humide de secteur S S W sur la Méditerranée a créé les conditions favorables au développement d'un orage multicellulaire. A 500 hPa la configuration isobare montre une dorsale s'étendant de la Grande Bretagne à l'Algérie, une faible courbure cyclonique sur la mer, et un géopotential maximum centré sur le sud de la Suède. A 850 hPa les isohypses décrivent également une courbure cyclonique sur l'Italie septentrionale et on remarquera également la présence d'une goutte froide positionnée à la verticale du nord de la Toscane.

2.3. Maximisation de la pluie

La maximisation de la pluie s'appuiera, à titre comparatif, sur l'utilisation de deux modèles : le premier est le modèle préconiser par la méthode PMP, le second, utilisé à l'Ecole Polytechnique de Milan, permet de calculer l'intensité d'une pluie issue d'une cellule convective.

2.3.1. Le modèle PMP

L'utilisation du modèle PMP est assez simple puisqu'elle consiste à appliquer aux pluies effectives le coefficient de maximisation (eq. 4) tel que :

$$P_m = P_e \times C_m \quad (5)$$

P_m : pluie maximisée

avec : P_e : pluie effective

C_m : coefficient de maximisation

L'intensité de la pluie est donc maximisée car le coefficient de maximisation est, dans la grande majorité des cas, supérieur à 1.

2.3.2. Le modèle de la cellule convective

Le modèle de la cellule convective est plus complexe car son utilisation implique, outre le calcul des différents paramètres, une série d'approximations découlant du manque de données relatives à l'événement du 19 juin 1996. L'intensité de la pluie issue d'une cellule orageuse est donnée par l'équation suivante :

$$i = \frac{4\rho_a V \Delta z_1}{\rho_w D} \times \frac{q_{v1} - q_{v2}}{1 - q_{v2}} \quad (6)$$

dans laquelle :

i : intensité de la pluie en m/s

ρ : densité de l'air en kg/m³

V : vitesse du vent en m/s

Δz_1 : altitude de la base de la cellule orageuse (m), autrement dit le niveau de convection libre (LFC)

D : diamètre de la cellule (m)

V : vitesse du vent en m/s

q : humidité spécifique de l'air (kg/kg)

Dans ce modèle, il est évident que les valeurs du diamètre de la cellule et du niveau d'équilibre thermique (sommet de la cellule) ne peuvent être qu'approximées car nous ne disposons d'aucune mesure in situ permettant leur validation. Le niveau d'équilibre thermique a été fixé 10000 m car les

calculs montrent qu'au delà de cette altitude la quantité d'humidité spécifique est très infime si bien qu'elle influe très faiblement sur l'intensité de la pluie au niveau du sol.

3. Résultats obtenus

3.1. Le modèle PMP

Tableau 1 : Résultats du modèle P M R

Station	Cm	Pluie 96	PMP
Orto di Donna	2,4	150,4	364,1
Vagli di Sotto	2,0	121,0	241,8
Palagnana	2,0	297,6	584,9
Pomeziana	1,9	477,6	929,0
Retignano	1,8	400,6	730,1
Azzano	1,9	260,4	499,6
Cervaiolo	2,4	241,4	572,7
Convalle	1,7	150,0	256,5
Gombitelli	1,8	60,6	110,6
Camaiore	1,6	53,2	86,6
Fornovolasco	1,8	428,6	785,9

La cartographie des résultats de la PMP, avec la méthode du krigeage, nous permet de localiser un secteur géographique particulièrement exposé au risque hydrométéorologique (Fig.2). Il s'agit d'une zone couvrant une superficie d'environ 60 km² comprenant les bassins versants du fleuve Versilia et ses principaux affluents et du Turrone di Galliciano situé en Garfagnana. Cette zone se caractérise par une topographie très accidentée, des versants abrupts et des sommets culminants à plus de 1500 mètres (Pania della Croce 1860 m).

Les valeurs des coefficients de maximisation de la pluie sont très élevées ce qui démontre que, malgré des intensités significatives mesurées le 19 juin 1996, la capacité évaporatoire maximale de l'atmosphère était encore loin d'être atteinte. Ainsi, la pluie maximale probable, dans les stations les plus touchées par l'orage (Retignano, Fornovolasco et Pomazzana) est quasiment deux fois plus élevée que les cumuls de pluie du 19 juin 1996. De plus, bien que les valeurs de la PMP calculées dans les Alpes Apuane soient très élevées, les résultats obtenus sont cohérents avec les très fortes pluies déjà mesurées dans le bassin méditerranéen occidental : La Llau, 1200 mm/24h (en 1940) ; Valle-rauge, 950 mm/24h (en 1900) ; île de Montechristo (archipel toscan), 800 mm/24h (en 1990).

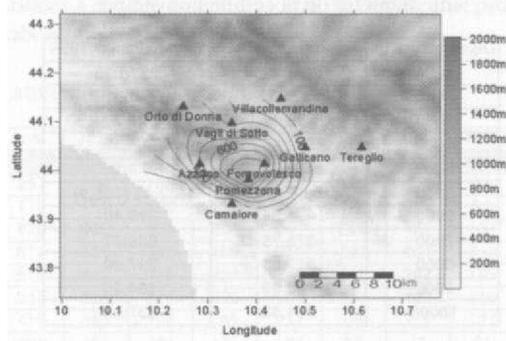


Figure 2 : Modèle Palmieri - isohyètes de la PMP.

Cette configuration est tout à fait propice au déclenchement d'inondations de type « flash flood » accompagnées de forts ruissellements pouvant provoquer des glissements de terrain dont les débris, associés aux produits de l'érosion fluviale, pourraient alimenter un transport fluvial très fourni en direction de la vallée et provoquer des dommages considérables.

3.2. Le modèle de la cellule convective (CC)

Le modèle de la cellule utilise l'humidité spécifique et non la quantité d'eau précipitable pour quantifier la quantité de vapeur présente dans la cellule orageuse. Toutefois, étant donné la variabilité de l'intensité de la pluie durant l'orage, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au diamètre de la cellule orageuse.

Effectivement, en examinant la coupe topographique réalisée le long du parcours de l'épicentre de l'orage (Fig.3), nous constatons que les stations qui ont mesuré les plus fortes intensités (>400

mm/24h) se situent dans les fonds de vallées adossées à des versants montagneux abrupts dont l'altitude dépasse 800 m. Dans ces conditions, et vu l'altitude du niveau de convection libre estimé à 250 m, nous pouvons raisonnablement postuler au ralentissement puis à la compression latérale de la cellule lorsque cette dernière arrive sur le versant de la montagne.

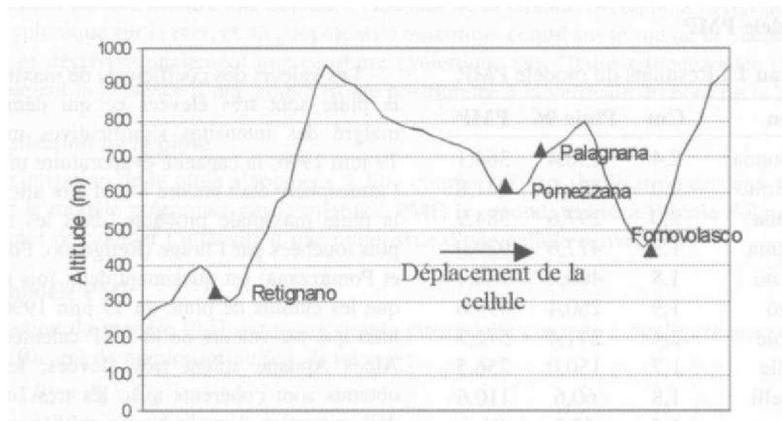


Figure 3 : coupe topographique selon le déplacement de l'épicentre orageux.

Tableau 2 : Intensité de la pluie en fonction du diamètre de la cellule convective.

Diamètre en m	Pomeziana 1996	Fornovolasco 1996
1000	2616.22	2378.38
2000	1308.11	1189.19
3000	872.07	792.79
4000	654.05	594.59
5000	523.24	475.68
5500	475.68 (929)	432.43 (785,9)
6000	436.04	396.40
7000	373.75	339.77
8000	327.03	297.30
9000	290.69	264.26
10000	261.62	237.84

Dans ces conditions, de façon à évaluer le rôle du diamètre de la cellule sur l'intensité de la pluie, nous l'avons fait varier en maintenant constants les autres paramètres du modèle (Tab.2). Les résultats indiquent que plus le diamètre de la cellule diminue/augmente plus l'intensité de la pluie augmente/diminue. Nous pouvons ainsi penser que les pics pluviométriques mesurés à Pomeziana (157 mm entre 6h et 7h) et à Fornovolasco (142 mm entre 14h et 15h) pourraient être la conséquence d'un mouvement latéral de compression exercé sur la cellule, mouvement provoquant une diminution de son diamètre donc une accélération des mouvements verticaux donc de la

vitesse de production de vapeur d'eau à l'intérieur de la cellule convective.

Ce travail nous a également permis d'évaluer le diamètre moyen de la cellule orageuse au cours de la journée du 19 juin 1996 à 5500 m (tab. 2). Ce résultat est cohérent avec les travaux déjà réalisés sur les orages multicellulaires dans lesquels la taille des cellules composant ces systèmes a été évaluée entre 3000 et 10000 m. La spécificité du modèle utilisé implique cependant une limitation car son utilisation est liée au passage de l'épicentre de l'orage sur une station. Ainsi, la PMP a été calculée aux deux postes les plus exposés lors de l'événement de juin 1996, Pomeziana et Fornovolasco, pour un diamètre moyen de la cellule convective de 5500 m. Les résultats de l'élaboration figurent en gras dans le tableau ci-contre.

3.3. Comparaison des résultats

Les résultats montrent des différences significatives des intensités de la PMP : les valeurs obtenues avec le modèle de la PMP (en gras entre parenthèses) sont nettement supérieures à celles du modèle de la cellule convective. Ces écarts s'expliquent par le manque de données nécessaires au bon

calibrage du modèle CC ; les valeurs de l'humidité spécifique ont été déterminées par la méthode des différences finies et dans ce contexte les conditions de contours sont déterminantes. Ainsi, dans la suite de ce travail, nous conserverons les résultats obtenus avec le modèle PMP, modèle qui prend en compte, indirectement, l'ensemble des paramètres impliqués dans la dynamique de l'orage.

4. Interprétation statistique de la PMP

4.1. Ajustement de l'humidité relative et de la température à la loi Bêta

Les valeurs de température et d'humidité relative ayant servies de base au calcul de la PMP sont considérées comme les valeurs maximales sur la période considérées ; nous devons donc utiliser une loi statistique admettant une limite supérieure. La loi Bêta répond à cette attente, elle est très utilisée dans les sciences atmosphériques pour l'étude des paramètres limités supérieurement comme par exemple l'humidité relative bornée à 100%. Elle admet la loi de répartition suivante :

$$f(x) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} x^{p-1}(1-x)^{q-1}$$

$$0 \leq x \leq 1 \quad p, q > 0$$

(7)

avec p et q les paramètres de forme de la distribution.

4.2. Calcul de l'intensité de la pluie afférente à une probabilité cumulée

Le calcul des probabilités cumulées permet de déterminer la probabilité de non dépassement simultanée, à un certain seuil, de la température et de l'humidité relative. Les résultats sont ensuite entrés dans le modèle PMP, permettant ainsi d'attribuer à chaque valeur de sortie du modèle une probabilité de non dépassement. Les résultats de l'élaboration sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Intensité de la pluie afférente à une probabilité donnée.

Température ET Humidité Relat				100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
Station	Lat	Long	Alt	PLUIE PROBABLE									
Orto di Donna	44.13	10.25	1100	364.1	286	257	224	188	163	141	121	95	78
Vagli di Sotto	44.10	10.35	600	241.8	194	172	150	128	111	96	82	66	54
Palagnana	43.98	10.42	710	584.9	492	436	380	324	281	243	208	167	137
Pomezzana	43.98	10.38	597	929.0	763	674	588	502	435	377	322	261	213
Retignano	44.00	10.33	325	730.1	586	512	447	385	334	288	246	202	165
Azzano	44.02	10.28	416	499.6	396	347	302	260	225	194	166	136	110
Cervairole	44.03	10.30	1170	572.7	466	419	365	306	265	231	198	155	127
Convalle	43.95	10.47	350	256.5	218	191	167	144	125	108	92	76	62
Gom bitelli	43.92	10.43	490	110.6	93	82	71	61	53	46	39	32	26
Camaiore	43.93	10.35	47	86.6	70	61	53	46	40	35	30	25	20
Fornovolasco	44.02	10.42	470	785.9	653	574	501	430	373	322	276	225	184

Le tableau nous indique, pour chaque station de mesure, l'intensité de la pluie pour chaque probabilité de non dépassement. Ainsi, la colonne 100% correspond à la PMP, c'est à dire à l'intensité de la pluie qui à 100% de chance de ne pas être dépassée, autrement dit, aucune chance, dans les conditions climatiques actuelles, d'être dépassée dans les Alpes Apuane.

4.3. Etablissement d'une échelle d'intensité des pluies dans les Alpes Apuane

Compte tenu de l'homogénéité climatique et topographique des Alpes Apuane, ainsi que du caractère aléatoire de la localisation, à échelle fine, des epicentres des phénomènes orageux, nous pouvons généraliser les résultats de Pomezzana à l'ensemble de la zone géographique étudiée. Dans ces conditions, nous sommes donc en mesure de définir analytiquement une échelle d'intensité des pluies extrêmes dans les Alpes Apuane, telle que :

Tableau 4 : Échelle d'intensité de la pluie.

Niveau	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Intensité <i>mm/24h</i>	213	261	322	376	435	502	588	674	763	929

Ainsi, dans les Alpes Apuane, le seuil définissant une précipitation extrême a été évalué à 213 mm/24h, valeur au-delà de laquelle il sera possible d'attribuer à une pluie un niveau d'intensité comme le font les géologues pour les tremblements de terre avec l'échelle de Richter et les météorologues pour le vent (échelle de Beaufort) et les tornades. Nous pouvons donc caractériser l'orage du 19 juin 1996 (477 mm/24h) d'événement extrême, puis le classifier, par l'intermédiaire de l'échelle, comme orage de niveau 5,7.

Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de l'intégration de la physique à la statistique souvent limitée dans les études d'événements pluviométriques intenses. La méthodologie de la PMP permet également d'affronter le problème des extrêmes d'un point de vue différent car les pluies sont caractérisées non plus par rapport à des valeurs minimales, comme le propose les études statistiques classiques, mais par rapport aux intensités maximales possibles de la pluie.

Cette nouvelle approche du problème, par l'intermédiaire de la création d'une échelle d'intensité des pluies, permet une interprétation plus simple des phénomènes atmosphériques convectifs pour les décideurs et les populations que le traditionnel « temps de retour », notion floue et souvent très mal comprise. De plus, en reprenant l'exemple de l'orage du 19 juin 1996, dire que cet événement est de niveau 5,7 sur une échelle de 10 au lieu de lui attribuer un temps de retour de 500 ans, permettrait d'une part de relativiser ce type d'événement et d'autre part de mieux s'en protéger.

Bibliographie

- BRUGIONI, M., et al., 1998 : *19 Giugno 1996 : alluvione in Versilia e Garfagnana*. Caso di studio, Firenze, 315 p.
- National Weather Service, 1998 : *Probable Maximum Précipitation : calculation procedure*. Hydrometeorological report n° 58.
- PALMIERI, S., et al., 1979 : *Precipitazione Massima Probabile*. Resoconto della giornata di lavoro del 5 novembre 1979, Roma, 126 p.
- ROSSO, E., 2000 : *Modello di cella temporalesca*. Esercitazione del corso di Idrologia, Politecnico di Milano, 5 p.
- U.S. Department of Commerce, 1977 : *Probable maximum precipitation estimates, Colorado river and great basin drainages*. Hydrometeorological report n°49, Washington D.C., 161 p.
- U.S. Department of Commerce, 1978 : *Probable maximum precipitation estimates, United States East of the 105th meridian*. Hydrometeorological report n°51, Washington D. C., 78 p.
- U.S. Department of Commerce, 1986 : *Probable maximum and TVA precipitation estimates with real distribution for Tennessee river drainages less than 3000 square Mi. in area*. Hydrometeorological report n° 56, Silver Spring.