Averses extensives et crues concomitantes dans l'Arc Alpin *

(Prix Henri Milon 1977)

Extensive showers and simultaneous floods in the Alpine range

Huguette Vivian

Chargée de Recherche au CNRS – Docteur d'Etat

Le problème de l'extension des averses sur l'obstacle orographique que constitue l'Arc Alpin et les possibilités d'observer de grandes crues concomitantes sur les différents cours d'eau est un problème aux vastes dimensions qui redonne de justes proportions aux phénomènes hydrométéorologiques alpins, non plus considérés dans des contextes régionaux, mais avec toute l'extension géographique souhaitée. Les services nationaux hydrométéorologiques, à l'occasion d'un événement survenant dans leur pays, ont depuis longtemps déjà publié de remarquables monographies. Aussi, nous sommes-nous attachés à étendre les données à toute la région alpine du Rhône au Danube, du Rhin au Pô, afin de répondre à quelques questions posées lors du IV^e Congrès de Météorologie alpine en 1956, par M. Pardé, à savoir entre autres :

- s'il existe un schéma caractéristique de l'extension géographique des averses correspondant à des types précis (caractérisés par des situations météorologiques similaires) ;
- si, à la suite de l'extension d'une grosse averse de type donné, il existe, à travers l'Arc alpin, des réactions hydrologiques simultanées sur les différents réseaux.

Pour approcher ce problème, nous sommes partis non pas de l'examen des précipitations journalières portant sur une longue période, mais de *l'examen des plus grandes crues survenues de 1870 à 1970, et de leur étude*

statistique. La recherche des données météorologiques, pluviométriques et la cartographie des épisodes pluvieux ont suivi. L'étude statistique a pour but d'établir la réalité des concordances entre crues, de chiffrer les liens existant entre cours d'eau à l'aide du coefficient de corrélation et de déterminer les cas de grandes crues concordantes les plus intéressantes.

L'existence des concordances étant ainsi mise en valeur, nous avons établi les dossiers des plus fameuses crues du siècle sur les 4 grands réseaux alpins. Pour chaque cas étudié, il a été dressé *une carte de l'épisode pluvieux* portant fréquemment, étant donné l'extension géographique du phénomène, sur plus d'une semaine ; *une carte du maximum pluvieux* de 1 à 3 jours ayant engendré la crue record sur un des cours d'eau, *une carte des quotients des totaux de l'épisode et des normales pluviométriques* qui, selon Langbein, permet schématiquement de déterminer l'épicentre de l'averse et les lieux où elle a revêtu un caractère exceptionnel. (Planches de l'Atlas).

Le travail se scinde en 5 *grandes parties* (volumes de texte) dans lesquelles il est possible de trouver en introduction, des généralités sur les types d'épisodes hydrométéorologiques étudiés, en conclusion, une synthèse sur les circonstances atmosphériques expliquant la genèse et l'évolution des averses et des crues consécutives (illustrées par des limnigrammes) et, entre les deux, les descriptions détaillées des cas particuliers ayant servi de support aux synthèses.

L'analyse des données : étude statistique des crues

Cette étude, fondée sur le *calcul des corrélations entre crues* observées à 19 stations de référence et lors de 78 événements, sur *l'analyse des correspondances et en*

(*) Notre recherche, effectuée sous la direction du Professeur M. Pardé puis du Professeur Ch. P. Péguy et dont nous présentons quelques résultats, a fait l'objet d'un Doctorat d'Etat soutenu devant l'Université de Grenoble le 27 avril 1976. Ce travail est présenté sous forme d'un texte de 1308 pages (plus 44 pages de tableaux annexes) et d'un Atlas qui lui est indissociable.

Les 2 volumes de texte (format 24 x 15 – 37 figures) édités par l'Atelier de reproduction des Thèses d'Etat à Lille, et l'Atlas qui l'accompagne (imprimé chez Louis Jean à Gap, 05, composé de 49 planches noir et blanc et 4 planches couleurs – format 34 x 36), sont en vente à la Librairie Honoré Champion, 7 quai Malaquais, Paris.

composantes principales, eut pour principal objet et résultat de donner un *groupage des données selon les affinités* des différents bassins versants, de permettre, en fait, de voir concrètement et mathématiquement comment, en fonction des réactions paroxysmales annuelles et exceptionnelles des principaux cours d'eau, s'organise, se scinde en "*ensembles*" homogènes tout l'espace hydrologique alpin. D'autre part, l'analyse factorielle appliquée aux dates des crues a permis d'extraire quelles étaient les *saisons les plus aptes* à voir naître des crues concordantes sur 2, 3 réseaux et les *dates les plus caractéristiques* de l'extensivité des phénomènes hydro-météorologiques.

L'étude des pourcentages de concordances entre les débits maximaux annuels pour la période 1900-1968 et celle des coefficients de corrélation entre les dates de grandes crues permettent d'illustrer deux faits géographiques :

— l'*incompatibilité* marquée par des coefficients de corrélation négatifs entre certains bassins, l'opposi-

tion la plus flagrante étant celle entre *versant NO et Nord* de l'Arc Alpin et le *versant Sud*, entre *Alpes orientales* et *Alpes occidentales* (sud) ;

— le *regroupement en zones hydrologiques de compatibilité* à l'intérieur desquelles il est possible d'observer un grand nombre de crues monogéniques simultanées (Fig. 1).

Notons, avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,50 ⁽¹⁾ :

— versant Nord et N-Ouest :

- le Rhône à Lyon, le Rhin à Bâle ;
- le Rhin à Bâle et le Danube Bavaïois.

— Alpes centrales :

- le Rhin alpestre et le Tessin ;

— Alpes occidentales :

- le Rhône à Lyon, Avignon et l'Isère ;
- le Bas Rhône, la Durance et le Pô ;

(1) Pour le nombre de données au seuil de 1/100, les coefficients supérieurs à 0,28 sont significatifs.

Figure 1 — Coefficients de corrélation entre grandes crues (Années 1900-1968).

- Alpes orientales :
 - le Bas Pô, le Tessin et l'Adige ;
 - l'Adige, le Tessin et la Drave.

Avec des coefficients supérieurs à 0,30 et inférieurs à 0,50 se forment les groupes d'affinités moins attendus et par ce fait parfois plus intéressants au niveau d'une étude de l'extension des événements hydrométéorologiques exceptionnels :

- le Rhône à Lyon et le Danube Bavaïrois ;
- le Rhin à Bâle et le Danube à Vienne ;
- Haut Rhin, Inn et Adige ;
- Pô et Drave.

L'analyse des correspondances et en composantes principales permet d'affiner la notion d'ensembles hydrologiques créés selon divers facteurs géographiques concrétisés par les axes 1, 2 et 3 des graphiques sur lesquels sont reportés les points "dates de crues" et "stations hydrométriques" pour chacun des réseaux. Il est possible de voir s'opposer (Fig. 2) :

- les bassins du nord et du sud de la chaîne, (axe 1) ;
- les bassins des Alpes occidentales et des Alpes orientales, la position par rapport à l'axe 2 marquant le degré de continentalité.

Tous ces groupages se font dans l'année en des phases saisonnières bien individualisées. Celles-ci correspondent aux régimes pluviométriques régionaux et à la répartition des débits maximaux annuels, les crues exceptionnelles ne paraissant être que l'exagération inattendue d'un phénomène habituel d'abondance. *Un calendrier des "rencontres" fréquentes entre grandes crues s'établit :*

- **Juin** est le mois des multiples concomitances de crues réparties très largement dans l'Arc alpin avec une concentration sur les bassins danubiens, rhénans, et le Pô, soit sur les Alpes centrales et orientales ;
- **Novembre** est le mois des rencontres très fréquentes mais plus localisées dans les Alpes occidentales franco-italiennes (Bas Rhône-Pô-Adige) ;
- **Février et mars** sont les mois des crues concomitantes hivernales sur le seul versant Nord alpin (Rhône supérieur, Rhin et Danube supérieur).

Le reste de l'année est moins riche en grandes crues concordantes ou du moins s'applique à des zones géographiques moins vastes que précédemment.

Ces répartitions spatiales et temporelles se comprennent fort bien par l'étude des grands types de situations perturbées qui se succèdent sur les Alpes au cours de l'année et que nous avons intitulés :

- les types océaniques d'hiver ;
- les types helvétiques d'été ;
- les types "Europe Centrale" ;
- les types méditerranéens.

Ces quatre grands types de situations engendrent quatre types d'épisodes pluvieux intéressant de façon préférentielle deux ou plus des groupes hydrologiques. Les épisodes hydrométéorologiques ne correspondent pas en fait à un type de temps mais à une succession de types de temps similaires, en évolution spatiale sur l'Europe. Au niveau de l'Arc alpin, ces événements

durent de 4 à 8 jours et il ne peut s'agir, bien évidemment, que d'un type de temps évolutif à facettes nuancées selon la position des centres d'action atmosphériques.

Les grands événements hydrométéorologiques alpins extensifs

Il existe quatre types d'événements au cours desquels, en 4 à 8 jours, se déclenchent à la suite d'un épisode pluvieux à la fois violent et étendu, de fortes crues concomitantes supérieures à la moyenne (déterminée pour nous par le critère : $A \text{ crue record} / A \text{ crue observée} > 0,50$) sur 2 et même parfois 3 grands réseaux hydrologiques alpins.

Chaque fois lors de ces événements, un des cours d'eau a connu une crue exceptionnelle de rare fréquence, parfois même sa crue record. C'est dire que les épisodes pluvieux géniteurs allient l'intensité ponctuelle ou du moins régionale à l'extensivité sur une grande partie de l'Arc alpin.

A — Les épisodes hydrométéorologiques océaniques hivernaux

Ils sont engendrés par des régimes cycloniques d'Ouest, NO ou SO d'origine atlantique qui amènent, semble-t-il, les 2/3 des fortes précipitations sur le N-Ouest de l'Arc alpin. De tels régimes se caractérisent par la présence simultanée sur l'Europe occidentale d'une aire de basse pression, centrée sur les Iles Britanniques ou la Mer du Nord et d'une zone anticyclonique, centrée sur la péninsule ibérique, pouvant s'avancer sur la France en coin offensif. Parfois une zone anticyclonique continentale s'établit sur l'Europe de l'Est et la Scandinavie, opérant un blocage des perturbations. Les flux d'Ouest à Sud Ouest affectent les Alpes occidentales du Nord ; ceux du Nord Ouest s'abattent sur le Jura, les Préalpes franco-helvétiques et les premiers massifs bavaïrois.

Nous avons établi des schémas qui montrent les situations caractéristiques du déclenchement de tels types de précipitations ; ils ont été faits à partir de situations isobariques au sol communes à tous nos événements, de 1876 à nos jours. Les épisodes pluvieux responsables des grandes crues sont dus au maintien du flux perturbé à la même latitude pendant plusieurs jours, donc à la stabilité des centres d'action, et à la formation, au coude alpin, de ce que les météorologues appellent une masse orographique prolongeant les pluies sur les massifs contre lesquels s'effectue le soulèvement de l'air humide.

Selon la répartition temporelle des différentes phases de l'épisode météorologique, les précipitations se concentrent sur les Alpes Nord-Occidentales et nous avons l'épisode *océanique occidental* responsable des grandes crues du Rhône à Lyon, du Rhin à Bâle (Février 1928 — Novembre 1944 — Décembre 1918, etc.) ou l'épisode *océanique oriental* concentré entre les Alpes de St Gall

Figure 2 — Signification géographique des axes 1 et 2 de l'analyse des correspondances.

et le Salzkammergut, responsable des crues hivernales du Danube (Janvier 1948 – Janvier 1920...). Une succession des deux types d'épisodes pluvieux est enregistrée lors des événements hydrométéorologiques fameux de février 1928, novembre 1944, pendant lesquels on put assister à une succession de crues sur les réseaux rhodanien, rhénan et danubien, de Lyon à Vienne.

L'extension d'un épisode pluvieux océanique ne dépend pas de sa durée et du nombre de dépressions à l'origine du courant perturbé ; il ne peut pas s'étendre sur les Alpes du Sud sauf dans le cas exceptionnel d'une position très méridionale de la circulation zonale comme en janvier 1955. Il reste confiné aux Alpes occidentales franco-helvétiques si des hautes pressions thermiques formées sur la Pologne et les Balkans bloquent la marche du flux perturbé au-delà du 15° méridien ; inversement, il reste uniquement oriental si, dès le début de l'épisode, les hautes pressions ibériques s'avancent en proue sur les Alpes occidentales.

Les précipitations maximales (200 à 250 mm pour 4 à 5 jours) se localisent pratiquement toujours aux mêmes endroits et il est possible de tracer les *modèles types des averses océaniques* dont le *champ d'action* peut s'étendre à presque toute la convexité alpine (Fig. 3 et 4).

Les noyaux paroxysmaux sont allongés en chapelet du Jura à l'Allgau dans le cas d'un épisode occidental, du Gothard aux Préalpes autrichiennes dans le cas d'un épisode oriental.

Dans le premier cas, les principaux cours d'eau qui sont en fortes crues avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,50, sont le Rhône à Lyon et ses affluents jusqu'à l'Isère (au sud), le Rhin à Bâle et ses affluents, le Danube bavarois supérieur et ses affluents, l'Iller et le Lech. Dans le second cas, sont en intumescences presque simultanées, le Rhin à Bâle et ses affluents, le Danube et ses affluents jusqu'à Vienne.

L'épisode pluvieux du 11 au 15 février 1928 est caractéristique, étant donné son extensivité, de ces deux types de répartition schématisés par le tracé de l'isohyète 100 mm. Les précipitations les plus fortes (plus de 150 mm) se localisent sur les Préalpes dauphinoises et savoyardes, le Jura, l'Oberland bernois, les Alpes de Glaris, l'Allgau, le Tyrol et le Salzkammergut. L'extension des précipitations ne se fait pas au delà du bassin de l'Isère ; vers l'Italie elle ne dépasse pas la crête frontière. A la suite de cet épisode pluvieux dont le maximum se situe en France du 13 au 15 février mais se poursuit en Autriche jusqu'au 17, de nombreuses crues furent enregistrées entre le 16 et le 20, non seulement sur le Rhône à Lyon (4845 m³/s) et le Bas Rhône (5984 m³/s) mais aussi sur le Rhin à Bâle (2780 m³/s), l'Aar à Brugg (688 m³/s), le Danube en Bavière (1090 m³/s) à Ingolstadt, et en Autriche (5678 m³/s) à Vienne.

Les totaux pluviométriques recueillis ne sont généralement pas très forts dans ce type d'épisode pluvieux mais, la régularité des pluies réparties sur plusieurs jours consécutifs en une période automnale ou hivernale où l'évaporation est quasi nulle est un facteur propice à la genèse des crues. De plus, la fonte des neiges peut venir accroître l'apport des précipitations liquides. Enfin, nous

avons pu remarquer que ces épisodes décisifs ne sont pratiquement jamais isolés dans le mois au centre d'une période relativement sèche, mais s'insèrent dans un ensemble pluvieux étendu sur un mois ou plus, le sol étant déjà saturé et les cours d'eau ayant souvent un débit bien soutenu lors du déclenchement de l'averse maximale.

B – Les épisodes hydrométéorologiques de saison chaude sur les Alpes centrales.

Ces épisodes engendrent les plus grosses crues du Rhin à Bâle, s'étendent sur la Bavière, ou peuvent prendre un aspect très alpestre et interne à la chaîne en sévissant sur le Rhin supérieur, le Tessin, l'Inn, le Rhône valaisan, en fait tous les bassins hydrographiques supérieurs rayonnant autour du Gothard. La genèse de ces épisodes est moins schématiquement simple que celle des épisodes précédents et nous avons distingué 3 types de situations atmosphériques responsables des principales averses d'été ; un élément fixe et commun à tous ces épisodes hydrométéorologiques est la présence de basses pressions sur l'Europe de l'Est et l'Europe centrale en opposition aux hautes pressions atlantiques :

– 1^{er} type : il s'apparente au type de temps générateur des précipitations océaniques par l'existence d'un flux de sud-ouest dirigé sur les Alpes occidentales. Il s'en différencie par l'intervention d'un blocage de ce flux contre les reliefs, blocage effectué par une intrusion d'air polaire froid. Le flux chaud repoussé violemment contre la chaîne, s'élève et se condense à l'intérieur de celle-ci sur les plus hauts sommets (juin 1955).

– 2^e type : illustré très clairement par l'épisode de juin 1910, il engendre à la fois les plus grosses crues du Rhin à Bâle mais aussi maintes inondations bava-roises. Il est caractérisé par une intrusion d'air froid de vaste dimension dans une sorte de marais barométrique, intrusion qui se poursuit jusque sur la Méditerranée où se creusent alors des minima actifs. Il s'effectue une remontée d'air chaud et humide par le Sud Est, la Yougoslavie, l'Autriche occidentale, la Suisse orientale, la Bavière, et le long de la discontinuité thermique ainsi formée, apparaissent des phénomènes pluvieux frontaux.

– 3^e type : est celui de situation dite de "goutte froide" dont les effets sont identiques à ceux de la situation précédente, mais sont parfois plus localisés selon l'ampleur et la durée de passage de la goutte. Détachées souvent violemment de la masse d'air polaire, ces gouttes circulent à haute altitude selon des trajectoires préférentielles dans des talwegs limités à l'Ouest et à l'Est par des zones anticycloniques. Ces gouttes itinérantes sur l'Europe paraissent être incontestablement les causes essentielles des fortes précipitations estivales qui, sur les Alpes, très originalement, s'abattent sur des versants d'expositions opposées.

Les Alpes centrales et orientales sont la zone d'attraction des gouttes froides entre mai et août (49 %). Elles engendrent, par la baisse brusque de pression qu'elles déterminent ou "breakdown", une convergence tourbil-

Figure 3 – Répartition pluviométrique type des épisodes océaniques occidentaux (courants sud ouest-ouest).

Figure 4 – Répartition pluviométrique type des épisodes océaniques orientaux (courants ouest-nord ouest).

lonnaire d'air froid de NO-SE et d'air chaud pseudo-méditerranéen de S-Est. On comprend que la localisation des précipitations maximales dépende de la position de la goutte froide et de la dépression d'altitude qui l'accompagne, de la durée de son passage ou de son maintien. Ce phénomène atmosphérique explique fort bien l'origine des grandes averses qui ont causé les crues helvétiques extraordinaires de juin 1953 et août 1954.

On ne peut pas rattacher très nettement à un type de situation météorologique un type d'épisode pluvieux comme il a été possible de la faire pour les épisodes océaniques ; par contre, lors de chacun des événements hydrométéorologiques, il est aisé de comprendre pourquoi il a engendré tel type d'averse plus ou moins étendu sur la chaîne alpine.

La localisation des noyaux pluviométriques paroxysmaux au sein desquels les totaux en 48 heures peuvent dépasser 200 mm, en position préalpine ou alpine, au niveau des Alpes centrales et leur extension occidentale dépend :

- par flux de SO-Ouest, de la latitude du phénomène de blocage et du soulèvement en force de l'air chaud ;
- par situation de marais puis d'intrusion froide jusqu'au sud des Alpes, de la position de la ligne de discontinuité thermique ;
- par situation de goutte froide isolée, du passage de celle-ci entre Alpes françaises et autrichiennes, de sa traversée vers le sud ou non, de son ampleur.

Les précipitations descendent en position méridionale sur les Alpes françaises et le versant italien lorsque :

- la circulation zonale s'effectue au niveau du 45° parallèle ainsi que le blocage de l'air humide ;
- lorsque se creusent des minima barométriques sur le golfe de Gênes et la plaine du Pô, suite à la descente de l'air froid en Méditerranée.

L'extension latérale des épisodes pluvieux sur les Alpes orientales est déterminée essentiellement par la position en longitude et latitude des hautes pressions occidentales repoussant plus ou moins le talweg entre le 5° et le 10° de longitude Est.

Trois modèles d'épisodes pluvieux découlent de ces diverses situations ; ils comportent des points de concentration des pluies stables mais une extension variable :

— *l'épisode pluvieux de "circulation zonale"* avec ou sans blocage (septembre 1968 – juin 1955) a des noyaux paroxysmaux qui s'échelonnent du bassin du Drac au Sud au lac de Constance au Nord, avec débordement sur le Tessin (crues concomitantes du Rhin et ses affluents, de l'Arve, de l'Isère, du Drac et du Tessin) (Fig. 5).

— *l'épisode alpestre*, centré sur les bassins du Haut Rhône et Haut Rhin (Fig. 6) engendre les crues records de ces deux fleuves dans leur partie alpestre en corrélation avec de notables intumescences de l'Adige et surtout du Tessin (août 1954).

Du 18 au 25 août 1954, on peut totaliser des précipitations supérieures à 250 et même 300 mm dans la région tessinoise, l'isohyète 150 mm englobant le Haut Valais, le Haut Rhin, tandis qu'un autre noyau s'allonge

sur le Jura ; mais l'extension des précipitations supérieures à 100 mm autour de ces zones de maxima est spectaculaire puisque sont touchés à la fois le Sud des Alpes, l'Italie, la Bavière occidentale. Le Rhin en amont du lac de Constance connût un débit record de 2700 m³/s ; le Rhône valaisan roula 1040 m³/s, soit le 2^e débit record après celui de septembre 1948 ; l'Inn à Martinsbruck et surtout le Tessin à Bellinzona eurent également une grosse crue (1200 m³/s à Bellinzona). Des petites et moyennes intumescences se déclenchèrent sur le Rhône à Lyon (2375 m³/s) le Rhin à Bâle (3140 m³/s), l'Aar à Brugg (810 m³/s), le Danube à Ingolstadt, Linz et Vienne. Fait curieux à signaler, l'Isère, le Drac, la Durance et même le Pô accusèrent une montée mineure mais visible de leurs eaux. Plus qu'à la force des crues sur chacun des cours d'eau, nous nous attachons à l'extension spatiale du phénomène hydrométéorologique ; que le Pô à Pontelagoscuro (3750 m³/s), l'Adige à Trente (522 m³/s) aient connu une crue simultanément avec le Rhône supérieur, le Rhin et le Danube, nous paraît être le fait original qu'il importait de signaler.

Centré au cœur des Alpes, à la charnière orographique où l'Arc alpin change de direction, ce type d'averse fait donc participer au même événement hydrologique de très nombreux cours d'eau. C'est sans doute un des types d'averse qui a la plus grande extension spatiale.

— *l'épisode rhénan* (Fig. 7) s'étend normalement du bassin de la Sarine à celui de l'Isar sur le réseau danubien avec des précipitations maximales concentrées sur les Alpes des 4 Cantons, Glarus, St Gall. Sont alors en crues simultanées l'Aar, le Rhin, tous ses affluents orientaux, l'Inn, et même le Danube bavaro-autrichien.

L'épisode du 21 au 27 juin 1953 montre très nettement des précipitations qui obéissent à une répartition à la fois typique des averses océaniques et des averses à nuance méditerranéenne. Les totaux maximaux n'intéressent toutefois que le versant nord des Alpes, avec un noyau centré sur les Alpes de Glaris et de St Gall (200 à 300 mm). Les précipitations comprises entre 50 et 100 mm couvrent la totalité de la Suisse et le nord des Alpes françaises, s'étendent sur le Piémont bavarois et les Alpes de Salzbourg où elles atteignent 150 mm ; elles débordent sur la Lombardie avec des maxima de 200 mm dans le Tessin.

La crue du Rhin n'est que la 6^e de 1900 à nos jours, mais elle présente la particularité d'être accompagnée par un grand nombre d'intumescences sur d'autres cours d'eau. Le Rhin à Bâle ne roula que 3800 m³/s (4300 en juin 1910) mais tous les cours d'eau suisses furent en crues simultanées (Aar, Reuss, Limmat, Rhône à Scex) avec le Rhône à Lyon (2297 m³/s) et le Danube à Ingolstadt (642 m³/s) à Vienne, le Tessin à Bellinzona, l'Adige à Trente et même la Drave à Villach...

Avec les épisodes hydrométéorologiques estivaux localisés sur les Alpes centrales helvétiques, nous pénétrons déjà dans le domaine des phénomènes atmosphériques caractéristiques des précipitations dites d'"Europe Centrale" qui sévissent de juin à août sur la Bavière et l'Autriche.

Figure 5 – Répartition pluviométrique type des épisodes estivaux océaniques (circulation zonale de sud ouest-ouest).

Figure 6 – Répartition pluviométrique type des épisodes alpestres italo-helvétiques.

Figure 7 — Répartition pluviométrique type des épisodes rhénans.

C — Les épisodes hydrométéorologiques de type Europe centrale.

Ces épisodes estivaux sont longtemps restés mystérieux pour les hydrométéorologues, au même titre que certaines grandes averses helvétiques car les précipitations véritablement diluviennes qui s'abattent alors que sévit un flux froid et pas très humide de N-Ouest, ont tous les caractères de précipitations méditerranéennes.

Ils sont dus comme les précédents, au *phénomène de "goutte" froide d'altitude, descendue sur l'Europe Centrale*, selon une trajectoire NO-S.Est, mais, ici à une *longitude comprise entre le 5° et le 20° méridien*. Il s'établit sur l'Ouest et le Nord de l'Europe, pendant le même temps, une dorsale de hautes pressions rejoignant parfois en arc de cercle la zone anticyclonique d'Europe centrale et orientale. Ces gouttes complètement isolées de leur origine, s'évacuent vers l'Est après avoir stationné un temps variable sur la Bavière ou sur l'Autriche. Il est bien certain que la seule situation du champ de pression au sol ne pouvait, pour toutes les années antérieures aux années 1950, permettre de saisir le mécanisme qui fait intervenir de l'air chaud de provenance S-Est venant recouvrir l'air froid et créer un front actif.

— Lorsque le talweg le long duquel la goutte froide descend à nos latitudes, s'allonge entre le 5° et le 10° de long. Est pour évoluer ensuite par translation latérale vers l'Europe centrale, *l'épisode est plus spécialement bavarois* et même général, étendu de la Suisse orientale à l'Inn (juin 1940 — juin 1965).

— Lorsque la goutte se détache plus à l'Est entre 10° et 15° de L. Est de façon assez violente et rapide (24 à 48 heures) comme en juillet 1954, elle reçoit une poussée vers l'Europe centrale et est véritablement éjectée au niveau de l'Autriche. Ce vortex déclenche de très fortes pluies *autrichiennes*, celles même qui sont responsables des plus grandes crues et inondations du Danube entre le confluent de l'Inn et Budapest.

Les configurations du champ de pression au sol sont dans les deux cas toujours assez caractéristiques, avec des minima centrés sur le 10° méridien ou à l'Est de celui-ci, parfois descendant jusque sur l'Italie, et, sur toute l'Europe occidentale et septentrionale, une vaste zone de hautes pressions. *Il existe des épisodes hydrométéorologiques assez longs qui voient se succéder les deux types de situations* avec des temps de stationnement variables des gouttes et minima. Ainsi, il peut y avoir extension des précipitations sur les Alpes suisses et le réseau rhénan lorsque l'intrusion froide arrive sur la France et les Alpes occidentales dans les 24 à 48 premières heures de l'épisode (juin 1965) les maxima atlantiques ne dépassant pas la longitude de l'Espagne. Le prolongement des précipitations vers l'Europe Centrale et la plaine hongroise est lié à l'offensive des hautes pressions atlantiques jusqu'au 10° méridien et au stationnement de la goutte froide pendant au moins 24 heures entre le 15° et 20° de L.Est (août 1959). L'extension méridionale des précipitations danubiennes n'est pas exclue ; elle a lieu lorsqu'un minimum se creuse sur le golfe de Gênes et même jusqu'à la Tunisie comme en juillet 1924 et juin 1940.

Deux tracés isohyétaux types résultent des deux types simples d'épisodes pluviométriques :

— *L'épisode bavarois et général* s'étale du bassin de l'Aar à celui de l'Enns et de la Haute Drave, avec des noyaux paroxysmaux sur les Alpes de Glarus, St Gall, l'Allgau et les préAlpes bavaroises jusqu'à la vallée de l'Inn moyen (Fig. 8). Les cours d'eau touchés sont le Danube jusqu'à Linz, l'Ilzer, le Lech, l'Isar, l'Inn et le Rhin à Bâle.

L'épisode de *mai-juin 1940* vit naître une des plus grandes crues du Danube bavarois et eut des conséquences hydrologiques étendues à la Suisse orientale et à l'Italie étant donné la descente de l'air froid à des latitudes méridionales. Le Danube quant à lui, eut encore à Vienne une intumescence au dessus de la moyenne. Commencé le 27 mai, sur la Suisse, l'épisode pluvieux se termina le 2 juin sur l'Autriche ; les journées paroxysmales se concentrèrent du 29 au 31 mai et les pluies déversées alors sur la Bavière représentent les 2/3 des totaux de l'épisode. Elles sont regroupées en noyaux entre le bassin de la Reuss et celui de la Salzach avec des totaux supérieurs à 200 mm sur les hauts bassins du Lech, de l'Isar, l'Inn et de la Saalach. Le 29 mai vit s'amorcer la majorité des grosses intumescences, les minima de pointe ayant lieu entre le 30 mai et le 1er juin. L'Isar eut sa crue record à Munich (510 m³/s) et Landau (1420 m³/s) ; l'Inn à Schärading roula 5125 m³/s. Le Danube à Ingolstadt eut un débit de pointe de 1860 m³/s et à Linz de 6463 m³/s (coefficient de crue : 0,74). Parallèlement, le Rhin à Bâle atteignait le 31 mai 2700 m³/s, mais le phénomène le plus intéressant à noter dans l'optique d'une recherche des répercussions lointaines ou inusitées des épisodes pluvieux, est l'existence d'une intumescence du Pô, supérieure à la majorité des gonflements accompagnant habituellement les crues des cours d'eau du versant nord helvétique.

— *L'épisode autrichien* s'étend du bassin de la Reuss à celui de la Traisen, exclusivement sur le versant nord alpin, sa limite la plus méridionale étant le bassin de la Drave ; par contre, il se poursuit au Nord et au Nord Est de la vallée du Danube (fig. 9). Les précipitations les plus fortes (150 à 200 mm en 24 heures en juillet 1954) se concentrent surtout sur les Alpes du Tyrol, les PréAlpes de Salzbourg et le Salzkammergut ; elles engendrent les crues records du réseau danubien entre le bassin de l'Isar et la Hongrie.

L'épisode du *7 au 11 juillet 1954* fut la cause de la crue record du Danube à Vienne et à Linz pour le XX^e siècle, et le responsable de catastrophiques inondations. Cet épisode est nettement autrichien, caractéristique des crues du moyen Danube des confins hongrois ; par contre, le Piémont bavarois et les bassins du Lech et de l'Ilzer furent épargnés. Les maxima pluviométriques du 7 au 9 juillet se concentrent, avec des valeurs supérieures à 300 mm sur les Alpes du Tyrol entre l'Isar et l'Inn, les Alpes de Salzbourg et le Salzkammergut. Nous avons dans ce type d'averse une concentration des précipitations toujours très marquée dans le temps (48 heures) et dans l'espace, l'épisode de juillet 1954 étant un des plus extensifs. De ce fait, il y a peu de cours d'eau alpins qui soient en crue concomitantes avec celles du Danube à Vienne. Sur ce fleuve, les

débats maxima se trouvent entre la confluence de l'Inn à Vienne avec 8 800 m³/s à Linz, 9 600 m³/s à Vienne. En Bavière, à Ingolstadt la crue ne fut que moyenne (1 140 m³/s). Notons les petites crues de la Drave (328 m³/s à Villach), du Rhin supérieur (610 m³/s à St Margrethen) et du Rhône supérieur à Scex.

Ainsi, *entre le mois de janvier et celui d'août*, pour des raisons météorologiques variées, *toute la convexité alpine peut connaître des épisodes pluvieux hyper extensifs* aptes à alimenter par leur intensité des crues en série, apparues du Rhône au Danube en un laps de temps de 1 à 3 jours. Parmi les plus extensifs, sont les épisodes océaniques occidentaux d'hiver ; les moins étendus sont ceux de type Europe centrale (autrichiens).

D — Les épisodes hydrométéorologiques méditerranéens.

Par l'ampleur de l'espace géographique qu'ils touchent, le nombre et la puissance des crues qu'ils déclenchent du Rhône à la Drave, ces *épisodes, engendrés par des flux pluvieux de Sud et Sud Est, se révèlent aussi importants dans l'hydrométéorologie alpine que les épisodes océaniques et d'"Europe centrale" réunis*. Ils peuvent couvrir toutes les Alpes méridionales franco-italiennes, et, dans le temps, couvrent aussi une grande partie de l'année puisqu'ils sévissent d'octobre à décembre sur le Bassin du Rhône, surtout de mai à juin sur celui du Pô, et d'août à septembre sur les cours d'eau des Alpes vénitiennes.

Il apparaît toutefois que *c'est la saison automnale qui est celle où sont susceptibles d'avoir lieu les épisodes les plus extensifs* et le plus grand nombre de crues concordantes ; le plus bel exemple d'un tel événement est celui de novembre 1951.

Le processus météorologique qui préside à la formation de ces précipitations est immuable ; dans tous les cas, elles sont engendrées par un violent appel d'air méditerranéen chaud et humide de Sud à Sud-Est, vers un centre dépressionnaire sur l'Ouest et le Centre de la France.

L'étude de la haute atmosphère a révélé que le *secteur méditerranéen est une zone d'attraction pour les intrusions froides* accompagnées de minima barométriques avec 22 % des apparitions annuelles, les plus fréquentes ayant lieu en *mai-juin* et *septembre-octobre*. Ces apparitions sont la cause de la plupart des déluges qui s'abattent sur les bassins versants méditerranéens aux saisons dites intermédiaires. L'air froid dépressif qui envahit le Sud de l'Europe occidentale le fait sous forme de langue ou comme précédemment de "goutte" ; le processus d'isolement complet de ces gouttes ("cutting of process") vu lors des épisodes autrichiens ne s'effectue le plus souvent que lors de certains événements vénitiens estivaux.

Schématiquement, nous trouvons 3 types de situations atmosphériques en altitude et au sol donnant lieu à 3 types d'épisodes pluvieux :

— *type rhodanien* : l'intrusion se fait sous forme de langue avec une dépression centrale, tandis que les hautes pressions règnent sur l'Italie et les Balkans ; la

Figure 8 – Répartition pluviométrique type des épisodes bavarois généraux.

Figure 9 – Répartition pluviométrique type des épisodes autrichiens.

zone frontale perturbée se forme au niveau du couloir rhodanien avec flux de Sud.

— *type padan* : l'intrusion est plus basse en latitude que la précédente avec formation de dépressions isolées sur la Provence. Dans le talweg creusé entre anticyclone atlantique et anticyclone continental naissent des perturbations animées d'un mouvement rotatoire SO, N-Est et se déplaçant vers le Nord Est de l'Italie.

— *type vénitien* : la situation n'est pas sans rappeler celle que nous avons présentée pour les épisodes autrichiens, avec une large goutte stationnée sur la Provence et l'Italie ; elle correspond souvent à une phase terminale de la situation précédente et engendre les précipitations frontales pouvant aller de la côte provençale aux Alpes Orientales, avec concentration sur ces dernières.

En fait, ces trois situations se succèdent souvent soit deux par deux, soit même toutes les trois au cours d'un épisode de mauvais temps de 8 à 12 jours consécutifs et pendant lequel tout l'adret alpin est arrosé de pluies torrentielles. Le caractère particulièrement abondant de celles-ci (600 à 800 mm en 6 jours — 500 mm en 5 jours), est dû non seulement à la violence de l'appel d'air chaud et humide, mais aussi, à la présence d'un arc montagneux *concave* contre lequel viennent s'emboutir les nuages et dans lequel les perturbations peuvent rester prisonnières. Lorsqu'a lieu, au sein d'un long épisode, la succession des 2 ou 3 situations, le temps de maintien de chacune d'elle détermine le caractère dominant de cet épisode, son tracé isohyétal et la formation d'une grande crue du Rhône, ou du

Pô, ou de l'Adige, chaque fleuve étant toujours accompagné par des intumescences des deux autres. *De même qu'il n'y a pas de grande crue isolée, il n'y a pas de type d'épisode pluvieux dont la localisation géographique soit absolument tranchée ; il existe trois nuances dans les tracés modèles des isohyètes.*

— *L'épisode rhodanien* (Fig. 10) s'étend sur tout le bassin rhodanien au sud du confluent de l'Isère et s'avance sur l'Appennin, le Piémont et même le Tessin en noyaux épars lors des cas les plus extensifs ; il peut remonter au Nord jusqu'au confluent de la Saône. Cet épisode se compose presque toujours d'une phase cévenole suivie d'une phase provençale. Les noyaux de précipitations maximales sont larges et se répartissent avec une quasi égale intensité sur le rebord cévenol, les Préalpes et Alpes du Sud (Durance), les Alpes Pennines. Le noyau du Tessin s'avère être un pôle pluviométrique constant lors de tous les épisodes méditerranéens. Sont en très grande crue le Bas Rhône et ses affluents ainsi que le Pô (ainsi que le montrent les événements de novembre 1935).

Le mois de *novembre 1935* se caractérisa par une série pluvieuse extraordinaire commencée dès octobre. La saturation du bassin du Rhône inférieur était donc très forte et le fleuve déjà haut lorsque survinrent les averses qui déclenchèrent une série extraordinaire de crues successives dans le Sud des Alpes et du couloir rhodanien. L'épisode décisif du 7 au 13 novembre 1935 est un beau type d'averse méditerranéenne extensive puisque les pluies n'épargnèrent ni la Provence, ni le rebord cévenol, ni le bassin du Drac et remontèrent

Figure 10 — Répartition pluviométrique type des épisodes méditerranéens rhodaniens.

presque jusqu'à Lyon, au Nord. Les maxima pluviométriques (plus de 200 mm) se rassemblent en une bande SEst-NOuest allant de la Provence au Haut Vivarais en atteignant souvent plus de 300 mm. En Italie, nous trouvons une concentration de pluies sur la région du lac Majeur et le Tessin ainsi que sur la Vénétie (Haut Tagliamento et Isonzo), ces noyaux apparaissant presque toujours lors des averses méditerranéennes rhodaniennes ; par contre le bassin padan peut être relativement épargné. Pendant une dizaine de jours des crues générales eurent lieu sur tout le versant occidental et méridional des Alpes. Le Rhône enregistra une série de plusieurs intumescences, la plus grandiose ayant lieu à la mi-novembre. A Lyon il roula $4028 \text{ m}^3/\text{s}$ à la Mulatière et $9238 \text{ m}^3/\text{s}$ à Beaucaire. Le Pô connu à Pontelagoscuro sous l'influence principalement des affluents lombards, un débit de $5600 \text{ m}^3/\text{s}$. A la suite d'une averse plus exclusivement italienne tombant du 14 au 18 novembre, le Pô enregistra alors une crue de beaucoup supérieure à la première alors que le Rhône entrait dans sa phase de décrue ($6620 \text{ m}^3/\text{s}$ à Pontelagoscuro). Nous abordons là un des traits essentiels des concordances entre Rhône inférieur et Pô qui sont extrêmement nombreuses mais au cours desquelles les débits maxima ne coïncident jamais exactement.

— *L'épisode padan* (type mai-juin 1917 – mai 1926 – novembre 1951) couvre outre le bassin du Pô, les Préalpes et Alpes du Sud jusque sur la Durance moyenne et peut, à l'Est, déborder même sur le versant Nord au niveau des Alpes centrales (Fig. 11). Les noyaux de précipitations les plus abondantes et intenses se concentrent

sur l'Appennin, les Alpes Pennines et Lépontiennes ; elles se prolongent souvent sur les Préalpes orientales de Vénétie. Le Pô et tous ses affluents lombards et apennins sont en crues simultanées ainsi que le Bas Rhône, la Durance, l'Adige, le Piave et le Tagliamento.

Du 7 au 12 novembre 1951, un vrai déluge s'abattit sur le bassin du Pô avec des maxima pluviométriques extraordinaires dans les bassins de la Sésia, du Toce où ils dépassèrent 500 mm en 4 jours... Dans les Alpes lombardes, les pluies dépassèrent 350 mm. Plus à l'Est, dans les Alpes Carniques on nota plus de 600 mm. Les précipitations recueillies par le versant italien sont toujours supérieures à celles qui tombent sur le bassin rhodanien en général ; seules les précipitations cévenoles peuvent rivaliser avec les précipitations padanes. En novembre 1951, l'extension des précipitations à l'Est explique la crue de l'Adige qui eut lieu parallèlement à celle du Pô tandis que leur pénétration sur le versant sud-occidental des Alpes (Durance-Verdon-Drôme-Drac) rend compte des nombreuses crues élémentaires qui se déclanchèrent dans cette zone et de l'intumescence du Rhône à Beaucaire ($8377 \text{ m}^3/\text{s}$). Tous les affluents padans ont participé à la montée générale des eaux ; le Pô au moment de la rupture des digues, le 14, atteignit 11 500, dépassant les crues antérieures. Le Rhin en amont du lac de Constance (St Marghreten $310 \text{ m}^3/\text{s}$), l'Aar à Brugg ($510 \text{ m}^3/\text{s}$), le Rhône valaisan (Scex $230 \text{ m}^3/\text{s}$) et même le Rhône à Lyon accompagnèrent le Pô, mais le Rhône inférieur surtout eut une très forte crue. Il roula un maximum de $6906 \text{ m}^3/\text{s}$ à Avignon, $8377 \text{ m}^3/\text{s}$ à Beaucaire. Son maximum principal ne vint

Figure 11 — Répartition pluviométrique type des épisodes padans.

que lors d'une deuxième averse du 18 au 22 alors que le Pô était en décrue ($9175 \text{ m}^3/\text{s}$ à Beaucaire, soit la 2^e crue du siècle).

— *L'épisode vénitien* "illustré" par les exemples de septembre 1960, 1965, août 1966 et novembre 1966, épisodes au cours desquels naquirent les plus grandes crues du siècle pour l'Adige à Trente et la Drave à Villach, s'étend du bassin de la Sésia à ceux de l'Isonzo et de la haute Drave. Les noyaux paroxysmaux fréquents se retrouvent sur les Alpes Pennines, les Dolomites, les Préalpes Vénitiennes, Carniques et Juliennes, et traversent parfois sur les bassins supérieurs de l'Inn et de l'Enns. Des crues simultanées gonflent alors l'Adige, tous les cours d'eau de la région vénitienne, la Drave, la Mur, parfois l'Inn, le Haut Rhin et, à l'Ouest, le Pô (Fig. 12).

Avec l'exemple de *novembre 1966* se schématise le cas d'un épisode de type vénitien très net et responsable de la crue record du XX^e siècle pour l'Adige. Du 2 au 5 novembre la région préalpine comprise entre l'Adige et Tagliamento reçut des précipitations exceptionnelles de plus de 500 et même 700 mm... Plus de 200 mm sont tombés sur toute la Vénétie, mais aussi sur la Haute Drave et le Gail en Autriche. Vers l'ouest l'extension de telles pluies se fit en tâches sur les lacs italiens (lac Majeur surtout), le bassin rhodanien et les Alpes Maritimes ne recevant que 50 à 100 mm. A la suite de cet épisode pluvieux, Vénétie et Carinthie connurent de graves inondations. L'Adige à Trente eut un débit de $2321 \text{ m}^3/\text{s}$ et la Drave à Villach, le même jour (5 novembre) accusa $1238 \text{ m}^3/\text{s}$ (3^e maximum du siècle).

Le Pô eut une intumescence bien visible tant à l'amont à la Becca qu'à Pontelagoscuro ($7270 \text{ m}^3/\text{s}$) le 7 novembre ; le Rhône à Scex et Lyon ($2311 \text{ m}^3/\text{s}$ à Pt Morand), le Rhin à Bâle eurent de faibles gonflements à la mesure des précipitations reçues mais ainsi que ceux de l'Inn à Scharding et du Danube à Linz et Vienne, ils sont curieux à noter comme indice d'une répercussion lointaine d'une averse concentrée en un lieu bien précis de la chaîne alpine.

Ces résultats, aboutissement d'une description systématique de nombreux cas particuliers, amènent quelques conclusions :

— *Il existe indubitablement des épisodes pluvieux extensifs sur l'Arc alpin*, épisodes nés d'un mécanisme atmosphérique s'effectuant bien au dessus de la Chaîne ; celle-ci sert de "moule" à la répartition géographique des précipitations avant tout *frontales* mais exacerbées par certains reliefs. L'Arc alpin détermine, au cœur de l'Europe, une zone de concentration pluvieuse aussi immuable dans son aspect au niveau des événements exceptionnels qu'à celui des moyennes annuelles. *Le relief donne une certaine continuité aux grandes averses extraordinaires* qui se calquent le plus souvent sur les premiers contreforts les mieux exposés entre 600 et 1000 m d'altitude.

Il naît ainsi, autour de l'Arc alpin plus qu'à l'intérieur de la chaîne, des zones semblant prédestinées à recevoir les très fortes précipitations ; les cartographies d'isohyètes que nous avons faites aboutissent donc à l'établissement de la carte des régions "à averses exten-

Figure 12 — Répartition pluviométrique type des épisodes vénitiens.

sives", de la *frange pluvieuse où naissent les grandes crues*.

— L'Arc alpin constitue *un pivot* autour duquel et au-dessus duquel s'effectuent les va et vient cycliques des centres d'action tout au long de l'année. Il est intéressant de constater qu'une espèce de "*ronde saisonnière*" des événements hydrométéorologiques exceptionnels s'y effectue, ronde apparente correspondant à des oscillations en latitude et longitude des intrusions froides et des dépressions :

- d'octobre à décembre naissent les crues du Bas Rhône accompagné du Pô ;
- de janvier à mars sévissent les précipitations océaniques et Rhône supérieur, Rhin, Danube bavarois sont touchés ;

— au printemps suit l'offensive des dépressions et gouttes froides sur les Alpes centrales responsables des plus grandes crues helvétiques et bavaraises, et lorsque l'intrusion franchit les Alpes, d'une partie des crues padanes ;

— la pleine saison chaude voit s'accroître le décalage des intrusions froides à l'Est et ce sont les grandes crues danubiennes qui ont lieu, suivies en septembre par celles de l'Adige.

Le passage d'un type de temps à un autre, d'un type marqué d'épisode pluvieux à un autre, se fait par transition lente, à la faveur d'averses successives ; ainsi s'explique l'existence d'événements hyper-extensifs et la possibilité de voir monter presque simultanément les grands fleuves alpins et leurs affluents.