

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Herausgeber:** Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 72 (1974-1975)  
**Heft:** 345

**Artikel:** Le grain orageux et ses particularités  
**Autor:** Bouët, Max  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-276680>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Le grain orageux et ses particularités

PAR

MAX BOUËT \*

*Résumé.* — Etude du grain orageux sur la base de 156 cas observés en Suisse romande en mettant l'accent sur la variation rapide de pression qu'il produit au sol. Sont traités : la distribution annuelle et diurne de fréquence, le retard à la pluie, la saillie de pression sous l'arc de grain et l'orage en général dont on donne le spectre de fréquence diurne en traitant à part l'orage de caractère local. Le grain authentique est accompagné d'un front froid et en représente la forme la plus instable ; il provoque un brassage intense des basses couches de la troposphère par les mouvements verticaux mis en branle, et cela de préférence dans la soirée.

En complément, on mentionne les courtes interruptions du fœhn alpin en Valais causées apparemment par des intrusions froides, orageuses ou non, et on en fournit quelques exemples.

### INTRODUCTION

On entend par « grain orageux » toute bourrasque apparaissant brusquement, de courte durée, accompagnée de pluie parfois torrentielle et d'orage ; la durée du phénomène, presque toujours marqué par un assombrissement momentané, est de l'ordre de 10 à 30 minutes environ.

L'aspect du grain est caractéristique ; on le voit s'approcher plus ou moins rapidement sous la forme d'une barre nuageuse noirâtre, peu élevée et quasi rectiligne devant un rideau de pluie : *l'arc de grain*. Ses nuées basses, déchiquetées et tourmentées, trahissent l'existence de forts courants ascendants. L'arc à l'intrados nettement dessiné est surmonté d'une puissante panne de nuages à développement vertical, constituée d'énormes cumulonimbus formant une vaste muraille en mouvement. Il est des grains sans pluie ni orage dits « grains blancs » ; ils sont rares chez nous.

---

\* Etavez, CH - 1052 Le Mont-sur-Lausanne.

Le grain se développe selon une ligne, s'étendant sur des dizaines voire des centaines de kilomètres, d'allure sinueuse et irrégulière ; en effet, la progression ne se fait pas partout à la même vitesse. La « ligne de grain » (*Böenlinie, squall line*) apparaît quelquefois sur la carte météorologique en travers d'un pays ; mais dans bien des cas elle passe inaperçue, vu sa faible dimension en profondeur, réduite à quelques kilomètres seulement. Il existe des formes orageuses ou simplement pluvieuses rappelant le grain par leur aspect, mais qu'il convient d'écartier dans une étude de grain franc.



Fig. 1. — Grain en vue sur la rive gauche du lac de Zurich. On distingue nettement l'arc de grain noirâtre devant le rideau de pluie. Dans quelques minutes l'averse atteindra le lac, puis la rive droite du premier plan. La courbure apparente de l'arc est un effet de perspective. (Cliché Th. Zingg, Männedorf.)

Il y a tout d'abord des faux grains qui s'observent dans un état pseudolabile de l'atmosphère, à l'arrière des fronts froids. Les averses qui se produisent dans ces conditions peuvent donner lieu à des coups de vent sous une nuée basse et sombre qui rappellent le grain classique. Phénomène de faibles dimensions, assez localisé et vite disparu, ces vents d'averse analogues aux vents d'orage ne constituent pas un grain proprement dit et je les ai laissés de côté.

Puis l'orage banal de caractère local est aussi le siège d'un coup de vent simulant le grain. Sous le cumulonimbus générateur arrivé à sa pleine maturité se produit régulièrement un courant descendant froid

qui s'étale sur le sol en une nappe fuyant l'orage de tous côtés. Selon l'importance de la cellule orageuse, on observe alors un coup de vent allant du souffle léger à la rafale ; dans des conditions particulières celle-ci peut être importante. Je dois en effet mentionner le cas des orages à caractère local sévissant en Savoie, puis sur le Bas-Valais, et dont la retombée froide s'échappe vers le Haut-Lac Léman sous forme d'une longue et parfois forte bourrasque dirigée du sud-est vers le nord-ouest : c'est la fameuse vaudaire d'orage (5). Là également, on ne saurait parler de grain ; le phénomène est régional, conditionné par le relief, et n'a rien à voir avec un front froid.

L'expérience montre en effet que les grains orageux bien caractéristiques sont toujours liés au passage d'un front froid et manifestent ainsi un changement de masse d'air. La baisse de température qui les accompagne résulte donc à la fois de la retombée du cumulonimbus et de l'arrivée d'une masse froide provenant, pour nos régions d'Europe centrale, de l'Atlantique Nord. On peut sans doute affirmer que le grain orageux n'est que la forme la plus instable des fronts froids d'été. À l'advection froide à grande échelle s'ajoute au bord d'attaque une forte convection, productrice d'une averse orageuse et d'un coup de vent plus ou moins vif, chute sur le sol de couches plus élevées de l'atmosphère violemment brassée en cet endroit précis. Il est vraisemblable que le front « prépare » la basse atmosphère en la rendant instable ; le mécanisme exact n'est d'ailleurs pas bien connu.

On a examiné ici 156 cas de grains orageux ; or dans 4 % des cas seulement le diagnostic de front froid est resté incertain.

Le passage d'un grain est chose si nette qu'une observation attentive, montre en mains, permet souvent d'en noter l'heure à quelques minutes près ; le premier coup de vent est en effet facile à repérer, et c'est lui qui marque le passage et non le début de la pluie ni celui de l'orage.

Dans tout ce qui suit, je m'en tiens au grain orageux classique de grande étendue dont l'approche se signale toujours par un ciel très bouché à l'horizon. Certains grains avec leur assombrissement caractéristique peuvent être de véritables tempêtes où l'averse drue se mêle parfois de grêle et où le coup de foudre est fréquent ; les éléments déchaînés en font un beau spectacle, mais aussi un épisode dangereux de nos étés. Que de dégâts causés par les grains, que d'arbres déracinés ou brisés, de ravinements, de coulées de boue et de récoltes compromises faut-il mettre à leur compte sur le Plateau suisse ! Et combien serait-il souhaitable que nos services météorologiques prévoient *avec précision* (heure et intensité) les grains orageux venant de France ! La tâche est difficile, mais pas impossible ; elle exigerait peut-être l'existence d'un réseau régional d'alerte à l'ouest, en France voisine.

Le passage d'un grain dans le Jura donne lieu à de forts vents descendants sur le versant suisse : ce sont les *coups de joran* des invasions froides

venant de la Franche-Comté et de la Bourgogne. Par trois fois en 80 ans, l'un de ces grains a déclenché dans la grande chaîne une violente tornade, dont deux dans la même région comprise entre l'Ain supérieur (Jura) et la Vallée de Joux (9). Là encore se vérifie le rôle important du relief terrestre sur les mouvements atmosphériques.

Les vallées internes du domaine alpin ne sont pas à l'abri des grains orageux, mais ceux-ci y perdent beaucoup de leur force au point de passer souvent inaperçus ; leur survête est en général si atténuée qu'elle n'attire plus l'attention. L'orage même s'y fait plus court et plus rare. Le Valais, comme je l'ai fait remarquer ailleurs, compte deux fois moins d'orages que le Plateau, du moins dans les bas-fonds (5). Les Alpes pennines n'accusent pas le tiers du nombre de jours orageux du Jura ; si l'orage est plus rare en ces contrées, le grain y est aussi un accident secondaire et de moindre énergie.

Le lecteur excusera les nombreuses et fastidieuses données numériques de cette étude ; il comprendra, je l'espère, que sur un sujet de cette sorte le détail importe et qu'il faut parfois suivre pas à pas la chronologie d'un phénomène pour tâcher d'en saisir la structure et la complexité.

#### SOURCES

Retrouver les passages de grains dans les vastes dossiers de l'Institut suisse de météorologie, à Zurich, ne serait pas chose aisée, car ces phénomènes ne sont pas spécialement notés par les observateurs. C'est donc par voie indirecte qu'il faudrait procéder, c'est-à-dire par les observations d'orage des nombreuses stations du réseau et consultation des trop rares barogrammes et thermogrammes disponibles dans le pays. Entreprise compliquée et peu prometteuse ; j'ai procédé autrement.

Ayant observé et noté soigneusement près d'un millier d'orages depuis de nombreuses années, je me sers ici de ces notes complétées par les enregistrements à ma disposition ; ce matériel concerne donc essentiellement la région de Montreux et de Lausanne, mais aussi pour une dizaine d'années le Valais central (Montana). Les conclusions à tirer de cette documentation se rapportent donc à la Suisse romande, mais il est permis de les généraliser, le grain présentant partout la même allure, en pays de plaine du moins. Chaque fois que cela fut possible, j'ai donné des indications sur les conditions parallèles dans le Valais central.

Il serait cependant du plus haut intérêt de connaître l'évolution géographique des grains, c'est-à-dire leur progression sur de longues distances ; on mesurerait alors leur vitesse de propagation, leur extension, leurs renforcements et leurs atténuations régionales. Suivre les grains depuis les côtes françaises jusqu'aux Alpes serait certainement

riche en enseignements et ouvrirait peut-être sur le phénomène de nouvelles perspectives. Il est regrettable que la météorologie synoptique moderne, préoccupée avant tout de repérer les grands courants de la planète en vue de la prévision, « oublie » ces grains dont les effets directs sur l'activité humaine sont pourtant évidents. Or la propagation des grains orageux de la mer aux Alpes suisses et au-delà est mal connue et la prévision de leur passage laisse encore beaucoup à désirer. Les cartes du temps telles que les dressent quotidiennement les services météorologiques sont insuffisantes, car les lignes de grain s'y repèrent malaisément. Il faudrait pour leur dépistage une analyse plus fine, un réseau de barographes assez dense et des observateurs qualifiés. Ces conditions n'existant pas, la recherche après coup des grains sur un grand territoire se révèle extrêmement délicate.

C'est donc sur la base des grains observés en Suisse romande que se fonde la présente étude. 156 passages observés directement durant la période de 1930 à 1973, contrôlés par le tracé du barogramme et, cas échéant du thermogramme, constituent un matériel assez intéressant et homogène. Seuls 4 % des passages retenus n'ont pas pu être reliés à des changements de masse (fronts froids) ; il s'agit donc, dans la presque totalité des cas, de grains dépassant largement le rayon local, mais dont la durée de vie reste inconnue. 95 % de ces grains furent accompagnés d'orages au lieu d'observation ; il s'agit donc bien de grains orageux typiques. Dans tous les cas, il y eut un coup de vent important, apprécié à vue ; l'ordre de grandeur de la vitesse des rafales est compris entre 30 et 100 km/h. Les cas très rares de grains blancs, c'est-à-dire sans pluie, ont été laissés de côté.

Le vent en altitude (5000 m) lors des grains étudiés était du secteur SSW à WNW, deux fois du sud et jamais de NW. Tous les barogrammes reproduits ont été contrôlés par de nombreuses lectures barométriques directes.

Et voici, à titre d'exemple, un cas de grain estival rapide ayant intéressé pratiquement toute la Suisse ; son existence antérieure en territoire français m'est inconnue.

#### LE GRAIN TYPE

Le 14 juillet 1968, un grain orageux violent a traversé la Suisse à grande vitesse en progressant d'ouest en est ; situé sur l'ouest de la France à l'aube, il est signalé à 15 h 20 à Genève, à 16 h 05 à Lausanne, à 16 h 25 à Montreux, à 17 h à Sierre et atteint Bâle à 16 h 35, Berne à 16 h 45 et Zurich à 17 h 50. L'air neuf derrière le grain a provoqué un refroidissement d'environ 5° des couches basses de l'atmosphère ; il

franchit les Alpes, et son arrivée au Tessin méridional y déclenche apparemment de l'orage vers 20 h 30. Le vent, au moment du passage, a présenté des rafales de plus de 100 km/h par endroits, causant de gros dégâts en certaines régions du Plateau. La vitesse de déplacement de la ligne de grain fut d'environ 80 km/h en Suisse romande et de 60 à 70 km/h en Suisse orientale, plus faible encore dans les Alpes. La figure 2 montre la baisse de pression avant le grain, puis la hausse rapide de 4 mm suivie très vite d'une chute d'un millimètre, et enfin la reprise de la hausse. La figure 3 reproduit les isochrones du grain sur le territoire suisse ; on y voit la progression rapide du phénomène du Jura au Rheintal saint-gallois avec freinage par l'obstacle alpin qui retarde l'avance de l'air froid. Si l'on disposait de renseignements détaillés dans les vallées alpines, on y constaterait sans doute des complications locales des trajectoires et des vitesses dues au relief.

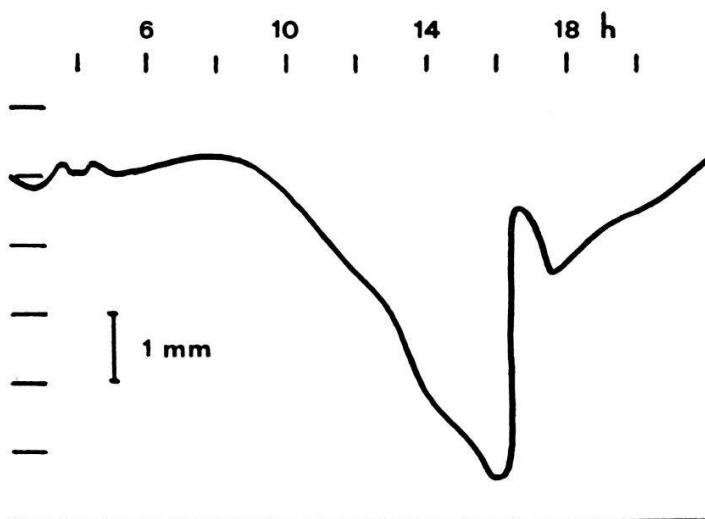


Fig. 2. — Montreux, 14 juillet 1968. Barogramme montrant la brusque saillie au passage de l'arc de grain et la hausse subséquente de pression due à l'advection du front froid. Remarquer la forte baisse avant le grain.

Grâce aux renseignements obtenus à Vienne auprès de l'Institut central de météorologie (Zentralanstalt f. Meteorologie u. Geodynamik) qui m'a fourni copie des barogrammes de 35 stations autrichiennes, j'ai pu suivre la progression du grain au-delà de la frontière orientale de la Suisse. Le front a pénétré dans le Vorarlberg vers 19 h, puis est descendu le Tyrol ; son passage s'observe ensuite tout le long du versant septentrional des Alpes algaviennes et bavaroises, de plus en plus estompé ; le crochet de grain n'est plus que de 2 mm en Haute-Autriche. Dans la Basse-Autriche, sa trace se perd peu à peu, et à Vienne même la hausse de pression disparaît. Les derniers passages nets sur le barogramme ont lieu vers 3 h à l'aube du 15 juillet en Basse-Autriche. Depuis le Jura, le grain a donc progressé sur 600 km à la vitesse moyenne de 55 km/h, d'abord élevée sur le Plateau suisse, puis plus réduite à l'est. Le trajet français, avant 16 h le 14 juillet, n'a pu être étudié ; on peut

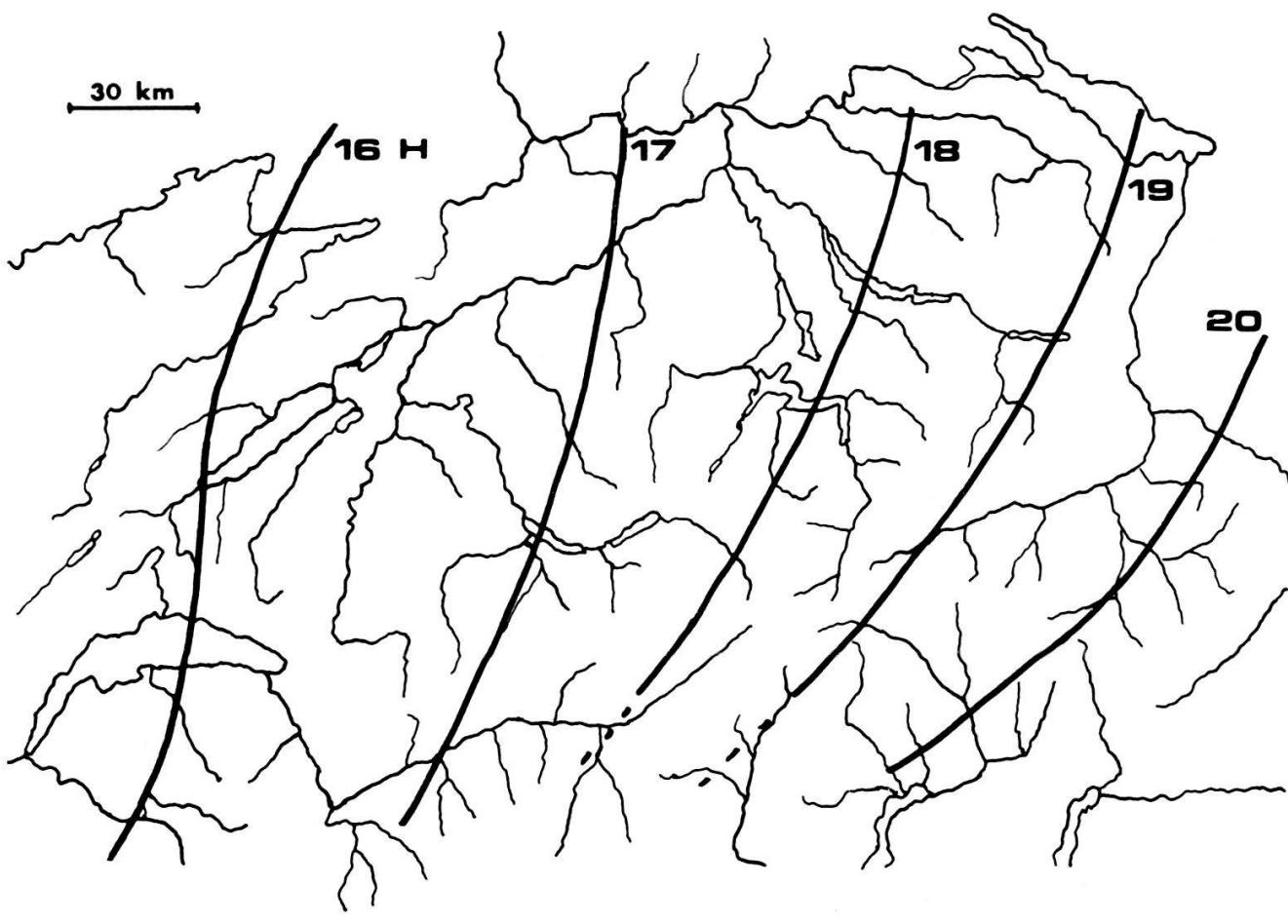


Fig. 3. — 14 juillet 1968. Isochrones du front froid en Suisse, d'heure en heure. Le tracé dans les Alpes est incertain faute de données précises, mais le freinage par le relief est très apparent.

admettre d'après la carte synoptique qu'il fut de l'ordre de 600 km jusqu'à l'escalade du Jura.

Au sud du long massif des Tauern, soit en Carinthie et en Styrie, il n'est plus possible de repérer un passage frontal, du moins pas sur la base des courbes de pression ; le franchissement des hautes chaînes par l'air froid produit une frontolyse qui modifie profondément l'allure du phénomène de grain ; des observations directes du ciel (forme des nuages, orages éventuels) amélioreraient le diagnostic. Une analyse très poussée utilisant les courbes de température, l'état du ciel en chaque région ainsi que les données pluviométriques permettrait de retrouver peut-être l'accident atmosphérique dans ces provinces méridionales, comme au Tessin d'ailleurs.

Mais de telles recherches exigent un matériel documentaire considérable et de consultation malaisée. Et puis, il faut bien remarquer qu'aujourd'hui encore la météorologie régionale (climatologie) se contente d'un appareillage rudimentaire manquant de précision pour

des études de ce genre et négligeant le facteur temps. Pour suivre avec succès des fronts ou des grains dans leurs déplacements sur de longues distances, il faudrait disposer d'enregistreurs où le temps puisse se lire avec une précision de cinq minutes au moins ; or on est loin du compte si l'on considère en outre les instruments mal réglés ou insuffisamment contrôlés.

Voilà ce que je puis dire de façon sommaire du grain type du 14 juillet 1968, remarquable par sa vitesse élevée et sa durée de vie.

En ce qui concerne la Suisse romande et le Valais, la question de la progression des grains et des fronts froids *en général* a été étudiée précédemment ; je rappelle les conclusions de cette étude (7).

Les fronts froids venant de l'ouest ou du sud-ouest pénètrent en Valais trois fois sur quatre par-dessus les chaînes montagneuses protectrices de la vallée centrale, que ce soit par l'ensellement de Chamonix (vallée de l'Arve) ou par franchissement des Alpes bernoises avec déversement sur leur flanc méridional. Une fois sur quatre, dans le cas des fronts lents, l'air froid s'introduit en remontant la vallée du Rhône et l'emplissant de sa masse lourde. Toutefois, les deux possibilités : franchissement des hauteurs ou accès par la vallée, doivent le plus souvent se combiner en une invasion complexe du profond sillon valaisan. Quant au délai de passage entre le bassin lémanique (Montreux) et le Valais central (Sierre), il varie entre 15 et 190 minutes ; en moyenne, il est de 75 minutes environ.

### 1. Fréquence

Le grain type n'est pas fréquent en Suisse, 150 de ces accidents répartis sur 35 années complètes donnent une moyenne de 4 par an ; leur nombre, toutefois, varie passablement d'une année à l'autre, puisque 1958 par exemple n'en présenta aucun et que j'en ai noté 11 en 1963 et en 1965 ; en 1973, il n'y en eut que deux. Il se peut que quelques grains de cette longue période m'aient échappé, mais leur nombre est en tous cas minime.

La *répartition sur l'année* des 150 grains se fait selon le tableau suivant qui donne leur fréquence relative.

#### *Distribution des grains par mois, en pour cent*

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
3	3	1	3	10	21	32	21	2	2	1	1	100

Le maximum estival est net : le 84 % des grains se présente de mai à août. C'est en juillet que le phénomène apparaît le plus volontiers avec

un ou deux cas par an en moyenne ; la coïncidence avec le mois le plus chaud n'est assurément pas fortuite. En hiver, seuls quelques fronts froids très actifs se manifestent sous forme de grains faiblement orageux ; de septembre à mars, il n'y a guère en chaque mois qu'un grain orageux tous les dix ans à peine en moyenne.

Quant à la distribution des passages *au cours du jour*, elle s'établit comme suit en groupant les heures d'arrivée par intervalles de deux heures (156 valeurs) :

#### *Heures de passage des grains ; fréquences relatives*

Intervalles	Fréquences	Intervalles	Fréquences
0- 2 h	1 %	12-14 h	8 %
2- 4 h	—	14-16 h	15 %
4- 6 h	2 %	16-18 h	18 %
6- 8 h	3 %	18-20 h	34 %
8-10 h	3 %	20-22 h	10 %
10-12 h	5 %	22-24 h	1 %

Valeurs brutes, non ajustées.

C'est vers 19 h que le passage d'un grain est le plus probable ; pendant la nuit, entre 23 et 5 h, le phénomène est très rare. On remarque la rapide décroissance de la fréquence après le maximum de 19 h ; la même particularité s'observe à propos des orages en général. Mais il convient de noter que le grain, puisqu'il peut apparaître à toute heure du jour et de la nuit et en outre à toute époque de l'année, ne peut pas être seulement un phénomène de convection des beaux jours, mais qu'il relève en grande partie de la stratification thermique de la basse et moyenne troposphère modifiée à l'approche d'un front froid. C'est plus qu'un orage et plus qu'un simple coup de vent.

#### *2. Le ciel avant et après*

Quel temps fait-il *la veille d'un grain*? On ne peut répondre à la question que d'une façon vague, tant il est souvent difficile de caractériser simplement le type de temps d'un jour donné. Voici, en gros, ce qui ressort des notes prises au jour le jour.

Il a fait beau temps, avec ou sans convection locale, une fois sur deux environ ; il y a eu de l'orage une fois sur trois ; il y a eu un premier passage frontal sans grain huit fois sur cent. Je ne puis préciser davantage, tout en remarquant que le cas le plus usuel est une journée de beau temps avec une tendance orageuse plus ou moins prononcée l'après-midi.

Il est donc très difficile, en général même impossible, de prévoir au simple aspect du ciel la possibilité d'un grain orageux le lendemain. Par l'examen de la carte météorologique et la consultation du baromètre, la prévision devient quelquefois possible ; le prévisionniste professionnel, dans ce cas, devrait être à même d'entrevoir la possibilité d'un grain, mais ne saurait apprécier pour le lendemain son importance, son intensité ni son étendue, encore moins l'heure de son passage. Par contre, plusieurs heures d'avance, ce même prévisionniste disposant des moyens modernes d'exploration (photos de satellites, radar, etc.) devrait pouvoir annoncer l'approche d'un grain orageux avec quelque certitude.

J'ajoute que sans carte ni renseignements particuliers tout observateur du ciel — je pense surtout au navigateur et à l'alpiniste — devrait se méfier d'un grain possible une ou deux heures à l'avance, à la seule vue des amoncellements nuageux en direction du sud-ouest ou de l'ouest. Un horizon bouché, s'assombrissant peu à peu par ciel couvert d'altostratus d'épaisseur croissante, une baisse de pression nettement supérieure à l'inflexion diurne normale et une température plutôt élevée pour la saison sont autant de signes annonciateurs d'un grain orageux ; il faut ajouter l'absence de vent, car le calme précède souvent la brusque rafale. En montagne, le passage d'un grain s'accompagne d'un très mauvais temps : brouillard épais tout d'abord lorsque le vent fraîchit, puis la bourrasque avec pluie ou neige ; le changement de temps s'effectue en quelques minutes et la température baisse rapidement.

Le *temps du lendemain* est en général troublé ; il règne une instabilité troposphérique plus ou moins grande donnant lieu à des averses ou à des orages répétés. Mais il y a des cas où le beau temps s'instaure à nouveau rapidement. L'amélioration de la visibilité est un caractère presque constant de l'air neuf amené par le grain : la limpidité de cet air contraste avec la brume antérieure au passage.

L'éventualité de deux jours consécutifs avec grain orageux est rare ; elle s'est présentée huit fois seulement lors des 38 années mises à contribution.

### 3. *Le retard à la pluie*

Si je place l'arrivée du grain au lieu d'observation au début de la hausse de pression qui coïncide pratiquement avec le premier coup de vent, je puis alors déterminer l'intervalle de temps séparant ce passage et le début de la pluie ; dans la règle, cette dernière commence peu après le passage avec un délai variant de 0 à 30 minutes environ.

Pour 68 grains de la liste générale, le procès-verbal du phénomène fournissait les données nécessaires au calcul du délai ; pour les autres, je n'en étais pas assuré. Malgré la difficulté de fixer avec sûreté et le passage du grain et le début de la pluie, j'ai cru pouvoir me servir de ce

matériel pour calculer le retard moyen ; celui-ci est de 11 minutes (médiane 7 min).

Un calcul analogue fut établi pour un certain nombre de fronts froids ordinaires absolument distincts des grains de la liste générale ; il m'a donné un retard moyen de 45 minutes (médiane 20 min), la variation s'étendant de -20 à 210 minutes, donc beaucoup plus grand et plus variable que pour les grains. Mais je dois spécifier que, dans un cinquième des cas étudiés, il pleuvait déjà bien avant le front ; ces cas n'entrent pas dans le calcul du retard moyen, bien entendu.

Citons le cas de front très lent du 1<sup>er</sup> avril 1952 pour lequel le retard à la pluie fut à Lausanne de 1 h 30 ! L'air froid, ce jour-là, avait pénétré lentement du nord au sud sur le Plateau sous forme de coin très mince, à la vitesse de 10 à 15 km/h seulement (8).

Je résume en disant que pour les grains orageux *la pluie commence en moyenne environ 10 minutes après le début de la hausse de pression*, tandis que pour les fronts froids ordinaires ce retard, beaucoup plus variable, s'élève à trois quarts d'heure environ.

C'est à la présence dans le grain du bourrelet de cumulonimbus qu'est due évidemment la précocité de la pluie ou de la grêle par rapport à la pénétration de l'air froid ; sur le front froid, cet amas nuageux à structure verticale n'existe pas en général sur son bord antérieur, ou du moins est peu développé.

Une recherche analogue pour le Valais ne fut pas possible faute de renseignements assez précis. Il semble toutefois que le retard soit ici du même ordre de grandeur, du moins pour les grains orageux ; pour les fronts ordinaires, les phénomènes sont souvent plus compliqués que sur le Plateau par suite de l'effet du relief et du fœhn.

#### 4. *Le barogramme de grain*

Tout grain laisse sur le barogramme une trace caractéristique : la courbe présente une saillie plus ou moins forte indiquant une hausse brusque de pression suivie d'une baisse moindre, cela en l'espace d'une ou deux heures environ (fig. 4 a). Comme le grain forme dans la règle le bord d'attaque d'un front froid, qu'il se situe en d'autres termes à la limite antérieure d'une masse froide en mouvement de grandes dimensions, la hausse de pression qu'il détermine est complexe et résulte de deux phénomènes distincts mais liés : 1) la surpression rapide et brève (saillie) due au noyau local d'air froid en chute verticale sous les cumulonimbus ; 2) la hausse plus lente et plus durable due à l'invasion froide à grande échelle du front proprement dit. La figure 4 a schématise le processus en montrant la saillie de grain venant se superposer à la hausse lente du changement de masse. L'accident barométrique porte le nom de « crochet de grain ».

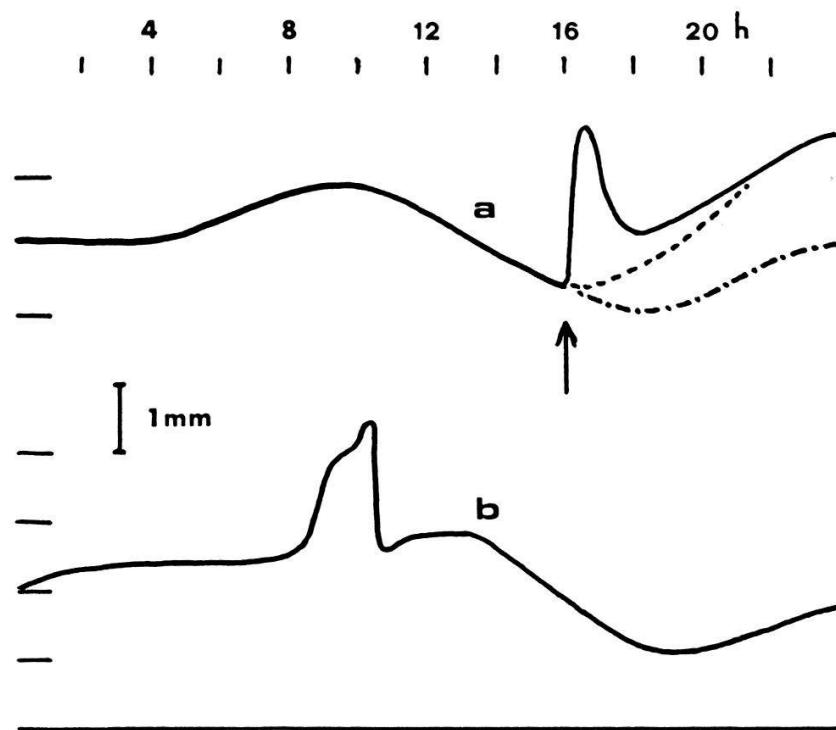


Fig. 4. — a) Schéma de crochet de grain : la surpression momentanée (saillie) produite par le cordon de cumulonimbus se superpose à la hausse du front froid indiquée en pointillé ; en tireté, courbe normale de beau temps. La flèche indique le début du phénomène coïncidant avec la première rafale de vent. — b) Montreux. Curieuse saillie du barogramme du 11 août 1966, sans orage ni grain, mais avec simple passage d'un système nuageux un peu instable de WSW entre 8 et 11 h.

La courbe schématique de la figure 4 a prend dans la réalité des formes variées conservant grossièrement l'allure indiquée. Selon l'importance de la masse nuageuse et de son bouillonnement vertical, selon la vitesse de déplacement du front, le barogramme se modifie, le crochet apparaissant plus ou moins nettement. En fait, on observe toutes les formes de transition entre la simple « bosse » de pression produite par un orage banal et le crochet de grain le plus vigoureux. De l'énergie mise en jeu dans le phénomène convectif dépend l'ampleur et l'allure de l'accident de pression.

La figure 4 b reproduit d'autre part une curieuse saillie qui s'est produite à Montreux, le 11 août 1966, lors d'une journée ensoleillée et sans orage ; entre 8 et 11 h, un système nuageux légèrement instable venant de l'ouest a passé sur la région en donnant lieu à un coup de vent du SE, puis à de la vaudaire de courte durée. Pas de pluie. Il n'est pas question de grain dans ce cas-là.

Je crois utile de reproduire quatre barogrammes réels pour illustrer ce qui vient d'être dit (fig. 5). Les deux premières courbes trahissent le passage d'un simple orage rapproché sans grain ; les deux suivantes sont l'effet de grains orageux très nets. L'amplitude de la saillie croît du pre-

mier au quatrième cas, l'échelle de pression étant la même partout. Cette figure appelle quelques précisions sur l'évolution du temps de ces quatre journées.

a) Montreux, 31 mai 1963. Beau le matin, puis développement de cumulonimbus étalant largement leurs panaches glacés jusqu'à couvrir presque entièrement le ciel ; deux petits orages avec faible pluie éclatent vers 15 h 30 et 19 h 30. Donc, convection locale sans front ni grain. Faible courant de NE en altitude. La variation diurne normale de pression est légèrement troublée par deux petites bosses au moment des orages. Beau temps le lendemain.

b) Lausanne, 31 juillet 1970. Assez beau le matin avec cumulus se développant en cumulonimbus. La convection s'intensifie l'après-midi et du tonnerre lointain se fait entendre dès 14 h. Gros orage, 16 à 17 h 30, avec pluie et grêle accompagnées de rafales de sud-ouest ; baisse momen-

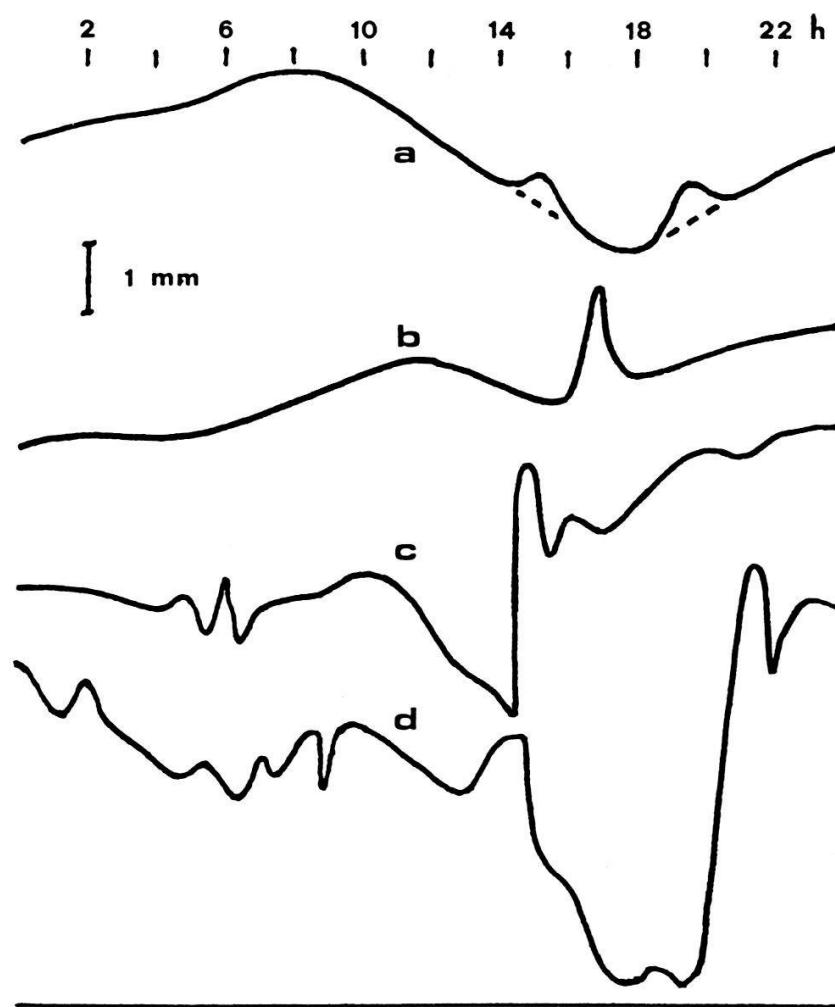


Fig. 5. — De l'orage local au grain. Barogrammes illustrant l'amplitude croissante de la saillie de pression selon l'énergie mise en jeu. L'échelle de pression est la même pour les quatre courbes. Explications dans le texte.

tanée de 10°. Il y a ensuite une stabilisation rapide ; peu nuageux le soir. Faible courant d'ouest en altitude ; pas de front ; la température reste inchangée du 31 juillet au 1<sup>er</sup> août. Beau le lendemain matin.

c) Montreux, 29 août 1964. Petits orages à 5 h 10 et à 9 h 45. Très nuageux le matin, couvert l'après-midi avec un peu de vaudaire vers 14 h (orageux en Valais !). Courant de sud-ouest en altitude, env. 70 km/h. Grain violent : rafales d'ouest dès 14 h 25 (50 à 60 km/h) avec pluie et orage. Pluie dès 18 h par ciel bas jusqu'à la nuit. Survente à Sierre (SW) à 15 h 45. Beau le lendemain après dissipation du stratus, et bonne visibilité. La température a baissé de 10° à 12° en altitude ; il y a donc changement de masse important.

d) Montreux, 16 septembre 1964. Couvert le matin par altostratus complexe à faciès préorageux ; couvert l'après-midi par altostratus moyen de WSW (120 km/h). Vaudaire de fœhn vers 14 h ; tonnerre au nord vers 14 h 15 ; pluie de 20 h 15 à la nuit. Forte pluie et rafales de NW vers 21 h 15 avec quelques tonnerres. Baisse de température de 10° à 12° en altitude. Le grain atteint Sierre à 21 h 45. Très nuageux le lendemain et venteux, bonne visibilité. Le grain comme tel est ici moins net ; on a affaire à un front froid important avec manifestations orageuses, donnant lieu à un crochet d'orage très net ; la surpression momentanée sous l'orage, quoique lente, se dessine clairement entre 21 et 22 h.

Ces quatre exemples, ainsi qu'une foule d'autres, font ressortir plusieurs faits intéressants :

1. La plupart des manifestations orageuses produisent au sol une surpression passagère : la bosse discrète des exemples *a* et *b* ci-dessus. Les orages généralisés à foyers dispersés et de haute altitude (instabilité pseudolabile) ne laissent souvent pas de trace sur le barogramme ; ils ne produisent pas non plus de coulée froide jusqu'au sol.

2. Lorsqu'il y a grain bien net, la bosse prend la forme d'une saillie plus prononcée venant se superposer à la hausse plus lente du front froid : la pression monte rapidement, baisse peu après le passage, puis croît de nouveau dans l'air neuf parvenu au lieu d'observation. Dans la série étudiée, la hausse quasi instantanée a varié de 1,0 à 7,6 mm.

3. On trouve dans l'immense collection de ces phénomènes toute la gamme des formes de transition entre l'orage purement local et la tempête de grain.

4. C'est la surpression momentanée d'une durée d'une heure environ qui caractérise le grain orageux. Ce dernier est donc complexe et comprend d'une part un afflux d'air froid neuf par advection horizontale, et d'autre part une coulée ou cascade d'air également froid issu du cumulonimbus orageux. C'est manifestement l'advection primaire du front

qui labilise l'atmosphère et qui déclenche l'ascension de l'air chaud pré-frontal suivie de la brusque retombée froide du circuit aérien de la machine thermique qu'est le cumulonimbus. Advection horizontale et circuit vertical déclenché par celle-ci sont les deux phénomènes physiquement liés qui constituent le grain orageux.

Il ne s'agit pas nécessairement dans ce processus d'un soulèvement de l'air chaud par le coin froid du front lequel, par son injection d'air humide avant le grain à plusieurs niveaux, rend instable toute la couche d'air comprise entre le sol et 6 à 10 km environ. Il ne faut pas oublier, en effet, que le vent est pratiquement toujours plus fort en altitude qu'au voisinage du sol, et que tout front froid « prépare » l'atmosphère moyenne devant lui par des glissements ou cisaillements en altitude sur lesquels nous sommes mal renseignés. Le simple fait qu'un passage au sol est toujours précédé de nuages moyens et élevés prouve qu'il se passe déjà quelque chose en altitude longtemps avant lui.

### *5. La hausse de pression dans les Alpes*

Après avoir exposé dans le paragraphe précédent la forme du barogramme de grain en pays plat, je considère maintenant l'allure particulière de la saillie barométrique dans une vallée intérieure des Alpes et son effet éventuel sur les vents régionaux. J'utilise pour cela les mesures de pression simultanées à Sierre (Chippis) et à Montreux où la comparaison de barogrammes contemporains était possible.

Je crois utile tout d'abord de souligner la différence dans le comportement des grains en Valais et sur le Plateau. Alors qu'en ce dernier endroit, comme dans le Jura d'ailleurs, les passages de grains s'accompagnent de forts troubles nuageux et venteux et en général avec pluies denses, en Valais central ces manifestations sont très atténuées : l'arc de grain se dessine mal et reste peu apparent ; la bourrasque est dans la règle plus réduite que sur les bords du Léman et l'averse y est moins drue. Dans la vallée même, le coup de vent vient de l'aval, parfois de travers par rapport à l'axe ; sur le versant des Alpes bernoises, c'est en général une rafale venant des hauteurs, du nord-ouest donc (vent cata-batique), car le grain franchit souvent cette chaîne du nord au sud.

En situation de fœhn, la lombarde (vent d'est) qui règne sur le versant de la rive droite (mais pas sur le versant opposé !) mollit seulement au passage du grain pour reprendre peu après ; ou alors elle cesse en céder le pas à un bref coup de vent d'ouest. Lorsque l'invasion froide revêt une certaine ampleur, la lombarde disparaît alors lentement et définitivement devant la rafale d'ouest ou de nord-ouest du passage frontal. Je reviens plus loin sur ce point particulier.

Quant aux manifestations électriques, elles aussi sont atténues en Valais et peuvent même faire complètement défaut.

Bref, le passage des grains en amont de Martigny s'impose beaucoup moins à l'attention que sur le Plateau ; dans bien des cas il peut même passer inaperçu pour l'observateur non averti. Les grains blancs ne sont pas rares en Valais.

Mais revenons à la hausse de pression, c'est-à-dire au crochet barométrique du grain.

J'ai relevé 26 cas de grains observés simultanément à Sierre et à Montreux dans les années 1959 à 1970 et noté dans chaque cas la valeur de la hausse postfrontale ainsi que l'écart de temps. Il en résulte qu'à *Sierre la hausse est en moyenne de 1 mm plus forte qu'à Montreux*, et que cet excès a pu atteindre jusqu'à 4,5 mm. Il est vraisemblable que la longue vallée encaissée entre de hautes chaînes de montagne retient momentanément une masse froide importante avant que l'équilibre se rétablisse entre Alpes et Plateau ; de là l'excès de pression au sol après le passage du grain.

Lorsqu'il s'agit non plus de grains, mais de simples fronts froids d'hiver, c'est l'inverse qui est de règle : la hausse à Montreux est plus forte qu'en Valais ; c'est en général le cas en hiver.

La plupart des grains orageux venant du secteur sud-ouest passent sur le bassin du Léman avant d'atteindre le Valais. La même liste que ci-dessus m'a fourni un *retard moyen de 75 minutes* à Sierre par rapport à Montreux ; il variait selon les cas de -25 à 240 minutes, car il arrive qu'un grain passe à Sierre avant Lausanne ou Montreux s'il pénètre directement par l'ouest du canton, ce qui est plutôt rare.

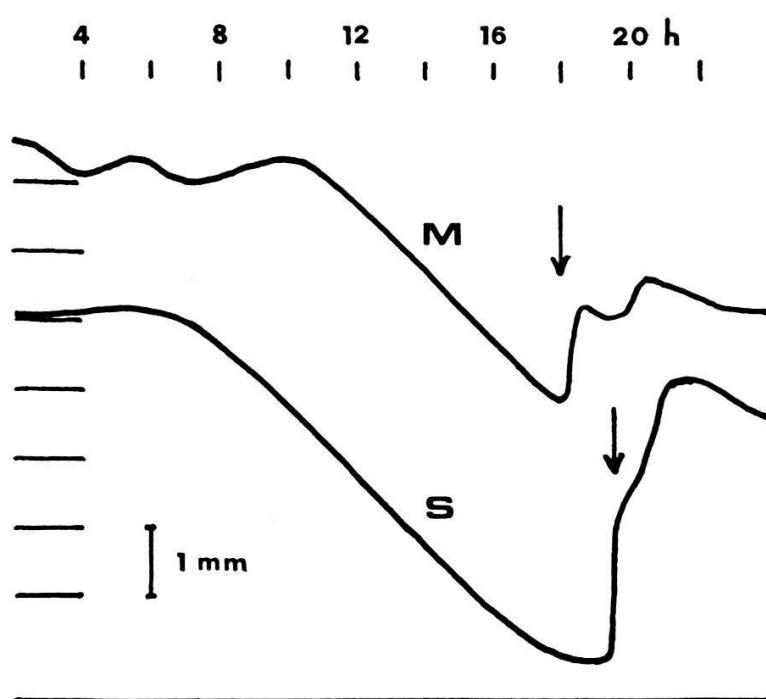


Fig. 6. — 15 mai 1965.  
Grain orageux. Barogrammes de Montreux (M) et de Sierre (S) ; hausses rapides de 1,7 mm et de 4,0 mm respectivement. Chute instantanée de température de 4,5° et de 6,5° resp.

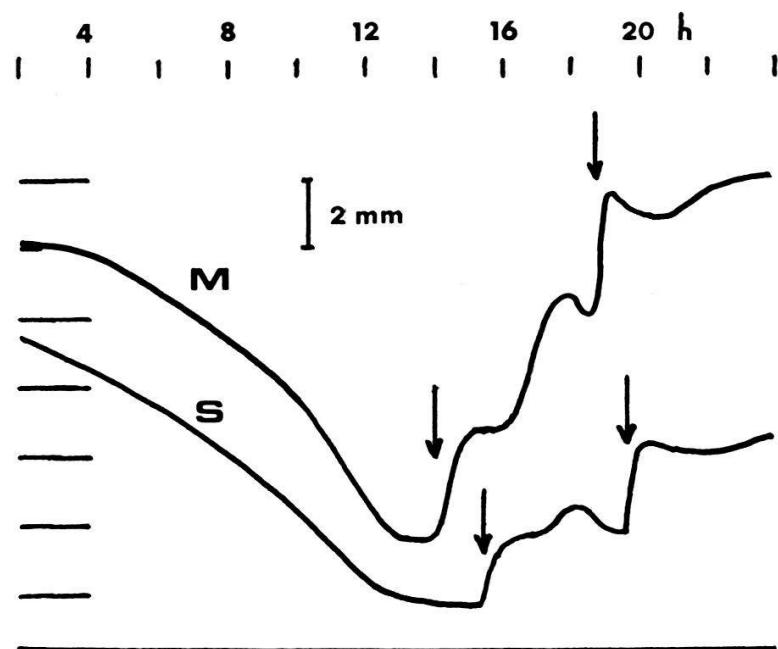
Les figures 6 et 7 illustrent le comportement particulier du Valais central lors des invasions froides en montrant deux exemples de passages à Montreux et à Sierre. Le premier concerne un grain typique qui, le 15 mai 1965, a traversé toute la Romandie en y produisant de nombreux orages (fig. 6). A Montreux, le passage a lieu à 18 h avec pluie et orage ; un deuxième orage éclate à 19 h 30 et se marque par une deuxième saillie barométrique. A Sierre, le grain arrive une heure et demie plus tard et y produit une rafale de 18 m/s ainsi qu'une hausse de pression de 4,1 mm en 2 h (contre 1,7 à Montreux). Courant d'ouest en altitude.

Le second exemple (fig. 7) concerne le front froid du 27 novembre 1965 qui passe à Montreux à 14 h avec de la pluie et un peu de vent de nord-ouest ; il est suivi d'un air très instable et d'un grain avec rafales et orage à 19 h. Les deux accidents se retrouvent à Sierre à 15 h 50 et à 19 h 50, donc avec un retard de 1 h 50 et de 50 minutes respectivement ; mais la hausse de pression est ici moins importante et le vent aussi plus faible.

Je ne saurais clore ce paragraphe sans rappeler que la *vaudaire d'orage* doit son origine à l'excès de masse (et de pression par conséquent) en Valais lors des orages ou des grains de cette vallée. L'écoulement de l'excédent se fait alors par le Bas-Valais en direction du lac Léman (5).

Je remarque enfin qu'au sein du fort courant ascendant qui engendre le cumulonimbus une dissymétrie quelconque, en soi peu importante et dont le relief terrestre est peut-être responsable, peut déclencher une rotation de ce courant : c'est alors la *tornade* dont l'énergie se dépense au sol en rafales destructrices. Il est certain que la présence d'un grain ou au moins d'une cellule orageuse très développée est nécessaire à la genèse du phénomène ; les rares exemples connus en Suisse le prouvent clairement (9).

Fig. 7. — 27 novembre 1965. Front froid double. Barogrammes de Montreux (M) et de Sierre (S). La hausse est ici plus forte à Montreux. Chute de température de 5° à Montreux, faible à Sierre. L'échelle de pression est deux fois plus petite que sur la figure 6. Les flèches indiquent les passages, l'un et l'autre plus tardifs en Valais qu'à Montreux.



## 6. *La vie du grain*

Je considère maintenant la durée d'un grain accompagné de son édifice nuageux très instable ; sa vie ne saurait être bien longue, mais on peut se demander si elle n'affecte pas une certaine périodicité. Le mécanisme dont le grain est le siège, ce brassage de l'air humide des couches basses et moyennes de l'atmosphère, transforme de l'énergie calorifique en mouvement et aboutit à un refroidissement de ces couches. Il y a alors épuisement d'énergie par friction et perte de chaleur, et le système tend plus ou moins rapidement vers la stabilisation ; d'où l'on doit admettre qu'un grain au cours de sa progression vers l'est doit s'épuiser et pratiquement s'effacer : la forte rafale observée en un lieu donné devient plus loin et plus tard simple coup de vent avec pluie, et plus loin encore disparaît. Or le front générateur, lui, subsiste ou peut subsister. Existe-t-il des grains épuisés qui vingt-quatre heures plus tard, le réchauffement diurne aidant, retrouvent de l'énergie et régénèrent plus à l'est le phénomène de la veille ? Je l'ignore, mais le tiens pour possible. A ce point de vue, l'étude prolongée sur le plan synoptique serait intéressante ; suivre un de ces accidents sur de longues distances et pendant deux jours au moins ferait peut-être apparaître de telles régénérations. Un grain détecté en France par exemple, observé ensuite en Suisse, pourrait éventuellement réapparaître en Autriche après une phase d'extinction. Un examen de ce genre exigerait plus que les données usuelles des réseaux de prévision et en outre des enregistrements de pression et de vent le long du trajet. De telles recherches sont malheureusement très rares.

A ce propos, un météorologue américain, TEPPER, a émis l'hypothèse que le grain serait une sorte d'avant-coureur du front froid, une onde gravitationnelle de pression produite par une accélération de ce front ; cela revenait à dissocier les deux phénomènes dans l'espace et dans le temps, puisque l'on devait alors observer en un lieu donné deux passages successifs. Il me semble difficile d'admettre ce schéma ; l'expérience montre en effet que front et grain forment un tout qu'aucun intervalle notable ne sépare (12). Il existe à vrai dire de temps à autre des grains doubles, voire même triples dans une seule journée ; le cas est toutefois exceptionnel.

KOSCHMIEDER a étudié le comportement d'un certain nombre de grains sur un réseau spécial de la région de Berlin comprenant des postes d'observation assez denses, mais trop petit (env. 100 km) pour que l'on ait pu suivre ces coups de vent à l'est ; il a aussi constaté l'accroissement de fréquence des grains en fin d'après-midi (11).

AUBERT a suivi un grain orageux de l'Espagne à la Pologne pendant trois jours, en août 1959, grain qui avait traversé la Suisse à vive allure, sur la base des cartes météorologiques et sans entrer dans le détail (2).

BODOLAI, en 1971, a voulu montrer l'existence de circulations verticales plus ou moins fermées à l'endroit du front froid par l'application des relations fondamentales de l'hydrodynamique, ce qui ne prouve évidemment rien.

Trois exemples réels soumis au calcul font apparaître en tous cas une branche ascendante au voisinage du front (3). Cette étude a au moins l'avantage d'établir la possibilité théorique de telles circulations.

*H. W. Courvoisier*, dans une étude non publiée (Zurich, 1960) sur les surveentes plutôt que les grains, a aussi remarqué la haute fréquence en fin d'après-midi ; il n'a pas considéré la géographie du phénomène, mais a cherché à établir des indices permettant de prévoir un grain ou une forte surveente.

Ces quelques indications montrent combien les recherches concernant la vie d'un grain (comme d'un front d'ailleurs) sont encore modestes. Les possibilités offertes par la photographie par satellites ouvriront peut-être de nouveaux aperçus sur ce point ; les observations au sol, solidement étayées par les enregistrements continus, resteront toutefois l'outil le plus fin pour l'étude de ce problème.

## L'ORAGE

C'est de l'orage en général qu'il est maintenant question, avec ou sans grain. Si je reviens sur un sujet déjà traité précédemment et bien connu, c'est que je dispose à ce jour d'une plus longue période d'observations permettant de bien asseoir un calcul statistique et de distinguer les orages à caractère local de ceux qui accompagnent les fronts froids.

### 1. Variation annuelle de fréquence

L'orage est un élément climatique à périodicité annuelle et diurne fortement marquée. L'année sous nos latitudes se partage en gros en deux saisons, l'une riche en orages et l'autre qui en est presque dépourvue ; on sait aussi qu'au cours du jour il y a des moments favorables à l'orage et d'autres qui le sont beaucoup moins.

La distribution de l'orage à Lausanne et environs, au cours de l'année, ressort du tableau suivant où figure le nombre moyen de « jours d'orage » par mois, sur la base de 27 ans d'observations complètes. J'entends par « jour d'orage » toute journée comptée de 0 à 24 h où l'on a entendu un coup de tonnerre au moins, quelle que soit la distance du foyer au lieu d'observation et son activité. Le tableau se fonde sur une période comprise entre 1931 et 1973, mais ne comprenant que 27 années complètes ; les fréquences absolues ont été ramenées à la décennie pour éviter les nombres décimaux.

*Lausanne. Jours d'orage ; moyennes mensuelles (27 ans) calculées pour 10 ans*

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
3	4	3	12	42	72	71	61	29	9	7	3	316

L'année compte donc 32 jours d'orage en moyenne. La saison proprement orageuse va de mai à septembre, avec 87 % des jours d'orage ; juin et juillet avec 7 jours chacun sont les mieux pourvus. Les mois d'hiver ne comptent individuellement que 3 à 4 jours par décennie, donc très peu.

Je n'ai mentionné que les jours d'orage et non les orages eux-mêmes. Il serait intéressant de connaître le nombre de ceux-ci en un lieu donné, mais il est très difficile de préciser dans ce sens. Lors d'une journée orageuse, on peut observer un, deux ou trois orages ou davantage encore selon les situations. Il m'est arrivé de dénombrer certains jours particulièrement riches en manifestations orageuses, comme le 11 août 1971 par exemple, au moins six centres orageux distincts sans être du tout assuré de les avoir tous recensés. Quiconque a suivi attentivement l'évolution d'une journée de ce genre a pu se rendre compte à quel point il est difficile de repérer les différentes cellules orageuses ; lorsqu'un foyer s'épuise, il s'en crée un nouveau presque au même endroit, de sorte que les roulements de tonnerre se succèdent avec insistance avec des moments de plus forte fréquence. Sur les bords du Léman, il n'est pas rare d'ailleurs d'observer des cellules orageuses tant sur les Préalpes que sur le Jura, ce qui complique le tableau jusqu'à la confusion.

Dans ces conditions, seule une estimation est possible. On peut admettre qu'en plein été un jour d'orage, en un lieu donné du Plateau, compte un à trois orages distincts en moyenne ; au printemps et en automne, il n'y a guère plus d'un seul centre actif par jour ; quant à l'hiver, il ne présente que de rares manifestations orageuses limitées à quelques décharges isolées au passage d'un front froid ou immédiatement après.

Un orage d'été dure en Suisse romande en moyenne 20 à 30 minutes. On sait qu'au Tessin cette durée est passablement plus longue.

## 2. *Variation diurne de fréquence*

La distribution de l'orage *au cours du jour* s'établit en dénombrant pour chaque jour le nombre d'heures pleines pendant lesquelles il a tonné. La somme de ces heures excède notablement la durée orageuse réelle, mais le procédé permet de connaître très exactement les moments de la journée où l'orage est le plus probable comme aussi ceux où il l'est le moins.

Le matériel d'étude est constitué par 2364 « heures d'orage » d'une série de 37 ans (1931 à 1973 avec années manquantes) ; cette base assez large autorise des conclusions sûres.

*Lausanne. Fréquences orageuses moyennes au cours du jour (37 ans)*

Intervalles	Heures par an	%	Intervalles	Heures par an	%
0- 1 h	1,6	26	12-13 h	1,7	27
1- 2 h	1,4	22	13-14 h	2,5	38
2- 3 h	1,3	21	14-15 h	3,3	52
3- 4 h	1,3	21	15-16 h	4,2	66
4- 5 h	1,3	21	16-17 h	5,0	78
5- 6 h	1,3	21	17-18 h	5,5	86
6- 7 h	1,2	20	18-19 h	5,6	88
7- 8 h	1,1	18	19-20 h	5,7	89
8- 9 h	1,0	16	20-21 h	5,6	87
9-10 h	1,0	14	21-22 h	4,7	73
10-11 h	1,0	14	22-23 h	3,2	50
11-12 h	1,2	18	23-24 h	2,2	34
				63,9	1000

Il y a en moyenne 64 heures d'orage par an à Lausanne et environs, sans doute un peu plus dans les Préalpes vaudoises et en Savoie, et certainement davantage aussi dans le Jura vaudois.

C'est entre 8 et 11 h que l'orage est le plus rare, et c'est entre 19 et 20 h qu'il est le plus probable. La fréquence croît rapidement à partir de midi et décroît plus rapidement encore après 20 h. Je remarque que le spectre de fréquence de l'orage en général présente la même allure que celui du grain orageux ; les maxima coïncident à une heure près.

A titre de comparaison, je cite le cas du Tessin méridional où la fréquence orageuse maximum a lieu dans la soirée, plus tard encore que sur le Plateau. Le nombre d'orages par jour d'orage y est aussi plus élevé, puisque Locarno a noté parfois plus de 10 orages dans la même journée, selon AMBROSETTI (1).

### 3. *L'orage local*

Il faut entendre par orage local celui qui se forme par simple ascendance convective au-dessus des éminences du relief (collines, montagnes) et qui n'a aucun lien avec un changement de masse par front froid. Cet orage naît communément l'après-midi au-dessus des crêtes ; il est en général peu mobile, mais il s'en trouve que le courant général entraîne plus ou moins loin de leur lieu d'origine.

J'ai cherché à calculer ce que représentent ces orages à caractère local dans la distribution générale de fréquence des manifestations orageuses. Ce n'est pas très facile, tant est parfois subtile la distinction entre orage local et orage de front ou de grain ; quant à l'orage dit d'instabilité prenant naissance dans l'air froid postfrontal, il ne convient pas de le ranger dans la catégorie des orages locaux.

La période de 1959 à 1973 (15 ans) se prête à une recherche de ce genre et j'en ai tiré les fréquences absolues et relatives souhaitables ; elle accuse 995 heures d'orage sans distinction de nature, dont 250 heures d'orages purement locaux, ce qui donne le rapport de 25 % en faveur de ces derniers dans l'ensemble de l'activité orageuse. Toutefois, les orages de caractère local n'apparaissant qu'entre 10 et 24 h, il convient de restreindre le calcul du rapport à cet intervalle de temps. Voici donc la *quote-part des orages locaux* par rapport à l'ensemble des orages, calculée pour chaque heure, en pour cent :

10-11 h	15 %	17-18 h	38 %
11-12 h	25 %	18-19 h	34 %
12-13 h	40 %	19-20 h	29 %
13-14 h	49 %	20-21 h	22 %
14-15 h	54 %	21-22 h	15 %
15-16 h	49 %	22-23 h	10 %
16-17 h	42 %	23-24 h	6 %

Le rapport croît de 10 à 14 h, présente son maximum entre 14 et 15 h, puis décroît symétriquement pour s'annuler à minuit. Si l'orage local a sa propre fréquence la plus élevée vers 16 h, il représente vers 14 h la fraction maximum de l'activité orageuse en général ; pour l'intervalle de 10 à 24 h seulement, il en est le tiers (32 %).

La figure 8 montre la courbe de fréquence absolue des orages locaux, en heures par an, et celle des orages en général ; elle fait apparaître le décalage de 3 heures des maxima de 16 h 30 et de 19 h 30 respectivement.

Un calcul analogue exécuté pour le Valais indique tout d'abord que l'orage de caractère local représente le tiers du total des orages, et

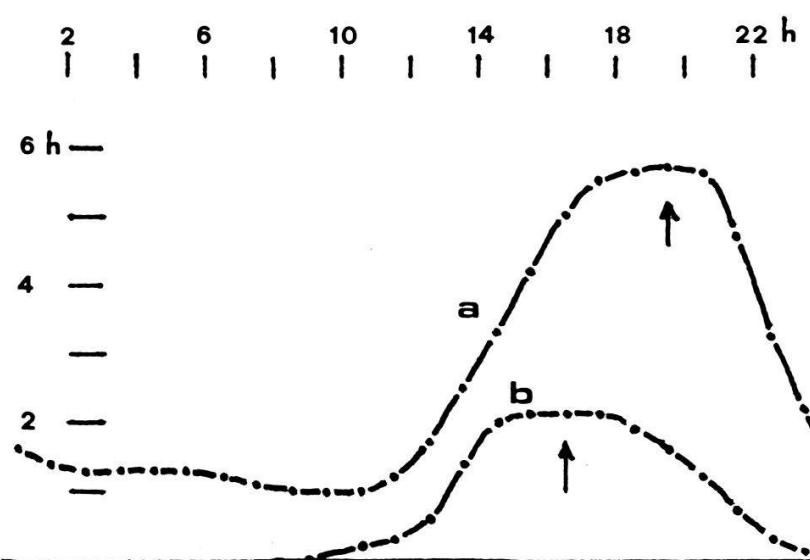


Fig. 8. — Lausanne. Variation diurne de la fréquence orageuse : a) nombre moyen par an d'heures d'orage de 0 à 24 h ; b) idem pour les orages locaux seulement. Les flèches indiquent les maxima respectifs de fréquence décalés de trois heures.

ensuite que son maximum de fréquence se place entre 16 et 17 h, soit à peu de choses près au même moment que le maximum relatif à l'ensemble des orages de ce pays. On voit une fois de plus que dans la grande vallée intérieure l'orage du soir relevant de l'instabilité vespérale est nettement moins important que sur le Plateau : à partir de 18 h, la fréquence orageuse diminue rapidement, alors qu'en pays plat elle ne décroît qu'après 20 h. Le refroidissement assez rapide de la montagne au déclin du jour intervient apparemment pour modérer l'activité orageuse de la soirée ; les aires glacées y sont aussi pour quelque chose sans doute.

Une indication encore à propos de la grêle. Dans la région de Lausanne et de Montreux, la période de 15 ans de 1959 à 1973 m'a fourni 28 cas de grêle (jours) répartis d'avril à octobre.

#### 4. *Le brassage vespéral*

On a vu plus haut que l'activité orageuse sur le Plateau romand augmente d'intensité du matin au soir et apparaît particulièrement grande en fin de journée ; c'est un fait banal que les fréquences d'heure en heure données ci-dessus n'ont fait que confirmer.

Cette activité évidemment liée à celle de la convection atmosphérique et par conséquent à l'élévation diurne de température atteint son plein développement bien après le maximum thermométrique qui, lui, se produit vers 15 h en été. J'ai relevé d'autre part que l'orage à caractère local se développe de préférence entre 15 et 18 h, donc plus près du maximum thermique. La courbe générale de fréquence de la figure 8 est donc complexe et résulte de l'effet conjugué des orages locaux, des orages tardifs et des grains.

Ces derniers, qui ne contribuent que pour une petite fraction à l'activité orageuse en général (8 % environ), se présentent le plus souvent entre 18 et 19 h, donc à peu près au moment où l'orage en général est le plus fréquent. Cette coïncidence est intéressante ; elle montre en tous cas qu'en fin de journée pendant la saison chaude, entre 18 et 20 h, la basse atmosphère accuse un *maximum d'instabilité* et qu'à ce moment-là les mouvements verticaux de convection thermique sont les plus développés si l'air est suffisamment humide. Il se produit alors un *brassage énergique* par lequel l'air des couches proches du sol s'élève en se refroidissant et celui des hautes couches est projeté vers le bas. D'où résultent condensation, pluie ou grêle et frottement moléculaire, générateur de tensions électriques. On peut même admettre que si la rupture d'équilibre dans la verticale intervient assez rapidement il y a grain orageux avec sa cascade d'air froid s'étalant sur le sol en y produisant la bourrasque classique. Une condition est toutefois nécessaire : l'air en jeu doit être suffisamment humide.

En période de haute pression (anticyclone continental), la stratification thermique de l'atmosphère lui impose une grande stabilité ; l'humidité est alors faible par suite de la subsidence. Dans ces conditions, la convection reste minime, voire nulle. On connaît ces belles journées d'été ne présentant pas ou que très peu de cumulus sur les montagnes ; aucun brassage vespéral n'est alors possible.

Dans le Valais central et sans doute dans tout le massif alpin, le brassage vespéral est fortement réduit, mais non absent. J'ai observé en Valais des ciels chaotiques avec centres orageux dispersés, mais très peu de grains orageux typiques ; il est d'expérience que les profonds remous du soir sont en ces lieux beaucoup plus rares que sur le Plateau.

A l'appui de cette assertion, il faut produire la distribution de fréquence orageuse à Montana, qui présente son maximum vers 18 h, donc une à deux heures avant Lausanne ; les observations faites au Gütsch, dans le massif du Gothard, confirment le fait.

On retrouve ici le rôle double du relief : gêne pour la circulation de l'air d'une part et action stabilisante des surfaces glaciaires d'autre part. J'ai déjà fait remarquer que les grains, retardés dans leur avance par l'obstacle montagneux, apparaissent atténués et affaiblis à l'intérieur du Valais. A cet égard, la zone préalpine allant de la Savoie aux Préalpes vaudoises et fribourgeoises se distingue nettement du Valais central, si proche cependant, par l'abondance des averses orageuses qui s'y déversent.

## ORAGE ET FŒHN

### 1. *Les intrusions froides*

Comme suite aux considérations sur l'orage de grain, il me paraît logique d'en ajouter d'autres sur l'orage alpin et son interaction avec le fœhn. Mon attention a été attirée à plusieurs reprises en Valais par les interruptions du fœhn causées selon toute apparence par une intrusion d'air froid au sein même du courant chaud. Il ne s'agit pas, je le souligne, de la fin du fœhn par l'arrivée massive d'un front froid, phénomène assez bien connu et fréquent, mais bien d'un *arrêt momentané* de ce vent qui reprend ensuite avec la même vigueur qu'auparavant. C'est là un accident assez curieux qui, sauf erreur, n'a jamais été mentionné par les météorologues alpins. On y retrouve les hausses barométriques de courte durée dont il a été largement question dans les paragraphes précédents, ce qui légitime la présente adjonction.

L'analyse de ces intrusions froides dans le courant de fœhn se révèle difficile car le phénomène est de très courte durée comparée à celle du fœhn lui-même ; et puis il semble très régional. Les choses se passent à peu près comme suit.

Normalement, le fœhn est un vent continu, assez régulier une fois établi ; il fraîchit rapidement après ses premières bouffées, se maintient des heures durant avec de faibles variations de vitesse moyenne si l'on fait abstraction de sa forte turbulence, puis mollit lentement pour s'éteindre, soit par simple diminution du gradient transalpin, soit par l'arrivée d'un front froid. Je rappelle qu'en Valais central le fœhn dure en moyenne 7 à 8 heures, mais peut quelquefois excéder notablement ce délai, et qu'en ces lieux il souffle de NE à E. Dans d'autres vallées du nord des Alpes, ce vent dure plus longtemps et souffle du secteur sud à cause d'une orientation différente du sillon.

Il arrive cependant que très brusquement, en l'espace d'un quart d'heure, le fœhn faiblisse notablement ou cesse même complètement en cédant la place à un peu de vent d'ouest, puis reprenne sa vitesse primitive au bout d'une demi-heure ou d'une heure. Cette accalmie ou cette interruption se marquent sur le thermogramme par une baisse nette de température ainsi que par un accroissement d'humidité ; elles se traduisent également par une hausse momentanée de pression.

Il s'agit donc bien d'un accident largement régional mais dont l'importance spatiale se discerne malaisément ; des interruptions de ce genre s'observent également dans le Bas-Valais et sans doute dans d'autres vallées. Ce ne peut être qu'une intrusion discrète d'air froid entraîné par le courant général du sud-ouest sans que l'on puisse parler de front froid proprement dit ; les symptômes de celui-ci font en effet défaut et d'ailleurs la brièveté de l'accalmie exclut la possibilité d'un front au sens classique du terme. C'est pourquoi je préfère parler ici d'intrusion froide qui rend mieux, je crois, l'allure du phénomène lequel, à ma connaissance, n'a jamais été mentionné comme tel dans la littérature météorologique. Son intérêt pratique est nul, mais du point de vue théorique il pose un intéressant problème.

En été, la suspension du fœhn coïncide avec de l'orage, et alors le phénomène devient plus simple et plus facile à interpréter puisque l'on peut invoquer le courant descendant du nuage orageux. C'est à un exemple de ce genre que je fais appel en essayant de le montrer le plus clairement possible grâce aux enregistrements de Sierre (Chippis) à 522 m et de Montana à 1500 m.

## 2. Exemple des 18 et 19 août 1958

Lors de ces deux journées, il existe une situation de fœhn avec gradient de pression dirigé du sud au nord des Alpes : 7 mb entre Locarno et Kloten le 18, 9 mb le 19, puis renversement le soir du 19. Mais il y a aussi une tendance accentuée à l'orage. A 3000 m règne un courant de SSW de 40 puis de 60 km/h. A Montana, le vent d'est (lombarde) se maintient en permanence (30 à 40 km/h) ces deux jours et ne disparaît

qu'à 19 h le 19. C'est en effet un front typique qui le 19, dans l'après-midi, aborde le bassin lémanique et dans la soirée le Valais en opérant un changement complet de la situation météorologique et en déclenchant de fortes pluies dans toute la Suisse, mais surtout dans les Alpes pennines, le Val d'Ossola et la partie occidentale du Tessin avec plus de 100 mm d'eau.

La journée du 18 août est assez nuageuse en Valais avec un ciel d'aspect orageux (cb) ; il y a de l'orage entre 14 et 15 h sur les Pennines, du Combin à la vallée de Conches ; à Montana, il y a un peu de pluie vers 15 h et le tonnerre gronde au loin, au sud et au sud-est.

Or à Sierre (anémographe de la station de Chippis) on note une survête de WSW vers 15 h, puis du fœhn de 40 km/h de 15 h 40 à 21 h 30, après quoi la girouette reste folle ; à Montana (observation de l'auteur) la lombarde mollit pendant quelques minutes au moment de l'orage lointain, mais reprend sitôt après pour se maintenir toute la nuit. Belle éclaircie après l'orage. A Altdorf, le fœhn dure de 15 à 17 h 45 et dès 20 h jusqu'au lendemain à 13 h 20. Donc survête d'aval à Sierre au moment de l'orage et accalmie momentanée de la lombarde à 1500 m ; longue interruption du fœhn à Altdorf.

La journée du 19 août ressemble à la précédente. Courant de SW à SSW sur la chaîne alpine, de W après le front. Les Alpes pennines sont de nouveau orageuses, surtout entre 12 et 13 h et plus tard encore, du Mont-Blanc à la Furka. La lombarde (40 à 45 km/h) s'est maintenue et ne cesse qu'à 19 h ; elle n'affecte qu'une modeste accalmie vers midi et demi. A Sierre, le fœhn souffle de 8 h 45 à 12 h 15, puis de 13 h à 17 h 30 ; il y a donc *cessation complète du fœhn* et rotation brusque à l'aval (10 m/s) pendant trois quarts d'heure avec chute de température de 6° et hausse de pression momentanée. A Altdorf, le fœhn cesse à 13 h 20 déjà, donc bien avant la fin du fœhn en Valais.

Ainsi il y a intercalation d'un bon vent d'aval dans la vallée du Rhône entre deux phases de fœhn d'environ 45 km/h au moment de l'orage pennin ainsi qu'une légère accalmie de la lombarde à 1500 m, mais sans changement de direction. Dans le Reusstal, la deuxième phase de fœhn fait défaut.

Or le front froid qui est signalé vers 13 h en Romandie et vers 16 h en Suisse orientale n'arrive à Sierre qu'à 17 h 30 (vent de WSW) ; la lombarde ne tombe qu'à 19 h. Après le front venant de l'ouest qui provoque de la pluie et une forte baisse de température, des orages d'instabilité se produisent entre 19 et 20 h en Valais.

La question est de savoir si l'accalmie de fœhn et le court refroidissement de midi à Sierre est une première apparition du front ou ne relève que de l'orage des Alpes pennines ; je penche en faveur de la deuxième hypothèse. L'accident du milieu du jour s'explique par l'orage et n'a pas l'allure de front froid. Il est toutefois difficile de conclure fermement sur la base de renseignements excellents mais géographiquement insuffisants.

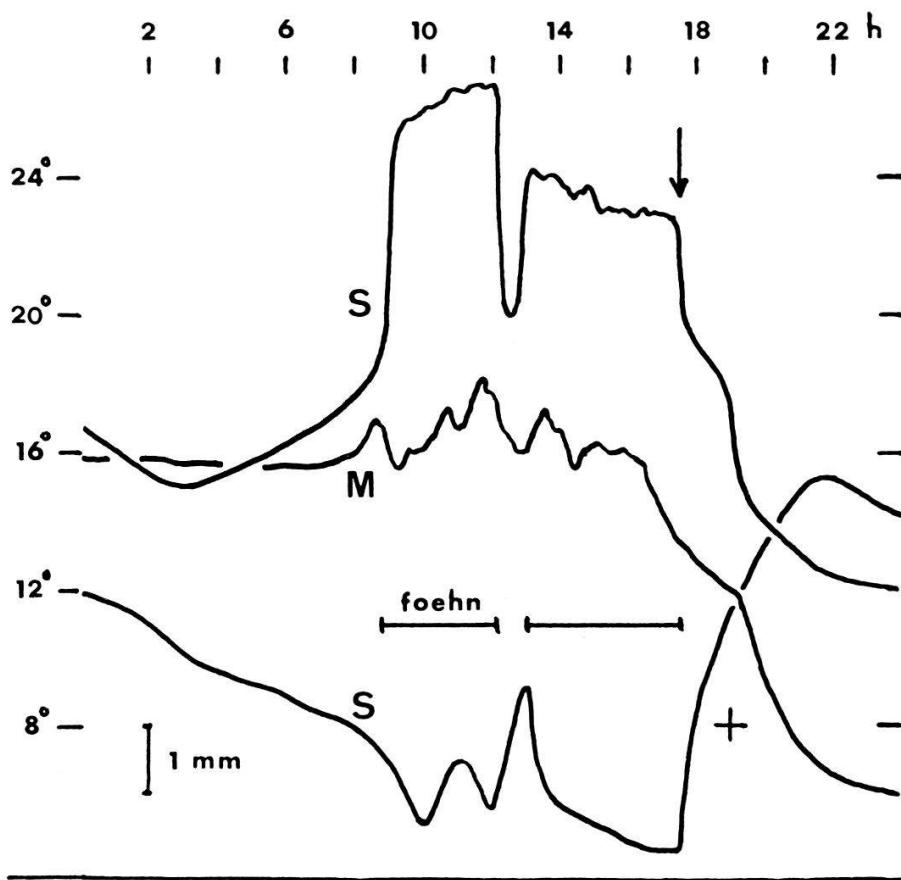


Fig. 9. — 19 août 1958. Température à Sierre (S) et à Montana (M) ; pression et durée du fœhn à Sierre. Celui-ci s'interrompt entre 12 et 13 h. Front froid à 17 h. 50. La croix à 19 h indique la fin de la lombarde à 1500 m.

La figure 9 se rapportant au 19 août résume graphiquement ce qui vient d'être dit. On y remarque entre autres les hausses momentanées de pression (saillies) au moment des orages de midi et la hausse plus importante et plus longue après le front froid du soir.

### 3. Autres exemples

On pourrait citer bien d'autres exemples d'arrêt du fœhn de vallée ou de la lombarde d'altitude du même genre. J'en ai analysé un en 1958 (4) où le passage d'un petit grain remontant la vallée du Rhône a fait tourner le vent de NE à SSE à Sierre pendant une heure et a interrompu la lombarde pendant 25 minutes à Montana ; il s'agissait du 28 mai 1956.

Le 20 décembre 1958, une nette accalmie de fœhn à Sierre et de la lombarde à 1500 m a également coïncidé avec une hausse de pression momentanée de deux millimètres ; cinq heures plus tard, un front froid mettant fin au fœhn pénétrait en Valais.

Le 15 novembre 1963, le fœhn a soufflé depuis 5 h dans le Bas-Valais et sur le Haut-Léman jusqu'à l'arrivée du front froid principal ; le Valais central, beaucoup plus froid n'avait pas eu de fœhn ce jour-là. Or à

Monthey, le fœhn a fortement calmi entre 15 et 17 h ; il a complètement cessé sur le Haut-Lac alors que la pression accusait à Montreux une hausse momentanée de 1,5 mm. Puis le vent chaud a repris jusqu'au passage du front froid à 20 h, repéré à 21 h à Sierre. Ici aussi, une intrusion froide précède de trois heures le front froid principal.

Le 2 novembre 1968 fut une journée de fœhn dans les Alpes avec fortes pluies au sud et sur les Alpes mêmes (Dimmerföhn) ; le Valais central fut pluvieux tout le jour. Depuis Montreux, j'observe de la vaudaire de fœhn sur le Haut-Lac le 1<sup>er</sup> et le 2 novembre. Elle souffle dans la nuit du 1<sup>er</sup> au 2 et cesse vers 8 h alors que la brume jusqu'ici repoussée vers l'ouest progresse vers l'amont ; il y a cependant des poussées de fœhn sur le lac par moments (zone limite !). A 10 h 15, le vent tourne au sud-ouest et la pression monte de 2 mm pour baisser de nouveau rapidement de 3,9 mm jusqu'à 15 h ; après une faible pluie, la vaudaire reprend dès 14 h 15 et cesse définitivement à 16 h ; pluie dès 19 h. Il y a donc suspension du fœhn pendant quatre heures coïncidant avec une très nette saillie de pression. Il semble que l'on ait affaire ici à un front froid discret en conflit avec le fœhn, mais le diagnostic est difficile. En altitude règne un courant de SSW (fig. 10).

Dans d'autres cas plus compliqués, enfin, on observe des alternances de fœhn et de vent d'aval fort curieuses. J'en ai donné un exemple détaillé en 1965 (6).

J'ai tenté de montrer dans ce qui précède que par fœhn alpin interviennent parfois des accidents de courte durée qui se manifestent par une accalmie ou cessation du vent, voire renverse totale, avec baisse de température et hausse de pression éphémères. Ce ne sont pas des fronts froids proprement dits puisqu'il n'y a pas de changement de masse

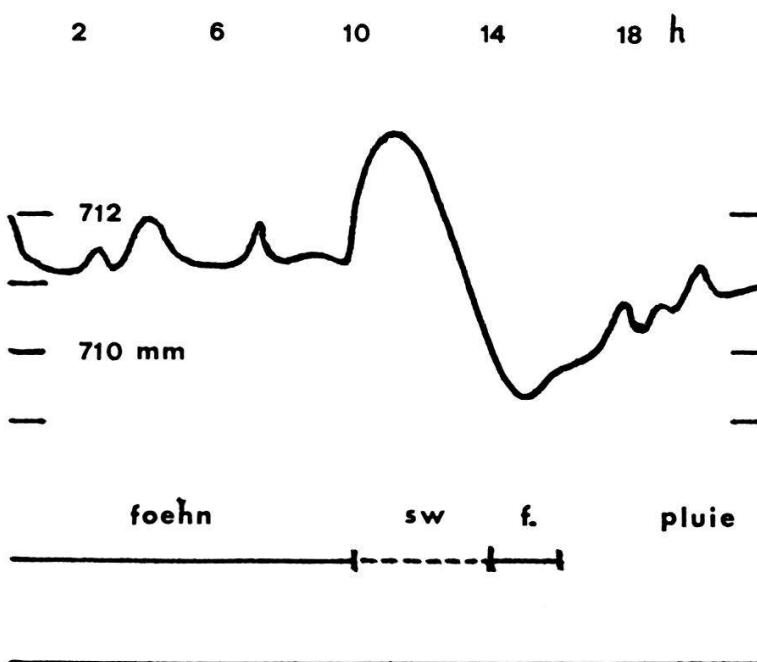


Fig. 10. — Montreux, 2 novembre 1968 : barogramme. Intrusion froide (SW) entre deux phases de fœhn sur le Haut-Lac Léman. La hausse de pression passagère durant cet intervalle est remarquable.

durable. Ces intrusions froides, orageuses ou non, témoignent de la complexité du régime fœhnique dans les Alpes. Lorsqu'il y a orage, la retombée froide des cumulonimbus fournit une explication simple ; à défaut d'orage, en hiver notamment, le mécanisme se complique. Une recherche minutieuse sur la base d'un réseau de postes d'observation de premier ordre et bien équipés jetterait peut-être quelque lumière sur ce curieux phénomène. C'est de la météorologie régionale, mais étroitement liée aux grands courants atmosphériques et dont l'étude n'est pas facile. L'approche d'un front produit apparemment une *labilisation de l'atmosphère moyenne*, avant le passage au niveau du sol ; cette phase préparatoire est encore mal connue ; et c'est probablement au cours de cette phase que se produisent les intrusions mentionnées, sortes d'avant-coureurs de l'arrivée au sol de la masse d'air neuf.

En l'absence de fœhn, on n'observe pas de telles complications devant un front froid, lequel est toujours simple et assez facile à repérer dans le Valais central ; mais si le fœhn règne dans le massif alpin les choses se passent souvent avec les complications préfrontales dont j'ai montré plusieurs exemples.

#### CONCLUSION

Au cours de cette étude ont été évoqués deux aspects d'un seul et même phénomène à grande échelle qui est l'invasion de nos régions d'Europe centrale par de l'air froid d'origine atlantique ou subpolaire, génératrice de temps troublé et pluvieux.

Ces deux aspects sont respectivement le grain orageux qui en est une forme particulièrement instable et agitée par suite du remous aérien qu'elle engendre, et d'autre part l'intrusion discrète d'air froid au sein du courant de fœhn dont il trouble le débit.

Le grain orageux est apparu comme un phénomène essentiellement estival et vespéral, producteur d'une saillie barométrique caractéristique ; il est étroitement lié au front froid dont il semble n'être qu'une forme particulière ou si l'on veut une conséquence immédiate de l'advection frontale.

La fréquence élevée de l'orage en général et du grain orageux en particulier en fin d'après-midi et début de soirée, vers 18 à 20 h sur le Plateau, si elle s'explique en partie par le réchauffement diurne qui accroît la valeur du gradient vertical de température, est aussi le signe que les couches moyennes de la troposphère présentent à ce moment-là de la journée une tendance accrue à l'instabilité. Que survienne alors de l'ouest un front froid dont l'approche se traduise par un léger refroidissement préliminaire des couches élevées, avant l'advection au sol, alors l'instabilité augmente rapidement au point de déclencher une circulation verticale trahissant une rupture d'équilibre : les conditions sont

remplies pour la formation du grain sur le bord antérieur de la masse froide en mouvement, avec son brassage violent des couches d'air comprises entre le sol et environ 10 km d'altitude.

Faut-il ramener les intrusions froides dans le courant de fœhn à un processus du même ordre, c'est-à-dire une labilisation en altitude du courant chaud par advection froide ? C'est possible, mais non prouvé. La question reste ouverte. Des séries de sondages aérologiques rapprochés, d'heure en heure, des jours de fœhn permettraient peut-être d'y répondre. Là en tous cas, les choses se passent dans une atmosphère beaucoup plus stable que dans le cas précédent.

Ces phénomènes sont restreints dans l'espace et dans le temps, ce qui rend leur étude difficile ; ils comptent cependant parmi les accidents atmosphériques les plus saillants de la météorologie dynamique considérée du point de vue régional. Ils disparaissent dans l'optique de la circulation générale de l'hémisphère, mais sont dignes d'attention à l'échelle restreinte du domaine de l'observation directe.

#### TRAVAUX CITÉS

1. AMBROSETTI, FL. 1971. — Il clima al sud delle Alpi. *Boll. Soc. ticinese Sc. naturali*, 65<sup>e</sup> année, Bellinzona.
2. AUBERT, C. 1960. — La tempête du 10 août 1959. *Aéro-Revue*, 35<sup>e</sup> année, Zurich.
3. BODOLAI, I. 1971. — Vertical circulations in frontal zones. *Időjárás*, 75, Budapest.
4. BOUËT, M. 1958. — Fœhn, vaudaire et grain orageux. *Bull. Murithienne*, 75, Sion.
5. — 1961. — Le vent en Valais. *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.*, 12, Lausanne.
6. — 1965. — Sur une advection intermittente d'air froid dans les Alpes suisses. *Archiv f. Meteor., Geophys. u. Bioklim. A*, 14, Wien.
7. — 1965. — La pénétration de l'air froid dans une vallée alpine. *Ibidem, A*, 15, Wien.
8. — 1968. — L'afflux d'air froid en Suisse. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 70, Lausanne.
9. — 1971. — La tornade du 26 août 1971. *Ibidem*, 71, Lausanne.
10. — 1973. — *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Payot, Lausanne.
11. KOSCHMIEDER, H. 1953. — Ergebnisse d. deutsch. Böenmessungen 1939/41. *Flug-meteorolog. Forschungsarbeiten*, Heft 2, Vieweg u. Sohn, Braunschweig.
12. TEPPER, M. 1950. — A proposed mechanism of squall line : the pressure jump line. *Journ. of Meteorol.*, 7, Washington.

*Manuscrit déposé le 9 février 1974.*