

No. 151

LES TROIS ANNEES DE MESURES INTENSIVES EFFECTUEES
DANS LE CADRE DU PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE
"DEPERISSEMENT DES FORETS ET POLLUTION DE L'AIR EN
SUISSE" (PNR 14+) SONT-ELLES CLIMATOLOGIQUEMENT
REPRESENTATIVES? SI NON, POURQUOI?

par

Bernard Primault, Zurich
Annemarie Fankhauser, Zurich
Décembre 1988

Dépérissement des forêts
Pollution de l'air

634.0.42
551.510.42

Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute



No. 151

LES TROIS ANNEES DE MESURES INTENSIVES EFFECTUEES
DANS LE CADRE DU PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE
"DEPERISSEMENT DES FORETS ET POLLUTION DE L'AIR EN
SUISSE" (PNR 14+) SONT-ELLES CLIMATOLOGIQUEMENT
REPRESENTATIVES? SI NON, POURQUOI?

par

Bernard Primault, Zurich
Annemarie Fankhauser, Zurich
Décembre 1988

Dépérissement des forêts
Pollution de l'air

634.0.42
551.510.42

Résumé

Pour connaître la représentativité des trois années de mesures intensives effectuées dans le cadre du programme national de recherche: "Dépérissement des forêts et pollution de l'air en Suisse" (PNR 14+), il était indispensable de pouvoir en comparer l'évolution météorologique aux conditions climatologiques régnant aux trois sites choisis. Dans la présente étude, on s'est tout d'abord efforcé de trouver dans la littérature des époques et des seuils déterminants pour la croissance des arbres. Cette étude n'a pas apporté les résultats escomptés. On a alors défini treize critères météorologiques pouvant avoir des conséquences graves sur le développement des forêts. Pour mieux suivre l'évolution naturelle de la végétation, on s'est délibérément écarté du calendrier usuel pour découper l'année en "saisons". Ainsi, on ne se base que sur une définition météorologique de la "période de végétation". Partant de là, on a défini quatre "saisons" ad hoc: le repos hivernal, le printemps, l'été et l'automne. Au moyen des relevés effectués à trois stations climatologiques de référence, on a établi des diagrammes de conditions climatologiquement "normales" (période de référence 1931 à 1970) selon les critères définis plus haut. Il sera ainsi possible de comparer l'évolution du temps de la période de mesures intensives avec les conditions climatologiques de référence pour les trois sites.

Zusammenfassung

Um zu wissen, ob die meteorologischen Werte der Intensivmessperiode, die anlässlich des Nationalen Forschungsprogramms "Waldschäden und Luftverschmutzung in der Schweiz" (NFP 14+) durchgeführt wurde, repräsentativ sind, ist es unentbehrlich, diese mit den Klimaverhältnissen der drei gewählten Standorte zu vergleichen. Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurde die Fachliteratur eingehend nach Zeitabschnitten und Schwellenwerten, welche für das Wachstum der Bäume massgebend sind, untersucht. Dieses Studium brachte jedoch nicht die erhofften Ergebnisse. Danach wurden dreizehn meteorologische Kriterien definiert, die auf die Entwicklung der Wälder schwerwiegende Auswirkungen haben können. Um die natürliche Entwicklung der Vegetation besser zu berücksichtigen, hat man bewusst vom Kalender Abstand genommen und das Jahr in vier Jahreszeiten unterteilt. Anfang und Ende der "Vegetationsperiode" wurden daher rein meteorologisch erfasst. Daraus wurden vier ad hoc-"Jahreszeiten" definiert: Winterruhe, Frühling, Sommer und Herbst. Ausgehend von diesen Kriterien und den Daten von drei Referenzstationen des Klimanetzes wurden Klimadiagramme erstellt (Vergleichsperiode 1931- 1970). So wird es möglich sein, die Witterung der drei Intensivmessjahre mit den Klimaverhältnissen der drei Referenzstationen zu vergleichen.

Riassunto

Alfine di stabilire la rappresentatività delle misure intensive eseguite per tre anni nell'ambito del programma nazionale di ricerche "Danni alle foreste e inquinazione dell'aria in Svizzera" (PNR 14+), è indispensabile poter paragonare l'evoluzione meteorologica alle condizioni climatiche dei tre siti prescelti. Nel presente lavoro è dapprima stata eseguita una ricerca bibliografica per trovare i periodi e i valori soglia determinanti per la crescita degli alberi, senza comunque ottenere i risultati sperati. Sono allora stati definiti tredici criteri meteorologici che possono avere delle conseguenze gravi per lo sviluppo delle foreste. In seguito, per meglio seguire l'evoluzione naturale della vegetazione, il calendario normale è stato deliberatamente sostituito con la suddivisione dell'anno in quattro ad hoc "stagioni". Il periodo vegetativo è così stato definito esclusivamente in base alle definizioni meteorologiche con il risultato di ottenere quattro periodi: il riposo invernale, la primavera, l'estate e l'autunno. In base ai criteri definiti sopra e ai rilievi effettuati alle tre stazioni climatologiche di riferimento è stato elaborato un diagramma delle condizioni climatiche normali (periodo di riferimento 1931-1970), che servirà da riferimento per paragonare l'evoluzione del tempo rilevato durante i tre anni di misure intensive.

Summary

In order to know the representativity of the three years of intensive measurements within the swiss national research project "Forest's damages and air pollution in Switzerland" (NRP 14+), it is essential to compare this data with the climatic conditions prevailing at the three sites. In a first step the periods and threshold values important for the growth of the trees are looked for in the literature.

Unfortunately, this study does not lead to the expected results. We therefore define thirteen meteorological criteria which can have damaging effects on the development of the forests. In better account with the natural evolution of the vegetation, we deliberately diverge from the usual calendar to split the year in four ad hoc "seasons". Thus, the definition of the "vegetation period" is a meteorological one only. Whereupon four "seasons" are defined: winter rest, spring, summer and autumn. With the data of three climatic reference stations and the above defined criteria climatic diagrams are established (reference period 1931-1970). Now, it will be possible to compare the evolution of the weather over the three years of intensive measurements at the three sites with the climatic reference conditions.

Sommaire

1.	But de l'étude et remarques générales	6
2.	Méthodes envisagées	9
3.	Recherche bibliographique	10
4.	Approche climatologique	11
4.1	Considérations générales	11
4.2	Période de base	12
4.3	Stations de référence	13
5.	Incidences de situations météorologiques particulières sur la croissance des arbres.	14
5.1	La période de végétation	14
5.1.1	Le début de la période de végétation	15
5.1.2	La fin de la période de végétation	16
5.1.3	La durée de la période de végétation	18
5.1.4	Les intervalles temporels qui en découlent	18
5.2	Le froid de l'hiver	20
5.3	Forte baisse de la température	22
5.4	Gels du printemps	24
5.5	Périodes de sécheresse	26
5.5.1	Durant le repos hivernal	30
5.5.2	Au printemps	31
5.5.3	En été	31
5.5.4	En automne	31
5.6	Périodes avec précipitations	32
5.6.1	Durant le repos hivernal	33
5.6.2	Au printemps	34
5.6.3	En été	34
5.6.4	En automne	35
5.7	Fortes chaleurs	35
5.7.1	Au printemps	36
5.7.2	En été	36
5.8	Le vent	36
6.	Valeurs quantitatives	37
6.1	Présentation des diagrammes	38
6.1.1	Histogrammes modifiés	38
6.1.2	Diagrammes ponctuels	39
6.1.3	Diagrammes en barres	40
6.2	Utilisation	40
6.2.1	Histogrammes modifiés	40
6.2.2	Diagrammes ponctuels	41
6.2.3	Diagrammes en barres	42

6.3	Valeurs numériques des trois stations de référence correspondant aux critères énoncés plus haut	43
7.	Conclusions	58
8.	Bibliographie (articles cités dans le texte)	60

Annexe

Liste des ouvrages consultés ou parcourus au cours de l'étude bibliographique

A. Littérature étudiée

B. Ouvrages complémentaires

1. But de l'étude et remarques générales

Vu le développement inquiétant du dépérissement des forêts suisses, le Conseil Fédéral a, en 1984, mis un important crédit à la disposition d'Offices fédéraux et d'instituts universitaires afin de mener une campagne de mesures intensives de différentes grandeurs pouvant aider à déterminer les causes du mal. Ces mesures ont été effectuées dans le cadre et à l'appui du programme national de recherche "Dépérissement des forêts et pollution de l'air en Suisse" (PNR 14 +). Cette campagne spéciale était d'emblée limitée à trois années (1986, 1987, 1988). Les mesures devaient englober des grandeurs météorologiques, chimiques ("polluants" atmosphériques) et physiologiques (assimilation, croissance par exemple).

Pour réaliser cette étude, on a mis en place des équipements de télémessure en trois endroits: Lägern, Alptal et Davos. Les mesures y sont faites à cadence rapprochée (en général 10 minutes) et les données ainsi recueillies sont rassemblées à l'EIR où elles sont stockées sous forme de banque de données d'accès direct et mises à la disposition de tous les chercheurs concernés. Elles seront traitées ensuite par moyens électroniques.

A l'origine, cette campagne de mesures était destinée à "prouver les effets dévastateurs de la pollution atmosphérique sur la forêt" (le titre est de nous, mais s'appuie sur les déclarations de certaines personnalités responsables du mandat). Une telle spécification aurait enlevé toute signification scientifique à l'étude et ses résultats n'auraient pu être utilisés que pour conforter certaines tendances politiques.

Lors de la définition des mesures à faire, de la disposition des essais et du traitement subséquent des données ainsi recueillies, on a élargi le mandat afin de donner à l'étude son plein caractère scientifique. Elle ne sera donc plus la preuve apportée à une idée préconçue, mais pourra, suivant les résultats obtenus, répondre à l'une des trois propositions suivantes: La pollution atmosphérique n'a aucune relation avec le dépérissement des forêts; la dite pollution est effectivement à l'origine du dépérissement; les mesures faites sont insuffisantes (nombre et/ou durée) pour permettre une conclusion valable.

Tant les dispositifs de mesure que les méthodes de dépouillement ont donc été conçus afin de pouvoir s'orienter dans un sens ou dans l'autre selon non plus un préjugé, mais une analyse scientifique. On a donc mis un soin tout particulier à ce que les dites mesures soient inattaquables.

Les instruments mis en place permettent de mesurer des grandeurs météorologiques (température à différents niveaux, humidité de l'air, précipitations, vent, rayonnement, durée d'insolation, etc.), chimiques (SO_2 , CO, NO_x , O_3 , etc.) et physiologiques (allongement, respiration, assimilation, etc.). Des publications spécifiques rendent compte de la disposition des lieux, du choix des capteurs, des méthodes d'acquisition des données et de l'élaboration des résultats. Aussi, nous n'en parlerons pas ici, renvoyant le lecteur à ces publications.

Dans le cadre du PNR 14+, cette campagne de mesures intensives ne pouvait être que limitée et dans le temps et dans l'espace. Il fut décidé de créer de toutes pièces trois stations de mesure. Vu la nécessité d'apporter un élément important d'appréciation aux Autorités chargées de prendre des mesures, le mandant avait dès l'abord fixé une durée de trois ans pour l'essai. Des difficultés techniques ont retardé le démarrage du projet, si bien que les trois années retenues pour la campagne sont: 1986, 1987 et 1988.

Vu la qualité des chercheurs engagés et le soin mis tant dans le choix des équipements que dans les méthodes d'élaboration des résultats, ces derniers ne pourront être mis en doute quant à leur caractère scientifique. Il ne restera à leurs détracteurs qu'une échappatoire: une ou l'autre, voire les trois années de mesures a connu des conditions météorologiques si particulières que les données de base en sont faussées si gravement qu'elles rendent les résultats de tout ou une partie de l'étude principale au moins problématiques, si ce n'est complètement aberrants.

C'est la raison pour laquelle l'étude principale a été flanquée d'une étude parallèle, mais totalement indépendante de la première. Son but est de définir un certain nombre de critères météorologiques qui ont une influence si ce n'est certaine au moins fort probable sur le développement des arbres et d'en déterminer le cadre et les limites climatologiques. La question posée est, en bref: Les trois années du projet sont-elles représentatives du point de vue climatologique? Si non: Pourquoi?

Une première remarque vient ici immédiatement à l'esprit: Le climat est-il soumis à des règles précises, c'est-à-dire qu'il présente des groupes d'années semblables. Si oui, il aurait fallu tout d'abord rechercher si ces groupes se représentent de façon cyclique ou si ils sont uniquement soumis au hasard. De très nombreuses études ont été faites à ce propos. Toutes ont montré que, dans les limites temporelles qui nous intéressent (un demi siècle environ) on distingue bien des tendances dans l'évolution du climat et l'apparition de groupes d'années particulières. Ces dernières ne se suivent que très rarement, séparées qu'elles sont par des années "normales" (nous reviendrons plus loin sur cette notion), voire de caractère opposé. Nous avons donc écarté l'hypothèse de stationnarité du climat et admis à priori que le 10% des années considérées comme anormales n'étaient pas groupées, mais pouvaient survenir individuellement et à n'importe quel moment de la période de base.

Une seconde notion s'impose également: le "stress" ou mieux la contrainte extérieure. Il s'agit cependant d'une notion globale et vague. Elle est très souvent utilisée comme alibi lorsque aucune explication précise ne peut être fournie à l'appui d'une thèse préconçue. C'est donc intentionnellement que ce mot n'apparaît pas dans la suite de ce travail. Nous avons préféré examiner des contraintes spécifiques plutôt que de nous réfugier derrière un terme de caractère très général.

Dans le métabolisme basal des plantes, on peut distinguer deux activités primordiales: l'assimilation ou la fabrication des substances de base (sucres, protéines, lipides, vitamines) et leur transport vers les lieux d'utilisation ou de stockage. La première de ces activités est strictement dépendante du rayonnement reçu (énergie disponible). La seconde n'est fonction de la luminosité que chez certaines plantes particulières, la vigne par exemple. Comme la présente étude se rapporte à des arbres chez lesquels le transport des matières élaborées a lieu immédiatement, nous avons renoncé à considérer ici le rythme circadien (fluctuation en 24 heures) et le rythme nyctéméral (rapport entre la durée du jour et celle de la nuit).

Il eût été plus judicieux, et nous l'aurions préféré, d'effectuer et de conclure cette étude parallèle avant le début des mesures sur le terrain. Pourtant, les délais impartis par le Conseil Fédéral ne l'on pas permis. Afin de garder toute notre indépendance, nous avons refusé de prendre connaissance de chiffres issus de la recherche principale avant

d'avoir déposé notre rapport. On ne pourra donc nous reprocher de nous être laissé influencer dans un sens ou dans l'autre. Le choix de nos stations de référence va dans le même sens.

2. Méthodes envisagées

Aucune recherche similaire ne nous étant connue, force nous fut de rechercher une méthode sui generis pour répondre à notre mandat. Deux voies nous ont paru pouvoir conduire au succès:

En premier lieu, une étude approfondie de la littérature pertinente pouvait apporter les indications voulues concernant les périodes de l'année ayant le plus d'importance quant au développement des arbres, donc de la forêt. Nous espérons en outre que cette étude bibliographique nous apporterait aussi, voire surtout, des valeurs-limites (de température, de durée de sécheresse, etc.) tant maximales que minimales au-delà desquelles les arbres sont susceptibles de présenter des déficiences dans leur développement.

En second lieu, une réflexion physiologique aidée d'une étude de recherches faites antérieurement devait permettre de délimiter les périodes critiques de l'année et l'élément météorologique limitatif correspondant. Puis, par l'étude systématique des relevés météorologiques effectués à des stations représentatives durant une longue période, de formuler des limites utilisables statistiquement.

Pour réaliser l'une ou l'autre de ces voies, voire les deux, l'équipe chargée du mandat devait disposer de connaissances spécifiques en foresterie pour la réflexion physiologique; en météorologie, principalement en ce qui concerne l'emplacement, la dotation des stations et le traitement climatologique des relevés; en informatique enfin pour l'établissement de programmes spécifiques et l'utilisation de la banque de données climatologiques de l'ISM.

L'un des auteurs a apporté à l'oeuvre commune ses connaissances de physiologie végétale, d'aménagement forestier, de météorologie et son expérience dans l'utilisation pratique de données climatologiques, l'autre sa ténacité, sa mobilité d'esprit et ses connaissances en informatique. Il appert donc que le tandem formé par hasard était en quelque sorte prédisposé à mener à bien le mandat qui lui était proposé.

3. Recherche bibliographique

Des critères et des limites précises découlant d'études partielles effectuées dans le pays ou à l'étranger, mais dans des conditions analogues de climat devaient pouvoir servir de base à notre étude. C'est pourquoi la plus grande partie de la première moitié de la période dont nous disposons a été consacrée à une compilation d'ouvrages (articles, notes de recherches, livres didactiques et de références, etc.). La liste des ouvrages consultés est consignée en annexe.

Malgré le soin apporté à dépouiller, à assembler, à comparer les résultats d'études les plus diverses, il ne nous a pas été possible d'en tirer une information suffisamment cohérente pour servir de base à nos investigations futures.

C'est surtout l'absence de limites précises dans les périodes critiques, voire de définitions basées non sur des dates du calendrier (mois en général) mais sur des faits astronomiques ou météorologiques qui nous a déconcerté. Les quelques chiffres présentés dans la littérature consultée ne permettent pas une définition suffisante de critères limitatifs qui permettraient de dire si une année est "normale" donc représentative ou non.

Pourtant, cette compilation bibliographique nous a permis de cerner de très près le problème du développement de la végétation. Ses résultats ont grandement contribué à la définition des critères météorologiques qui sont déterminants au cours de l'année et tels qu'ils sont décrits ci-dessous au point 5.

D'une part, le fait que la plupart des auteurs indiquent que l'usage de périodes fixes découlant du calendrier ne donne généralement pas de résultats cohérents et d'autre part des essais personnels antérieurs nous ont incité à rechercher des possibilités de définir les principales saisons dans la vie des arbres selon des données découlant soit des conditions météorologiques soit de la mécanique céleste. Les résultats de cette dernière recherche seront publiés ailleurs. Quant aux premiers, ils sont exposés plus bas (cf. 5.1).

Vu l'impasse dans laquelle nous conduisait cette recherche bibliographique, nous avons décidé, en novembre 1986, de l'abandonner, au moins provisoirement, au profit de la démarche climatologique envisagée comme possible, quitte à revenir par la suite à des informations tirées de cette recherche bibliographique.

4. Approche climatologique

4.1 Considérations générales

Notre mandat étant de dire si une année particulière était représentative pour la forêt ou non, une approche climatologique, donc avant tout statistique pouvait être envisagée sans autres. Seuls les périodes et les paramètres à considérer devaient correspondre à des moments critiques du développement des arbres.

En climatologie classique, on se sert généralement de moyennes pour établir des différences entre les climats spécifiques d'une région. Pourtant, il est extrêmement rare que les conditions météorologiques particulières d'une année correspondent à la moyenne de nombreuses années. En outre, la recherche bibliographique avait montré que ce sont des situations extrêmes qui sont, le plus souvent, à l'origine de déficiences de développement et, partant, de dégâts visibles.

Par conséquent, une étude climatologique devait mettre l'accent sur l'apparition de situations particulières. Pour cela, les définitions d'amplitudes normale, utile et totale publiées d'autre part (cf. Primault 1978) ont été retenues tout au long de la présente étude. Une année peut être considérée comme entièrement représentative, dans le cas qui nous occupe, si tous les critères retenus sont situés entre les limites de 10% et de 90% découlant de l'analyse fréquentielle de la période de base.

Si la valeur correspondant à l'un de ces critères n'est plus située dans ces limites, avant tout dans le sens de la contrainte physiologique spécifique (nombre élevé de jours froids dans le cas du gel de printemps par exemple), l'année considérée ne saurait être pleinement représentative. Dans ce cas, les spécialistes devront se prononcer sur les incidences du critère non représentatif sur les conclusions de l'étude générale. On ne pourra alors pas tirer une conclusion globale de rejet, mais différencier les possibilités d'importance relative d'un critère déficient particulier sur l'évolution du développement de l'année. Ainsi, par exemple, un automne anormalement sec n'a pas d'importance au vu d'une assimilation diminuée au printemps ou d'un débourrement tardif des aiguilles de l'année considérée.

Pour certains critères et/ou périodes, il est difficile d'établir des diagrammes fréquentiels comme ils sont définis plus haut. On admettra alors une limite de 90% des cas constatés comme indicatif de représentabilité. Ceci est le cas lorsque le seuil n'est limitatif que dans une direction donnée (exemple: Nombre de jours des périodes de sécheresse).

4.2 Période de base

Notre mandat consiste à définir des critères et des valeurs-limite permettant de dire si les 3 années de la série de mesures intensives sont représentatives ou non.

Climatologiquement et selon les spécifications de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) les périodes de référence doivent compter trente années au moins.

Nous renvoyons ici le lecteur à la remarque faite au chapitre 1 sur l'hypothèse de stationnarité du climat.

En outre, le mandat se rapporte à l'étude spécifique de dégâts apparus depuis 1980 environ. Comme une origine météorologique de ces dégâts ne peut être écartée a priori, si l'on ne veut offrir le flanc à la critique de vouloir prouver une hypothèse préconçue, la période de référence ne saurait englober les années 1980 à 1985; 1986 étant la première des trois années à tester.

Il est reconnu de longue date, et notre étude bibliographique l'a conforté maintes fois, que la forêt réagit lentement à des influences extérieures. Par conséquent, des accidents météorologiques majeurs survenus dans les années ayant précédé l'apparition des dégâts ne sauraient entrer dans la détermination des valeurs-limite. En partant de considérants basés sur la pratique arboricole et viticole, nous avons estimé qu'une période-tampon de 10 ans était nécessaire pour exclure toute répercussion d'accidents météorologiques (valeurs extrêmes) sur le développement des arbres, partant sur les dégâts constatés. Ceci reporte la fin de la période de base à 1970.

Cette année marque cependant la fin d'une époque, celle où les observations du soir se faisaient à 21h30 HEC. Nos trois années de recherche sont situées dans une époque où ces observations se font à 19h30. Par conséquent, tout critère faisant intervenir soit des indications décou-

tant de l'observation du soir, soit des données de la journée basées sur les trois observations (moyennes par exemple) devra être interprété avec prudence, non dans les calculs statistiques climatologiques, mais dans sa signification pour la représentabilité des trois années de mesures intensives.

La banque de données de l'ISM contient pour certaines stations des relevés depuis 1901, pour d'autres depuis 1931 seulement. C'est le cas pour Einsiedeln (cf 4.3). Afin d'assurer un parallélisme absolu des diagrammes de comparaison, nous avons retenu la seconde de ces années comme point de départ.

Notre période climatologique de base s'étend donc de 1931 à 1970. Elle compte 40 années et satisfait largement au minimum exigé par l'OMM. Elle comporte des années chaudes (1947), des hivers froids (1956) des étés secs (1956) ou autres. Elle peut donc être admise comme point de comparaison général.

4.3 Stations de référence

Notre étude doit servir à déterminer si les mesures faites sont représentatives d'une situation valable pour une grande région. En outre, les trois stations météorologiques créées au Lägern, à Alpthal et à Davos l'ont été en vue du projet de recherche et seront démontées à la fin de la période de mesures intensives.

Elles ne disposent donc pas d'un passé climatologique selon les normes de l'OMM et ne sauraient servir de points de référence pour d'autres études ou questions subséquentes.

Nous avons donc recherché les stations climatologiques du réseau de l'ISM qui se trouvaient remplir les définitions suivantes: proximité, longues séries d'observation, comparabilité de site (pente, crête, fond de vallée).

Il en est découlé le choix suivant:

Zurich-ISM	pour Lägern
Einsiedeln	pour Alpthal
Davos	pour Davos

5. Incidence de situations météorologiques particulières sur la croissance des arbres

Les arbres étant des êtres vivants exposés à toutes les influences de leur milieu naturel, donc à toutes les fluctuations des paramètres météorologiques, il n'est pas étonnant qu'ils réagissent à leur impact. Notre étude bibliographique nous le montre sans doute possible. Cependant, ces réactions ne sont souvent pas immédiates et varient fortement d'une espèce à l'autre, voire d'une race à l'autre au sein de la même essence botanique. En effet, Engler (1905) a prouvé par ses essais tant sur les mélèzes que sur les épicéas que les conditions extérieures, le climat en particulier, exercent une sélection naturelle. Il en résulte que un arbre ne peut être placé dans des conditions différentes sans en subir des répercussions irréversibles: Aussi paradoxal que cela paraisse au premier abord, de jeunes mélèzes provenant de l'Engadine périclissent à Zurich sous la morsure du gel.

Les trois sites choisis pour la campagne de mesures intensives étant situés dans des conditions climatiques très différentes, il est donc vraisemblable que la réponse des arbres aux impacts météorologiques soit également différenciée. Etablir des limites fixes et valables aux trois endroits ne répondrait donc pas à notre problème. Aussi avons-nous retenu comme critères de départ des faits ou accidents qui ont certainement des influences notables, mais avons laissé à l'évaluation climatologique le soin de fixer dans chaque cas les limites probables. En effet, nous avons pensé que, la sélection naturelle aidant, les peuplements considérés étaient bien adaptés au climat. Ceci est valable à nos yeux, même si les dits peuplements ne constituent pas des "climax" dans le sens propre du terme.

De ce fait, nous n'avons retenu que des conditions particulières qui sont souvent citées comme pernicieuses dans la littérature consultée.

5.1 La période de végétation

Bien que les dictons populaires qui sont sensés représenter l'expérience des peuples de génération en génération se réfèrent très souvent à des fêtes de saints, c'est-à-dire à des dates du calendrier, chacun a pu se rendre compte par lui-même que la végétation suit d'autres règles. En effet, le calendrier représente une subdivision arbitraire de l'année qui, elle, est déterminée par la mécanique céleste.

Si l'on veut rechercher une liaison entre la vie et d'autres phénomènes, il faudrait pouvoir se baser comme point de départ sur des faits découlant non pas d'une convention humaine telle que le premier janvier que ce soit selon le calendrier julien ou grégorien.

Recherchant un point de départ de l'"année" mieux adapté pour l'analyse de phénomènes vitaux, nous avons recherché d'autres points de repère, variables cette fois, mais découlant soit directement de la mécanique céleste (solstice d'hiver par exemple) soit de conventions basées sur celle-ci ("Nouvel-an des arbres" du calendrier judaïque par exemple). Les résultats furent décevants. On y reviendra dans une autre étude.

Si la végétation ne se plie pas à la mécanique céleste dans son développement, ce dernier est le reflet plus ou moins bien déterminé des conditions météorologiques de certaines périodes. On a vu à ce propos (Primault, 1970) l'importance de la température des 30 jours précédant le solstice d'hiver sur la date de floraison des abricots en Valais. Nous n'avons cependant pas ici affaire à des plantes cultivées, introduites chez nous par l'homme, mais à des essences autochtones ayant subi notre climat durant de nombreuses générations, ayant donc été étroitement sélectionnées par lui. Elles sont donc particulièrement bien adaptées à l'environnement (climat et sol) dans lequel elles vivent.

Dans deux études précédentes (Primault, 1953 et 1972), nous avons recherché un moyen d'adapter à l'évolution du temps les calculs afférents soit à la vie des peuplements forestiers, soit aux travaux des champs. Nous avons alors proposé deux modèles pour calculer la "période de végétation", c'est-à-dire le laps de temps qui sépare le moment où la végétation sort de sa torpeur hivernale de celui où les signes de vie disparaissent à nouveau en automne.

5.1.1 Le début de la période de végétation

En 1950 déjà, Jacquiot avait démontré que le "départ de la végétation" était moins déterminé par le gonflement des bourgeons que par le mouvement du suc cellulaire du cambium des arbres. Parallèlement à ce mouvement, mais probablement pas déterminé par lui, on constate un déplacement de l'eau dans les trachées du bois. Ainsi, chez les conifères dont les bourgeons de l'année ne se gonflent que tard, mais dont quelques jours chauds permettent une certaine assimilation, le "départ de la végétation" passe généralement inaperçu.

De nombreux essais de laboratoire, corroborés par des observations in situ, ont montré que les cellules du cambium "revivent" dès que le seuil de 5°C est franchi vers le haut. Cette limite est valable pour la plupart des plantes de nos forêts. Certes, pour les dits essais, on s'est servi de plants de plaine ou de moyenne montagne. Nous signalons plus haut et nous avons développé cette idée dans d'autres articles (Primault, 1971 en particulier) que, au cours des générations successives, les plants étaient sélectionnés naturellement par le climat. Il se peut donc fort bien, et il est même hautement probable, que ce seuil thermique ne soit pas universellement valable.

Les essais de laboratoire ont été effectués par température constante, alors que les plants de nos forêts sont soumis à une fluctuation journalière de la température. Comme la croissance est quasi linéairement proportionnelle à la température au-dessus du "zéro de végétation", nous avons adopté, comme base de nos calculs, la moyenne de la journée pensant que la croissance plus rapide durant les heures chaudes de la journée, compensait la léthargie constatée durant la nuit.

Les plantes ne réagissent pas immédiatement à une hausse de température. Pour leur éviter de périr sous la morsure du gel, la nature les a munis d'une certaine inertie. Un jour chaud isolé ne signifie donc pas le départ immédiat de la végétation. Il faut pour cela une période de plusieurs jours consécutifs dont la température moyenne dépasse le seuil ou le "zéro de végétation".

Ne disposant ni de données de laboratoire, ni de relevés effectués sur le terrain, nous avons recherché climatologiquement la durée qui donnait, pour notre période de référence une "amplitude normale" identique ou à peu près à nos trois stations de base. Nous avons alors retenu une période de 7 jours, ce qui vient conforter ce que nous avons admis déjà (cf Primault, 1972).

Nous reviendrons sur cette démonstration dans un article séparé.

5.1.2 La fin de la période de végétation

En automne, les jours devenant plus frais, l'activité des plantes s'en trouve réduite. Pourtant, l'interruption de cette activité ne se produit généralement pas de façon abrupte, mais après quelques jours seulement.

A notre connaissance, on ne trouve pas de recherches à ce propos. La plupart des auteurs ayant examiné les réactions des végétaux à l'automne se sont basés non sur le sens et la vitesse du flux de l'eau dans les troncs, mais sur des stades phénologiques facilement observables comme la coloration ou la chute des feuilles. Une telle méthode ne peut être envisagée pour les épicéas qui forment une grande partie des peuplements de nos trois sites. Nous référant aux deux études déjà citées, nous avons gardé une durée de 5 jours froids consécutifs comme déterminant l'arrêt de l'activité végétative à l'automne.

Dans nos considérations, nous avons admis d'abord que le seuil de 5°C ou "zéro de végétation" admis lors de la définition du début de la période devait être repris pour la fin. Or, à la réflexion, il est apparu que les arbres supportent aisément des périodes plus ou moins longues durant lesquelles cette température-limite n'est pas atteinte et cela sans entrer en léthargie. Si de telles conditions sont surmontées au printemps, il était vraisemblable qu'elles le seraient aussi en automne. Il fallait donc abaisser le seuil thermique pour obtenir une différenciation entre ce qui est nécessaire au départ de la végétation et ce qui n'est plus suffisant pour la maintenir.

Comme nous ne disposons ici non plus de données précises, nous avons établi climatologiquement l'amplitude normale découlant de divers seuils thermiques et retenu celui, situé au-dessous de 5°C qui donnait le chiffre le plus voisin à nos trois stations. Il s'agit de 4°C.

Bien des observateurs ont constaté déjà qu'un fort gel pouvait interrompre brutalement la phase végétative en détruisant les feuilles des arbres. Des températures basses dues à des nuits claires consécutives à des advections d'air froid peuvent occasionner des gelées notables en automne et cela aussi bien en plaine qu'en montagne.

Par conséquent, il fallait introduire dans notre définition un argument tenant compte de ce phénomène. Nos recherches bibliographiques ne nous ont apporté aucun argument nouveau, aussi avons-nous repris le même que précédemment, à savoir qu'une seule température minimum de -2°C ou moins interrompait la période de végétation.

Il arrive parfois que le temps de l'automne soit régi par une situation anticyclonique qui se prolonge durant plusieurs jours. Dans ces cas-là

les températures sont relativement élevées pendant la journée, surtout sur les pentes. La moyenne qui en résulte dépasse alors largement les 4°C retenus bien que, la nuit, il fasse déjà assez froid pour produire des gelées blanches. De telles situations peuvent entraîner la mort des feuilles si elles se prolongent quelques jours. Aussi avons-nous, comme par le passé d'ailleurs, introduit une troisième notion dans nos calculs, à savoir que la période de végétation était terminée si l'on notait 3 nuits de gel (minimum inférieur à 0°C) consécutives.

5.1.3 La durée de la période de végétation

De ce qui précède, la "période de végétation" c'est-à-dire le laps de temps de chaque année durant lequel les forêts sont en état d'assimiler est définie comme suit:

Il s'agit de la période séparant le septième jour consécutif dont la température moyenne a atteint 5°C au moins (5,0°C y compris) et a) ou bien le cinquième jour consécutif où la température moyenne n'a pas atteint 4°C (4,0°C non compris), b) ou bien le troisième jour consécutif présentant une température minimum négative, c) ou bien le jour où le minimum de la température a été inférieur à -2°C (-2,0°C non compris).

Ce laps de temps n'a pas de signification en lui-même, c'est-à-dire que sa durée n'est pas en relation directe avec l'accroissement forestier ou avec certains phénomènes particuliers tels que l'assimilation par exemple. Pourtant, ce n'est que durant cette période que ces phénomènes se déroulent dans l'écrasante majorité des cas.

Par conséquent, dans la définition des critères, cette durée n'intervient que de façon sous-jacente.

5.1.4 Les intervalles temporelles qui en découlent

Le développement de la végétation n'est pas uniforme depuis son début au printemps jusqu'à son déclin en automne. Ces différences ne sont pas dues uniquement aux températures qui augmentent de janvier à juillet pour diminuer ensuite, ni à la répartition irrégulière des précipitations. La propension qu'ont les arbres à valoriser ces températures et ces précipitations tout comme le rayonnement d'ailleurs est également tributaire du stade phénologique atteint par la plante. Ce stade peut être bien visible (débourement, coloration ou chute des feuilles par

exemple) ou plus caché (floraison du hêtre ou du chêne par exemple).

De cette réflexion on peut déduire trois phases principales dans la vie végétative d'un arbre au cours de la période annuelle de végétation telle qu'elle a été définie plus haut: le développement de l'appareil de production (feuilles, aiguilles, rameaux), la pleine utilisation de celui-ci pour la constitution de réserves et la fructification, la préparation de la période de repos (aoûtement) et de la saison suivante (formation des bourgeons).

On retrouve ainsi les trois saisons principales de notre calendrier. Mais, dans notre cas, nous n'avons plus affaire à des laps de temps fixés d'avance, mais à des intervalles temporels déterminés par les conditions météorologiques de l'année.

Pour suivre parfaitement ce raisonnement, il eût fallu découper la période de végétation en partant d'événements de nature uniquement météorologique. Nous n'avons trouvé aucune indication dans ce sens dans la littérature consultée, aussi avons-nous tout simplement divisé notre période de végétation en trois phases d'égale durée. Ce faisant, nous sommes pleinement conscients d'introduire une part d'arbitraire dans notre démarche. Pour établir un pont avec la nomenclature courante, nous avons conservé les dénominations usuelles pour ces trois intervalles particuliers: le printemps, l'été et l'automne.

Si le départ de la végétation est conditionné avant tout par des températures relativement élevées, certains événements ayant précédé ce moment ont des répercussions non négligeables sur le développement des arbres. Nous songeons ici plus spécialement à l'eau disponible dans le sol, surtout à un moment où l'approvisionnement en eau est primordial. Les périodes de sécheresse ou au contraire de pluie qui se sont manifestées juste avant le début de la période de végétation devront donc être incluses dans l'examen de la première phase. Les sols de nos sites de recherche ont des capacités de rétention limitées par leur profondeur et surtout par leur déclivité et par le fait qu'aucun de ces sites ne se trouve au fond d'une vallée. Par conséquent, nous avons admis que le laps de temps précédant le début de la période de végétation dont on devait tenir compte ici ne devait pas excéder un demi-mois, soit 15 jours. Il en résulte que, pour la suite de l'étude, le printemps débutera 15 jours avant le début de la période de végétation et en englobera le premier tiers.

L'été sera fait du deuxième tiers de la période de végétation et l'automne sera constitué de son troisième tiers.

On pourrait s'en tenir à cette seule subdivision et ne retenir que les trois "saisons" citées plus haut. Pourtant, l'étude bibliographique avait révélé l'importance non négligeable, voire primordiale d'accidents météorologiques particuliers survenus en-dehors de la période de végétation, c'est-à-dire en hiver. Il s'agissait de longues périodes de sec diminuant de façon significative la réserve en eau du sol ou au contraire de quantités inhabituelles de précipitations imbibant ce même sol de telle sorte que la respiration des racines en devenait impossible. Des accidents thermiques tels que froids intenses ou brusques chutes de températures peuvent également compromettre le déroulement harmonieux des différents stades phénologiques de l'année suivante, voire conduire à la mort de la plante.

Partant de ces informations, nous avons défini une quatrième "saison": le repos hivernal. Ce laps de temps est compris entre la fin de la période de végétation et le quinzième jour précédant le début de la période de végétation suivante. En effet, ce qui se passe durant cette "saison" influera seulement l'accroissement et le développement des arbres au cours de la période de végétation suivante (éventuellement aussi celles qui suivront) mais en aucun cas celle (ou celles) qui l'aura précédée.

Du fait que notre banque de données ne contient pas d'informations journalières avant le 1 janvier 1931 pour Einsiedeln, nous étions placés devant une difficulté supplémentaire. En effet, il n'était pas possible de déterminer, pour cette station, la date de la fin de la période de végétation de l'année 1930, ni d'analyser les événements entre cette date et le 31 décembre 1930.

Il en résultait une lacune d'un repos hivernal. Le remplacer par celui couvrant l'hiver 1970/1971 aurait été faillir au raisonnement précédent. Pour garantir une certaine comparabilité des données découlant de nos trois stations climatologiques de référence, nous avons fait débiter la période de repos hivernal de 1930/1931 au 1 janvier 1931.

5.2 Le froid de l'hiver

La végétation pérenne, et les arbres en constituent la majeure partie, entre en repos en automne pour "reprendre vie" au printemps. Il semble

donc que, comme certains animaux, les arbres entrent en léthargie et passent l'hiver dans un "état second" qui les met à l'abri des vicissitudes de la mauvaise saison.

Toutefois, au contraire de certains animaux hibernant (marmottes, ours par exemple) les arbres ne passent pas l'hiver terrés, donc à l'abri du froid ou de brusques hausses de température. Ils en ressentent au contraire tout l'impact direct.

Si les feuillus ne possèdent pas d'appareil leur permettant d'assimiler dès que des conditions favorables sont remplies (température suffisamment élevée notamment), il n'en va pas de même de certains conifères dont l'appareil assimilant, les aiguilles, est prêt à réagir, même pour de très courtes périodes: un jour, voire quelques heures seulement.

Dans un cas comme dans l'autre, les troncs possèdent toujours une certaine réserve en eau et le cambium est susceptible de réagir à toute hausse de température qu'elle soit due à un intense rayonnement ou au réchauffement de l'atmosphère dans laquelle il baigne.

Vu la présence de cette eau, des températures très basses, généralement inférieures à -15°C , peuvent amener le suc cellulaire à se congeler et, partant, entraîner des modifications chimiques telles que la cellule meurt. Ceci est valable non seulement pour les aiguilles, mais aussi pour les bourgeons et pour le cambium.

Une autre réalité dont on ne saurait ici sous-estimer l'importance est le fait que le coefficient de dilatation de l'écorce n'est pas le même que celui du bois. Par conséquent, par grand froid, l'écorce des arbres se rétrécit plus que la circonférence du tronc. Il s'ensuit des tensions mécaniques qui peuvent provoquer la déchirure de l'écorce sur de grandes longueurs.

Le premier critère retenu est donc le nombre de jours froids. On pouvait se demander si la durée jouerait ici un rôle prépondérant, donc s'il fallait tenir compte du minimum journalier ou de la moyenne du jour. Toutefois, la plupart des auteurs signalent que, en ce qui concerne les fentes de l'écorce tout au moins, une seule nuit suffit.

Quant au danger de congélation du suc cellulaire, il faut généralement plus d'une nuit froide pour que cette congélation se produise. Il eût donc fallu tenir compte du nombre de jours froids consécutifs. Seule une

longue période de froid intense (février 1956 par exemple) peut entraîner des dégâts suffisants pour qu'il faille en tenir compte ici. Nous y avons toutefois renoncé.

Un fait qui revient souvent dans la littérature, c'est que le froid de l'hiver a une influence inhibitoire sur l'accroissement de l'arbre et cela non seulement l'été suivant, mais durant plusieurs années consécutives. Plus encore que la rupture de l'écorce, c'est surtout cette constatation qui nous a incité à retenir le froid de l'hiver comme critère. Celui-ci s'énonce alors:

- A. Répartition fréquentielle du nombre de jours au cours desquels le relevé du matin se situe dans des classes de degré en degré au-dessous de 0°C. La période considérée est celle du repos hivernal.

5.3 Forte baisse de la température

Au printemps 1987, on a constaté en de nombreux endroits que les aiguilles des épicéas avaient jauni subitement et étaient ensuite tombées. Les bourgeons par contre sont restés intacts pour la plupart, si bien que les arbres ont reverdi comme des feuillus au cours du printemps. Dans bien des cas, seuls des rameaux ou des branches isolées furent atteints par cette nouvelle "maladie". Les médias ont immédiatement attribué cette coloration à la pollution de l'air. Pourtant, des recherches plus spécifiques ont montré qu'il s'agissait de dégâts de gel caractérisés.

Les températures relevées durant la période ayant précédé l'apparition de ces dégâts particuliers appartiennent effectivement au critère précédent. Le nombre de jours froids dénombré ne saurait cependant les expliquer, car ils auraient dû être signalés au cours d'autres années semblables.

Dans la littérature, et les études spécifiques faites en été 1987 à Birmensdorf viennent le corroborer, on retrouve souvent l'indication qu'une chute brusque de température, surtout si elle est conséquente, est préjudiciable aux plantes. Il ne s'agit cependant nullement d'un fait particulier de l'hiver. En pleine croissance, une telle chute de température peut bloquer pour plusieurs jours les mécanismes de développement des plantes.

Turner, dans le rapport provisoire élaboré en relation avec les dégâts de gel de l'hiver 1987 relève que, si une telle chute est suivie à brève échéance d'une hausse d'envergure semblable, les dégâts sont d'autant plus importants. Il signale, thermogrammes à l'appui, des fluctuations de plus de 10 K en quelques heures et cela aussi bien vers le bas que vers le haut. Il explique ce fait par des modifications de l'altitude du sommet de la couche d'air froid recouvrant le versant nord des Alpes sous l'influence du foehn. Les mas forestiers les plus atteints par ces dégâts particuliers auraient ainsi été baignés alternativement par de l'air chaud (foehn) et par de l'air froid (reflux de la couche d'air froid lorsque l'intensité du foehn diminuait).

Comme nous l'avons relevé déjà, une brusque et notable chute de température n'est pas seulement préjudiciable en hiver, mais exerce un choc en été également, choc dont les conséquences se perpétuent durant plusieurs jours. C'est probablement en vue d'éviter de tels chocs thermiques que les jardiniers s'abstiennent d'arroser leurs plantes avec de l'eau froide (tirée de conduites souterraines) durant les heures chaudes et ensoleillées de la journée (eau froide + refroidissement par évaporation).

Notons ici qu'un abaissement brusque de la température peut provenir soit d'un changement de masse d'air soit de conditions très particulières comme une chute de grêle par exemple ou le mouvement de la limite supérieure d'une masse d'air froid apparemment immobile.

Ne disposant pas de thermographes à nos trois stations de référence qui auraient permis une étude climatologique des fluctuations de température à une échelle temporelle fine, force nous fut de ne nous baser que sur les trois relevés journaliers des stations conventionnelles. En effet, si on dispose actuellement de relevés horaires, voire à 10 minutes d'intervalle pour les stations ANETZ de Zurich et Davos, nous n'avons des relevés semblables ni pour Einsiedeln aujourd'hui, ni pour les deux autres stations pour la période de base.

Fallait-il alors se baser sur des fluctuations de la moyenne journalière de la température, ce qui aurait indiqué une action prolongée ou se limiter à l'étude de délais particuliers. Vu les modifications intervenues quant aux délais d'observation, des seuils établis pour la période de base et pour les trois années de mesures intensives n'auraient pu être

retenus ni pour la moyenne journalière ni pour l'observation du soir. Nous avons ainsi renoncé, malgré ce que promettait une telle manière de faire, à étudier les fluctuations de la température pour des intervalles de 12 heures.

Restaient les relevés du matin et du milieu du jour soient des intervalles de 24 heures. Pour éviter une influence secondaire due au taux de nébulosité (en d'autres termes le réchauffement dû au rayonnement durant la matinée), nous avons retenu la seule observation du matin. Ce faisant, nous sommes pleinement conscients du fait qu'une nuit claire peut entraîner un abaissement considérable de la température, même sans changement de masse d'air. Pourtant, nous travaillons ici avec des relevés effectués sous abri et non pas avec des températures VAH (indices actino-thermiques).

Ces considérations nous permettent de formuler le critère suivant:

- B. Abaissement de la température du matin de plus de 10 K d'un jour au suivant durant la période de repos hivernal.

et l'indication complémentaire pour tenir compte en particulier des remarques de Turner et autres:

- B.1 Hausse de plus de 6 K au cours des 24 heures précédentes et/ou suivantes.

5.4 Gels du printemps

Chacun sait que, au printemps, de basses températures peuvent provoquer des dégâts importants à la végétation. Le fait que l'ISM diffuse des avis de gel pour les arboriculteurs et les viticulteurs en est la preuve évidente. Les arbres de nos forêts peuvent être atteints par des dégâts semblables et il n'est pas rare de trouver des descriptions d'accidents de ce genre.

Tout comme les arbres fruitiers et la vigne, les arbres de nos forêts peuvent ainsi perdre tout ou partie des feuilles nouvellement écloses. Les résineux subissent également le contrecoup de telles situations. Même s'ils ne perdent pas leurs aiguilles, le choc thermique qu'ils en ressentent entraîne nécessairement un arrêt ou pour le moins un ralentissement des processus de croissance.

Dans la pratique agricole, l'arboriculture et la viticulture en particulier, on n'utilise pas les mesures de température effectuées sous abri pour évaluer l'intensité du gel. En effet, selon la nébulosité, la température des plantes peut être bien inférieure à celle de l'air. On a, pour cerner le problème de plus près, c'est-à-dire tenir compte de la température des plantes ou mieux de l'effet combiné de la température de l'air et des pertes thermiques dues au rayonnement nocturne, introduit la notion d'"indice actino-thermique". On a en outre constaté que un thermomètre à alcool placé horizontalement et rayonnant librement indiquait à peu près la température des plantes ou température VAH (cf. Primault 1964).

Aucune de nos trois stations de référence n'est dotée d'un tel instrument et la mesure de la température VAH ne figure au programme d'aucune d'entre elles. Force nous fut alors de nous référer à des relevés effectués sous abri.

En outre, le gel exerce ses dégâts au lever du jour. Par conséquent, nous avons préféré utiliser des valeurs minimales de la température.

Un autre aspect est encore à élucider ici: la sensibilité des arbres au gel. On sait que les arbres fruitiers et la vigne présentent une certaine résistance naturelle aux atteintes du gel. Cette résistance est fonction de la concentration du liquide intercellulaire. Cette concentration est fonction d'une part de la transpiration des plantes (plus l'air ambiant est sec, plus ce liquide est concentré et, partant, plus la résistance naturelle est grande) et d'autre part du stade phénologique atteint.

S'il est difficile d'évaluer l'impact de la transpiration sur la résistance naturelle au gel, il n'en va pas de même des répercussions du stade phénologique. En partant de l'expérience acquise, on a pu tracer des courbes de température critique (en °VAH) en fonction du stade phénologique pour la plupart des arbres fruitiers ainsi que pour la vigne.

Dans notre cas et bien que, physiologiquement, les conditions soient analogues, on ne dispose pas de telles courbes pour les arbres forestiers. En outre, on n'a pas non plus de longues séries d'observations phénologiques, le réseau suisse correspondant n'ayant été mis sur pied qu'en 1951.

Par conséquent et bien que conscients des différences qui peuvent en résulter dans la représentabilité des chiffres découlant du dépouillement de nos trois stations de référence, nous avons formulé le troisième critère comme suit:

- C. Fréquence du nombre de jours où la température minimum (mesurée sous abri) est inférieure à 0, -3, -6 et -10°C (par périodes de 10 jours entre le 11 avril et le 30 mai).

On sera probablement étonné que nous dérogeons ici au principe énoncé sous 5.1., à savoir que nous abandonnions le calendrier usuel dans cette étude. Le paradoxe n'est qu'apparent. En effet, des études sur les singularités thermiques ont montré que la dernière d'entre elles qui puisse causer des dégâts importants au printemps se rencontre 153 jours après le solstice d'hiver, c'est-à-dire le 22 mai de notre calendrier. Il s'agit, en fait, de la "kalte Sophie" des Allemands (Primault 1970 b). Comme il s'agit d'un jour déterminé et indépendant de notre période de végétation, nous avons simplifié la compréhension de ce critère pour le profane en nous référant au calendrier usuel.

5.5 Périodes de sécheresse

Les plantes doivent pouvoir entretenir un courant d'eau des racines vers la couronne afin de permettre d'une part la transpiration et d'autre part l'apport d'éléments nutritifs, en général minéraux, constitutifs des produits élaborés. En outre, l'eau joue un rôle considérable dans les différents composants de la plante (hydrates de carbone, protéines, lipides, voire vitamines).

Durant toute l'année, donc également durant la période de repos hivernal, les arbres constituant la forêt contiennent une certaine quantité d'eau sous forme liquide. Cette eau est contenue dans le suc cellulaire dont elle représente la majeure partie en toutes saisons.

Dès que la température augmente au printemps, ce suc cellulaire se met en mouvement. C'est le "réveil de la vie" et les diverses fonctions des cellules s'en trouvent réactivées. Mais plus ces fonctions vitales sont vives et plus les besoins en eau se font pressants. En outre, avec l'élaboration de substance sèche (grossissement des bourgeons, débourrement, déploiement de nouvelles feuilles ou d'aiguilles, puis apparition

des fleurs, des graines, dépôt de cellulose dans le tronc et les branches, constitution de réserves enfin) les besoins en eau s'accroissent.

Il en découle que, au cours de l'année, c'est-à-dire selon le stade phénologique atteint par la plante, les besoins en eau varient sensiblement. Ils sont, à pouvoir absorbant de l'air (déficit de saturation) égal, plus importants au printemps qu'en été et surtout qu'en automne.

Une interruption de l'apport d'eau, même une simple diminution des quantités disponibles signifie donc en toute saison un handicap pour l'arbre et peut même, dans les cas extrêmes, conduire à un collapsus.

Si les besoins en eau des plantes sont en majeure partie fonction de l'évolution du temps (température, rayonnement, humidité de l'air, vent) et du stade phénologique correspondant, l'eau disponible dépend, elle, non seulement des précipitations - et ici nous englobons également la condensation (rosée et givre) ainsi que l'eau provenant du brouillard et retenue par la couronne des arbres - mais aussi, voire plus encore, des possibilités du sol à la retenir. En effet, le pouvoir de rétention du sol détermine la durée de la période sans apports extérieurs que peut supporter un peuplement sans en subir de dommages.

Pour tenir compte de ce second facteur dans nos considérations, il eût fallu pouvoir disposer d'analyses physiques du sol indiquant, pour chaque parcelle, le pouvoir de rétention. Pourtant, le sol est un médium hétérogène, c'est-à-dire que son pouvoir de rétention varie beaucoup d'un endroit à l'autre (porosité, composante organique, etc.). Ce pouvoir de rétention dépend en outre et de façon non négligeable de la profondeur de la strate explorée par les racines, respectivement de la profondeur du sol pour les sols superficiels.

Le mandat qui nous a été donné prévoit une étude climatologique pour déterminer la représentativité d'un nombre restreint d'années. Par conséquent, il nous a semblé possible de ne prendre en considération que des données météorologiques sans tenir compte des conditions spécifiques du sol dans lequel vivent et se développent les trois peuplements étudiés.

Dans nos considérations, l'utilisation, voire l'épuisement total de la réserve en eau du sol ne devait toutefois pas être ignorée.

Dans ses études sur les périodes de sécheresse, Uttinger avait déjà pressenti cette difficulté. Il proposait de ne pas faire dépendre la fin d'une période de sécheresse de la même quantité de précipitations si la période était brève ou longue. Il avait énoncé la règle suivante qui a prévalu pour ses calculs:

- Une période de sec (nombre de jours) est interrompue dès que la quantité d'eau recueillie au pluviomètre en 24 heures dépasse 0,3 mm durant les cinq premiers jours, 1,0 mm ensuite.

Tenant compte de ce qui précède, il nous a pourtant semblé que la quantité d'eau nécessaire à l'interruption d'une période de sécheresse ne saurait être constante. Elle devait au contraire augmenter progressivement avec la durée de cette période. Vu que l'énergie que doivent fournir les plantes pour soutirer au sol l'eau indispensable à leur développement, voire à leur survie, est fonction de la quantité disponible par rapport aux forces d'adsorption du sol et que cette fonction n'est pas linéaire, il eût été préférable d'adopter un modèle de degré supérieur. Pourtant, ne disposant pas d'expérience en la matière et nos recherches bibliographiques n'ayant conduit à aucun résultat concret, nous nous sommes contentés d'un modèle linéaire et avons adopté la définition suivante:

- Une période de sec est interrompue dès que la quantité d'eau recueillie en 24 heures au pluviomètre standard dépasse 0,3 mm durant les cinq premiers jours, $1 + ((N-5) * 0,14)$ mm ensuite; où N est le nombre de jours comptés depuis le début de la période

Cette définition est l'extrapolation simple de l'idée de Uttinger d'augmenter les précipitations nécessaires à l'interruption d'une période de sec selon sa durée.

En fait, plus encore que dans les cultures agricoles, une certaine quantité de précipitations n'atteint pas le sol au début de chaque événement, mais est retenue par la couronne des arbres où elle s'évapore. Il s'agit de l'interception. La littérature consultée donne des chiffres assez contradictoires concernant ce point particulier. Les divergences parmi les auteurs consultés proviennent avant tout des méthodes utilisées pour les mesures. Les uns ne tiennent compte que des différences de précipitations recueillies à des pluviomètres Hellmann placés d'une part dans des clairières ou en des endroits dégagés, d'autre part sous la

couronne des arbres. Leur résolution temporelle est de 24 heures. Les autres considèrent isolément chaque pluie et mesurent la quantité nécessaire pour que la précipitation devienne mesurable au sol sous le couvert végétal.

La seconde méthode nous a semblé la plus exacte. Pourtant, d'une part nous ne disposons pas d'enregistrement des précipitations permettant de déterminer le nombre d'"événements" en 24 heures, et d'autre part les quantités citées dépendent fortement et du pouvoir desséchant de l'air (déficit de saturation) et du temps qui sépare chaque fois la fin d'un événement et le début du suivant (possibilité pour la couronne de sécher).

Les chiffres découlant d'investigations effectuées selon la première méthode décrite sont très variables en raison-même du fait qu'ils ne tiennent pas compte du nombre d'événements au cours de l'unité temporelle.

C'est donc en pleine connaissance de cause que nous renonçons ici à tenir compte de l'interception dans nos calculs.

L'impact d'une période de sécheresse n'est pas le même selon les saisons.

- Au printemps, les arbres ont besoin de grandes quantités d'eau pour se développer, car l'étalement des feuilles et l'allongement rapide des nouvelles aiguilles réclament de l'eau et pour l'élaboration de matière sèche nouvelle et pour maintenir la turgescence des jeunes tissus.
- Au cours de l'été, la transpiration (chaleur d'évaporation), permet de maintenir la température des organes végétaux dans des limites tolérables malgré le rayonnement reçu. Cette transpiration est fonction des conditions météorologiques. En outre, l'énergie disponible et l'appareil de production pleinement développé permettent une forte assimilation à la condition expresse que l'approvisionnement des plantés en eau soit suffisant.
- En automne enfin, des conditions défavorables de l'approvisionnement en eau gênent un aoûtement équilibré et rapide.

Lorsque nous parlons de saisons, nous ne nous attachons pas au calendrier civil pour lequel le printemps débute à l'équinoxe du printemps pour se terminer au solstice d'été; l'été dure du solstice d'été à

l'équinoxe d'automne; l'automne enfin est la période comprise entre l'équinoxe d'automne et le solstice d'hiver.

Les arbres, eux ne se soumettent pas à de tels critères parfaitement arbitraires. Ils se développent selon les impulsions qu'ils reçoivent du milieu ambiant. Nous avons défini plus haut (5.1) le début et la fin de la période de végétation. Relevons simplement ici que les périodes considérées sont variables tant d'une station à l'autre que d'une année à l'autre.

5.5.1 Durant le repos hivernal

Sous nos climats, et plus spécialement en montagne (Davos et Einsiedeln), où le sol est recouvert de neige durant une grande partie de l'hiver, il peut paraître oiseux de parler d'une grande importance des périodes de sécheresse. En effet, la couche de neige au sol représente une réserve d'eau importante qui, lors de sa fonte, ira s'infiltrer dans le sol. Cependant, d'une part cette eau viendra saturer le sol (voir 5.6. plus bas) et d'autre part une partie plus ou moins importante de cette réserve s'écoulera en surface en raison même de la dite saturation, mais en pure perte pour la végétation.

Pourtant, ce ne sont pas ces phénomènes qui sont les plus importants ici. Du point de vue de la physiologie des plantes, une longue période de sec au cours du repos hivernal n'est pas sans importance. En effet, qui dit sécheresse, dit le plus souvent absence de nuages, donc forte insolation. Cet adage est valable avant tout en montagne. De ce fait, l'écorce des troncs, les branches, les rameaux, les aiguilles et les bourgeons se réchauffent sensiblement de jour sous l'ardeur des rayons solaires. Même s'il ne s'ensuit pas de réaction visible des plantes, le cambium se met à réagir, voire les aiguilles à assimiler. Les besoins en eau des plantes augmentent alors sensiblement, même s'ils n'atteignent pas ceux des autres saisons.

Pour tenir compte de cela, nous avons défini le critère suivant:

- D. Répartition fréquentielle de la durée des périodes de sécheresses excédant 10 jours durant le repos hivernal.

Remarques:

Dans les critères D, E, F, G, H, I, J, K, on sera peut-être étonné de trouver une limite inférieure de durée (10 jours) au-dessous de laquelle les décomptes n'ont pas été effectués. Ces critères se rapportent d'une part à la sécheresse, d'autre part à des périodes avec précipitations.

Dans les deux cas, il s'agit des causes premières des fluctuations de l'eau du sol. Ce dernier agit comme zone tampon si bien que de courtes périodes soit de sec soit de précipitations n'ont pas de conséquences directes sur le développement de la végétation arborescente.

En outre, pour fixer notre limite inférieure de durée, nous avons effectué de nombreux calculs préliminaires et constaté que la courbe du nombre de cas observés en fonction de la durée des dites périodes présentait une discontinuité très nette au voisinage des 10 jours et cela aussi bien pour les périodes de sec que pour celles avec précipitations.

5.5.2 Au printemps

Le critère suivant ressort des réflexions énoncées plus haut:

- E. Répartitions fréquentielles de la durée des périodes de sécheresse de 10 jours et davantage au cours du printemps.

En effet, il nous a paru judicieux de tenir également compte ici du temps qu'il a fait avant que les arbres ne réagissent aux impacts météorologiques aussi bien que de celui qui a présidé à leur plus fort développement. Si ce moment est précédé d'une période sèche, il en découlera nécessairement des conditions défavorables au débourrement et surtout à un développement harmonieux des jeunes pousses que ce soient des feuillus en plaine ou des conifères en montagne.

5.5.3 En été

- F. Répartition fréquentielle de la durée des périodes de sécheresse excédant 10 jours durant l'été.

5.5.4 En automne

Vers le déclin de la période de végétation, la sécheresse perd de son importance. Elle joue toutefois un certain rôle si bien que nous y avons

retenu un critère complémentaire dont le poids est cependant moins important que celui des précédents.

G. Répartition fréquentielle de la durée des périodes de sécheresse de 10 jours et davantage durant l'automne.

5.6 Périodes avec précipitations

Si un sol sec porte préjudice à un développement harmonieux des plantes et, partant, des arbres, un sol gorgé d'eau n'est pas nécessairement synonyme de bonnes conditions de développement.

En effet, les jours de pluie sont accompagnés le plus souvent d'un ciel très nuageux, voire couvert, donc d'un rayonnement déficient et de températures relativement basses.

Une série ininterrompue de jours avec précipitations n'est pas seulement le corollaire d'une croissance ralentie, mais aussi d'une très forte humidité du sol qui peut souvent aboutir à sa saturation, surtout si les précipitations sont non seulement persistantes, mais abondantes de surcroît. Un tel état de faits peut conduire à la saturation de couches de plus en plus profondes du sol dont la plasticité augmente quelques fois jusqu'au point de rupture. Il s'ensuit des éboulements subits ou consécutifs à un événement météorologique particulier comme une précipitation intense même non exceptionnelle. L'été 1987 en a donné de nombreux exemples.

La plupart de nos essences forestières ne sont pas habituées à se développer dans un sol saturé (hydroculture). Pour remplir leur rôle de fournisseur d'eau et d'éléments nutritifs, minéraux pour la plupart, leurs racines doivent pouvoir respirer, c'est-à-dire disposer d'oxygène sous forme gazeuse. Un sol saturé est donc un signe d'asphyxie pour elles. Ainsi, dans un sol saturé, et, aussi paradoxal que cela paraisse au premier abord, les racines de nos plantes sauvages ont de grandes difficultés à absorber de l'eau. Par conséquent, même une demande diminuée par une forte humidité de l'air (transpiration réduite) d'une part et un faible rayonnement (activité réduite) d'autre part ne peut être entièrement satisfaite. Il se produit alors un déséquilibre entre la partie souterraine des plantes (les racines) et leurs parties aériennes (tronc, branches, feuilles ou aiguilles surtout). Ce déséquilibre a les mêmes conséquences quoique atténuées que les périodes de sécheresse sur le développement des forêts.

Comme pour les périodes de sécheresse, il nous a paru important de différencier le nombre de jours sans précipitations nécessaires pour mettre fin à une période de pluie. En effet, plus les mauvaises conditions atmosphériques (froid, manque de soleil, sol gorgé d'eau) ont duré et plus il faut de temps à la végétation pour réagir à des conditions redevenues plus favorables et cela d'autant plus que le sol doit pouvoir s'aérer (évacuation de l'eau des gros pores du sol par gravitation, c'est-à-dire par drainage naturel). Les racines de nos plantes forestières doivent pouvoir respirer afin de remplir pleinement leurs fonction d'absorption d'eau et de sels minéraux.

Pour ces raisons, nous avons établi la durée des périodes de pluie selon la définition suivante:

- Toute période de 24 heures durant laquelle on a recueilli 1,0 mm de précipitations ou davantage est déclarée "jour de pluie";
- Une période de pluie est interrompue par 1 jour "sans pluie" (moins de 1,0 mm dans le pluviomètre) durant les premiers 5 jours
- 2 jours "sans pluie" du 6e au 10e jour,
- 3 jours "sans pluie" du 11e au 15e jour,
- et ainsi de suite.

5.6.1 Durant le repos hivernal

Durant l'hiver, les périodes de précipitations de longue durée sont dues le plus souvent à des afflux prolongés d'air maritime humide, mais doux. Les températures se relèvent alors et peuvent, en plaine surtout, dépasser au moins temporairement le seuil de repos complet de la plante.

Dans ces cas-là, de longues périodes avec précipitations signifient une reprise de l'assimilation pour les conifères et un certain réveil de l'activité cambiale chez tous les arbres, même si les conditions requises pour un "début de la période de végétation" ne sont pas remplies (cf. 5.1.1).

En suivant ces raisonnements, nous tirons le critère:

- H. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage durant le repos hivernal

5.6.2 Au printemps

Au départ de la végétation, les arbres consomment de très fortes quantités d'eau. C'est à ce moment-là qu'un déséquilibre entre les facultés d'absorption de l'appareil racinaire et les besoins des parties aériennes de la plante est le plus préjudiciable à un développement harmonieux. Ce déséquilibre peut cependant découler de conditions défavorables ayant précédé le "début de la période de végétation". Ainsi, et comme nous l'avons déjà fait pour les périodes de sécheresse, le point de départ de notre critère précédera cette date.

I. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage au printemps.

La définition de la période avec précipitations ne tenant pas compte des quantités tombées, force nous est d'ajouter ici un critère secondaire. En effet, des précipitations de 1,0 mm en 24 heures se répétant 30 jours de suite n'auront pas les mêmes répercussions sur la forêt que 30 mm tombés en 1 jour. Pour se faire une idée, même approximative seulement, des quantités disponibles, nous avons établi le critère:

I.1. Répartition fréquentielle des quantités journalières de précipitations tombées au cours du printemps.

5.6.3 En été

La consommation d'eau est très variable en été et due principalement à la transpiration et la production d'hydrates de carbone qui constitueront le bois. Une période prolongée de précipitation diminue et l'un et l'autre de ces phénomènes, surtout si les quantités apportées sont relativement peu importantes. Dans ce cas, l'humidité de l'air est forte et le rayonnement réduit. Comme pour les périodes de sécheresse, on définit le critère:

J. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage durant l'été.

Durant l'été plus encore que durant le printemps, les précipitations ont souvent un caractère orageux, On a alors de fortes quantités dans un relativement court laps de temps. Dans de telles conditions météorologiques, la température est souvent élevée d'où, et malgré une forte teneur en vapeur d'eau (mais pas nécessairement une humidité relative élevée)

de l'atmosphère, une transpiration importante des plantes. En outre, la durée d'insolation des "jours avec précipitations" peut être forte, d'où une activité importante des feuilles (assimilation, production de protéines, de lipides et de vitamines).

Afin de se faire une idée approximative du rapport entre les périodes avec précipitations apportant peu d'eau d'une part, et beaucoup d'eau d'autre part, nous avons introduit le critère secondaire:

J.1. Répartition fréquentielle des quantités journalières de précipitations tombées durant l'été.

5.6.4 En automne

Le troisième tiers de la période de végétation est, du point de vue des besoins en eau, de l'assimilation et du métabolisme général de la plante, une période de consolidation et d'attente. C'est le moment de l'aoulement, de l'entrée en repos. Des précipitations prolongées s'accompagnent alors très souvent de températures basses qui sont favorables à un déroulement de ces phénomènes.

K. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage durant l'automne.

5.7 Fortes chaleurs

Durant les deux premiers tiers de la période de végétation bien plus que durant le troisième, des températures élevées perturbent l'équilibre métabolique des plantes. En effet, l'activité cellulaire en est activée sans que l'énergie disponible à l'assimilation soit adaptée en conséquence (la durée d'insolation maximum possible ne dépend pas de la température de l'air, mais uniquement de l'horizon du lieu et de la hauteur du soleil). En outre, de fortes températures impliquent très souvent une transpiration abondante. Si les apports d'eau ne sont pas suffisants (manque de réserve dans le sol par exemple), les plantes ferment leurs stomates, d'où diminution notable de l'assimilation.

Si les conditions d'approvisionnement en eau des parties aériennes des plantes et l'énergie reçue sont optimales, on assiste, par hautes températures, à une saturation des feuilles en sucre, car le transport est limité. Ainsi de hautes températures ne sont en général pas aussi favorables au développement des plantes qu'on le pense d'ordinaire.

5.7.1 Au printemps

Bien que les effets soient identiques au début et au milieu de la période de végétation, nous avons tenu à garder une certaine différenciation saisonnière.

- L. Répartition fréquentielle des températures de 13h30 depuis 20°C de degré en degré au printemps.

5.7.2 En été

- M. Répartition fréquentielle des températures de 13h30 depuis 20°C de degré en degré durant l'été.

5.8 Le vent

Nous ne nous attarderons pas ici à la description des dégâts visibles provoqués à la forêt par le vent (déracinement, bris), mais à ceux que subissent les fibres du bois sous l'effet des tractions et compressions dues au balancement du houppier sous les rafales. Il s'agit ici de dégâts cachés et momentanés.

Selon l'intensité des rafales de vent, les arbres se courbent plus ou moins selon la hauteur et le diamètre du tronc voire de la disposition des branches. De ce fait, les fibres extérieures à l'arc que forme alors le tronc sont sollicitées en traction alors que celles situées à l'intérieur le sont en pression. Dès que la pression mécanique cesse sur le houppier, l'arbre se redresse, voire se courbe en sens inverse sous l'effet de l'inertie acquise par le premier mouvement.

Ces tensions successives déplacent les fibres de l'aubier les unes par rapport aux autres si bien que le courant d'eau y est perturbé, voire même interrompu dans certains cas. Il s'ensuit une perturbation dans l'approvisionnement général de la couronne, d'où rupture de l'équilibre métabolique vital.

Les arbres réagissent très rapidement à cet état de fait et colmatent en quelques jours les lésions ainsi occasionnées. Ces dégâts n'ont donc qu'une portée temporaire.

Nous aurions désiré introduire dans notre étude un critère reflétant ces phénomènes qui, s'ils se répètent durant une période de végétation, laissent des traces non négligeables dans le développement des arbres.

Malheureusement, nous ne disposons que de trois données de vent par jour sur banque de données pour la période de référence. Les rafales de vent étant un phénomène aléatoire durant la journée, les valeurs disponibles ne sont nullement représentatives.

C'est la raison pour laquelle nous avons renoncé à introduire ici un critère basé sur le vent.

6. Valeurs quantitatives

On a pu s'étonner en lisant ce qui précède que nulle part on ne trouve d'indications se référant aux trois sites du programme de mesures intensives ou aux stations climatologiques de référence. Cette lacune serait en contradiction avec le but de notre étude. Pourtant, nous avons voulu montrer par là que la démarche entreprise n'était nullement liée au programme PNR14+ mais pouvait très bien s'appliquer à d'autres lieux. La seule restriction est que notre démarche est subordonnée au développement des forêts ou mieux de certaines essences forestières. Elle peut cependant s'appliquer sans autres à d'autres essences forestières ou à des cultures pérennes (arboriculture ou viticulture par exemple). Elle n'est par contre pas applicable à toutes les autres activités humaines (bâtiment par exemple).

Une fois les critères établis, nous avons cherché pour chaque groupe une représentation simple, accessible à chacun. On aurait pu utiliser la forme tabulaire dans ce but. Pourtant, la consultation de tables est une tâche rébarbative. En outre, il fallait trouver un moyen simple de comparer, pour chaque critère, les années 1986, 1987 et 1988 avec les faits correspondants de la période de référence 1931-1970. Des tables sont peu explicites dans ce cas. C'est la raison pour laquelle, nous avons retenu la forme graphique.

Comme nous l'avons signalé plus haut, nous considérons qu'une année est parfaitement représentative si le critère en question se maintient dans la zone des 80% (amplitude utile) médians des cas enregistrés durant la période de référence ou au-dessus. Cette dernière restriction est à considérer conjointement aux influences du critère sur la forêt. Ainsi, une période de repos hivernal très douce (située tout à droite du diagramme) ne sera pas considérée comme exceptionnelle dans le sens du critère A: froid de l'hiver.

Une courbe annuelle située entre le premier décile et le premier quartile sera à retenir, mais ne déclassera pas nécessairement l'année. Celle-ci ne sera déclarée exceptionnelle, c'est-à-dire que les résultats obtenus par l'étude principale devront être expliqués spécialement, que si sa courbe est comprise entre le premier décile (bas ou haut suivant le critère) et la valeur extrême, voire dépasse celle-ci.

6.1 Présentation des diagrammes

6.1.1 Histogrammes modifiés

Pour tous les critères basés sur des classes de valeurs, qu'il s'agisse de températures ou de nombres de jours, l'histogramme est certainement le mode de représentation le plus explicite. Pourtant, comme nous exprimons chaque classe par ordre de fréquence, la représentation usuelle des histogrammes en barre semblait peu indiquée, surtout pour l'usage subséquent qu'on voulait en faire.

C'est la raison pour laquelle, nous lui avons préféré une représentation en continu, c'est-à-dire la liaison des sommets des barres correspondantes en supprimant celles-ci.

Pour expliquer les courbes ainsi obtenues, les plages correspondant à l'amplitude normale d'une part et aux intervalles compris entre le premier décile et le premier quartile, respectivement le troisième quartile et le neuvième décile d'autre part ont été ombrées (fig. 1).

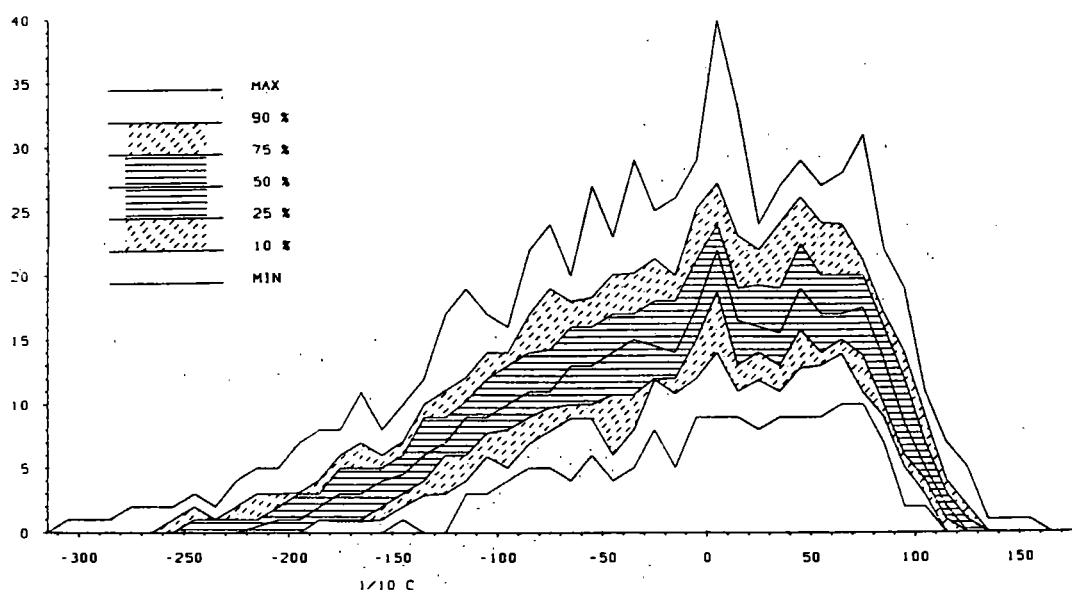


Fig. 1 Répartition fréquentielle des températures minimum de Davos 1931 à 1970.

Il sera alors facile d'y placer les valeurs d'une année à caractériser et d'en tirer la conclusion qui s'impose (cf. 6.2.1 ci-dessous).

6.1.2 Diagrammes ponctuels

Dans le cas de critères présentant un nombre restreint de cas (critères B et B.1), il n'était pas possible d'établir une répartition fréquentielle dans le sens usuel du terme.

Des chutes brusques de température jouant un rôle éminent devaient cependant figurer ici. Afin de permettre une comparaison objective, nous avons simplement fait figurer ces cas dans une notation séquentielle où ils apparaissent en ordre chronologique (fig. 2).

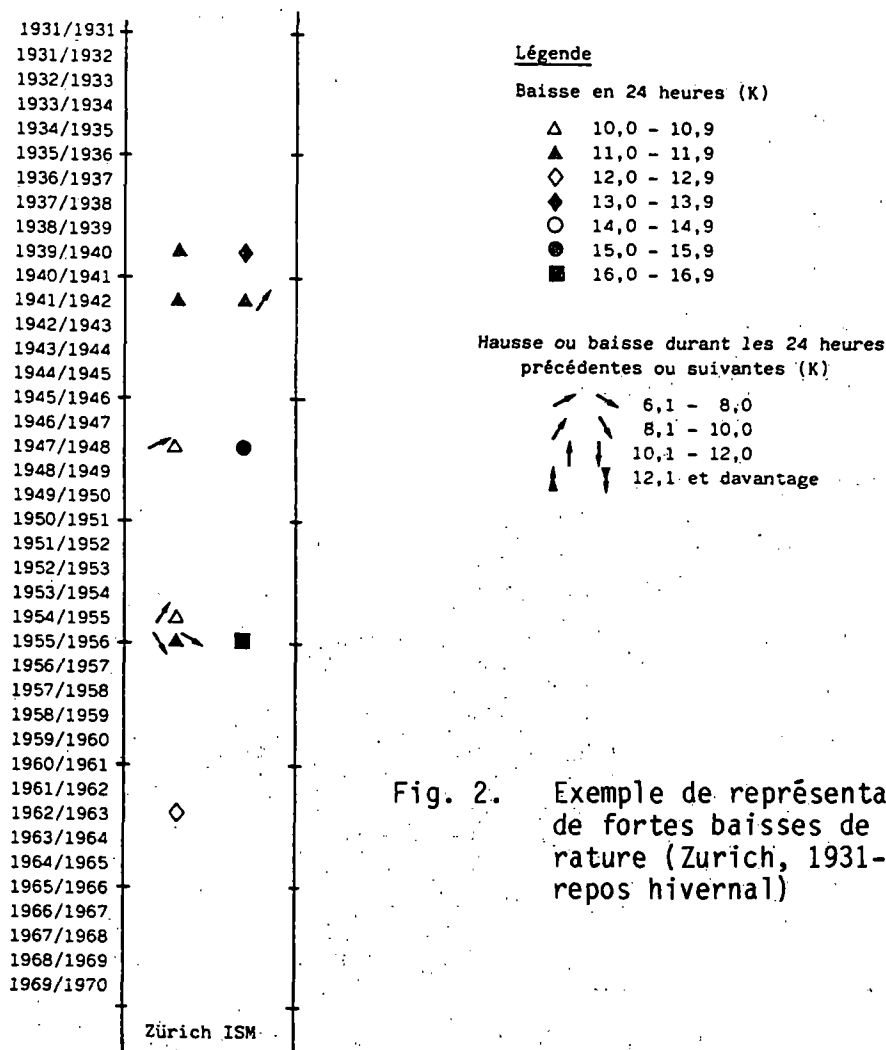


Fig. 2. Exemple de représentation de fortes baisses de température (Zurich, 1931-1970, repos hivernal)

6.1.3 Diagrammes en barres

Dans le cas de représentations fréquentielles simples (critère C), les diagrammes en barres tels qu'ils sont décrits d'autre part (cf. Primault 1978) sont directement utilisables pour la détermination des valeurs critiques (fig. 3).

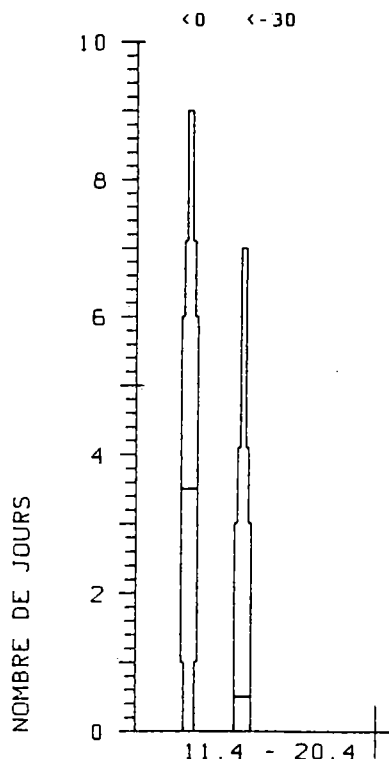


Fig. 3. Répartition fréquentielle des températures de 7h30 à Davos du 11 au 20 avril (1931-1970)
A gauche au-dessous de 0°C
A droite au-dessous de -3,0°C.

6.2 Utilisation

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, les diagrammes qui ont été préparés doivent permettre d'établir rapidement si le critère est réalisé ou non, si possible en utilisant directement l'ordinateur et la banque de données de l'ISM.

Pour expliciter notre pensée, nous donnons ci-dessous et pour chaque sorte de diagramme un exemple pratique de comparaison qui ne soit compris ni dans la période de référence ni dans la période de mesures intensives, c'est-à-dire entre 1971 et 1985.

6.2.1 Histogrammes modifiés

Le critère M caractérise le chaud de l'été. Un été doit être considéré comme exceptionnel si le nombre de jours où les températures de 13h30 dépassent, dans les classes les plus élevées, la limite du premier déci-

Nous avons retenu ici les années 1980 et 1983 (fig. 4).

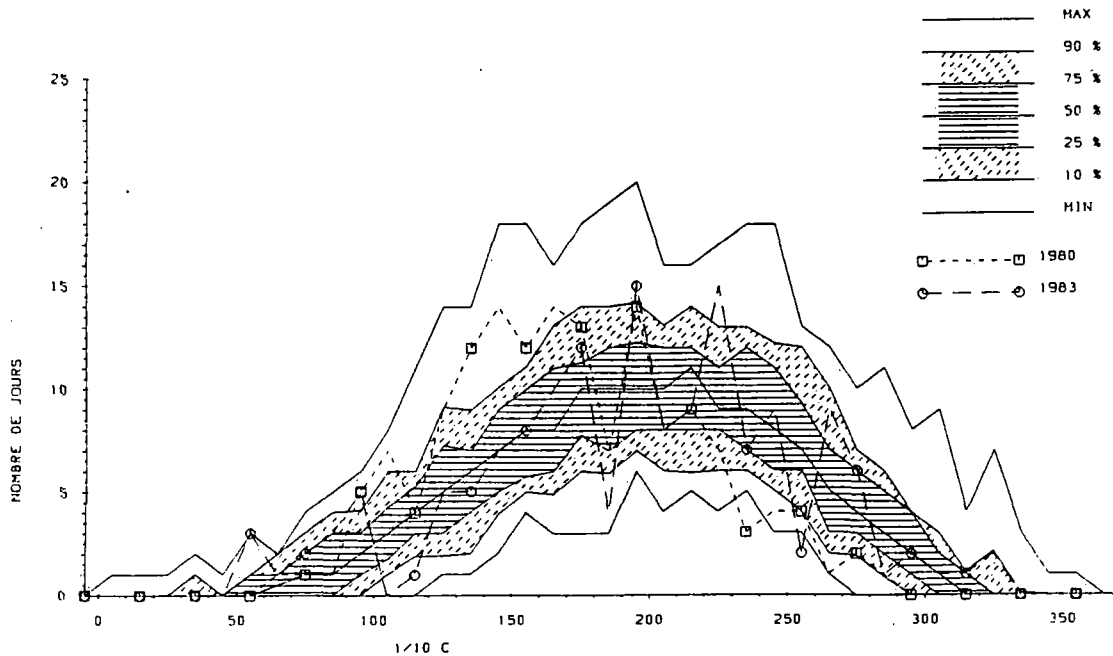


Fig. 4. Répartition fréquentielle des températures de 13h30 de Zurich, du 1 mai au 30 septembre des années 1931 à 1970. Courbes correspondantes de 1980 et 1983

Sur cette figure, seuls les nombres de jours où l'on a enregistré 23°C et 35° dépassent, en 1983, la limite des 90%. Ceux de 32 , 33 et 34° s'y retrouvent exactement. Selon le critère des jours de forte chaleur, l'année 1983 devrait être examinée spécialement. 1980 par contre ne présente pas de particularités sous cet aspect en raison du fait que sa courbe est située au-dessous de la médiane pour toutes les températures supérieures à 21° et bien que la fréquence des températures basses soit particulièrement élevée. Le critère M se rapporte en effet aux jours chauds et non aux jours froids.

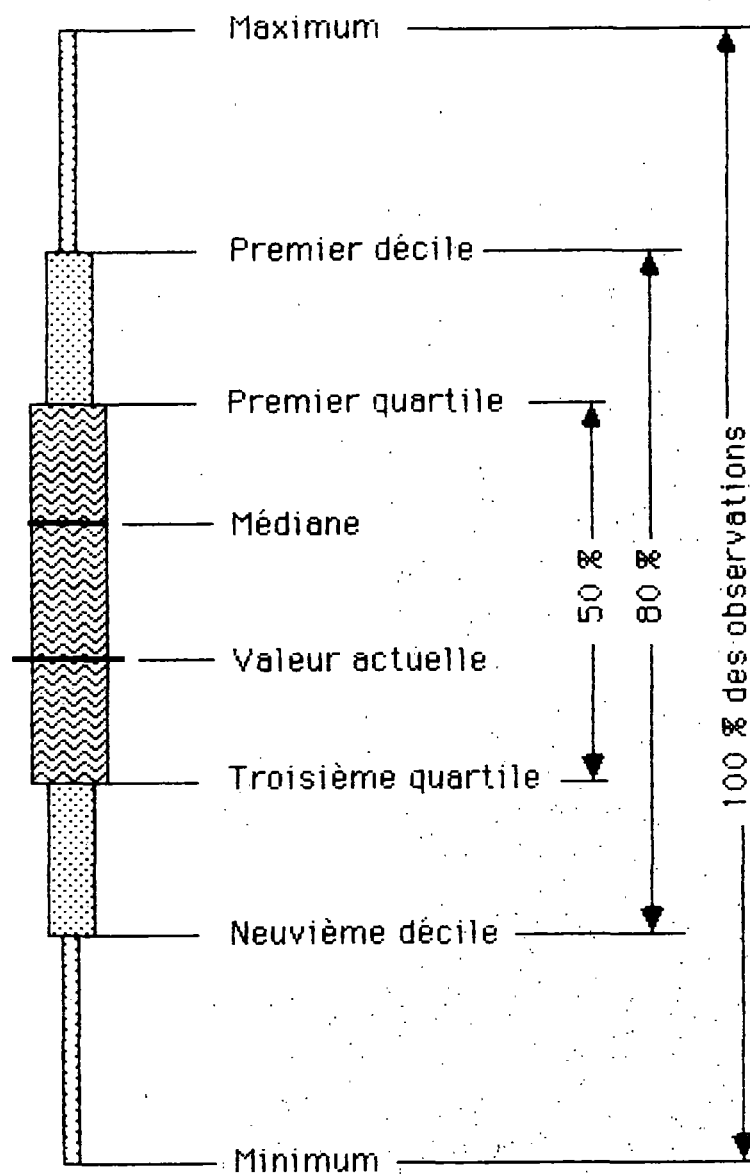
6.2.2 Diagrammes ponctuels

Dans ce cas, la détermination d'une valeur numérique objective est plus délicate. En effet, ces diagrammes n'indiquent que le nombre de cas par années où les baisses de températures sont comprises dans des classes déterminées. Si, une certaine année, le nombre de chutes et leur valeur respective sont particulièrement élevés, il n'y aura pas d'hésitation

possible. Par contre, dans le cas où de telles conditions se sont déjà présentées, seule une réflexion basée sur des considérations phytophysiologiques pourra apporter la réponse voulue.

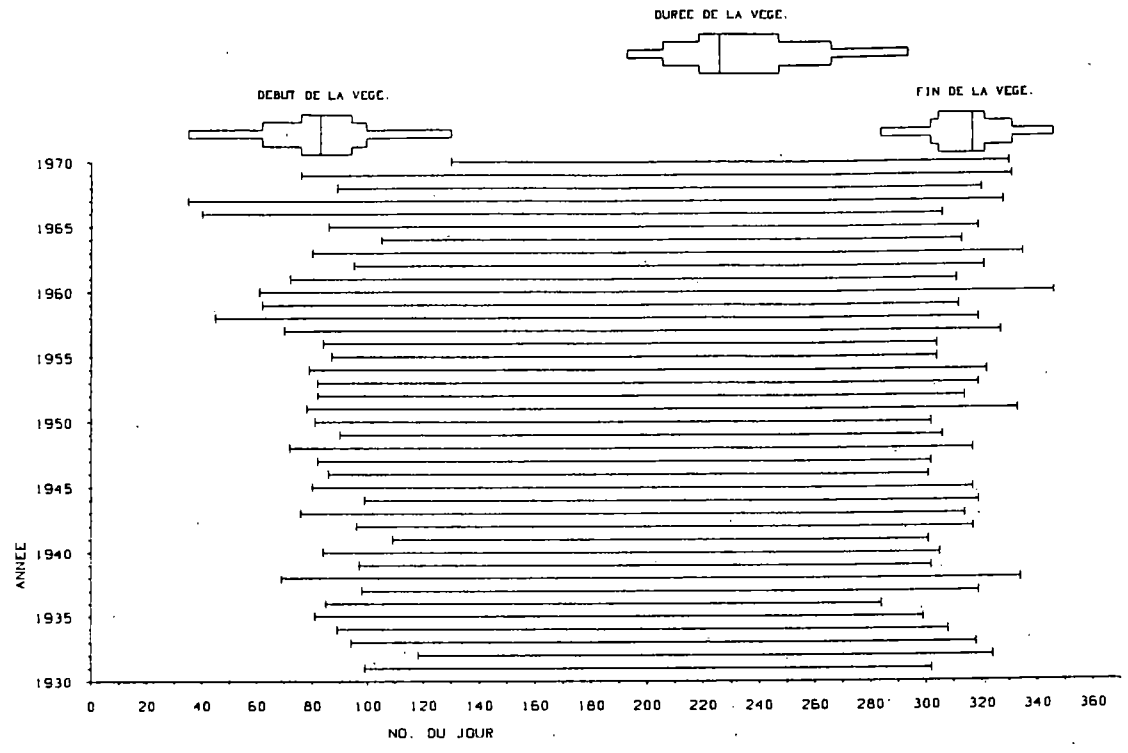
6.2.3 Diagrammes en barres

Comme pour les histogrammes modifiés, la détermination des extrêmes est ici très simple. Il suffit de placer les valeurs annuelles en regard des divers intervalles pour obtenir l'information requise.

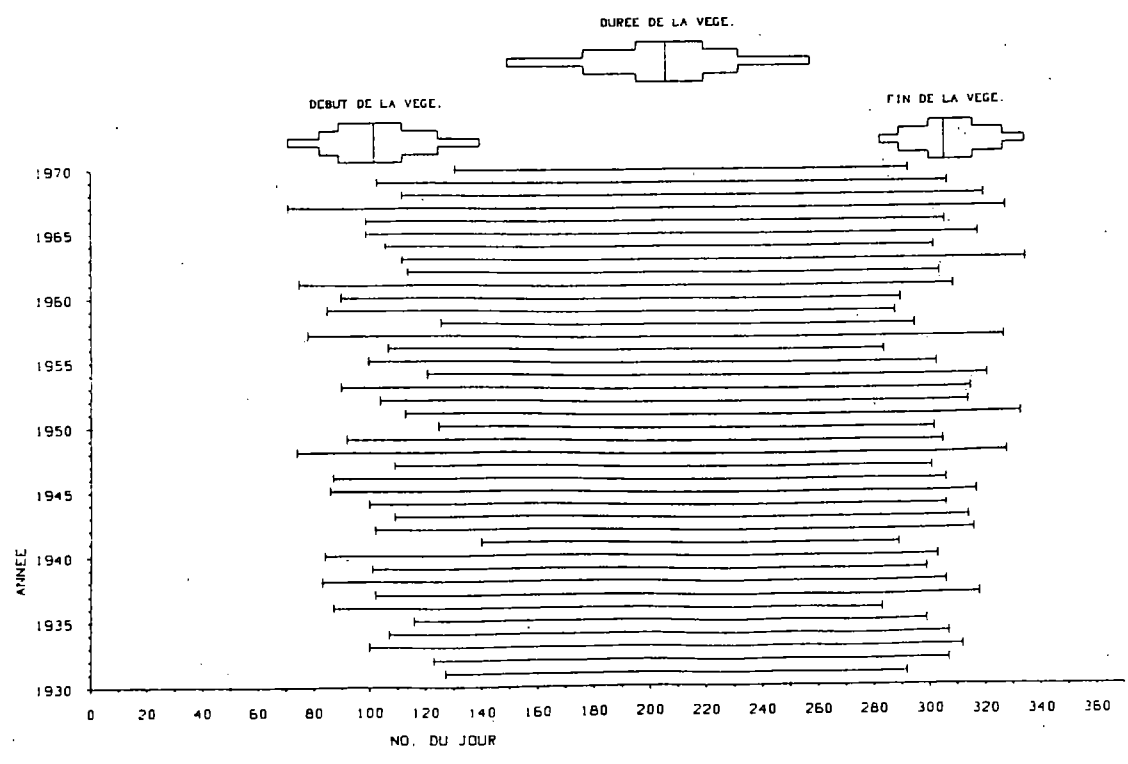


6.3 Valeurs numériques des trois stations de références correspondant aux critères énoncés plus haut

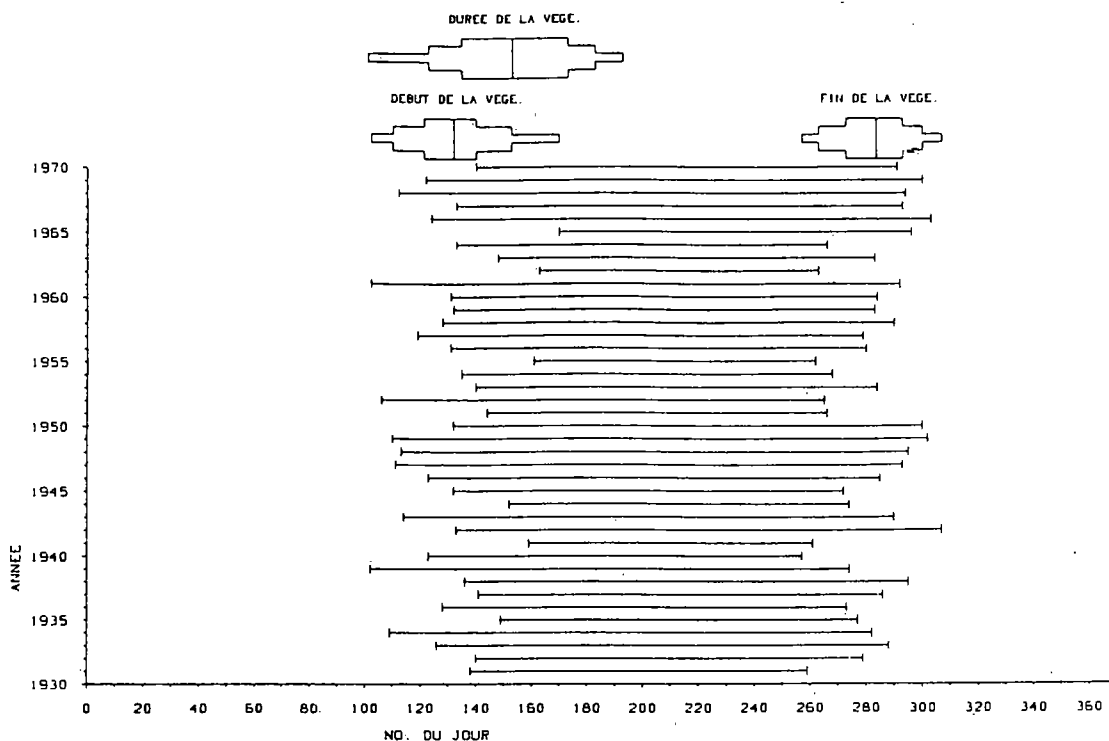
PERIODE DE VEGETATION ZUERICH (ISM)



PERIODE DE VEGETATION EINSIEDELN

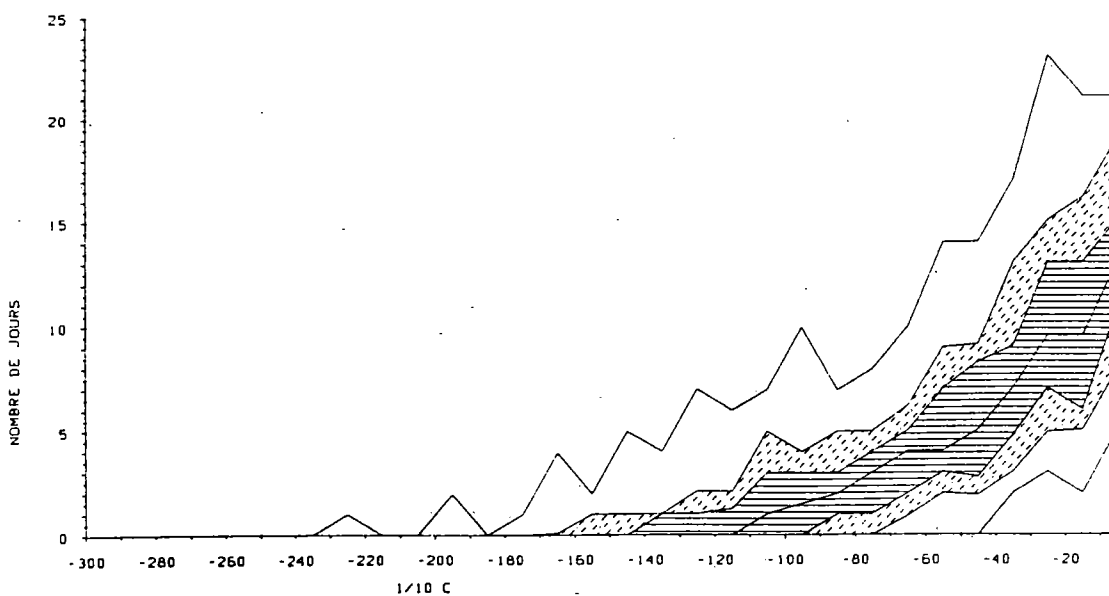


PERIODE DE VEGETATION DAVOS

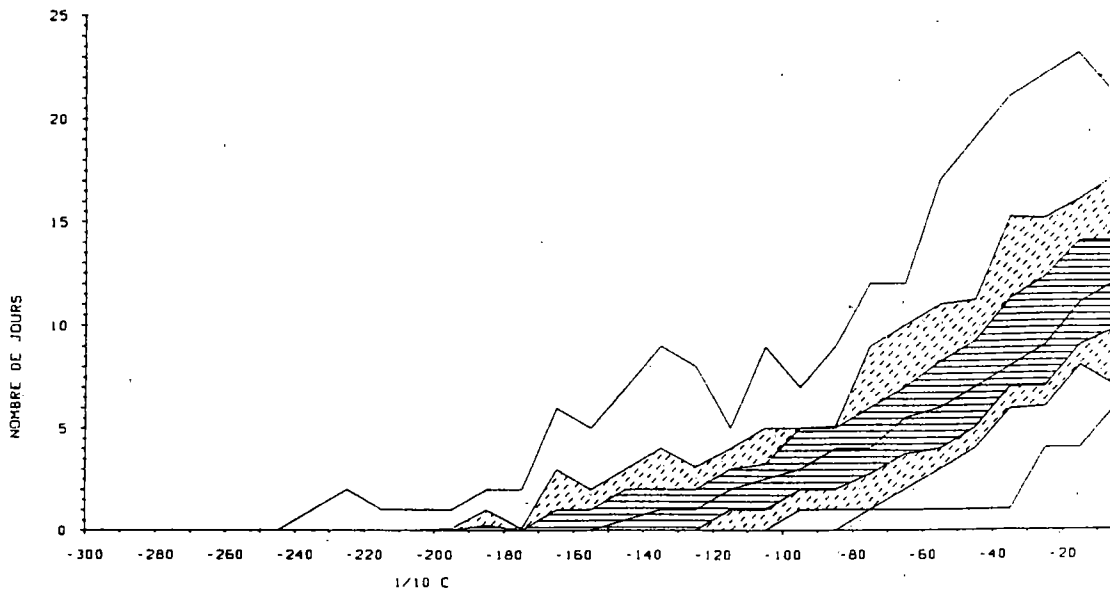


A. Répartition fréquentielle du nombre de jours au cours desquels le relevé du matin se situe dans des classes de degré en degré au-dessous de 0°C. La période considérée est celle du repos hivernal.

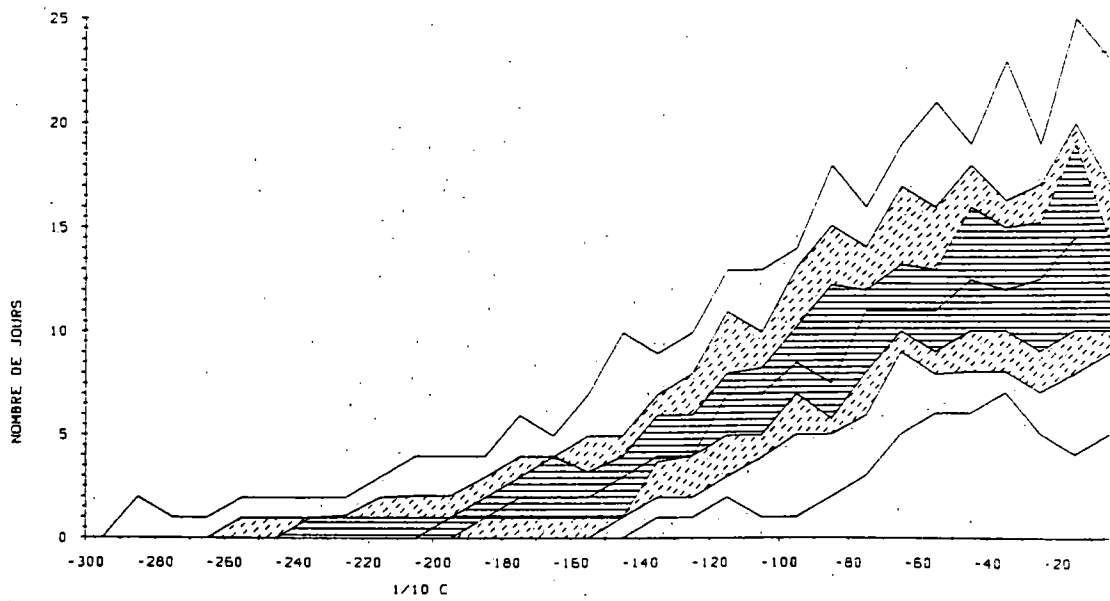
ZUERICH (ISM)



EINSIEDELN

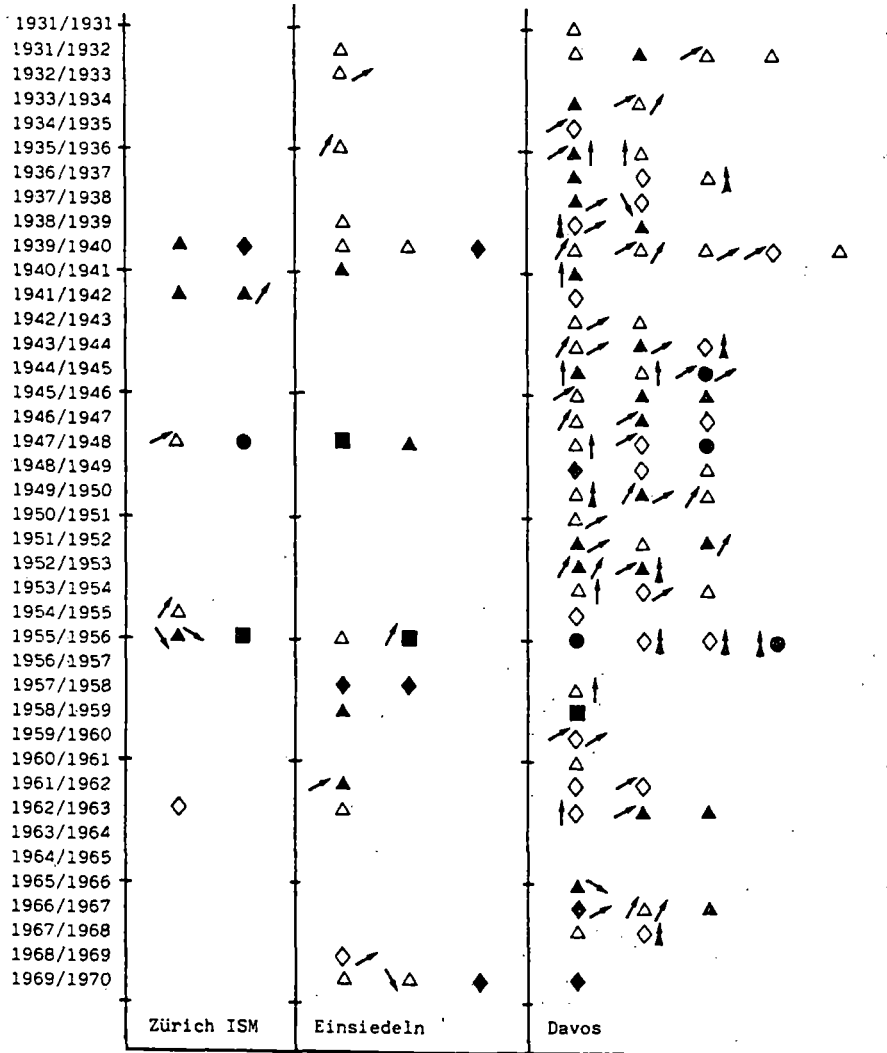


DAVOS



B. Abaissement de la température du matin de plus de 10 K d'un jour au suivant durant la période de repos hivernal.

B.1 Hausse de plus de 6 K au cours des 24 heures précédentes et/ou suivantes.



Légende

Baisse en 24 heures (K)

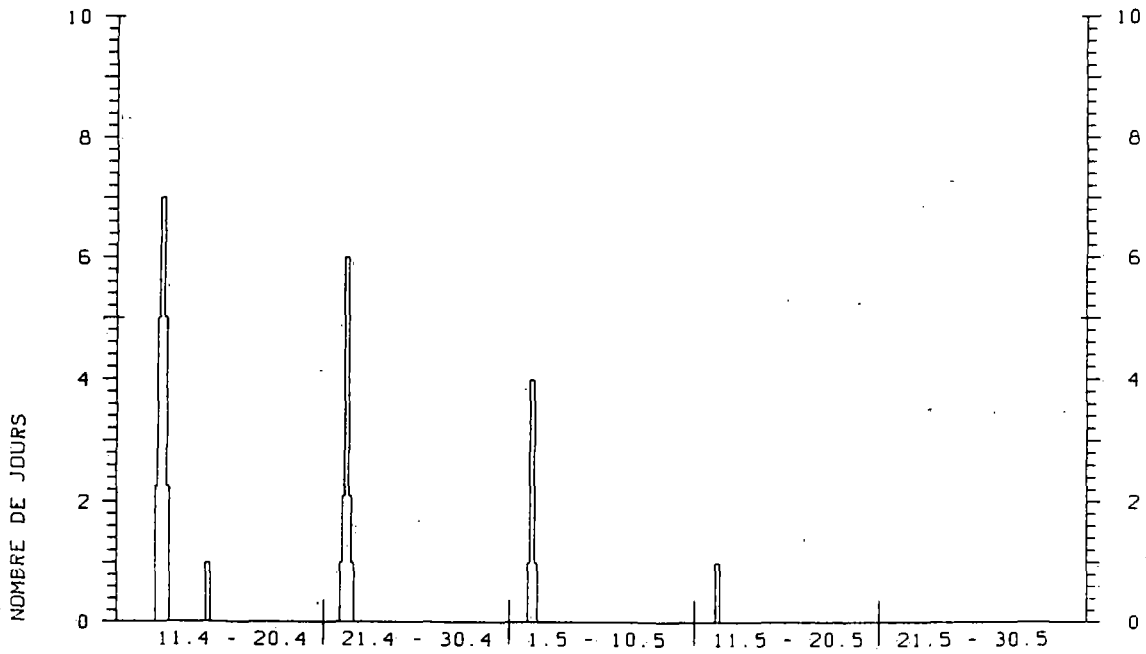
- △ 10,0 - 10,9
- ▲ 11,0 - 11,9
- ◇ 12,0 - 12,9
- ◆ 13,0 - 13,9
- 14,0 - 14,9
- 15,0 - 15,9
- 16,0 - 16,9

Hausse ou baisse durant les 24 heures précédentes ou suivantes (K)

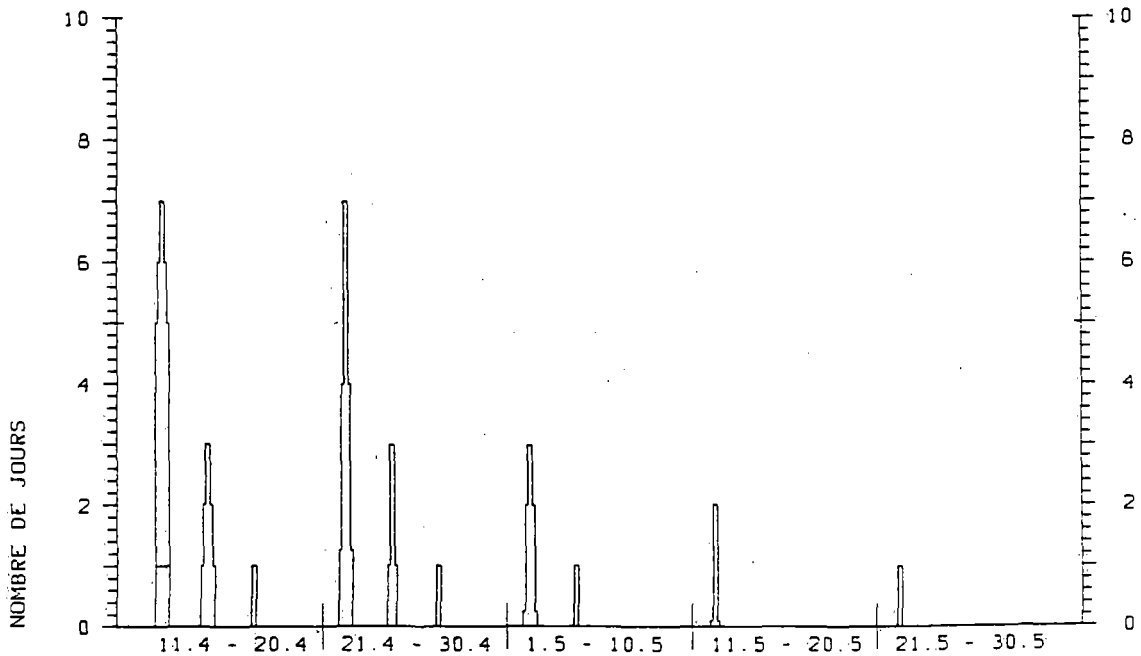
- △↗ 6,1 - 8,0
- ◇↗ 8,1 - 10,0
- △↗ 10,1 - 12,0
- ▲↗ 12,1 et davantage

C. Fréquence du nombre de jours où la température minimum (mesurée sous abri) est inférieure à 0, -3, -6 et -10° entre le 11 avril et le 30 mai, par périodes de 10 jours.

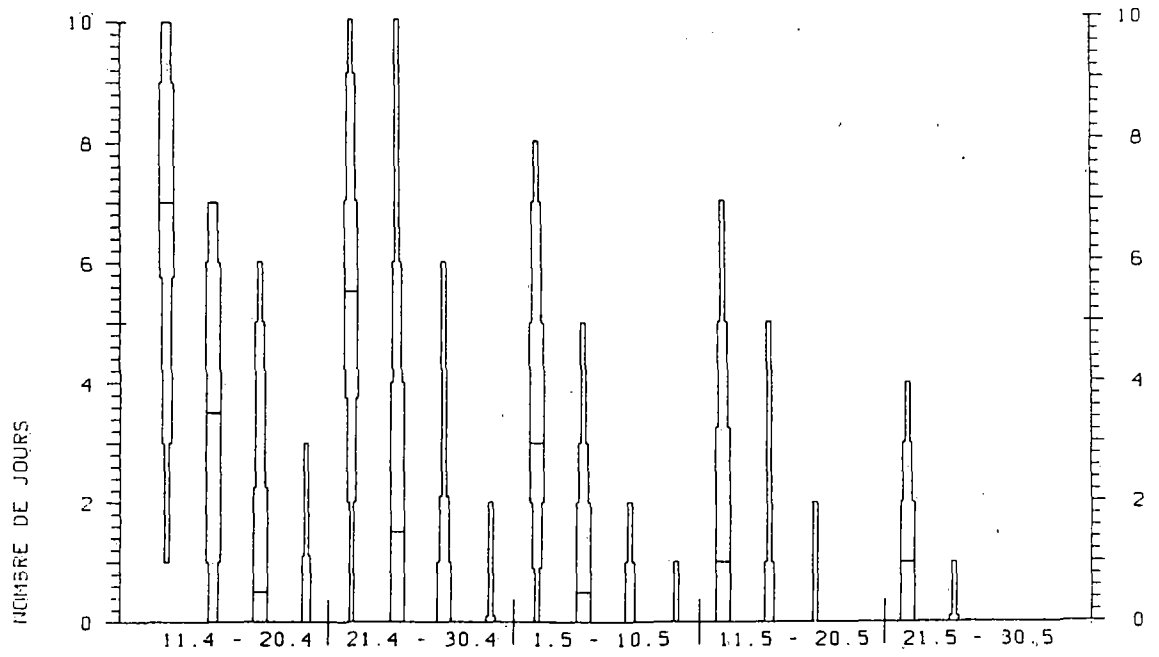
ZUERICH (ISM)



EINSIEDELN

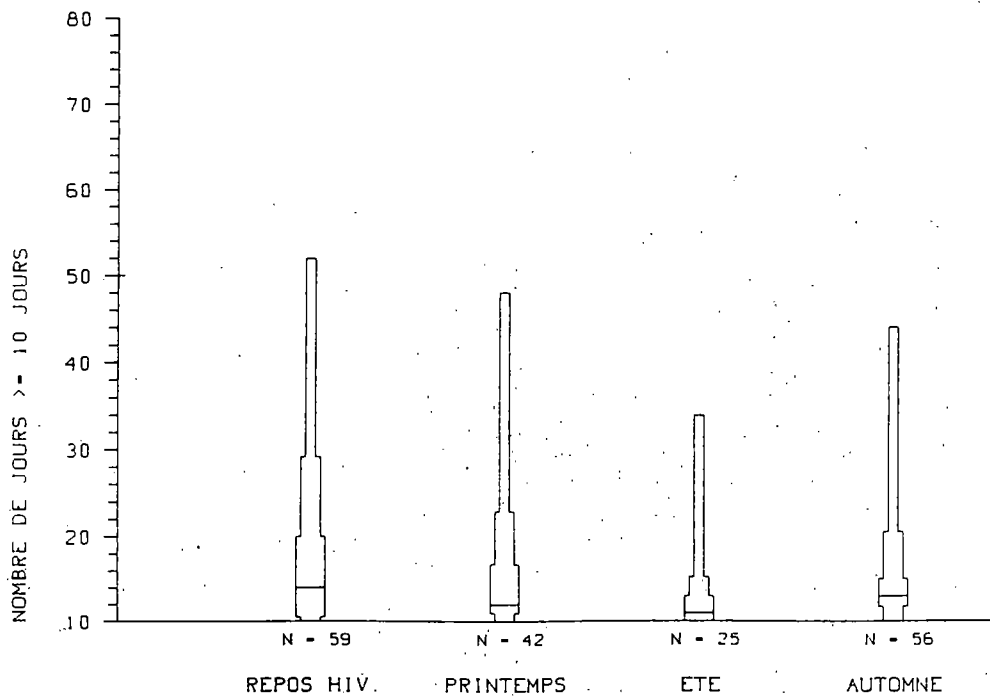


DAVOS

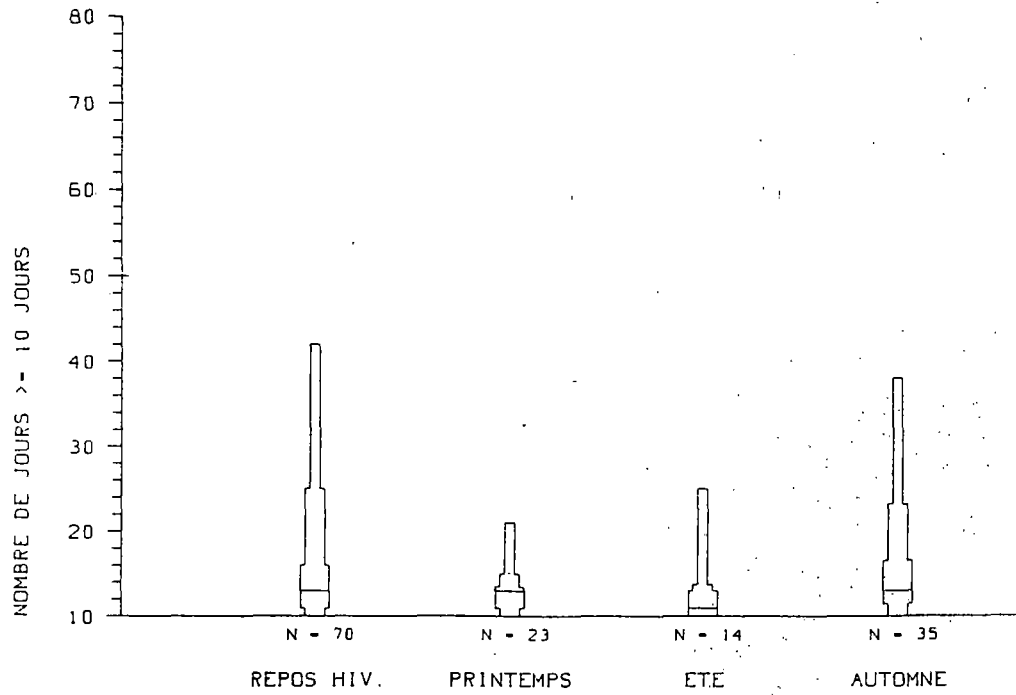


- D. Répartition fréquentielle de la durée des périodes de sécheresse de 10 jours et davantage durant le repos hivernal.
- E. Répartitions fréquentielles de la durée des périodes de sécheresse de 10 jours et davantage au cours du printemps.
- F. Répartition fréquentielle de la durée des périodes de sécheresse excédant 10 jours durant l'été.
- G. Répartition fréquentielle de la durée des périodes de sécheresse de 10 jours et davantage durant l'automne.

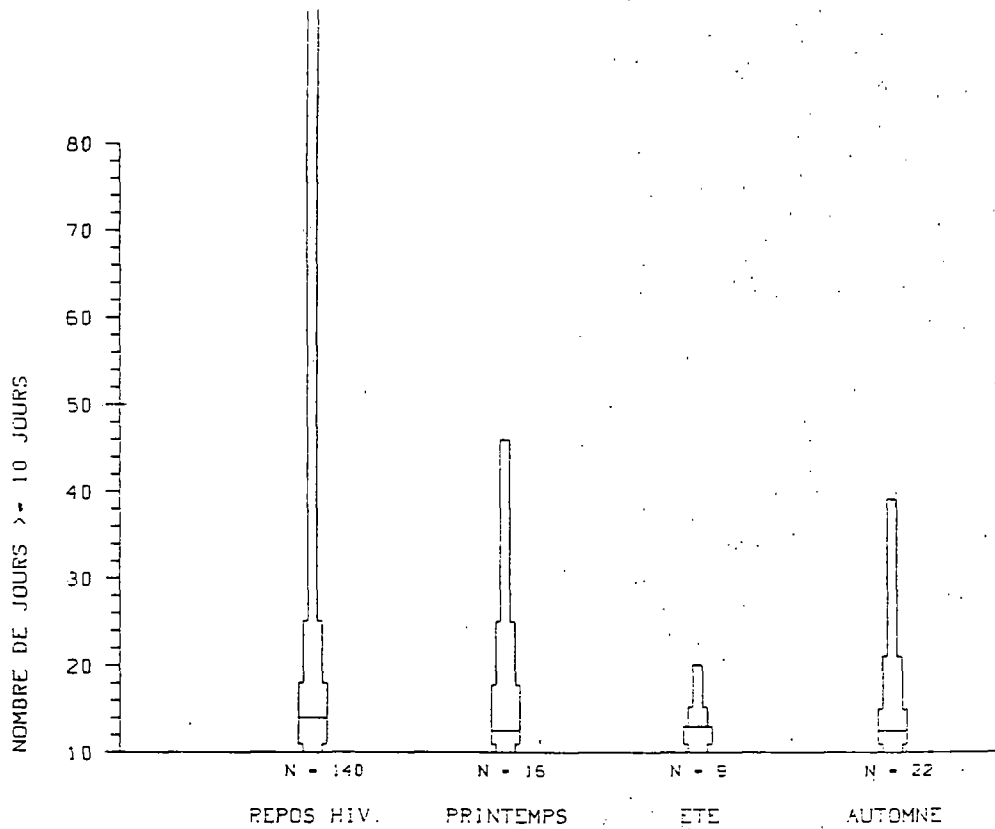
ZUERICH (ISM)



EINSIEDELN

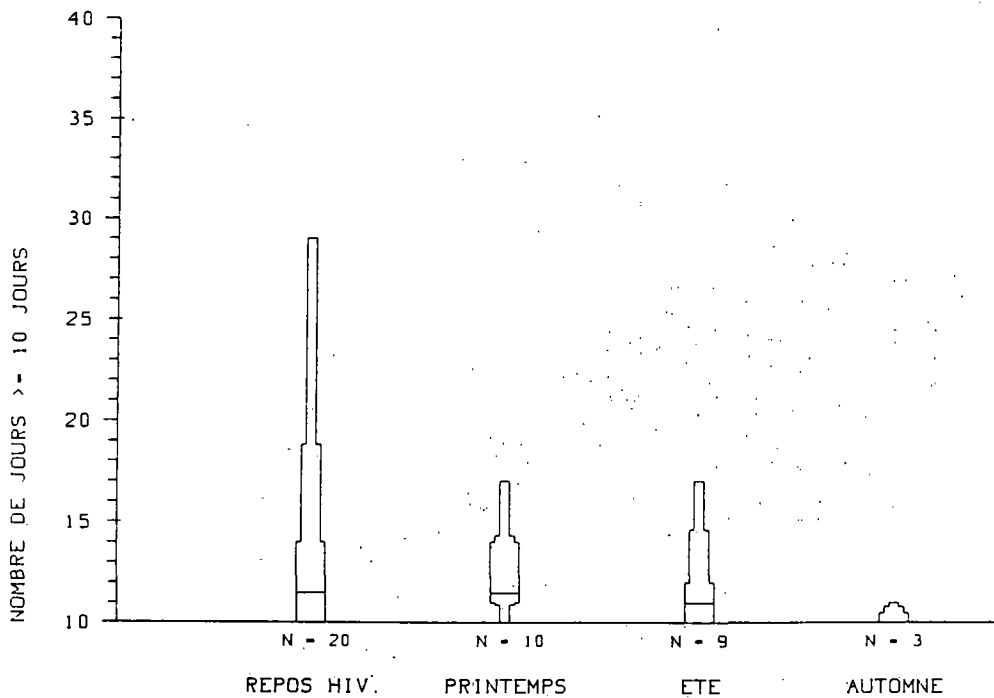


DAVOS

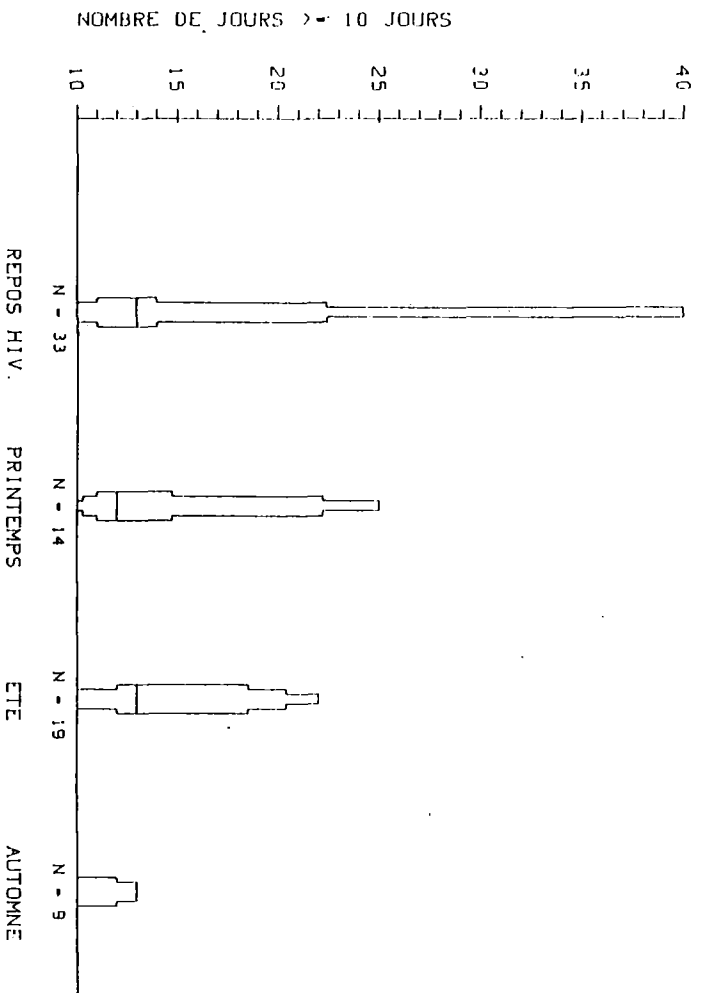


- H. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage durant le repos hivernal.
- I. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage au printemps.
- J. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage l'été.
- K. Répartition fréquentielle de la durée des périodes avec précipitations de 10 jours et davantage durant l'automne.

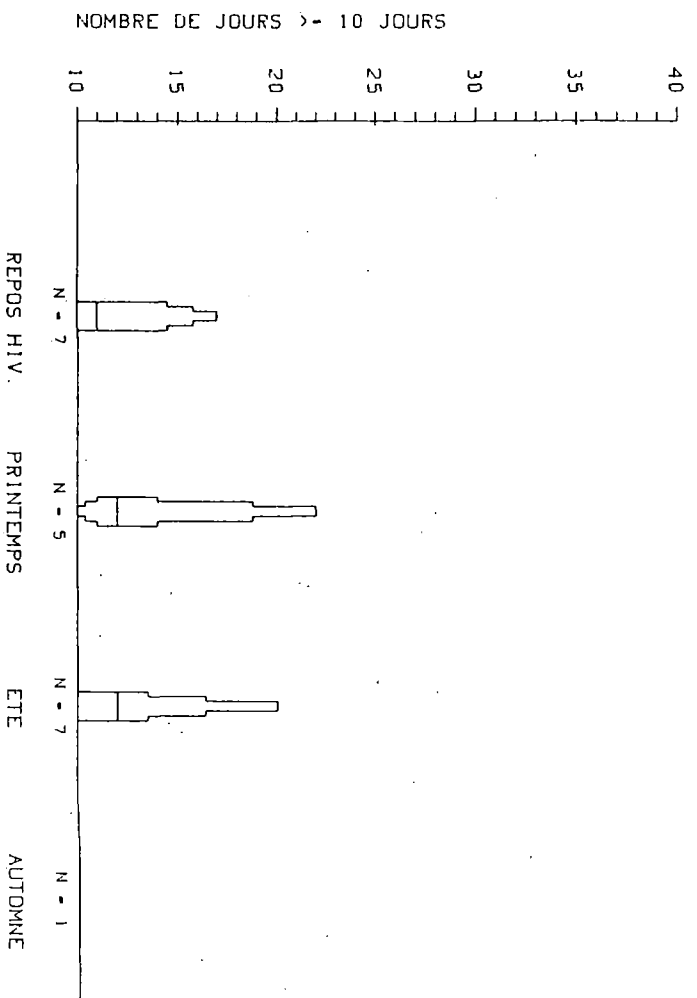
ZUERICH



EINSEDELN



DAVOS

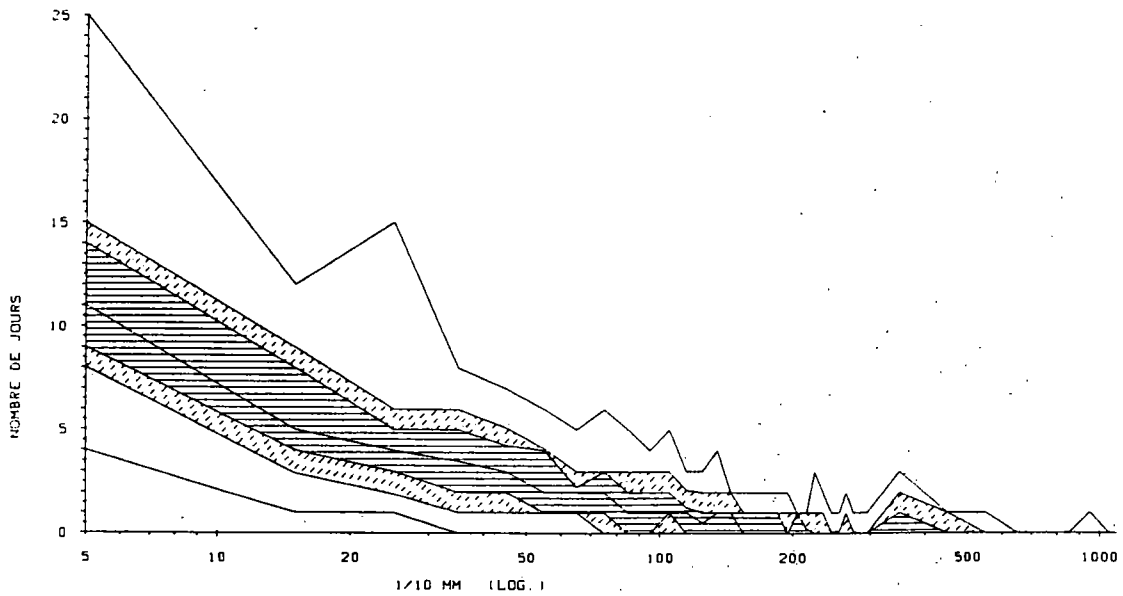


I.1 Répartition fréquentielle des quantités journalières de précipitations tombées au cours du printemps.

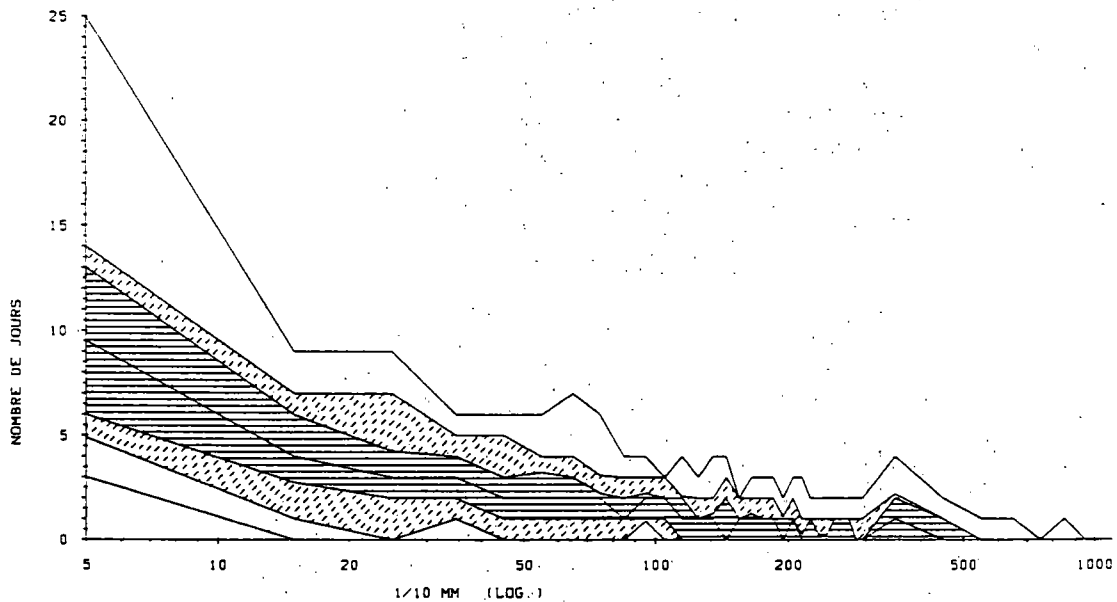
Remarque:

Pour que le diagramme garde toute sa clarté, nous avons adopté une échelle logarithmique pour les quantités relevées au pluviomètre. Les classes furent définies comme suit: de mm en mm jusqu'à 30 mm et de 10 en 10 mm au-dessus. Le pointage a lieu chaque fois au centre de la classe considérée.

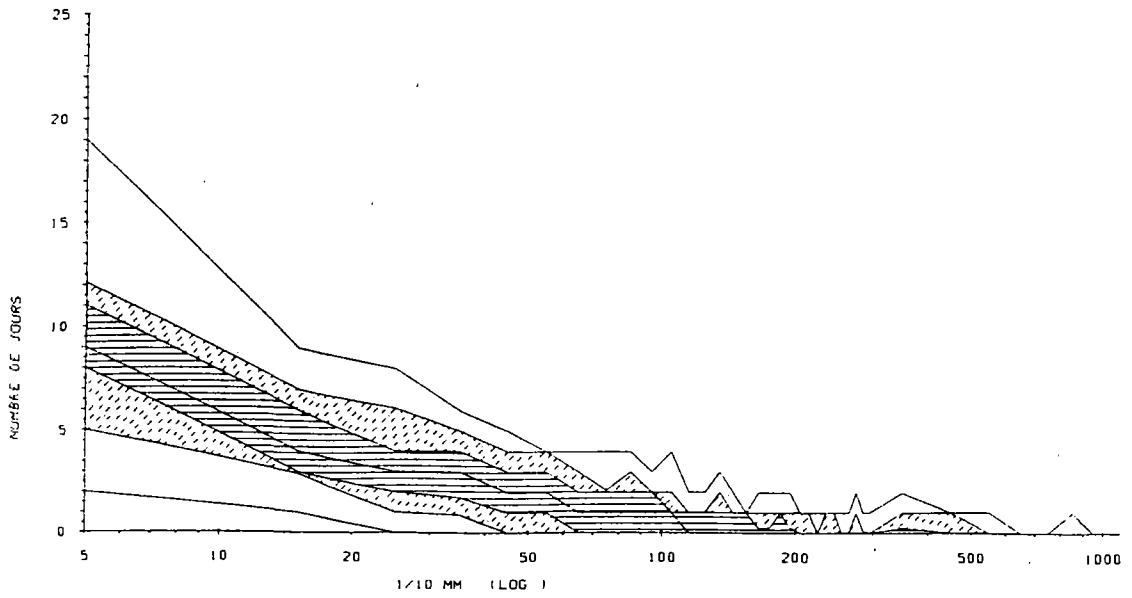
ZUERICH (ISM)



EINSIEDELN

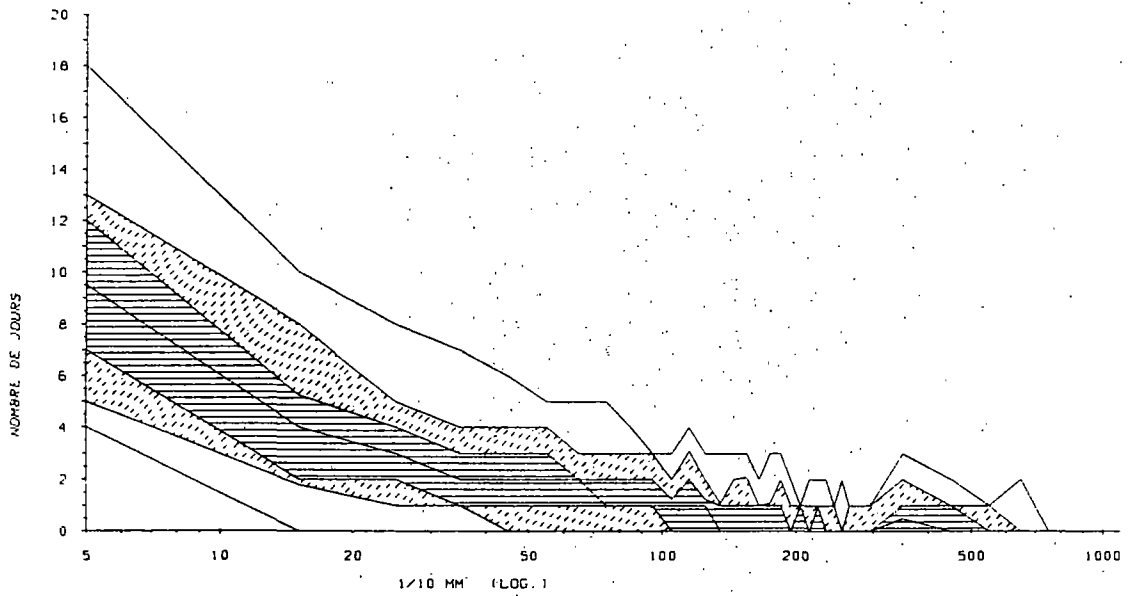


DAVOS

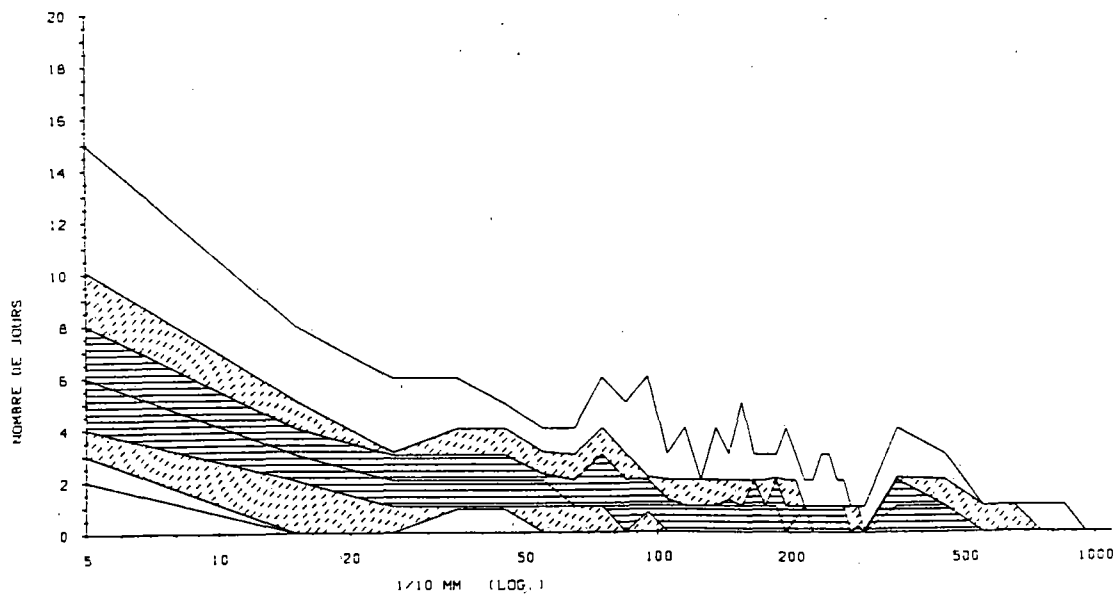


J.1 Répartition fréquentielle des quantités journalières de précipitations tombées durant l'été.
Même remarque que pour I.1

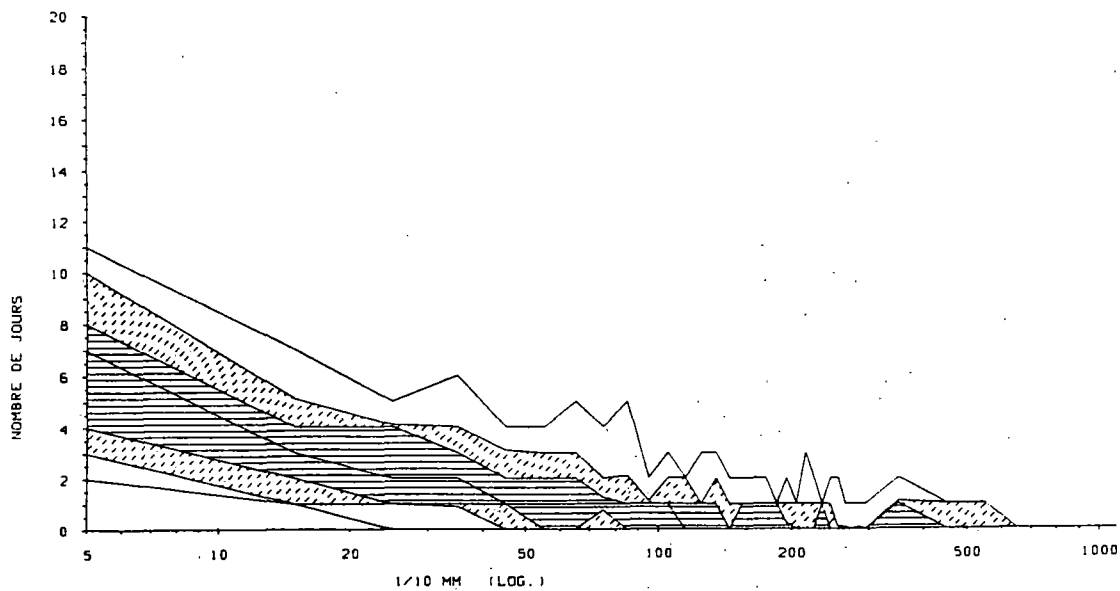
ZUERICH (ISM)



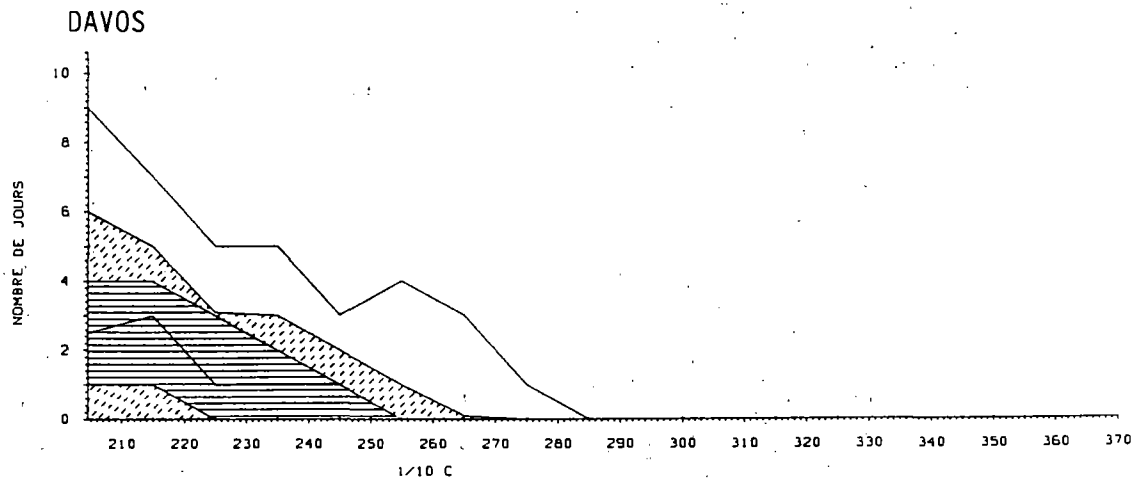
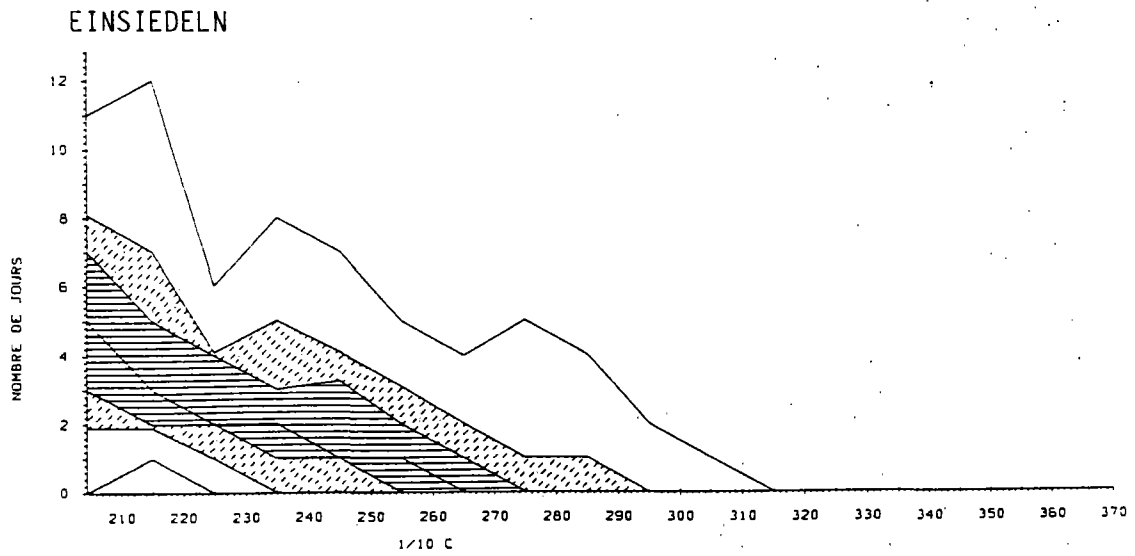
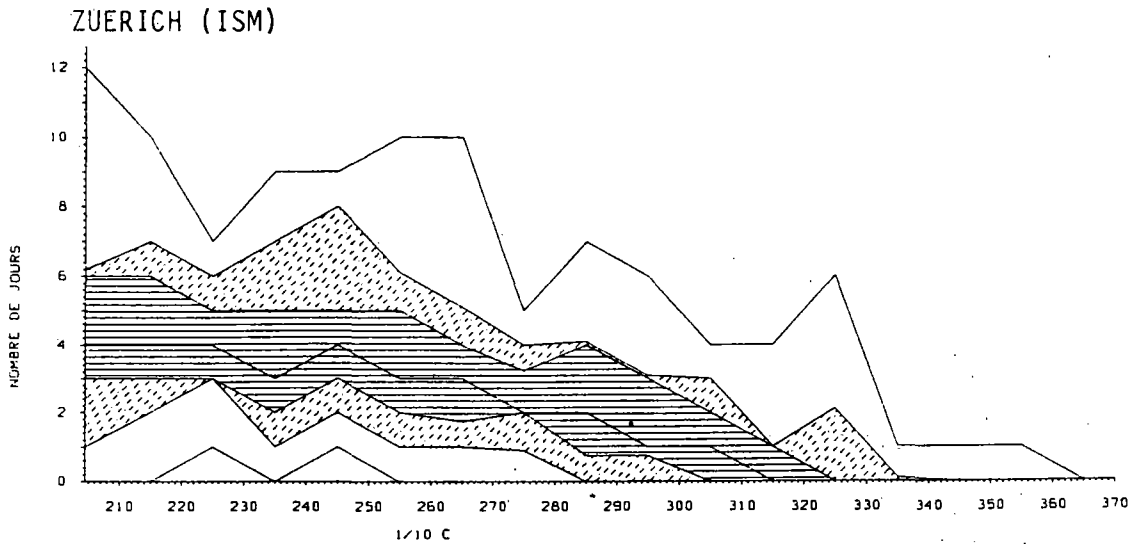
EINSIEDELN



DAVOS



M. Répartition fréquentielle des températures de 13h30 depuis 20°C de degré en degré durant l'été.



7. Conclusions

La démarche qui précède démontre que, par un certain nombre de critères, il est possible de caractériser l'influence possible des conditions météorologiques d'une année déterminée sur le développement d'essences forestières.

Certes, les critères retenus sont nombreux, trop nombreux à notre gré, car ils risquent de ce fait de déclasser les résultats de l'étude principale. Leur nombre révèle cependant une des caractéristiques des influences météorologiques sur la végétation: sa complexité.

Malgré ce défaut, la présente étude nous semble utilisable et nous considérons que nous avons rempli la mission qui nous avait été confiée. Il sera ainsi possible de caractériser les années de l'étude principale.

Tout au long de notre travail, de nombreuses constatations sont apparues et nous avons la ferme intention de poursuivre cette étude par d'autres, elles fragmentaires, qui éclaireront certainement d'un jour particulier le climat de notre pays.

En effet, les programmes élaborés au cours de ces deux ans sont tous suffisamment souples pour être applicables à d'autres stations d'observations, à d'autres limites numériques, voire à d'autres paramètres météorologiques. Ainsi, la définition des périodes sèches peut s'adapter à l'idée de Uttinger ou utiliser une autre fonction temporelle de l'augmentation de la quantité de précipitations nécessaires à leur interruption.

Notre étude était restreinte à la forêt. Pourtant, les critères qui en découlent s'appliquent tous aux cultures pérennes à condition d'en adapter les limites aux besoins et résistances naturelles spécifiques des plantes et surtout des variétés considérées. Une partie d'entre eux, nous pensons ici surtout aux périodes de sec et avec précipitations sont, en été, déterminants aussi pour les cultures annuelles.

En biométéorologie humaine et plus spécialement dans la classification des stations de cure climatique (dans cette optique, nous éliminons ici le facteur "pollution" - bruit, adjuvants chimiques à l'air tant solides que gazeux) des critères semblables doivent être définis. Sitôt ce travail terminé, bon nombre des programmes informatiques réalisés ici

pourront être appliqués à l'ensemble des stations dont les relevés sont consignés dans notre banque de données. On aura alors les bases indispensables à l'élaboration de cartes retraçant pour chaque saison de l'année les endroits les plus favorables ou à éviter pour la réhabilitation, voire la prévention d'affections graves.

L'application possible de nos conclusions ne se restreint cependant pas à la biométéorologie. Certains de nos diagrammes (températures très basses, chutes de température suivies et/ou précédées par des hausses) peuvent être des auxiliaires précieux pour les calculs de base de l'isolation des immeubles.

L'avenir montrera si, grâce à ce travail, la recherche climatologique a progressé quelque peu. A notre avis, chaque réflexion peut être considérée comme une petite pierre apportée à l'édifice bâti en commun.

8. Bibliographie (Articles cités dans le texte)

- Engler A.: Einfluss der Provenienz des Samens auf die Eigenschaften der forstlichen Holzgewächse.
Mitteilungen der schweizerischen Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen. 1905; 8
- Jacquot C.: Contributions à l'étude des facteurs déterminant le cycle d'activité du cambium chez quelques arbres forestiers.
Revue forestière française II. 1950; (II)
- Primault B.: Contribution à l'étude de l'influence des éléments météorologiques sur l'accroissement des forêts.
Geofisica pura e applicata. 1953; 24: 149-206
- Primault B.: Unifions nos méthodes de mesure.
XVith International Horticultural Congress -
1962 Gembloux/Belgique. 1964: 151-155
- Primault B.: Essai de prévision de la date de maturité des abricots en Valais.
La Recherche agronomique en Suisse. 1970; 9(3/4): 288-306
- Primault B.: Was dem Irländer sein Mamerz, ist dem Schweizer seine Sophie.
Schweizer Spiegel. 1970; 45(8): 38-43
- Primault B.: Essai de comparaison des champs d'application de la méthode d'écologie appliquée et de l'analyse climatologique.
Rapports de travail de l'ISM. 1971; (23):7
- Primault B.: Etude méso-climatique du Canton de Vaud en vue de son aménagement régional.
Cahiers de l'Aménagement, Lausanne. 1972; 14: 186 + 35 planches hors texte
- Primault B.: De la représentation des limites des séries climatologiques
Rapports de travail de l'ISM. 1978; (78): 7 + 2 tab. + 5 fig.
- Turner: Untersuchungen über Waldschäden in der Schweiz im Frühjahr 1987.
Zwischenbericht EAFV (6. Juli) 1987: 11

Adresse des auteurs

B. Primault
Witikonerstrasse 440
CH-8053 Zurich

A. Fankhauser
Zürichbergstrasse 76.
CH-8044 Zurich

Annexe

Liste des ouvrages consultés ou parcourus au cours de l'étude bibliographique

A. Littérature étudiée

- Amberger, A.: Pflanzenernährung.
Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart. 1979; 2. Auflage : 250
- Braun, H.J.: Bau und Leben der Bäume.
Verlag Rombach, Freiburg. 1980: 333
- Braun-Blanquet, J.: Pflanzensoziologie.
Springer Verlag, Berlin. 1964; 3. Auflage: 865
- Burger, H.: Untersuchungen über das Höhenwachstum verschied. Holzarten
Mitteil. der Schweiz. Zentralanstalt für das forstl. Versuchswesen. 1926; 14(1): 29-158
- Burschel: Waldschäden-Forstwirtschaft-Witterung.
Allgemein. Forstzeitschrift. 1985; 40(3): 43-46, 49
- Buschmann, C. u. Grumbach, K.: Physiologie der Photosynthese.
Springer Verlag, Berlin. 1985: 245
- Büsgen u. Münch: Bau u. Leben unserer Waldbäume.
Gustav Fischer Verlag, Jena. 1927; 3. Auflage: 426
- Eimern van J.: Wetter u. Klimakunde für Landwirtschaft, Garten- u. Weinbau.
Ulmer Verlag, Stuttgart. 1971: 239
- Eimern van J.: Ein Lehrbuch der Agrarmeteorologie.
Ulmer Verlag, Stuttgart. 1979
- Ehlers, M.: Baum u. Strauch.
Paul Paray-Verlag. 1986; 2. Auflage: 257
- Fellenberg, G.: Pflanzenwachstum.
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 1981: 232
- Flury, Ph.: Ueber den Einfluss von Trockenperioden auf das Bestandeswachstum.
Mitteil. der Schweiz. Centralanstalt für das forstl. Versuchswesen. 1926; 2: 251-292
- Frey-Wyssling, A.: Ernährung u. Stoffwechsel der Pflanzen.
Gutenberg-Verlag Zürich. 1945: 295
- Gäbler, H.: Allgem. Forstschutz.
Neumann Verlag, Radebeul, Berlin. 1962: 168
- Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschichten.
Friedr. Vieweg u. Sohn, Braunschweig. 1961; 4. Auflage: 646
- Gensler, G.A.: Der Begriff der Vegetationszeit.
Inaugural-Dissertation an der Universität Zürich. 1946

- Grabau, J.: Klimaschwankungen u. Grosswetterlagen in Mitteleuropa seit 1881.
Inaugural-Dissertation an der Universität Bern. 1985
- Häckel, H. u. Larcher, W.: Handbuch der Pflanzenkrankheiten.
Paul Parey Verlag Berlin u. Hamburg. 1985; mehrere Bände
- Hann v. J.: Handbuch der Klimatologie.
Engelhorn, Stuttgart. 1932; 4. Auflage: 444
- Hanselmann, K.: Wie Pflanzen Reservestoffe speichern.
Biologie in unserer Zeit. 1979 (9): 103-111
- Hanselmann, K.: Dissimilation pflanzlicher Speicherstoffe.
Biologie in unserer Zeit. 1981 (11): 15-27
- Hartig, R.: Lehrbuch der Pflanzenkrankheiten.
Julius Springer, Verlag. 1900; 3. Auflage: 324
- Hemveldop, J.: Die Grösse der Interzeptionsverdunstung in Fichtenkronen abhängig von einzelnen klimatischen Faktoren.
Allgem. Forst- u. Jagdzeitung. 1973: 35-41
- Jacquot, Cl.: Contribution à l'étude des facteurs déterminant le cycle d'activité du cambium chez quelques arbres forestiers.
Revue Forestière Française. 1950, (11)
- Kienast, F.: Dendroökologische Untersuchungen an Höhenprofilen aus verschied. Klimabereichen.
Inaugural-Dissertation and der ETHZ. 1985
- Kirwald, E.: Forstlicher Wasserhaushalt u. Forstschutz gegen Wasserschäden.
Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart. 1950: 160
- Klötzli, F.: Wald und Umwelt.
Schweiz. Zeitschrift für das Forstwesen. 1968
- Larcher, W.: Oekologie der Pflanzen.
Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart. 1984; 4. Auflage: 403
- Leibundgut, H.: Der Wald.
Huber Verlag, Frauenfeld. 1983: 212
- Lerch, G.: Pflanzenökologie.
Akademie Verlag, Berlin. 1985: 216
- Lundegardh, H.: Klima und Boden.
Gustav Fischer Verlag, Jena. 1957; 5. Auflage: 584
- Lyr, H., Polster, H., Fiedler, H.-J.: Gehölzphysiologie.
Gustav Fischer Verlag, Jena. 1967: 444
- Machalek, A.: Einfluss anthropogener Umweltfaktoren auf den Wald.
Wetter u. Leben. 1986; (2): 88-95
- Maximow, N.A.: Kurzes Lehrbuch der Pflanzenphysiologie.
Verlag Kultur u. Fortschritt, Berlin. 1951: 671

- Mayer, H.: Meteorologie u. neuartige Waldschäden.
Allgem. Forstzeitschrift. 1985; (51/52): 1395-1396
- Mitscherlich, G.: Wald, Wachstum u. Umwelt.
Sauerländer Verlag, Frankfurt. (mehrere Bände)
- Mitscherlich, G.: Ertragskundlich-ökologische Untersuchungen im Rein- u. Mischbestand.
Allgem. Forst- u. Jagdzeitung. 1966: 1-13
- Mitscherlich, G. et al.: Ueber den Jahresablauf des Höhenzuwachses junger Nadelbäume.
Allgem. Forst- u. Jagdzeitung. 1973: 9-18
- Mitscherlich, G.: Wald u. Wind.
Allgem. Forst- u. Jagdzeitung. 1973: 76-81
- Mössmer, R.: Verteilung Waldschäden an der Fichte nach Bestandes- u. Standortmerkmalen in den Bayerischen Alpen Forstl. Forschungsberichte der Forstwissenschaftl. Fakultät der Uni München. 1986; (73)
- Mullerstaël, H.: Reaktionen von Baumarten auf natürliche Stressfaktoren 1984/146 Mitteil. der Bundesforschungsanstalt für Forst- u. Holzwirtschaft, Hamburg. 1984; (146): 61-86
- Neger, F.W.: Die Krankheiten unserer Waldbäume und wichtigsten Gartengehölze. F. Enke Verlag, Stuttgart. 1919 u. 1924: 286
- Primault, B.: Contribution à l'étude de l'influence des éléments météorologiques sur l'accroissement des forêts.
Geofisica pura e applicata. 1953; 24: 149-206
- Primault, B.: Contribution à l'étude des réactions végétales aux éléments météorologiques.
Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles. 1957; 80: 115-162
- Rehfuess, K.E. u. Rodenkirchen, H.: Ueber die Nadelröte - Erkrankung der Fichte in Süddeutschland.
Forstwissenschaftl. Centralblatt. 1984: 248-262
- Rosznik, K.: Weltweise Witterungsanomalien in jüngster Zeit.
Naturwissenschaftliche Rundschau. 1986; (1): 24-26
- Roloff, A.: Untersuchungen zum vorzeitigen Laubfall und zur Diagnose von Trockenschäden in Buchenbeständen.
Allgem. Forstzeitschrift. 1985; (8): 157-160
- Rubner, K.: Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaues.
Neumann Verlag, Radebeul u. Berlin. 1953; 4. Auflage: 583
- Rudloff von H.: Heisse u. lange Sommer und rel. Häufigkeiten der darauffolgenden milden und kalten, trockenen und niederschlagsreichen Wintermonate in Deutschland (Teil 3).
Zeitschrift für Meteorologie. 1950; 4: 126-130

- Sauberer, F. u. Härtel, O.: Pflanze u. Strahlung.
Leipzig. 1958; 268
- Schmid-Haas, P.: Der Gesundheitszustand des Schweizer Waldes 1984.
Schw. Zeitschrift für Forstwesen 1985; (4): 251-273
- Schnelle, F.: Einführung in die Probleme der Agrarmeteorologie.
Eugen Ulmer, Stuttgart. 1948: 154
- Schnelle, F.: Pflanzenphänologie.
Leipzig. 1955: 299
- Schwantes, H.O. u. Steubing, L.: Oekologische Botanik.
Quelle + Mayer, Heidelberg. 1981: 408
- Schweingruber F.H.: Der Jahrring.
Verlag Paul Haupt, Bern u. Stuttgart. 1983: 234
- Schwerdtfeger, F.: Waldkrankheiten.
Paul Parey-Verlag 1981; 4. Auflage: 486
- Troll, W.; Allgemeine Botanik.
- Wiedemann, E.: Zuwachsrückgang u. Wuchsstockungen der Fichte.
Akad. Buchhandlung Walter Laux. 1925; 2. Auflage: 190
- Weischert, W.: Einführung in die allgem. Klimatologie.
B.G. Teubner, Stuttgart 1979; 2. Auflage: 256
- Wiesner, J.: Der Lichtgenuss der Pflanzen.
Engelmann Verlag, Leipzig. 1907: 322
- Woelfle, M.: Waldbau u. Forstmeteorologie.
Bayr. Landwirtschaftsverlag, München. 1950; 2. Auflage: 68
- Veen von der R.: Licht u. Pflanzen.
Philips' Techn. Bibliothek, Eindhoven. 1958: 163

B. Ouvrages complémentaires (contiennent des informations utiles)

- Braun: Lehrbuch der Forstbotanik.
- Burger, H.: Waldklimafragen II.
Mitteilungen der Schweizerischen Versuchsanstalt für das
forstliche Versuchswesen. 1934; 18: 7 - 54
- Butin, H.: Krankheiten der Wald- u. Parkbäume.
- Cramer, H.H. u. M.: Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Schadens-
perioden u. Klimaperioden in mitteleurop. Forsten seit 1871.
Pflanzenschutznachrichten Bayer. 1984; 37(2)
- Engeler, A.: Untersuchungen über den Blattausbruch.
Mitteilungen der Schweiz. Centralanstalt für das forstl.
Versuchswesen. 1913; 10

- Ernst, F.: Die Bedeutung der Klimaextreme für den Waldbau in Mitteleuropa.
Forstwissenschaftl. Centralblatt. 1934: 86 - 102
- Eschrich: Gehölze im Winter-Zweige u. Knospen.
- Friedrich, J.: Ueber den Einfluss der Witterung auf den Baumzuwachs.
Mitteil. an das forstl. Versuchswesen Oesterreichs, Wien. 1897;
(21-23)
- Frohne, D.: Systematik des Pflanzenreichs.
- Hiss, F.: Vom Tannensterben.
Allgemein. Forstzeitschrift. 1922
- Hoppe, E.: Regenmessung unter der Baumkrone.
Mitteil. and das forstl. Versuchswesen Oesterreichs, Wien. 1896;
(21-23)
- Huber, F.: Influence du froid, de la lumière et de stress hydriques.
Annales des Sciences forestières. 1984; (3)
- Item, H.: Ein Modell für den Wasserhaushalt eines Laubwaldes.
Mitteilungen der schweizerischen Versuchsanstalt für das forstliche Versuchswesen. 1974.
- Jaccard: Accroissement en épaisseur de quelques Conifères 1911/12.
Journal Forestier Suisse. 1913.
- Kern, K.G. u. Moll, W.: Der jahreszeitl. Ablauf des Dickenwachstums von Fichten verschied. Standorte im Trockenjahr 1959.
Allgemein. Forst- u. Jagdzeitung. 1960: 97-116
- König, E.: Sekundärschäden im sterbenden Wald.
Allgem. Forstzeitschrift. 1984: 1254-1255
- Kontic, R. et al.: Jahrringanalysen an Nadelbäumen zur Darstellung u. Interpretation von Waldschäden.
Berichte der Eidg. Anstalt für das forstl. Versuchswesen. 1986;
283
- Kramer, P.J. u. Koszłowski, Th.T.: Physiology of Woody Plants.
Academic Press, New York. 1979
- Kronfuss, H. u. Stern, R.: Strahlung u. Vegetation.
Angewandte Pflanzensoziologie.
Veröffentl. der forstlichen Bundesversuchsanstalt. 1978; (23)
- Kuhn, N.: Frequenzen von Trockenperioden u. ihre ökologische Bedeutung.
Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich.
1973.
- Libbert, E.: Lehrbuch der Pflanzensoziologie.

- Mayer, H.: Europäische Wälder.
- Müller, H.N.: Jahrringwachstum u. Klimafaktoren.
Angewandte Pflanzensoziologie, Veröffentl. der forstl. Bundesver-
suchsanstalt. 1980; (25)
- Niesslein, E. u. Voss, G.: Was wir über das Waldsterben wissen.
- Nördlinger: Forstbotanik I. 1874
- Pisek: Die CO₂-Assimilation.
Handbuch der Pflanzenphysiologie, Band 2. 1960
- Richter, G.: Stoffwechselphysiologie der Pflanze.
- Schnelle, F.: Frostschutz im Pflanzenbau.
- Stahl, E.: Zur Biologie des Chlorophylls. 1909
- Troll, W.: Praktische Einführung in die Pflanzenphysiologie.
- Walter, H.: Einführung in die Phytologie.
III. Grundlagen der Pflanzenverbreitung. 1951
- Warming, E. u. Gräbner, P.: Warming's Lehrbuch der ökologischen Pflan-
zengeographie. 1933
- Wilmanns: Oekologische Pflanzensoziologie. 1984
- Problemen um die wachsenden Waldschäden
Tagung der Arbeitsgemeinschaft für den Wald
Separatdruck Schweiz. Zeitschrift für das Forstwesen. 1984; (11)

