

## IMAGE DU CLIMAT SUR LES ALPES <sup>1</sup>

par Albert Bezinge,<sup>2</sup> Sion et Gérard Bonvin, Lens

### INTRODUCTION

Notre but est d'étudier les différentes paramètres climatiques et de les comparer avec les observations de la nature pour tenter de comprendre les influences du climat.

FLOHN (1968) définit le climat d'une région, comme l'état moyen de l'atmosphère pendant un intervalle de quelques dizaines d'années. Pour faciliter notre étude, nous avons analysé, dans la mesure du possible, certaines valeurs météorologiques et hydrologiques sur la décennie 1961-1970. En outre, les images du climat données par la nature, tel que les altitudes limites des forêts, les altitudes d'apparition des névés (méthode de Richter) et les altitudes moyennes des fronts glaciaires proviennent des cartes nationales de la Suisse au 1 : 25 000, éditées ces dernières années et dont les photogrammétriques s'échelonnent de 1955 à 1965.

La région étudiée comprend les Alpes Pennines qui s'étendent d'ouest en est, du Val d'Illyz jusqu'au Simplon, limitée au nord par la vallée du Rhône, au sud, par l'arête frontière Suisse-Italie, en passant par Chamonix, dès l'altitude de 1000 m environ.

Cette puissante arête, partant du Mont Blanc (4807 m), se termine par le massif du Weissmies (4023 m), sur un axe ouest-est. Côté suisse, plusieurs vallées transversales profondes très encaissées, longues de 40 km, descendent jusqu'au Rhône avec un axe général sud-nord. L'arête frontière, Mont Blanc-Simplon, correspond à la ligne de partage des eaux et elle culmine à 4634 m à la Pointe Dufour. Son altitude moyenne se situe vers 3500 m.

---

<sup>1</sup> Rapport présenté lors de la réunion de la section de glaciologie de la Société Hydrotechnique de France, les 22 et 23 février 1973 à Grenoble.

<sup>2</sup> Grande Dixence S.A., rue des Creusets 41, 1950 Sion.

Les Alpes Pennines sont soumises à plusieurs climats, selon la situation des vallées, provenant du relief bien marqué, des orientations et des massifs limitrophes: Alpes Bernoises, Massif du St-Gothard, etc.

### **Climat 1:**

Régime océanique ou atlantique, avec air maritime. Vents soufflant du sud-ouest, ouest et nord-ouest.

Ce régime, le plus important, intéresse particulièrement la région de Chamonix, Illiez, Trient et les Dranses: son influence va en diminuant d'ouest en est et intervient péniblement dans la région de Zermatt ou de Saas.

### **Climat 2:**

Régime continental. Vents frais ou chauds, selon la saison, soufflant du nord-est jusqu'au sud-est, pouvant provenir de Finlande, de la Russie ou des Balkans et apportant généralement de l'air sec. Son influence peut se faire sentir sur toute la région étudiée.

### **Climat 3:**

Régime méditerranéen, avec vents soufflant du sud. En général, ce régime apporte de grosses précipitations, surtout dans la zone du Simplon, de Saas, Zermatt, Hérens, sur une bande large de quelques kilomètres au nord de l'arête faîtière.

Phénomène similaire à la «Lombarde» et a ses effets débordant sur la Vanoise.

### **Climat 4:**

Régime polaire (situation rare !). Vents froids soufflant du nord: Spitzberg, Norvège, Suède. Ce régime peut intéresser toutes les Alpes.

Pour l'extrémité de la vallée de Zermatt, on estime que l'influence des climats 1, 2 et 3 se répartit pour  $\frac{1}{3}$  chacun.

Stations	Altitude m	Précipitations annuelles										Précipitations moyennes		
		1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1961/70	1901/40	1931/60
Brigue	671	630	718	605	528	947	761	531	910	551	754	694	725	—
Saas Almagell	1680	662	804	803	569	986	911	597	1018	—	—	794	866	832
Zermatt	1632	719	687	703	549	881	762	621	841	592	774	713	704	676
Grächen	1617	500	584	605	398	672	541	458	788	522	636	570	591	—
Ackersand/Stalden	700	446	520	546	351	605	535	332	595	389	400	472	530	—
Viège	650	546	718	579	451	740	646	456	752	496	605	599	636	616
Chippis	529	593	573	557	431	812	564	463	617	463	581	565	548	—
Sierre	565	659	700	644	509	864	645	615	728	541	701	661	575	590
Grimenz	1565	867	822	791	721	1091	768	655	863	593	864	804	767	—
Grande Dixence	2166	977	730	986	831	1263	989	878	1160	912	1103	983	900	—
Hérémenche	1205	722	616	679	649	1007	709	593	844	620	700	714	679	693
Sion	551	658	577	589	464	898	634	569	723	566	722	640	588	599
Sion-Aérodrome	483	616	539	592	466	922	612	538	683	546	698	621	572	—
Cleuson	2200	903	760	964	832	1219	937	833	1034	827	923	923	900	—
Fey-Nendaz	780	—	—	—	—	765	755	613	661	645	730	—	—	—
Montagnier Bagnes	840	874	819	857	719	1116	914	723	1109	780	955	887	764	802
Mauvoisin Barrage	1840	1082	389	736	897	1394	1123	1001	1310	1012	1310	1025	—	—
Grand-St-Bernard	2479	1713	1877	2101	1872	2576	2187	1659	2309	2077	2303	2067	2172	2066
Bourg-St-Pierre	1620	849	811	841	736	1076	921	739	994	849	934	875	849	911
Orsières	915	721	638	742	627	1126	923	750	1022	746	835	813	729	752
Martigny-Ville	471	760	704	680	518	1089	829	652	821	614	826	749	771	750
Barberine	1822	1786	1793	1527	1308	2657	1959	1714	1954	1522	2158	1838	1640	—
Châtelard	1130	1196	1146	1165	915	1576	1214	1082	1312	988	1307	1190	1157	—
Les Marécottes	1040	1215	1224	1078	847	1795	1461	1148	1427	1216	1504	1292	1162	1163
Lac du Goillet (Italie)	2526	935	685	1041	657	1200	982	875	1236	1024	1153	979	1933/60=1029	—
Chamonix (France)	1040	1321	1090	—	—	—	—	—	—	—	—	1934/60=1256	—	—
Le Tour (France)	1471	1569	1552	—	—	—	—	—	—	—	—	1934/60=1464	—	—

Tableau 1 : Précipitations annuelles en mm CE (CE = Colonne eau).

Tableau 2: Valeur des gradients de précipitations.

Localisation	Valeur du gradient en cm CE/hm	Situation de la station	Remarques
<i>Vallée de Zermatt</i>			1
Viège-Zermatt	env. 1,2	talweg Nord	—
Zermatt-Gandegg	env. 0,6	versant Nord	2
Gandegg-Furggjorh	env. 45,0	versant Nord	3
Zermatt-Gornergrat	env. 3,0	versant Ouest	—
Gornergrat-Grenzgletscher	env. 10,0	versant Ouest	4
Zermatt-Schönbuhl	env. 4,0	versant Est	—
Zermatt-Trift	env. 3,6	versant Est	—
<i>Vallée de Saas</i>			5
Viège-Saas	2,0	talweg Nord	—
Saas-Région Allalin	2,5-8,0	versant Est	—
<i>Vallée d'Hérens</i>			
Evolène-Riedmatten	2,0	versant Est	—
Evolène-Bouquetins	1,5	versant Ouest	—
Sion-Hérémente	1,0	talweg Nord	—
Hérémente-Barrage G.D.	3,0	talweg Nord	—
<i>Vallée de Bagnes</i>			
Martigny-Le Châble	2,0	talweg Nord	—
Le Châble-Mauvoisin	1,0	talweg Nord	—
<i>Vallée d'Entremont</i>			
Martigny-Orsières	1,5	talweg Nord	—
Orsières-Bourg-St-Pierre	0,5	talweg Nord	—
Bourg-St-Pierre-Gd-St-Bernard	15,0	talweg Nord	—
Orsières-Col d'Orny	13,0	versant Est	—
<i>Profil Vernayaz-Trient-Chamonix (fig. 2)</i>			
Vernayaz-Châtelard	7,0	talweg Nord	—
Vernayaz-Marécottes	10,0	talweg Nord	—
Châtelard-Barberine	9,0	versant Est	—
Châtelard-Orny	12,5	versant Ouest	—
Chamonix-Le Tour	5,0	talweg Sud	—
Chamonix-Plateau du Midi	8,5	versant Ouest	—
<i>Val d'Illeiez</i>			
Bex-Champéry	14,0	talweg Nord	6

### Remarques

1. À noter: 3 mesures extrêmes de précipitations annuelles dans cette vallée aride:  
 Ackersand: 45 cm à 610 m talweg  
 Grächen: 57 cm à 1600 m versant ouest  
 Taeschalp: 53 cm à 2230 m versant ouest, massif des Mischabels.  
 D'après les études du bilan de masse du glacier de Hohwäng 1971-1972, on trouve

# MESURES METEOROLOGIQUES

## 1. Précipitations annuelles moyennes et gradients

Ces paramètres sont très importants pour l'hydrologie, la glaciologie et la végétation, mais ils sont de plus en plus difficiles à déterminer au fur et à mesure que l'on monte en altitude. En effet, plus l'indice de *nivosté* augmente, plus les erreurs augmentent dans un sens ou dans l'autre. Les indices d'écoulement analysés par la suite, permettront de recouper approximativement les précipitations. De plus, l'hétérogénéité des précipitations qui découle du relief, des vents, des versants et des circulations nuageuses, ne facilite guère une approche précise.

---

un maximum des précipitations vers 3400 m (SCHNYDER). Après l'hiver 64/65, on a exécuté des sondages et mesuré, par pesées, des précipitations nivales sur les glaciers environnants, 7 totalisateurs et ceux-ci ont été relevés à la même époque. Six totalisateurs étaient déficitaires de 25 à 130 %, soit une erreur moyenne par manque de 65 % environ.

Les précipitations de Zermatt se répartissent comme suit:

Hiver: 57 % d'octobre à avril et été: 42% de mai à septembre,

soit dans la même proportion que les mois pris en considérations dans les saisons. Le versant italien possède un gradient moyen de 2 cm/hm de Châtillon au lac de Goillet, à 2500 m d'altitude.

2. On remarque l'aridité de la vallée de St-Nicolas, de Viège à Gandegg, jusqu'à 2800 m d'altitude, avec une sécheresse accentuée sur le versant Ouest des Mischabels, jusqu'à la crête. Le versant Est du Weisshorn, qui lui fait face, comprend des précipitations doubles vers 2600-2800 m d'altitude.

3. La mesure de Furggloch n'est pas représentative car le totalisateur est placé sous le vent, en aval de l'arête faîtière et KASSER avait déjà relevé le gradient élevé de cette région (1949).

Pour le Furggloch, en extrapolant les sondages faits sur le glacier et en comparant avec le totalisateur, on s'aperçoit que ce dernier mesure 30 % de plus, ce qui n'est vrai que très localement.

4. Les mesures effectuées en haute altitude sont faites à l'aide de perches d'accumulation implantées et par sondages et pesées de la neige par exemple au Grenzletscher vers 4000 m d'altitude.

5. Cette région a été très bien étudiée par KASSER et une carte au 1 : 10 000 des variations glaciaires de 1957 à 1967 en a résulté. Cette carte démontre la grande disparité des précipitations mesurées par des totalisateurs, dans un bassin de haute montagne.

6. Par comparaison avec le profil de la vallée de St-Nicolas, on remarque l'augmentation des précipitations et des gradients et une bonne régularité de ceux-ci avec les différentes altitudes.



La loi de variation des précipitations avec l'altitude ou gradient, est différente pour chaque versant de vallée et il faudrait une multitude de mesures pour obtenir un effet statistique et s'approcher de la réalité. Le tableau 1 donne les altitudes et les valeurs annuelles. Le graphique de la figure 1 donne une bonne image des précipitations dessinées par vallée.

*Profil en long des précipitations Illiez-Saas, d'ouest en est (fig. 2)*

Les gradients calculés permettent de tracer une courbe des précipitations calculée pour une altitude commune aux vallées et qui correspond à plusieurs stations de fond de vallée. Ainsi, en calculant les précipitations pour l'altitude 1600 m en talweg et en partant de la région de Chamonix-Illiez, on voit une diminution très marquée des précipitations, dans le sens ouest-est, avec un rehaussement dans la zone du Simplon. Donc, les hautes chaînes de montagnes des vallées latérales sont de puissants freins à la pénétration des courants atlantiques humides, comme la crête frontière freine les sporadiques courants méditerranéens. Ainsi, dès Entremont, les vallées sont pauvres en précipitations, tout comme la vallée du Rhône de Brigue à Martigny (fig. 3).

Tableau 3: Précipitations en haute altitude (données MZA).

Localisation	Durée des mesures	Altitude m	Valeur en cm CE	Remarques
Dents du Midi-Mont Ruan		2860	env. 300	
Col d'Orny	1961-1970	3170	env. 374	De 1901 à 1940: env. 309 cm
Mont Blanc	1961-1970	3500	env. 325	
Col du Géant	1961-1970	3370	env. 209	De 1931 à 1940: env. 167 cm
Col du Gd-St-Bern.	1961-1970	2450	env. 207	Avec effet de col. De 1901 à 1940: env. 217 cm
Theodul-Furgghorn	1961-1970	3390	env. 303	Avec effet de crête. De 1901 à 1940: env. 335 cm
Mont Rose-Mattmark	carottes Zans	4000	env. 200	
Schwarzbggl.	1961-1970	2930	env. 115	De 1901 à 1940: env. 163 cm
Simplon-Magenhorn	1961-1970	2470	env. 123	De 1901 à 1940: env. 151 cm

# COUPE EN TRAVERS TRIENT-CHAMONIX

Alt en m

Nord ← → Sud

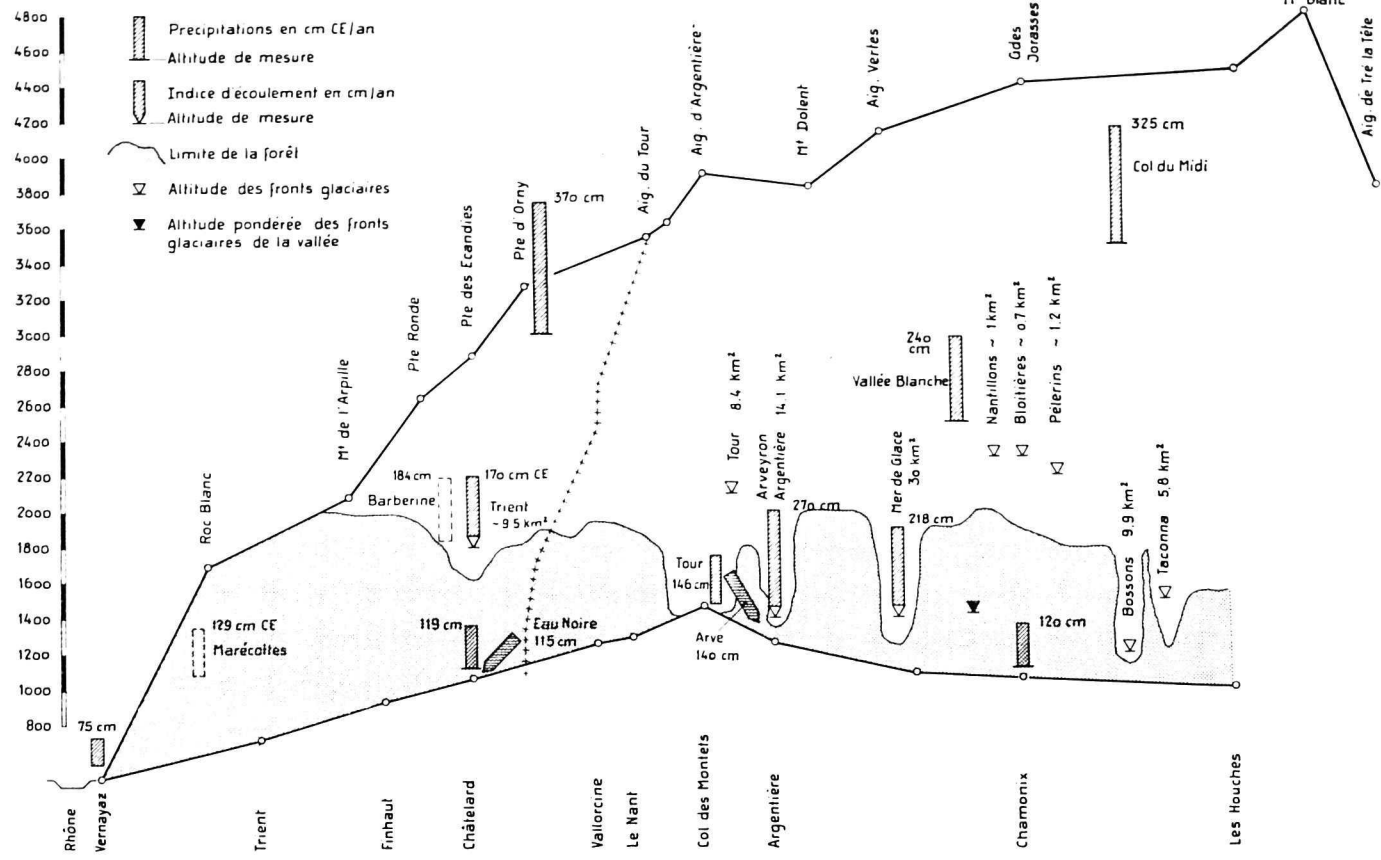


Fig. 2. Coupe en travers Trient-Chamonix.



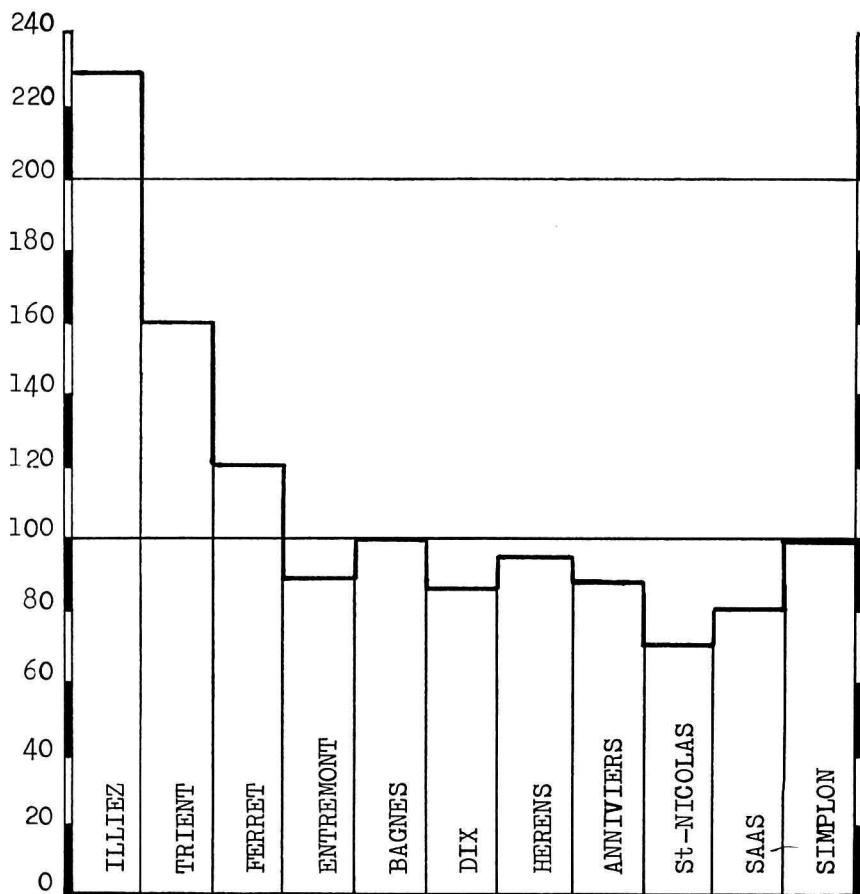


Fig. 3. Précipitations à 1600 m, en cm CE/an.

Les précipitations augmentent rapidement avec l'altitude:

dès 1000 m: Vals de Chamonix, Trient, Illiez;

dès 1600 m: Vals Ferret, Entremont, Bagnes;

dès 2800 m: Vals des Dix, Hérens, Anniviers, Zermatt.

Il ressort des analyses des précipitations, un effet important: d'Illiez aux Dranses, les précipitations sont semblables, aussi bien sur les versants est qu'ouest, versants au vent ou versants sous le vent. Par contre, de Bagnes au Simplon, tous les versants ouest sont plus arides que les versants est.

En ce qui concerne les précipitations en haute altitude, seuls les totalisateurs, avec leurs erreurs et des sondages, nous donnent quelques renseignements (tableau 3).

Dans le temps, on remarque une augmentation des précipitations sur Orny et Col du Géant et une diminution sur les autres stations, vers l'est jusqu'au Simplon. Ceci corrobore l'avance des glaciers dans le massif du Mt-Blanc (Trient, Bossons, etc.).

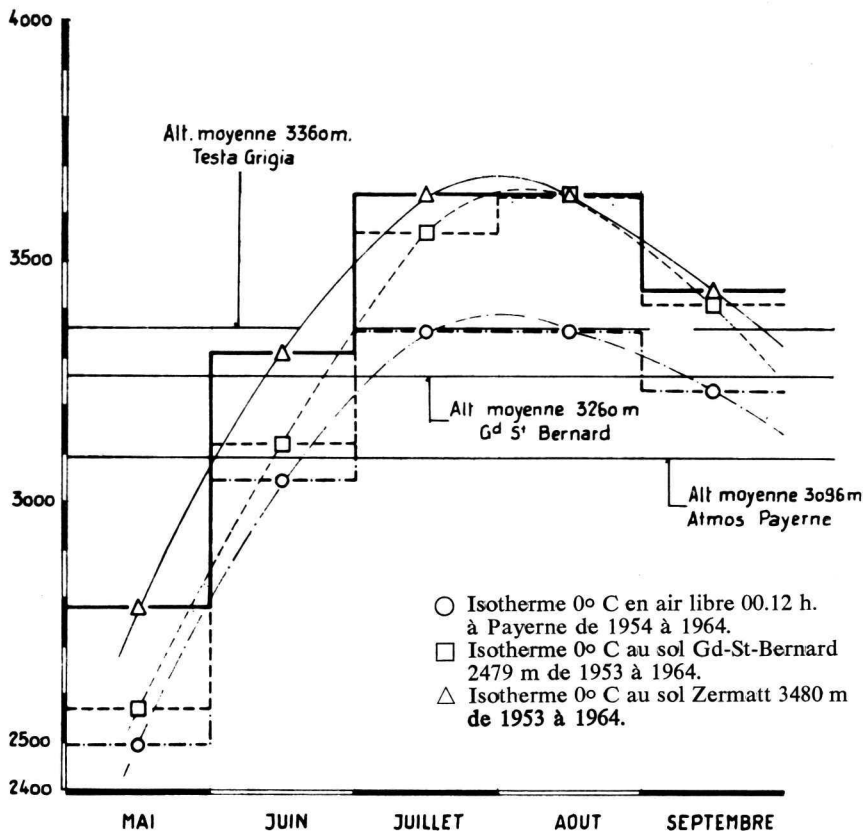


Fig. 4. Altitudes moyennes mensuelles estivales de l'isotherme 0° C.

## 2. Températures d'été et gradients (figure 4)

La température d'été, de mai à septembre, joue un rôle prépondérant sur l'hydrologie nivo-glaciaire, la végétation, le climat d'une région, la glaciation et les limites des neiges. Les gradients de température calculés ci-dessus nous aideront à contrôler les températures existant sur le profil ouest-est à 1600 m d'altitude.

Sion 510-Gd-St-Bernard 2488:

0,63° C/hm 1961-1970

Sion 510-Barrage Grande Dixence 2160: 0,62° C/hm 1967-1970

On trouve, à l'aide du gradient moyen de 0,6° C/hm et des températures mesurées au sol, les valeurs suivantes d'été (mai-septembre) à 1600 m:

Val de Chamonix:	env. 10,8° C
Bourg-St-Pierre:	env. 10,1° C
Val des Dix:	env. 10,3° C
Zermatt:	env. 10,3° C
Saas:	env. 10,8° C

Donc, la température d'été moyenne est assez stable, malgré les différences climatiques, précipitations, couvertures nuageuses et malgré les situations différentes. Ainsi, les phénomènes thermiques de l'été sont homogènes dans l'ensemble des vallées des Alpes Pennines.

Par contre, en altitude et en été, les phénomènes thermiques ne sont plus homogènes. Pour contrôler ces phénomènes, nous avons dû prendre des mesures sûres de 1953 à 1964, à haute altitude:

Tableau 4: Températures moyennes, gradients thermiques et altitudes isothermiques à haute altitude.

	M	J	J	A	S	Moyenne en été
Testa Grigia:						
3480 m	-4,7	- 1,1	+ 1	+ 0,9	-0,2	- 0,8° C
Zermatt:						
1610 m	+7,8	10,9	12,7	11,6	9,4	10,4° C
Gradient:						
—° C/hm	0,67	0,64	0,625	0,57	0,517	0,603° C/hm
Altitude isotherme:						
0° C	2780	3310	3640	3640	3440	3360 m

A titre de comparaison, on a calculé les gradients sur versants sud et nord, pour deux années, avec la station haute commune: Testa Grigia.

Tableau 5: Gradients sur versants Sud et Nord.

	M	J	J	A	S	Moyenne
1963						
Lac Goillet						
(versant sud)	0,51	0,58	0,72	0,67	0,60	0,60
Zermatt						
(versant nord)	0,65	0,62	0,60	0,57	0,53	0,59
1964						
Lac Goillet	0,47	0,53	0,66	0,66	0,58	0,58
Zermatt	0,62	0,63	0,66	0,59	0,50	0,59

Il ressort des tableaux 4 et 5:

- Une diminution progressive du gradient de température de mai à septembre, sur versant nord.
- Une augmentation du gradient de mai à août, sur versant sud.
- Un gradient moyen de  $-0,6^{\circ}$  C/hm pour 12 étés.
- Une altitude de l'isotherme  $0^{\circ}$  C qui va en augmentant, de mai à août.

Pour la même période 1953-1964, on a mesuré à la station du Gd-St-Bernard, à 2480 m d'altitude:

	M	J	J	A	S	Moyenne
Température moyenne mensuelle	0,6	4,1	6,8	6,6	4,8	4,58° C
Altitude isotherme $0^{\circ}$ C	2570	3120	3560	3640	3410	3260 m
Différence avec Zermatt (tab. 4)	-210	-190	-80	0	-30	-100 m

Donc une altitude de l'isotherme  $0^{\circ}$  C, 100 m plus basse au Gd-St-Bernard.

En utilisant les mesures de Testa Grigia et du Gd-St-Bernard, de 1961 à 1970 et en prenant le gradient moyen d'été 0,603, on trouve l'altitude moyenne de l'isotherme  $0^{\circ}$  C comme suit:

Tableau 6: Altitude moyenne de l'isotherme  $0^{\circ}$  C.

Années	Testa Grigia	Gd-St-Bernard	Différence isotherme
1961	$-0,36^{\circ}$ C 3420 m	4,88° C 3300 m	120 m
1962	$-0,56^{\circ}$ C 3390 m	4,48° C 3220 m	170 m
1963	$-0,6^{\circ}$ C 3380 m	4,3° C 3190 m	190 m
1964	$-0,4^{\circ}$ C 3550 m	5,74° C 3340 m	210 m
1965	$-1,3^{\circ}$ C 3260 m	3,8° C 3110 m	150 m
1966	$-0,9^{\circ}$ C 3330 m	5,38° C 3370 m	-40 m
1967	$-0,4^{\circ}$ C 3410 m	5,08° C 3320 m	90 m
1968	$-1^{\circ}$ C 3310 m	4,3° C 3190 m	120 m
1969	$-0,6^{\circ}$ C 3380 m	4,92° C 3300 m	80 m
1970	$-1,04^{\circ}$ C 3300 m	5,32° C 3360 m	-60 m
Moyenne	$-0,72^{\circ}$ C 3370 m	4,82° C 3270 m	100 m

Ces valeurs moyennes sont semblables à celles calculées pour 1953 à 1964. Par contre, on relève des basculements de l'isotherme 0° C pour certaines années.

L'analyse des radiosondages de Payerne de 1954 à 1964 à 0 h. et 12 h. entre 850 mb et 700 mb, permet de trouver l'altitude de l'isotherme 0° C. On obtient les résultats suivants:

Tableau 7: Altitude de l'isotherme 0° C selon les radiosondages de Payerne.

	M	J	J	A	S	Moyenne
Gradient	0,62	0,61	0,62	0,59	0,57	0,602° C/hm
Altitude 0° C	2495	3045	3355	3355	3230	3096 m
Différences avec:						
Gd-St-Bernard:	— 75	— 75	—205	—285	—180	—165 m
Testa-Grigia:	—285	—265	—285	—285	—210	—260 m

Donc, l'isotherme 0° C en atmosphère libre est plus basse que sur le relief. Le gradient de température, pour cette période, est semblable à celui trouvé par les mesures au sol.

### 3. Couverture nuageuse

A différentes stations, le service suisse de météorologie fait mesurer, depuis fort longtemps, la couverture nuageuse trois fois par jour, estimée en dixième de la surface du ciel visible depuis la station.

Tableau 8: Couverture nuageuse.

Localisation	Altitude m	Date des mesures	Moyenne
Gd-St-Bernard	2479	été 1951-1960	6.1/10
Testa Grigia	3480	été 1953-1962	5.4/10
Zermatt	1610	été 1931-1960	4 /10
Saas	1785	été 1901-1940	4.4/10

#### Remarques

— Le Gd-St-Bernard, soumis au débordement des différents climats, est le plus couvert avec en plus un effet des nuages stationnaires.

— Zermatt est la région la plus dégagée de Suisse, de par sa position et son climat. Moyenne suisse: 6,2-6,5/10.

— Testa Grigia, malgré sa position de col, comme le Gd-St-Bernard, a un ciel plus dégagé.

— Saas se rapproche de Zermatt.

## HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS

Comme KASSER l'a indiqué dans ses études, l'hydrologie moyenne annuelle sur une décennie intègre assez bien les précipitations et le climat d'une région. Notre étude est facilitée par les multiples mesures effectuées par les sociétés hydroélectriques et par celles exécutées depuis très longtemps par le service fédéral des eaux. Il en ressort que les mesures de débit au fond d'une vallée principale sur des surfaces qui dépassent 100 km<sup>2</sup> ne donnent pas une bonne image de l'hydrologie locale propre à chaque bassin versant des vallons secondaires. En effet, dans les talwegs des vallées principales des Alpes Pennines, les précipitations sont très faibles de 50 à 70 cm CE/an et de ce fait avec les évaporations et végétations, les indices d'écoulement de ces bassins intermédiaires descendent jusqu'à 25 et 35 cm CE/an: Vallées de Saas, St-Nicolas, Anniviers, etc. Le tableau 9 récapitule les données pour chaque bassin, avec dates, caractéristiques et indices d'écoulement en cm CE/an et on relève:

— D'ouest en est, une diminution des indices d'écoulement, soit un maximum de 270 cm CE/an à Argentières, avec un minimum de 50 à 60 cm CE/an dans les Mischabels, malgré les altitudes et les glaciations élevées du massif.

— Des indices d'écoulement beaucoup plus faibles sur les versants ouest d'Hérens à Saas.

— Des indices d'écoulement très faibles dans les talwegs des vallées principales.

— Un parallélisme parfait entre les indices d'écoulement et les précipitations, au fur et à mesure que l'on monte en altitude.

— Comme relevé par les mesures de précipitations, on retrouve une hydrologie favorable lorsqu'on se rapproche de l'arête frontière des Alpes.

— Plus on s'élève en altitude, plus l'écoulement d'hiver diminue, par suite de la longue période froide d'hiver et des précipitations neigeuses prépondérantes.

— Aucune formule empirique n'est possible pour déterminer d'avance les débits d'un bassin versant de haute montagne: seules des mesures de débits et de précipitations peuvent fournir des résultats concrets.

---

Tableau 9: Hydrologie des bassins versants.

A: Surface en km<sup>2</sup>. B: % de glace. C: Dates des mesures. D: Ecoulement moyen en cm CE/an. E: Ecoulement maximum en cm CE/an. F: Ecoulement minimum en cm CE/an. G: Ecoulement en été (%). H: Ecoulement en hiver (%).

	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>Trient</b>								
Eau Noire-Châtelard/Frontière	78,6	6,7	62-71	115	157	76	78	22
Glacier du Trient	29,1	34,2	56-71	170	220	126	83	17
<b>Chamonix</b>								
Arveyron d'Argentières (Electricité de France),	31,6	59	61-70	270	—	—	87	13
Arveyron Mer de Glace (id.)	78	51	61-70	218	265	167	86	14
Arve-Pont de la Joux 1200 m (id.)	44,4	19	—	140	—	—	80	20
<b>Ferret</b>								
Reuse de Saleina, versant Est dès 1200 m	24	49	56-71	175	215	139	86	14
Dranse de Ferret dès 1200 m	66,1	12,3	56-71	152	186	122	86	14
<b>Entremont</b>								
Dranse d'Entremont (Forces motrices du Gd-St-Bernard, dès 2100 à 1800 m	78,2	30	63-72	110	140	90	—	—
<b>Bagnes (Forces Motrices de Mauvoisin)</b>								
Dranse à Mauvoisin avec Corbassières dès 1695 m	150	52	61-70	150	200	120	—	—
Collecteur rive droite versant Ouest dès 2000 m	17,3	0	61-70	123	185	80	—	—
Dranse à Fionnay (bassin intermédiaire 1500 à 2000 m)	21,2	2-3	61-70	108	135	70	—	—
Dranse au Chables dès 800 m	254	31	55-58	145	—	—	88	12
<b>Dixence</b>								
Dixence dès 2240 m	44	25	—	115	—	—	—	—
<b>Hérens</b>								
Borgne, bassin orienté à l'W, dès 2400 m	19	32	61-70	100	117	70	94	6
Borgne dès 1900 m	79	55	—	140	185	110	94	5
Borgne à La Luette dès 1000 m	231	25	61-70	106	126	91	81	19
<b>Anniviers</b>								
Navizence à Vissoie dès 1200 m	209	18	56-62	99	120	84	73	27
<b>St-Nicolas ou Zermatt</b>								
Viège de Zermatt, massif des Mischabels bassin à l'W, dès 2450 m <sup>1</sup>	58	72	64-72	85	110	60	98	2
Id. Mt-Rose, Cervin, Weisshorn, dès 2000 m	180	72	64-72	140	180	110	94	6
Id à Randa 1400 m <sup>2</sup>	315	49,7	61-66	120	130	95	88	12
<b>Saas</b>								
Viège de Saas, Weissmiss, vers. W, dès 2100	35	30	66-72	102	—	—	—	—
Viège de Mattmark dès 2000 m	53	50	—	135	155	110	91	9

Remarques: 1. 22 km<sup>2</sup> de bassins avec des glaciations de 34 à 74 % et des sommets de 4500 m ont des indices de 50 à 60 cm CE/an.

2. En calculant les apports des bassins intermédiaires en talweg, entre les cotes 1400 et 2000 m, on obtient des indices de 30 à 40 cm CE/an. Cette remarque est également valable pour la vallée de Saas.

— Les amplitudes de volumes ou d'indices d'écoulement, entre les années favorables ou défavorables varient selon la nature du bassin entre  $\pm 40\%$ , fonction des conditions météorologiques, soit précipitations annuelles pour un bassin nival ou températures estivales pour un bassin glaciaire.

Nous pensons que cette disparité hydrologique entre les versants provient d'abord des précipitations variables et des neiges qui disparaissent par sublimation sur les versants ouest, comme relevé sur les adrets valaisans, à moyenne altitude. De plus, on a remarqué que les effets du fœhn peuvent être différents selon les époques:

— En mai, juin, de préférence, le fœhn est tiède et chaud, de force régulière et, après 48 h., produit de gros débits de fusion de la neige.

— En été et en automne le fœhn est violent, soufflant par rafales et tourbillons qui burinent la neige, tout en la faisant diminuer sans fonte. Ce fœhn apporte quelquefois des poussières du continent africain.

## IMAGE DE LA NATURE

### 1. Limites supérieures des forêts

KOEPPEIN indique que le climat est avant tout une réalité très complexe, si on envisage uniquement ses composantes physiques et on risque de méconnaître son caractère essentiel. La plante, au contraire, qui fait partie de la végétation naturelle d'une région, est obligée de subir les effets globaux de l'ensemble des facteurs du climat. De ce fait, elle constitue un appareil enregistreur des effets cumulatifs des différents phénomènes climatiques.

Il en est ainsi des résineux, mélèzes, arolles et épicéas qui poussent à des hauteurs élevées en forêts denses ou clairsemées. HESS (1942), avait déjà fait l'inventaire des limites des forêts compactes ou des arbres isolés et pensait que l'on devait pouvoir comparer ces altitudes aux glaciers; COUTAGNE (1954) a également fait des recherches dans ce sens-là. La période de végétation des arbres précités se produit essentiellement pendant l'été, en fonction des degrés de la température, ce qui donne le bois clair à faible densité de cernes de croissance, tandis que le bois foncé à haute densité de cernes se produit d'automne au printemps.

Il est certain que mis à part les effets destructeurs des forêts par les paysans au XIX<sup>e</sup> siècle, le terrain, l'orientation des vents, les avalanches, les vents catabatiques jouent encore un rôle non négligeable sur leur répartition régionale.



D'après l'étude de HESS (1942) et les cartes au 1 : 25 000, on a reporté sur les profils en long et en travers, les altitudes maximales des forêts:

Tableau 10: Altitudes maximales des forêts.

Vallée	Versant est	Versant ouest	Espèces végétales
Illiez	1800 m	1850 m	Epicéa
Trient	1900 m	1900 m	Mélèze + Epicéa
Chamonix	1850 m	2000 m	Mélèze + Epicéa
Ferret	1960 m	2000 m	Mélèze + Epicéa
Entremont	2050 m	2000 m	Mélèze + Epicéa
Bagnes	1950 m	1950 m	Mélèze
Dix	2100 m	2200 m	Mélèze
Hérens	2100 m	2200 m	Mélèze + Arolle
Anniviers	2100 m	2200 m	Mélèze
Zermatt	2250 m	2300 m	Arolle + Mélèze
Saas	2250 m	2200 m	Arolle + Mélèze
Simplon	1900 m	2200 m	Mélèze

Des arbres ou arbustes isolés peuvent atteindre des cotes de 200-250 m supérieures à celles des forêts denses ou régulières. Vers l'extrémité amont des vallées, ces limites ont tendance à descendre, provenant sans doute des phénomènes divers: terrains peu propices à la végétation, vents froids des cols et des glaciers, avalanches.

L'altitude limite des forêts varie avec une amplitude de 500 m, dont le maximum se situe à Zermatt. Il semble que plus il y a de précipitations, plus la limite des forêts s'abaisse, pour des températures estivales presque semblables. De plus, en règle générale, la limite sur versants ouest, est environ 100 m supérieure à celle des versant est.

Remarquons aussi que souvent des versants sud (adret) de petits vallons latéraux dans les régions sèches: Findelen, Z'Mutt, ne comportent pas de forêts, malgré l'ensoleillement et les températures favorables. Ceci a été observé dans le Tyrol et les forestiers autrichiens ont affirmé que cela provenait des coupes forcées du XIX<sup>e</sup> siècle, ce qui n'est pas le cas sur les versants observés.

Lors de la déglaciation d'un vallon ou du retrait d'un glacier, on a noté que les mélèzes croissaient 15 à 20 ans après l'abandon du terrain par les glaces avec une avance plus rapide de la végétation sur l'ubac que sur l'adret, à Z'Mutt par exemple à 2200 m. Comme relevé par plusieurs auteurs, ces limites ont fluctué au cours des siècles et on a retrouvé à Findelen, à 2350 m d'altitude, un tronc d'arolle de 1100 cernes, détruit par l'avance glaciaire du XVII<sup>e</sup> siècle. Des datations récentes au C 14 nous ont

permis de dater des troncs retrouvés en haute altitude, où il n'y a plus d'arbres vivants et les dates fluctuent entre 4000 et 8000 ans.

Le Dr SCHWEINGRUBER pense que la limite de végétation des rhododendrons peut donner aussi une bonne image du climat local.

## 2. Altitudes limites d'apparition des névés, méthode de Richter

Elle découle du microclimat, de l'orographie d'un massif et de son altitude. Cette méthode permet d'obtenir une image assez bonne d'un climat local.

D'ouest en est, on trouve:

Illiez-Trient	env. 2650 m	Dix-Hérens	env. 3250 m
Trient-Ferret	env. 2900 m	Hérens-Anniviers	env. 3200 m
Ferret-Entremont	env. 2950 m	Anniviers-Zermatt	env. 3200 m
Entremont-Bagnes	env. 3050 m	Zermatt-Simplon	env. 3250 m
Bagnes-Dix	env. 3050 m	Saas-Simplon	env. 3200 m

Ainsi, comme pour les forêts, cette limite varie de 600 m d'Illiez à Zermatt et donne une image de l'intégration des paramètres: précipitations annuelles, fusion d'été. Lors d'un changement de climat de quelques années, immédiatement ce paramètre fluctue. Il semble que c'est celui qui présente le plus faible temps de réponse au climat et pour mieux l'observer, il serait intéressant de faire, en septembre, des relevés photographiques annuels des altitudes limites.

## 3. Altitudes moyennes des fronts glaciaires

Après MERCANTON, nous avons étudié, en 1969, l'évolution des fronts glaciaires. Mais cette recherche n'aboutit pas à des données cohérentes. Le front d'un glacier dépend de plusieurs paramètres: dimensions du glacier, relief du bassin, altitudes moyennes des crêtes, exposition, précipitations, températures d'été, etc.

Afin de pouvoir comparer la glaciation des vallées, nous avons calculé l'altitude moyenne des fronts glaciaires pondérés par la surface des glaciers en jeu, ceci par versant et ensemble de la vallée considérée (tabl. 11).

Il est intéressant de constater que les versants ouest, mis à part Chamonix, présentent des altitudes de fronts 200 à 600 m plus élevées que les versants est et nord. Par contre, les altitudes moyennes des fronts glaciaires de chaque vallée, fluctuent de 1420 à 2795, selon les précipitations et selon les hauteurs moyennes des crêtes des bassins versants. Les quatre derniers versants ouest (Hérens, Anniviers, Zermatt, Saas) ont des altitudes de

Tableau 11: Altitude moyenne/pondérée des fronts glaciaires.

	Versant nord et est	Versant ouest	Vallée
Illiez	—	2200 m	—
Trient	2500 m	1800 m	—
Chamonix	2500 m	1415 m	1420 m
Ferret	2040 m	—	—
Entremont	2450 m	2700 m	2500 m
Bagnes	2320 m	2500 m	2405 m
Dix	2790 m	2890 m	2795 m
Hérens	2240 m	2830 m	2320 m
Anniviers	2090 m	2580 m	2215 m
Zermatt	2330 m	2930 m	2370 m
Saas	2400 m	2800 m	2480 m

fronts moyennes élevées de 2580 à 2930, malgré les sommets de 4000 et plus qui les limitent, caractéristiques de régions très sèches.

#### 4. Limites des neiges persistantes

En 1902, JEGERLEHNER avait défini une ligne climatique qui correspondait à la limite maximale des neiges sur les glaciers suisses. Il avait déjà trouvé qu'au fur et à mesure que l'on pénètre dans les Alpes, cette limite climatique s'élève. RICHTER avait trouvé de même pour les Alpes tyroliennes.

Cette limite sépare le glacier en deux zones, soit la dissipatrice et l'accumulatrice. Si cette ligne observée en septembre, fluctue par rapport au centre de gravité des surfaces, il y a déséquilibre du bilan de masse et le glacier augmente ou diminue de volume. Cette limite est le résultat grossier des précipitations neigeuses et de la fusion estivale. En 1927 déjà, MERCANTON déterminait cette ligne par photographie aérienne et traductions sur des cartes. Depuis quelques années, nous avons repris cette méthode pratique, rapide et économique, et nous reportons sur les nouvelles cartes au 1 : 25 000, les limites de la neige. Par manque de mesures statistiques, nous avons défini les limites de la neige. Par manque de mesures statistiques, nous avons défini les amplitudes de cette limite:

	Versant ouest	Versant est et nord
Chamonix	2600-3000	
Hérens	3100-3300	2750-3200
Zermatt	3000-3500	3000-3300

Vers 1860, cette limite était d'environ 2900-3000 m, dans la région de Zermatt.

On relève que cette limite s'élève avec la situation des glaciers d'ouest en est et les glaciers versants ouest ont des limites de 200-300 m plus élevées que celles des versants est, mis à part la région de Chamonix. On peut ajouter aux remarques de JEGERLEHNER que les précipitations sont les principales responsables de cette variation d'altitude de la ligne climatique. Là aussi, le temps de réponse au climat est très rapide et cette méthode de relevés par photographies va être appliquée chaque fin d'été, du Simplon au Trient pour le compte de l'Institut de Géographie de l'EPF à Zurich.

## 5. Centre de gravité des surfaces glaciaires

Ce centre, ou altitude moyenne du glacier, correspond, en général, à la zone de bilan spécifique nul, qui peut varier d'une année à l'autre, avec une marge de 400 à 500 m en altitude, selon les conditions météorologiques de l'année. Les altitudes moyennes ont été calculées pour certains glaciers et pour d'autres régions elles sont définies par estimation et toutes sont pondérées par la surface des glaciers.

Le report de ces altitudes, sur le profil en long, montre que d'ouest en est celles-ci passent de 2600 m à Chamonix jusqu'à 3400 m dans la région de Zermatt. Il semble bien que cette cote est définie par l'activité du glacier, résultant du climat local et de deux paramètres importants déjà définis: précipitations annuelles, température d'été. De plus, elles coïncident assez bien avec les altitudes trouvées pour les sommets, avec apparition de névés (RICHTER). Il existe un certain parallélisme avec les limites des forêts.

Mais comme les grands glaciers ont un temps de réponse de plusieurs décennies aux variations du climat, on ne peut pas comparer leurs altitudes des centres de gravité, avec celles des petits glaciers qui eux suivent assez rapidement les fluctuations. Donc il y a un décalage.

## CONCLUSION

Il ressort de l'étude:

- Une grande variabilité des précipitations et de l'hydrologie annuelles.
- Des gradients de précipitations très différents vers l'extrémité des vallées, vers les crêtes et une grande dissymétrie entre versants est et ouest, provenant sans doute des vents dominants.
- L'isotherme  $0^{\circ}$  C qui en été s'élève selon un plan incliné qui va en montant de 300 m en altitude entre les radiosondages en atmosphère libre (Plateau Suisse) et les mesures faites à Testa Grigia (Zermatt).

— Une hydrologie spécifique très semblable aux précipitations locales.

— Une glaciation active dans la partie ouest des Alpes Pennines avec des fronts et des centres de gravités d'altitudes plus basses qu'à l'est.

— Une élévation d'ouest en est de la limite des forêts et de la limite d'apparition des névés.

Les variations du climat peuvent être analysées mathématiquement par les tendances, mais les erreurs et les discontinuités, provenant de changement des stations, amènent quelquefois à des résultats aberrants.

Il s'avère que, pour une étude semblable, il faut utiliser des mesures sûres s'étalant sur une décennie et les observations importantes, nécessaires pour améliorer la méthode, sont:

— Mesures des précipitations annuelles par pluviomètres ou totalisateurs bien situés, par sondages et pesées de la neige en haute altitude sur des plateaux.

— Mesures précises des températures estivales.

Il semble même que les appareils enregistreurs classiques ne sont pas assez précis. De plus, leur emplacement joue un rôle important.

— Photographies, en fin d'été, des limites de névés sur les glaciers et report sur des cartes à grande échelle.

— Photographies, en fin d'été, des sommets proches de la limite de névés, pour repérer les variations de climat.

— Mesures des débits d'écoulements sur des bassins tests de haute montagne.

Relevons l'importance des précipitations, puisque, d'après nos estimations, si la région de Zermatt recevait autant de précipitations que la région de Chamonix, on aurait un glacier plus grand que le glacier d'Aletsch, dont le front atteindrait la région de Viège, dans la vallée du Rhône.

Cette étude préliminaire sera poursuivie par M. Gilgen, étudiant géographe de l'EPFZ, dans le cadre d'un travail de diplôme.

## Bibliographie

BOUET, M. 1972. *Climat et météorologie de la Suisse Romande*. Payot Lausanne.

BEZINGE, A. 1971. *Déglaciation récente dans les vals de Zermatt et d'Hérens*. Soc. Hydrotechnique de France. Grenoble.

COUTAGNE, A. 1954. *Hydrométéorologie des bassins de haute montagne*. Documents Electricité de France.

FLOHN, H. 1968. *Le temps et le climat*. Hachette Paris. 252 pp.

FRICK. 1956. *Les arbres luttent pour leur existence*. Alpes, Neiges et Rocs 10.

FLORENCE. *Dendroclimatologie en Maurienne*. Faculté des Sciences de Grenoble, 38.

- GAUDET, 1967. *L'altitude moyenne des glaciers*. Soc. Hydrotechnique de France. Grenoble.
- HAINARD, P. 1969. *Signification écologique et biogéographique de la répartition des essences forestières sur l'adret valaisan*. Boissiera, Genève, 15. 150 pp.
- HESS, E. 1942. *Die Natürlichen Waldgrenzen in Kanton Wallis*. Bull. Murith. 59. p. 50-65.
- KASSER, P. dès 1950. *Etudes glaciologiques diverses*. Institut d'Hydrologie et de Glaciologie de l'EPF. Zurich.
- LLIBOUTRY, L. 1965. *Traité de glaciologie*. Masson Paris.
- LUGEON, J. 1928. *Précipitations atmosphériques, écoulement et hydro-électricité*. Baconnière et Dunod, Neuchâtel.
- LEHR, P. 1957. *Météorologie*. Hachette, Paris. 159 pp.
- LUTSCHG, O. 1926. *Über Niederschlag und Abfluss in Hochgebirge*. Office fédéral de l'économie hydraulique. 480 pp.
- LEROY-LADURIE, E. 1971. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris. 380 pp.
- POLGE, 1971. *Le message des arbres*. La Recherche 11.
- SCHNYDER, B. 1972. *Etudes du bilan de masse du glacier de Hohwäng*. Document Grande Dixence. Non publié.
- VENETZ, I. 1833. *Mémoire sur les variations de la température dans les Alpes de la Suisse*. Mém. Soc. helv. Sc. nat. 1, 2.
- VIVIAN, R. *Fiches des glaciers français*. Rev. de Géographie alpine. Grenoble.

En plus, ont été consultés: Les Annales de la Centrale suisse de météorologie, les Annales hydrographiques de la Suisse, la Revue du Club alpin Suisse Les Alpes (les variations périodiques des glaciers des Alpes et les études glaciologiques de Forel) et les Documents de l'Electricité de France, des Forces motrices du Grand-St-Bernard, des Forces motrices de Mauvoisin, de la Grande-Dixence, des Forces motrices de Mattmark.