

# LES CRISTAUX DE NEIGE

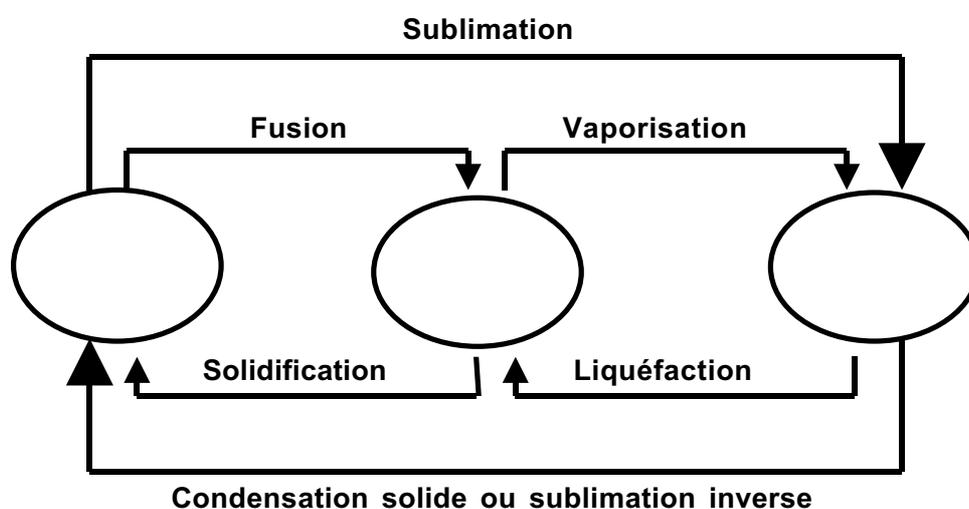
## FORMATION - 1 -

Par E. PAHAUT, Météo-France, Centre d'Études de la Neige.

### I - RAPPELS

Dans les nuages où ils se forment et se développent, dans le manteau neigeux où ils se transforment, les cristaux de neige ont une évolution liée en grande partie au jeu du déséquilibre entre les différentes phases de l'eau : liquide, solide (glace) et gazeuse (vapeur d'eau). Aussi, avant d'examiner ce qui se passe dans les nuages ou au sein d'une couche de neige déposée au sol, il est utile de faire quelques brefs rappels.

### I - 1. Les changements d'état



Le passage d'une phase à l'autre se fait par des transformations qui absorbent (-) ou libèrent (+) une certaine quantité de chaleur : c'est la chaleur latente "L" qui varie avec la température.

Chaque transformation a son inverse : toute quantité de chaleur absorbée par l'une est restituée par l'autre. Ainsi, la fonte de 1 kg de glace à 0° C en 1 kg d'eau à 0° C exige l'apport de  $334 \times 10^3$  Joules, (soit  $80 \times 10^3$  calories) donc la solidification de 1 kg d'eau à 0° C en 1 kg de glace à 0° C libère la même quantité de chaleur.

On remarquera que la chaleur latente de sublimation de la glace, passage direct de la phase solide à la phase vapeur est égale à la somme des chaleurs latentes de fusion et de vaporisation.

L (0°)	J. Kg <sup>-1</sup>	Calories. g <sup>-1</sup>	L (0°)
(-)			(+)
Fusion	$334 \times 10^3$	80	Solidification
Vaporisation	$2501 \times 10^3$	598	Liquéfaction
Sublimation	$2835 \times 10^3$	678	Condensation
			Solide

## I - 2 La saturation

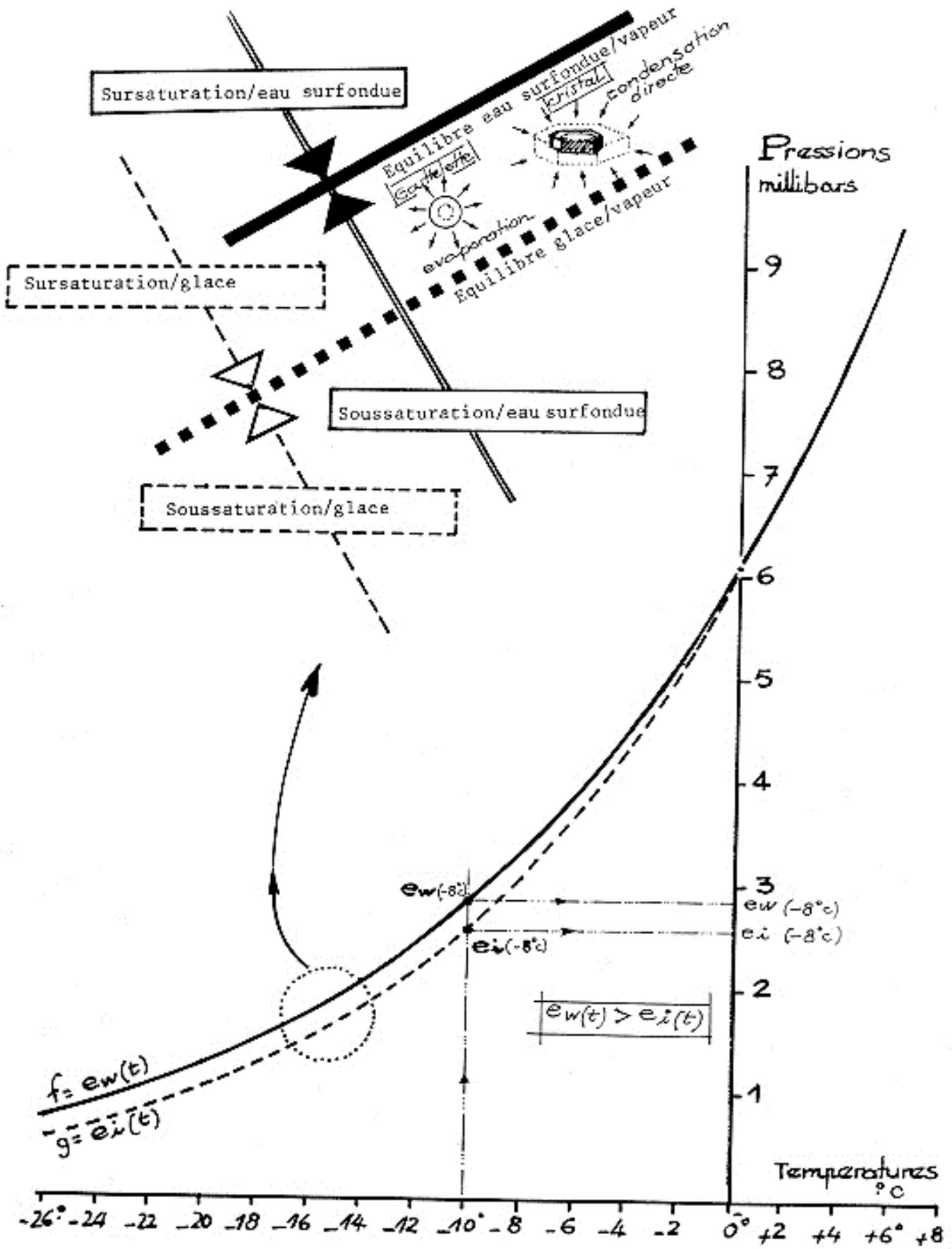
Dans la nature, l'eau existe sous trois phases. L'état liquide et solide nous sont familiers. La phase gazeuse l'est beaucoup moins : c'est la vapeur d'eau, gaz invisible qui est l'un des constituants de l'air que nous respirons. La vapeur d'eau ne doit pas être confondue avec le "brouillard" qui s'échappe d'une casserole d'eau en ébullition. Ce nuage constitué de microgouttelettes d'eau est le témoin d'une phase condensée donc de l'état liquide.

Les trois principales sources de la vapeur sont :

- l'évaporation (vaporisation) des plans d'eau liquides,
- la sublimation des champs de neige, des glaciers, des banquises,
- l'évapotranspiration des végétaux.

Imaginons une étendue d'eau parfaitement plane, surmontée d'un volume fini d'air sec. L'évaporation de l'eau suppose un apport d'énergie qui détruit les liaisons entre les molécules d'eau liquide, constituées d'un atome d'oxygène uni à deux atomes d'hydrogène. L'agitation moléculaire qui en découle permet aux molécules d'eau de s'échapper dans l'air. Celui-ci s'enrichit en vapeur d'eau et devient plus humide. Ces molécules ont une masse et exercent une pression partielle,  $e$ , exprimée en millibars. Cette pression de vapeur croît avec le nombre de molécules jusqu'à un état d'équilibre pour lequel il y a autant de molécules qui s'échappent de la phase liquide ou qui y retournent. Cet état d'équilibre correspondant à une pression de vapeur maximale ou saturante  $e_w$  est fonction de la température. Aussi, un volume d'air pourra absorber d'autant plus de vapeur d'eau que sa température sera élevée.

<b>Quantité maximale de vapeur d'eau en grammes par m<sup>3</sup> d'air saturé par rapport à l'eau <math>Q_w</math> et à la glace <math>Q_i</math></b>											
<b>T</b>	- 20°	-18°	- 16°	-14°	- 12°	- 10°	- 8°	- 6°	- 4°	- 2°	0°
<b><math>Q_w</math></b>	1,08	1,29	1,50	1,74	2,04	2,38	2,74	3,16	3,65	4,21	4,83
<b><math>Q_i</math></b>	0,89	1,08	1,28	1,52	1,81	2,15	2,53	2,99	3,52	4,13	4,83



\* COURBES DES PRESSIONS DE VAPEUR SATURANTE

Pour une température donnée, on définit donc une pression de vapeur saturante  $e_w(t)$  par rapport à une surface plane d'eau liquide. Dans un diagramme pression de vapeur/température, la courbe  $e_w(t)$  est définie même à des températures négatives : l'eau surfondue, c'est-à-dire liquide à des températures négatives, est un phénomène courant dans l'atmosphère.

Lorsque pour une température donnée, la pression partielle de vapeur d'eau d'un volume d'air atmosphérique atteint  $e_w(t)$  on dit que l'air est saturé. De la même manière que par rapport à l'eau, on définit une tension de vapeur saturante par rapport à la glace. À température négative, un bloc de glace, un champ de neige, en contact avec un air sec, se "sublime" : il y a passage direct de l'état solide à l'état de vapeur des molécules d'eau. Les quantités de chaleur requises sont plus importantes mais le mécanisme est le même que pour l'évaporation. Seule la masse des molécules mises en jeu pour atteindre l'équilibre est plus faible pour la glace que pour l'eau liquide. Aussi, à une température donnée, un même volume d'air sera saturé par rapport à la glace et sous saturé par rapport à l'eau liquide, ce qui implique :  $e_w(t) > e_i(t)$ . L'écart  $(e_w - e_i)$  atteint son maximum à  $-11,8^\circ \text{C}$  et vaut :  $0,27 \text{ mb}$ .

La relation  $e_w(t) > e_i(t)$  est fondamentale pour le mécanisme de formation des cristaux de neige. En effet, une particule d'air atmosphérique peut être en état de sous saturation par rapport à l'eau liquide et en sursaturation par rapport à la glace. Supposons que dans cette particule, une gouttelette d'eau et un cristal de glace coexistent :

- l'équilibre liquide-vapeur n'est pas atteint. La gouttelette d'eau, en atmosphère non saturée s'évapore.

- l'équilibre glace-vapeur est dépassé. Le cristal de glace en atmosphère sursaturée s'enrichit par dépôt de glace, directement de la phase vapeur à la phase solide.

La gouttelette d'eau disparaît et le cristal de glace grossit.

Pour mesurer le degré de sursaturation d'une masse d'air on utilise des hygromètres. Ceux-ci indiquent une "humidité relative", exprimée en %, et définie par le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau de la masse d'air considérée et la pression de vapeur saturante à la température de l'air.

$$U\% = 100 \frac{e}{e_w(t)}$$

Ainsi, dans le cas d'un air absolument sec, sans trace de vapeur d'eau :

$$e = 0 \text{ et } U = 0\%$$

Dans le cas d'un air saturé en vapeur d'eau et à la température  $t$ ,

$$e = e_w(t) \text{ et } U = 100\%$$

On peut définir une humidité relative par rapport à la glace :

$$U_{i(\%)} = 100 \frac{e}{e_i(t)}$$

La relation  $e_w(t) > e_i(t)$  et le fait que les hygromètres courants soient étalonnés par rapport à l'eau liquide expliquent pourquoi, en montagne, un hygromètre indiquera une humidité relative inférieure à 100 % dans le cas d'une chute de neige à température négative.

### **I- 3 La condensation**

On vient de voir qu'un volume d'air amené à saturation pouvait contenir une quantité maximale de vapeur d'eau : ( $U = 100 \%$ ), et que, théoriquement, tout surplus de vapeur se traduit par l'apparition de la phase liquide ou solide.

Cependant, si la masse d'air a été préalablement débarrassée de toutes ses impuretés, de toutes ses poussières en suspension, la sursaturation peut atteindre 400 % avant que n'apparaisse la phase liquide.

Dans les conditions normales de saturation, la condensation sous la forme de microgouttelettes n'apparaît qu'en présence de certaines poussières ou particules en suspension, appelées noyaux de condensation.

Ces noyaux, sur lesquels apparaît la phase condensée, sont d'origine diverses :

- poussières naturelles : les plus efficaces sont les cristaux de sel marin,
- poussières industrielles : il est bien connu qu'elles favorisent la formation de brouillards.

→ **Les noyaux de condensation** : leur efficacité permet d'en distinguer deux espèces :

a) les gros noyaux : dont le diamètre varie de 0,2 à 10  $\mu\text{m}$  se rencontrent dans les basses couches de l'atmosphère (jusqu'à 3000/~4000m). Ils agissent dès que le seuil de saturation est atteint, et même en état de sous saturation pour certains d'entre eux, tels les cristaux de chlorure de sodium en raison de leur hygroscopie.

b) les petits noyaux : dits d'Aitken, dont le diamètre est inférieur à 0,2  $\mu\text{m}$ . Ils prédominent en altitude et leur activité retardée engendre des saturations importantes.

## **II - GENÈSE DES CRISTAUX DE NEIGE DANS LE NUAGE**

### **II -1 Le milieu nuageux**

Les gouttelettes résultant de la condensation ont des rayons de l'ordre de  $10^{-3}$  à 0,2  $\mu\text{m}$ . Le diamètre des gouttelettes observées dans les nuages est en moyenne de 4 à 10  $\mu\text{m}$  avec une plage de variation de 2 à 50  $\mu\text{m}$ . Examinons les processus capables de provoquer ce grossissement.

a) La coalescence, c'est-à-dire la réunion de plusieurs gouttelettes en une seule, soit par effet de choc, soit par effet de charges électriques de polarité inverses.

b) Les transferts de vapeur qui provoquent l'évaporation et la disparition de certaines gouttelettes au profit d'autres qui grossissent. Deux actions peuvent expliquer ce phénomène.

→ **Effet de courbure** : la tension de vapeur saturante  $e_w$  est fonction décroissante du rayon :

Si  $r < R$ ,  $e_w(r) > e_w(R)$ . Donc, pour deux gouttelettes  $r$  et  $R$  mises en présence, la tension de vapeur saturante pour  $R$  ne l'est pas pour  $r$  et celle-ci s'évapore au profit de  $R$ .

→ **Effet de température** : la tension de vapeur  $e_w$  est fonction de la température.

Si  $t < T$ ,  $e_w(t) < e_w(T)$ . Pour deux gouttelettes qui ont une température  $t$  et  $T$ , la tension de vapeur saturante pour  $t$  ne l'est pas pour  $T$ . La moins froide des gouttelettes va s'évaporer au profit de la plus froide.

→ **Le diamètre des noyaux** : s'il s'agit de noyaux géants, de  $10 \mu\text{m}$  à  $20 \mu\text{m}$  ou plus, les gouttelettes seront d'autant plus grosses ; cependant ce phénomène est limité.

## II - 2 LES CRISTAUX DE NEIGE

Le processus de leur formation peut, schématiquement, se décomposer en deux phases :

a) La "naissance" des cristaux est liée à l'apparition, dans les nuages constitués de gouttelettes d'eau surfondue, de particules de glace, encore appelées germes ou embryons.

b) La "croissance" de ces germes se fait ensuite par transfert de vapeur. L'embryon se développe et grossit par dépôt de glace directement de la phase vapeur à la phase solide.

→ **naissance** : formation du "germe" ou "embryon".

On a vu précédemment que l'on définissait une pression de vapeur saturante par rapport à l'eau liquide à des températures négatives. L'eau surfondue est un état métastable fréquent en altitude. Ainsi, un nuage peut-être constitué de gouttelettes d'eau liquide jusqu'à  $-15^\circ \text{C}$ . De même que la condensation de la vapeur d'eau en fines gouttelettes, se réalise sur des noyaux de condensation, la surfusion ne cesse que par l'action de "noyaux de congélation". Ceux-ci ne deviennent vraiment efficaces que vers  $-12^\circ \text{C}$  et provoquent la congélation de certaines gouttelettes qui vont jouer le rôle de germe. L'analyse des prélèvements effectués au sein même des nuages a montré que le taux de concentration de germes était supérieur à celui des noyaux de congélation. L'explication proposée par certains auteurs (Hobbs et Alii) est celle du fractionnement de la gouttelette congelée. Cet "éclatement" se produirait soit par effet de choc, soit par une congélation homogène de la gouttelette : l'enveloppe de glace extérieure éclaterait lors de la progression du regel vers l'intérieur de la goutte.

Ces noyaux de congélation proviennent de cendres, sables et sels métalliques. Leur diamètre moyen est de l'ordre de  $0,1$  à  $10 \mu\text{m}$ . Leur structure cristalline ou du moins leur arrangement d'atomes superficiels est semblable à celui des atomes d'oxygène dans un cristal de glace. Leur action se traduit par une nucléation hétérogène par opposition à la nucléation homogène qui, elle, se produit en l'absence de tels noyaux, simplement à partir de l'eau pure, mais à la température très basse de  $-41^\circ \text{C}$  (congélation spontanée).

Selon certains auteurs (Nikandrov) la surfusion peut également cesser par coalescence entre deux gouttelettes suffisamment froides.

Dans les expériences de pluie provoquée (et non de pluie artificielle) onensemence le nuage avec des noyaux de congélation artificiels, efficaces à une température moins basse que le seuil de  $-12^{\circ}\text{C}$  ; l'iodure d'argent est actif dès  $-4^{\circ}\text{C}$ . On peut également provoquer une nucléation par refroidissement important : on utilise de la neige carbonique qui permet d'abaisser la température -  $40^{\circ}\text{C}$ .

En montagne, la formation du givre "opaque" surchargeant les superstructures telles que câbles et pylônes est due à la congélation, par effet de choc sur ces obstacles, de gouttelettes d'eau surfondue.

→ **croissance** : dans les nuages, si la sursaturation par rapport à l'eau est rarement supérieure à 1 %, elle correspond à des sursaturations par rapport à la glace de 10 % à  $-10^{\circ}\text{C}$  et de 21 % à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Dans un nuage où coexistent germes de glace et gouttelettes d'eau surfondue, il se produit une diffusion de vapeur vers le cristal de glace qui se développe par cristallisation directe de la vapeur d'eau. Cette diffusion, dont le moteur est un gradient de pression de vapeur, rompt l'équilibre au niveau de la gouttelette entre la phase liquide-vapeur. Il y a évaporation de la gouttelette au profit du cristal qui grossit ~jusqu'au moment de sa chute. C'est Bergeron, qui en 1933 a émis cette hypothèse pour expliquer le mécanisme de déclenchements des précipitations dans un nuage à température négative.

Cette croissance va s'opérer très rapidement d'abord (quelques  $\mu\text{g}$  en 30 minutes) puis plus lentement.

Dans la tranche d'atmosphère où se forment les germes, les conditions de pressions et de température font que seule une cristallisation de la glace de structure  $I_h$  (hexagonale) est possible. Dans cette structure, chaque atome d'oxygène est relié par une liaison hydrogène à 4 atomes d'oxygène de façon à réaliser un empilement d'hexagones de type chaise, assez proche de l'hexagone plat. Cette Liaison confère à l'ensemble une symétrie hexagonale que l'on retrouve à échelle macroscopique dans la très grande diversité de formes que présentent les cristaux arrivés au terme de leur croissance. Une simple loupe suffit pour découvrir ces formes merveilleuses et variées à l'infini. Si l'on examine plus attentivement des échantillons de neige fraîche, il est possible de regrouper tous les types de cristaux en une dizaine d'espèces et d'en distinguer trois grandes familles.

### III. LES PRINCIPAUX TYPES DE CRISTAUX DE NEIGE

#### III - 1 Les "Monocristaux" :

- Plaquettes
- Étoiles
- Aiguilles
- Colonnes

→ **Les plaquettes** : elles se présentent sous forme d'hexagones plans, dont la surface est lisse ou striée. Leur épaisseur (quelques dizaines de microns) est très faible par rapport à leur diamètre (quelques mm). Elles se forment vers  $-12^{\circ}$  C et  $-18^{\circ}$  C.

→ **Étoiles** : ces cristaux possèdent 6 axes de symétrie et sont constitués de 6 dendrites qui se sont développées dans un même plan autour d'un noyau central et qui sont d'autant plus ramifiées que la saturation est importante. Elles se forment entre  $-13^{\circ}$  C et  $-18^{\circ}$  C. Leurs dimensions sont très variables : de 0,5 à 7 - 8 mm.

→ **Colonnes** : Elles ont l'aspect de prismes de section hexagonale. Le rapport de leur longueur à leur diamètre est compris entre 1 et 5. On distingue deux types de colonnes :

- Colonnes solides (ou pleines) qui se forment dans un état proche de la saturation par rapport à la glace.

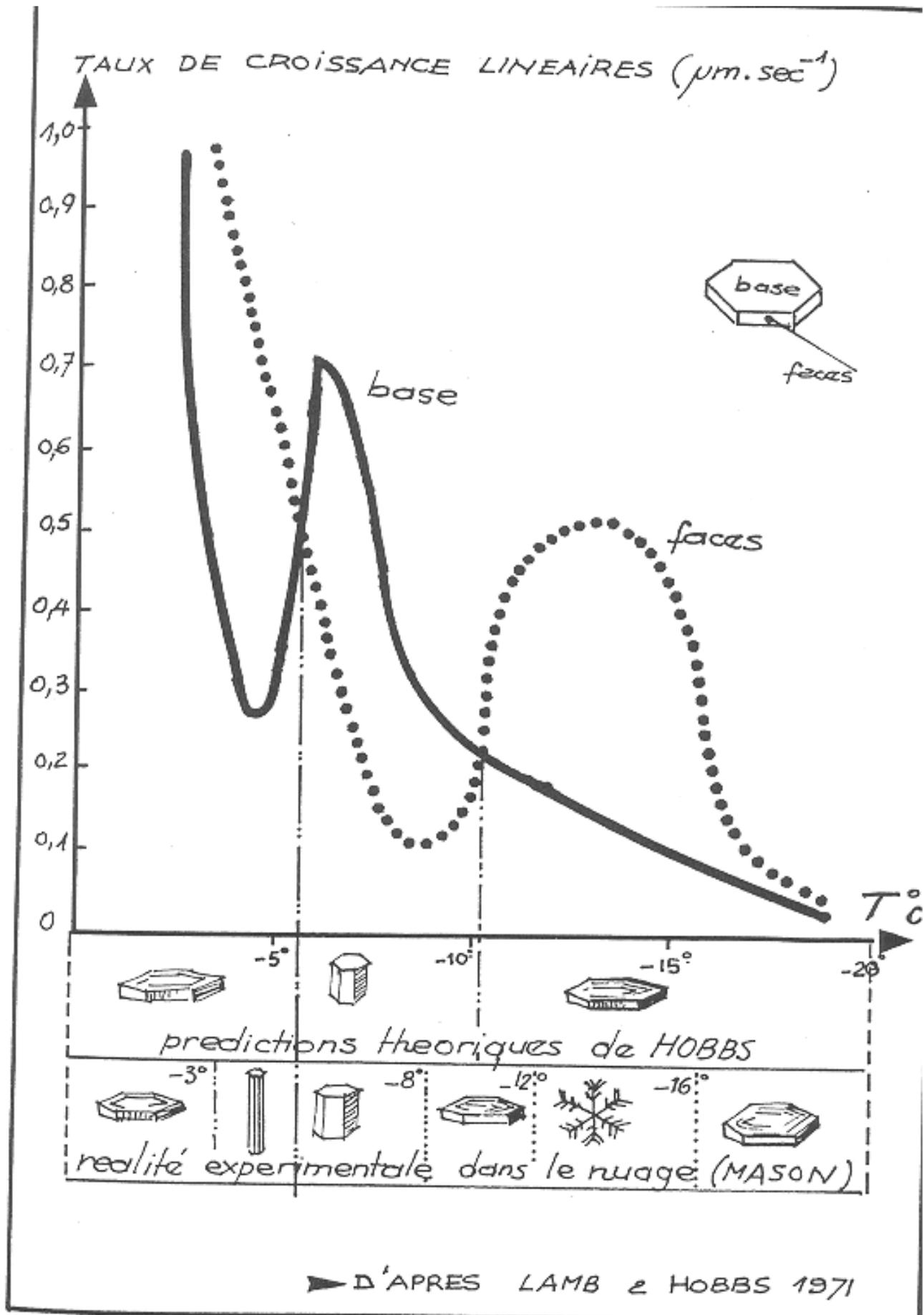
- Colonnes creuses qui se forment dans des conditions de forte sursaturation.

→ **Aiguilles** : bâtonnets dont la section est quelquefois hexagonale. Le rapport longueur/diamètre est supérieur à 5. Comme les colonnes, les aiguilles peuvent être creuses ou pleines. Elles se forment à des températures comprises entre  $-4^{\circ}$  C et  $-8^{\circ}$  C et par forte humidité.

Les études réalisées sur les phénomènes de croissance, notamment par Hobbs, Lamb et Mason, ont montré que le type de cristal dépendait essentiellement de la température. En effet, sur le germe initial, les vitesses de croissance sont différentes pour la base, les faces latérales et les arêtes et dépendent uniquement de la température. Le taux de sursaturation n'intervient que pour l'accroissement massif du cristal.

(Voir schéma)

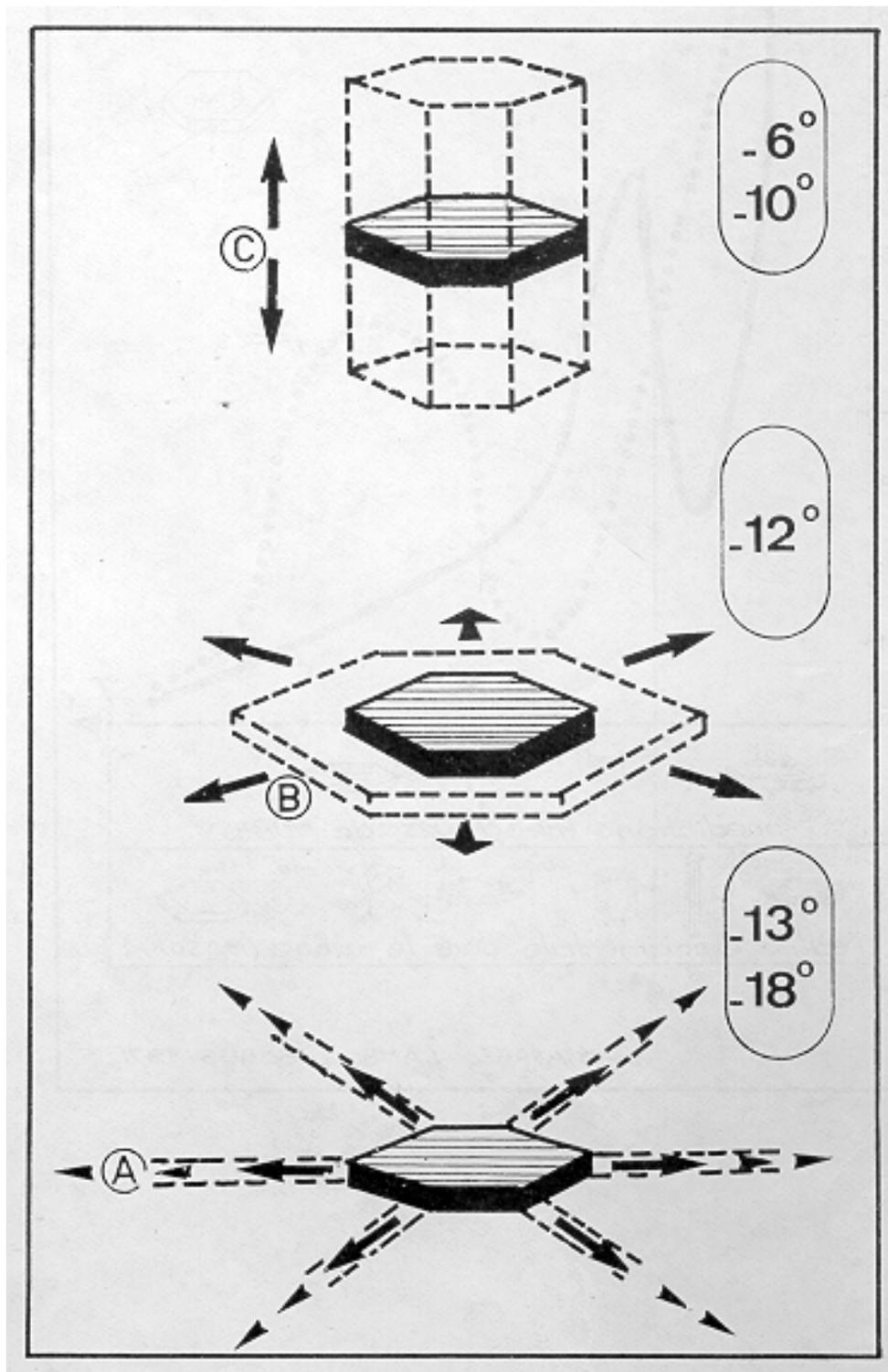
SHÉMA TAUX DE CROISSANCE LINÉAIRE



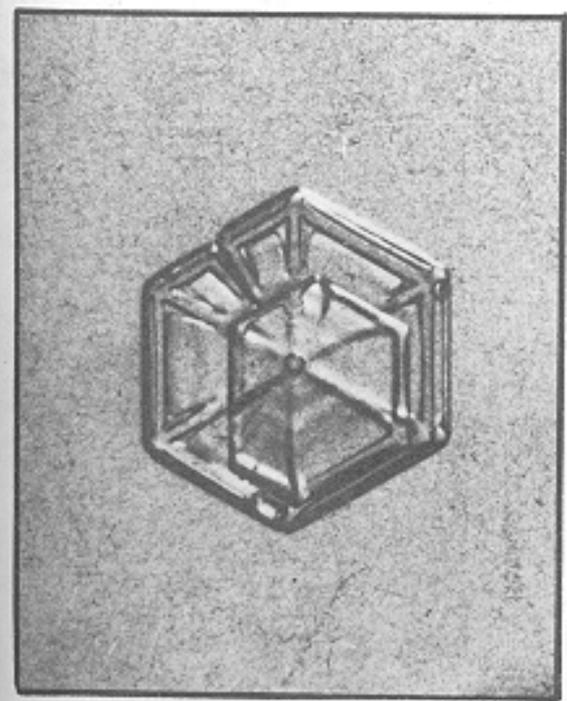
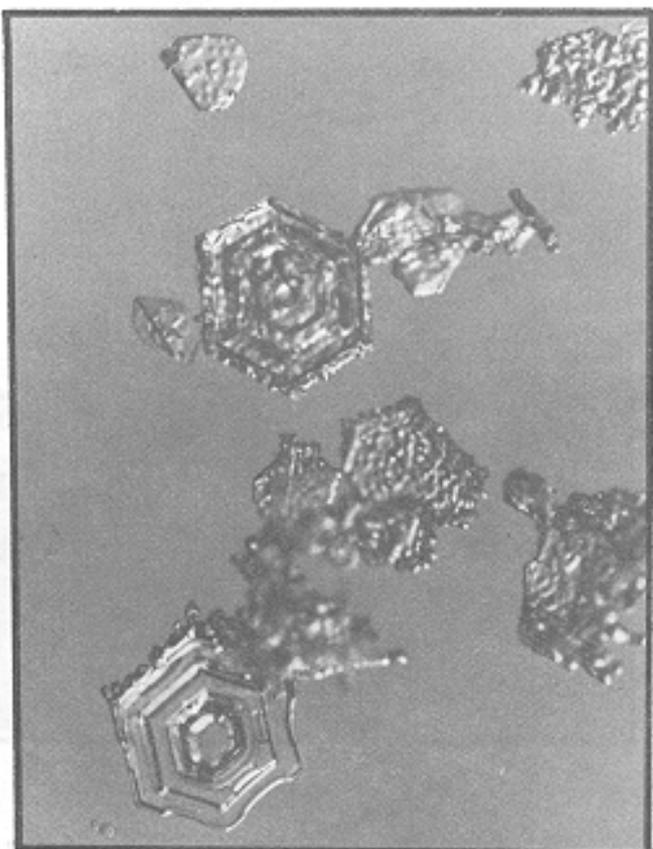
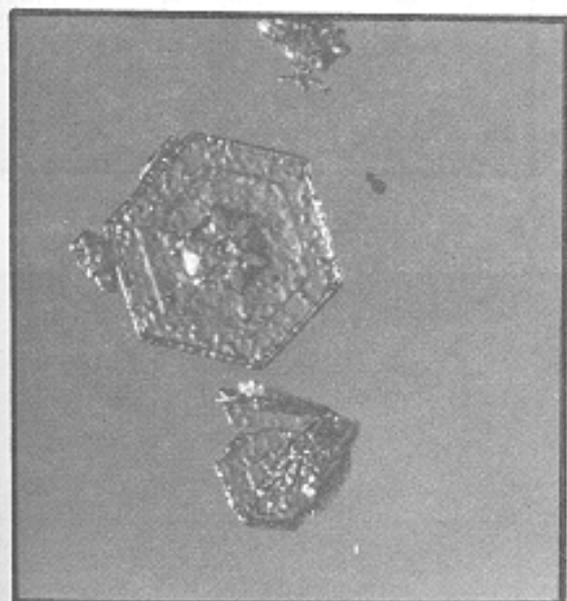
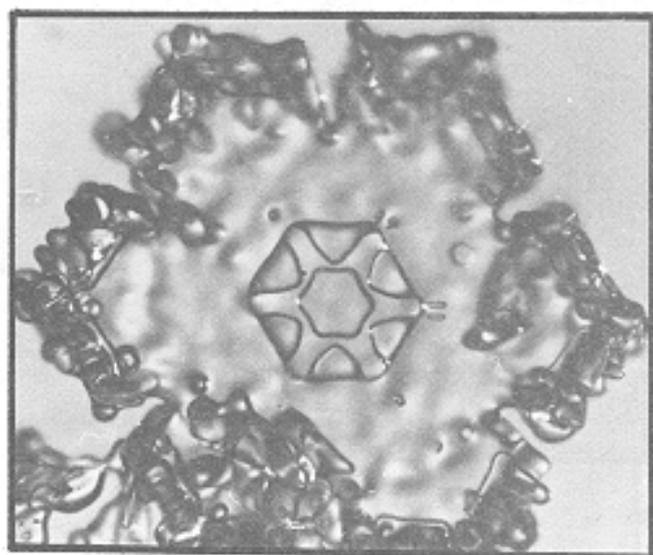
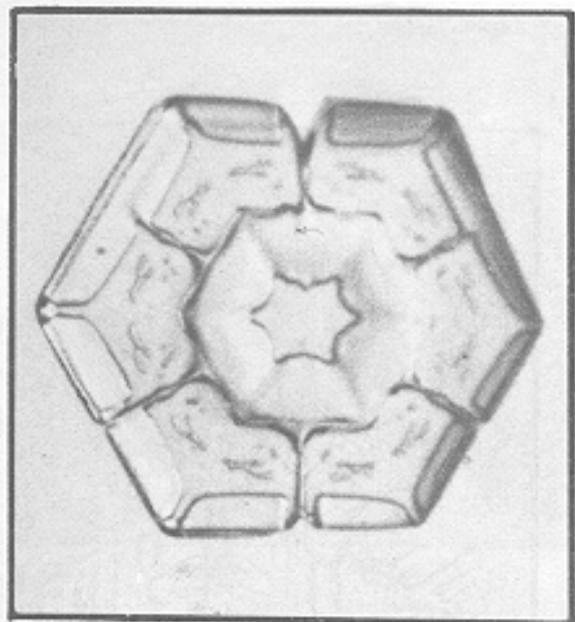
Entre  $-6^{\circ}\text{C}$  et  $-10^{\circ}\text{C}$ , la croissance se fait surtout suivant la direction (C) et aboutit à une forme d'aiguilles ou de colonnes hexagonales.

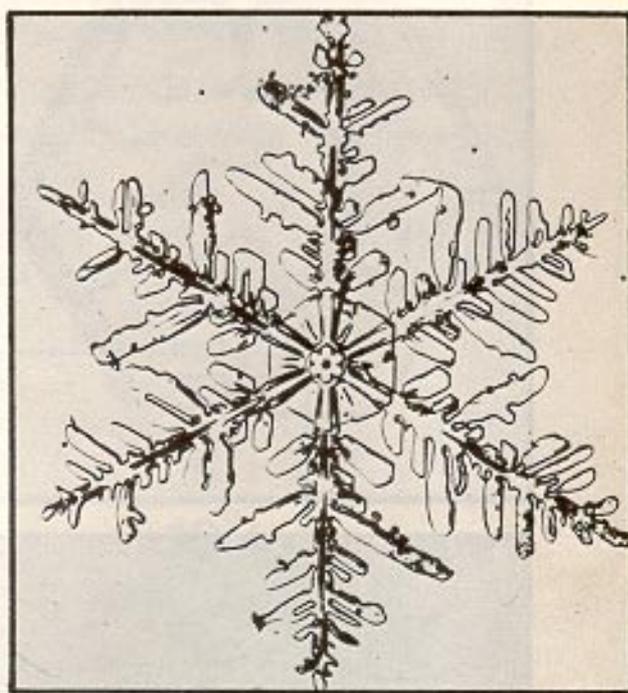
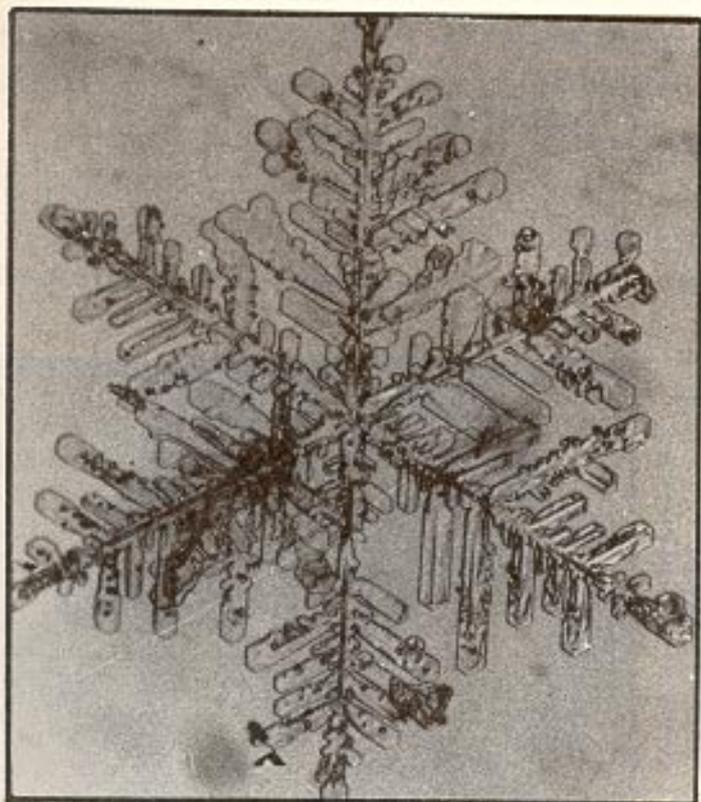
Vers  $-12^{\circ}\text{C}$ , la direction (B) l'emporte et conduit à une forme d'hexagone plan de faible épaisseur (plaquette).

Entre  $-13^{\circ}\text{C}$  et  $-18^{\circ}\text{C}$ , la croissance est plus rapide sur les arêtes (A) : des dendrites se développent et forment un cristal en étoile.

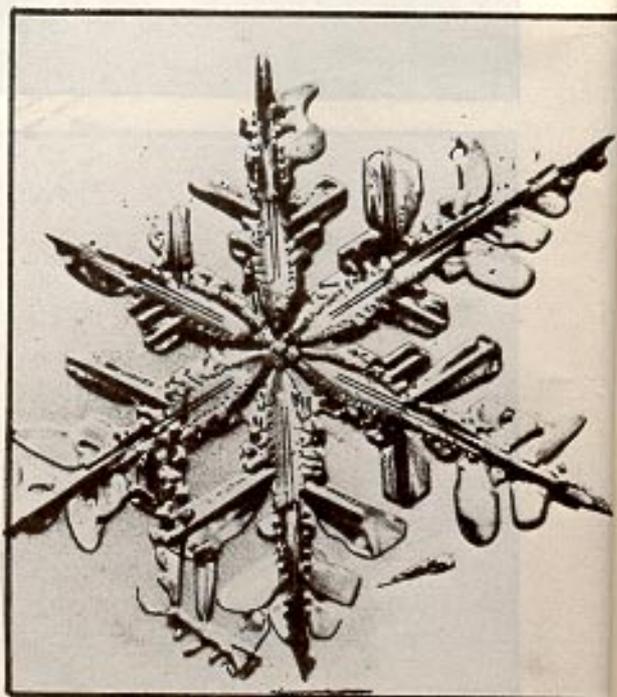
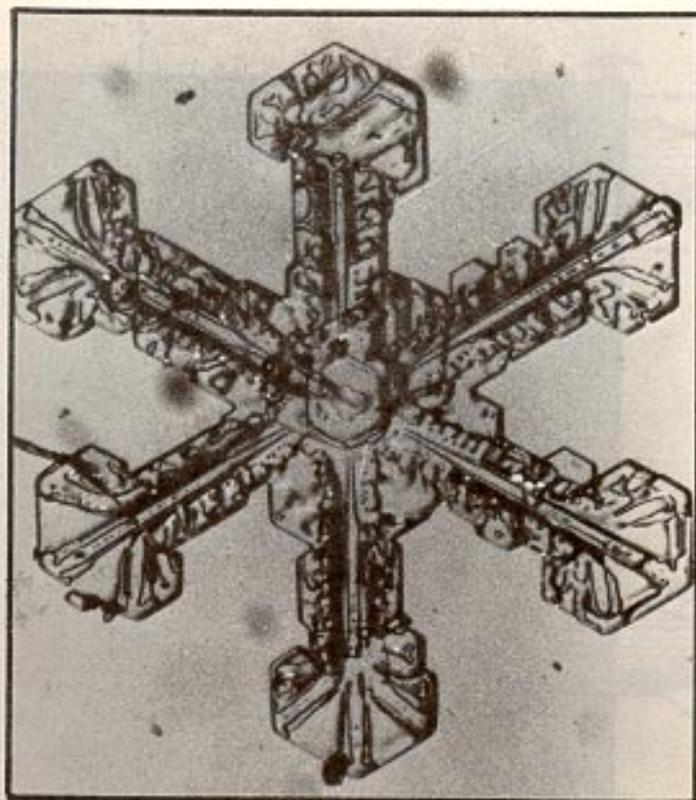


Plaquettes...



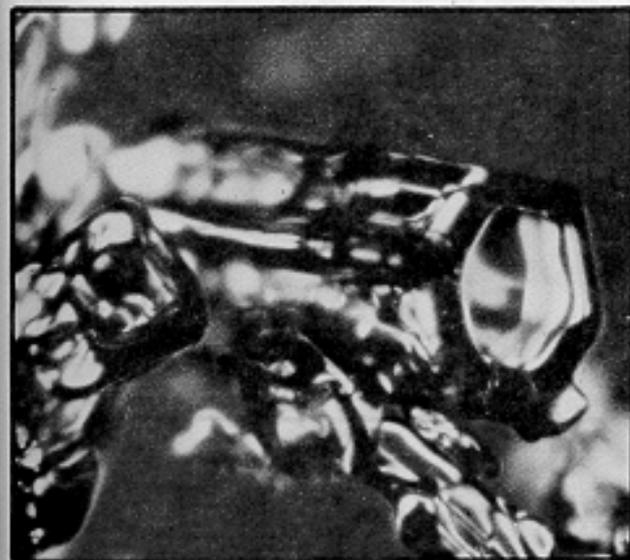
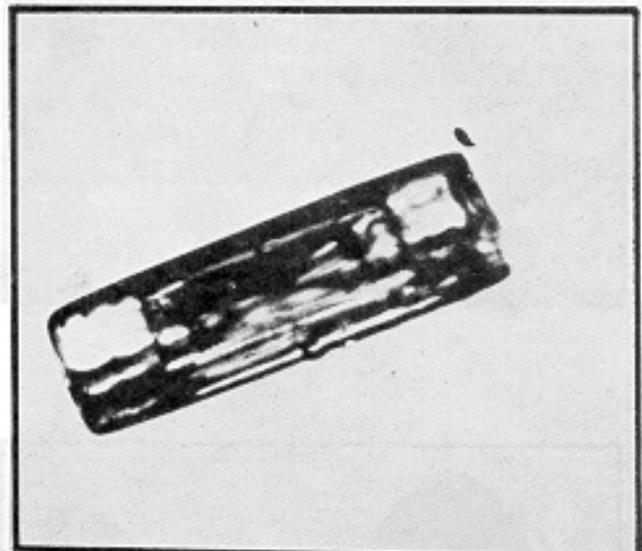
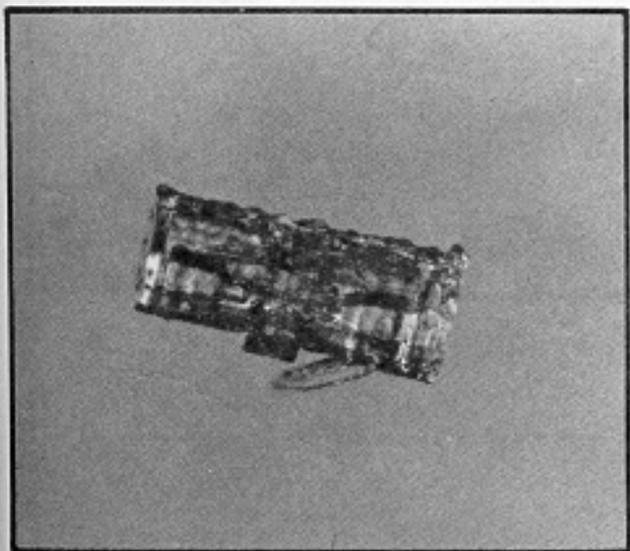
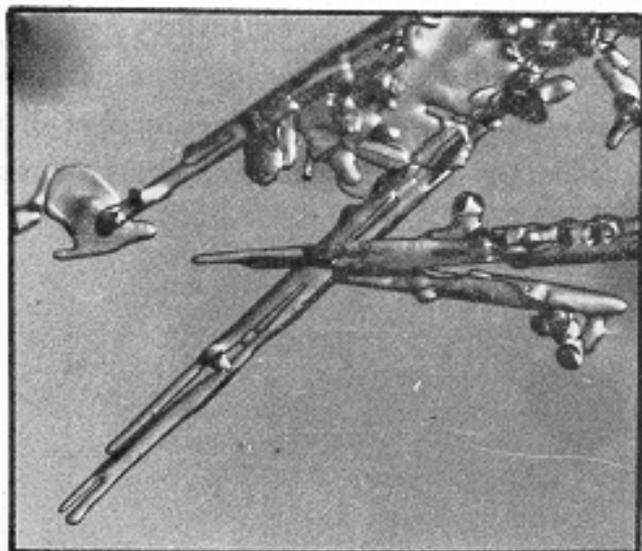
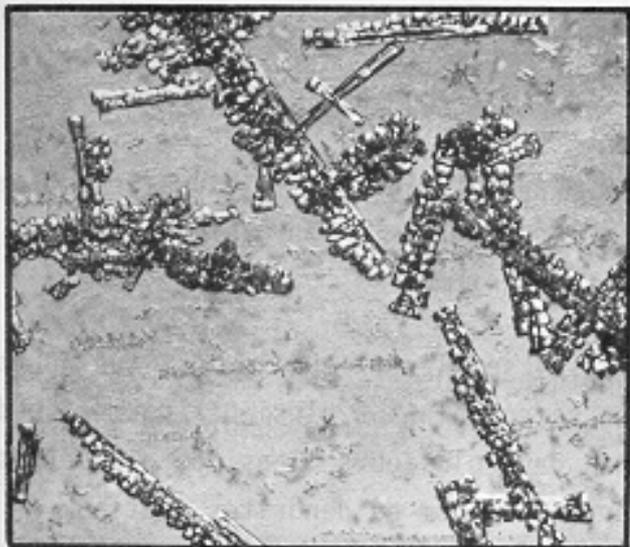


Etoiles...



III-2. Les "Aiguilles"

### Aiguilles



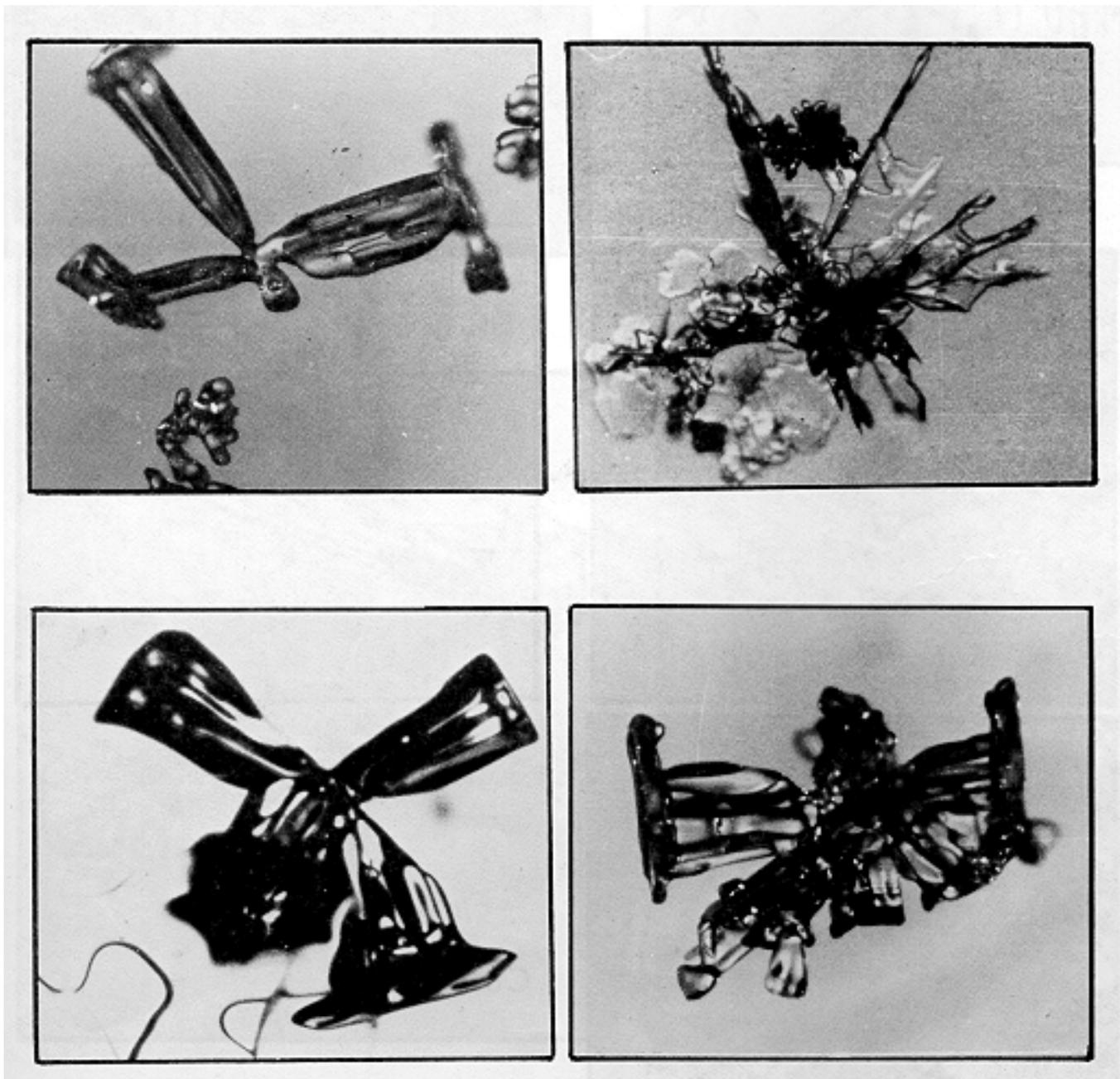
### Colonnes

### III - 2 Les "Polycristaux"

La surfusion d'une gouttelette persiste d'autant plus que le diamètre est petit. Jusqu'à  $-20^{\circ}\text{C}$ , les gouttelettes se congèlent en produisant 1 ou plusieurs germes sur lesquels croissent les "monocristaux".

À des températures inférieures à  $-20^{\circ}\text{C}$ , il semblerait que les petites gouttelettes encore liquides donnent naissance en se congelant à plusieurs germes soudés entre eux. Ce qui favorise le développement, dans plusieurs plans, de plaquettes, dendrites ou colonnes. Ces assemblages prennent le nom de dendrites spatiaux.

#### PHOTOS POLYCRISTAUX



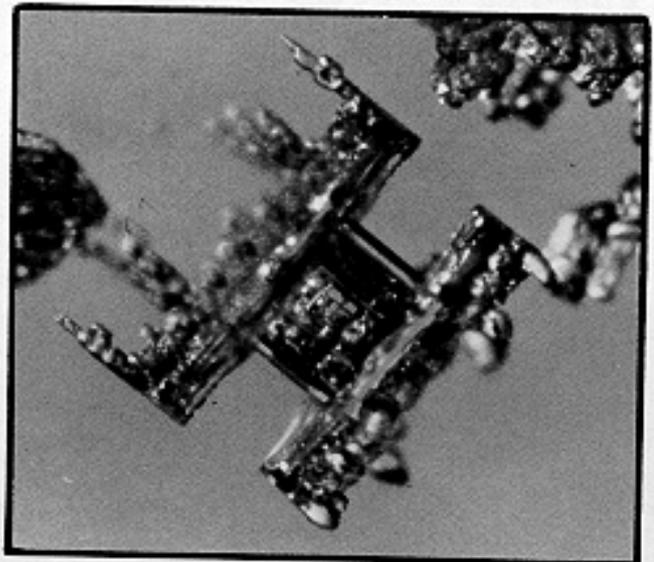
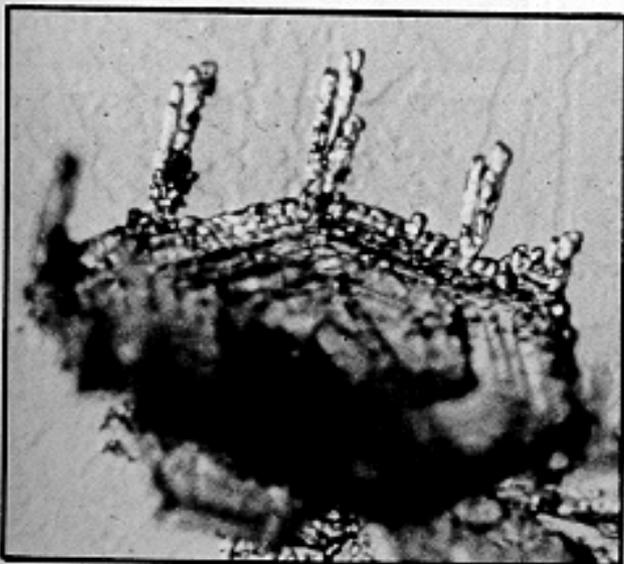
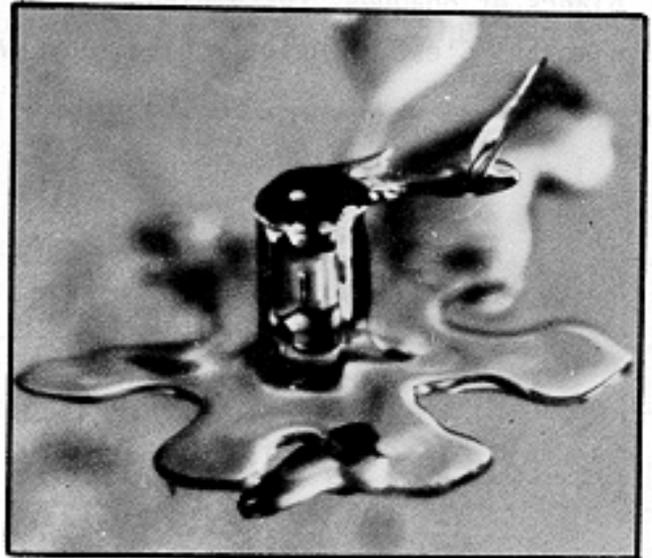
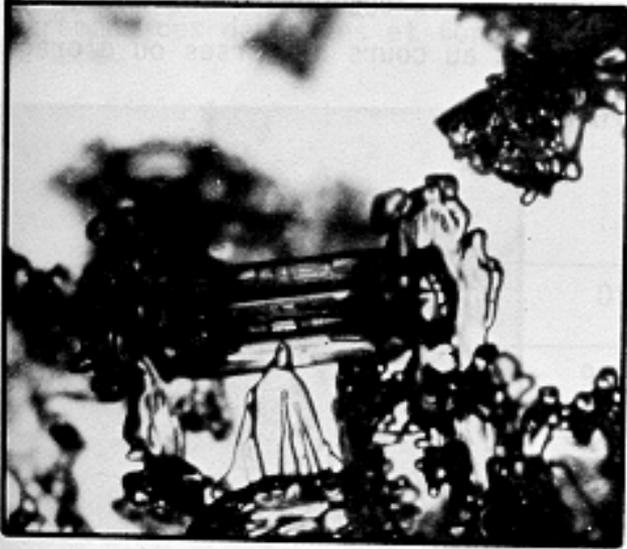
### III - 3 Les cristaux composites

Ce sont des combinaisons de plaquettes, de colonnes, d'étoiles ou de dendrites.

Les plus connus sont les "boutons de manchettes" composés de deux plaquettes ou étoiles formées à l'extrémité d'une colonne et perpendiculairement à l'axe central.

On observe également des plaquettes ou étoiles avec des excroissances dendritiques développées sur leurs sommets et dans un plan perpendiculaire.

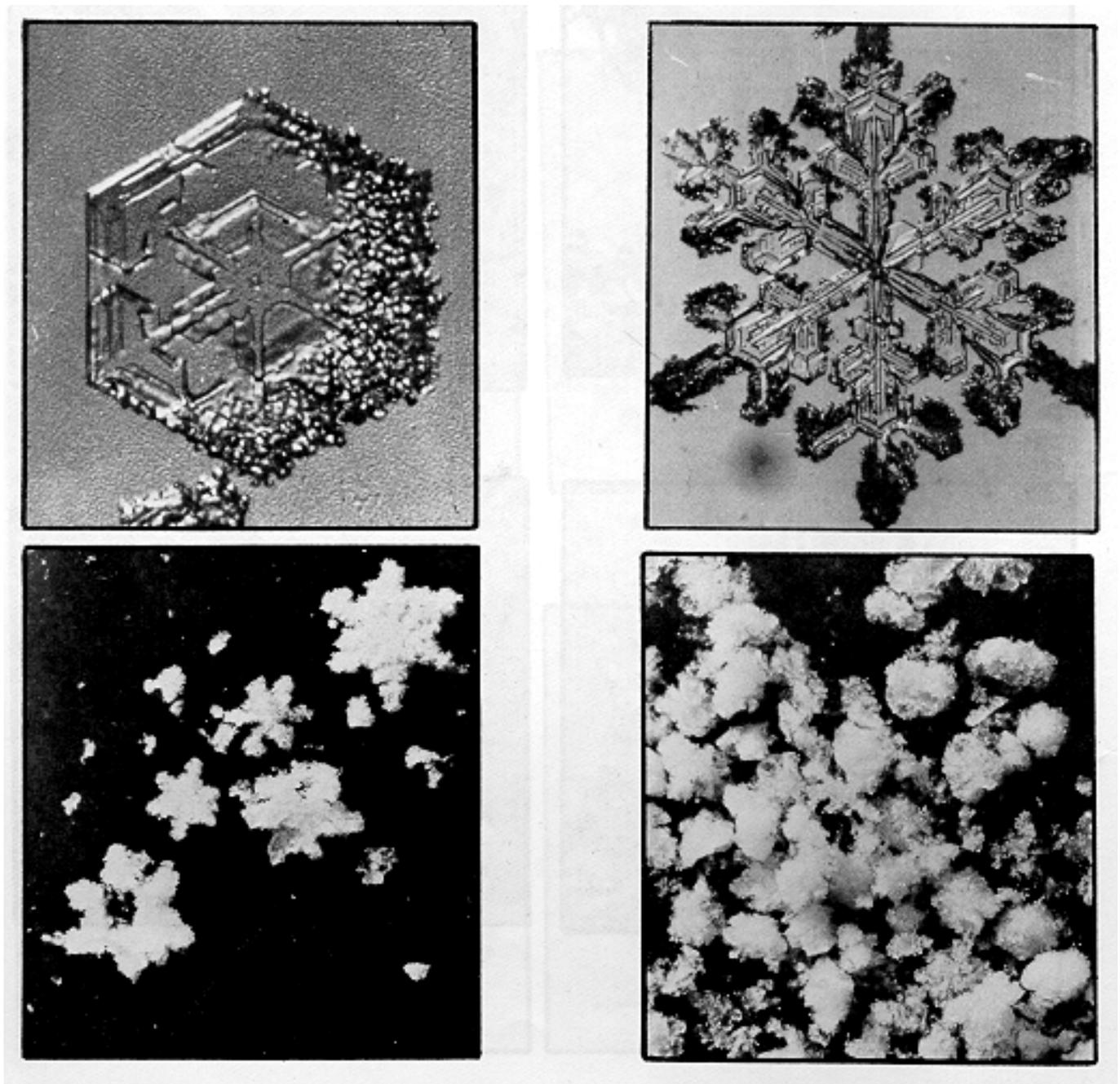
#### PHOTOS CRISTAUX COMPOSITES



### III - 4 Les cristaux givrés

Au cours de leurs mouvements au sein du nuage, les cristaux de neige peuvent capter des gouttelettes d'eau surfondue qui se congèlent instantanément à leur contact, en donnant un aspect grenelé à la surface. Si le phénomène est limité, les cristaux demeurent reconnaissables et translucides (cristaux partiellement ou entièrement givrés). Si l'instabilité est forte, dans les nuages de type Cumulus ou Cumulonimbus, un givrage intense se produit dans toutes les directions autour du cristal. Celui-ci se présente alors sous la forme de grains coniques ou sphériques, blancs et opaques, ressemblant assez, en dehors de la couleur, à des boules de mimosas. C'est la neige roulée, observée surtout au cours d'averses ou d'orages.

#### PHOTOS CRISTAUX GIVRÉS



### IV LA CHUTE DES CRISTAUX

Au cours de leur chute vers le sol, les cristaux de neige sont soumis aux effets de la température, de l'humidité et du vent.

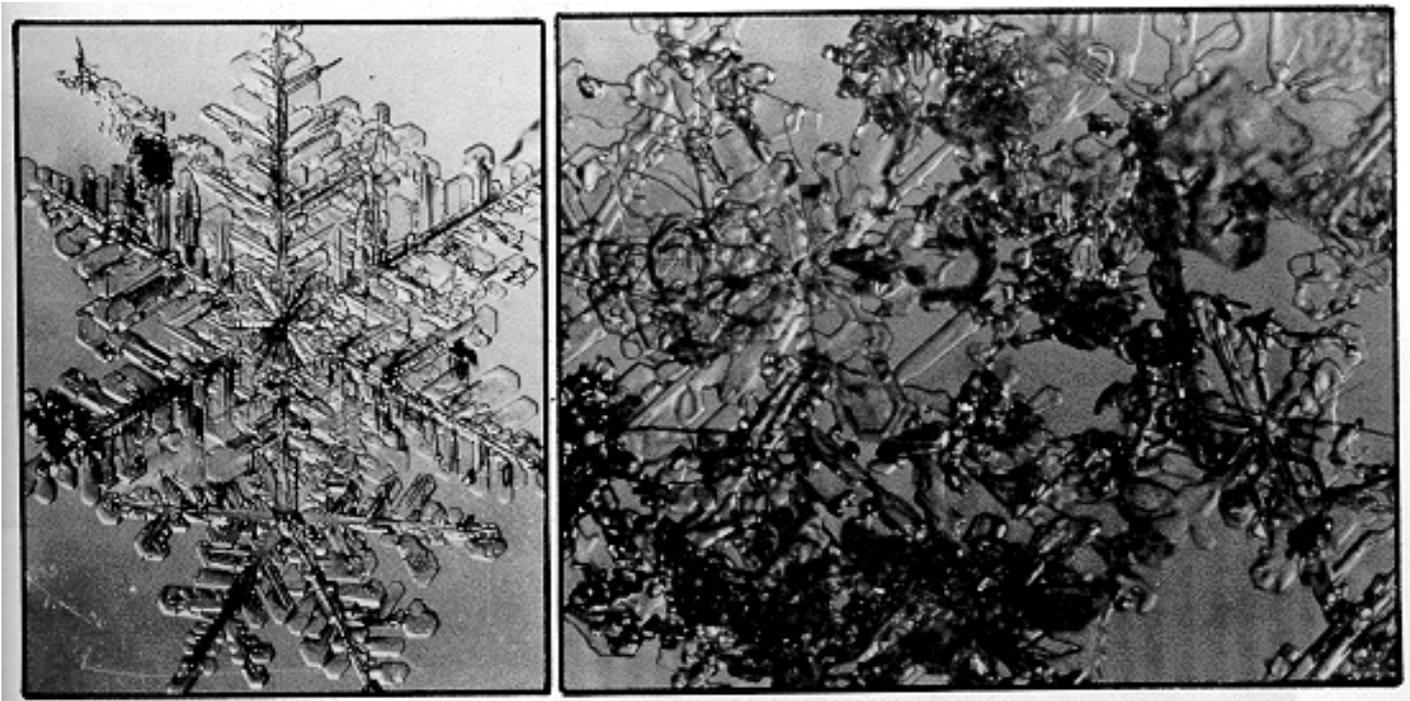
#### IV - 1 La température

Si celle-ci est négative ou proche de 0° C, les cristaux arrivent au sol. Par temps très froid, ils auront tendance à tomber isolément ou en légers flocons de quelques cristaux. Par temps doux, un début de fonte partielle favorise l'enchevêtrement des dendrites et forme des flocons plus importants et plus lourds.

Si la température est supérieure à + 3° C, + 4° C, alors leur fonte est totale et c'est la chute de pluie.

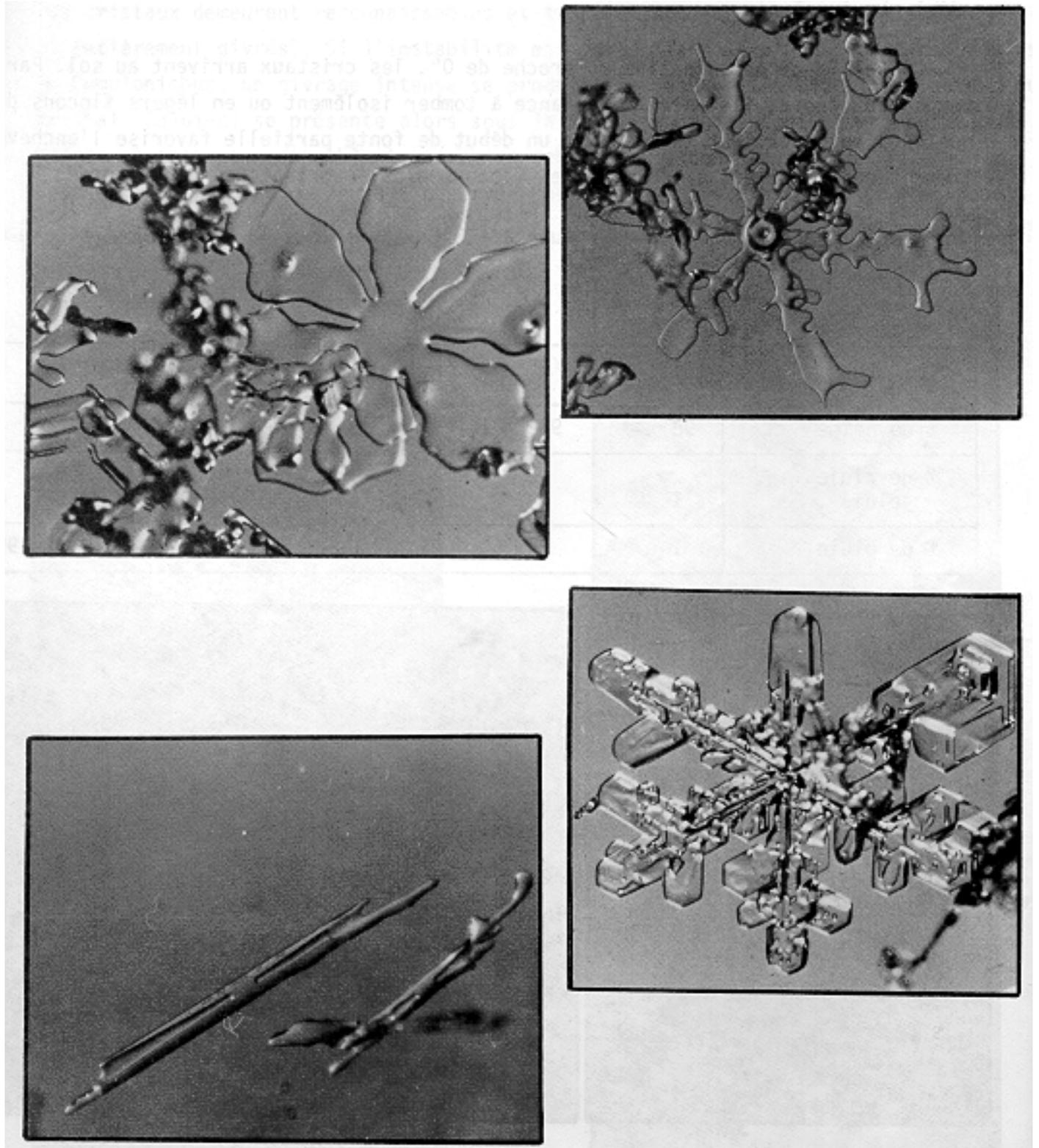
D'après M. LLIBOUTRY

Température au sol	-1°	0°	1°	2°	3°	4°
% de neige	98	93	50	30	8	1
% de pluie + neige	1	4	23	15	7	0
% de pluie	1	3	27	55	85	99



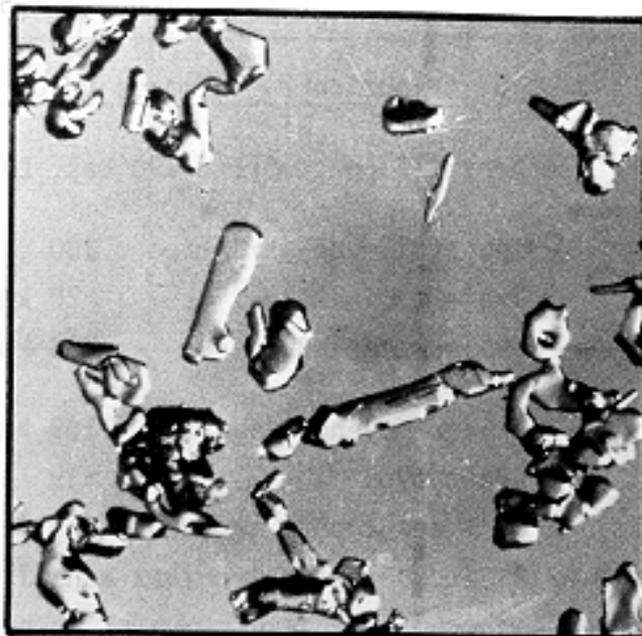
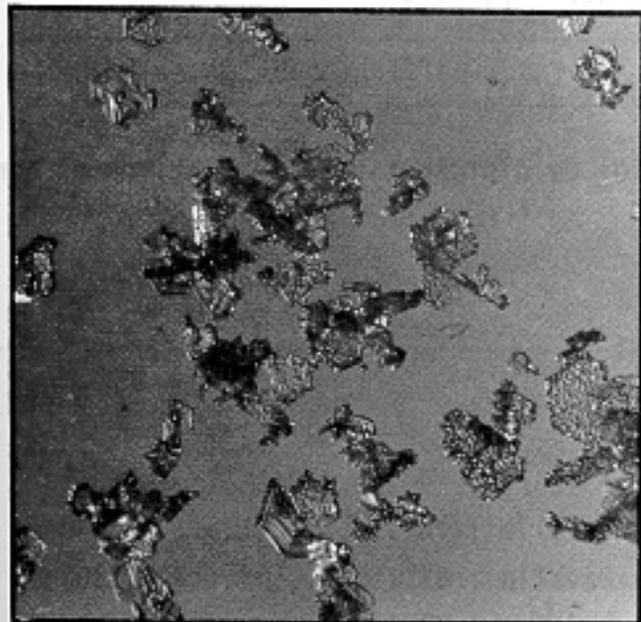
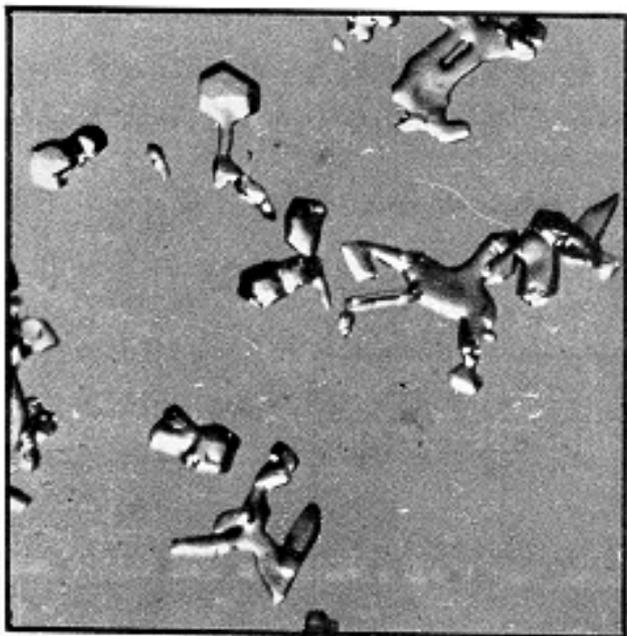
## IV - 2 L'humidité

Si la tranche d'air entre le nuage et le sol est en état de sous saturation, il se produit une sublimation partielle du cristal : les angles vifs s'émeussent et on observe des cristaux aux formes plus douces et parfois très dépouillées.



#### IV - 3 Le vent

C'est un agent très efficace de dislocation pour les fragiles édifices que sont les cristaux de neige. Les formes dendritiques sont les plus sensibles à cet effet mécanique du vent, doublé dans certains cas d'une accentuation de la sublimation. Les cristaux recueillis par grand vent sont brisés, fragmentés en particules parfois réduites à l'état de petits grains fins. (Neige ventée)



## V MASSE VOLUMIQUE DE LA NEIGE FRAICHE

Les mesures qui ont amené les quelques conclusions que nous exposons ont été faites au Col de Porte, à 1300 m d'altitude. Elle se rapporte à de la neige tombée depuis moins de 12 heures.

Le lieu des mesures étant bien abrité, il s'agit d'une neige peu ou non ventée. Tous les cas où la présence de pluie mêlée à de la neige était manifeste ont été éliminés, ainsi que ceux où la hauteur de la chute de neige était inférieure à 5 cm.

Compte tenu du tassement propre de la neige et du système de mesure (carottage et pesage), on peut considérer que les valeurs de densité sont estimées à moins de 5 % près.

### V - 1 Distribution des hauteurs de neige recueillies en 24 heures

Hauteurs (cm)	%
0 - 9	59
10 - 19	23
20 - 29	12
30 - 39	3
40 - 49	2
50 - $\geq$	1

Échantillonnage : 500 cas - (7 hivers)

### V - 2 Distribution de la masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )

L'échantillon comprend 190 cas. La loi de distribution est relativement normale.

- Intervalle de variation : 180
- valeur minimale :  $20 \text{ kg/m}^3$
- valeur maximale :  $200 \text{ kg/m}^3$
- Valeur moyenne :  $109 \text{ kg/m}^3$
- Écart type : = 39
- 68 % des cas se trouvent dans l'intervalle : 70.....148
- 95 % des cas se trouvent dans l'intervalle : 31.....187

On remarquera que la plage de variations de ce paramètre est très étendue.

La masse volumique de la neige déposée dépend principalement de 3 variables :

- a ) le type de cristaux de neige,
- b ) la température,
- c ) le vent.

### V - 3 Masse volumique et type de cristaux

On a vu que la neige pouvait être constituée de cristaux forts différents. On conçoit donc que, toutes choses étant égales par ailleurs, un volume déterminé de cristaux étoilés sera plus aéré, donc plus léger, que le même volume de grains de neige roulée. Il est donc intéressant de connaître la répartition de la densité en fonction de la nature des cristaux.

Bien que les différentes chutes de neige soient constituées le plus souvent de cristaux de types différents, on a pu cependant isoler 3 classes à partir de l'échantillonnage total : étoiles, particules irrégulières et neige roulée (les cas où il y a mélange étant exclus).

Les moyennes de la masse volumique établies pour chacune de ces 3 classes sont sensiblement différentes. Ainsi, la neige roulée est, en moyenne, deux fois plus lourde que la neige tombée sous forme d'étoiles.

<b>Échantillon total</b>	$\rho = 109 \text{ kg/m}^3 \quad n = 190$
+ Étoiles	$\bar{\rho}_1 = 67 \text{ kg/m}^3 \quad n = 23$
λ Particules irrégulières	$\bar{\rho}_2 = 108 \text{ kg/m}^3 \quad n = 30$
Δ Neige roulée	$\bar{\rho}_3 = 118 \text{ kg/m}^3 \quad n = 24$

### V - 4 Masse volumique et température

Il n'existe pas de liaison simple entre la masse volumique de la neige fraîche et la température de l'air sous abri pendant la durée de la chute. Pour une même température, les valeurs de  $\rho$  sont très dispersées (coefficient de corrélation linéaire entre les deux paramètres :  $r = 0,53$ ).

Toutefois, il est intéressant de noter que cette dispersion modérée à basse température s'accroît rapidement quand la même température tend vers  $0^\circ \text{C}$ . La neige devient alors plus humide, c'est-à-dire que sa teneur en eau liquide augmente.

Cependant, pour fixer les idées, on peut définir une zone limitée par deux courbes qui représentent les valeurs maximales et minimales que peut prendre la densité de la neige pour une même température.

Température de l'air	$\rho$ Max. kg/m <sup>3</sup>	$\rho$ Min. kg/m <sup>3</sup>
- 13° C	47	20
- 10° C	63	28
- 7,5° C	92	42
- 5° C	130	57
- 2,5° C	170	75
0° C	200	92

### V - 5. Masse volumique et vent.

Par son action mécanique qui disloque les cristaux et accroît la compacité de la neige déposée, le vent favorise les densités élevées.

Bien que le lieu de mesures soit assez abrité, les prélèvements effectués ont montré l'effet du vent. Mais, comme  $\sim$  la température, la liaison vent-densité est très ouverte ( $r = 0,40$ ).

Ce type de liaison s'améliore nettement si la densité est considérée comme fonction de 2 variables : température et vent. On trouve ainsi une relation empirique de la forme :

$$\rho = A + B\theta + C\sqrt{u}$$

$$\rho = 109 - 8,0|\theta| + 26\sqrt{u}$$

$$r = 0,79$$

$$\rho : \text{en kg/m}^3$$

$|\theta|$  : valeur absolue de la température sous abri pendant la chute

$$\theta \leq -1^\circ, 0^\circ \text{ C}$$

$u$  : vent moyen pendant la chute, en m/s, avec  $u \leq 5$  m/s

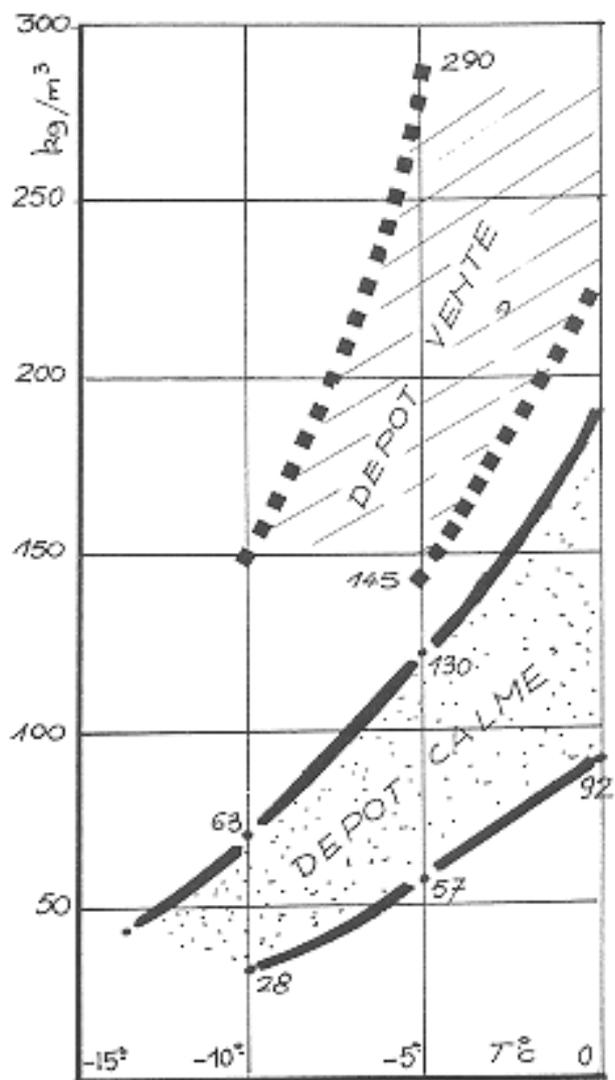
Pour des valeurs de vent moyen supérieures à 5 m/s et dans une gamme de température de 0° C à - 10° C, Laurent REY (brochure "La neige, ses métamorphoses, les avalanches") a mesuré les masses volumiques suivantes :

$$0^\circ \text{ C} = \rho \approx 250 \text{ kg/m}^3$$

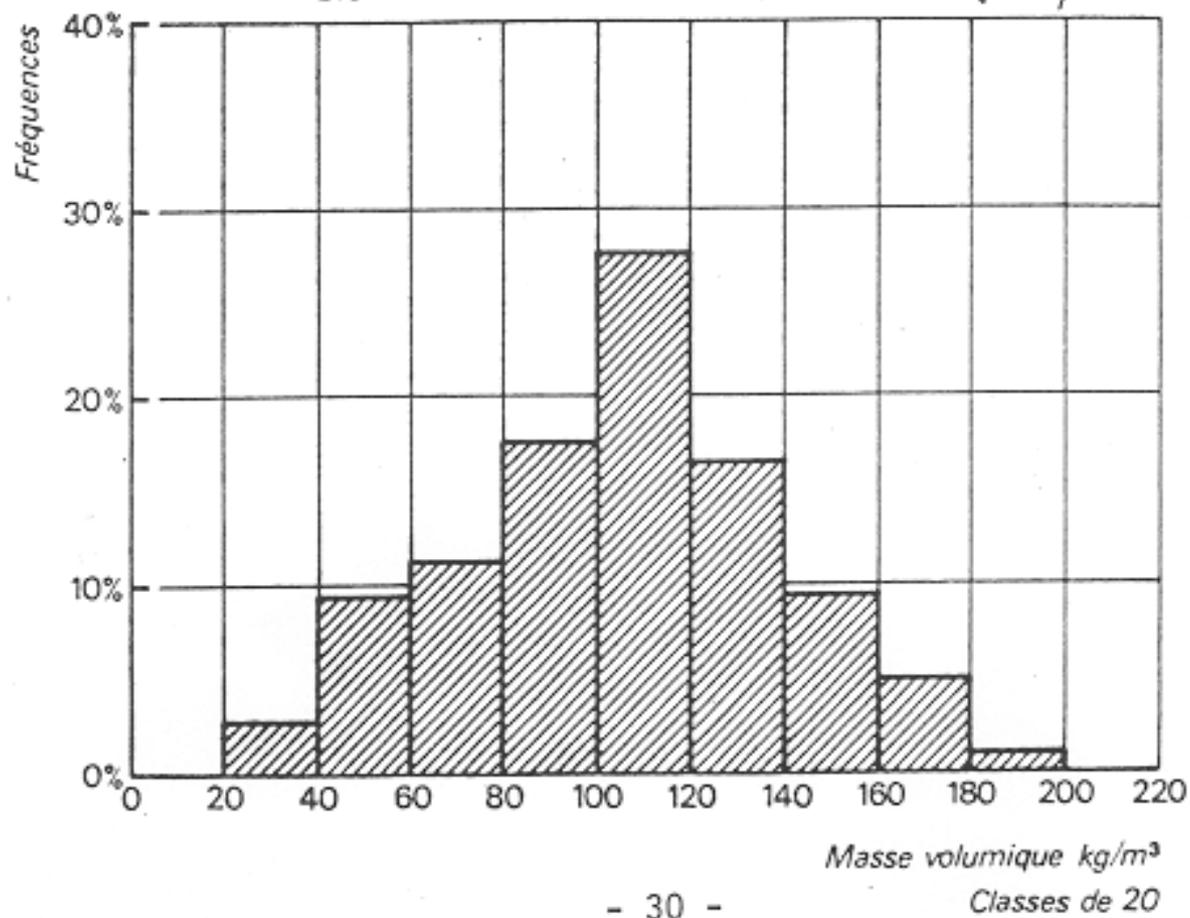
$$- 5^\circ \text{ C} = \rho = 145 \text{ à } 290 \text{ kg/m}^3$$

$$-10^\circ \text{ C} = \rho \approx 150 \text{ kg/m}^3$$

# EFFET DE LA TEMPÉRATURE ET DU VENT SUR LA MASSE VOLUMIQUE DE LA NEIGE FRAICHE



DISTRIBUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE (depot calme)



## VI - CLASSIFICATION DES CRISTAUX DE NEIGE FRAICHE

L'O.M.M. a adopté une classification de la neige et de la glace de l'A.I.H.S. (SCHAENER, KLEIN, DE QUERVAIN - Bruxelles 1951).

Cette classification distingue dix formes typiques de précipitations solides : huit de ces formes ont trait aux principaux cristaux de neige, deux se rapportent aux grains de glace (pluie gelée ou grêle).

Il est évident que chacune de ces dix classes de cristaux recouvre une très grande diversité de formes.

### PRÉCIPITATIONS SOLIDES - CLASSIFICATION O.M.M.

PRECIPITATIONS SOLIDES - CLASSIFICATION O.M.M.

CODE	SYMBOLES GRAPHIQUES	FORMES TYPIQUES	DESIGNATION
1			Plaquettes
2			Etoiles
3			Colonnes
4			Aiguilles
5			Dendrites spatiales
6			"Boutons de manchette"
7			Particules irrégulières
8			Neige roulée
9			Granules de glace
0			Grêle

## **BIBLIOGRAPHIE**

HOBBS - P.V.- Ice Physics -  
CLARENDON PRESS. OXFORD (1974)

LAMB J. et HOBBS - P.V.- Growth rates and habits of ice crystals grown from the vapor phase  
- J. atm. Sci 28, 1506-0 (1971).

LLIBOUTRY - Traité de glaciologie (1964).

MASON - The physics of clouds (1971).

MAGONO et LEE - Meteorological classification of natural snow crystals (1966).  
Journal of the faculty of science, Hokkaido University. Séries VII (geophysics).

QUENEY P. - Éléments de Météorologie (Édition Masson/Paris - 1975).

PAHAUT E. - Les cristaux de neige et leur métamorphose Monographie n° 96 de la  
Météorologie Nationale Sept. 75.

TRIPLET ROCHE - Météorologie Générale. (Édition Masson/Paris - 1975).

Documents photographiques du C.E.N. - SAINT MARTIN D'HÈRES.