



Environment
Canada

Environnement
Canada

National Hydrology Research Institute Institut national de recherches en hydrologie

NHRI PAPER NO. 1/RAPPORT N° 1 DE L'INRH
IWD SCIENTIFIC SERIES NO. 96/ÉTUDE N° 96, SÉRIE SCIENTIFIQUE, DE LA DGEI

Snow Crystals /Les cristaux de neige

R. Perla

NATIONAL HYDROLOGY RESEARCH INSTITUTE,
INLAND WATERS DIRECTORATE,
OTTAWA, CANADA, 1978.

NHRI-INRH

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES EN HYDROLOGIE,
DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES,
OTTAWA, CANADA, 1978.

Contents

	Page
ABSTRACT	v
RÉSUMÉ	v
INTRODUCTION	1
NEWLY FALLEN SNOW	1
RIMED NEW SNOW	2
EFFECTS OF SUBLIMATION AND WIND	3
RECRYSTALLIZATION IN THE SNOWPACK	3
GROWTH OF LARGE CRYSTALS	4
LAYERS AND STEPS	4
HOLLOW CRYSTALS	4
SURFACE HOAR	5
MELT-REFREEZE CRYSTALS	5
TINY LIFE ON SNOW CRYSTALS	6

Illustrations

Plate I.	Newly fallen snow: (a) hexagonal plate; (b) hexagonal column; (c) bullet; (d) column capped on both ends with hexagonal stellar; (e) joined bullets capped on both ends; (f) plate with corner spikes; (g) sectors; (h) dendrite; (i) irregular dendrite	9,10
Plate II.	Rimed snow crystals: (a) lightly rimed plate; (b) rimed sector; (c) rimed dendritic arm; (d) rimed stellar; (e) heavily rimed stellar; (f) graupel on 1-mm grid	11
Plate III.	Effects of sublimation and wind: (a) rounding of dendritic branches; (b) wind fragment with evidence of sublimation; (c) wind fragment; (d) close-up of sublimated fragment with rime particle	12
Plate IV.	(a) Initial recrystallization, dendritic arms visible (2-mm grid). (b) Initial recrystallization	

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
NEIGE FRAÎCHEMENT TOMBÉE	1
NEIGE FRAÎCHE GIVRÉE	2
EFFETS DE LA SUBLIMATION ET DU VENT	3
RECRYSTALLISATION DE LA NEIGE ACCUMULÉE AU SOL	3
CROISSANCE DES GROS CRISTAUX	4
COUCHES ET ESCALIERS	4
CRISTAUX CREUX	4
GIVRE DE SURFACE	5
CRISTAUX FONDUS ET RECONGELÉS	5
ORGANISMES MICROSCOPIQUES VIVANT SUR LES CRISTAUX DE NEIGE	6

Illustrations

Planche I.	Neige fraîchement tombée: a) plaque hexagonale; b) colonne hexagonale; c) granules; d) colonnes couronnées à chaque extrémité par une étoile hexa- gonale; e) granules fusionnés et recou- verts aux deux extrémités; f) plaque aux angles ornés d'aiguilles; g) secteurs; h) dendrite; i) dendrite irrégulière	9,10
Planche II.	Cristaux de neige givrés: a) plaque légèrement givrée; b) secteur givré; c) dendrite givrée; d) étoile givrée; e) étoile fortement givrée; f) neige roulée (grille à carrés de 1 mm)	11
Planche III.	Effets de la sublimation et du vent: a) arrondissement des dendrites; b) fragment de neige ventée montrant des traces de sublimation; c) fragment de neige ventée; d) gros plan d'un fragment sublimé avec une particule de givre	12

Illustrations (cont.)

	Page
(2-mm grid). (c) Rounding and thickening of grains. (d) Enlarging of grains (1-mm grid). (e) Close-up of rounded grain. (f) Comparison of recrystallized grain (coloured mass) with new snow particles (too small to show colour under polarized light)	13
Plate V. Examples of enlarged, faceted crystals on 1-mm grid	14
Plate VI. (a), (b), and (c) Examples of crystal layering on 1-mm grid. (d) Close-up of crystal layering	15
Plate VII. Examples of hollow crystals on 1-mm grid	16
Plate VIII. (a) Three surface hoar crystals (1-mm grid). (b) Surface hoar crystal about 10 mm long; note layer growth. (c) Surface hoar crystal nearly 20 mm long. Tiny particles are crystals of newly fallen snow. (d) Surface hoar crystal 2 months old showing evidence of recrystallization that has thickened and rounded the crystal	17
Plate IX. Clusters of melt-freeze crystals	18
Plate X. Red algae on snow crystal	19

Illustrations (suite)

	Page
Planche IV. a) Recristallisation initiale, dendrites visibles (grille à carrés de 2 mm); b) recristallisation initiale (grille à carrés de 2 mm); c) arrondissement et épaississement des granules; d) gros plan des granules (grille à carrés de 1 mm); e) gros plan d'un granule arrondi; f) comparaison d'un granule recristallisé (masse colorée) avec des particules de neige nouvelle (trop petites pour être colorées par la lumière polarisée)	13
Planche V. Exemples de gros cristaux à facettes (grille à carrés de 1 mm)	14
Planche VI. a), b) et c) Exemples de formation de couches (grille à carrés de 1 mm); d) gros plan de la formation de couches sur un cristal	15
Planche VII. Exemples de cristaux creux (grille à carrés de 1 mm)	16
Planche VIII. a) Trois cristaux de givre de surface (grille à carrés de 1 mm); b) cristaux de givre de surface d'environ 10 mm; noter la croissance en couches; c) cristal de givre de surface d'environ 20 mm; les particules minuscules sont des cristaux de neige fraîchement tombée; d) cristaux de givre de surface vieux de deux mois, montrant des traces de recristallisation qui les a épaisse et arrondis	17
Planche IX. Agglomérats de cristaux fondus et recongelés	18
Planche X. Algues rouges sur un cristal de neige	19

Abstract

Different types of snow crystals are discussed and illustrated in photographs obtained by passing polarized light through the specimens. The specimens were collected near the Sunshine Ski area of Banff National Park in Alberta. Also discussed are effects of sublimation and wind; recrystallization in the snowpack; growth of large crystals; crystal layering; and minute life on snow crystals.

Résumé

Le présent rapport traite des différents types de cristaux de neige et fournit des photographies en lumière polarisée de ces derniers. Les échantillons de cristaux proviennent des environs de la station de ski Sunshine du parc national de Banff en Alberta. Il est également question dans ce rapport de l'action de la sublimation et du vent, de la recristallisation dans la couverture nivale, de la formation de gros cristaux, de la croissance en couches des cristaux, ainsi que des organismes microscopiques vivant sur les cristaux de neige.

Snow Crystals

Les cristaux de neige

R. Perla

INTRODUCTION

More snow falls on Canada in a winter than on any other country in the world. All of us are aware of the benefits, pleasures, and pains caused by the pervasive white blanket that covers our landscape. On the one hand, snow provides recreation and, on the other, serious transportation problems. Melting snow furnishes water for drinking, irrigation, and hydropower, and also, unfortunately, induces destructive floods.

Snow is abundant and is a fascinating material to study under the microscope. Because snow is found in nature relatively close to its melting point (0°C), individual snow crystals change into shapes that have little resemblance to the original flakes that fall from the clouds. Some snow crystals disappear completely as a result of melting or sublimation; some grow at the expense of others, and increase in volume by a factor of 1000. Some have smooth, round shapes; others are sharply angular with microscopic steps.

It is the purpose of this paper to introduce the rich variety of snow crystals found in nature. The photographs were obtained by passing polarized light through the specimens. Because of the optical properties of ice, polarized light helps to accentuate crystal boundaries and other microscopic features. In particular, thick crystals will display an impressive array of colours resulting from double-refraction of the polarized light.

The specimens were extracted from an undisturbed snowpack near the Sunshine Ski area (Banff National Park, Alberta), and carried a short distance to a refrigerated laboratory, where they were placed in glass petri dishes and set on a microscope stand for photography. Reference grids with spacings of 1 or 2 mm were pasted on the petri dishes; these grids are visible in some of the photos.

NEWLY FALLEN SNOW

New snow crystals are generally hexagonal because the H_2O molecules in ice arrange themselves in a hexagonal lattice, but they are not nearly as symmetric as is commonly believed. Many photographers have carefully picked the

INTRODUCTION

L'hiver, il tombe plus de neige au Canada que dans tout autre pays du monde. Tous connaissent les bienfaits et les plaisirs autant que les problèmes engendrés par ce manteau blanc omniprésent qui recouvre le paysage. D'une part, la neige permet une foule d'activités récréatives, d'autre part, elle entraîne de sérieux problèmes de transport. La neige fondante fournit l'eau du robinet, sert à l'irrigation et à la production d'hydro-électricité, mais malheureusement, elle provoque aussi des inondations destructives.

La neige abonde au pays et offre un sujet fascinant au microscope. Comme, dans la nature, elle se trouve près de son point de fusion (0°C), ses cristaux prennent des formes qui ne ressemblent guère aux flocons s'échappant des nuages. Certains cristaux de neige disparaissent complètement par fonte ou sublimation alors que certains s'accroissent aux dépens d'autres cristaux et peuvent augmenter leur volume par un facteur de 1000. Les cristaux présentent soit une forme lisse et arrondie, soit des angles aigus et des escaliers microscopiques.

Le présent rapport se veut une introduction à la grande variété de cristaux de neige qui existent dans la nature. Les cristaux y sont photographiés en lumière polarisée, qui, à cause des propriétés optiques de la glace, accentue les contours ainsi que d'autres caractéristiques microscopiques des cristaux. Les cristaux épais, notamment, fournissent un impressionnant éventail de couleurs à cause de la biréfraction de la lumière polarisée.

Les échantillons de cristaux proviennent de la couverture nivale vierge aux environs de la station de ski Sunshine du parc national de Banff en Alberta. Après les avoir transportés sur une courte distance jusqu'au laboratoire réfrigéré, on les a déposés et photographiés dans des boîtes de Pétri placées sur une platine de microscope et contenant des grilles de référence à carrés de 1 ou de 2 mm. Les dernières sont d'ailleurs visibles sur certaines photographies.

NEIGE FRAÎCHEMENT TOMBÉE

Les cristaux de neige fraîchement tombée sont généralement hexagonaux, car les molécules d' H_2O prennent la forme d'un hexagone dans la glace. Ils ne sont pas, toutefois, aussi symétriques que le donne à croire beaucoup

most symmetric examples from a larger assortment of irregular shapes, and have thus conveyed the misleading impression that high symmetry is the rule rather than the exception. Exact crystal symmetry (involving all molecules) must be exceedingly rare. It is also unlikely that any two snow crystals are identical.

The cloud temperature is the crucial influence determining whether the hexagonal snow crystal grows as a flat plate or a long column. Plate growth apparently dominates when cloud temperatures are either between 0 and -4°C or between -10 and -20°C . Column growth dominates in the alternate temperature ranges -4 to -10°C and -20 to -35°C . No one yet has a complete explanation for this strange temperature dependence.

The growth of intricate, feather-like branches (dendrites) depends on the percentage of *supersaturation* within the cloud. Supersaturation is a measure of the abundance of water vapour. When the supersaturation is relatively high, water vapour molecules will pile up at the crystal corners or edges rather than spread out evenly on crystal faces, thus producing spikes, stellars, sectors, and other dendritic features.

Nine photos of newly fallen snow are presented in Plate I.

RIMED NEW SNOW

As a snow crystal falls through a cloud it collides with microscopic droplets of water. Some of these droplets may stick to the crystal and instantly freeze, leaving a coating of small spherical bumps known as *rime*. Examples of various degrees of riming are illustrated in Plate II. It is rare to inspect a sample of newly fallen snow and find that all crystals are completely rime-free. At least some trace of rime is almost always observed, and quite often the rime is so thick that the original crystal cannot be seen. Heavy coats of rime which obscure the original crystal shape are typically produced during severe cloud turbulence. In the winter, such turbulence may occur during the passage of a cold front, or when moist air is lifted over a mountain range. During these conditions the crystals are tossed through several moist layers before finally dropping out of the cloud. If rimed crystals are repeatedly circulated in a turbulent cloud, the crystals may develop into hailstones.

For rime or hail to form, the cloud temperature must be 0°C or colder. It is interesting that the rime-producing droplets exist in the liquid state even at temperatures as low as -40°C until collision with a snow crystal triggers instant freezing of the droplet.

de photographies qui ont soigneusement choisi les exemples les plus symétriques, à partir d'une masse de flocons au contour irrégulier, et qui ont ainsi répandu l'idée qu'un haut degré de symétrie constitue la règle plutôt que l'exception. Une symétrie cristalline exacte (de toutes les molécules) doit être excessivement rare. En outre, il est très peu probable que deux cristaux de neige soient parfaitement identiques.

La forme que prend la croissance du cristal de neige, en plaque ou en colonne allongée, dépend avant tout de la température du nuage: il semble que la croissance en plaque domine entre 0 et -4°C ou entre -10 et -20°C et que la croissance en colonne prédomine entre -4 et -10°C ou entre -20 et -35°C . Personne n'a encore pu expliquer tout à fait cet étrange rôle que joue la température.

La formation sur le cristal de branches plumeuses et complexes, dites dendrites, dépend de la *sursaturation* à l'intérieur du nuage. La sursaturation est fonction de la quantité de vapeur d'eau qui y est présente. Lorsque le nuage est sursaturé, les molécules de vapeur d'eau s'empilent sur les angles et les arêtes du cristal au lieu de s'étendre également sur toutes ses facettes, produisant ainsi des aiguilles, des étoiles, des secteurs et d'autres structures dendritiques.

La planche I montre neuf photographies de neige fraîchement tombée.

NEIGE FRAÎCHE GIVRÉE

Lorsque le cristal de neige tombe du nuage, il entre en collision avec de minuscules gouttelettes d'eau. Certaines de ces gouttelettes peuvent adhérer au cristal et y geler instantanément, formant ainsi une enveloppe de petites protubérances sphériques connue sous le nom de *givre blanc*. La planche II offre des exemples de givrage à divers degrés. S'il est rare de trouver des échantillons de neige fraîchement tombée qui ne contiennent que des cristaux entièrement libres de givre, il est tout à fait normal d'en prélever qui renferment au moins quelques traces de givre, et, assez souvent, d'épaisses couches qui dissimulent complètement le cristal d'origine. Ce phénomène résulte d'ordinaire d'une forte turbulence dans le nuage. En hiver, la turbulence est causée par le passage d'un front froid ou par l'air humide qui s'élève au-dessus d'une chaîne de montagne. Dans de telles conditions, les cristaux traversent plusieurs couches humides avant de s'échapper du nuage. Lorsque les cristaux givrés se déplacent à plusieurs reprises au sein d'un nuage turbulent, ils peuvent former des grêlons.

Enfin, la température du nuage doit être égale ou inférieure à 0°C avant que des cristaux givrés ou des grêlons s'y forment. Il est intéressant de noter que les gouttelettes à l'origine du givrage existent à l'état liquide même à -40°C , et ce, jusqu'à leur collision avec un cristal de neige qui déclenche leur gel instantané.

EFFECTS OF SUBLIMATION AND WIND

Sublimation is the loss of water molecules from the ice surface to the air. This process occurs when the air can absorb additional water molecules; the air is then said to be in a state of *undersaturation* with respect to the ice surface. Sublimation is the reverse of the crystal growth process that occurs in the *supersaturated* environment of clouds.

Thus, as snow crystals fall from a supersaturated cloud down to an undersaturated lower level of the atmosphere a small portion of crystal mass will sublime back into the atmosphere. A more significant amount of sublimation occurs during "blowing" snow storms, when heavy winds fragment crystals and transport the broken particles considerable distances.

Sharp corners of crystals, narrow dendritic arms, and other *convex* protrusions are the first features to sublimate and disappear. This leads to a smooth, more rounded crystal (see Plate III). During sustained wind transport when the air is relatively dry (undersaturated), the rounded fragments of blowing snow will sublimate further and eventually disappear unless they come to rest as part of the snowpack.

RECRYSTALLIZATION IN THE SNOWPACK

The air pore space within the snowpack is in a humidity state that is very closely balanced between undersaturation and supersaturation. In fact, the balance is so precarious that the pore space is slightly undersaturated with respect to some crystal surfaces, and slightly supersaturated with respect to other surfaces. Ice surfaces in the undersaturated environment will sublimate, and conversely, ice surfaces in the supersaturated environment will enlarge. Growth of crystals at the expense of others is called *recrystallization*.

During recrystallization, the transfer of water molecules is: (a) from small crystals to larger crystals, (b) from strongly convex surfaces to less convex surfaces (or concavities), and (c) from relatively warm crystal surfaces to cold crystal surfaces. As a consequence of (a), small grains become smaller while large grains grow even larger. As a consequence of (b), dendritic arms and protrusions disappear as crystals tend toward rounded, more compact shapes. Also as a consequence of (b), touching crystals tend to weld together since molecules are transferred into the natural concavities formed by the contact of adjacent crystals. This welding together of crystals is called *sintering*.

Because crystals are evolving toward thicker, more massive grains, brilliant colours appear when polarized light is passed through recrystallized specimens (see Plate IV).

EFFETS DE LA SUBLIMATION ET DU VENT

La sublimation est le processus par lequel les molécules d'eau passent directement de la surface de la glace à l'air ambiant, qui peut les absorber. L'air est alors dans un état de *sous-saturation* par rapport à la surface de la glace. La sublimation est le phénomène inverse de la croissance des cristaux qui survient dans un nuage *sursaturé*.

Ainsi, lorsque les cristaux de neige tombent de nuages sursaturés dans des couches inférieures sous-saturées de l'atmosphère, ils subliment en faible proportion dans l'air ambiant. Le taux de sublimation est plus important au cours des «poudreries», lorsque des vents violents fragmentent les cristaux et transportent les particules brisées sur des distances considérables.

Les angles aigus des cristaux, les dendrites étroites et les autres protubérances *convexes* sont les premières structures à sublimer et à disparaître. Ceci produit un cristal lisse et arrondi (voir planche III). Lorsque le vent souffle de façon continue et que l'air est assez sec (sous-saturé), les fragments arrondis de la neige ventée subliment davantage et disparaissent à moins de se joindre à la couverture nivale accumulée au sol.

RECRYSTALLISATION DE LA NEIGE ACCUMULÉE AU SOL

Dans la neige accumulée au sol, l'humidité de l'air est en équilibre instable entre la sous-saturation et la sursaturation. En fait, cet équilibre est tellement précaire que l'espace interstitiel peut être légèrement sous-saturé par endroits et légèrement sursaturé à d'autres. En milieu sous-saturé, la glace sublimera, et inversement, en milieu sursaturé, elle augmentera de volume. La croissance des cristaux aux dépens d'autres cristaux est appelée *recrystallisation*.

Durant la recristallisation, le transfert des molécules d'eau se fait: a) des petits cristaux aux gros, b) des surfaces fortement convexes aux surfaces moins convexes (ou concaves); et c) des surfaces relativement chaudes des cristaux aux surfaces froides. En conséquence de a), les petits granules deviennent plus petits tandis que les plus gros augmentent de volume. En conséquence de b), les dendrites et les protubérances disparaissent, et les cristaux ont tendance à s'arrondir et à devenir plus compacts alors que les cristaux adjacents ont tendance à se souder ensemble du fait que les molécules sont transférées dans les concavités naturelles formées par le contact des cristaux. Le terme *frittage* décrit ce processus de fusion des cristaux.

Les cristaux deviennent de plus en plus épais et massifs de sorte que les photographies en lumière polarisée reproduisent en couleurs brillantes ces échantillons de neige recristallisés (voir planche IV).

GROWTH OF LARGE CRYSTALS

There is a strong initial tendency for large crystals to grow at the expense of small crystals; however, this effect decreases as the average crystal size increases. Continued crystal growth depends on vapour flow from relatively warm crystal surfaces to cold crystal surfaces. Fundamental physics teaches that the warmer the ice surface, the greater the concentration of vapour over that surface. To balance the difference in vapour concentration between neighbouring crystal surfaces of slightly different temperatures, vapour will sublimate from the warmer ice surface and deposit on the cold surface. Significant vapour transport will occur if there is only $1/100^{\circ}\text{C}$ temperature difference across a 1-mm pore space.

Growth of large snow crystals is characterized by development of facets (flat crystal faces intersecting at angles determined by the molecular structure of ice). During recrystallization there is competition between the formation of facets and the tendency of sublimation to round the crystal by eroding edges and corners. As long as the temperature difference mechanism pumps vapour across the pore space, facet growth can successfully compete against the tendency toward a rounded shape. Once a facet begins to capture vapour, it will grow and therefore be in a better position to capture additional vapour. Examples of enlarged, faceted crystals are shown in Plate V.

LAYERS AND STEPS

Crystal growth occurs by the addition of successive layers. Each new layer that spreads across the crystal is fed by water molecules, which have a tendency to attach to the advancing *step* of the layer. Considering the molecular structure of the crystal, it can be shown that the step is the most favourable site for a molecule to join the spreading layer. If a molecule lands near the advancing step, the molecule may migrate a microscopic distance to reach the step.

In principle, an advancing step could consist of a single molecular layer, but if there is a sufficiently high influx of water molecules, then several hundred molecular layers may advance simultaneously as a single step that is microscopically visible. As shown in Plate VI, examples of snow crystal layering are particularly well illustrated by the refractive colours of polarized light.

HOLLOW CRYSTALS

Each new crystal step has a tendency to initiate and spread out from an edge or corner of a facet. As the crystal enlarges, the step cannot spread evenly across the facet, but

CROISSANCE DES GROS CRISTAUX

Il existe au départ une forte tendance pour les gros cristaux à s'accroître aux dépens des petits; toutefois, elle diminue à mesure que la grosseur moyenne des cristaux augmente. La croissance continue des cristaux dépend du courant de vapeur passant des surfaces relativement chaudes des cristaux aux surfaces froides. Les lois fondamentales de la physique démontrent que plus une surface glacée est chaude, plus la vapeur sera concentrée au-dessus de cette surface. Afin d'équilibrer la différence dans la concentration de vapeur entre surfaces voisines de cristaux de températures légèrement différentes, la vapeur viendra de la sublimation des surfaces de glace plus chaudes et se déposera sur les surfaces froides. Même une différence de température de $0,01^{\circ}\text{C}$ de part et d'autre d'un interstice de 1 mm provoquera un transport significatif de vapeur.

La croissance des gros cristaux de neige se caractérise par la formation de facettes (faces de cristaux aplatis qui se coupent selon des angles déterminés par la structure moléculaire de la glace). Pendant la recristallisation, il y a concurrence entre la formation des facettes et la sublimation qui arrondit les arêtes et les angles des cristaux. Aussi longtemps que les différences de température permettent le transport de vapeur à travers l'interstice séparant deux surfaces, les facettes peuvent se développer et contrecarrer l'arrondissement. Une fois qu'une facette commence à capturer la vapeur, sa croissance lui permet par le fait même d'en capturer davantage. La planche V renferme des exemples de gros cristaux à facettes.

COUCHES ET ESCALIERS

La croissance des cristaux procède par addition de couches successives. Chaque nouvelle couche qui s'étend sur le cristal est alimentée par les molécules d'eau qui se fixent au bord de la couche qui avance. En prenant la structure moléculaire du cristal, il est facile de démontrer que le bord est l'endroit idéal permettant à la molécule de se fixer à la couche en expansion. Si une molécule tombe en avant de la couche, il se peut qu'elle migre sur une faible distance pour la rejoindre.

En principe, une couche en expansion pourrait n'être formée que d'une seule couche moléculaire, mais s'il y a un apport suffisant de molécules d'eau, plusieurs centaines de couches moléculaires pourront s'étendre simultanément en une seule couche visible au microscope. La planche VI donne des exemples de formation de couches, qui sont particulièrement bien mis en évidence par la réfraction de la lumière polarisée.

CRISTAUX CREUX

Chaque nouvelle couche qui s'étend sur un cristal a tendance à le faire à partir d'un angle ou d'une arête de ses facettes. Tandis qu'un cristal croît, il arrive que les couches

instead new growth is eventually confined to the edges. This produces cups, scrolls, and other hollow shapes (see Plate VII).

The growth of hollow crystals typically occurs in snowpacks that have: (a) relatively low snow density where there is ample pore space into which the growing crystals can expand, and (b) a significant temperature difference across the snowpack, assuring vapour transport. Both conditions (a) and (b) are observed in a thin, unconsolidated snowpack where the temperature difference is due to the normally warm ground temperature (about 0°C) in conjunction with a radiation-cooled upper snow surface at a temperature below 0°C (for example -10°C).

If the above conditions are satisfied, it is likely that enlarged, hollow crystals will form in the lower layers of the snowpack. These crystals, which are called *depth hoar*, provide little support to overlying layers, and are thus a major contributory factor to snow slope instability and avalanches.

SURFACE HOAR

During winter there is generally a loss of heat from the ground, through the snowpack, and out into space. The radiation loss of heat at the snow surface tends to lower the surface temperature. This effect is most pronounced during winter evenings when the sky is clear. If there is sufficient moisture in the air layer immediately above the snow surface, the drop in surface temperature can produce a local state of supersaturation, causing vapour to deposit from the atmosphere on to the radiation-cooled surface. The surface crystals will grow as flat feathers reaching up into the atmosphere, sometimes to lengths of 20 mm or longer (see Plate VIII).

Surface hoar is an especially weak type of crystal that provides very little shear support to overlying snow slabs. Avalanches are almost certain to slide on surface hoar discontinuities.

MELT-REFREEZE CRYSTALS

During spring the snowpack experiences repeated cycles of daytime melting followed by evening refreezing. These cycles produce remarkable changes whereby the crystals form into clusters of numerous rounded beads. Shown in Plate IX are examples of clusters photographed with successively greater magnification.

The recrystallization processes in a wet snowpack are more complex than in a dry snowpack because water mol-

ne peuvent plus s'étendre également sur toutes ses facettes et qu'elles s'empilent sur les arêtes du cristal. C'est ainsi que se forment des cupules, des rouleaux et d'autres structures creuses (voir planche VII).

La croissance des cristaux creux survient typiquement dans la couverture nivale qui est: a) de faible densité, ménageant ainsi de nombreux interstices à la croissance des cristaux et b) de température très variée, provoquant un transport significatif de vapeur. Les deux conditions, a) et b), sont présentes dans toute couverture nivale mince et lâche dans laquelle la différence de température est normalement fonction de la température plus chaude du sol (environ 0°C), comparativement à celle à la surface de la neige, refroidie par rayonnement à une température en-dessous de 0°C (par exemple, -10°C).

Si les deux conditions sont présentes, des cristaux creux agrandis vont sans doute se développer dans les couches inférieures de la couverture nivale. Ces cristaux, qui forment le *givre de profondeur*, ne fournissent qu'un faible support aux couches supérieures et constituent donc un des principaux facteurs de l'instabilité de la neige sur les pentes et des avalanches.

GIVRE DE SURFACE

Durant l'hiver, il survient généralement une perte de chaleur du sol, à travers la couverture nivale, dans l'air ambiant. Ce rayonnement de la chaleur à la surface de la neige tend à abaisser la température de surface, surtout les soirs d'hiver où le ciel est dégagé. Si l'humidité de la couche d'air en contact avec la neige est suffisante, la chute de température à la surface peut produire une sursaturation localisée, provoquant un dépôt de vapeur de l'atmosphère à la surface refroidie. Les cristaux à la surface vont augmenter de volume et s'étendre vers le haut sous forme de plumes aplatis, parfois jusqu'à une longueur de 20 mm ou plus (voir planche VIII).

Le givre de surface est un type de cristaux essentiellement fragiles qui ne fournissent que peu de résistance au glissement des plaques de neige qui le recouvrent contribuant nécessairement aux avalanches.

CRISTAUX FONDUS ET RECONGELÉS

Au printemps, la couverture nivale subit des cycles répétés de dégel diurne suivis de gel vespéral. Ces cycles provoquent l'agglomération des cristaux en de nombreuses perles rondes. La planche IX fournit des exemples de ces agglomérats photographiés à des grossissements successivement plus puissants.

Dans la neige mouillée, la recristallisation est plus complexe que dans la neige sèche car les molécules d'eau

ecules are transferred through the liquid phase as well as through the vapour phase. One basic principle still applies: *large crystals grow at the expense of small crystals*. As the temperature approaches 0°C, crystals with the smallest radii are the first to melt, and a portion of the liquid water is transferred to clusters of large grains. These clusters will be firmly cemented together during the evening freeze cycle.

TINY LIFE ON SNOW CRYSTALS

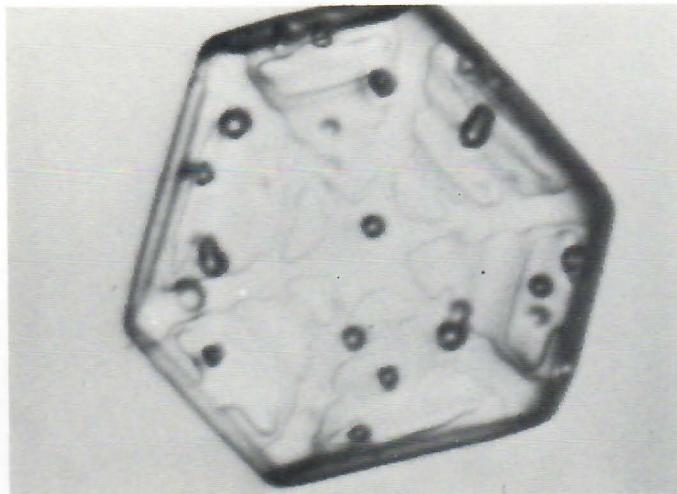
A wide assortment of tiny animals and plants live and reproduce on snow crystals, and in some cases are ecologically restricted to that habitat. Several species of one-celled algae thrive on the surface of the spring and summer snowpack, tinting the snow a colour that is characteristic of the species. Red snow is most common, but other colour combinations are often observed. During midday, darkly coloured pigmentations help the cell absorb incoming radiation and thus raise cell temperatures above that of the environment. During evenings, the snow surface temperature drops as a result of radiation loss, but the algae have developed a resistance to cell damage caused by freezing temperatures. An example of red algae is shown in Plate X.

sont transférées à travers la phase liquide et la phase gazeuse en même temps. Un principe fondamental tient toujours cependant: *les gros cristaux se développent aux dépens des plus petits*. Quand les températures s'approchent de 0°C, les petits cristaux fondent les premiers, et une portion de l'eau liquide est transférée aux agglomérats de granules plus gros. Les agglomérats sont raffermis lors du cycle de congélation.

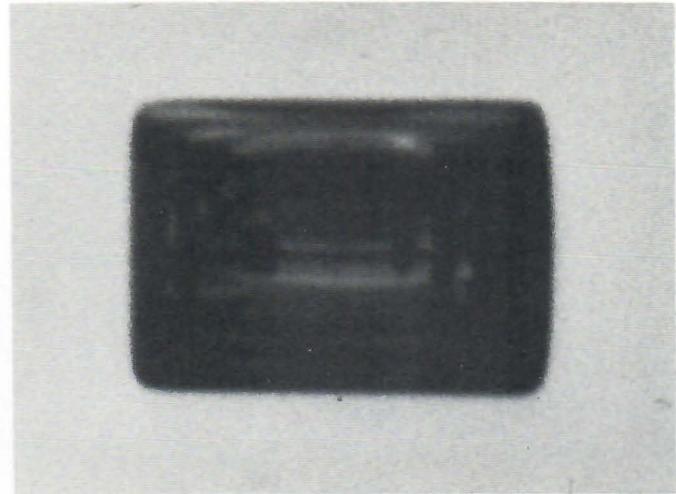
ORGANISMES MICROSCOPIQUES VIVANT SUR LES CRISTAUX DE NEIGE

Une flore et une faune fort variées vivent et se reproduisent sur les cristaux de neige et, dans certains cas, elles sont écologiquement limitées à cet habitat. Plusieurs espèces d'algues unicellulaires se développent sur la couverture nivale, le printemps et l'été, donnant à la neige une teinte caractéristique de l'espèce. La neige rouge est la plus commune, mais d'autres combinaisons de couleur se rencontrent souvent. Le jour, des pigments foncés permettent à la cellule d'absorber le rayonnement incident et à éléver ainsi sa température au-dessus de celle du milieu environnant. Le soir, la température de la neige en surface descend par rayonnement, mais les algues résistent aux effets nuisibles provoqués par les températures inférieures au point de congélation. La planche X renferme un exemple d'algue rouge.

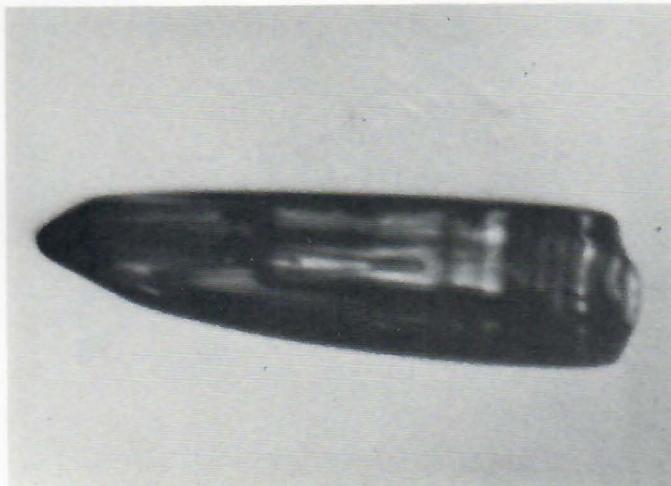
**Plates I to X
Planches I à X**



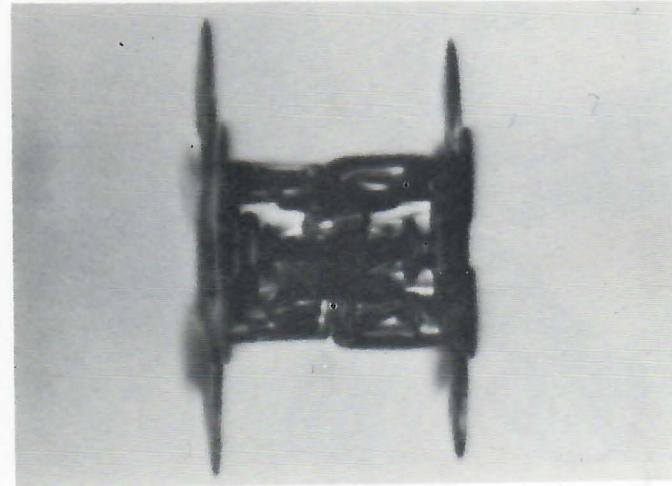
a 0.2 mm



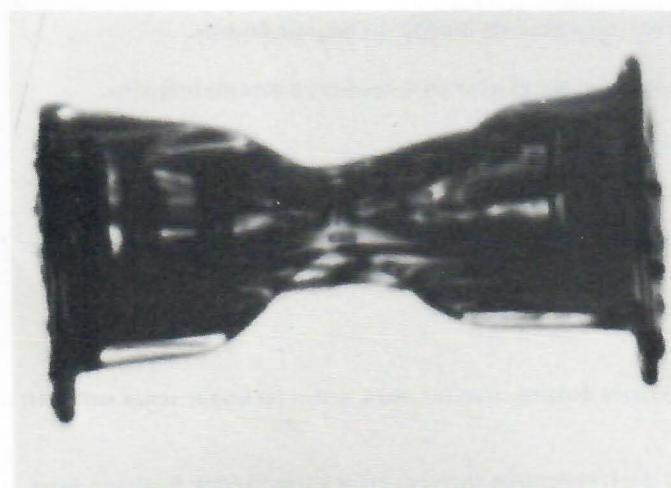
b 0.4 mm



c 0.3 mm



d 0.3 mm



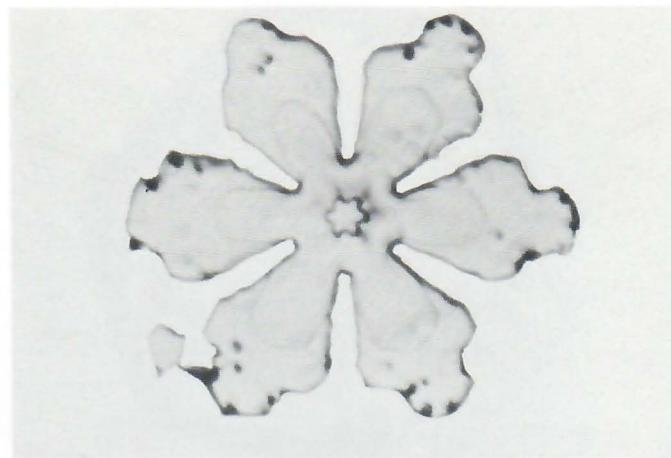
e 0.4 mm

Plate I. Newly fallen snow: (a) hexagonal plate; (b) hexagonal column; (c) bullet; (d) column capped on both ends with hexagonal stellar; (e) joined bullets capped on both ends.

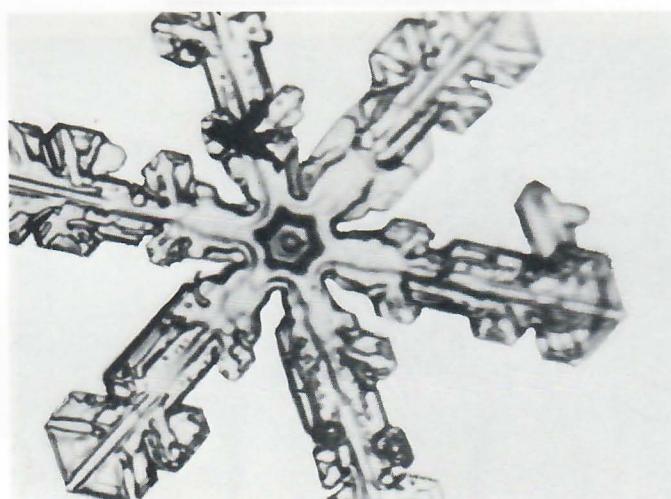
Planche I. Neige fraîchement tombée: a) plaque hexagonale; b) colonne hexagonale; c) granules; d) colonnes couronnées à chaque extrémité par une étoile hexagonale; e) granules fusionnés et recouverts aux deux extrémités.



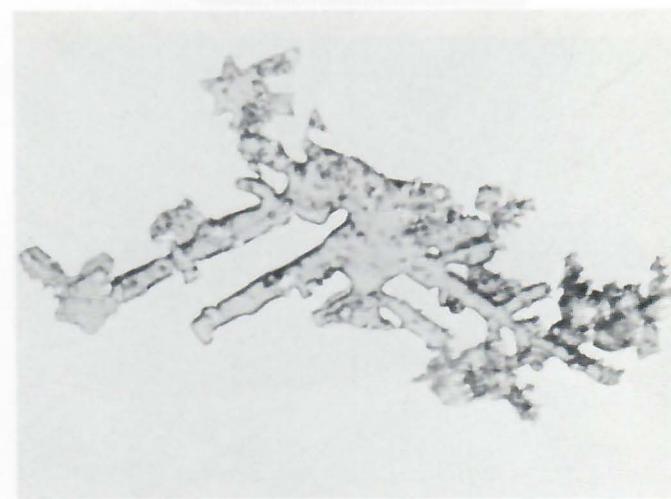
f 0.4 mm



g 0.5 mm



h 0.5 mm



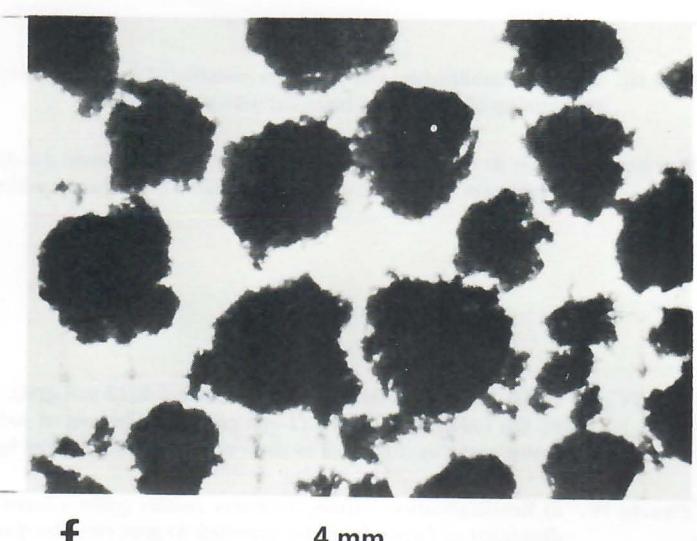
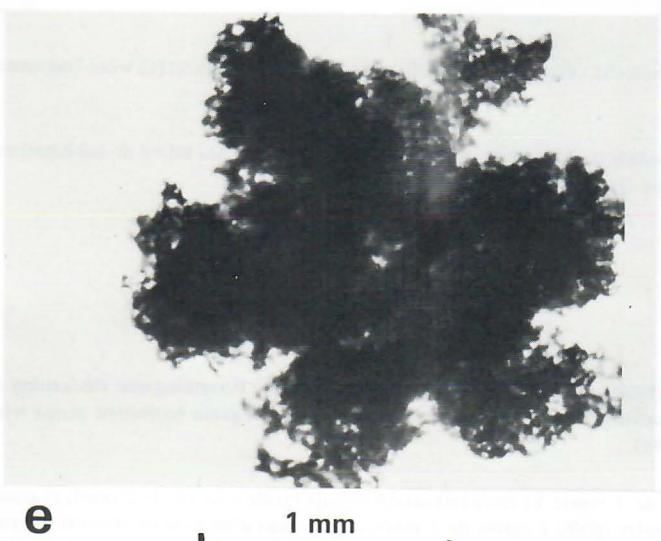
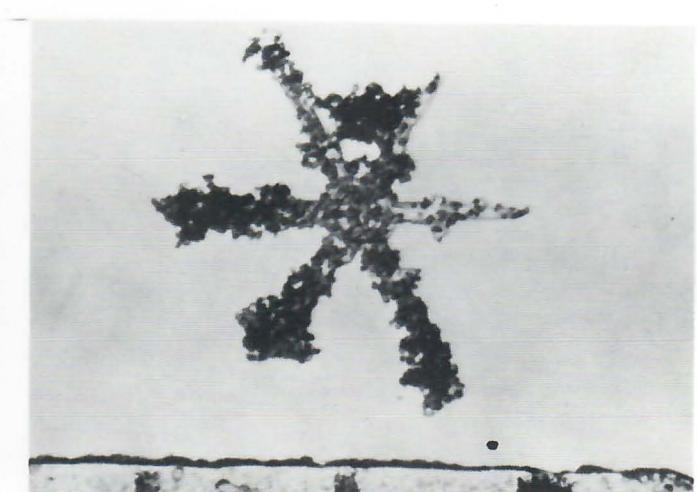
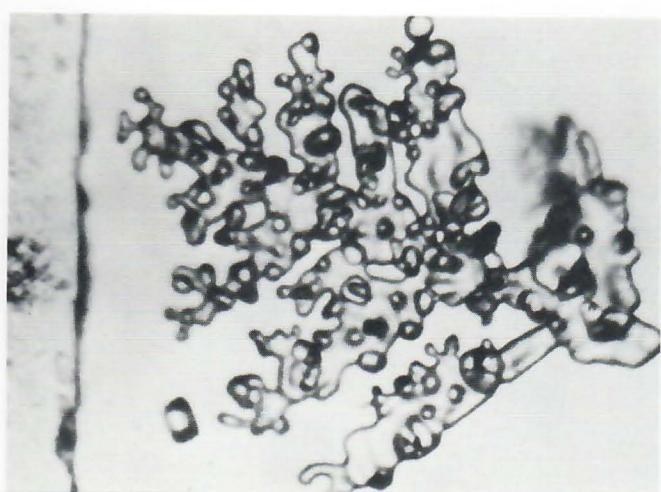
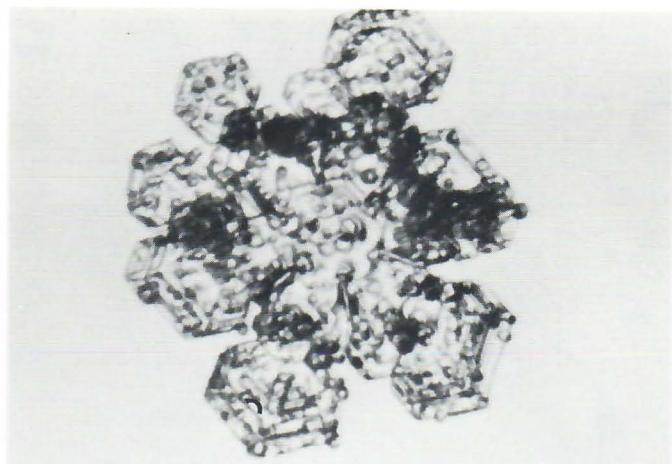
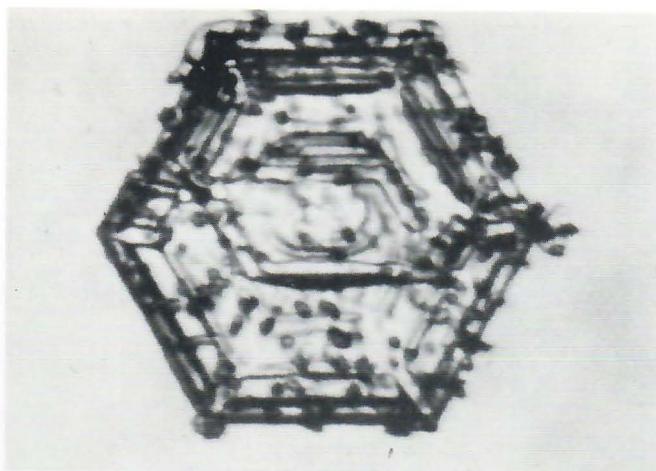
i 1 mm

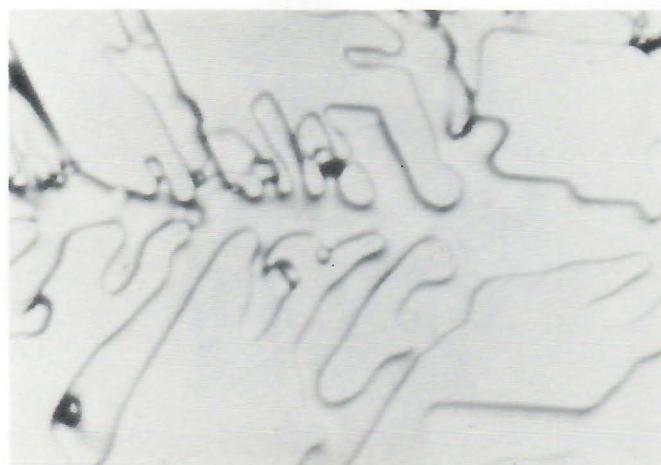
Plate I (cont'd). Newly fallen snow: (f) plate with corner spikes; (g) sectors; (h) dendrite; (i) irregular dendrite.

Planche I (suite). Neige fraîchement tombée: f) plaque aux angles ornés d'aiguilles; g) secteurs; h) dendrite; i) dendrite irrégulière.

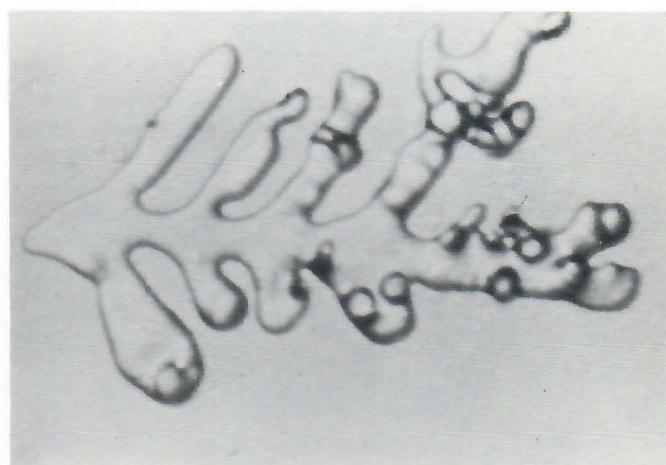
Plate II. Rimed snow crystals: (a) lightly rimed plate; (b) rimed sector; (c) rimed dendritic arm; (d) rimed stellar; (e) heavily rimed stellar; (f) graupel on 1-mm grid.

Planche II. Cristaux de neige givrés: a) plaque légèrement givrée; b) secteur givré; c) dendrite givrée; d) étoile givrée; e) étoile fortement givrée; f) neige roulée (grille à carrés de 1 mm).

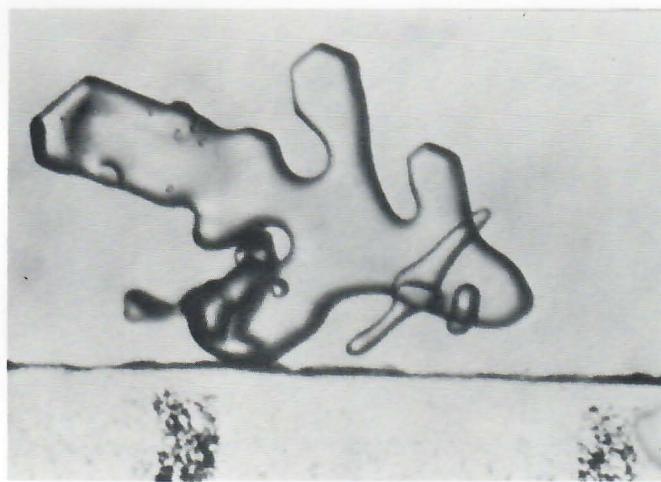




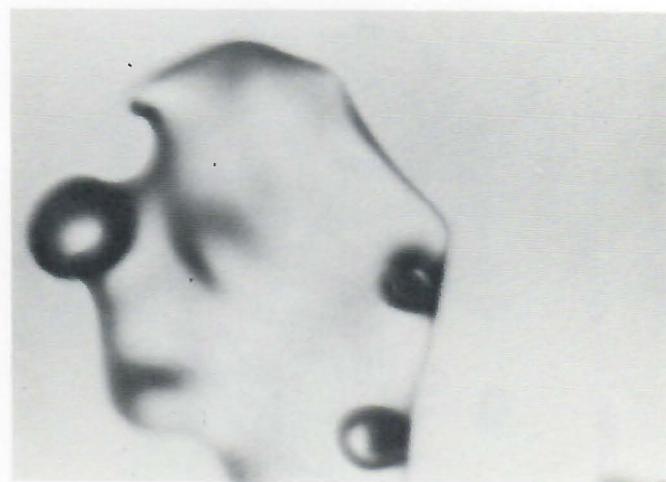
a 0.5 mm



b 0.4 mm



c 1 mm



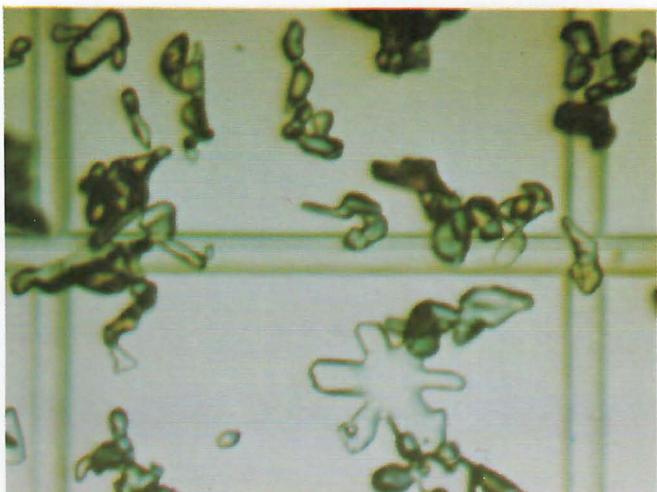
d 0.2 mm

Plate III. Effects of sublimation and wind: (a) rounding of dendritic branches; (b) wind fragment with evidence of sublimation; (c) wind fragment; (d) close-up of sublimated fragment with rime particle.

Planche III. Effets de la sublimation et du vent: a) arrondissement des dendrites; b) fragment de neige ventée montrant des traces de sublimation; c) fragment de neige ventée; d) gros plan d'un fragment sublimé avec une particule de givre.

Plate IV. (a) Initial recrystallization, dendritic arms visible (2-mm grid). (b) Initial recrystallization (2-mm grid). (c) Rounding and thickening of grains. (d) Enlarging of grains (1-mm grid). (e) Close-up of rounded grain. (f) Comparison of recrystallized grain (coloured mass) with new snow particles (too small to show colour under polarized light).

Planche IV. a) Recristallisation initiale, dendrites visibles (grille à carrés de 2 mm); b) recristallisation initiale (grille à carrés de 2 mm); c) arrondissement et épaissement des granules; d) gros plan des granules (grille à carrés de 1 mm); e) gros plan d'un granule arrondi; f) comparaison d'un granule recristallisé (masse colorée) avec des particules de neige nouvelle (trop petites pour être colorées par la lumière polarisée).



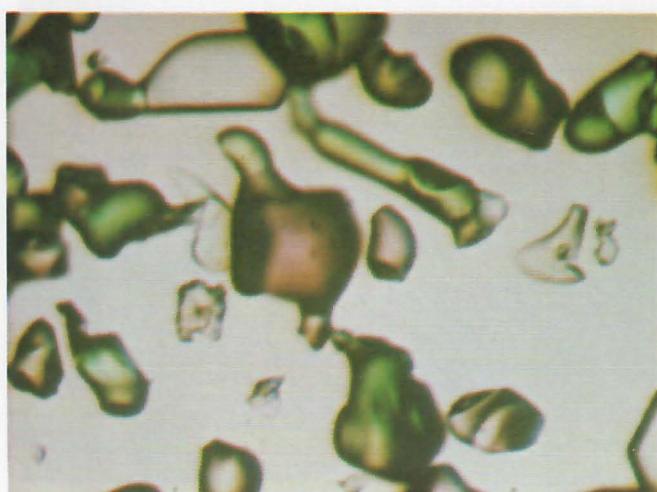
a

1 mm



b

2 mm



c

1 mm



d

3 mm



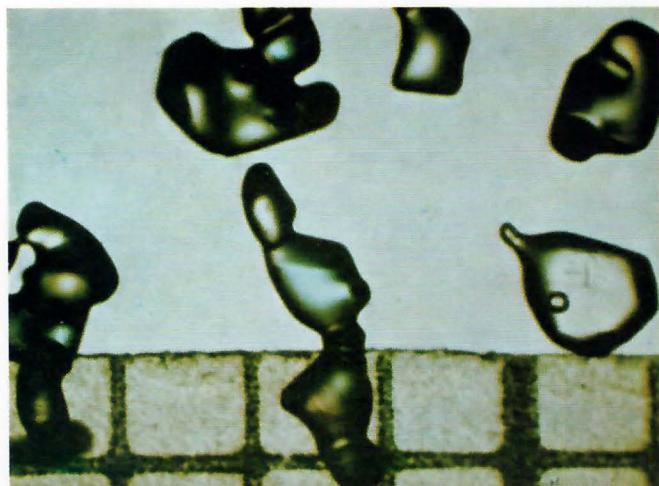
e

0.2 mm



f

2 mm



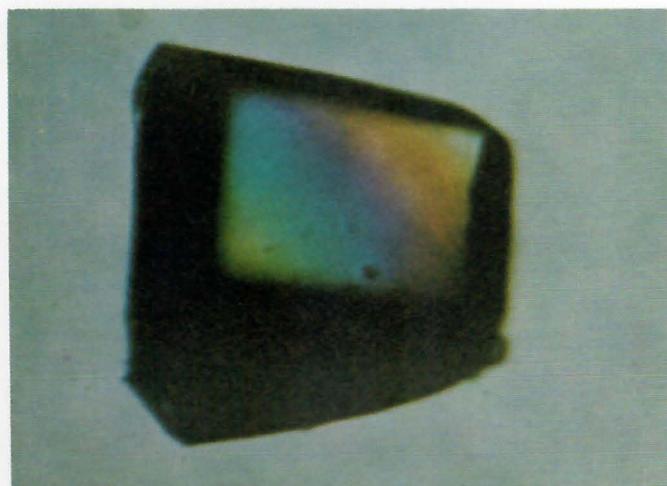
a



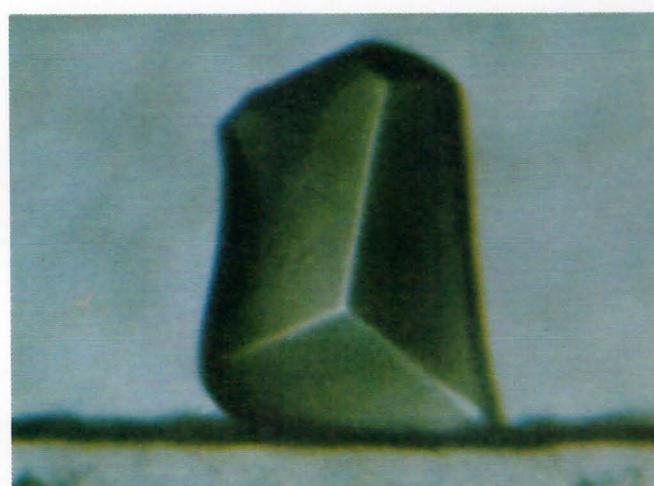
b



c



d



e



f

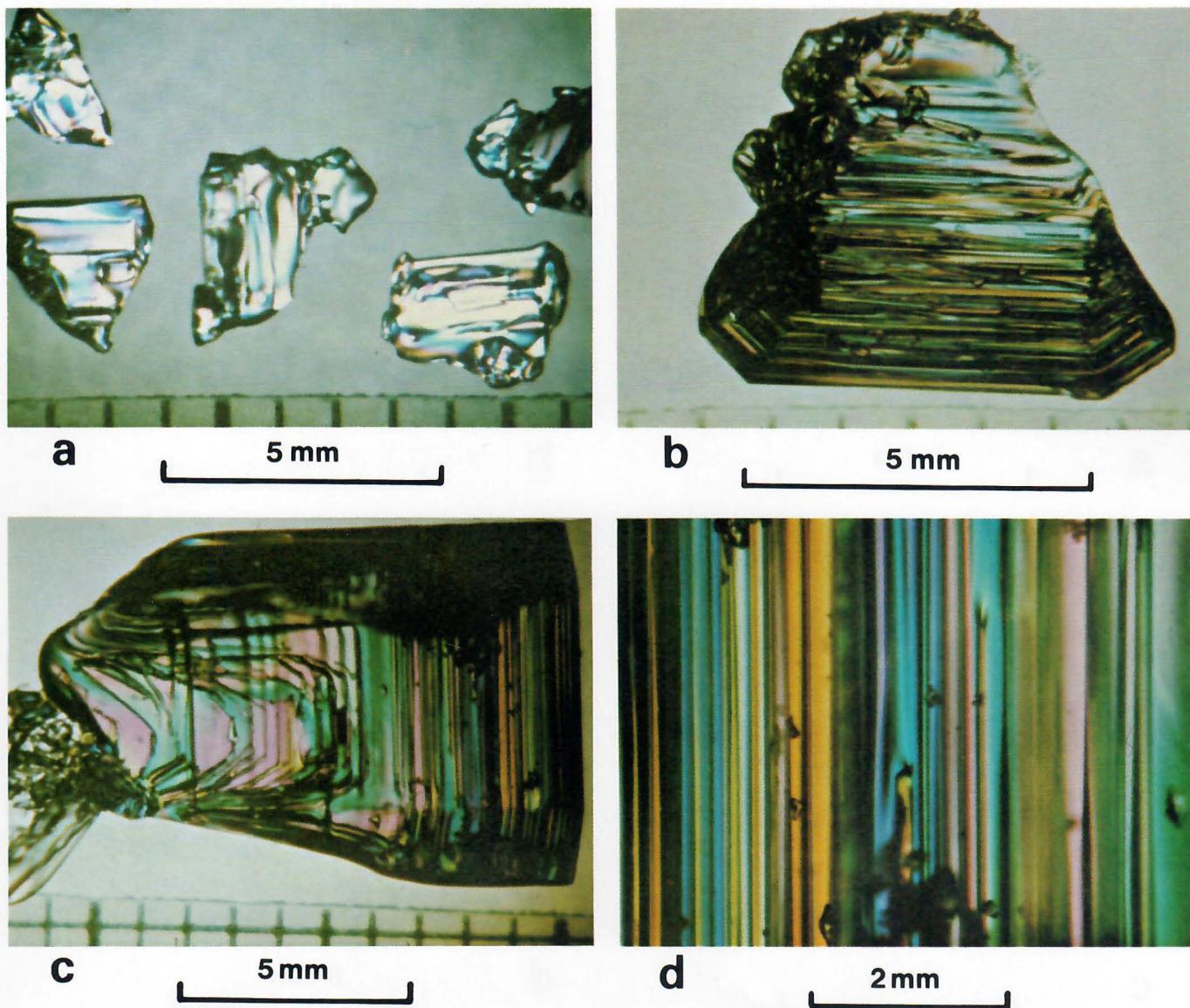


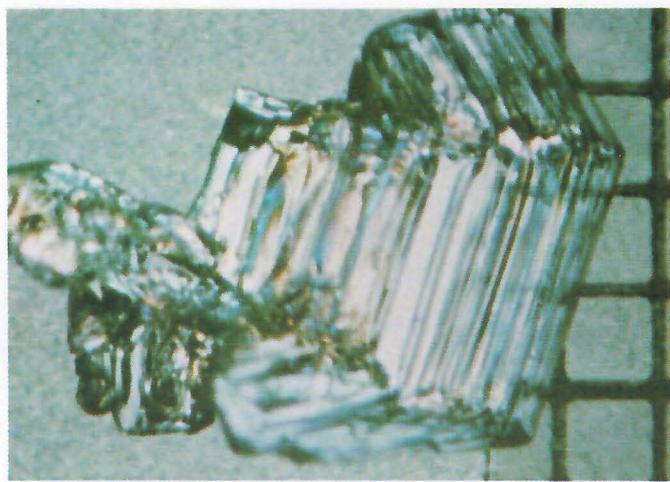
Plate VI. (a), (b), and (c) Examples of crystal layering on 1-mm grid. (d) Close-up of crystal layering.

Planche VI. a), b) et c) Exemples de formation de couches (grille à carrés de 1 mm); d) gros plan de la formation de couches sur un cristal.

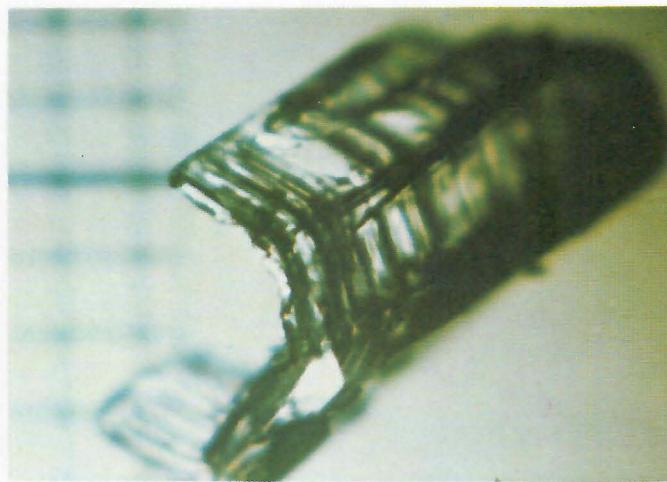


Plate V. Examples of enlarged, faceted crystals on 1-mm grid.

Planche V. Exemples de gros cristaux à facettes (grille à carrés de 1 mm).

**a**

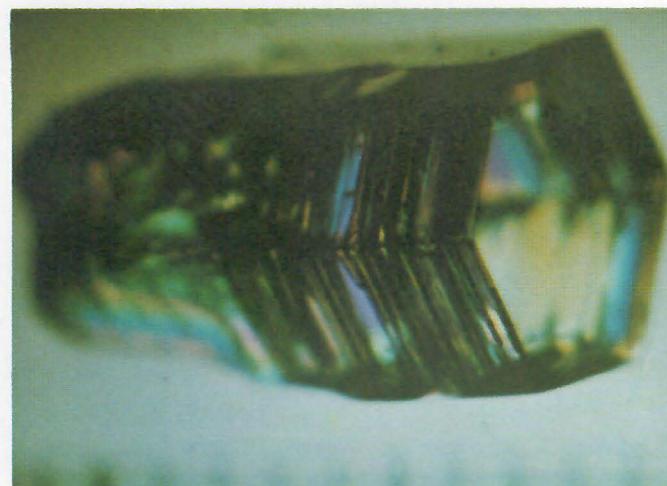
3 mm

**b**

4 mm

**c**

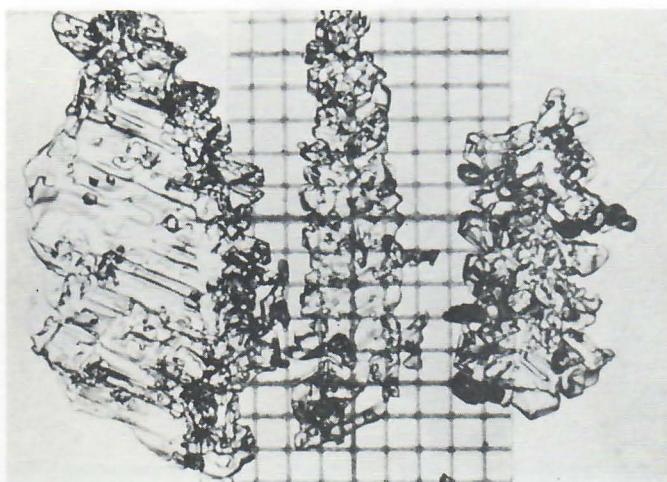
4 mm

**d**

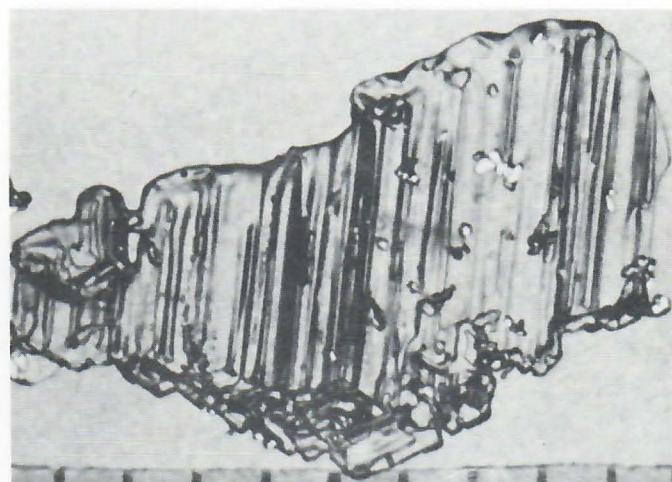
5 mm

Plate VII. Examples of hollow crystals on 1-mm grid.

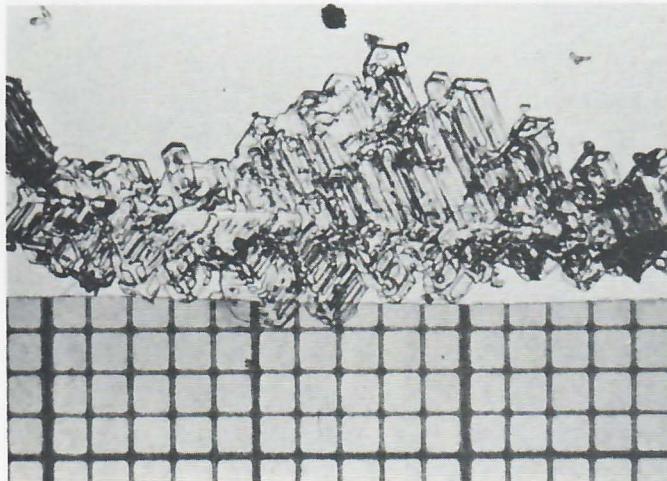
Planche VII. Exemples de cristaux creux (grille à carrés de 1 mm).



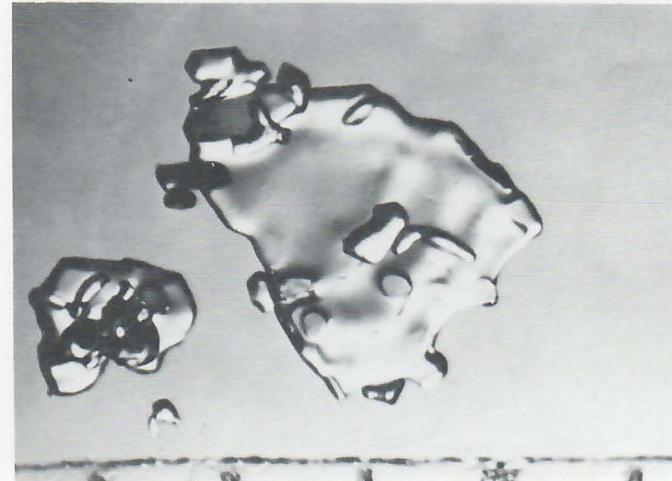
a
10 mm



b
5 mm



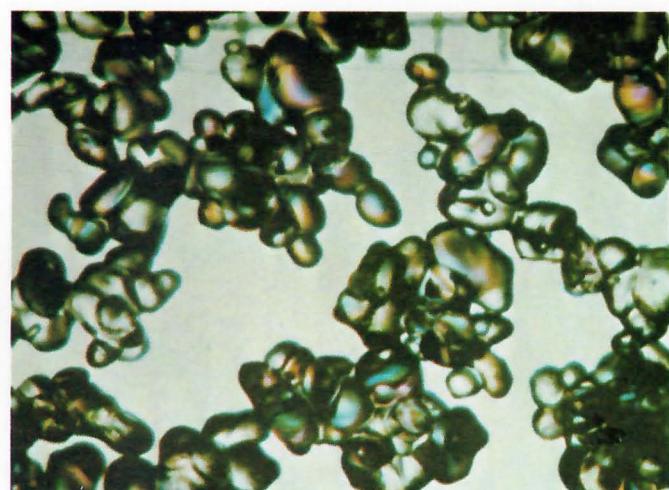
c
10 mm



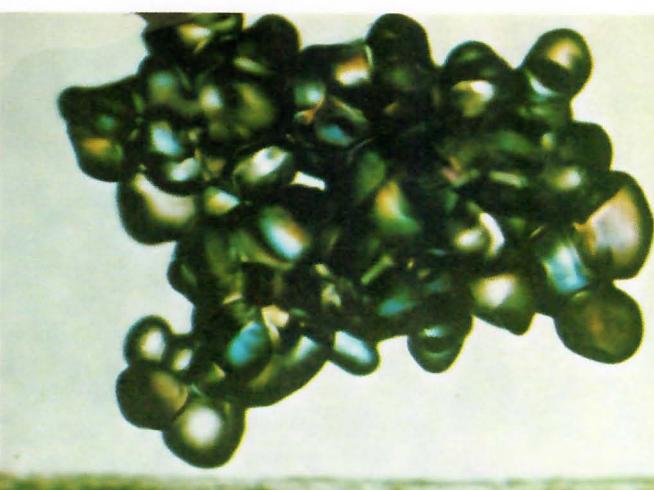
d
3 mm

Plate VIII. (a) Three surface hoar crystals (1-mm grid). (b) Surface hoar crystal about 10 mm long; note layer growth. (c) Surface hoar crystal nearly 20 mm long. Tiny particles are crystals of newly fallen snow. (d) Surface hoar crystal 2 months old showing evidence of recrystallization that has thickened and rounded the crystal.

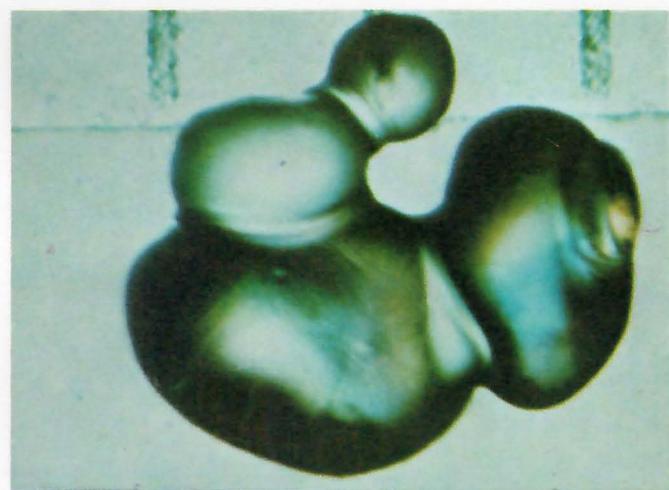
Planche VIII.a) Trois cristaux de givre de surface (grille à carrés de 1 mm); b) cristaux de givre de surface d'environ 10 mm; noter la croissance en couches; c) cristal de givre de surface d'environ 20 mm; les particules minuscules sont des cristaux de neige fraîchement tombée; d) cristaux de givre de surface vieux de deux mois, montrant des traces de recristallisation qui les a épaissis et arrondis.



a



b



c



d

Plate IX. Clusters of melt-freeze crystals.

Planche IX. Agglomérats de cristaux fondu et recongelés.



0.3 mm

Plate X. Red algae on snow crystal.

Planche X. Algue rouge sur un cristal de neige.