

Détermination objective des caractéristiques des grains de neige à partir d'images

B. Lesaffre, E. Pougatch et E. Martin

Centre d'Etudes de la Neige

I ■ INTRODUCTION

La neige peut être étudiée selon deux techniques, d'une part à partir d'images issues de coupes et d'autre part à partir d'images de grains prélevés dans un échantillon. La première méthode [1] permet de conserver la structure de la neige et met ainsi en évidence les liaisons inter-granulaires. La deuxième méthode, utilisée dans l'étude décrite ici, s'attache essentiellement aux caractéristiques des éléments constituant le matériau neige.

Le but recherché est de disposer d'un outil de mesures objectif des paramètres morphologiques des grains de neige. Cela permettra d'une part d'affiner les lois de métamorphose du modèle physique d'évolution du manteau neigeux CROCUS [2, 3] et d'autre part d'apporter des éléments utiles en matière de télédétection.

Les premières études ont été effectuées en 1985. Les images de grains de neige sont alors captées directement à partir d'une loupe binoculaire en chambre froide, puis traitées. Elles comportaient alors 64 niveaux de gris sur une grille de 256×256 pixels.

Ce système présentait plusieurs inconvénients au niveau matériel et logiciel (image déformée, lenteur...). Néanmoins, il a permis de mener une étude quantitative de la métamorphose de la neige sèche à différents gradients de température (Brunot, 1986).

L'évolution actuelle des matériels informatiques, supports vidéo et logiciels de traitement d'images a incité à une refonte totale de ce système.

Grâce à cela, une exploration systématique de tous les types de neige a pu être menée et aboutir à une reconnaissance des différents types de neige à partir de leurs caractéristiques morphologiques.

Objective determination of snow grains characteristics from images

The determination of snow grains characteristics (such as type or size) are crucial to validate snow models and interpret data from remote sensing. Until now, the size and type of snow grains are estimated in the fields. Nowadays, the transport of snow sample in iso-octane allows laboratory analyses. An objective analysis of snow grains digital images has been developed at the Centre d'Etudes de la Neige since the mid 80's. The images are taken in a cold room and stored on a videodisk. The calculation of relevant parameters for snow characterisation was developed. Recently, the hardware and software systems were upgraded, allowing quicker and easier analyses. Finally, a procedure designed to determine the snow types from images analysis was developed and calibrated with 65 snow samples. For that purposes, independent experts determined the snow type (as defined by the International Classification) of each sample. The procedure was verified on an independent set of snow images.

This semi-automated determination gives 97 % of accurate results on granular snow types. However, it is not reliable on precipitation particles.

II ■ CHAÎNE D'ACQUISITION ET DE PRÉTRAITEMENT

● 2.1 Acquisition

La neige étudiée provient soit directement du terrain, transportée dans l'iso-octane [4], soit de métamorphoses provoquées en chambre froide.

Les grains de neige sont disposés sur une plaque de verre, isolés les uns des autres. Eclairés par une source lumineuse située en dessous, ils fournissent à une caméra l'image de leur silhouette en 2D, grossie par la loupe binoculaire. Cette caméra est reliée à un vidéodisque pour le stockage des images.

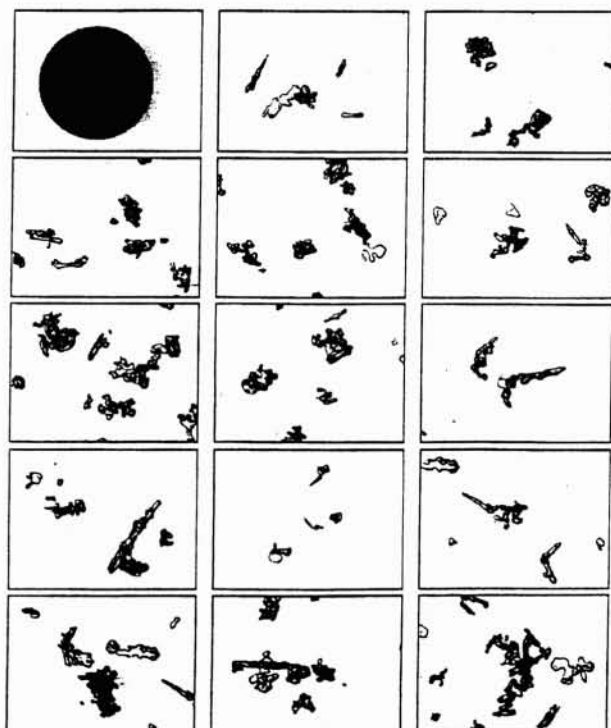
Il est nécessaire d'enregistrer au préalable une image de référence (bille de taille connue).

Les échantillons comportent une trentaine de grains.

● 2.2 Prétraitement

A partir du vidéodisque, les images sont numérisées sur micro-ordinateur à l'aide d'une carte pilotée par le logiciel Visilog (Noesis). L'image produite comporte 384x288 pixels sur 256 niveaux de gris. Elle subit les étapes suivantes :

- segmentation par hystérésis dont les seuils sont ajustés par l'opérateur,
- remplissage des particules,
- élimination des parasites par la méthode d'ouverture,
- élimination des particules tronquées sur les bords de l'image,
- élimination des particules de surface inférieure à un seuil fixé par l'opérateur,
- numérotation des particules,
- extraction et tri du contour des particules.



1. Images de grains prélevés au cours d'une métamorphose d'isothermie, utilisées comme test. La bille de calibration a un diamètre de 3 mm. Le grossissement est de 12,5.

Il est important de noter que l'image à traiter n'a que deux dimensions. Certaines caractéristiques telles que l'épaisseur des grains et cavités sont perdues. La figure 1 montre les images de grains d'un échantillon. A ce grossissement (12,5), un pixel est un carré de 0,0145 mm de côté.

III ■ PARAMÈTRES CALCULÉS

● 3.1 Pour chaque particule

- la surface S ,
- la longueur maximale L ,
- le périmètre P ,
- le paramètre $P^2/4\pi S$ permet d'évaluer le degré de dendriticité des grains ($= 1$ pour le cercle),
- le paramètre $\pi L^2/4S$ permet d'évaluer la tendance à la symétrie ($= 1$ pour le cercle).

Ces paramètres, bien que significatifs, dépendent étroitement de la disposition des grains. Leur utilisation nécessite un grand soin dans les prises de vue (séparation des grains).

Les minima, maxima, moyennes et écarts-types de ces paramètres sont également calculés.

- le paramètre $\Sigma P^2/\Sigma 4\pi S$ permet de minimiser l'impact des grains petits par rapport à l'ensemble de l'échantillon.

● 3.2 A partir des contours

- la courbure pour chaque pixel (méthodes de calcul décrites au paragraphe 4),
- les moyenne et écart-type des courbures concaves et convexes sur l'ensemble des contours (inverse = rayon moyen),
- les moyenne et écart-type des courbures concaves et convexes sur chaque grain,
- les minima et maxima des courbures concaves et convexes sur l'ensemble des grains,
- l'histogramme de distribution des rayons de courbure sur l'ensemble des contours. Les rayons supérieurs à 2 mm sont groupés dans la même classe.

IV ■ MÉTHODES DE CALCUL DES RAYONS ET VALIDATION

Les moyennes sont calculées pour tous les points à courbure convexe ($R > 0$), respectivement concave ($R < 0$) du pourtour de chaque grain. On prend ensuite l'inverse de ces résultats pour obtenir le rayon moyen de chaque grain.

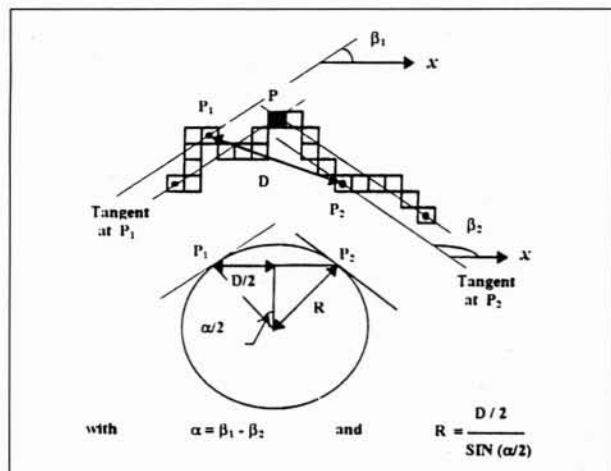
Les moyennes globales des courbures (concaves et convexes) sont calculées sur l'ensemble des pixels de tous les contours. Le rayon moyen convexe correspondant constitue un des paramètres utilisés pour la reconnaissance des différents types de neige. Le rayon concave n'est pas utilisé en pratique car il est trop dépendant de la disposition des grains.

Deux méthodes sont proposées pour le calcul des rayons.

● 4.1 Méthode par calcul des tangentes

Les rayons de courbure sont calculés en chaque point du pourtour des grains, à partir d'un nombre $(2N + 1)$ de pixels, de part et d'autre du point considéré. Ce nombre est fixé par l'opérateur.

La tangente en chaque point P est d'abord calculée : elle est choisie comme étant la droite passant par les deux points



2. Méthode par calcul des tangentes. Calcul du rayon de courbure en P à partir de 11 pixels ($N=5$). Un carré représente un pixel du contour du grain.

P_1 et P_2 du contour, distants de N pixels de chaque côté de P (fig. 2).

Le rayon de courbure R est le rayon du cercle tangent aux tangentes en P_1 et P_2 , P_1 et P_2 étant distants de D .

4.2 Méthode par recherche d'une fonction de lissage

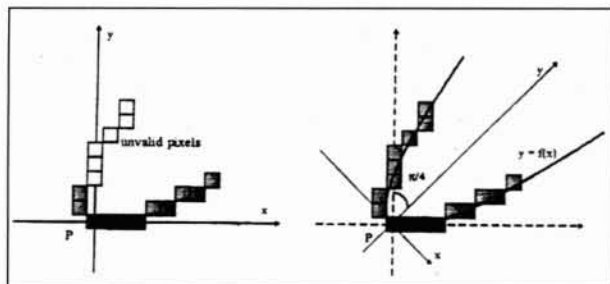
Les rayons de courbure sont déterminés en utilisant les propriétés métriques des courbes planes. Pour cela, on effectue le lissage partiel du pourtour du grain sur un nombre N de pixels, fixé par l'opérateur.

— recherche du nombre maximum de pixels d'abscisses croissantes de part et d'autre du point P , de manière à ce que ce nombre soit inférieur ou égal à N .

Pour cela, on effectue des changements d'axes successifs par pas de $\pi/4$ dans le sens des aiguilles d'une montre (fig. 3) et on détermine les abscisses de chacun des points dans les nouveaux repères. La recherche s'arrête dès que le nombre total des points est égal à N . Si ce nombre reste inférieur à N dans les 8 repères, le repère retenu est celui où le nombre est maximum. Néanmoins le calcul de la courbure ne sera effectué que si ce nombre atteint un minimum fixé par l'opérateur.

— une régression d'ordre 2 est effectuée à partir des points trouvés (fig. 3). On détermine ainsi les coefficients de la fonction de lissage correspondante : $f(x) = ax^2 + bx + c$

$$\text{puis le rayon } R = \frac{[1 + f''(x)]^{3/2}}{f''(x)}$$



3. Méthode par recherche d'une fonction de lissage. Recherche de l'angle de rotation optimal et de la fonction $f(x)$.

4.3 Validation

Dans le but de valider les calculs de rayons ainsi que d'optimiser le choix de la méthode et du nombre de pixels N , un traitement systématique sur des billes de tailles connues a été effectué. Les rayons des billes utilisées sont : 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm et 1,5 mm. On a procédé à deux séries de traitements sur ces billes, d'une part isolées les unes des autres et d'autre part agglomérées entre elles. Pour chacune de ces séries les deux méthodes ont été utilisées, avec un grossissement identique (12,5). Les paramètres $2N+1$ (tangente), N (lissage), ont pris les valeurs suivantes : 7, 11, 15, 19, 23. Les valeurs de rayon convexe moyen obtenues ont été comparées à la taille réelle des billes.

La figure 4 montre ces résultats.

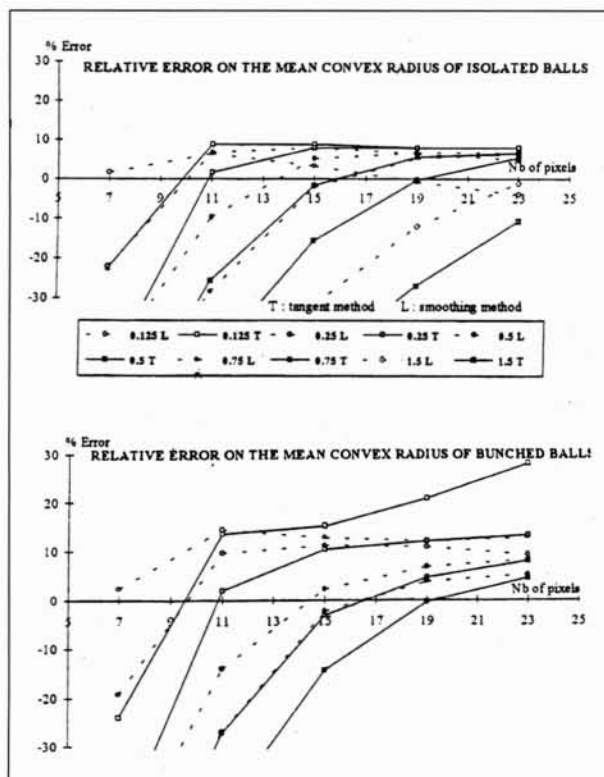
— Pour des valeurs inférieures à 13, les rayons sont nettement sous-estimés dans de nombreux cas, et ceci avec les deux méthodes.

— Dans le cas des billes isolées, l'augmentation du nombre de pixels améliore les résultats. On note que les erreurs sont généralement moindres avec la méthode de lissage.

— Dans le cas des billes groupées, l'augmentation du nombre de pixels aggrave les erreurs sur les petites billes avec la méthode de la tangente. Pour la méthode de lissage, les erreurs sur les rayons sont à peu près constantes ($\leq 10\%$) de 17 à 23 pixels.

La plupart des grains de neige ayant une taille (diamètre) inférieure à 2 mm, le choix du nombre de pixels utilisé dans cette étude a été fixé à 17. Avec ce choix les erreurs sur le calcul des rayons sont inférieures à 10 % dans la majorité des cas. Pour des grains plus gros, on se ramènera au cas favorable en diminuant le grossissement lors de la prise de vue.

Par souci d'homogénéité entre les traitements, ce nombre a été conservé pour tous les échantillons de cette étude en ajustant le grossissement aux types de grains traités.



4. Validation du calcul du rayon convexe moyen. Pourcentage d'erreur sur des billes isolées et groupées.

V ■ IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DES TYPES DE NEIGE

● 5.1 Apprentissage

5.1.1 Fichier d'apprentissage

Afin de disposer des valeurs des paramètres calculés sur tous les types de neige, 65 échantillons ont été traités, se répartissant de la façon suivante :

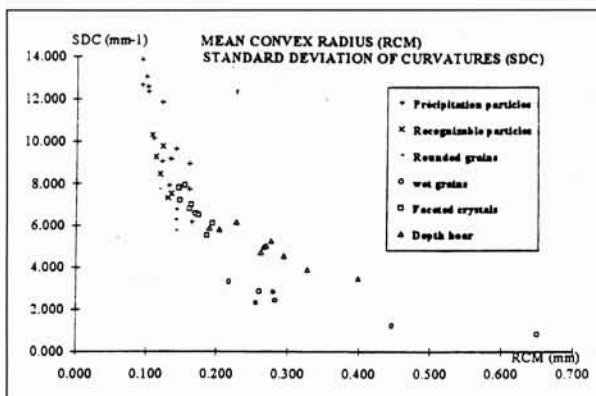
- 12 échantillons de neige fraîche,
- 3 échantillons intermédiaires entre neige fraîche et particules reconnaissables,
- 6 échantillons de particules reconnaissables,
- 10 échantillons intermédiaires entre particules reconnaissables et grains fins,
- 5 échantillons de grains fins,
- 7 échantillons de grains ronds,
- 9 échantillons de grains à faces planes,
- 10 échantillons de gobelets,
- 3 échantillons intermédiaires entre gobelets et grains ronds.

Cette répartition a été établie par reconnaissance visuelle de plusieurs experts en accord avec la classification internationale [5].

5.1.2 Paramètres utilisés pour la reconnaissance

Certains paramètres dépendant trop de la disposition des grains de neige ont été rejetés : surface, périmètre, longueur. Ces paramètres prennent des valeurs très différentes sur deux grains de neige selon qu'ils sont ou non en contact l'un avec l'autre. Afin de sélectionner les paramètres les plus discriminants, des graphiques par couples ont été tracés. La figure 5 montre l'exemple du couple rayon de courbure convexe moyen, écart-type des courbures convexes. Seuls les échantillons appartenant à une catégorie nettement identifiée visuellement ont été pris en compte.

On remarque dans cet exemple que les points correspondant à un type de neige donné forment une zone plus ou moins bien disjointe des zones représentant les autres types. Cela n'est pas vrai pour la neige fraîche (+) dont la zone intercepte celles des particules reconnaissables (x), des grains fins (-) et des grains à faces planes (□). Cette particularité ayant été constatée avec la plupart des autres couples de paramètres, la neige fraîche, de morphologie très variable n'a pu être distinguée, dans certains cas, de ces trois types de neige. La reconnaissance automatique décrite dans cette étude ne concerne que les neiges évoluées.



5. Répartition des valeurs mesurées du fichier d'apprentissage pour le couple de paramètres (RCM -ECT).

L'examen des graphiques a conduit à sélectionner les paramètres suivants :

— **rayon convexe moyen.** Ce paramètre donne des éléments relatifs à la taille des grains. Il est très stable. En effet deux échantillons différents de la même neige donnent des résultats très proches.

— **écart-type des courbures convexes.** Ce paramètre, dépendant de la régularité du contour des grains, est également très stable.

— **rapport écart-type des courbures convexes sur courbure convexe moyenne.** Ce rapport sépare plus nettement des populations de neiges différentes ayant la même courbure ou le même écart-type (exemple grains fins et grains à faces planes) (fig. 6).

— $\Sigma P^2 / \Sigma 4\pi S$. Ce paramètre augmente avec la dendriticité et diminue pour les neiges granuleuses. Contrairement aux précédents, il est sensible à la disposition des grains entre eux.

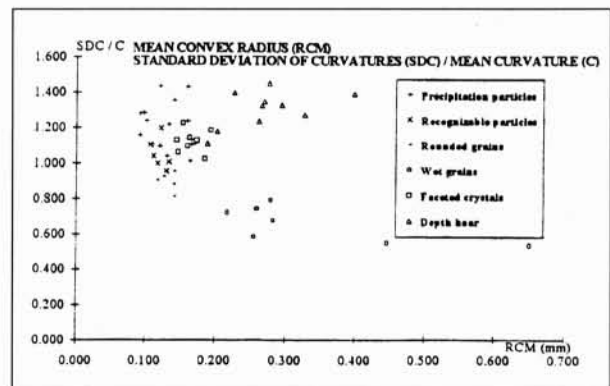
— **histogramme.** La consultation des feuilles de résultats a montré que l'histogramme de répartition des rayons de courbure présente des caractéristiques liées au type de neige. L'exemple de la figure 7 montre deux histogrammes d'allure différente pour des neiges (grains fins et grains à faces planes) de rayons convexes moyens proches.

Une variable empirique (histo) a été élaborée dans le but de tenir compte de l'allure de l'histogramme. Elle est définie par $(x_{max} * np) * (y_{max})^{-1}$ avec

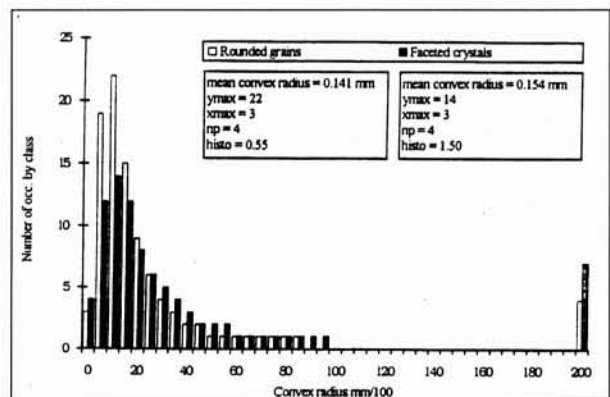
y max = ordonnée maximale dans la partie convexe

x max = abscisse correspondant à y max

np = ordonnée correspondant aux valeurs supérieures à 2 mm (« plats ») dans la partie convexe.



6. Répartition des valeurs mesurées du fichier d'apprentissage pour le couple de paramètres (RCM -ECT/C).



7. Histogrammes de répartition des rayons de courbure convexes. Comparaison entre des grains fins et des grains à faces planes.

5.1.3 Méthode de reconnaissance

Une approche algorithmique à partir de seuillages sur les différents paramètres est rapidement apparue trop restrictive.

La valeur que prend chaque paramètre traduit partiellement le degré de proximité de l'échantillon étudié à un des types de neige. Cette « distance » est exprimée par un nombre (poids) entre 0 et 1. Ainsi, la valeur 0 exprime le fait que l'échantillon ne peut appartenir à ce type de neige. À l'inverse, la valeur 1 indique que l'échantillon, relativement à ce paramètre, présente les caractéristiques du type.

La figure 8 montre pour chacun des paramètres, les valeurs mesurées sur les échantillons d'apprentissage, et l'estimation des poids pour les différentes classes de valeurs.

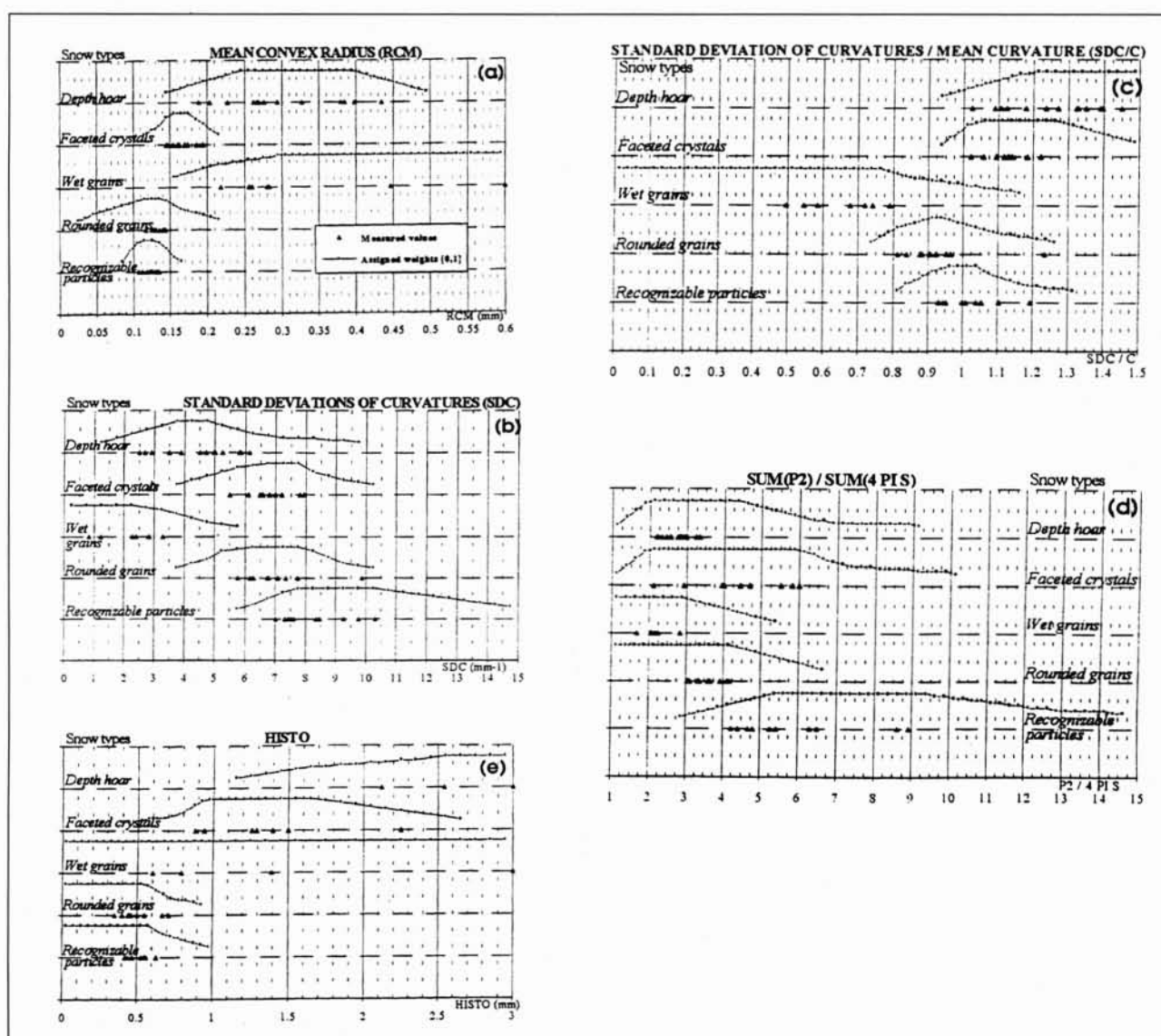
Le procédé de reconnaissance consiste à multiplier entre elles les 5 valeurs prises par ces poids pour l'échantillon, ceci étant effectué pour chaque type de neige (Δ , $\bullet$, $\circ$, $\square$, Λ).

On dispose alors de 5 résultats permettant d'exclure (valeurs nulles) un ou plusieurs types de neige.

Les caractères de l'échantillon sont répartis en proportions des résultats non nuls.

La répartition des poids a été mise au point de façon expérimentale de manière à ce que la méthode fournisse de bons résultats sur l'ensemble des 53 échantillons d'apprentissage (65 moins 12 du type neige fraîche).

Le nombre limité d'échantillons du fichier d'apprentissage n'a pas permis d'employer les méthodes statistiques usuelles. Cependant, en parallèle à la méthode de reconnaissance définie ci-dessus, une approche par analogie a été testée. Elle consiste à rechercher dans le fichier d'apprentissage l'échantillon le plus proche de celui étudié. Les distances euclidiennes sont calculées dans l'espace normé à 5 dimensions, défini par les 5 paramètres décrits précédemment. Dans la plupart des cas, l'échantillon trouvé correspond bien à l'échantillon testé. Les échecs constatés proviennent du fait que la répartition du fichier d'apprentissage dans l'espace n'est pas homogène. Cet inconvénient disparaît par l'apport expert de la méthode développée. En effet, les courbes d'affectation des poids (fig. 8) présentent des valeurs non nulles en dehors des points observés.



8. (a, b, c, d, e) Affectation d'un poids d'appartenance à un type de neige pour chaque classe de valeurs prises par chacun des 5 paramètres, à partir des valeurs mesurées et d'un jugement expert.

5.1.4 Variables nivologiques

Dans le modèle CROCUS, la morphologie de la neige est caractérisée par deux nombres réels variant de 0 à 1 : la dendricité et la sphéricité pour les neiges récentes ; la taille et la sphéricité pour les neiges granuleuses.

La dendriticité varie de 1 pour la neige fraîche à 0 vers les neiges granuleuses.

La sphéricité varie de 1 pour les grains fins et grains ronds à 0 pour les grains à faces planes et les gobelets. Elle est fixée arbitrairement à 0.5 pour la neige fraîche.

Afin d'obtenir une traduction nivologique des paramètres calculés dans cette étude, et après examen des valeurs mesurées (fig. 8), une correspondance est proposée de la façon suivante.

Le paramètre $\Sigma P^2/\Sigma 4\pi S$ varie de valeurs proches de 2 (grains ronds) à des valeurs proches de 12 (neige fraîche dendritique). La dendricité suit cette variation en prenant des valeurs de 0 à 1. Elle est donnée pour la neige fraîche, les particules reconnaissables et les grains fins de taille < 0.3 mm.

La sphéricité (= 1- angulosité) varie linéairement de 0 à 1 lorsque le rapport écart-type des courbures / courbure moyenne varie de 1,3 (gobelets) à 0,8 (grains fins, grains ronds). Elle est donnée pour tous les types de neige.

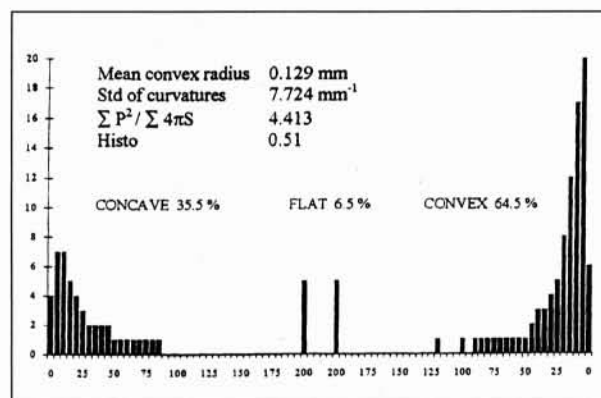
La taille est donnée par le diamètre convexe moyen. Pour les neiges de type ($\square$, Δ), afin de prendre en compte l'angulosité, ce diamètre est multiplié par le rapport précédent.

Les caractéristiques estimées ainsi que ces variables sont fournies dans le fichier résultat à la suite des paramètres calculés.

● 5.2 Tests

5.2.1 Example

La figure 9 résume les résultats du traitement des images de la figure 1.



9. Extrait du fichier de résultats correspondants aux images de la *figure 1* : histogramme de répartition des rayons et résultats de la reconnaissance automatique.

5.2.2 Résultats globaux

Afin de valider la méthode de reconnaissance, le traitement a été effectué sur 37 échantillons tests. Les résultats sont regroupés dans le tableau de la *figure 10* en respectant la règle suivante : lorsque plusieurs caractères ont été identifiés, on ne tient compte du deuxième que si sa proportion dépasse 5 %. L'éventuel troisième est ignoré.

— 23 traitements donnent un très bon résultat.

— 13 autres donnent un résultat voisin de l'observation visuelle. Par exemple, 4 échantillons classés dans la catégo-

[illegible]

10. Tableau de contingence des résultats des tests. 1 : reconnaissance visuelle. 2 : reconnaissance automatique.

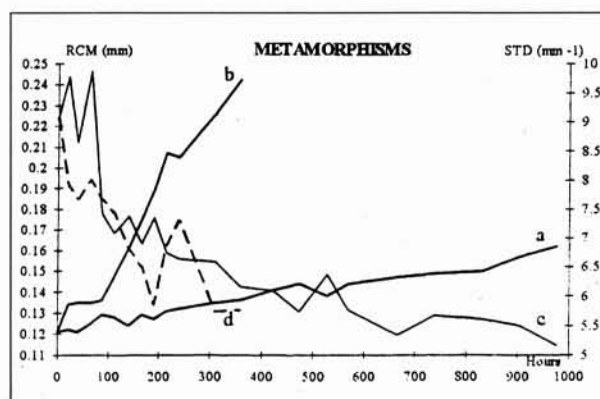
rie intermédiaire < grains ronds – faces planes > ont été identifiés comme ayant les caractères de la catégorie < grains ronds – gobelets >.

— 1 échantillon est mal reconnu. Il correspond à des particules reconnaissables comportant une proportion importante d'aiguilles, ainsi qu'un début de formations anguleuses dues à un fort gradient pendant deux nuits. Le caractère exclusif de grains à faces planes est lié aux contours rectilignes des aiguilles. Ce problème est proche de celui rencontré avec la neige fraîche.

5.2.3 Métamorphose

Une métamorphose de faible gradient (isothermie à -5°C) ainsi qu'une métamorphose de fort gradient ($1^{\circ}\text{C cm}^{-1}$) ont été conduites en chambre froide à partir de particules reconnaissables. L'évolution des paramètres calculés a été suivie par prélèvements réguliers. La *figure 11* montre l'évolution des rayons convexes moyens et de l'écart-type des courbures convexes. On note la différence d'évolution des rayons convexes moyens pour les deux cas. La lente variation au cours de la métamorphose d'isothermie montrée également par R.L. Brown [6] a été correctement mise en évidence (0,04 mm en 1 000 heures). Dans cette métamorphose, le lissage des contours est traduit par la décroissance régulière de l'écart-type des courbures convexes.

La transformation des grains a été correctement discernée par la méthode de reconnaissance (*fig. 12*)



11. Evolution du rayon de courbure convexe moyen et de l'écart-type des courbures convexes au cours des deux métamorphoses.

- métamorphose d'isothermie
a) RCM c) ECT
- métamorphose de fort gradient
b) RCM d) ECT
ECT = écart type des courbures

Hours	Isothermal metamorphism	Large temperature gradient
000	/	/
000 - 039	/ ●	/ ●
039 - 087	/ ●	/ ● □
087 - 141	● /	□
141 - 263	● /	□ Δ
263 - 357	●	Δ
357 - 976	●	

12. Reconnaissance des grains en cours de métamorphoses.

VI ■ CONCLUSION

La neige fraîche présente une grande diversité de formes. C'est pourquoi il est très difficile de vouloir les distinguer à l'aide des cinq paramètres décrits dans cette étude. Au fur et à mesure de son évolution, elle atteint des états de plus en plus caractérisés. A ce stade, les résultats de la méthode sont largement positifs. Pour les neiges fraîches, seules la dendricité et la sphéricité sont fournies.

Le calcul du rayon convexe moyen donne des résultats précis et reproductibles, comme l'a montré l'expérimentation sur les métamorphoses. Les écart-types des courbures ainsi que la distribution des rayons convexes sur l'ensemble des contours ont de la même manière joué un rôle essentiel dans le procédé de reconnaissance automatique.

Le paramètre $\Sigma P^2 / \Sigma 4 \pi S$, traduisant correctement la dendricité, est cependant très sensible à la composition des images. Il est donc nécessaire, lors de la prise de vue, de séparer au mieux les grains, pour ne pas introduire de biais dans l'analyse.

Un nombre plus important d'échantillons composant le fichier d'apprentissage aurait sans doute permis d'établir de façon plus rigoureuse les lois de distribution des poids.

Malgré cela, il apparaît que les paramètres calculés sont le reflet de réelles caractéristiques morphologiques. Ces valeurs numériques, obtenues de façon objective, permettent de comparer des échantillons sur des critères ne dépendant pas des observateurs humains.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GOOD W. — Laboratory techniques for the characteristics of snow structure. 1989. ESA, SP-302, 147-151
- [2] BRUN E., MARTIN E., SIMON V., GENDRE C. and COLEOU C. (1989). — An energy and mass model of snow-cover suitable for operational avalanche forecasting. J. Glaciol., 35 (121), 333-342.
- [3] BRUN E., DAVID P., SUDUL M. and BRUNOT G. (1992). — A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. J. Glaciol., 38 (128) 13-22.
- [4] BRUN E. and PAHAUT E. (1991). — An efficient method for a delayed and accurate characterisation of snow grains from natural snowpacks. J. Glaciol., 37 (127), 420-422.
- [5] COLBECK S. and 7 others (1990). — The international classification for seasonal snow on the ground. Wallingford, Oxfordshire, International Association of Hydrological Sciences, International Commission on Snow and Ice.
- [6] BROWN R.L., EDENS M.Q., SATO A. (1994). — Metamorphism of fine-grained snow due to surface curvature differences. A. glaciol.

ANNEXE : EXEMPLE COMPLET D'UN ÉCHANTILLON TEST

