

# FLCONS DE NEIGE

Frédéric HAVET



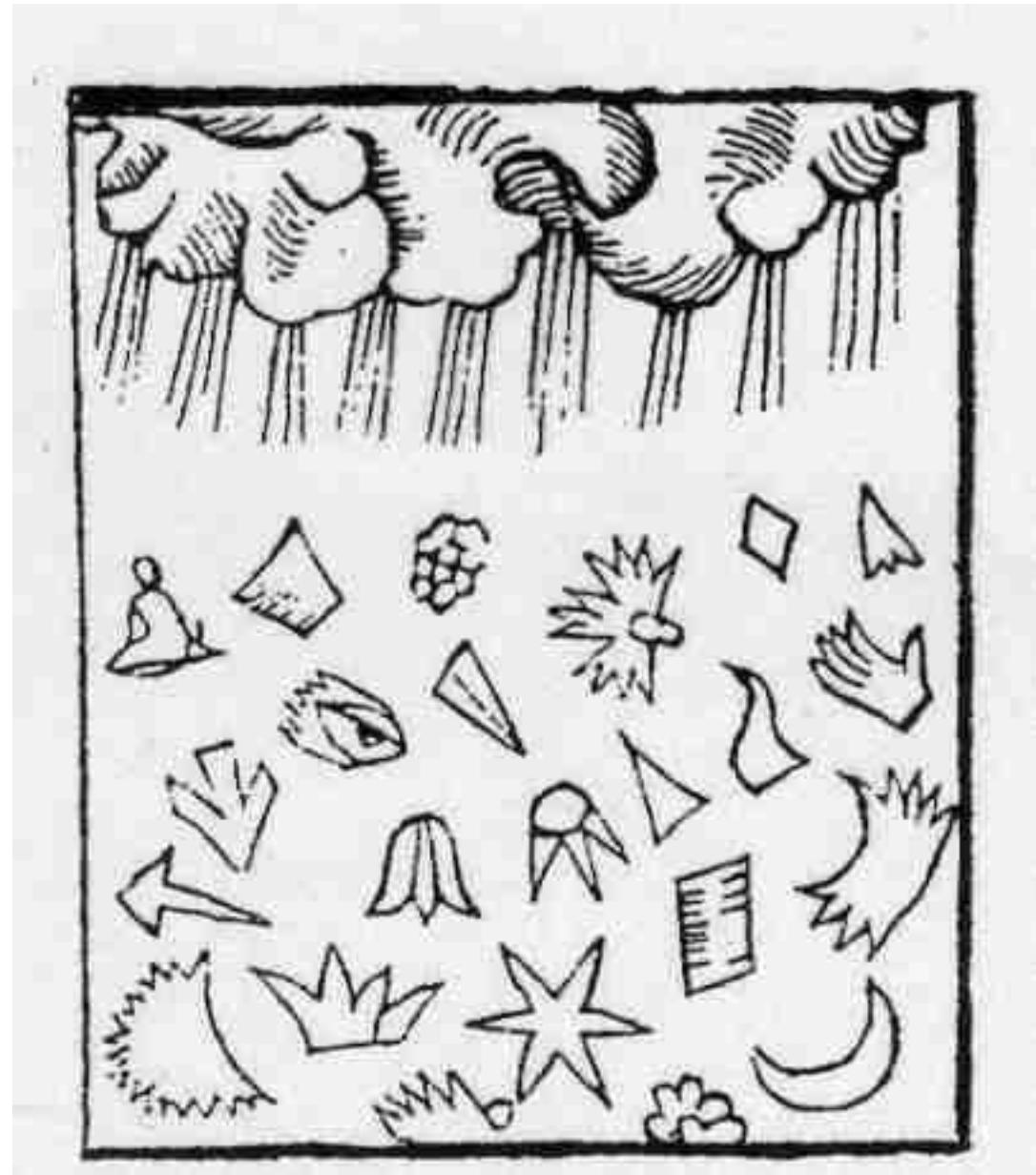
# Premiers dessins



Olof Månsson / Olaus Magnus  
(1490—1554)



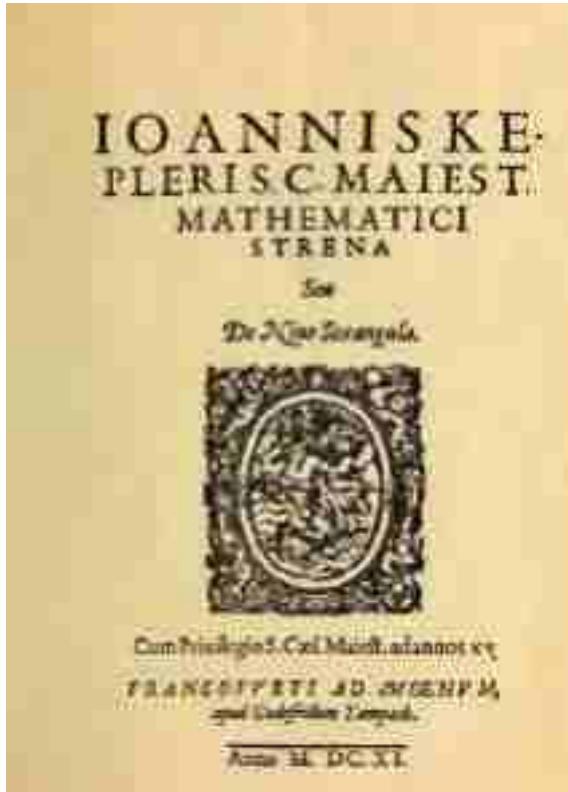
Publié en 1555



# Première étude



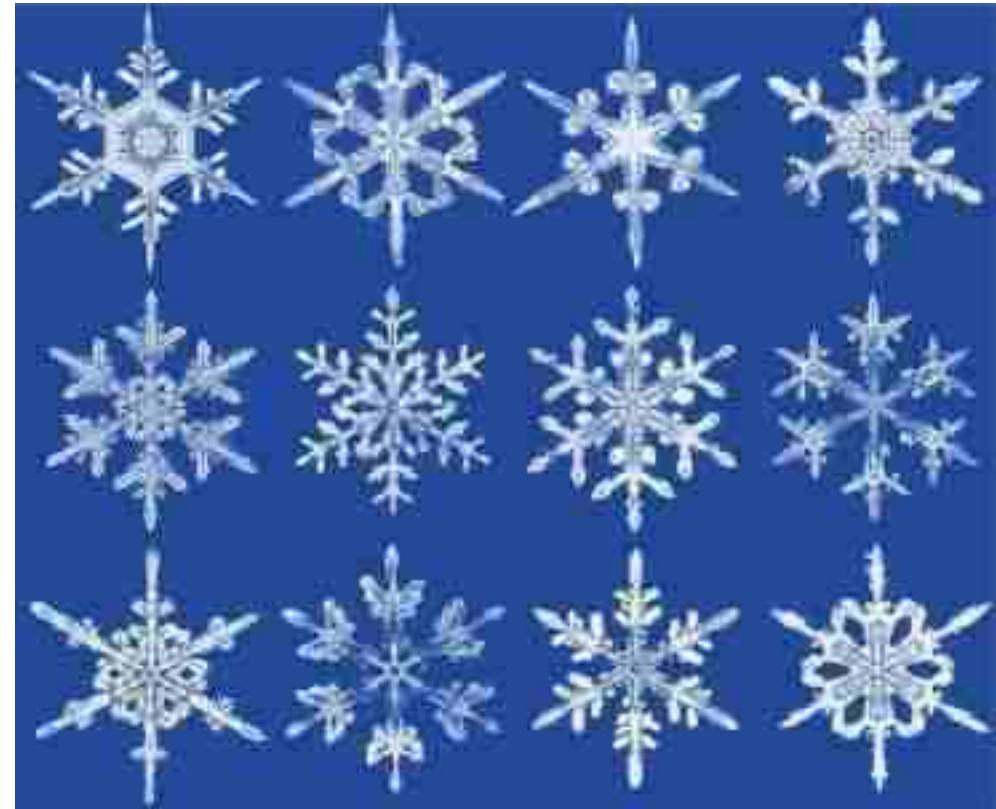
Johannes Kepler  
(1571–1630)



*Strena seu de nive sexangula*  
Publié en 1611

1) Les flocons ont un **air de famille**,  
mais sont **tous différents**.

2) Tous les flocons ont **six branches**.

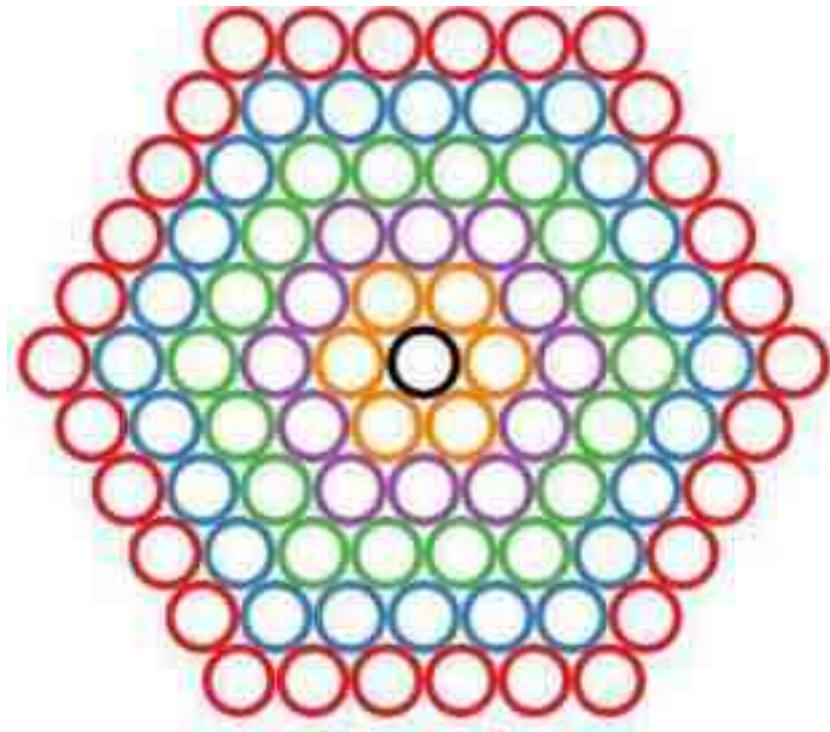


# Pourquoi six branches ?

Analogie avec les alvéoles des abeilles dans les ruches.

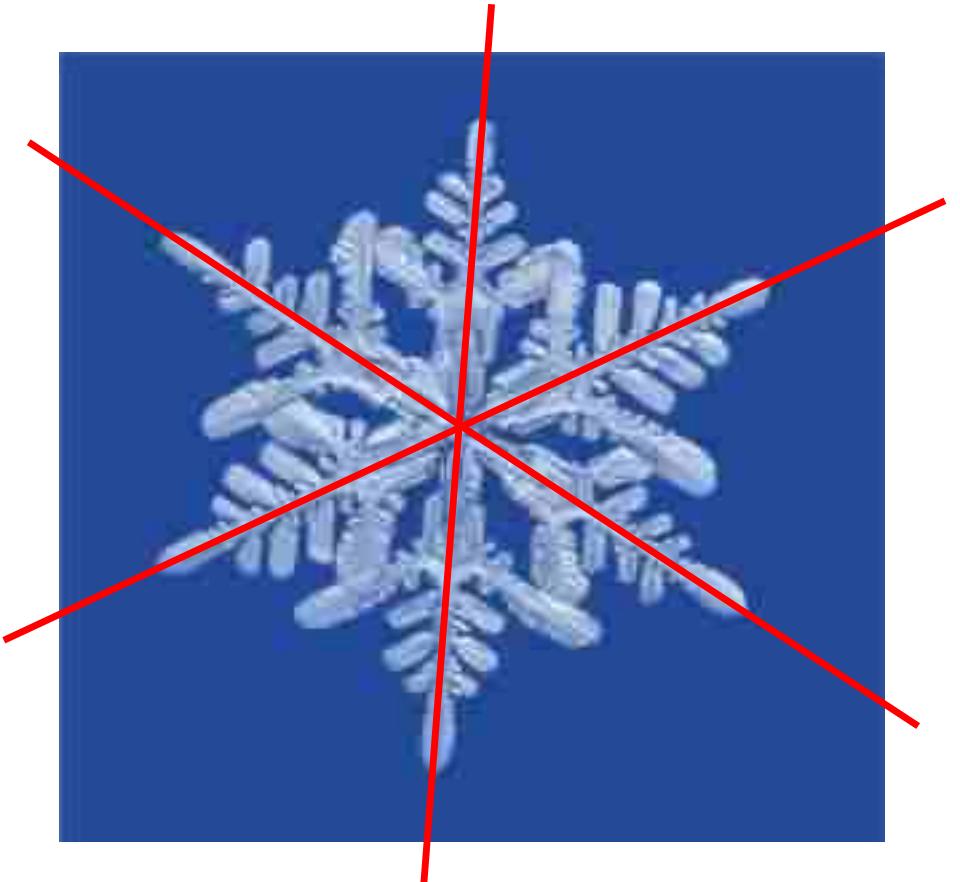


Un disque peut être entouré de six disques de même rayon.



« Les flocons de neige sont peut-être constitués de **disques minuscules** qui sont tassés les uns contre les autres. »

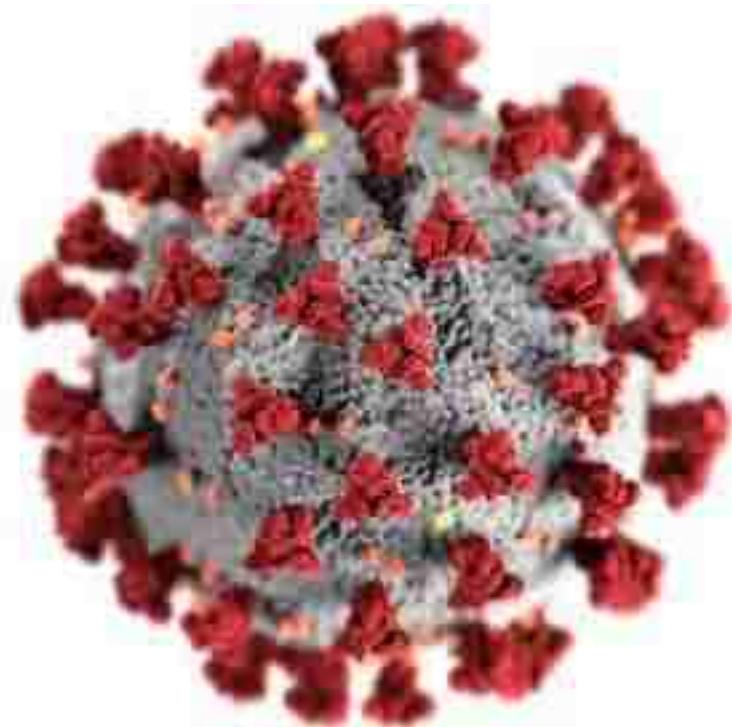
# Pourquoi sont-ils symétriques ?



- Symétries par rapport à 3 axes.
- Rotation d'ordre 6, soit  $360/6 = 60$  degrés.

# Pourquoi sont-ils plats ?

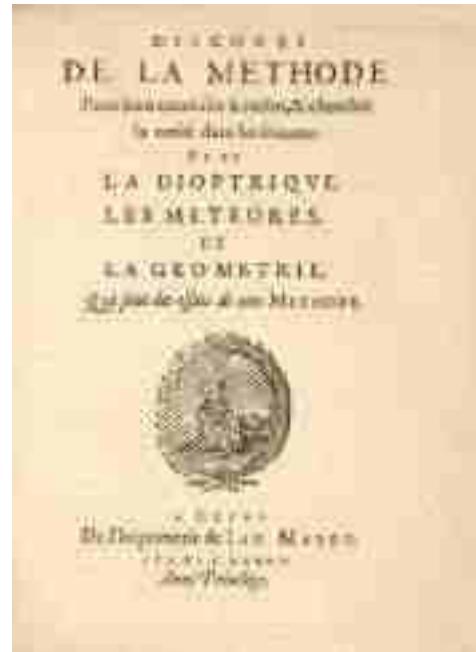
Pourquoi ne sont-ils pas sphériques, comme les oursins ou des virus ?



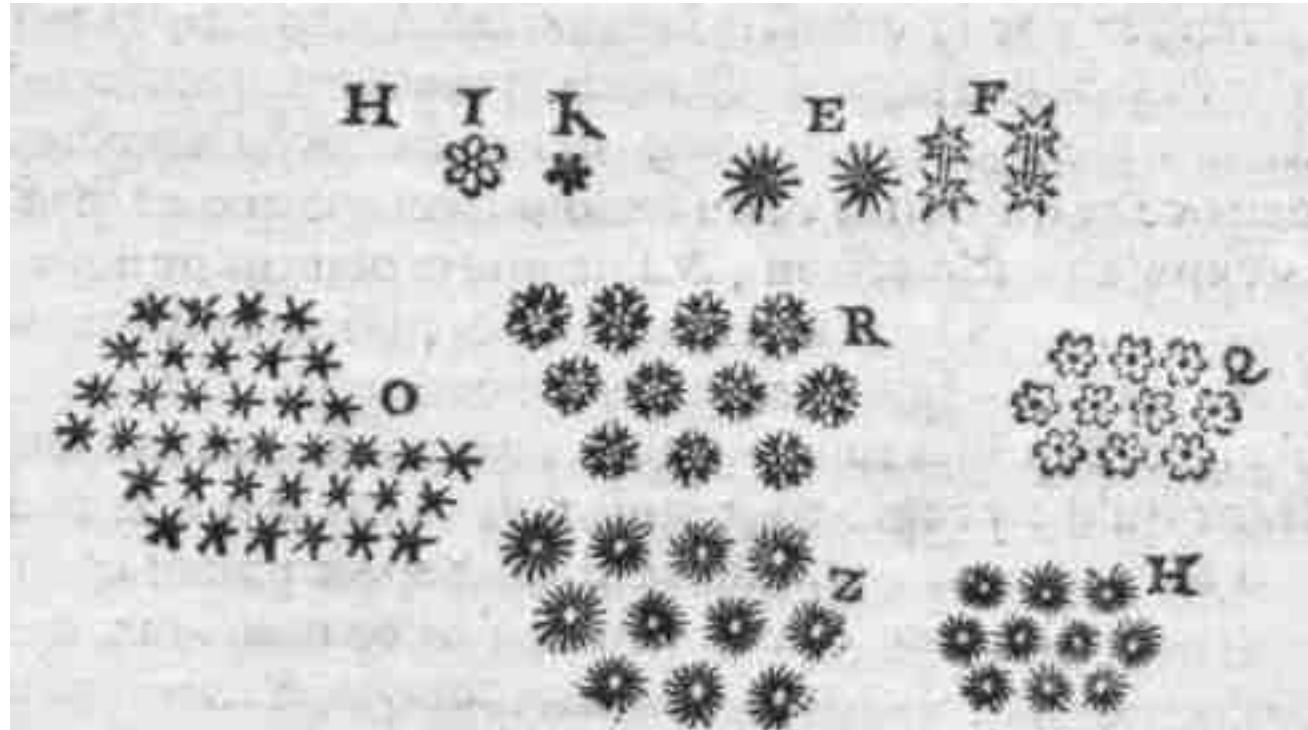
# Dessins de flocons



René Descartes  
(1596 – 1650)



1637

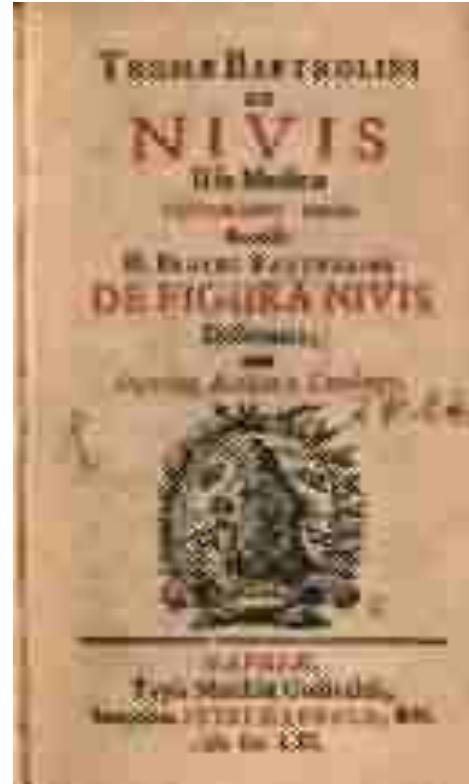


[...] je dirai ce qui cause la pluye et la gresle et la neige ; où je n'oublierai pas celles dont les parties ont la figure de petites étoiles à six pointes très parfaitement compassées, & bien qu'elles n'aient point été observées par les anciens ne laissent pas d'être une des plus rares merveilles de la nature [...]

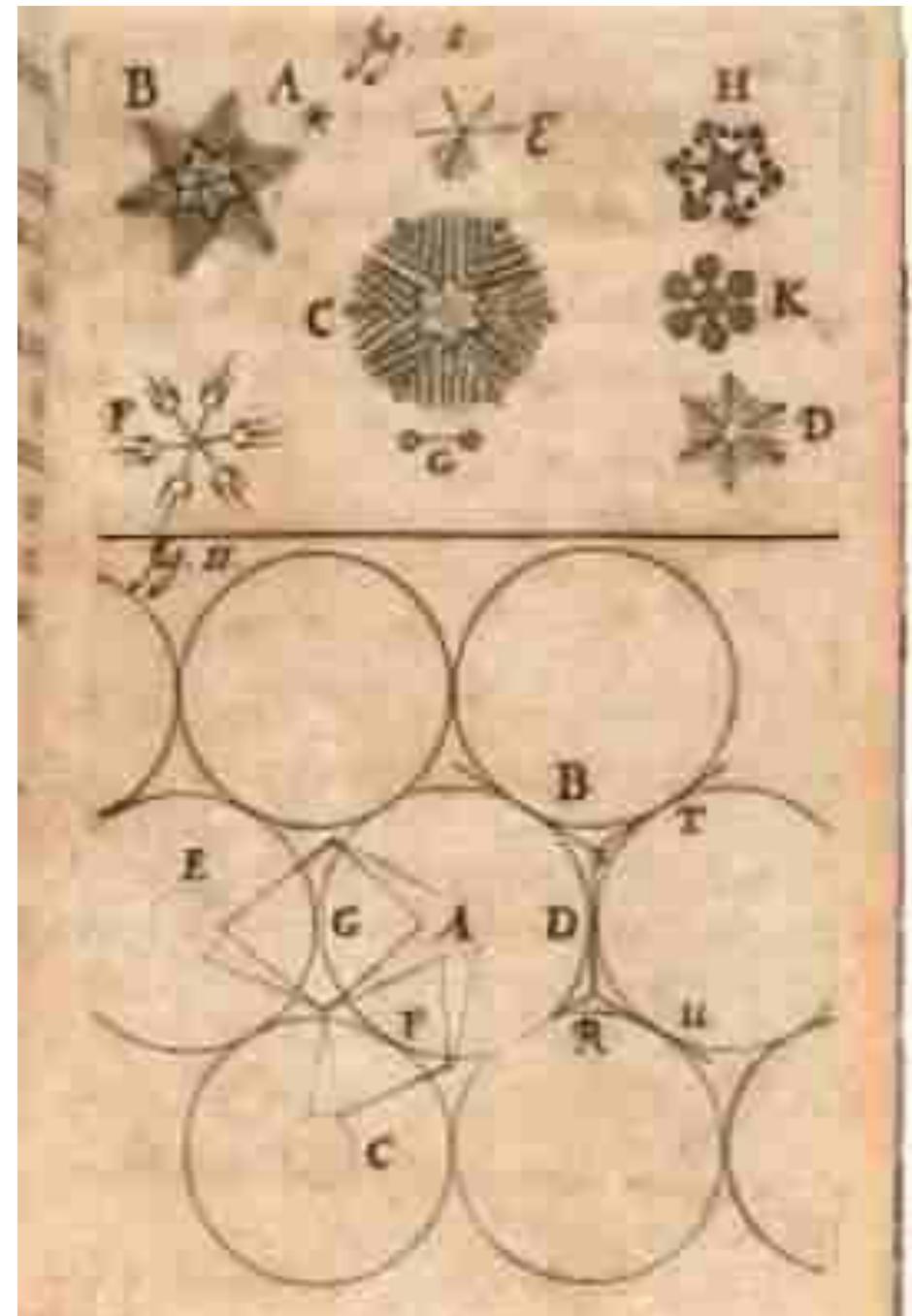
# Dessins de flocons



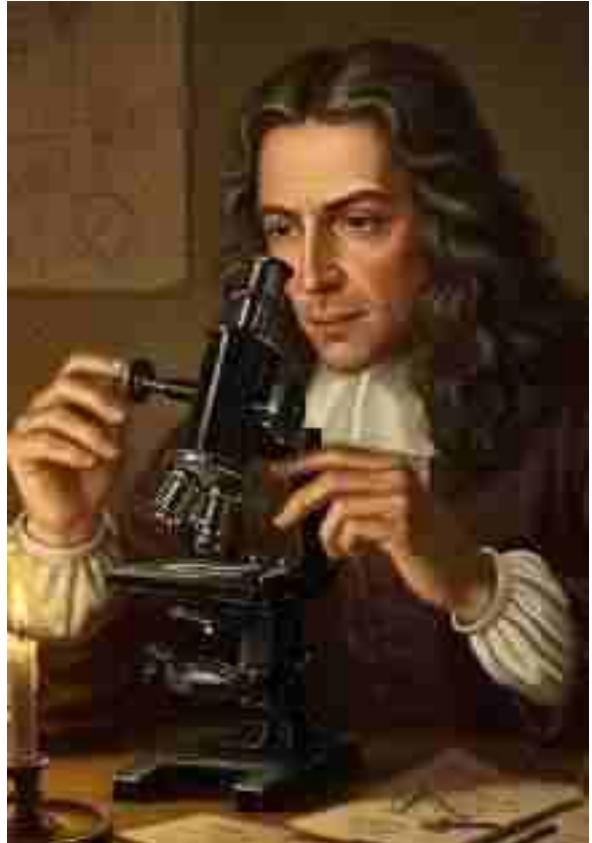
Thomas Bartholin  
(1616 – 1680)



1661

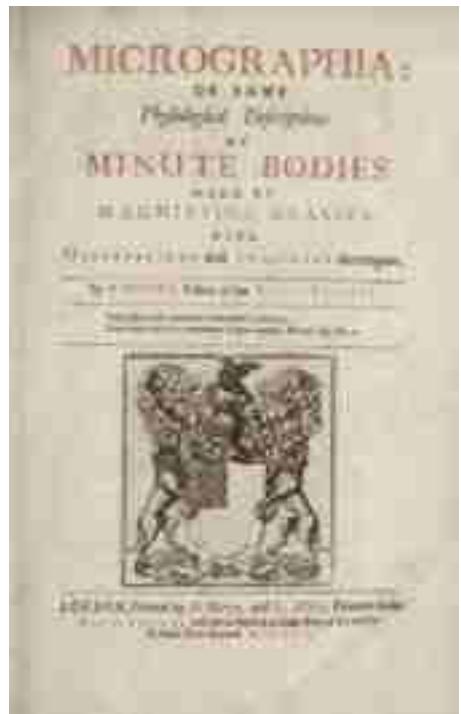


# Dessins de flocons



# Robert Hooke (1635 – 1703)

# Premières observations au microscope



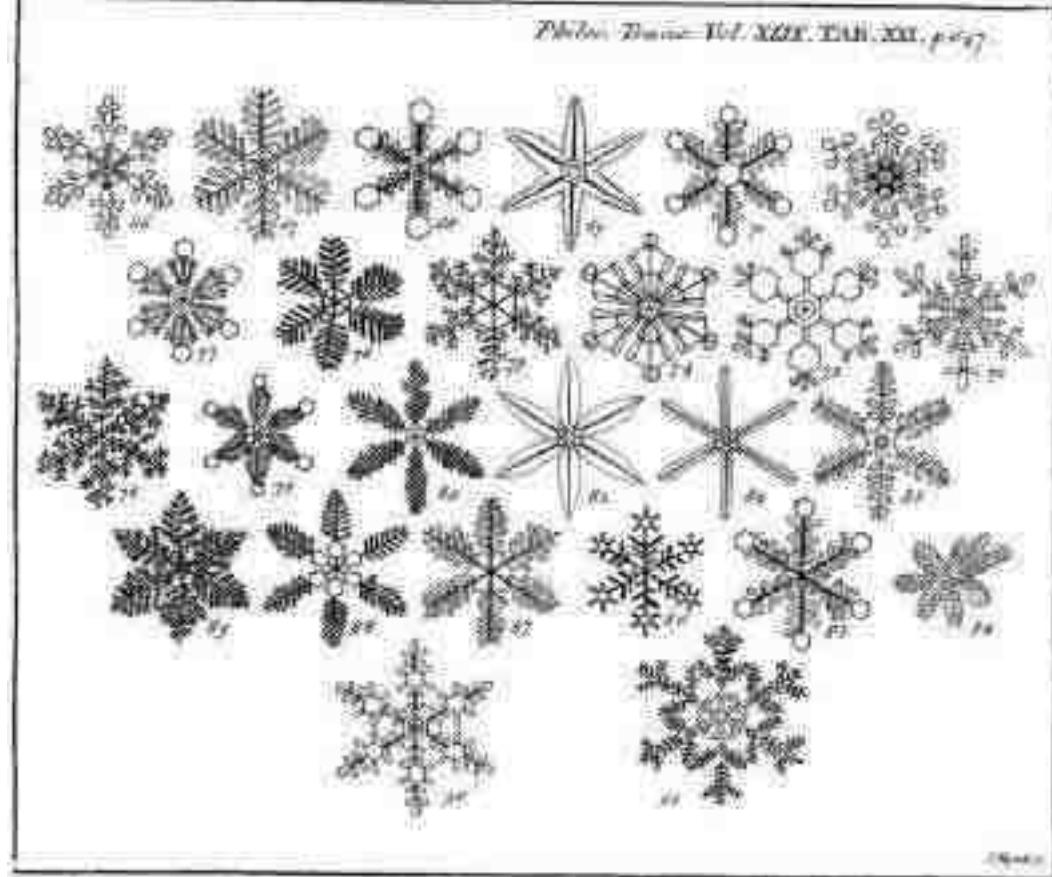
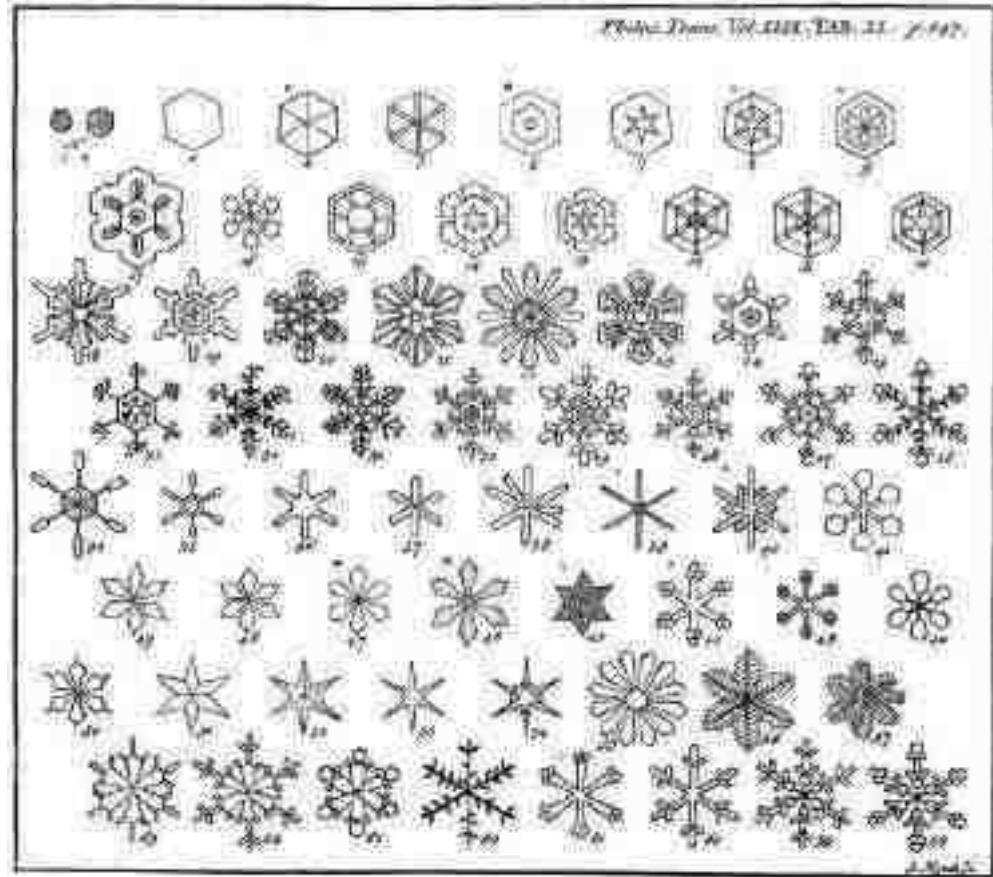
Utilisation d'un compas et pliage du papier pour respecter les symétries.

Dessin de **ce qu'il pense être un flocon** qui selon lui s'abîme en tombant et fond au microscope, mais ont des **formes parfaites**.

# Dessins de flocons

John Nettis  
(1635 – 1703)

*Philosophical  
Transactions,*  
1755.

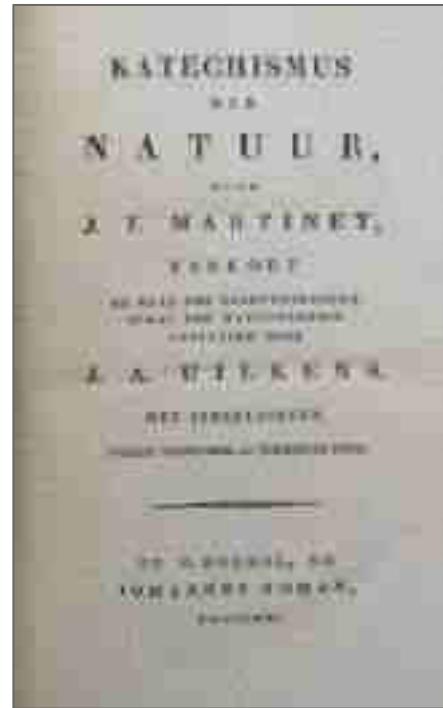


Grand soin de ne pas toucher ni respirer sur les flocons afin que « *l'extrême exactitude et l'égalité des figures de leurs particules les plus infimes puissent être observées et délimitées* ».

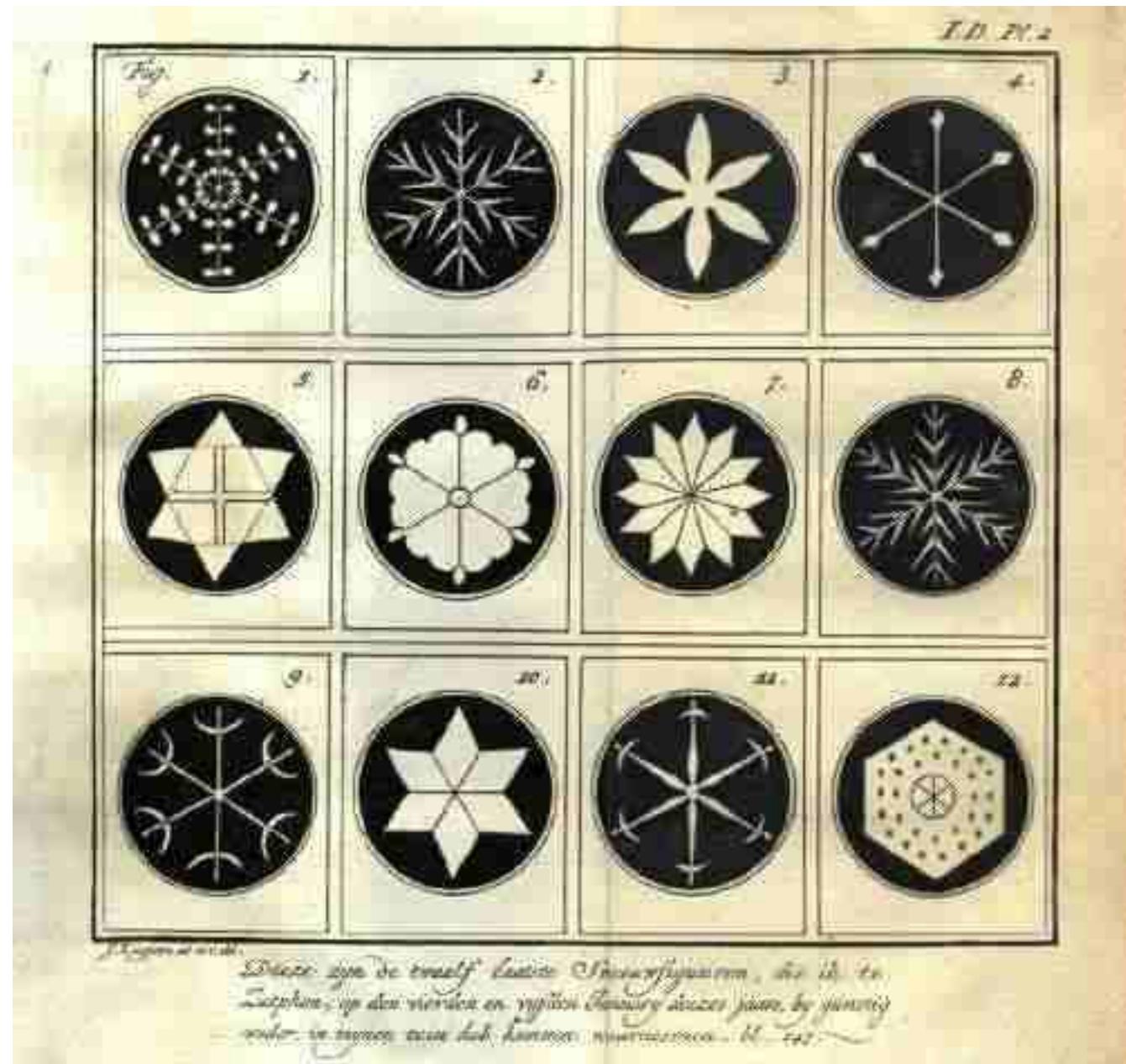
# Dessins de flocons



Joannes Florentius  
Martinet  
(1729 – 1795)



*Katechismus der  
Natuur,*  
1777.



Ditte zijn de twaalf leden Schneeflissers, die ik te  
Leopold, op den vierde en vijfde Januarij afgeloopen jaare, be waarnig  
vond, in denzen eenen drie huijen verschillende. bl. 442.

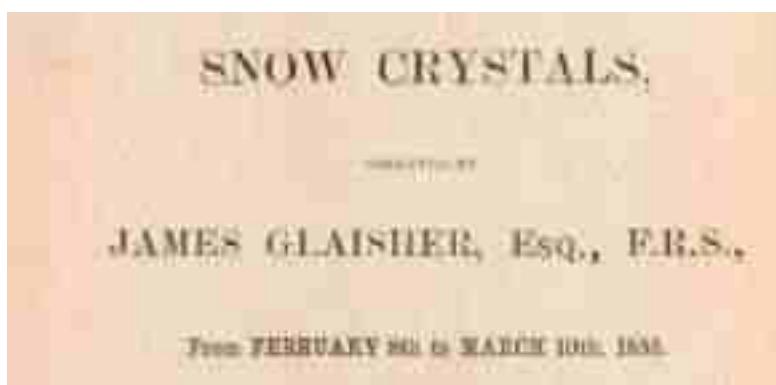
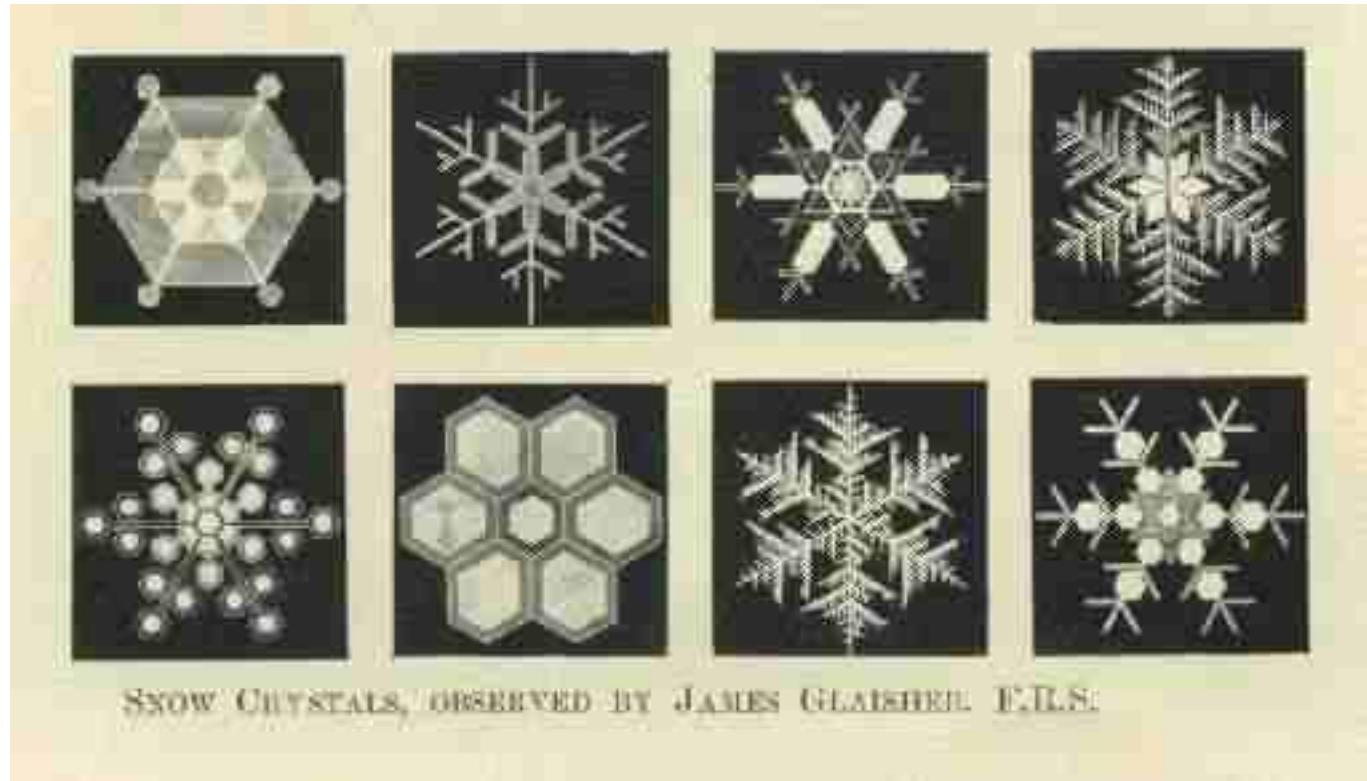
# Dessins de flocons



Cecilia Glaisher  
(1828 – 1892)



James Glaisher  
(1809 – 1903)

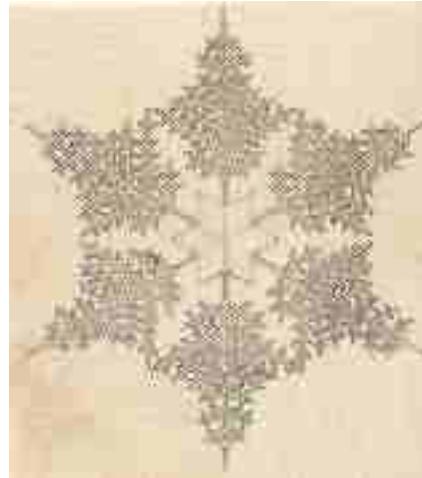
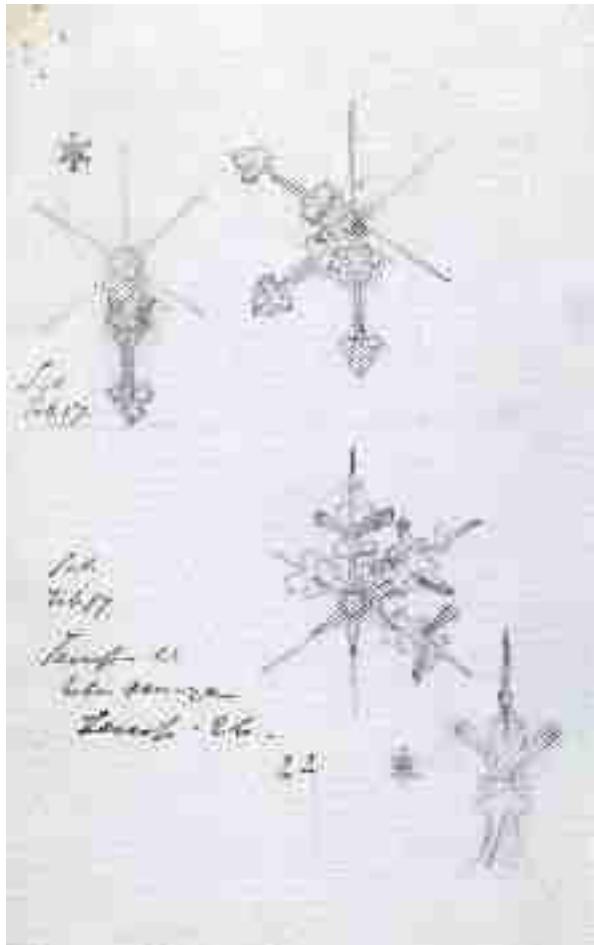


1855

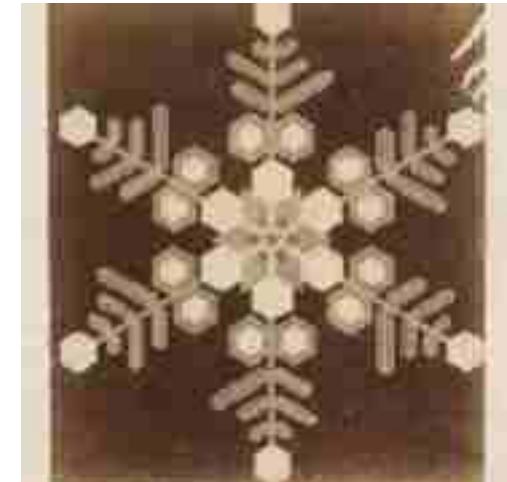
Observations à la loupe des flocons venant se poser sur sa fenêtre.

# Dessins de flocons par Cecilia Glaisher

Dessin de ce qu'elle voit.



Puis schématisation, imagination,  
et parfois ajout de couleurs.

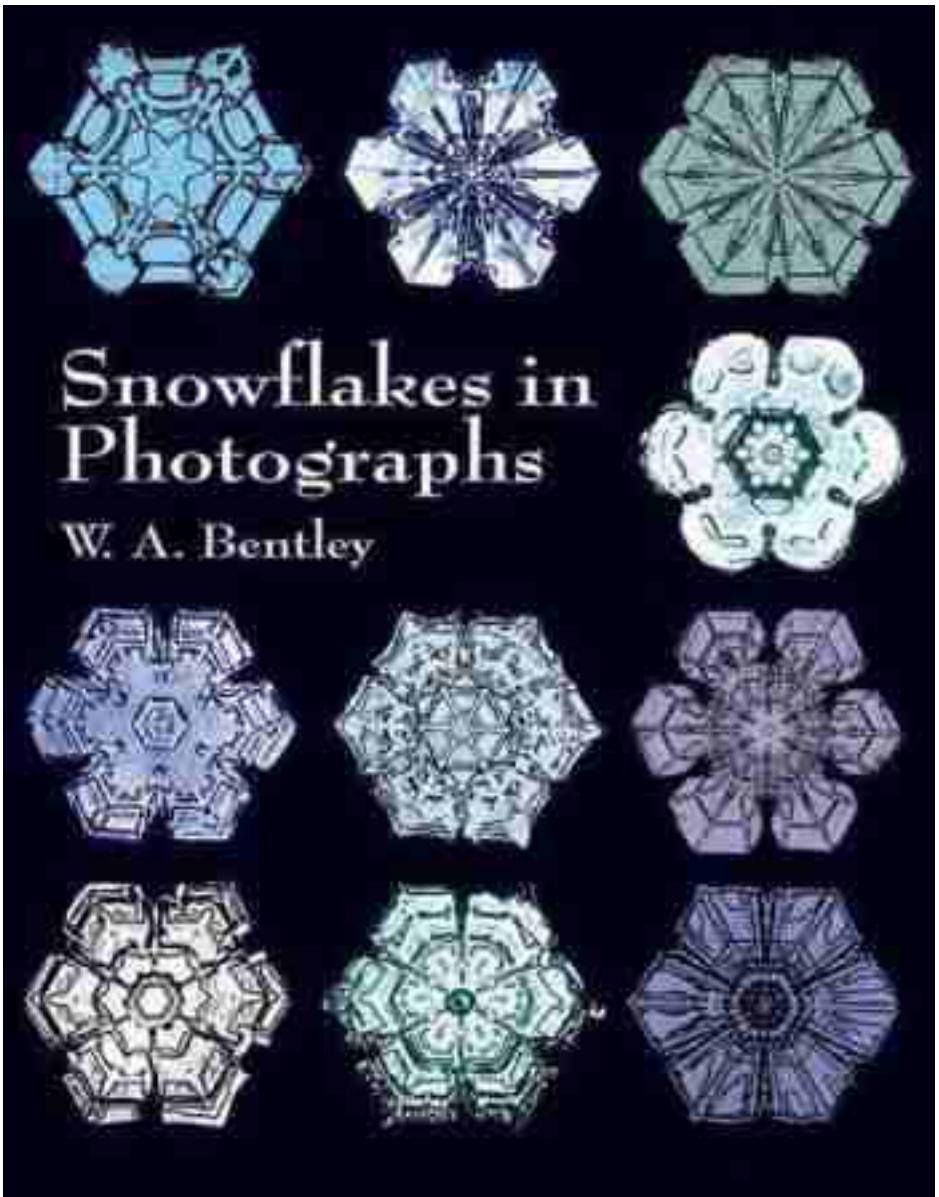


# Photographies de flocons

Wilson Bentley  
(1865 – 1931)



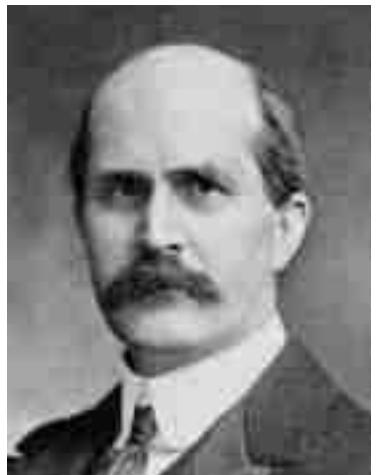
Observations puis photographies au microscope  
(à partir de 1885)



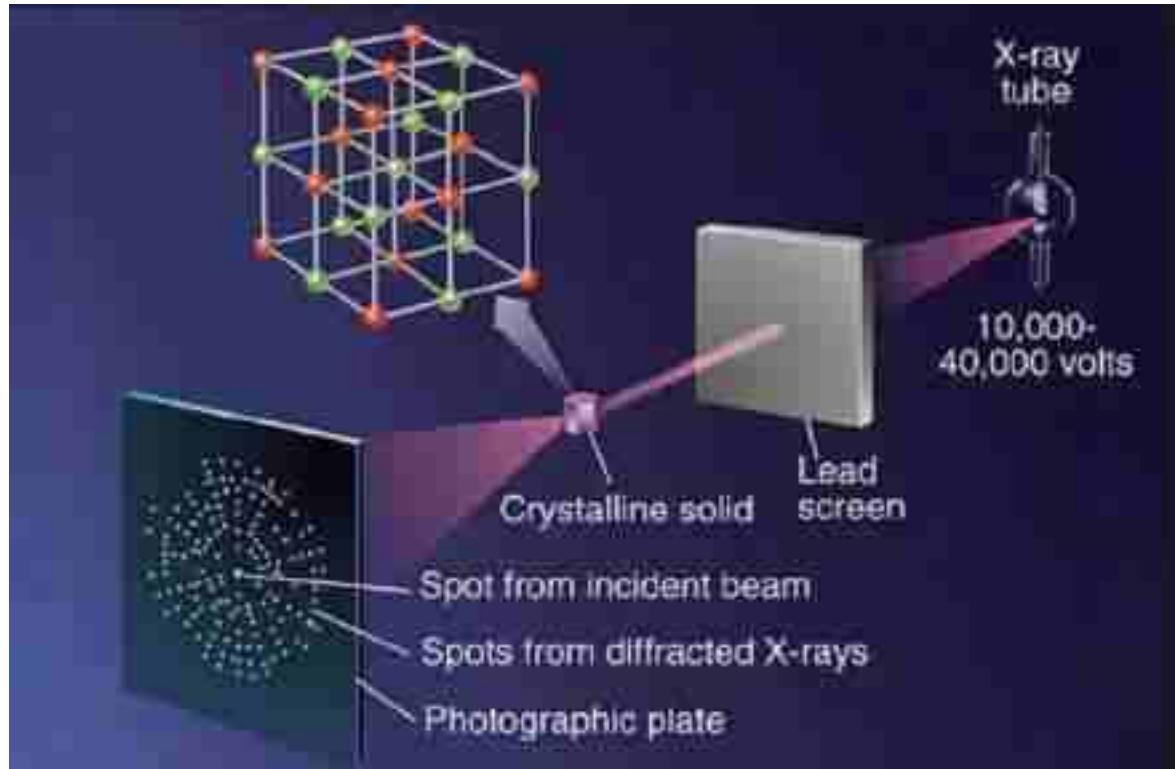
# Cristallographie



William Lawrence Bragg  
(1890 – 1971)

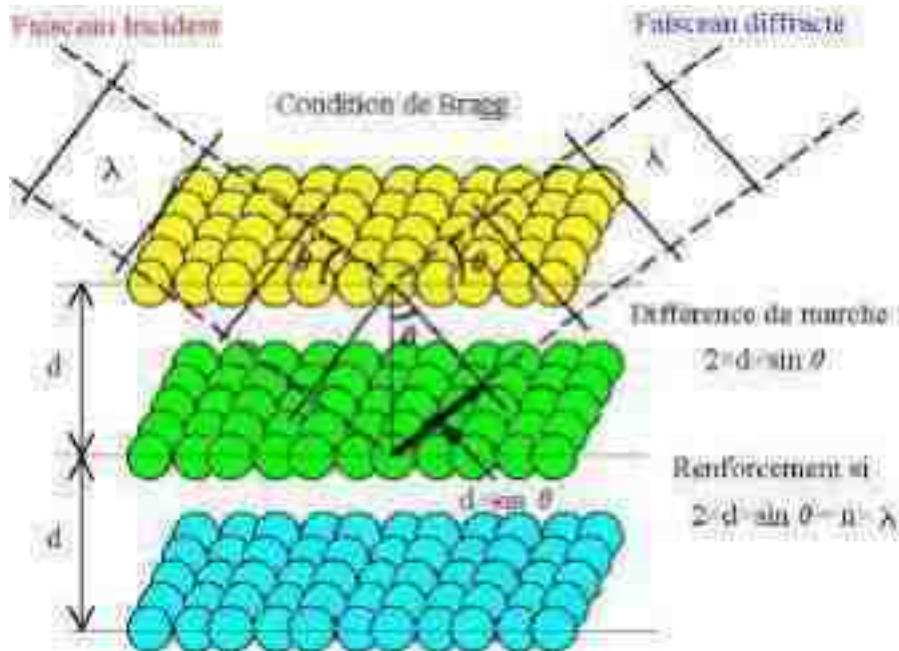
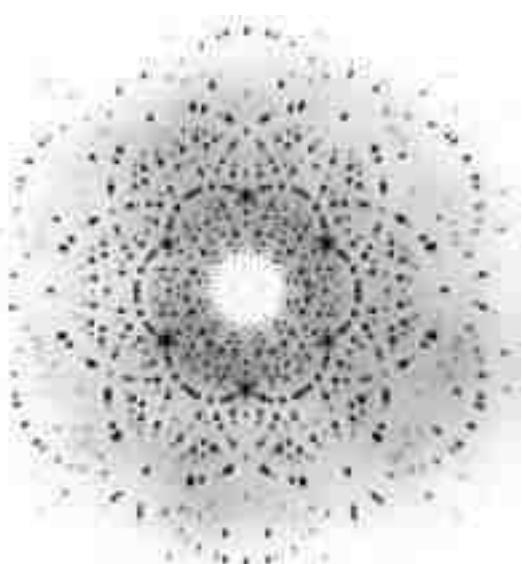
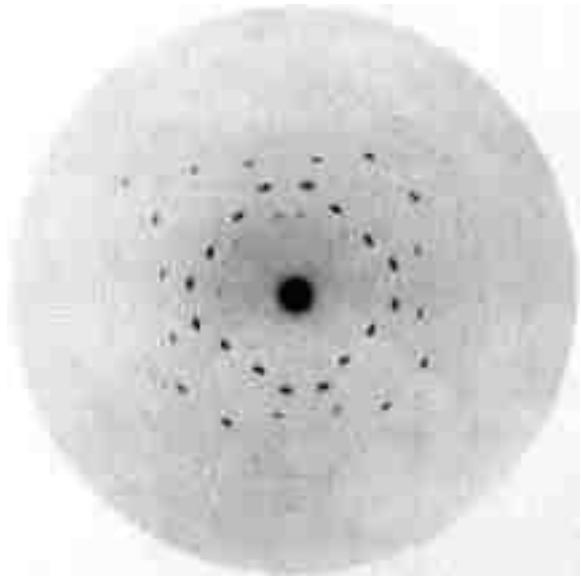


William Henry Bragg  
(1862 – 1942)



Prix Nobel 1915

# Cristallographie



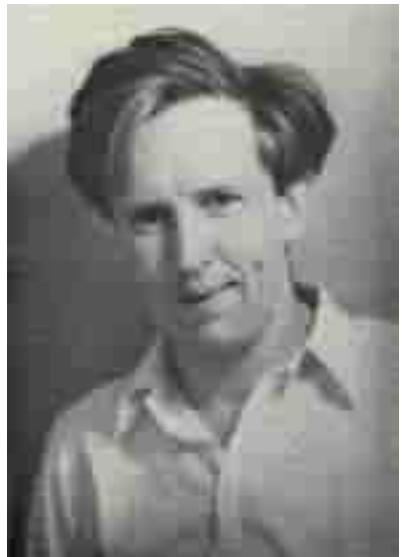
$$\text{Loi de Bragg : } n\lambda = 2d \sin \theta$$

- $n$  := ordre de diffraction (un entier),
- $\lambda$  := longueur d'onde des rayons X,
- $d$  := distance entre les plans d'atomes dans le cristal,
- $\theta$  := moitié de l'angle de diffusion  $2\theta$ .

# Cristallographie

## Structure cristalline hexagonale

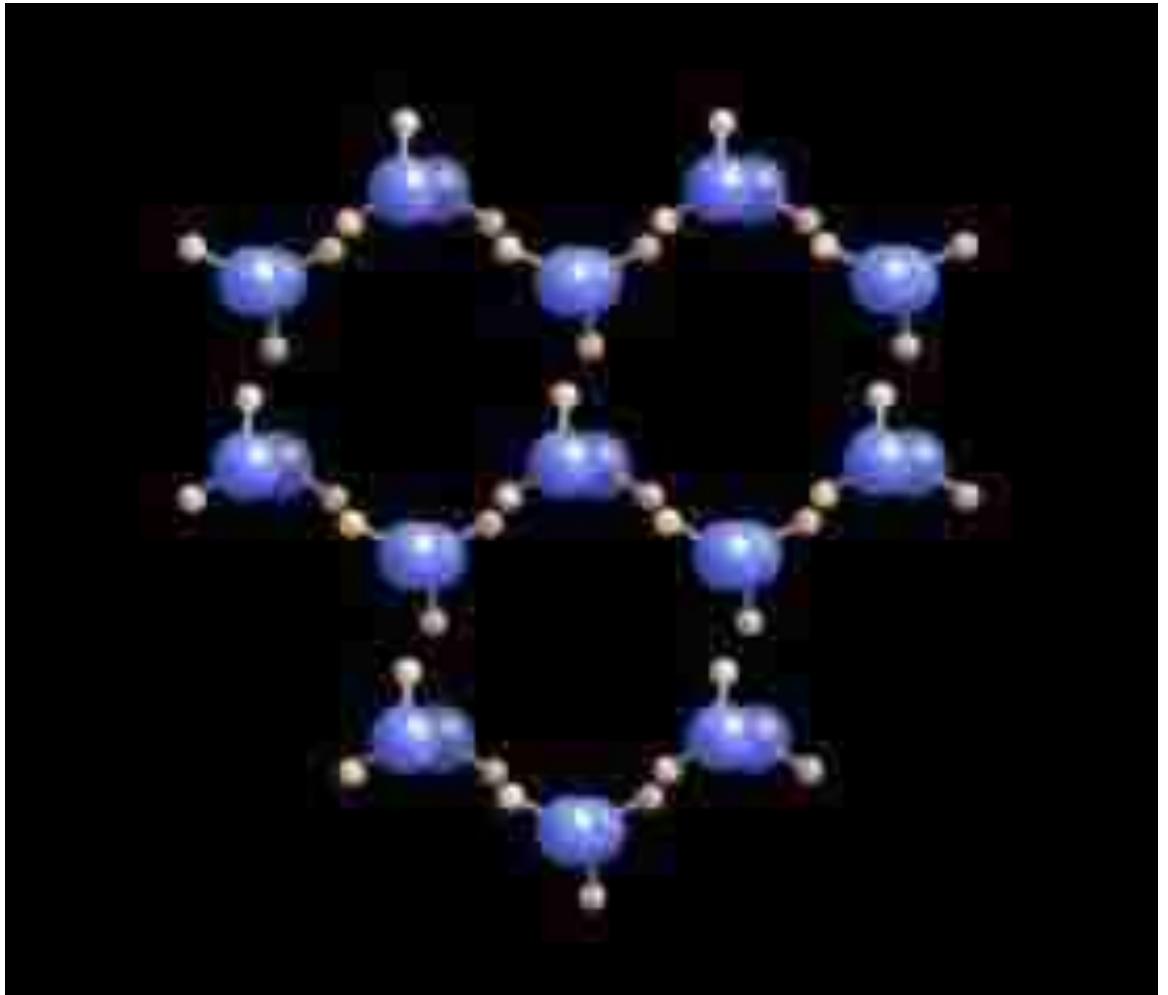
Hypothèse des Bragg,  
confirmée en 1933 par Bernal et Fowler.



J. D. Bernal  
(1901—1971)



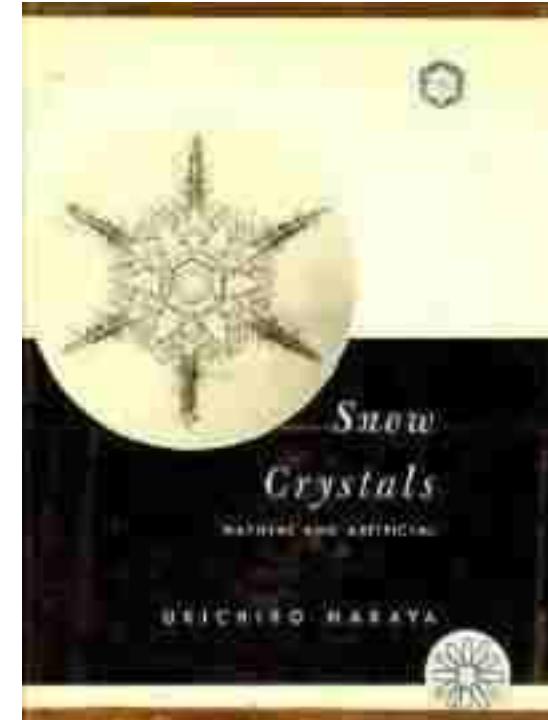
Ralph Fowler  
(1889—1944)



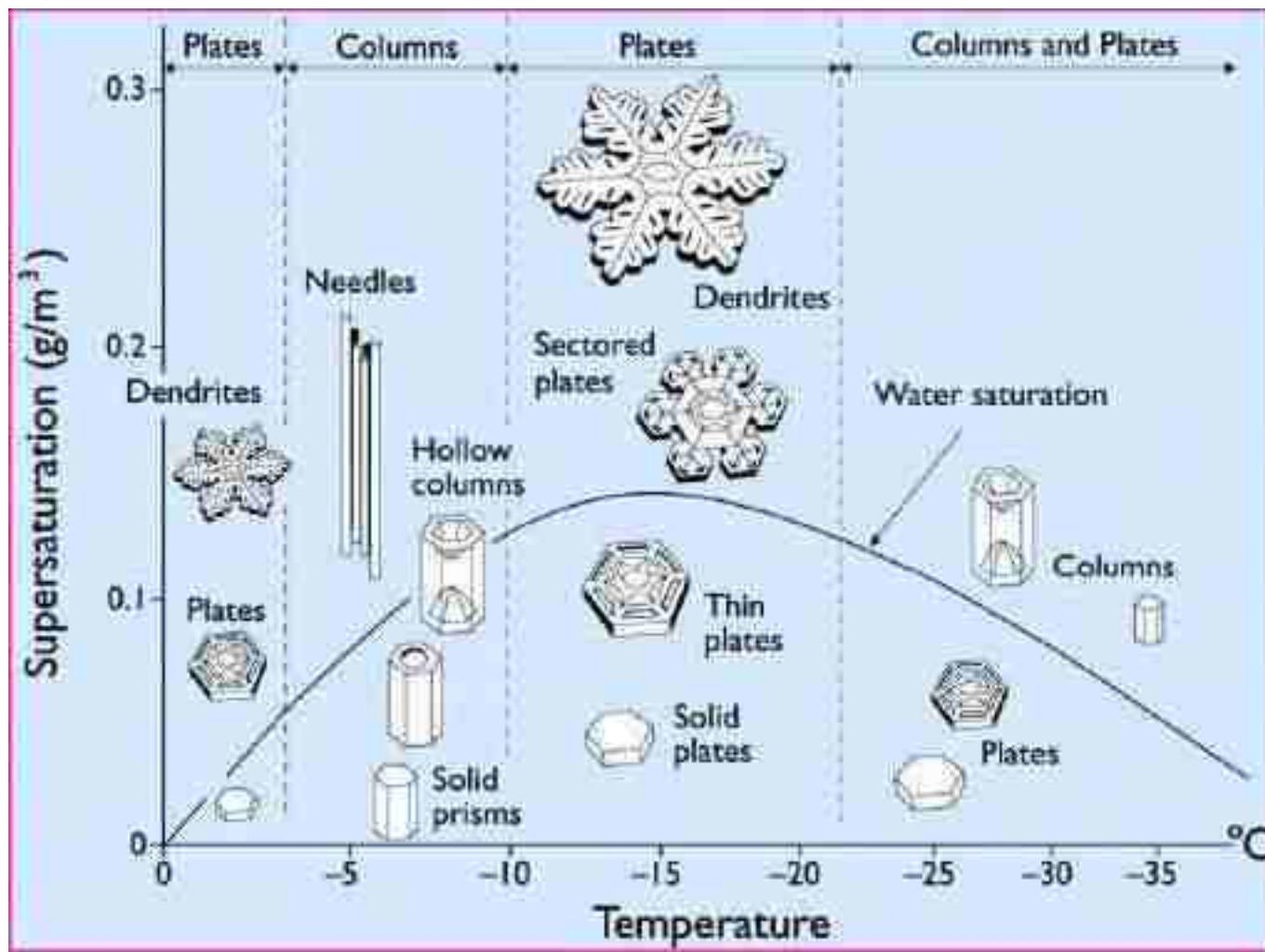
# Flocons naturels et artificiels



Ukichiro Nakaya  
(1900–1962)



# Classification des flocons



# Classification des flocons

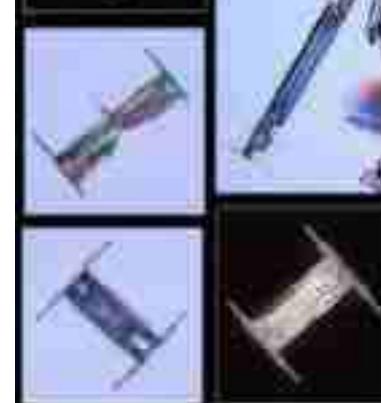
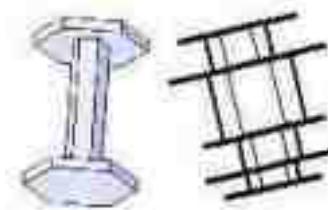
Dendrites stellaires



Colonnes et aiguilles



Colonnes coiffées



Dendrites fougères



# Classification des flocons

Poussière de diamant



Triangulaire



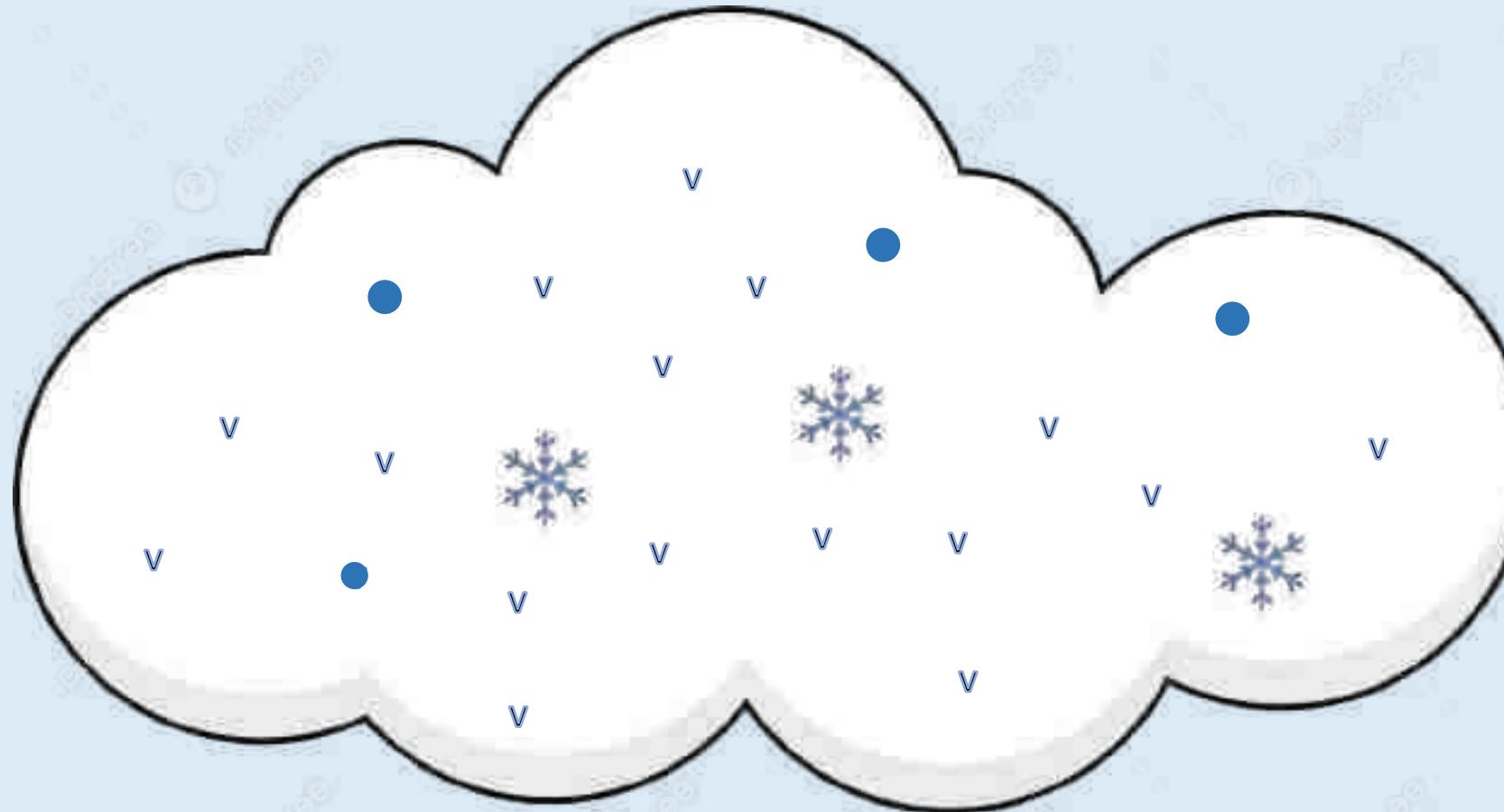
A douze branches



Bordé



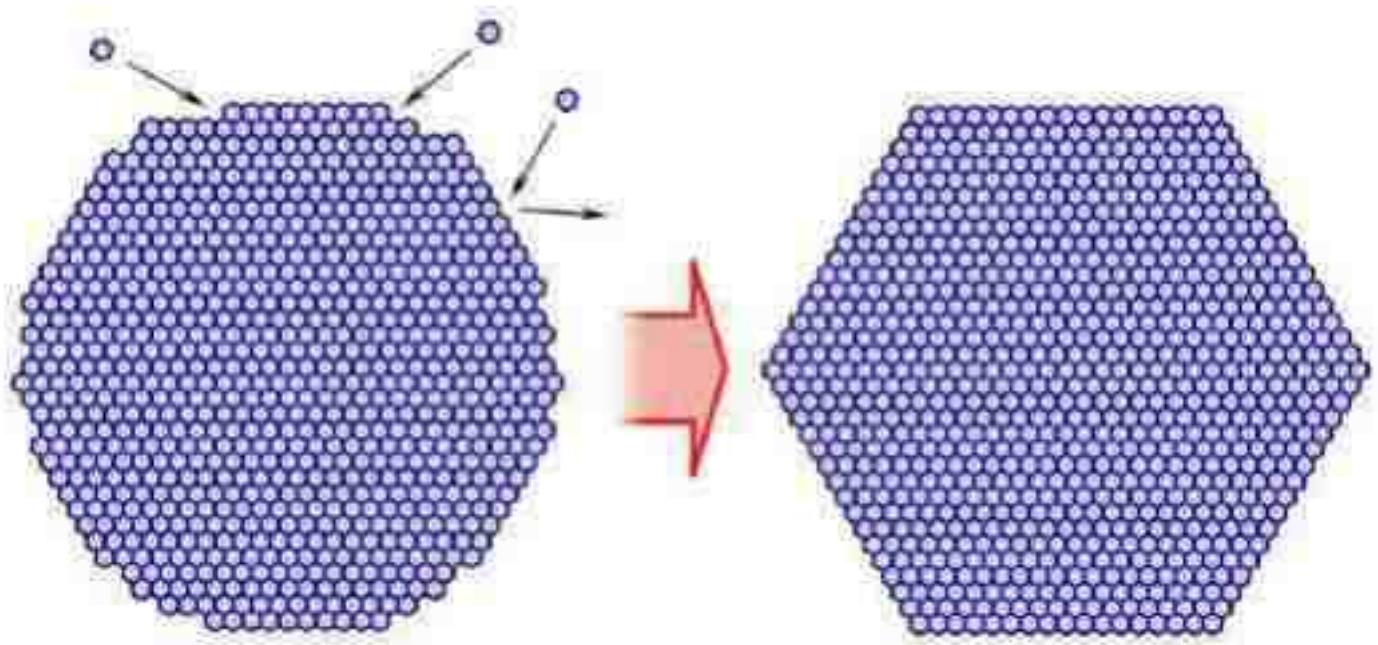
# Naissance d'un flocon



# Facettage

Molécules d'eau adhèrent **bien aux aspérités**, riches en liaisons chimiques, **moins sur les surfaces lisses**, avec de liaisons.

Les irrégularités de la surface se remplissent.

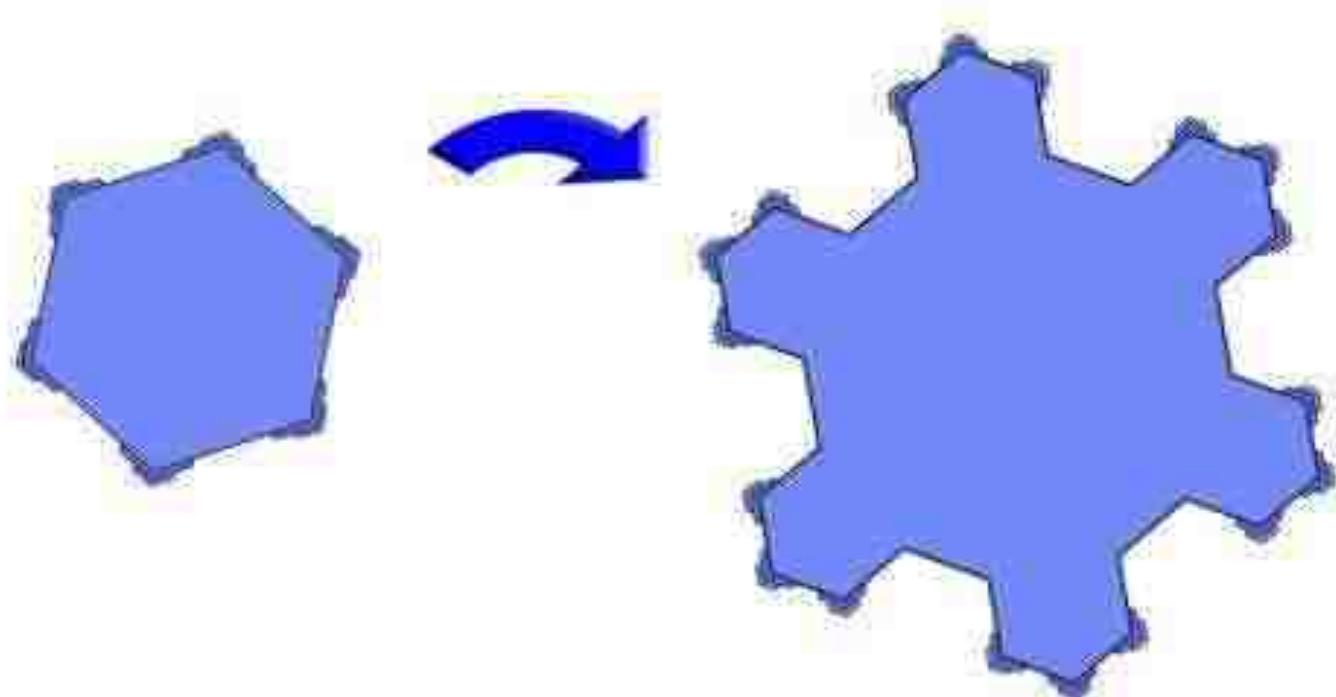


Prédominant lorsque les cristaux de neige sont **petits** ou **croissent lentement**.

# Ramification

Six **sommets** croissent plus vite car ils **plus exposés à l'air humide**,  
→ **ramifications**.

La ramification augmente la saillance → **accélération** de leur croissance.



Prédominante lorsque les cristaux de neige sont **grands** ou **croissent vite**.

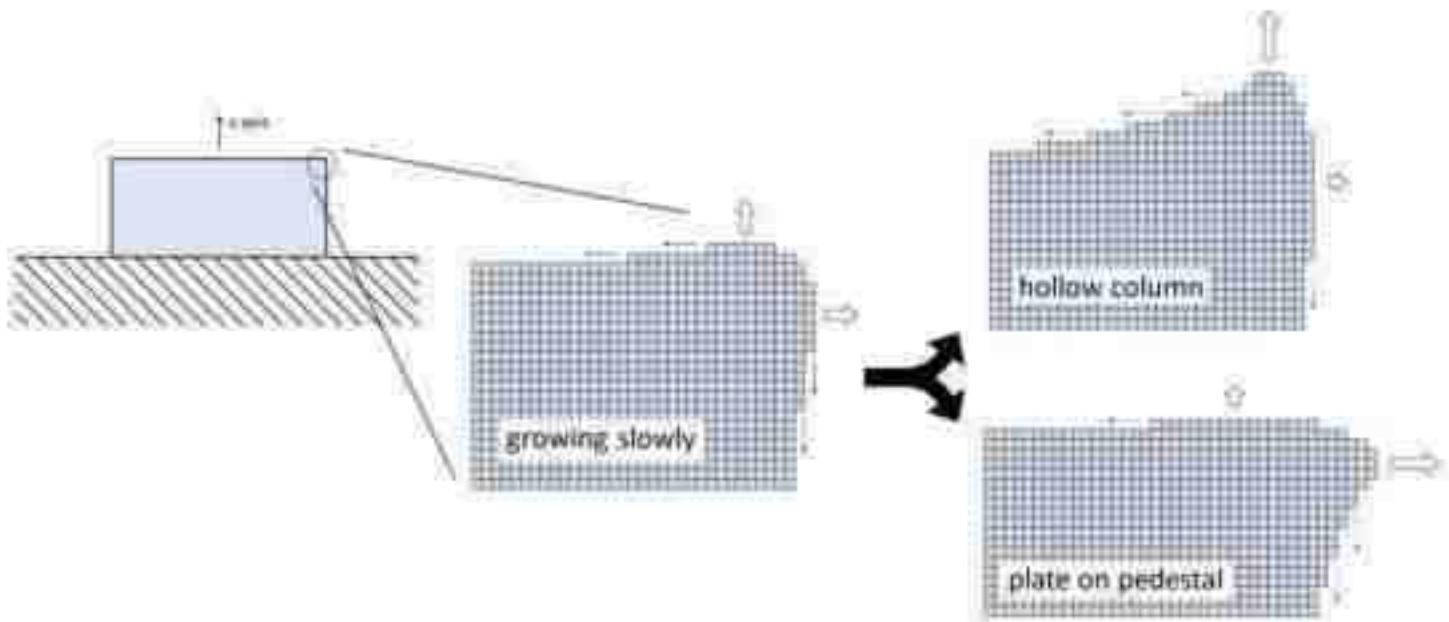
# Affûtage des arêtes

Pourquoi les flocons prennent-ils aussi fins ?

Instabilité de croissance par affûtage des arêtes.

Croissance d'une surface dépend de la largeur de la facette.

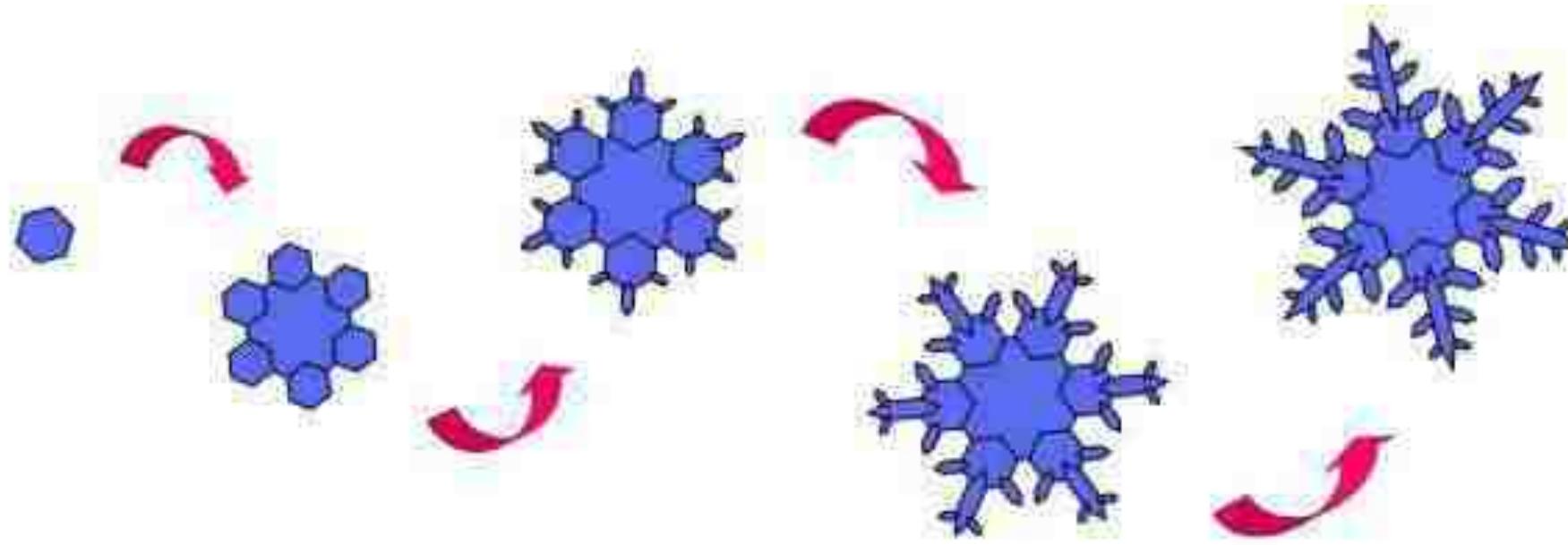
Dernière terrasse moléculaire petite (largeur < 100 molécules)  
→ les molécules s'y fixent plus facilement  
→ affûtage des arêtes.



Mais pourquoi cette dépendance?



# Formation d'un flocon



Départ : petite plaque hexagonale.

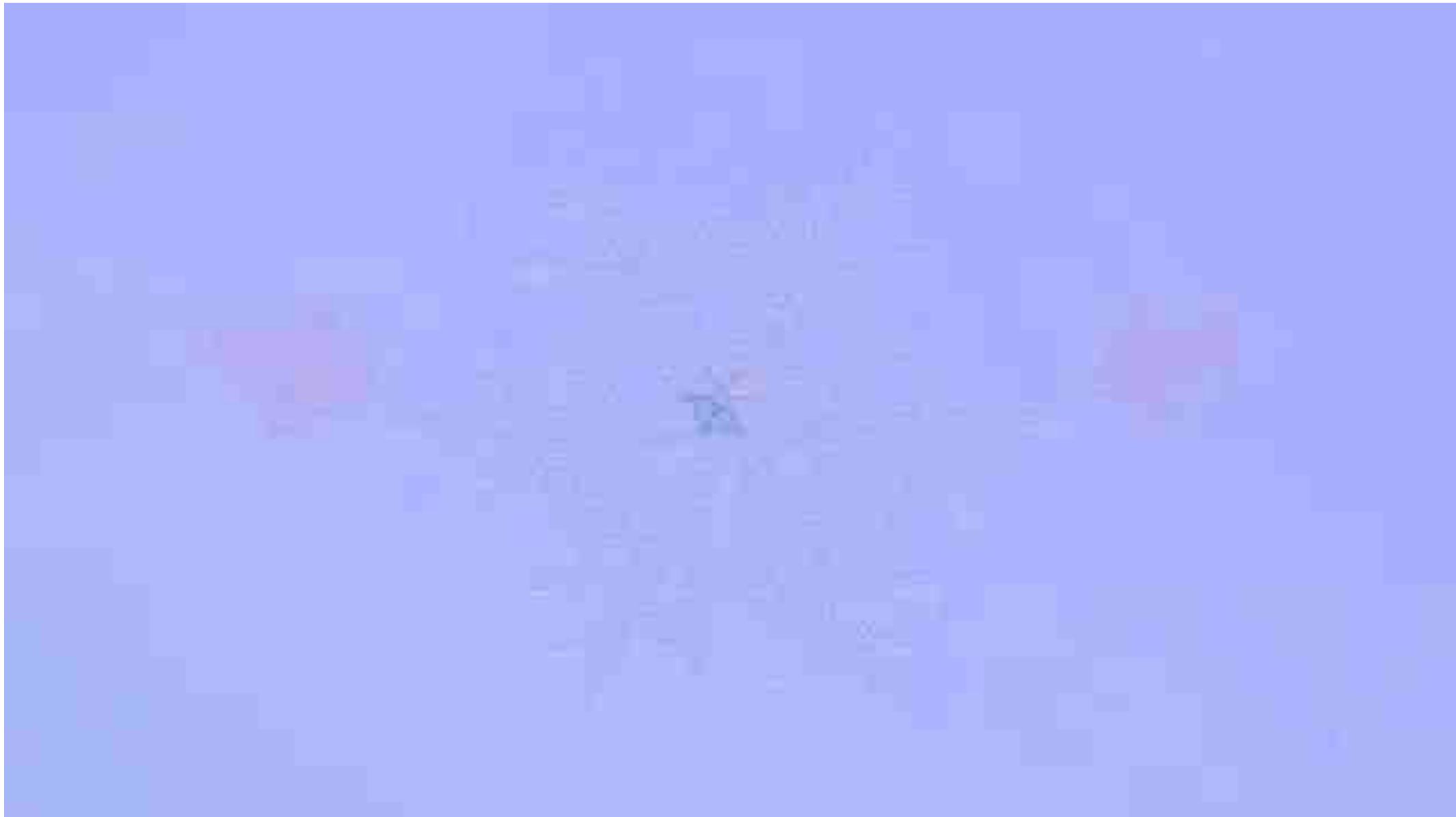
Des **ramifications** jaillissent de ses **six sommets** à mesure qu'il grandit.

Variations de température et d'humidité → modification de la croissance.

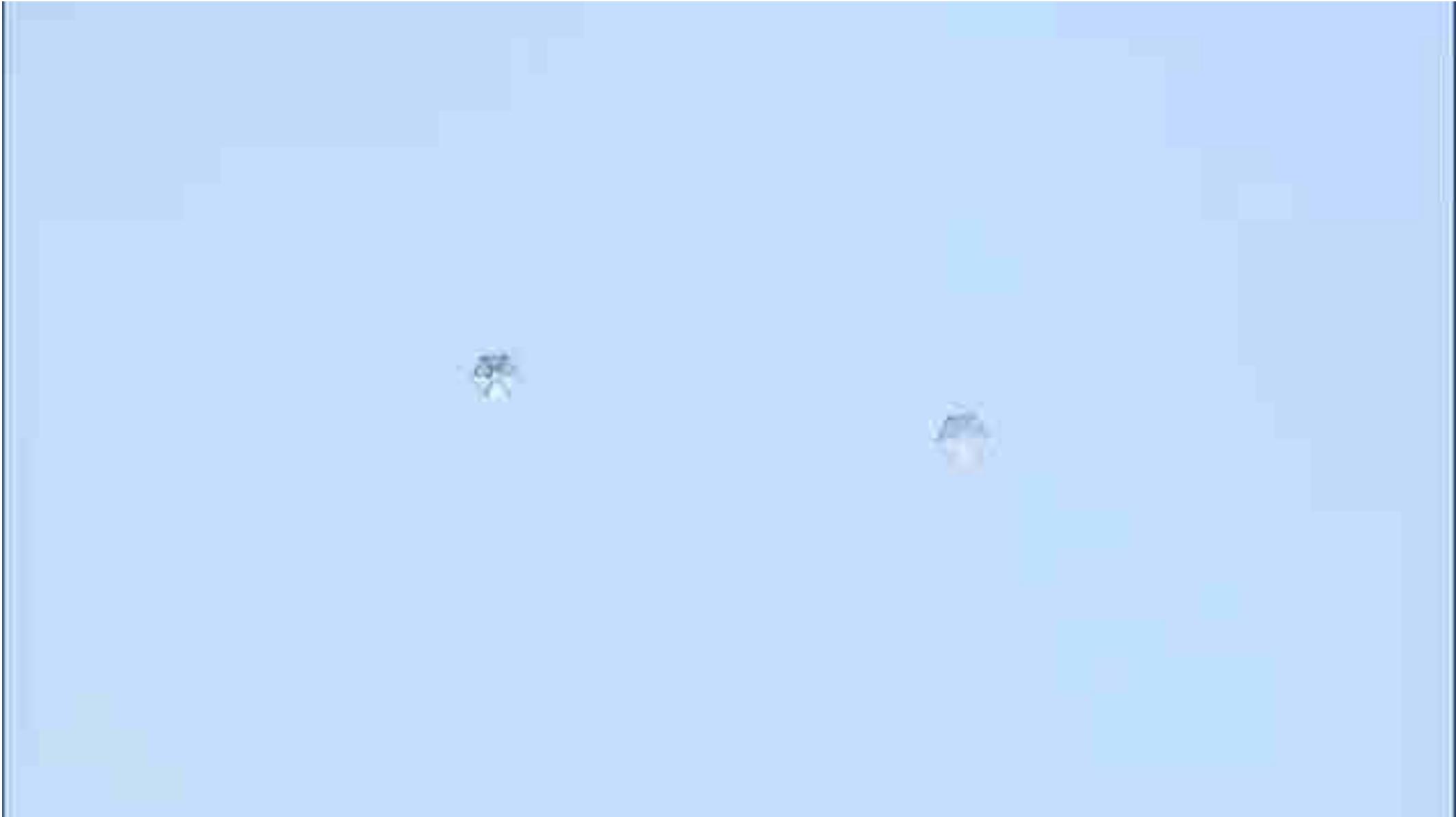
**Forme du cristal** déterminée par sa **trajectoire à travers les nuages**.

Même trajectoire pour les six ramifications → **croissance synchrone** → **forme symétrique**.

# Formation d'un flocon

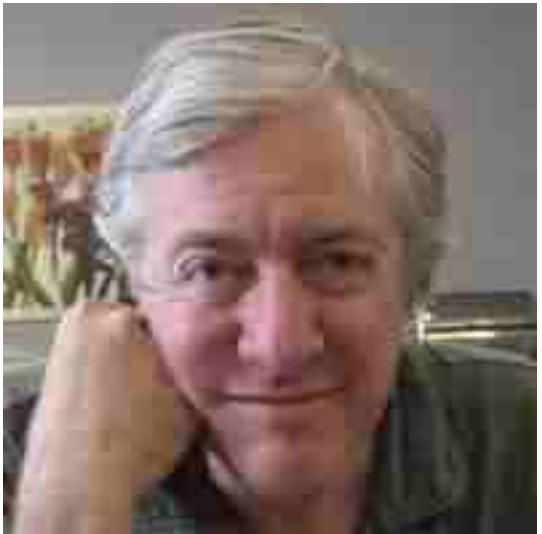


# Formation de plusieurs flocons

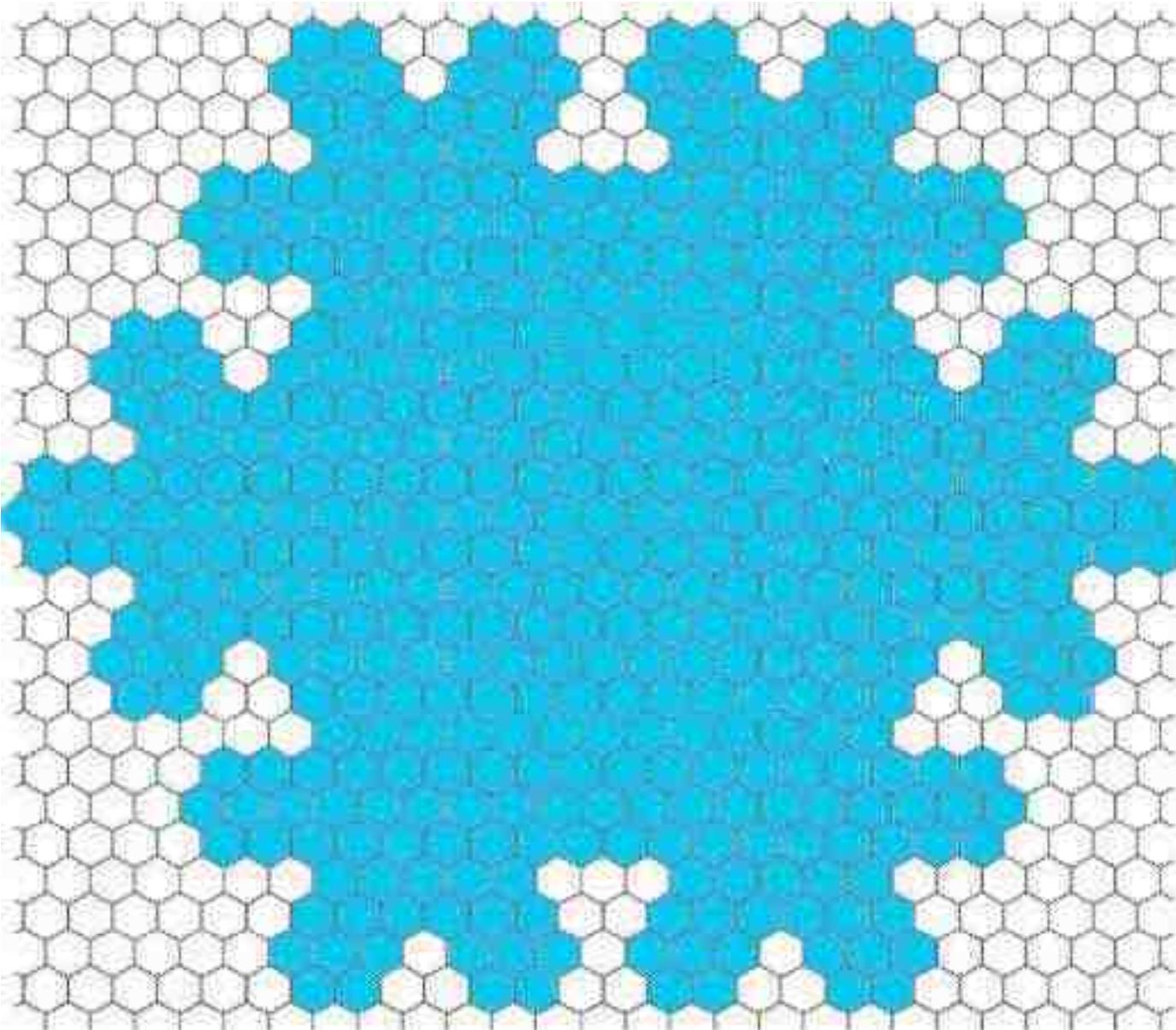


# Flocons mathématiques

Une cellule **gèle**  
si elle a **1 ou  $\geq 3$  voisins gelés**.



Norman Packard  
(1954— )



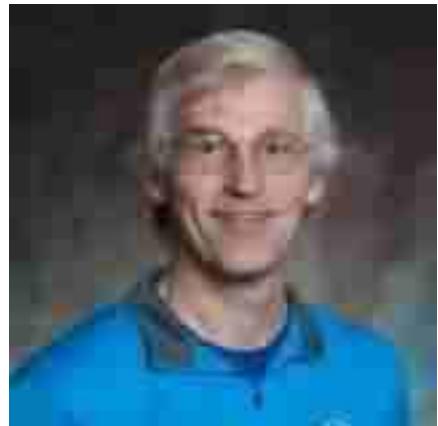
# Flocons mathématiques

Une cellule est **gelée, prête à geler**, ou autre.

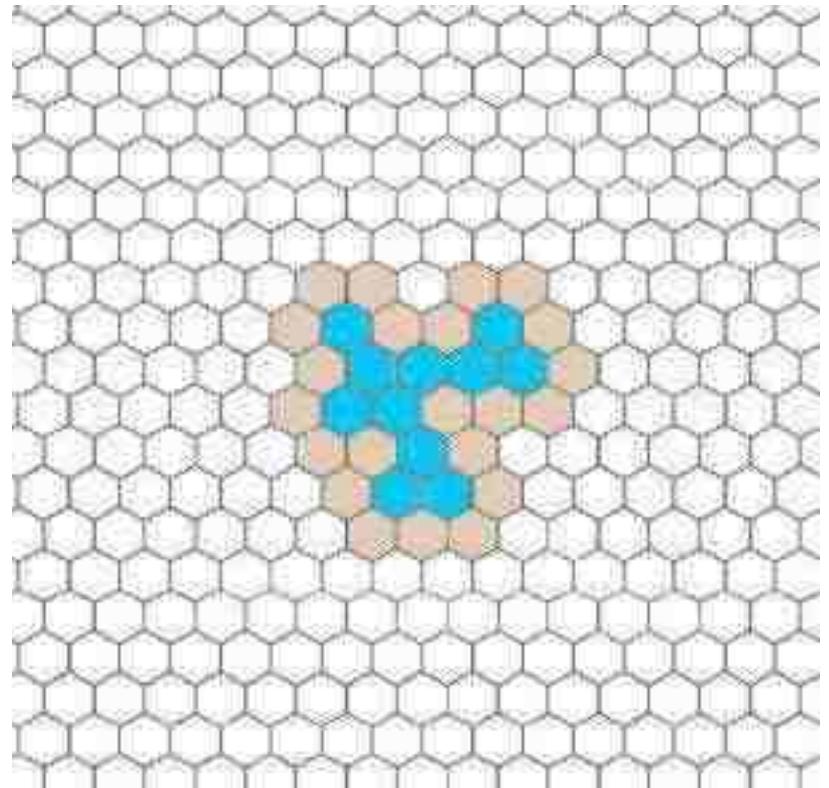
A un taux d'humidité compris entre 0 et 1.  
Elle gèle à 1.

Transfert de  $\beta$  de son humidité vers les voisines.

Apport de  $\gamma$  à chaque cellule.



Clifford Reiter



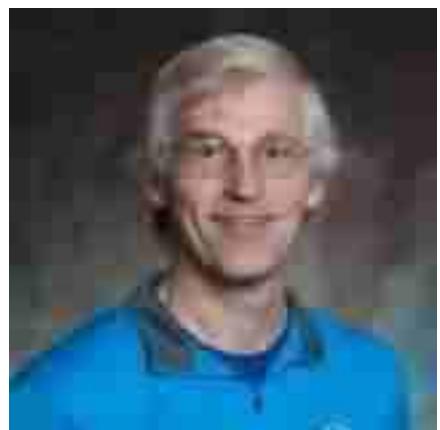
# Flocons mathématiques

Une cellule est **gelée, prête à geler, ou autre.**

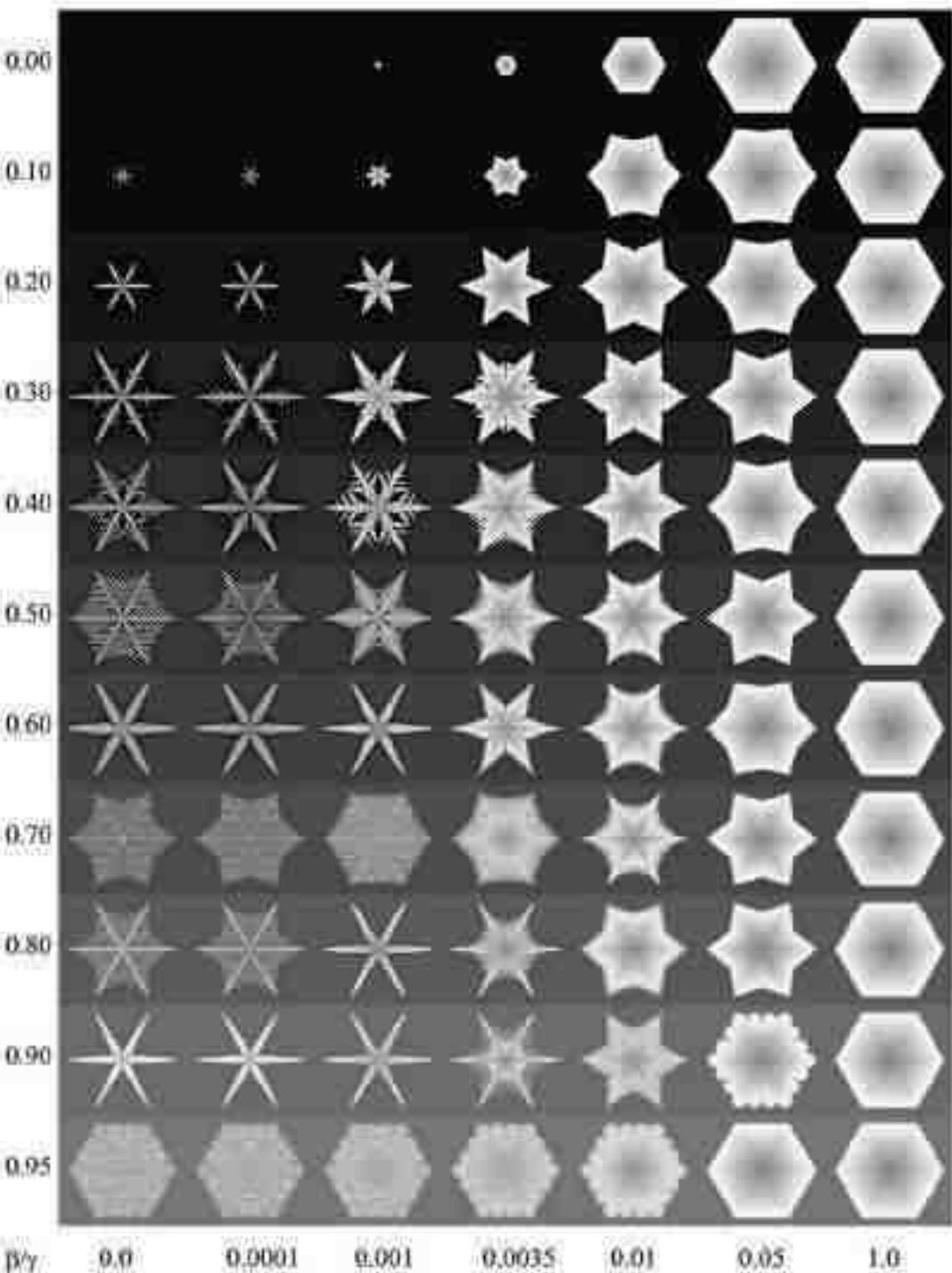
A un taux d'humidité compris entre 0 et 1.  
Elle gèle à 1.

Transfert de  $\beta$  de son humidité vers les voisines.

Apport de  $\gamma$  à chaque cellule.



Clifford Reiter





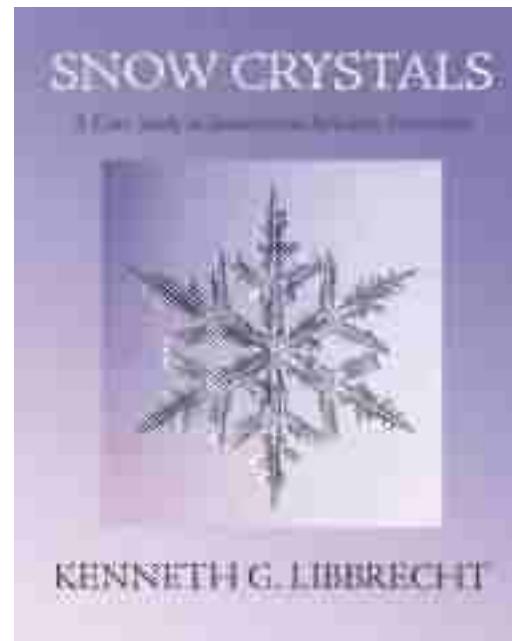
# En savoir plus

Site web : <https://www.snowcrystals.com/>  
(en anglais)

Video : Veritasium -- The Snowflake Myth  
<https://www.youtube.com/watch?v=ao2Jfm35XeE>  
(en anglais)

Livres :

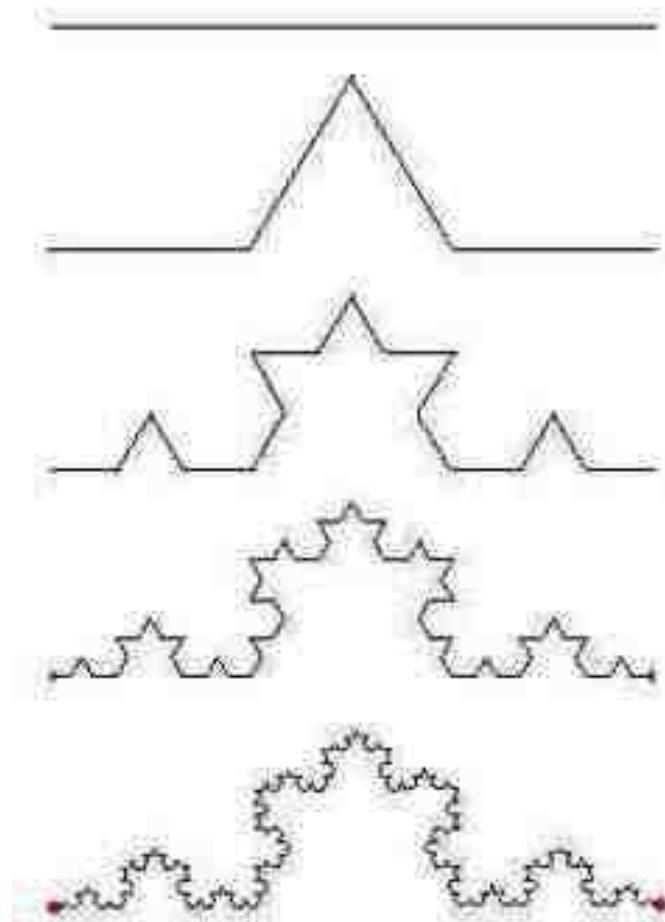
- *Snow crystals*, Kenneth G. Libbrecht,  
*Princeton University Press*.
- *La petite histoire des flocons de neige*, Etienne Ghys,  
*Odile Jacob*.



# Flocon de Koch



Helge von Koch  
(1870—1924)



# Flocon de Koch

Périmètre infini : limite de  $(4/3)^n \times p(\text{triangle})$

Mais aire finie :  $8/5 \times \text{aire}(\text{triangle})$

Longueur multipliée par 4  
lorsque taille multipliée par 3.

Dimension fractale :  $\log(4)/\log(3) = 1,26$ .

