

FL C NS DE NEIGE

Frédéric HAVET



Institut
Esope 21



TERRA
NUMERICA

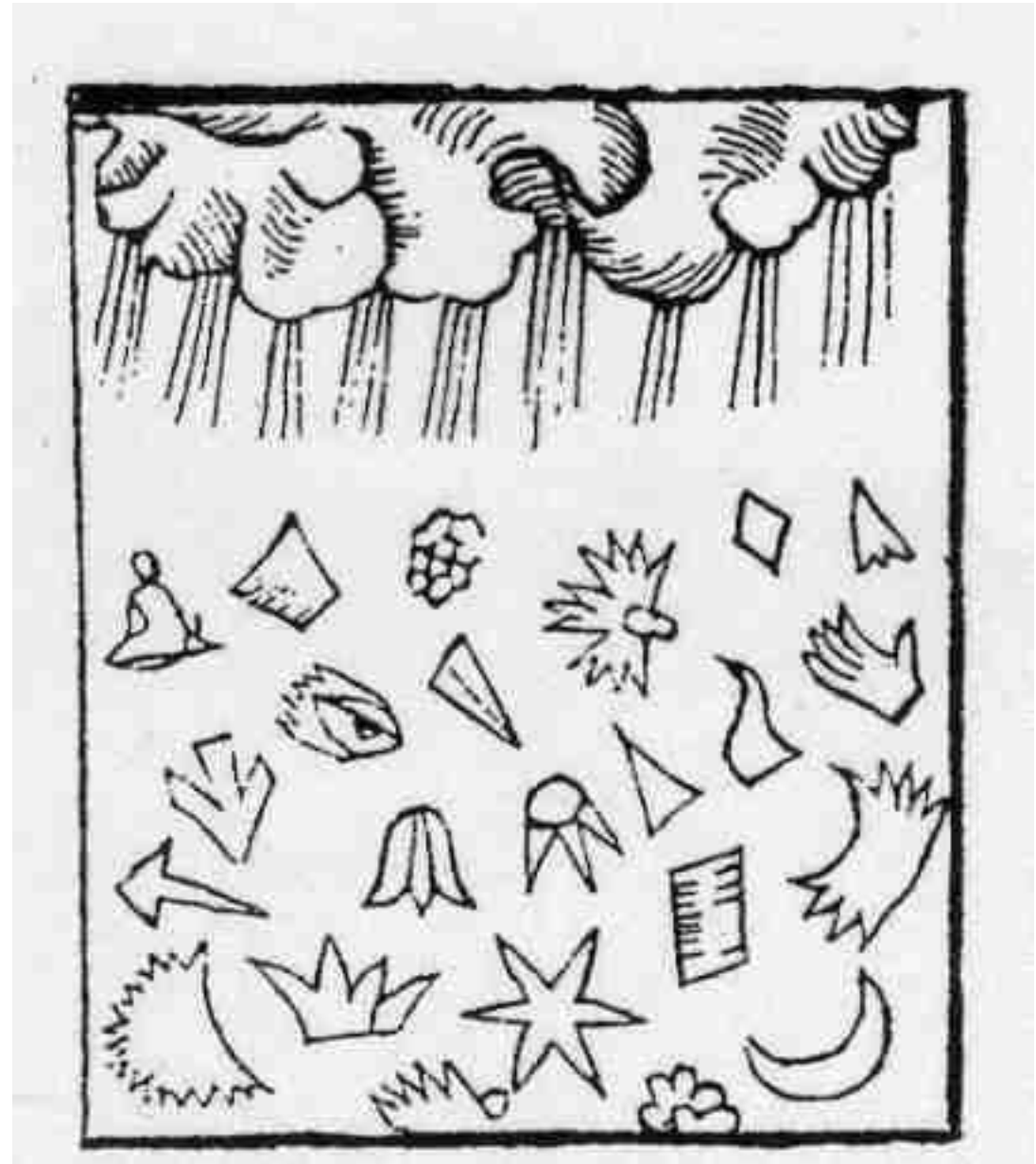
Premiers dessins



Olof Månsson / Olaus Magnus
(1490—1554)



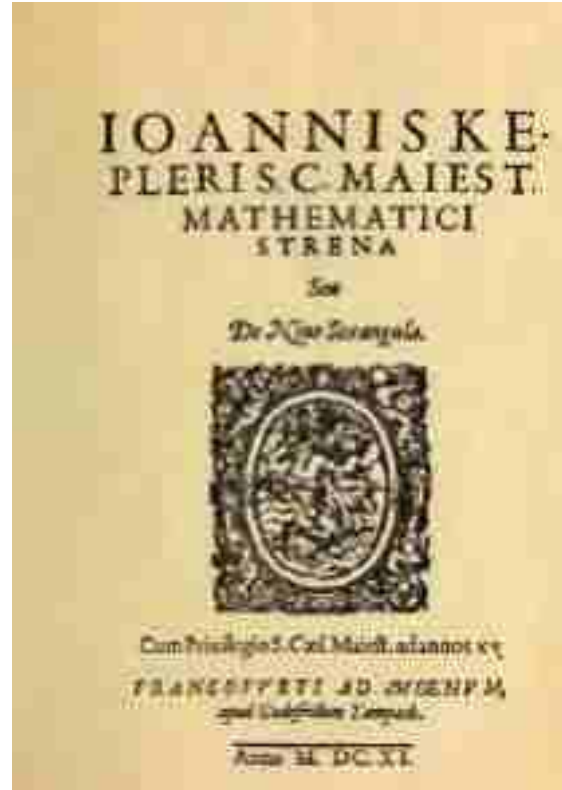
Publié en 1555



Première étude

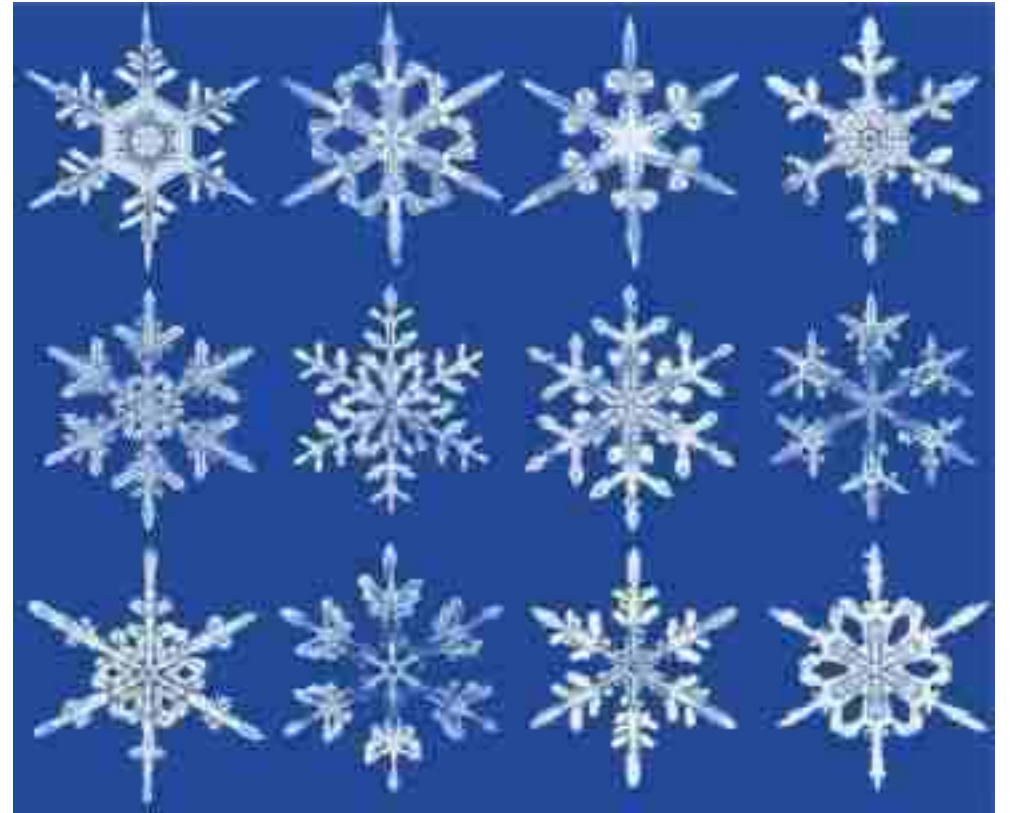


Johannes Kepler
(1571—1630)



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**.

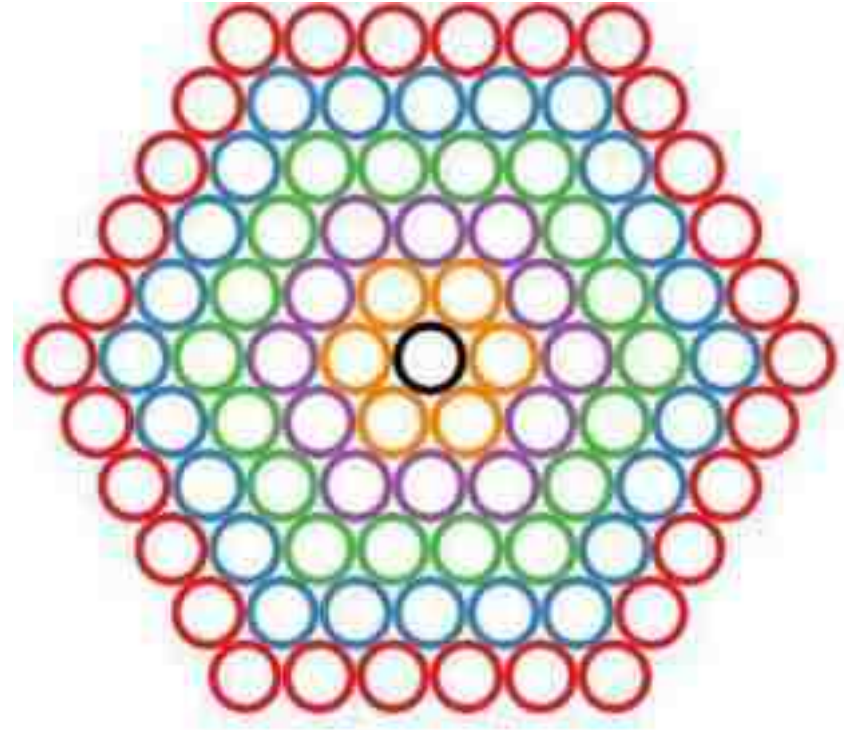


Pourquoi six branches ?

Analogie avec les alvéoles des abeilles dans les ruches.

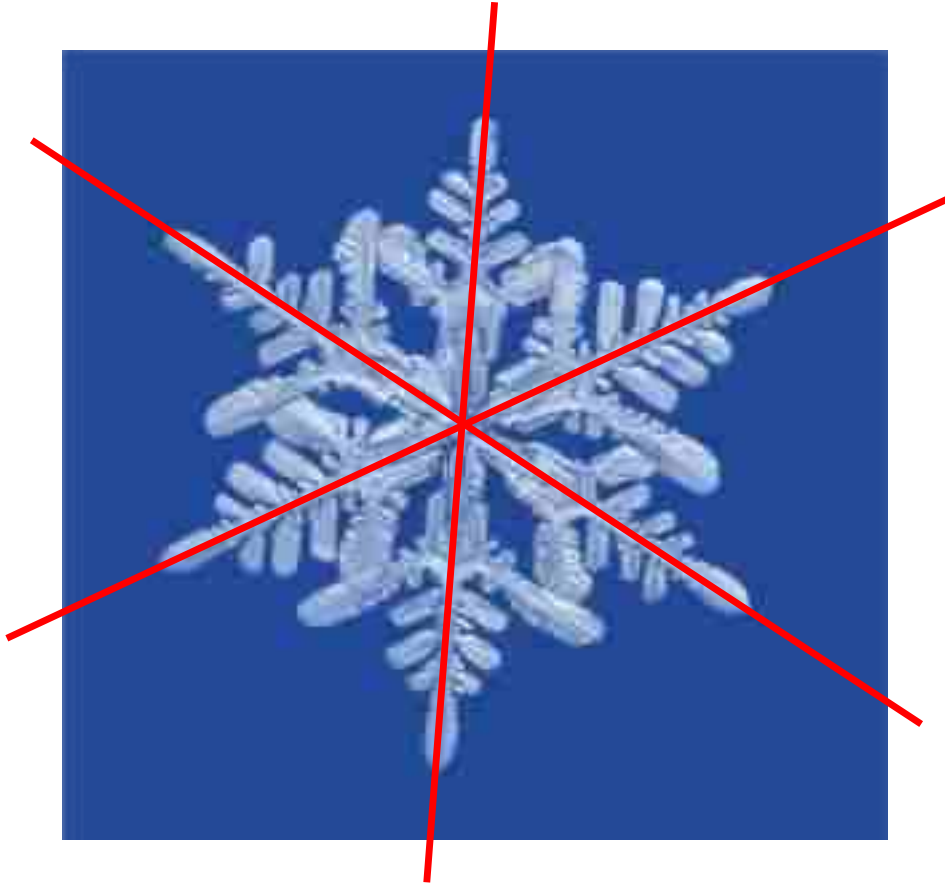


Un disque peut être entouré de six disques de même rayon.



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

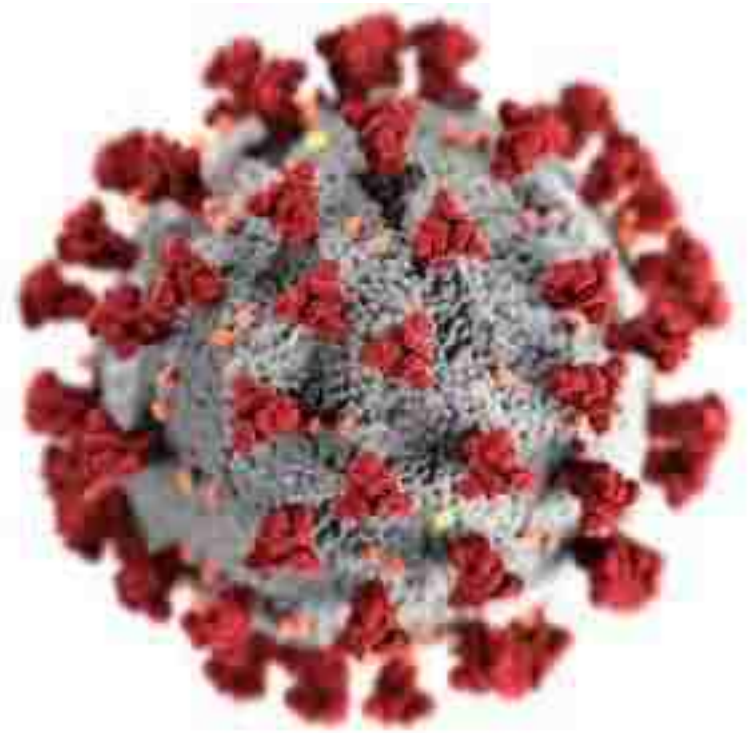
Pourquoi sont-ils symétriques ?



- 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 ?



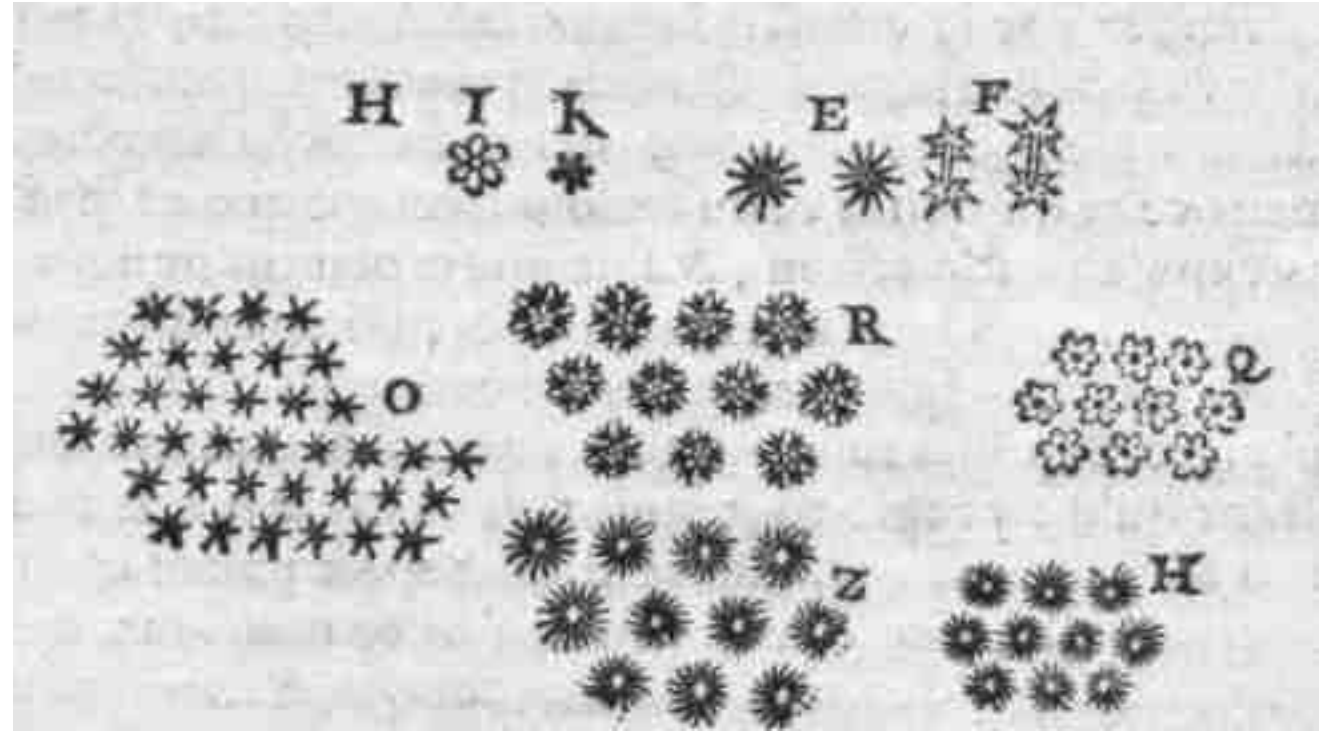
Dessins de flocons



René Descartes
(1596 – 1650)



1637

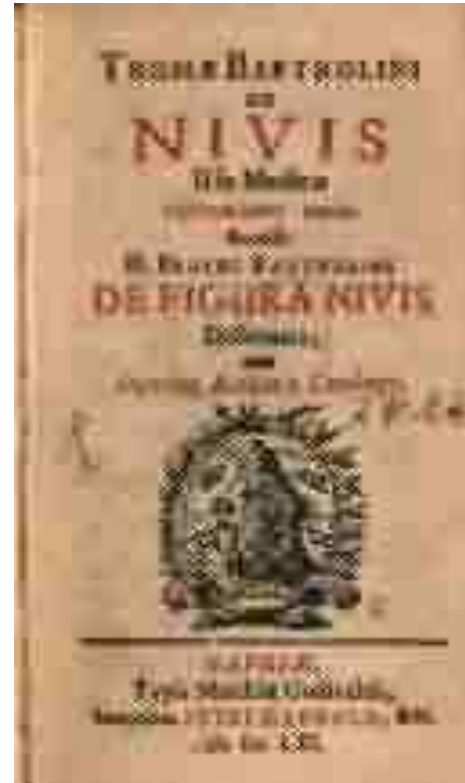


[...] je dirai ce qui cause la pluie et la gresle et la neige ; où je n'oublierai pas celles dont les parties ont la figure de petites étoiles à six pointes très parfaitement compassées, & bien qu'elles n'aient point été observées par les anciens ne laissent pas d'être une des plus rares merveilles de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

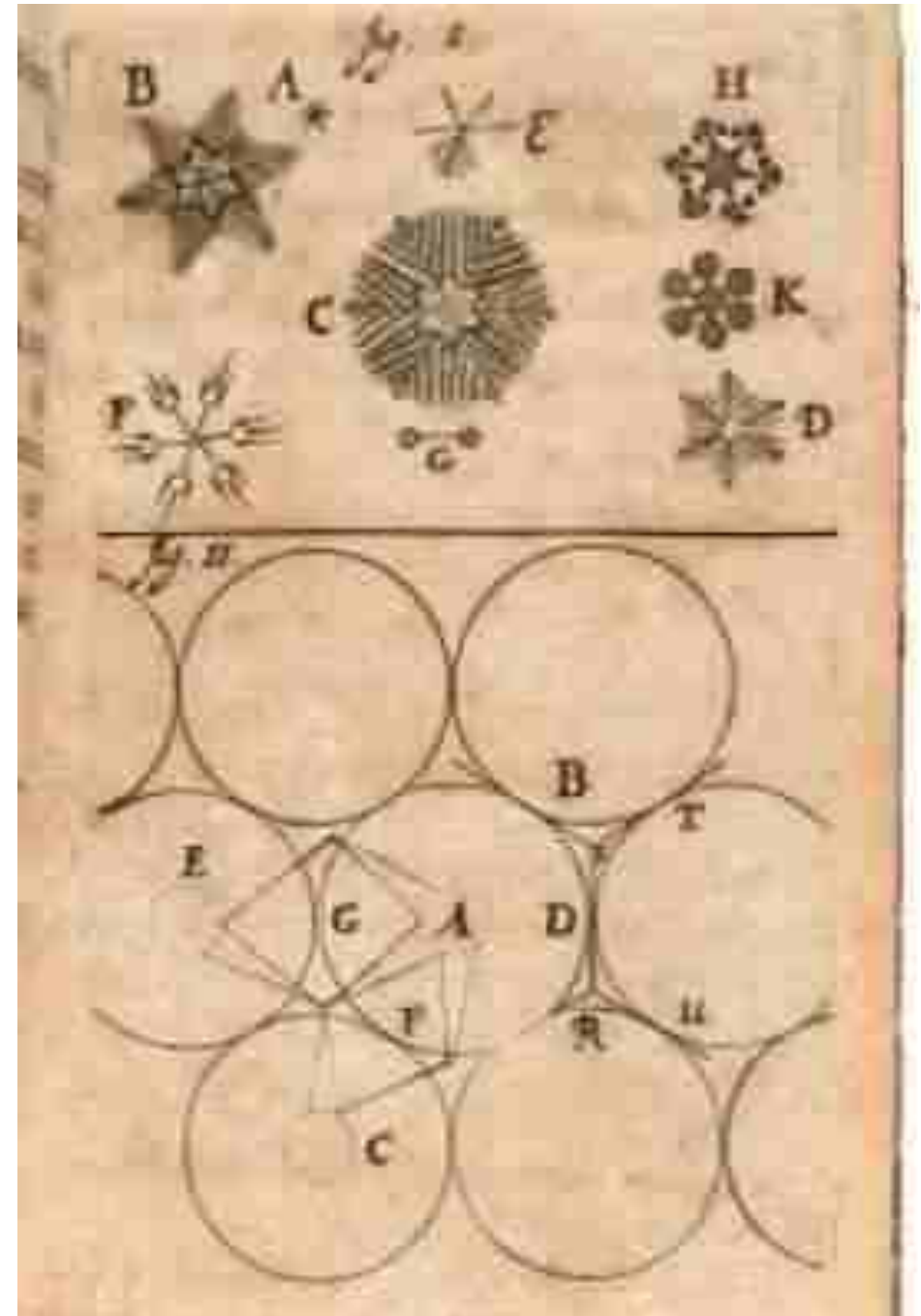
Dessins de flocons



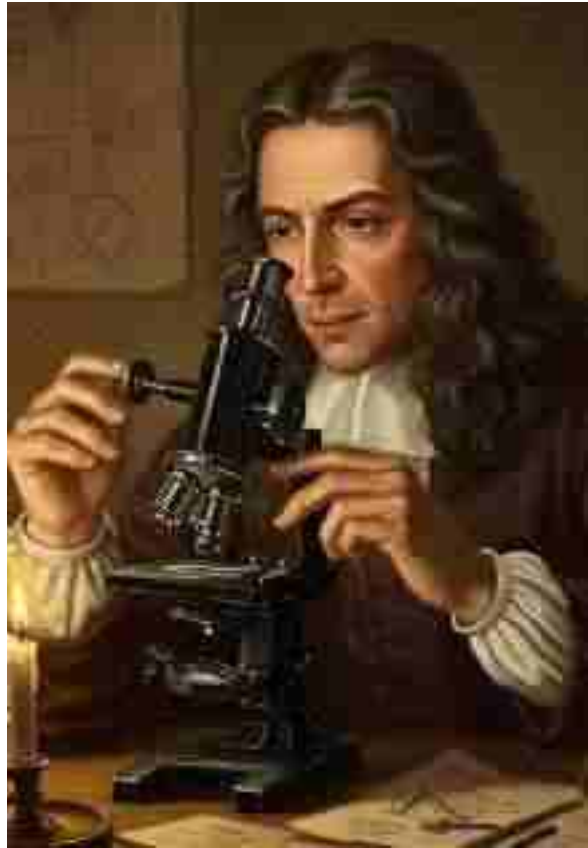
Thomas Bartolin
(1616 – 1680)



1661

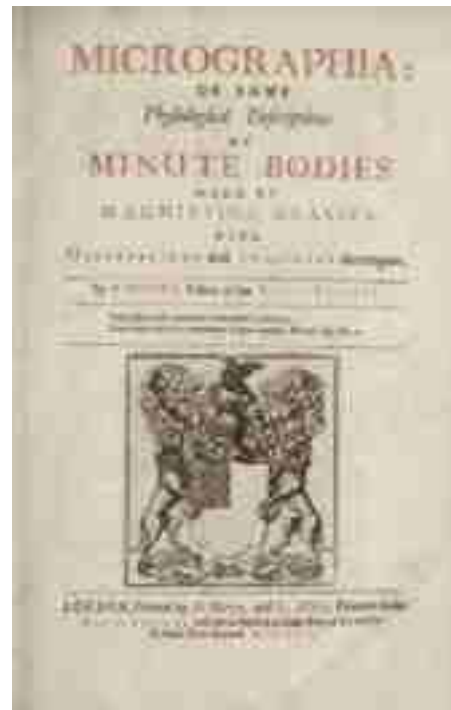


Dessins de flocons



Robert Hooke
(1635 – 1703)

Premières
observations
au
microscope



Micrographia. 1665.



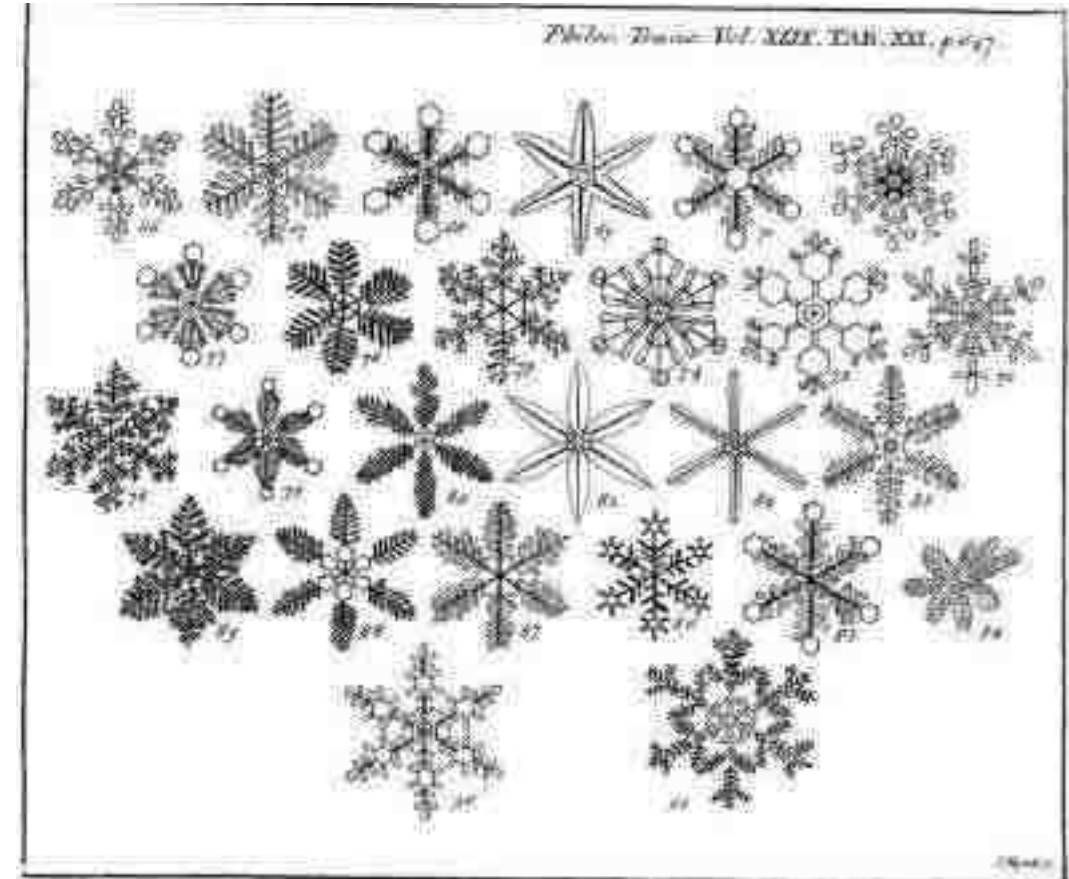
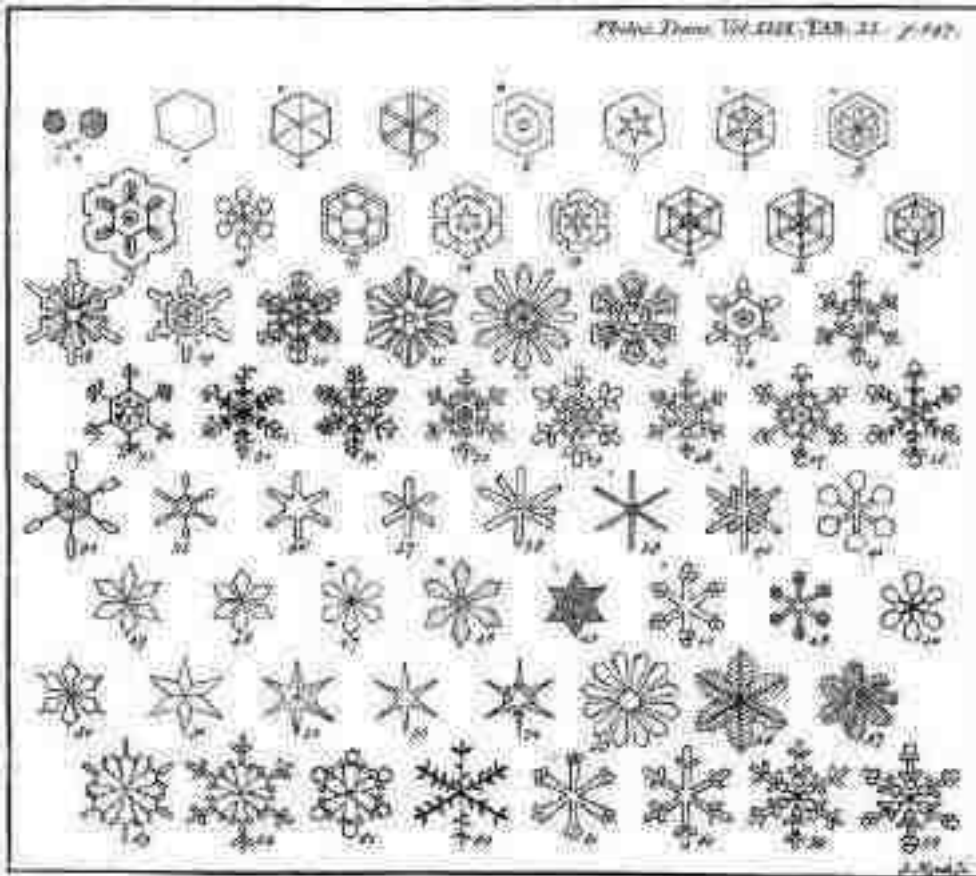
Utilisation d'un compas et pliage du papier pour
respecter les symétries.

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.

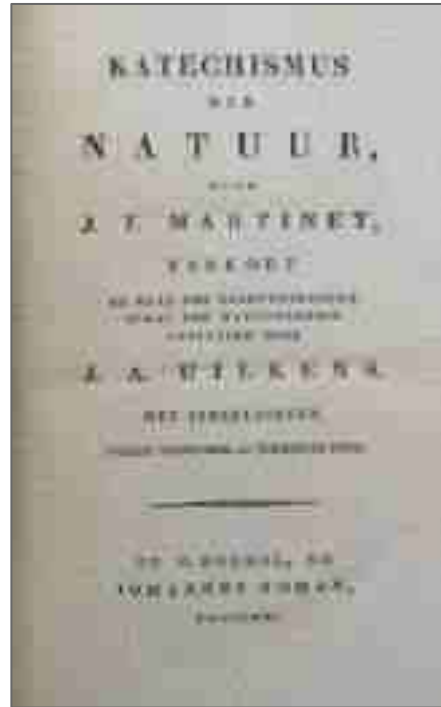


Grand soin de ne pas toucher ni respirer sur les flocons afin que « *l'extrême exactitude et l'égalité des figures de leurs particules les plus infimes puissent être observées et délimitées* ».

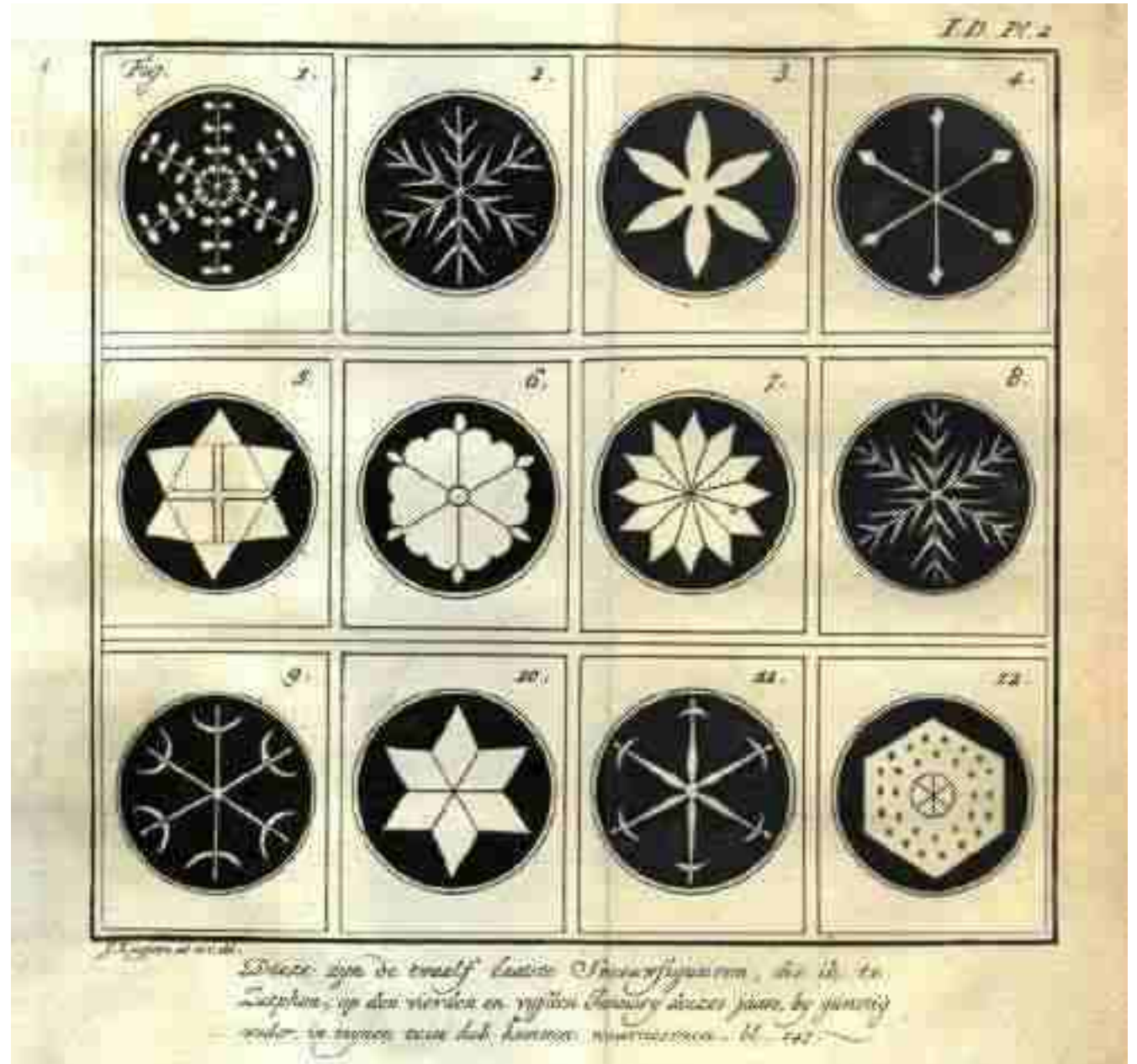
Dessins de flocons



Joannes Florentius
Martinet
(1729 – 1795)



*Katechismus der
Natuur,*
1777.



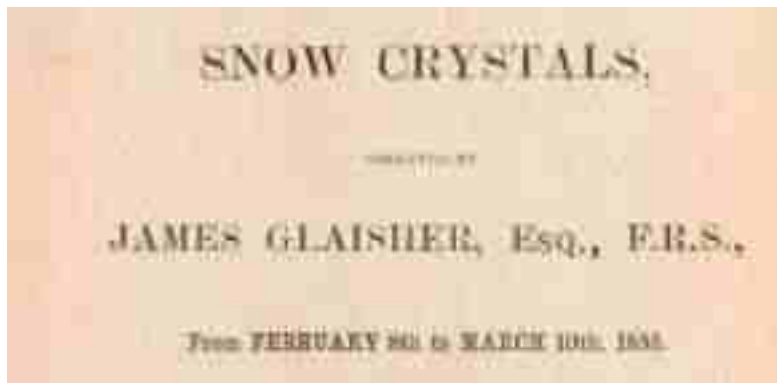
Dessins de flocons



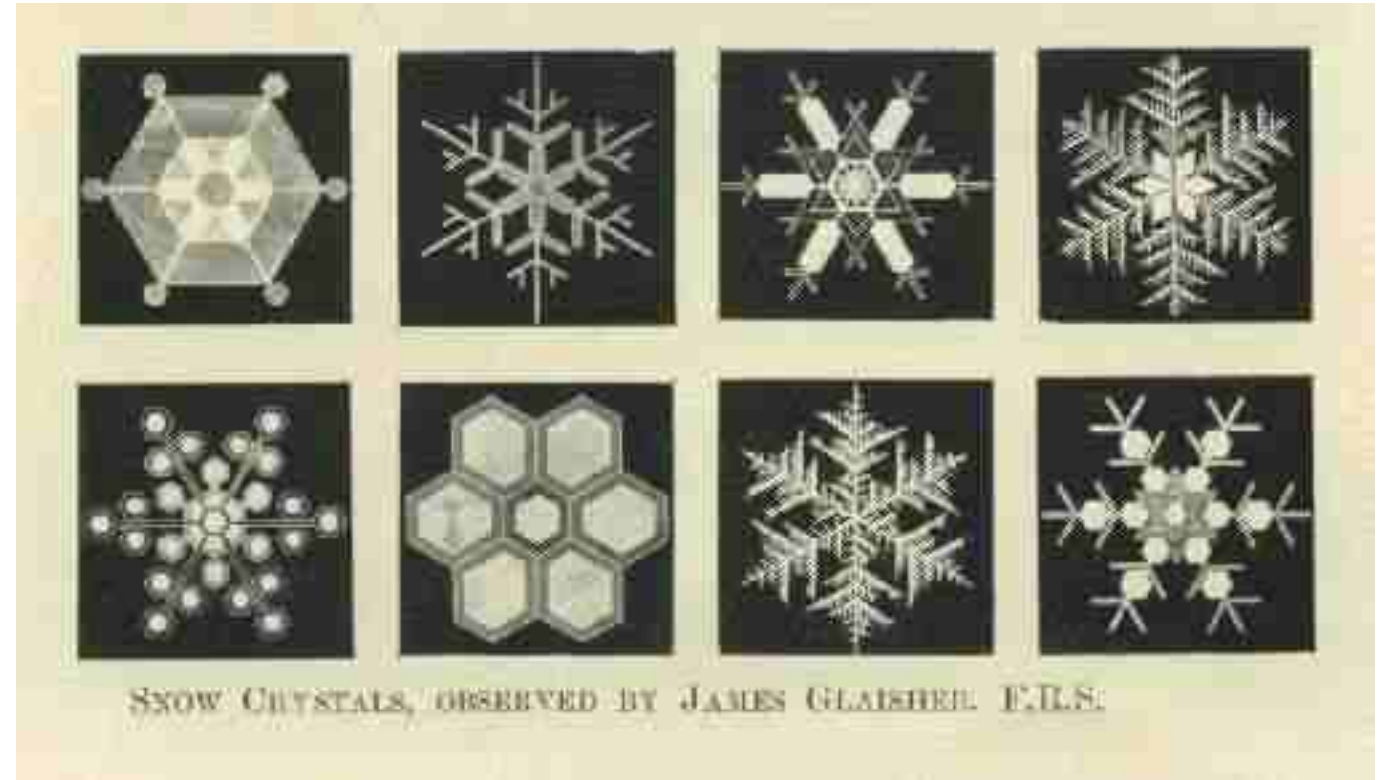
Cecilia Glaisher
(1828 – 1892)



James Glaisher
(1809 – 1903)



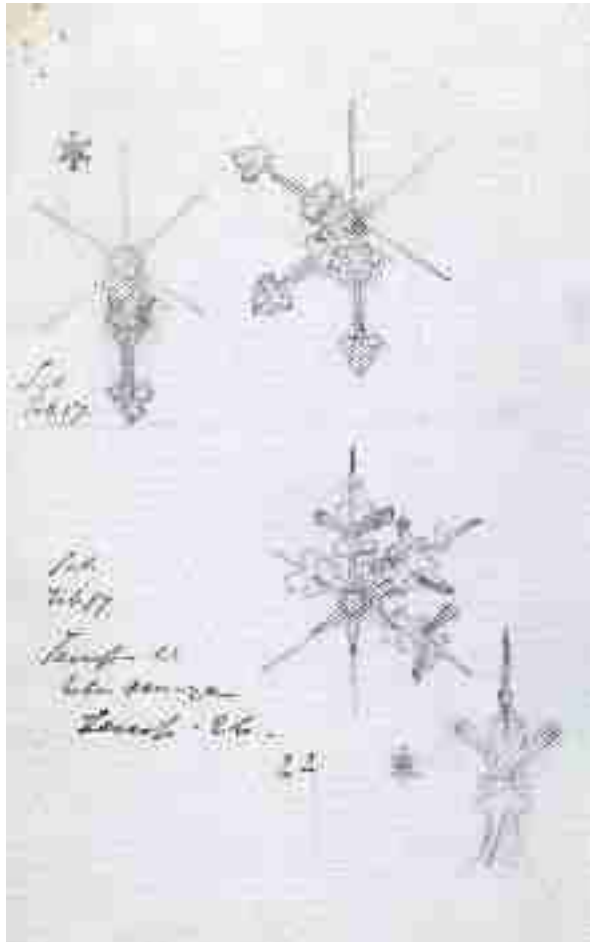
1855



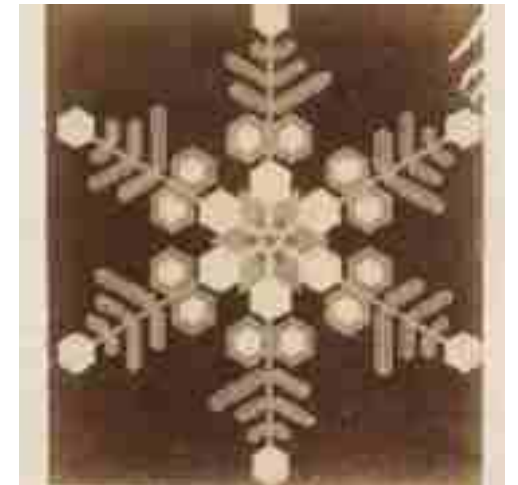
Observations à la loupe des flocons venant se
poser sur sa fenêtre.

Dessins de flocons par Cecilia Glaisher

Dessin de ce qu'elle voit.



Puis schématisation, imagination,
et parfois ajout de couleurs.

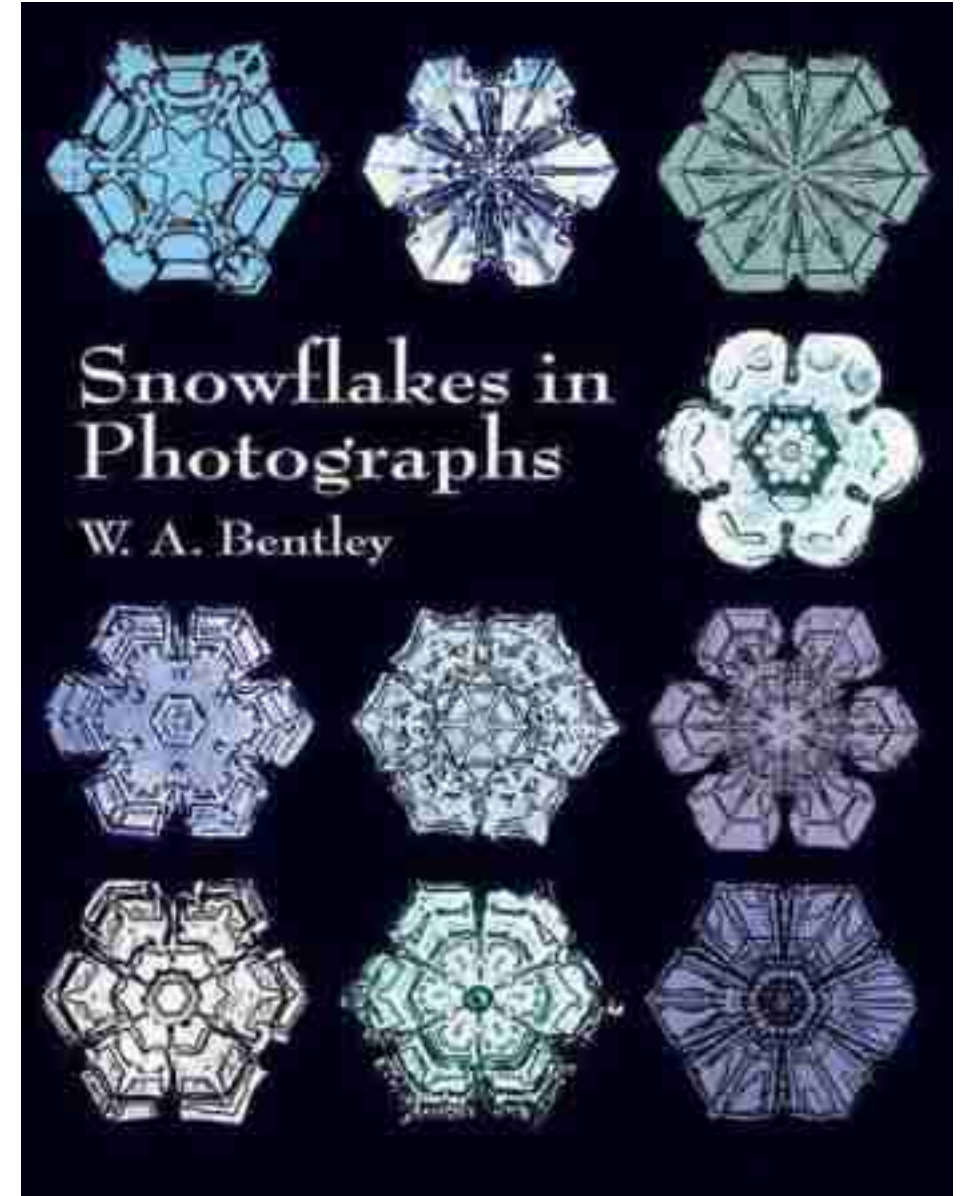


Photographies de flocons

Wilson Bentley
(1865 – 1931)



Observations puis photographies au microscope
(à partir de 1885)



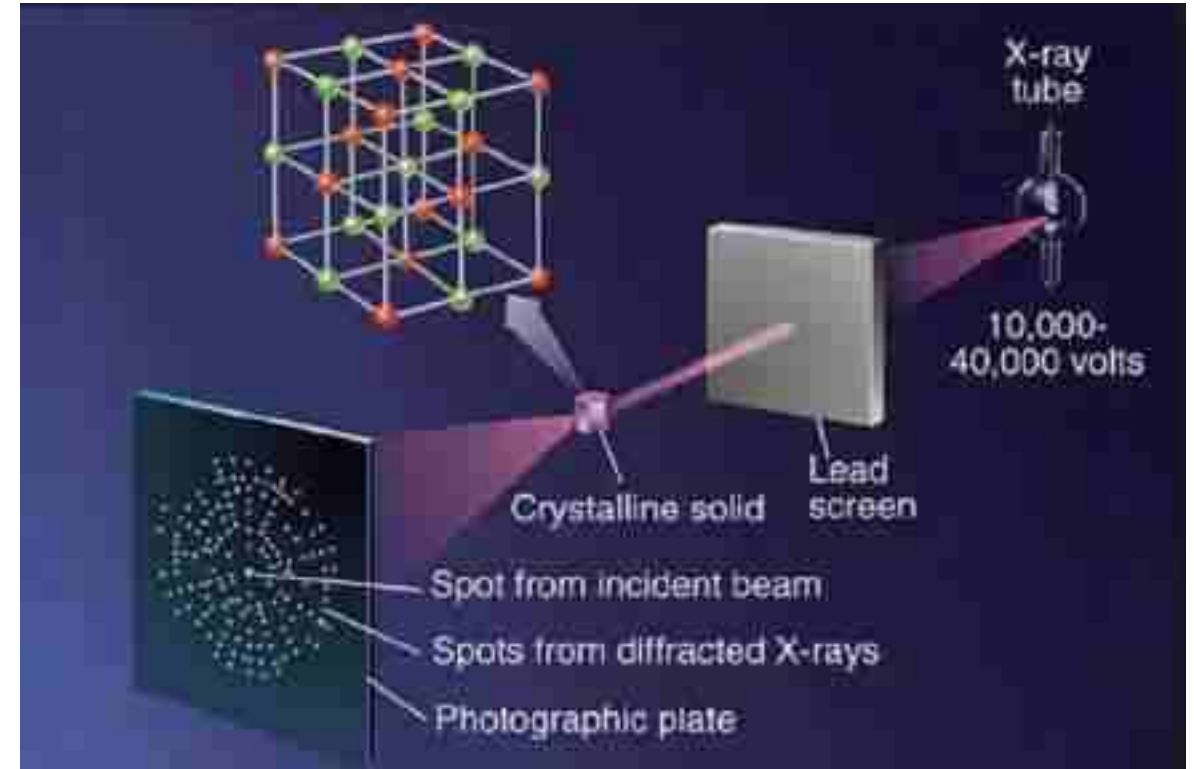
Cristallographie



William Lawrence Bragg
(1890 – 1971)

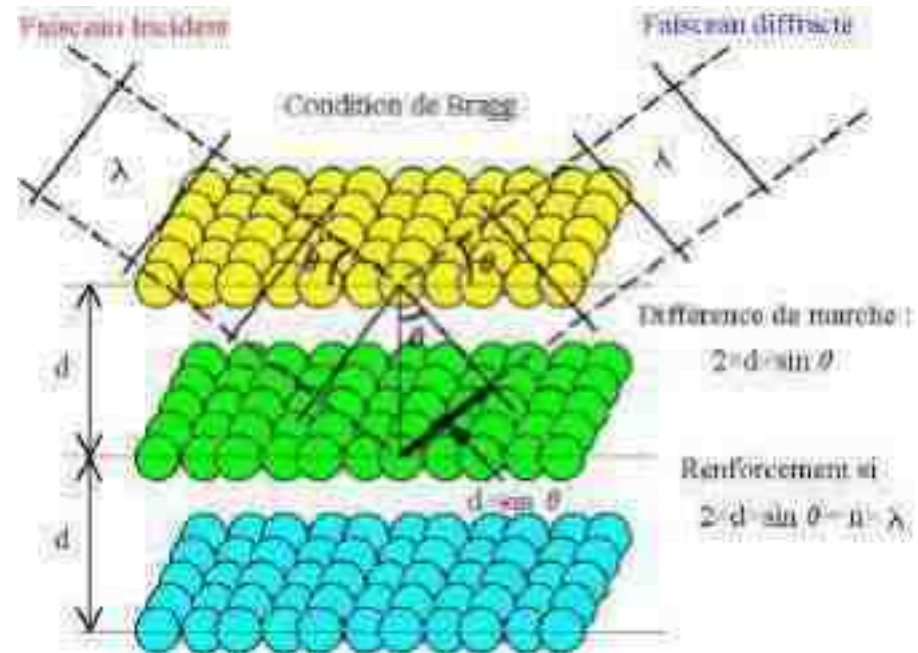
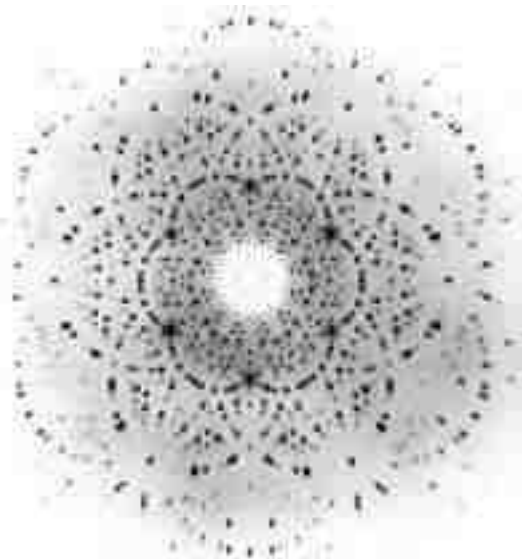
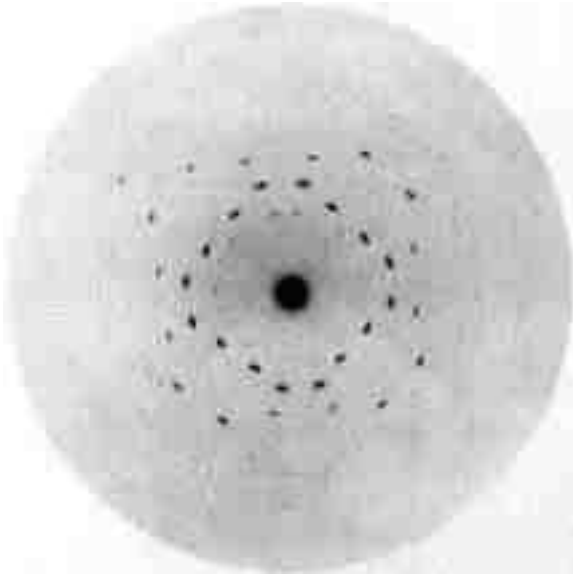


William Henry Bragg
(1862 – 1942)



Prix Nobel 1915

Cristallographie



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

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

Cristallographie

Structure cristalline hexagonale

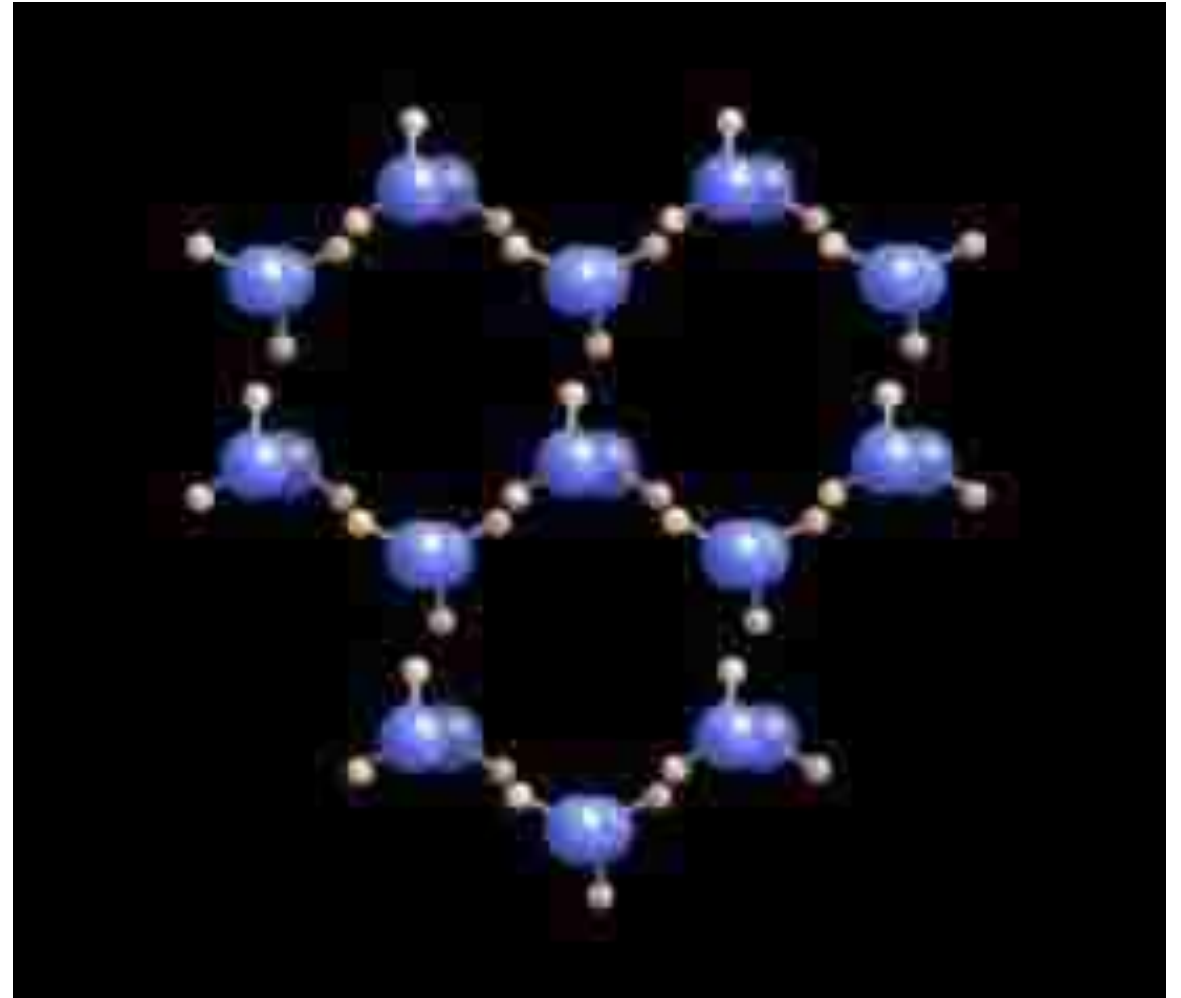
Hypothèse des Bragg,
confirmée en 1933 par Bernal et Fowler.



J. D. Bernal
(1901—1971)



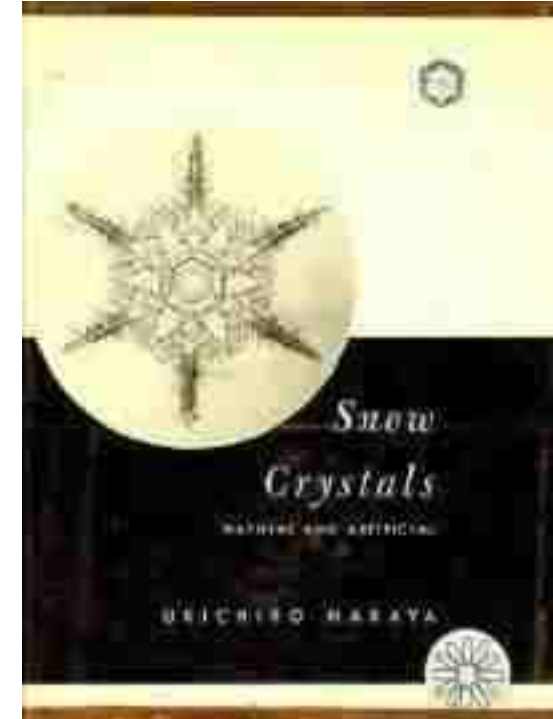
Ralph Fowler
(1889—1944)



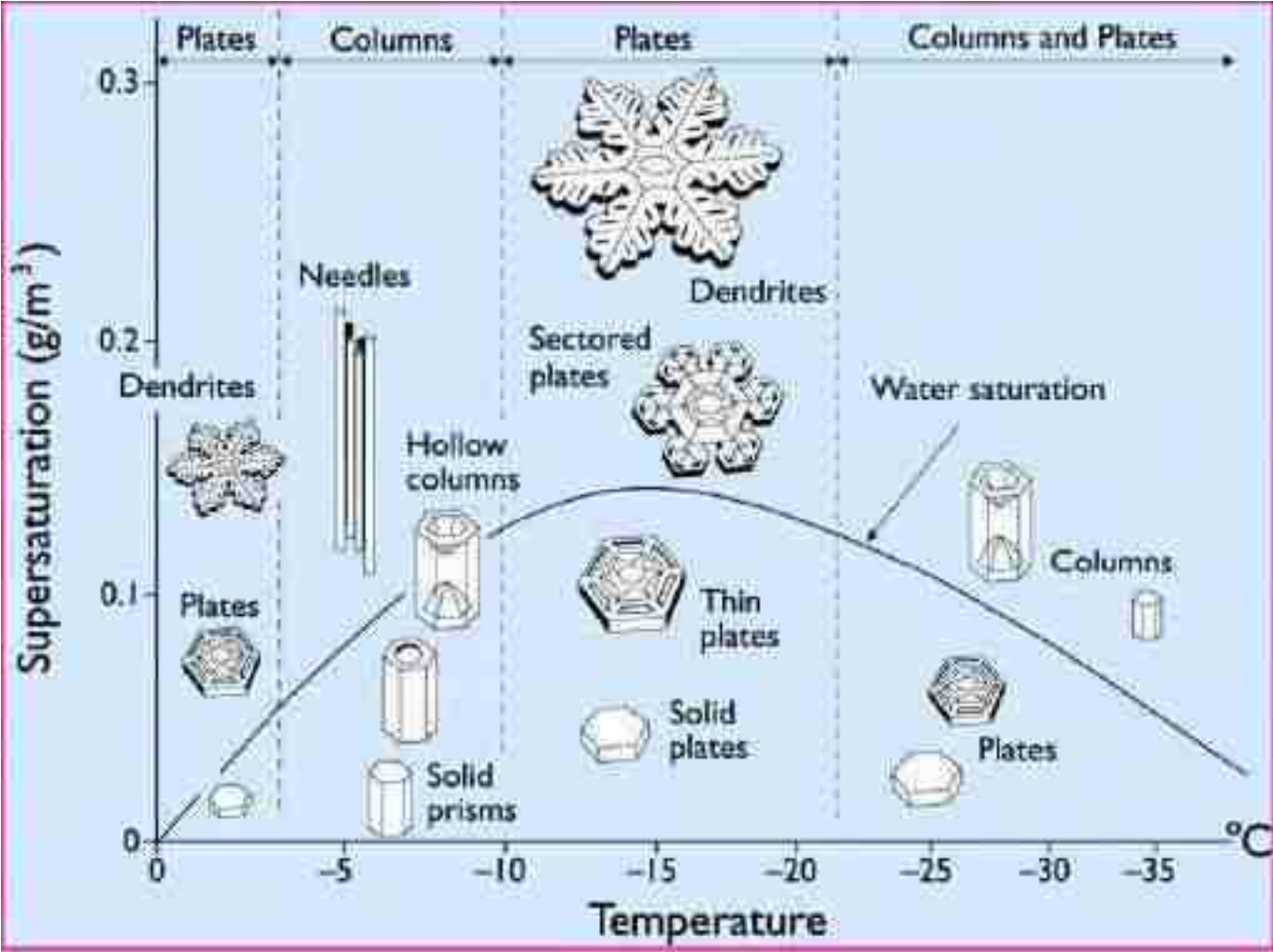
Flocons naturels et artificiels



Ukichiro Nakaya
(1900—1962)



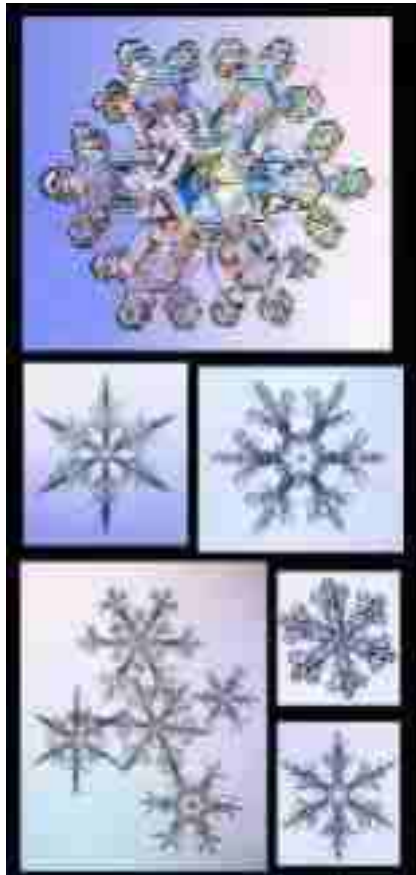
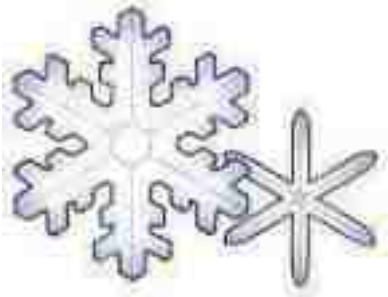
Classification des flocons



 Simple plates	 Solid columns	 Shards	 Shards in rows	 Flake-like forms
 Hexagonal plates	 Solid columns	 Flake	 Columns in rows	 Unbranched stars
 Solid plates	 Solid needles	 Capped columns	 Solid plates in rows	 Flake-like forms
 Sectorial plates	 Solid needles	 Rough-capped columns	 Shard-like forms	 Flake-like forms
 Simple stars	 Simple needles	 Capped needles	 Thin columns	 Irregular
 Solid dendrites	 Solid needles	 Double plates	 Inverted stars	 Snow
 Solid plates	 Capped needles	 Solid plates	 Capped plates	 Clumped

Classification des flocons

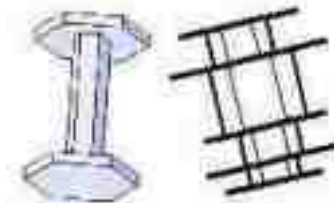
Dendrites stellaires



Colonnes et aiguilles



Colonnes coiffées

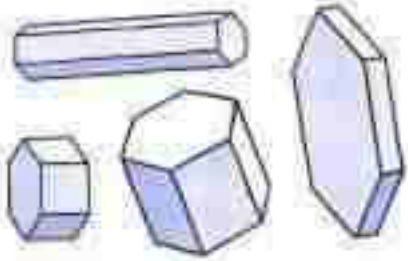


Dendrites fougères

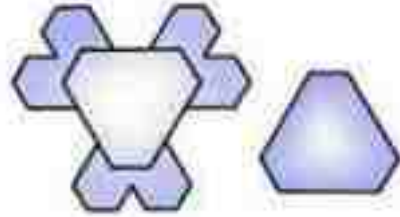


Classification des flocons

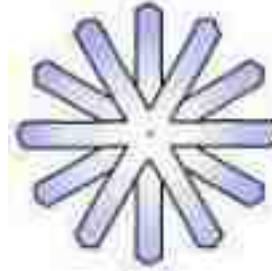
Poussière de diamant



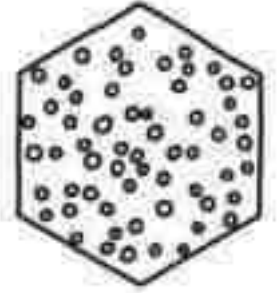
Triangulaire



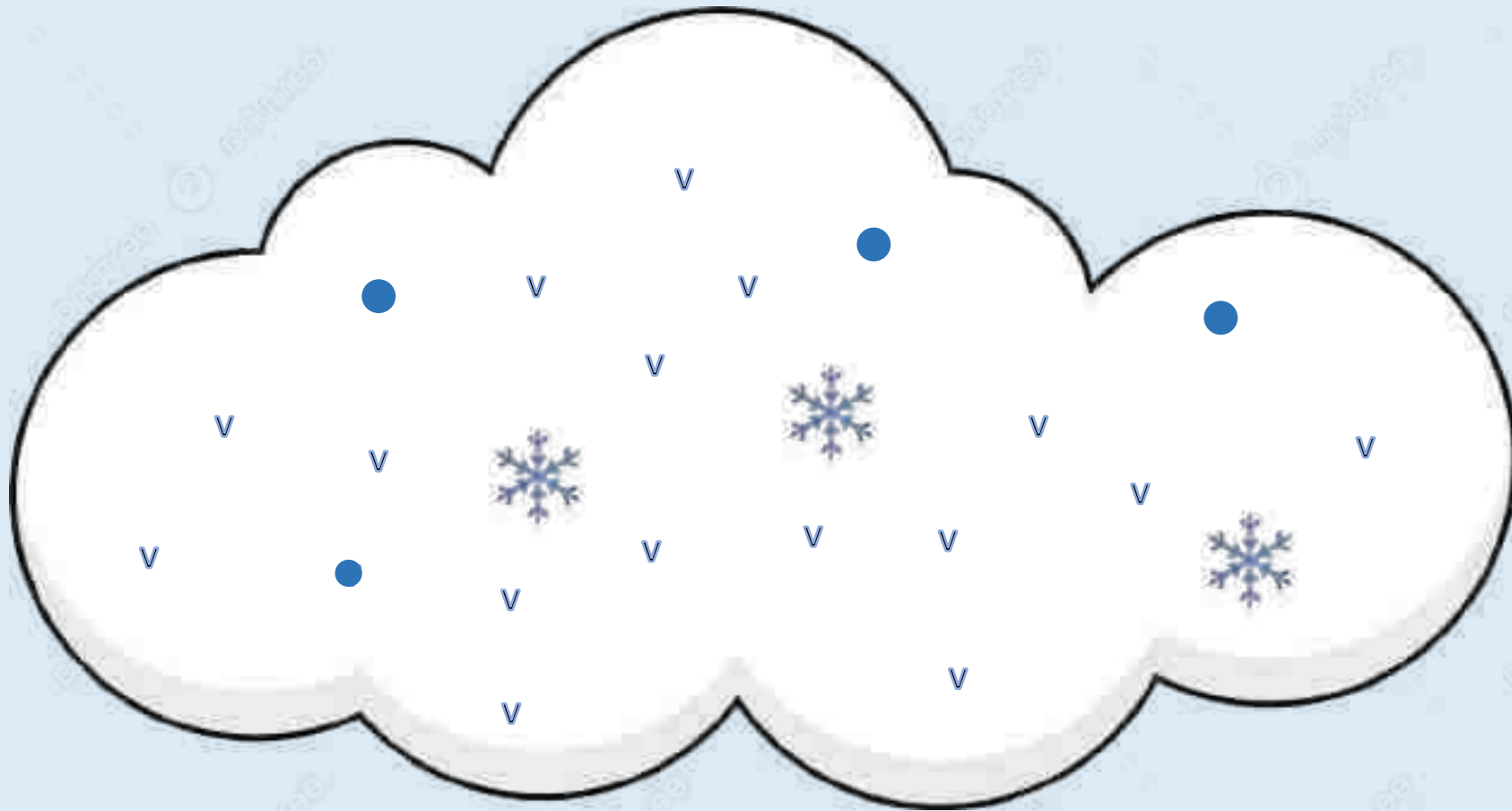
A douze branches



Bordé



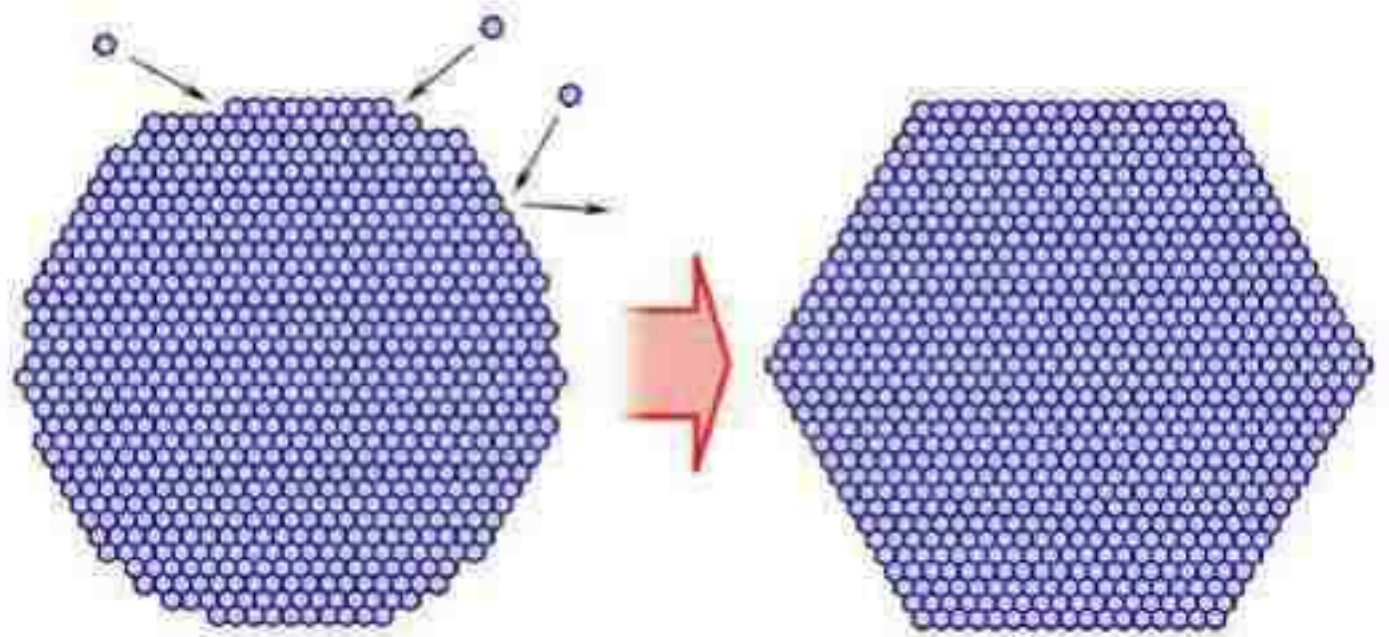
Naissance d'un flocon



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.

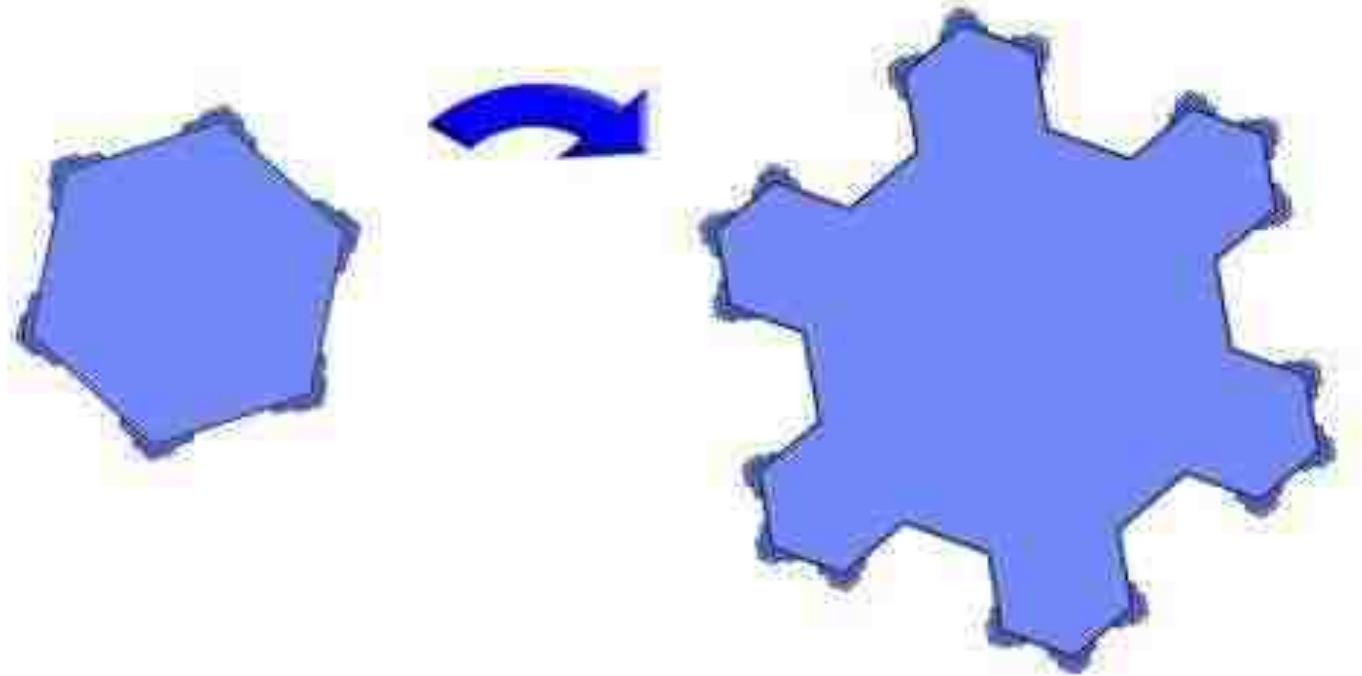


Prédominant lorsque les cristaux de neige sont **petits** ou **croissent lentement**.

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**.

Affutage des arêtes

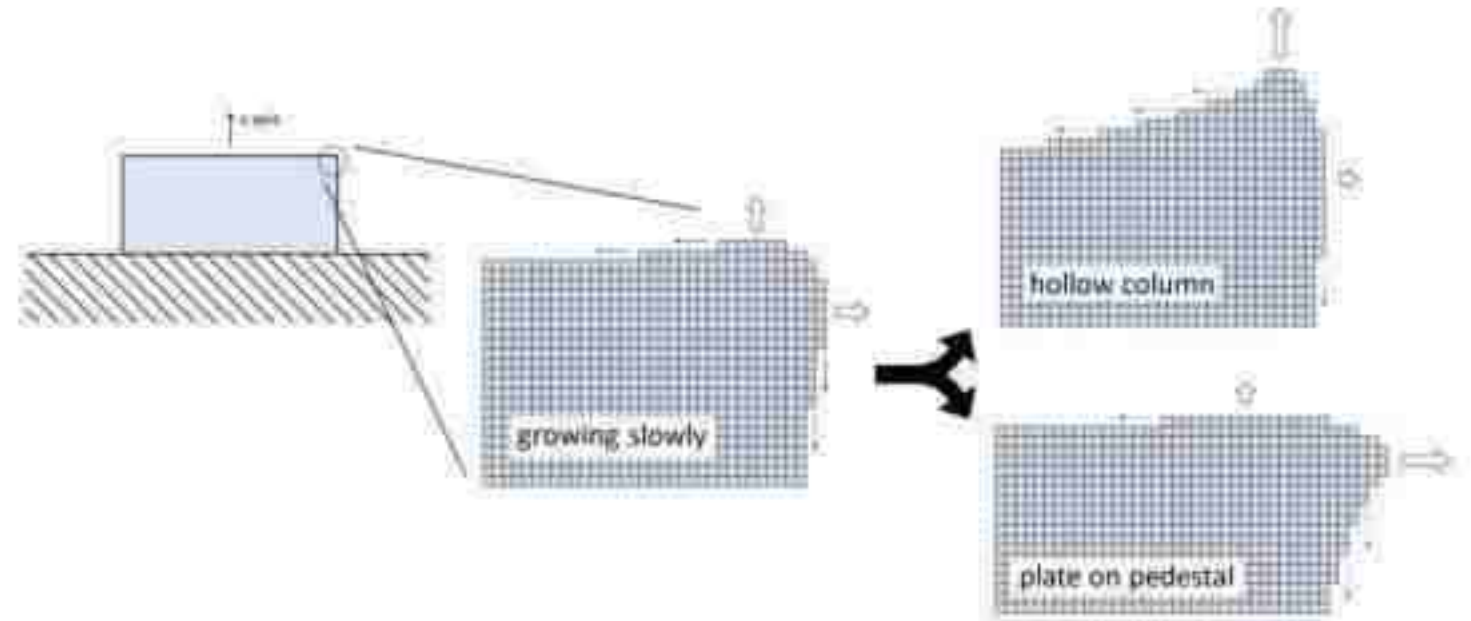
Pourquoi les flocons prennent-ils sont-ils **aussi fins** ?

Instabilité de croissance par affûtage des arêtes.

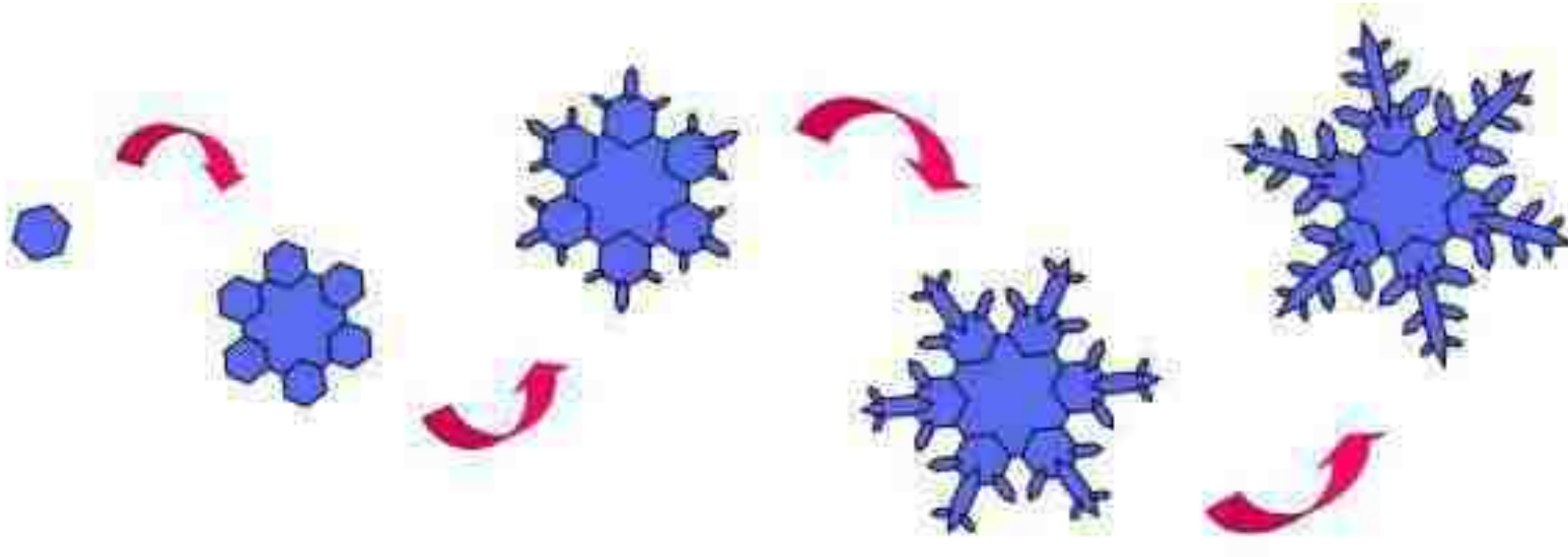
Croissance d'une surface
dépend de la largeur de la
facette.

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.

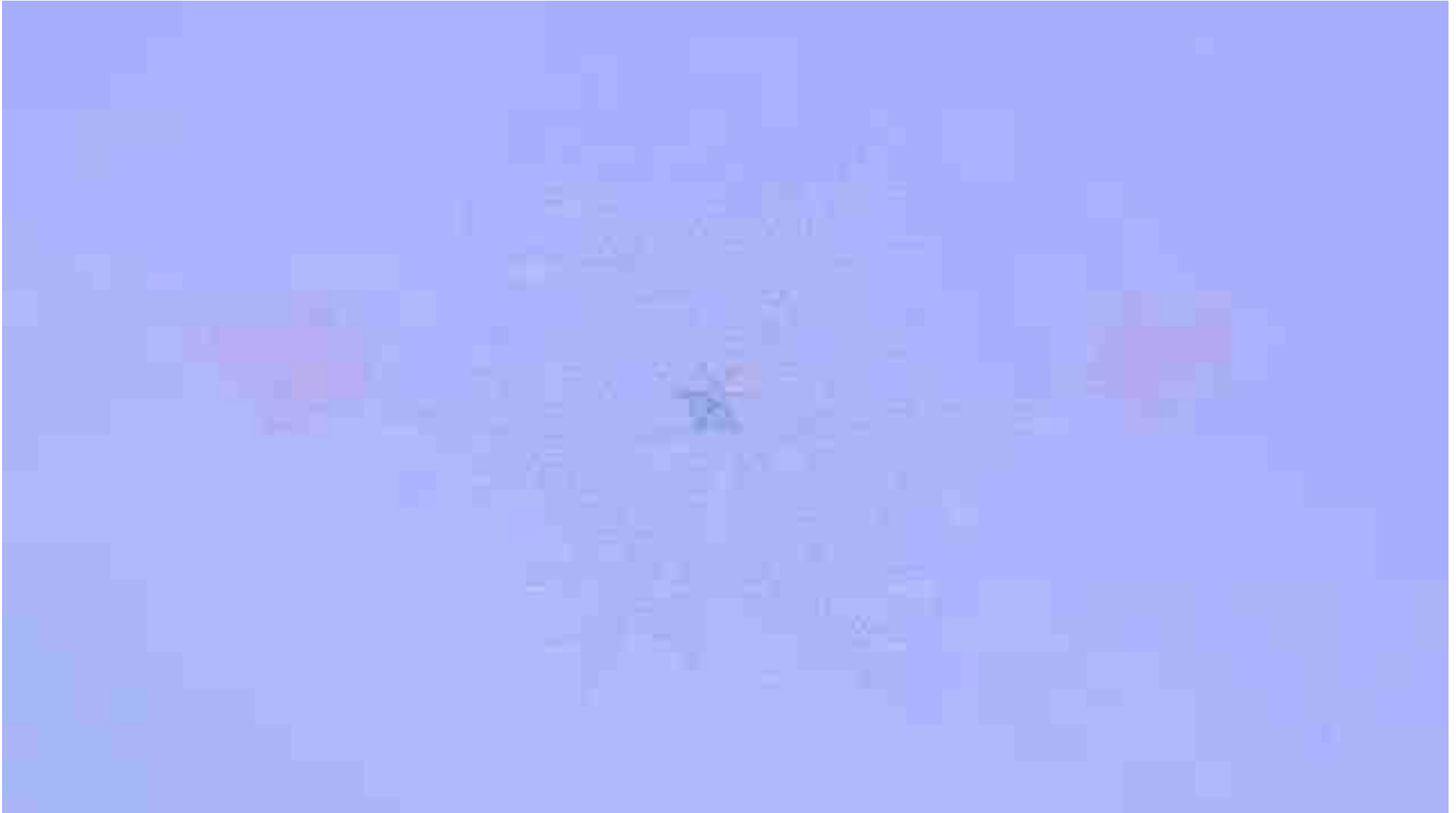
Des **ramifications** jaillissent de ses **six sommets** à mesure qu'il grandit.

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

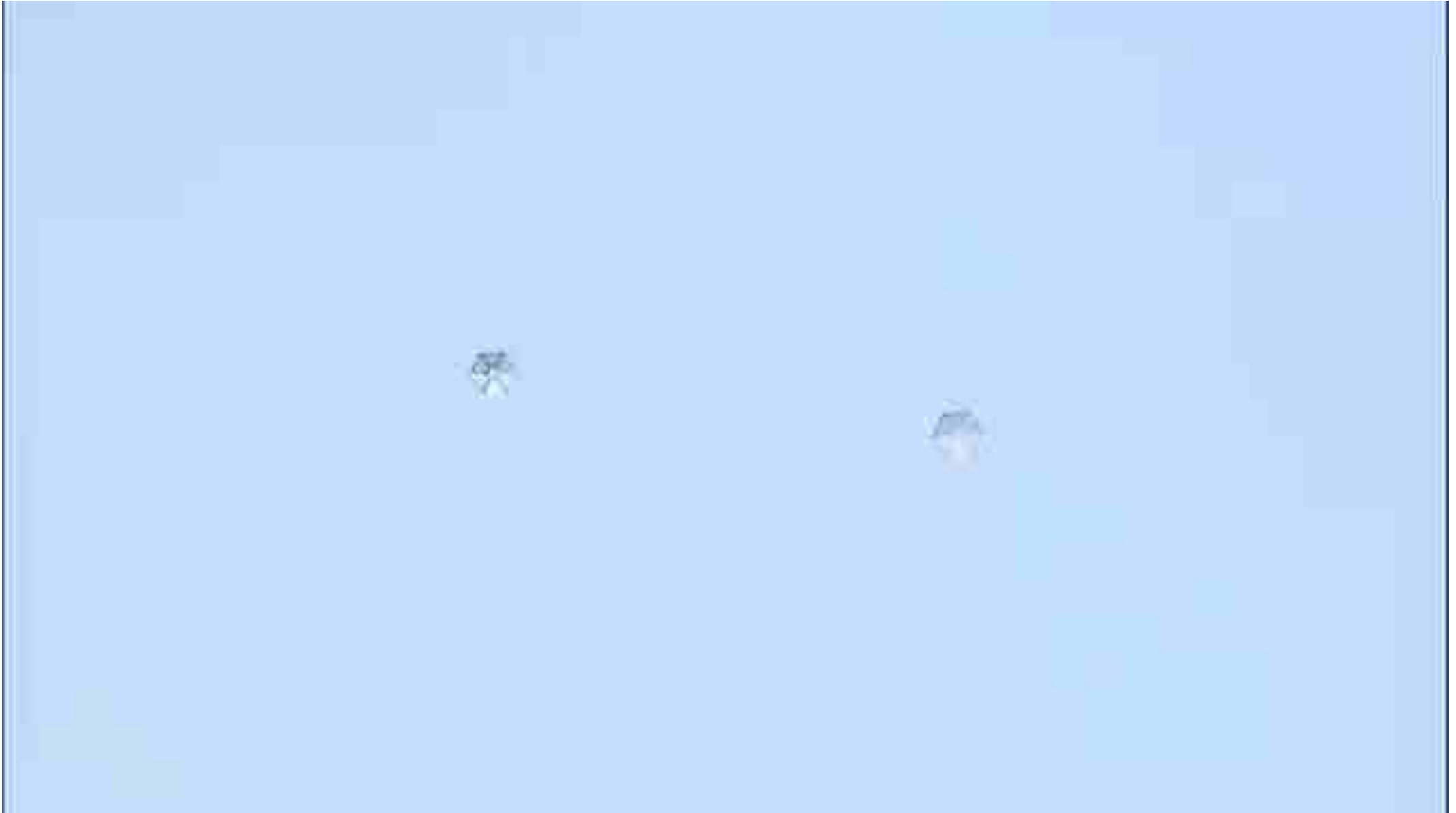
Forme du cristal déterminée par sa **trajectoire à travers les nuages**.

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

Formation d'un flocon



Formation de plusieurs flocons

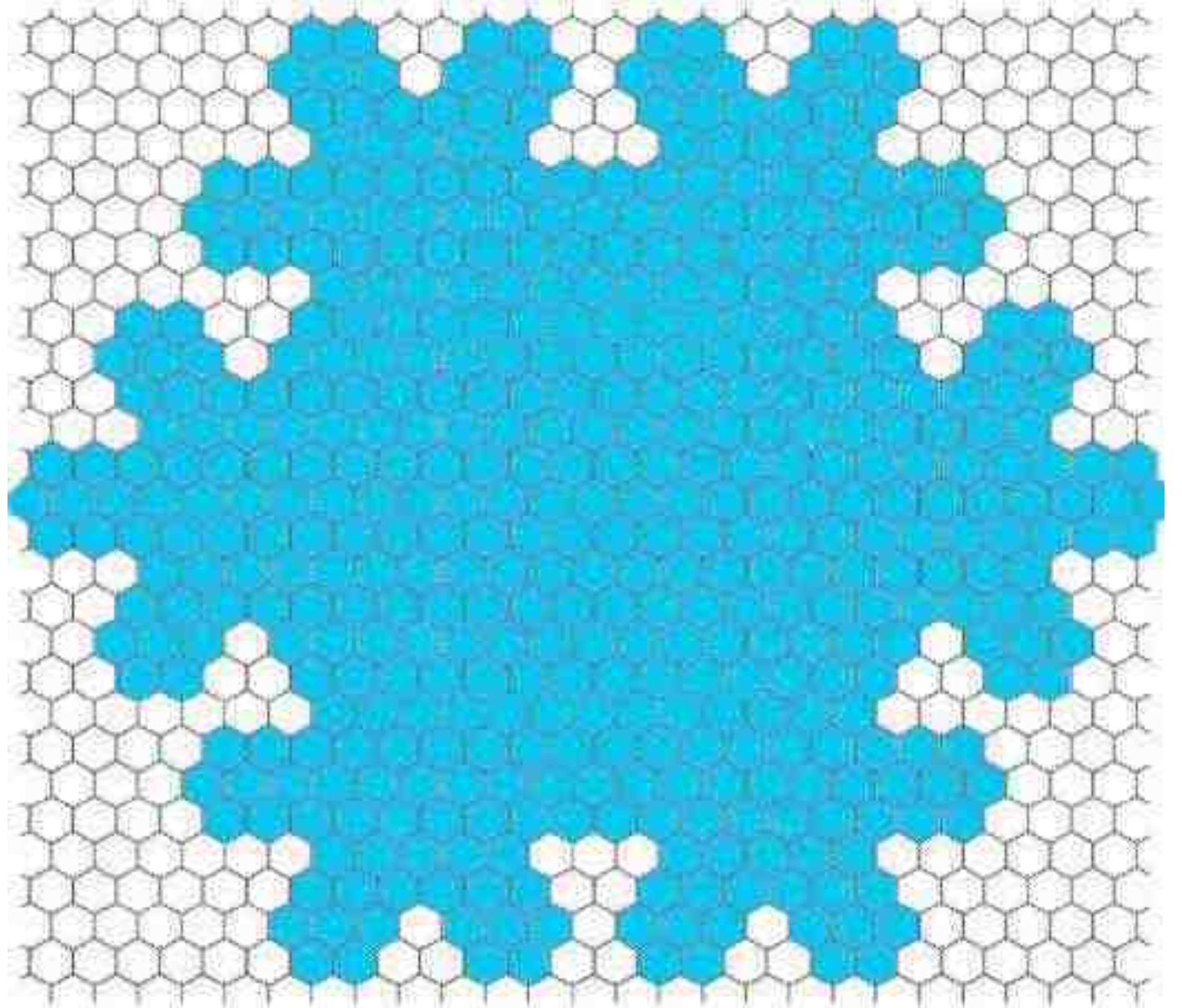


Flocons mathématiques

Une cellule **gèle**
si elle a **1** ou ≥ 3 voisins gelés.



Norman Packard
(1954—)



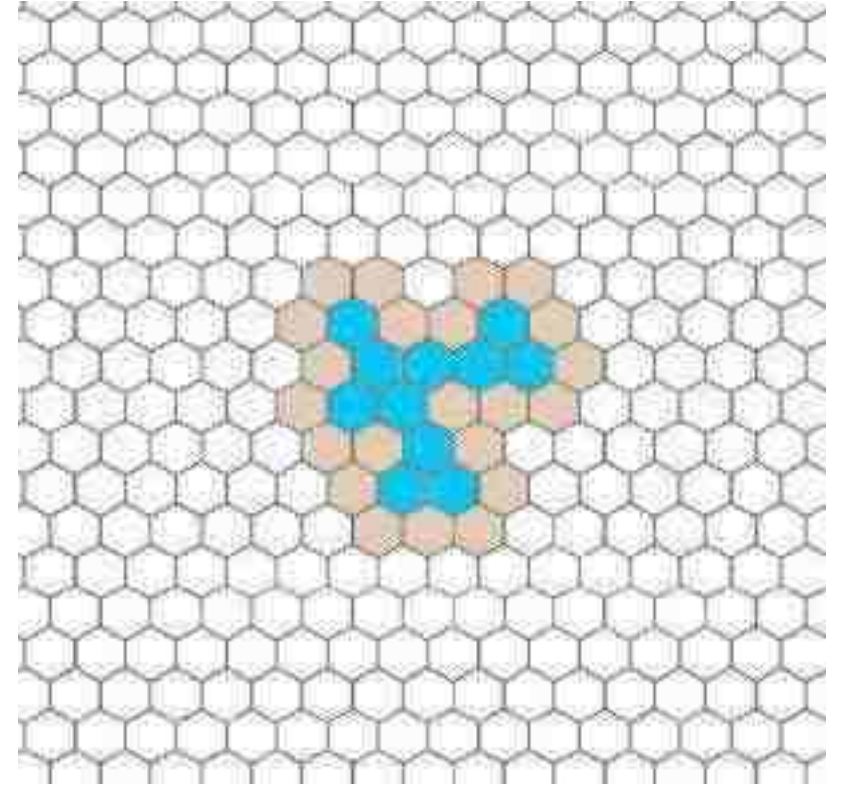
Flocons mathématiques

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 β de son humidité vers les voisines.

Apport de γ à chaque cellule.



Clifford Reiter

Flocons mathématiques

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

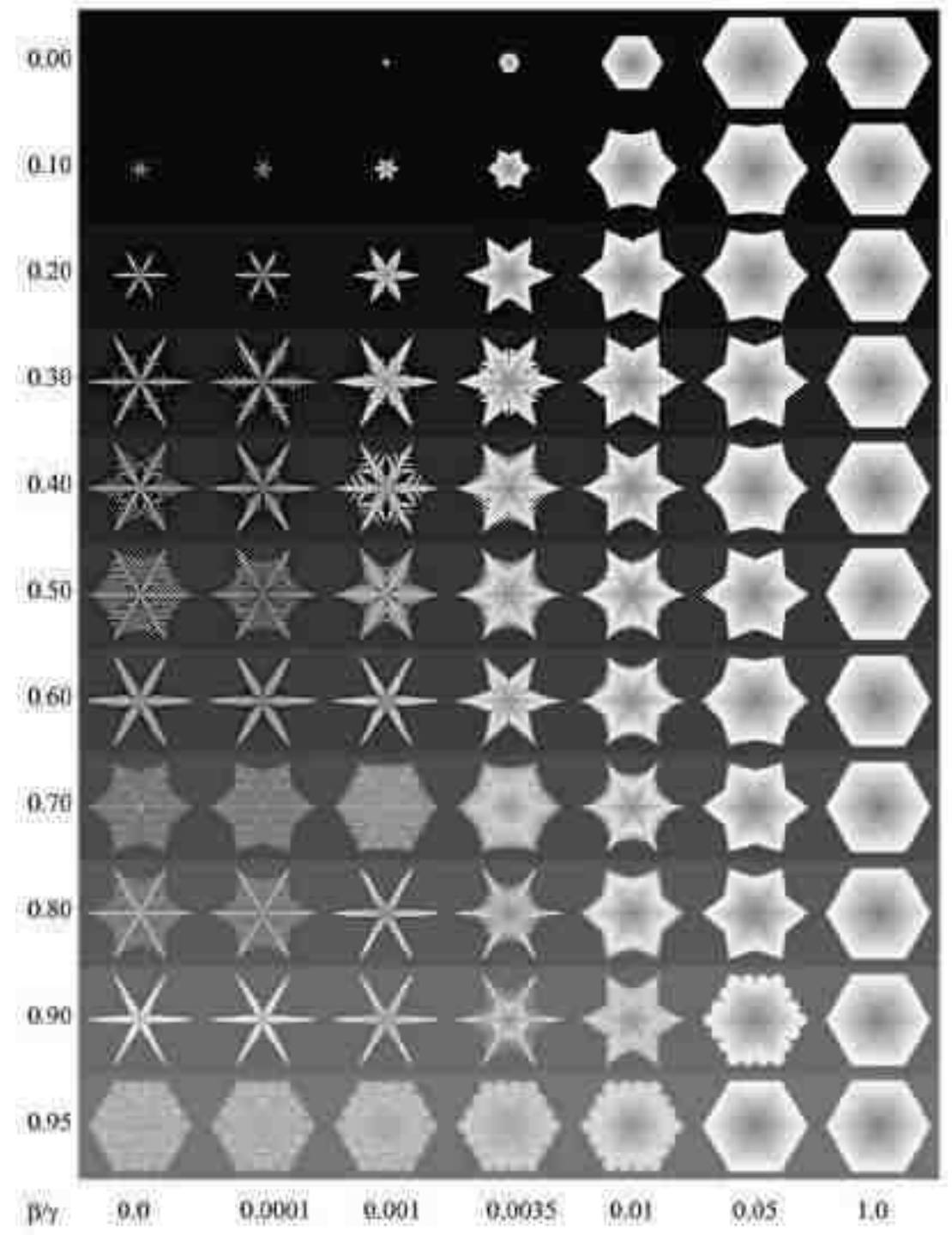
A un taux d'humidité compris entre 0 et 1.
Elle gèle à 1.

Transfert de β de son humidité vers les voisines.

Apport de γ à chaque cellule.



Clifford Reiter





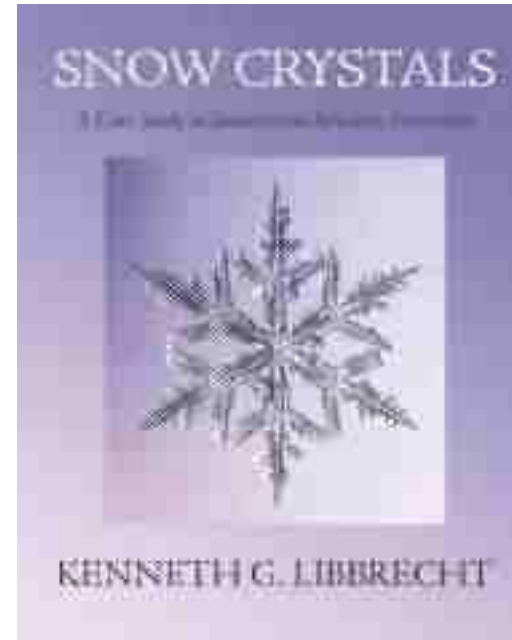
En savoir plus

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

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

Livres :

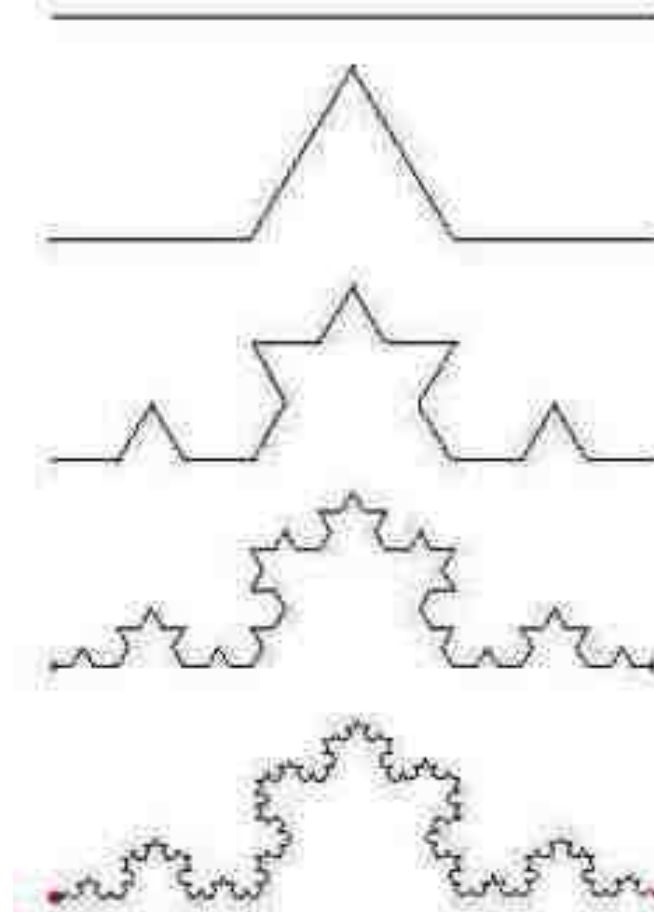
- *Snow crystals*, Kenneth G. Libbrecht, Princeton University Press.
- *La petite histoire des flocons de neige*, Etienne Ghys, Odile Jacob.



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

