

Mise en perspective didactique d'un projet de recherche

Alexandre Jedrecy

Concours spécial de l'agrégation externe de physique-chimie option physique
Session 2022

Parcours universitaire et scientifique

① Parcours universitaire et scientifique

② Expériences d'enseignement

③ Activité pédagogique

④ Expérience de recherche

Parcours universitaire et scientifique

■ Formation

2012-2015 : Licence Physique-Mathématique, *UPMC, Paris*

2015-2016 : M1 de Physique fondamentale, *UPMC, Paris*

2016-2017 : M2 ICFP, Parcours matière condensée, *ENS, UPMC , Orsay, Diderot*

2021-2022 : Préparation à l'agrégation au centre de Montrouge, *ENS, SU, PS*

■ Expérience de recherche

2017-2020 : Thèse de doctorat, *IMPMC*

« *Étude des transformations de phase de la matière grâce à des coordonnées topologiques* »

Expériences d'enseignement

- ① Parcours universitaire et scientifique
- ② **Expériences d'enseignement**
- ③ Activité pédagogique
- ④ Expérience de recherche

Expériences d'enseignement

■ « Concepts et fondements de la physique » (L1)

Encadrement de travaux pratiques, dirigés et tutorats, SU (2018)

Quelques observations :

- Problèmes avec les maths
- Ordres de grandeurs et analyse dimensionnelles utiles
- Étudiant-es manquent d'autonomie

Expériences d'enseignement

■ « Concepts et fondements de la physique » (L1)

Encadrement de travaux pratiques, dirigés et tutorats, SU (2018)

Quelques observations :

- Problèmes avec les maths
- Ordres de grandeurs et analyse dimensionnelles utiles
- Étudiant-es manquent d'autonomie

Pour le lycée :

- Contextualiser la modélisation
- Ordres de grandeurs et exemples du quotidien
- Séances d'exercices en groupes semi-autonomes

Expériences d'enseignement

■ « Optique et électrocinétique » (L1)

Encadrement de travaux pratiques, dirigés, réalisation de projet expérimentaux, SU (2018)

Quelques observations :

- Difficile de suivre le programme sans perdre des étudiant-es
- Projets expérimentaux motivants
- Sujet des projets parfois pas assez guidé

Expériences d'enseignement

■ « Optique et électrocinétique » (L1)

Encadrement de travaux pratiques, dirigés, réalisation de projet expérimentaux, SU (2018)

Quelques observations :

- Difficile de suivre le programme sans perdre des étudiant-es
- Projets expérimentaux motivants
- Sujet des projets parfois pas assez guidé

Pour le lycée :

- Prioriser les points clefs du programme
- Les projets expérimentaux en autonomie sont motivants

Activité pédagogique

- ① Parcours universitaire et scientifique
- ② Expériences d'enseignement
- ③ Activité pédagogique
- ④ Expérience de recherche

Étude de la glace hexagonale

■ Étude documentaire

Étude structure cristalline glace hexagonale

1ère enseignement scientifique, chapitre « une longue histoire de la matière »

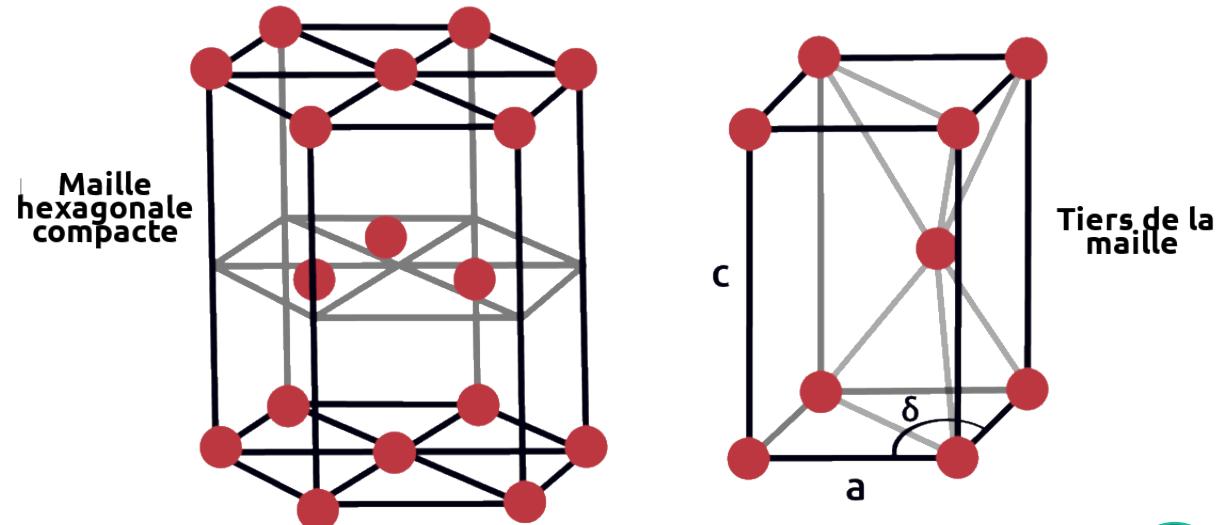
- **Problématique :** comment expliquer la symétrie des flocons de neige ?
- **Objectifs :** utiliser les outils développés pour les mailles cubiques faces centrées, expérimenter la méthode scientifique



Étude de la glace hexagonale

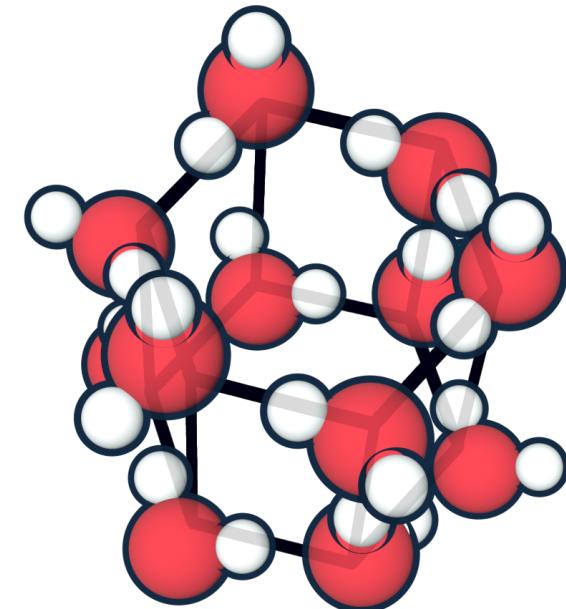
Déroulé détaillé :

- Question ouverte à la classe : Quelle est la structure microscopique des flocons de neige ? Sa symétrie macro est due à celle micro
- Présentation de la maille hexagonale compacte (hc)
- Exercices : calcul de la compacité de la maille et de la densité de la glace hexagonale



Étude de la glace hexagonale

- Problème : glace plus dense que l'eau liquide !
- Qu'est-ce qu'on a oublié ? Les liaisons hydrogènes !
- Présentation de la maille hexagonale de la glace avec les liaisons hydrogènes et de sa compacité
- **Conclusion :** symétrie micro ↔ symétrie macro
Pour déterminer la géométrie de la maille il faut plus d'informations



Les transitions de phase en PCSI/PC

■ En physique :

Transition abordée de manière phénoménologique

- Lecture diagramme de Clapeyron (P, V)
- Lecture diagramme de phase (P, T)
- Notion de point critique et de métastabilité
- Important pour les machines thermiques

Principalement les transitions du premier ordre, mais on peut aborder le second ordre en parlant des milieux ferromagnétique

Les transitions de phase en PCSI/PC

■ En chimie :

Étude des équilibres pour les corps purs et binaires

→ Concentré sur les transitions du premier ordre

Utilisation de l'enthalpie : théorie de la nucléation classique en ouverture

→ Permet d'expliquer la métastabilité

→ Mobilise à la fois la physique et la chimie

La métastabilité en PCSI/PC

Transition abordée en

- première année : phénoménologie
- seconde année : équilibre entre deux phases

Métastabilité :

- Vu expérimentalement avec analyses thermiques
- Théorie de la nucléation classique en ouverture

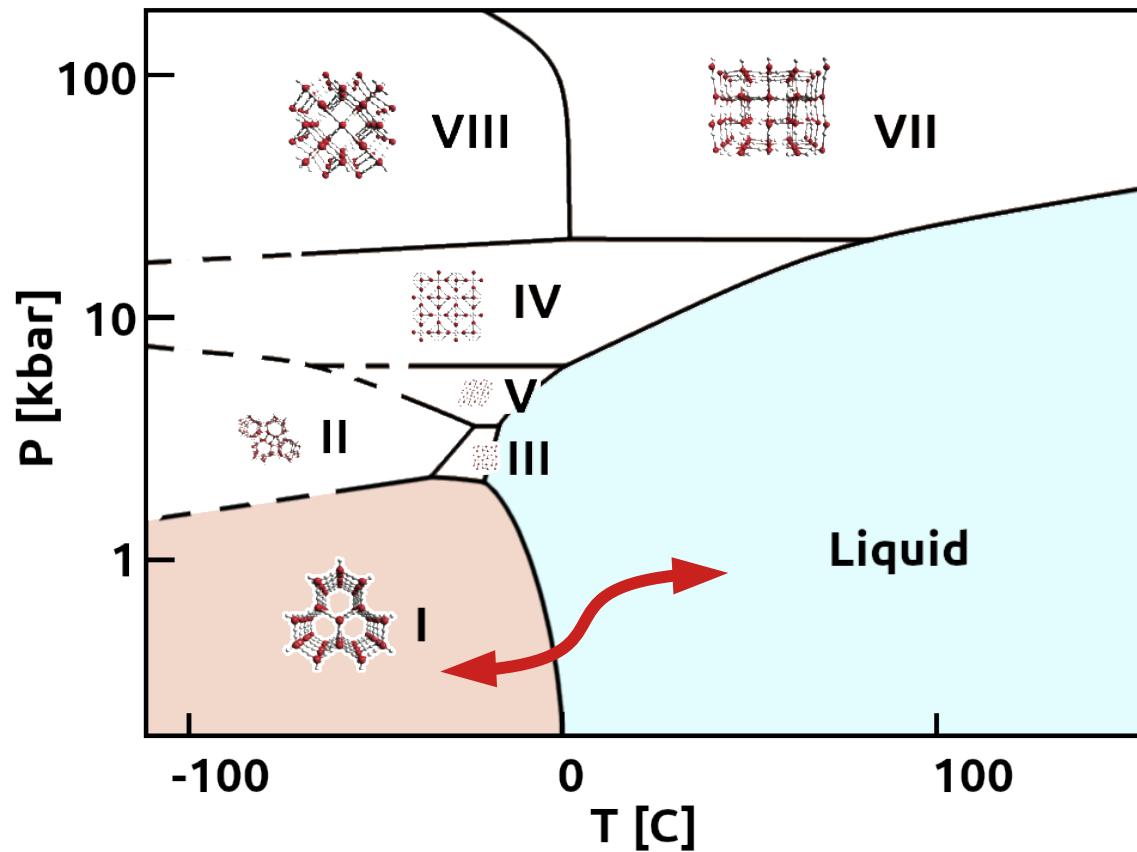
La métastabilité en PCSI/PC

- Exemple de séance d'exercice autour de la théorie classique de la nucléation
 - Description du modèle
 - Forme de G déduite par analyse dimensionnelle
 - Déduction d'une taille critique
 - Analyse cinétique : métastabilité

Expérience de recherche

- ① Parcours universitaire et scientifique
- ② Expériences d'enseignement
- ③ Activité pédagogique
- ④ Expérience de recherche

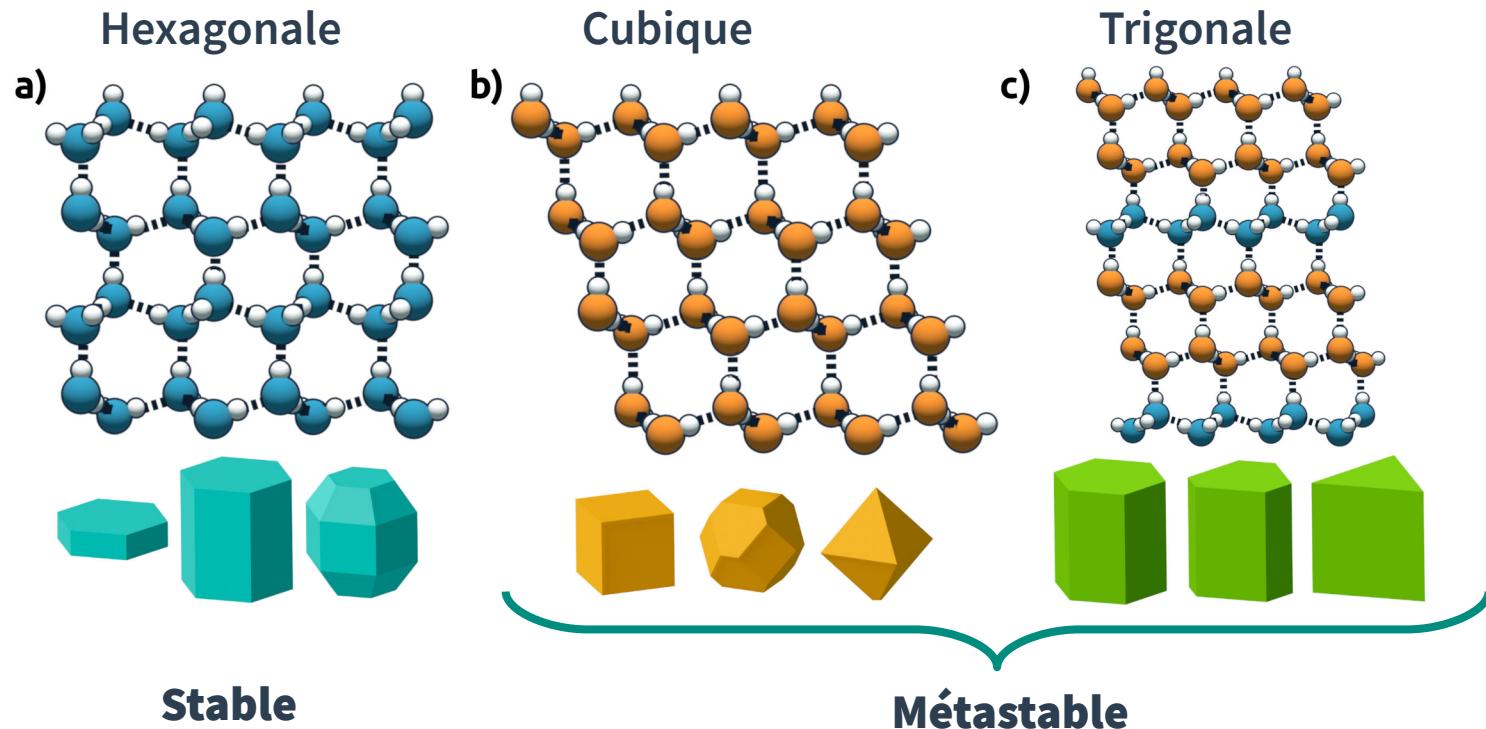
Nucléation homogène de l'eau



On étudie la transition de l'eau pure liquide en glace I

La glace I

Confusion historique entre glace cubique et trigonale



Cubicité = # molécules cubiques / # molécules cristallines

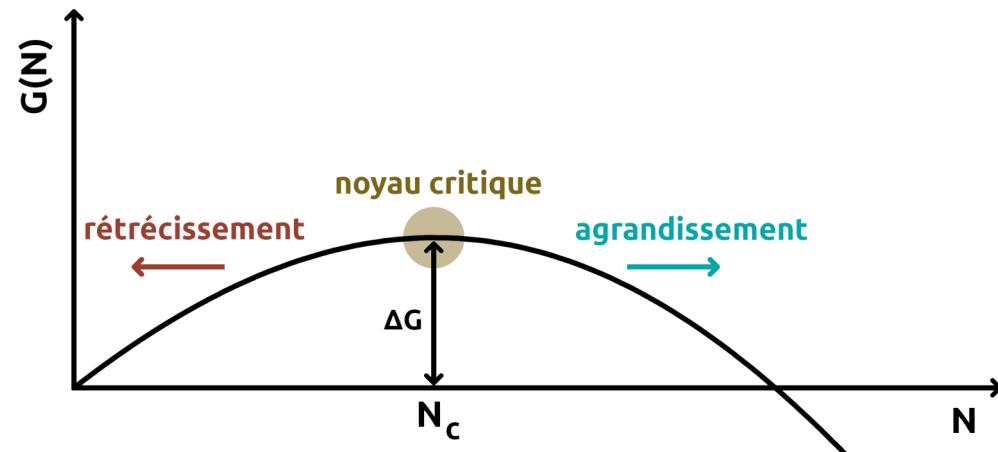
Théorie de la nucléation classique

Nucléation en deux temps

- Formation d'un **noyau critique**
- Le noyau s'étend à tous le système

Théorie de la nucléation classique :

- Noyaux modélisés comme des gouttes sphériques
- Forme et composition du noyau négligées



Hypothèses vérifiées pour l'eau ?

Dynamique moléculaire et principe d'ergodicité

Moyenne temporelle = moyenne sur l'espace des états

→ Vérifiée pour des trajectoires longues

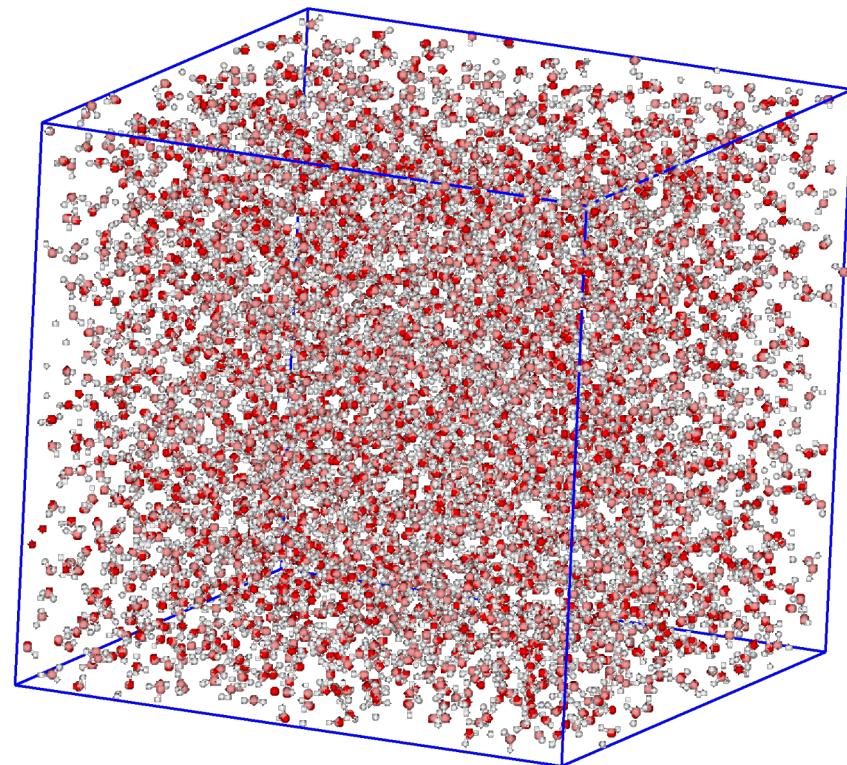
Dynamique moléculaire et principe d'ergodicité

Moyenne temporelle = moyenne sur l'espace des états
→ Vérifiée pour des trajectoires longues

Comment l'expliquer à des élèves niveau MP ?

- Hypothèse qui relie théorie et expérience
 - ensemble = théorie
 - temporelle = expérience
- Activité numérique : simuler une marche aléatoire 1D
 - trajectoires simulées uniques
 - $\langle x \rangle = 0$ pour chaque simulation
 - résultat identique à la moyenne d'ensemble

Système étudié

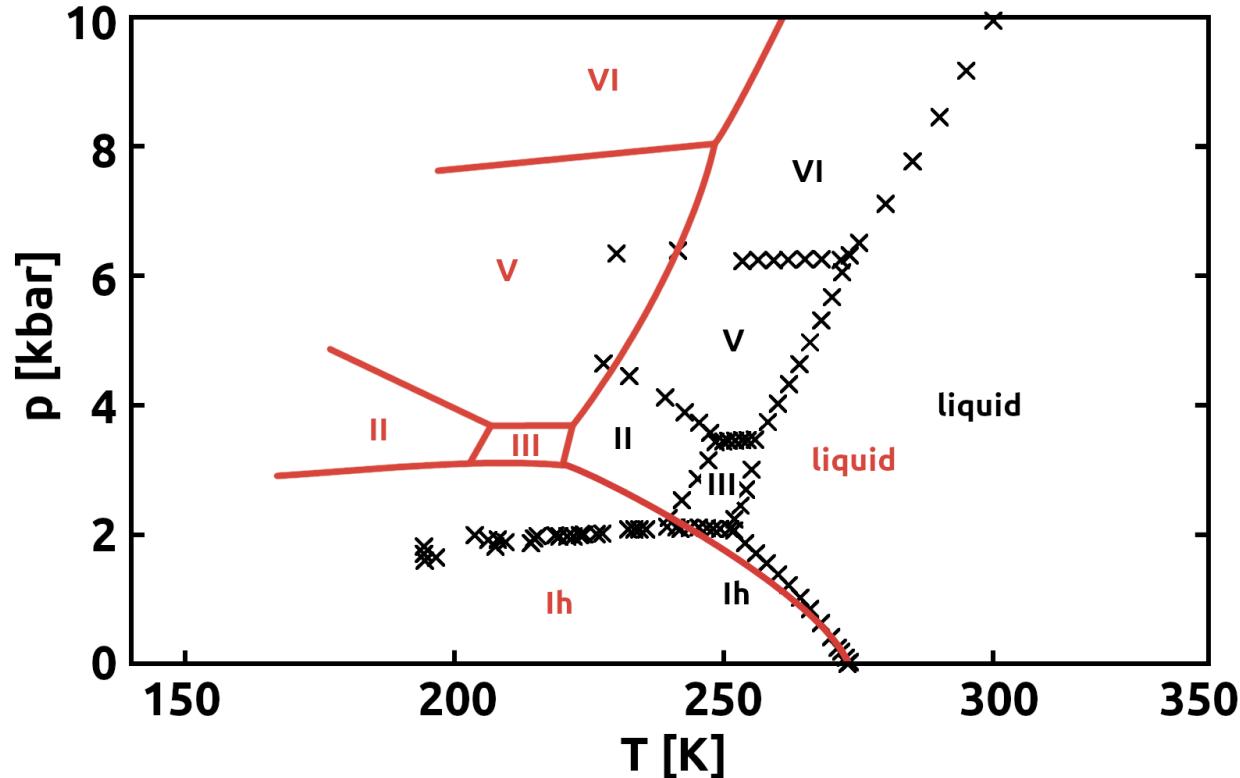


**T = 237 K
P = 1 bar**

Boîte de 4096 molécules d'eau, modélisées avec le modèle TIP4P/Ice

Modèle TIP4P/Ice

Modèle conçu pour reproduire les propriétés des **phases solides** de l'eau



Modèle qui reproduit le mieux le diagramme de phase de l'eau !

Thermodynamique et cinétique

Thermodynamiquement $G_{\text{hexagonale}} < G_{\text{cubique}} < G_{\text{trigonale}}$

Mais dans l'atmosphère formation de glace trigonale... Pourquoi ?

Thermodynamique et cinétique

Thermodynamiquement $G_{\text{hexagonale}} < G_{\text{cubique}} < G_{\text{trigone}}$

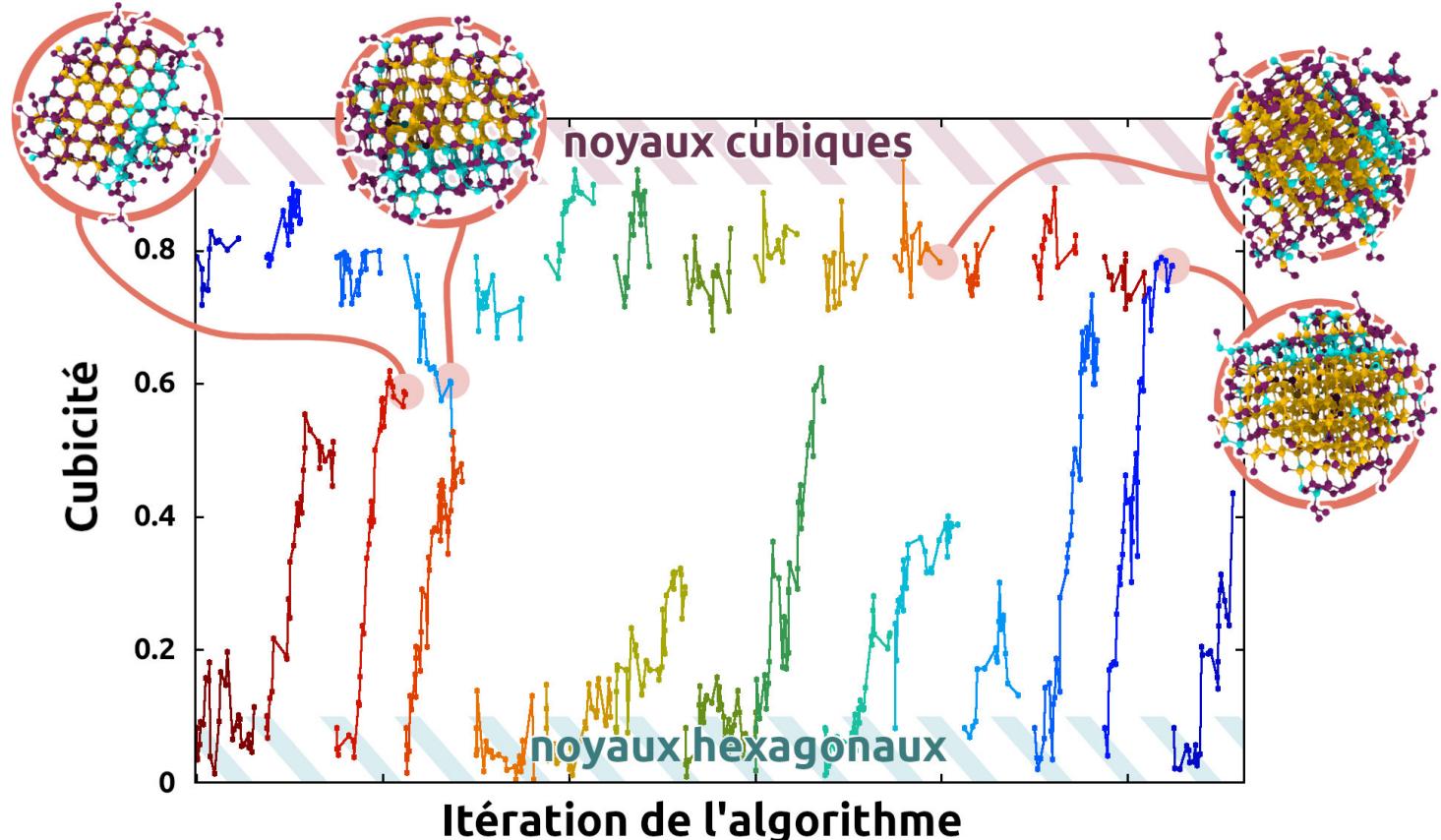
Mais dans l'atmosphère formation de glace trigonale... Pourquoi ?

Algorithme d'échantillonnage des chemins de transition

- Construit un ensemble de noyaux critiques
- Évolue spontanément vers le noyau optimal d'un point de vue cinétique
- Noyau optimal cinétiquement \neq structure stable thermodynamiquement

Résultats

Noyaux critiques évoluent vers une haute cubicité
→ La cinétique favorise une transition vers un noyau trigonal
→ La composition du noyau joue donc un rôle essentiel !



Conclusion

- Envie d'enseigner et de partager des connaissances
- Expériences d'enseignement
- Sujets de recherche → illustrations enrichissantes