

# De l'eau qui ~~bout~~<sup>gèle</sup> à ChatGPT : la physique des algorithmes

---

Antoine Maillard



*Équipe ARGO*

Apprentissage, Graphes et  
Optimisation Distribuée



*Inria*

Demi-heure de science – 2 Juillet 2026

# Menu

---



## Entrée

*Physique statistique ?*



## Plat

*Transitions de phases en physique et en informatique*



## Dessert

*Théorie de l'apprentissage et réseaux de neurones*



# “Mathéma-phys-informaticien” ?

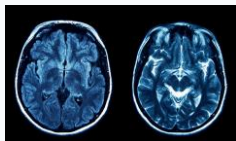
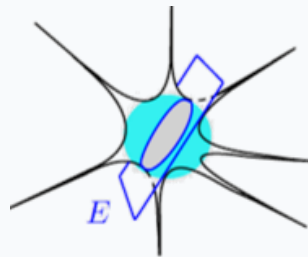
Emprunt à L. Zdeborová



Physique  
Physique statistique,  
mécanique statistique



Mathématiques  
Probabilités, statistiques, ...



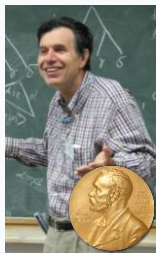
Informatique  
Traitement du signal, acquisition  
comprimée, théorie de l'information,  
apprentissage machine, ...





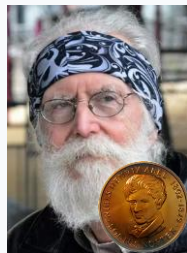
# Une communauté importante

2021



G. Parisi

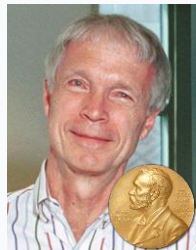
2024



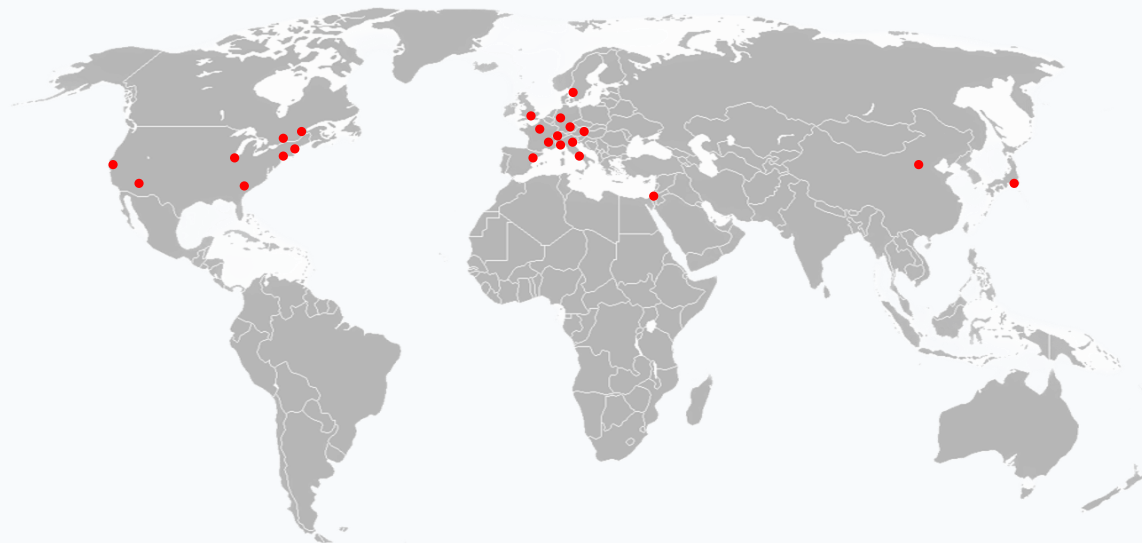
M. Talagrand



2024



J. Hopfield



*ARGO*  
(permanents)



L. Budzynski



L. Massoulié



M. Lelarge



(et moi)



# La physique statistique

La “physique des grands ensembles”

---



# La physique statistique

La “physique des grands ensembles”

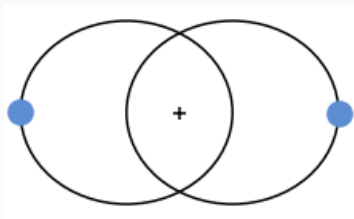
Mécanique classique

$$F = ma$$



I. Newton

Systèmes gravitationnels:



$$N = 2$$



# La physique statistique

La “physique des grands ensembles”

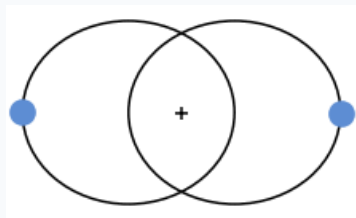
Mécanique classique

$$F = ma$$

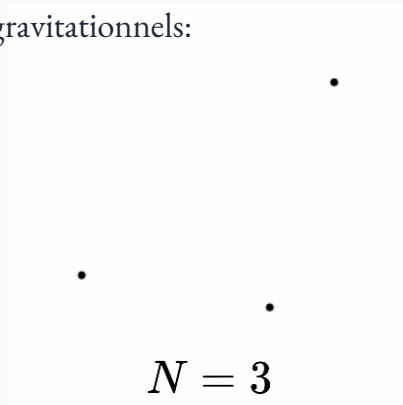


I. Newton

Systèmes gravitationnels:



$$N = 2$$



$$N = 3$$





# La physique statistique

La “physique des grands ensembles”

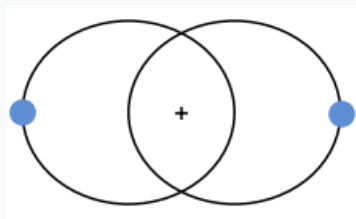
Mécanique classique

$$F = ma$$

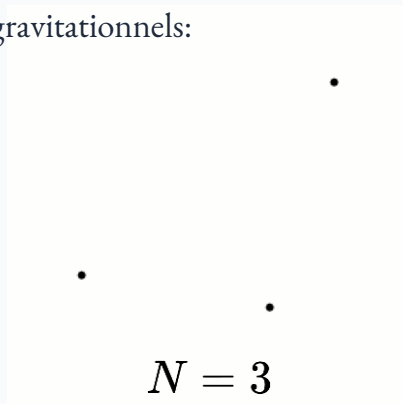


I. Newton

Systèmes gravitationnels:



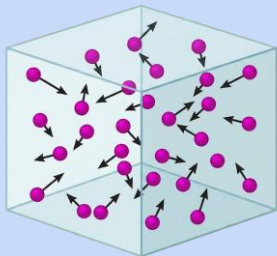
$$N = 2$$



$$N = 3$$



Molécules dans un verre d'eau



$$N_{\text{Avogadro}} \sim 6 \cdot 10^{23}$$



Calculer toutes les trajectoires est

1. Sans espoir
2. **Sans intérêt** (ne dit rien sur la physique de l'eau)

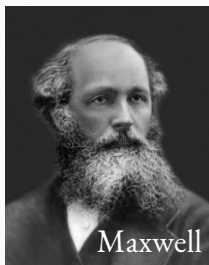
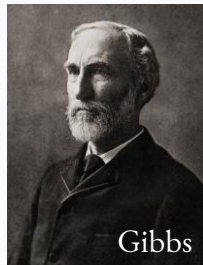




# La physique statistique

---

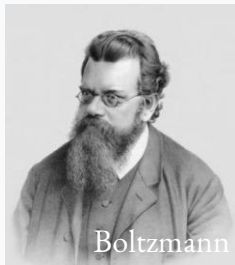
19e siècle



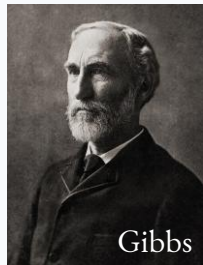


# La physique statistique

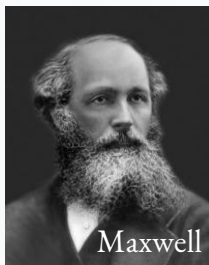
19e siècle



Boltzmann



Gibbs



Maxwell



**Idée clé:** utiliser une  
approche **probabiliste**



“Quelle est la probabilité que l'énergie cinétique de mon gaz de  $N$  particules à température  $T$  soit égale à  $E$  ?”

$$\mathbb{P}(E) \propto e^{-E/T}$$

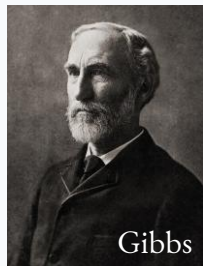


# La physique statistique

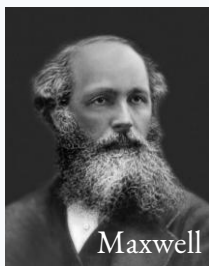
19e siècle



Boltzmann



Gibbs



Maxwell



**Idée clé:** utiliser une approche **probabiliste**



“Quelle est la probabilité que l'énergie cinétique de mon gaz de  $N$  particules à température  $T$  soit égale à  $E$  ?”

$$\mathbb{P}(E) \propto e^{-E/T}$$

Lois microscopiques **+** Très grand nombre de particules



Comportement **macroscopique**  
**prédictible**, lois simples.

Loi des grands nombres

Théorème central limite

Concentration de la mesure

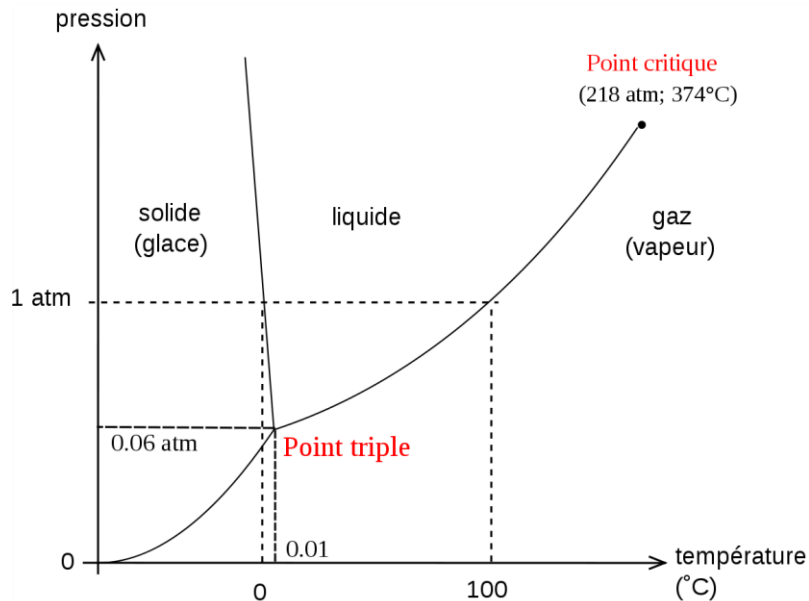
$$\frac{\Delta E}{\langle E \rangle} \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$$

...

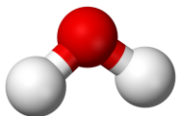
- Caractérisé par un petit nombre de quantités **macroscopiques**  
Variables d'état: densité, température, pression, ...
- Phénomènes **émergents** quand  $N \rightarrow \infty$   
Transitions de phases, ...
- Approche **très générale**  
Physique, informatique, économie, biologie, ...



# Transitions de phase: physique...

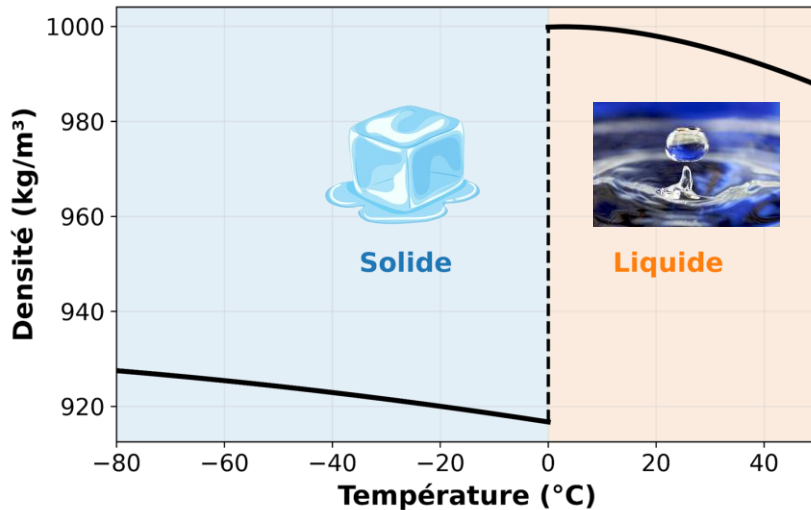
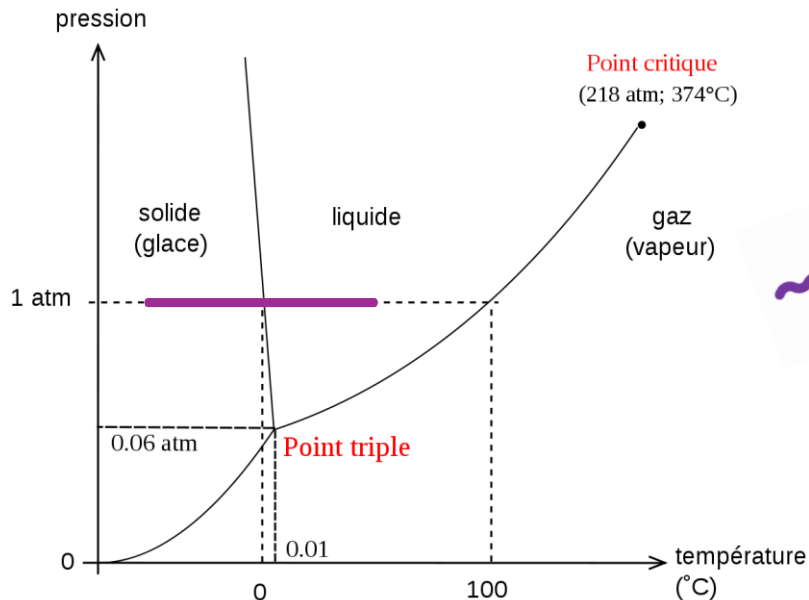


La molécule ne change pas !

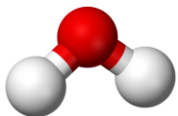




# Transitions de phase: physique...



La molécule ne change pas !



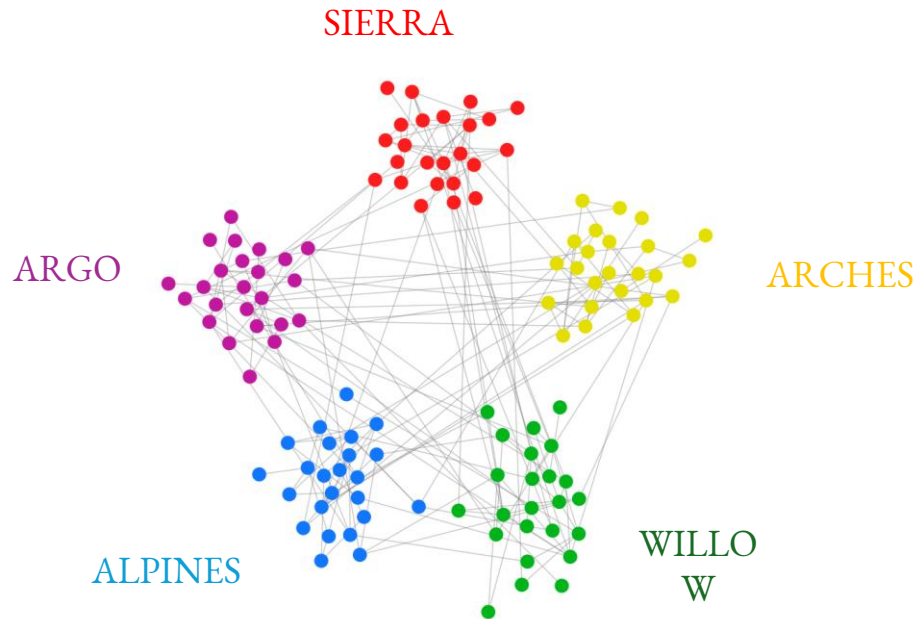
- **Changement brutal** des propriétés physiques
- Comportement émergent quand le **nombre de molécules est très grand**  $N_{\text{Avogadro}} \sim 6 \cdot 10^{23}$



# Transitions de phase: ... et informatique

---

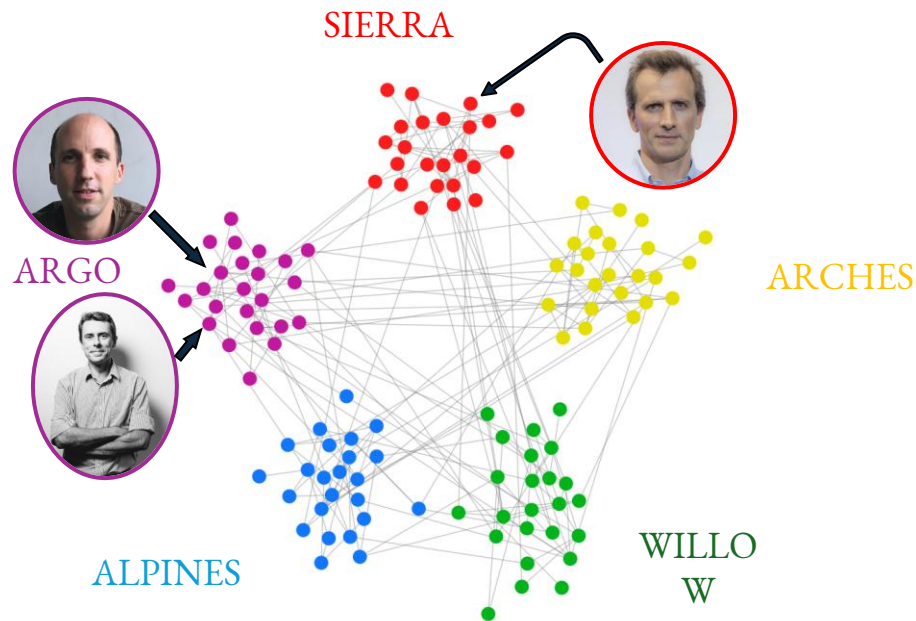
— : collaboration





# Transitions de phase: ... et informatique

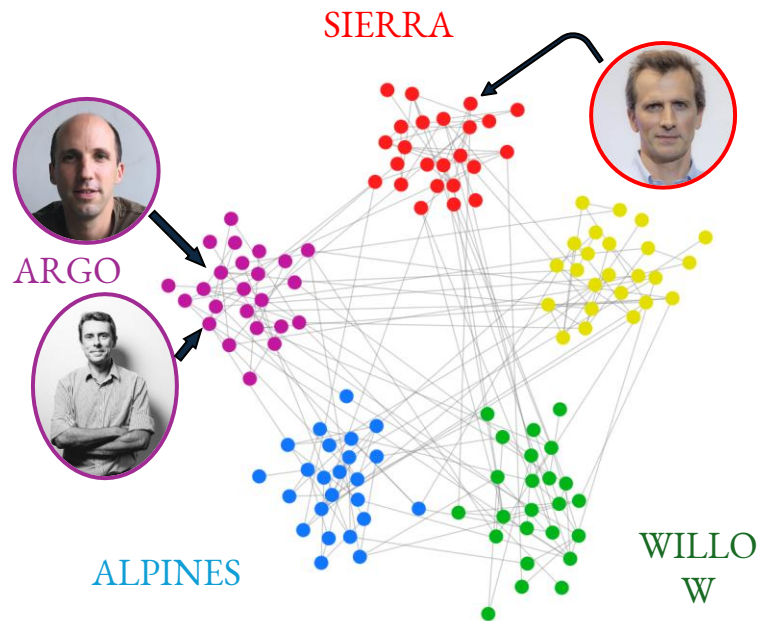
— : collaboration





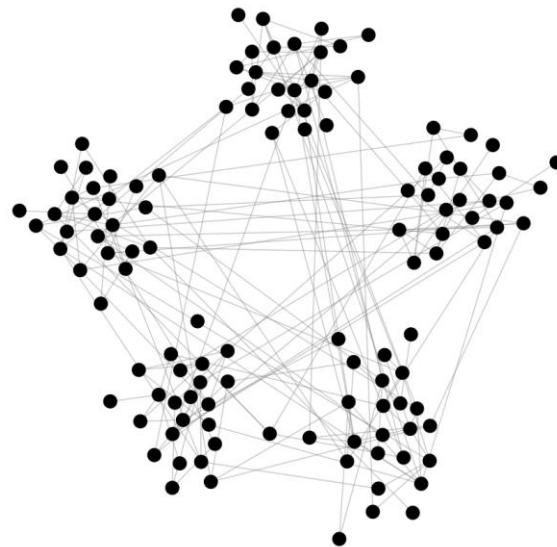
# Transitions de phase: ... et informatique

— : collaboration



Reconstruis les équipes !

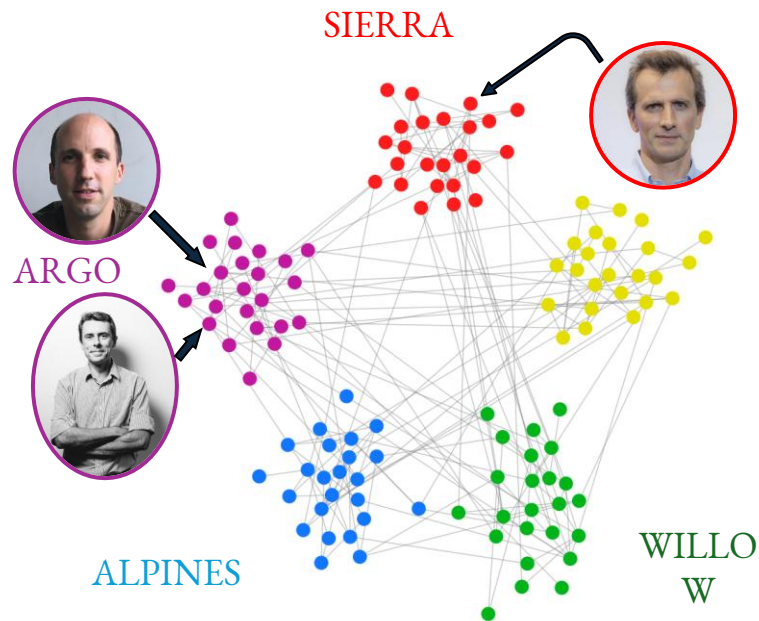
ARCHES





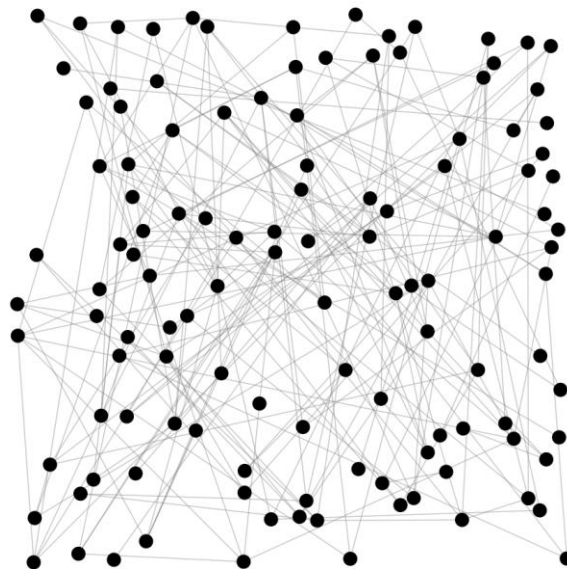
# Transitions de phase: ... et informatique

— : collaboration



Reconstruis les équipes !

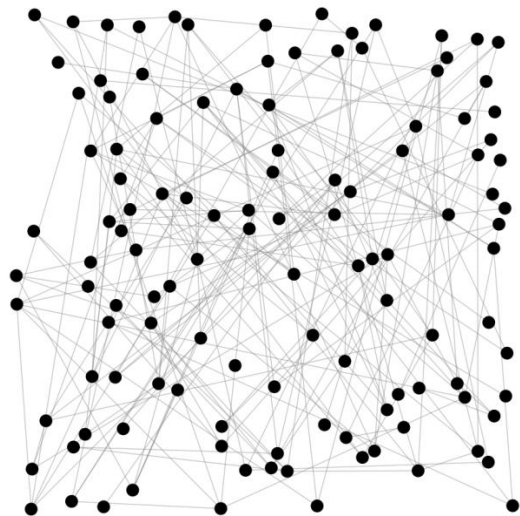
ARCHES





# Transitions de phase: ... et informatique

---



## Reconstruire les équipes

- Est-ce que c'est possible ?
- Avec un algorithme efficace ?

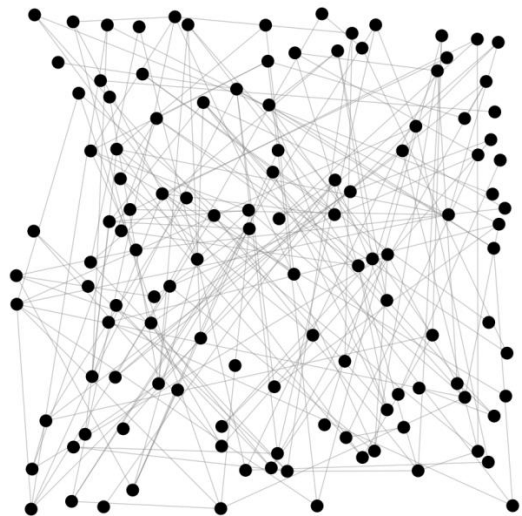
## Applications:

- Détection de communauté sur des réseaux
- Clustering (partitionnement) de données
- ...



# Transitions de phase: ... et informatique

---



## Reconstruire les équipes

- Est-ce que c'est possible ?
- Avec un algorithme efficace ?

### Applications:

- Détection de communauté sur des réseaux
- Clustering (partitionnement) de données
- ...

**Créons un  
modèle simple !**



# Transitions de phase: ... et informatique

---

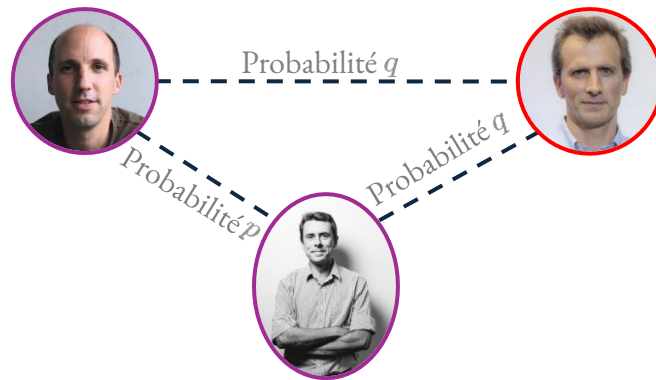
“Stochastic Block  
Model”



# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :





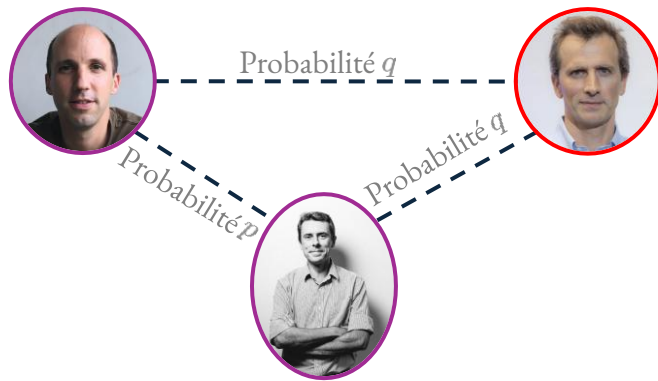
# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :

“Les membres d’une même équipe sont plus susceptibles de collaborer”

$$q < p$$





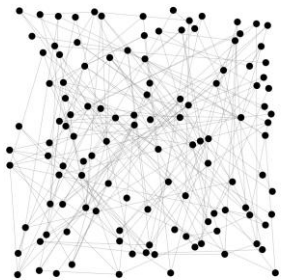
# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

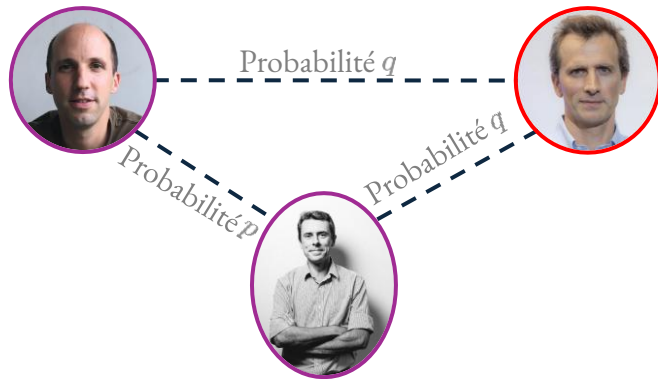
1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :

“Les membres d’une même équipe sont plus susceptibles de collaborer”

$$q < p$$



Possible de retrouver les équipes ?





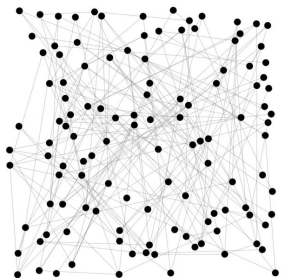
# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

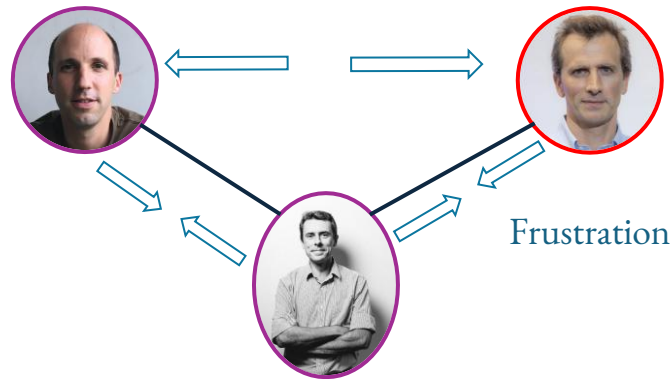
1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :

“Les membres d’une même équipe sont plus susceptibles de collaborer”

$$q < p$$



Possible de retrouver les équipes ?





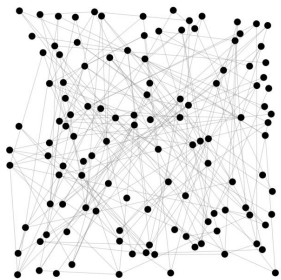
# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :

“Les membres d’une même équipe sont plus susceptibles de collaborer”

$$q < p$$



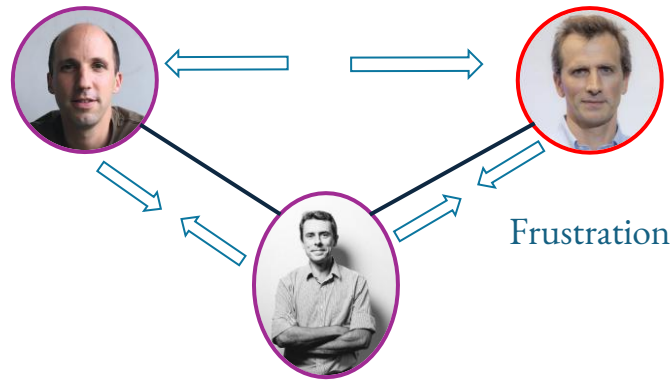
Possible de retrouver les équipes ?

T. Bayes



## Stratégie optimale (limite théorique)

1. Regarder tous les choix possibles ( $\# \text{équipes}$ )<sup>N</sup>
2. Faire la moyenne pondérée à un poids  $e^{-E/T}$



$$\begin{aligned} \frac{E}{1} &\longleftrightarrow \text{Frustration} \\ \frac{1}{T} &\longleftrightarrow p - q \end{aligned}$$



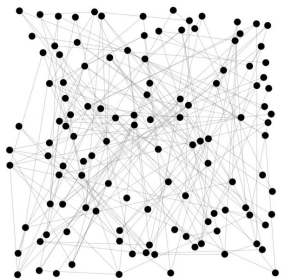
# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :

“Les membres d’une même équipe sont plus susceptibles de collaborer”

$$q < p$$



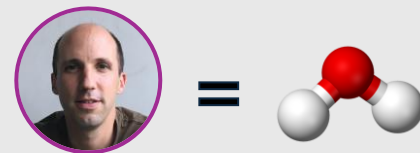
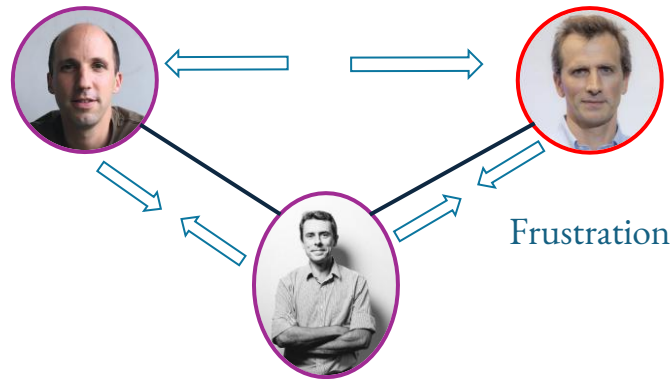
Possible de retrouver les équipes ?

T. Bayes



## Stratégie optimale (limite théorique)

1. Regarder tous les choix possibles ( $\# \text{équipes}$ )<sup>N</sup>
2. Faire la moyenne pondérée à un poids  $e^{-E/T}$



- “Energie” :  $\frac{E}{1} \longleftrightarrow$  Frustration
- “Température” :  $\frac{1}{T} \longleftrightarrow p - q$
- Nombre de chercheurs  $N \gg 1$



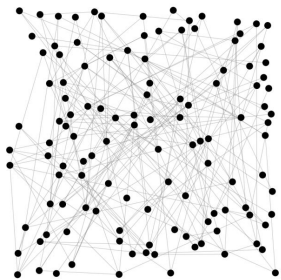
# Transitions de phase: ... et informatique

“Stochastic Block Model”

1. Même nombre de chercheurs dans chaque équipe
2. Pour chaque paire de chercheurs, on tire au hasard :

“Les membres d’une même équipe sont plus susceptibles de collaborer”

$$q < p$$



Possible de retrouver les équipes ?

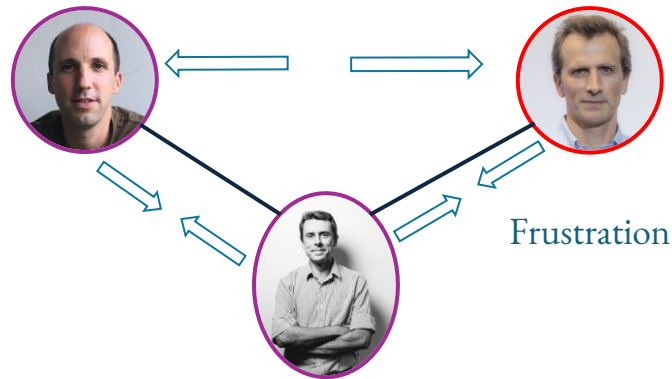
T. Bayes



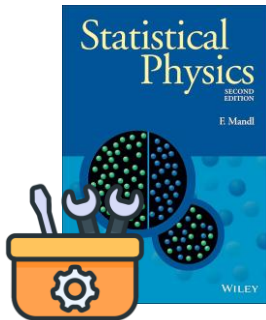
**Stratégie optimale (limite théorique)**

1. Regarder tous les choix possibles ( $\# \text{équipes}$ )<sup>N</sup>
2. Faire la moyenne pondérée à un poids  $e^{-E/T}$

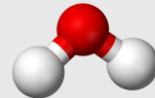
**= Equilibre thermique**



Frustration



=

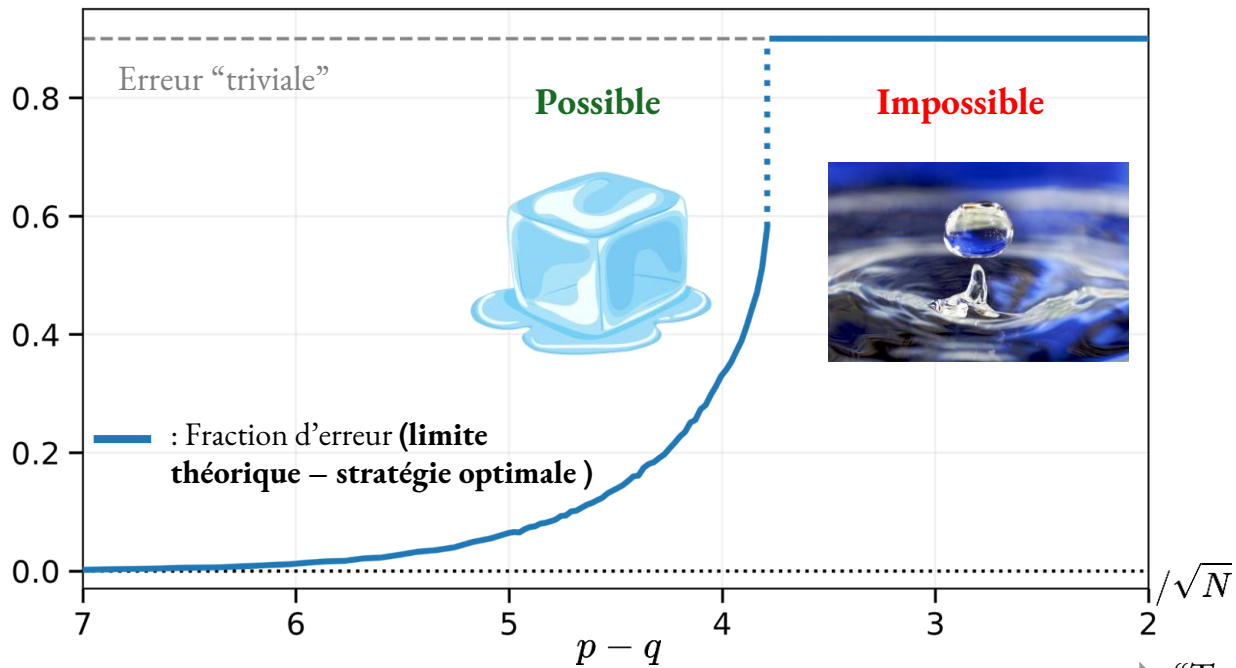


- “Energie” :  $\frac{E}{1} \longleftrightarrow$  Frustration
- “Température” :  $\frac{1}{T} \longleftrightarrow p - q$
- Nombre de chercheurs  $N \gg 1$



# Transitions de phase: ... et informatique

10 équipes,  $q = 0.25$



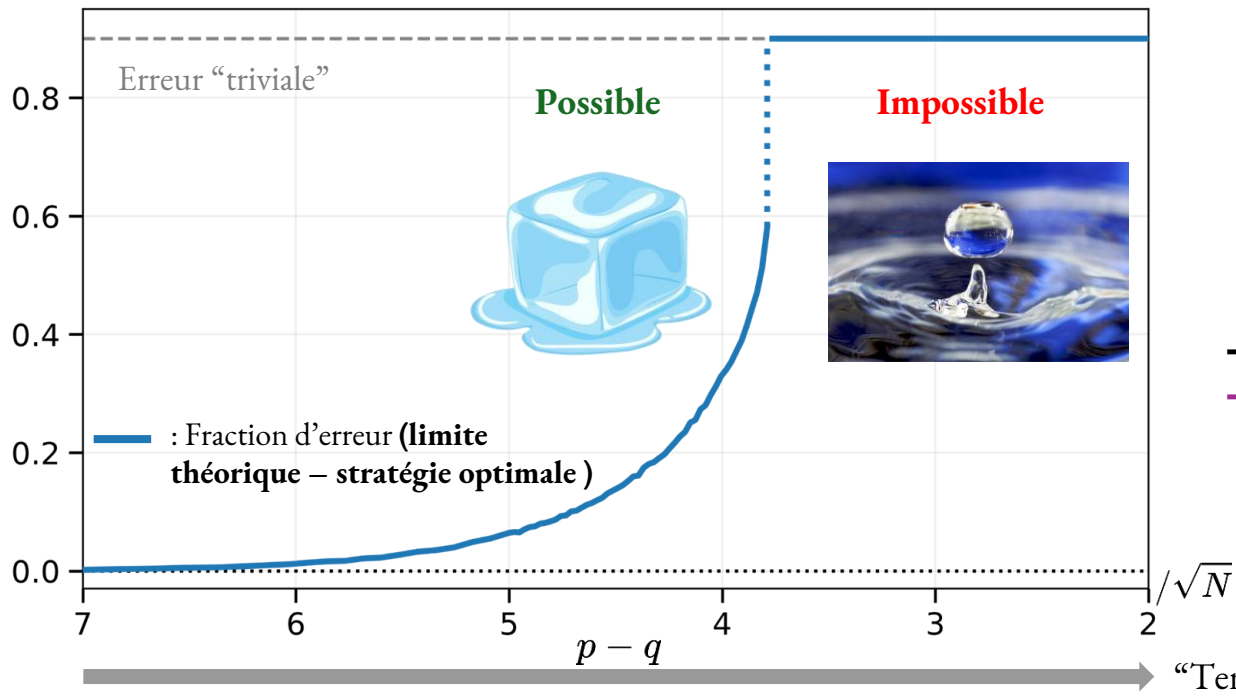
Une transition de phase !!

“Température”



# Transitions de phase: ... et informatique

10 équipes,  $q = 0.25$



Une transition de phase !!

Reconstruire les équipes

- Est-ce que c'est possible ? ☒
- Avec un algorithme efficace ?  
"efficace" = temps polynomial en  $N$



# Métastabilité: surfusion...

---



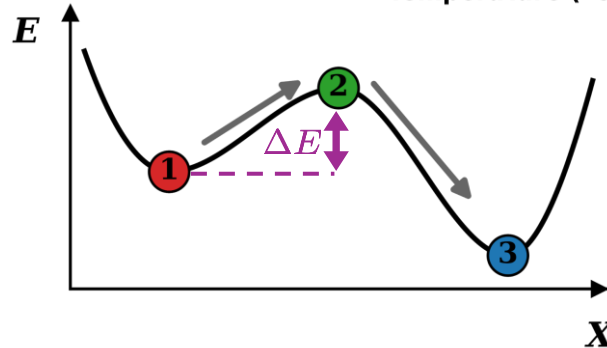
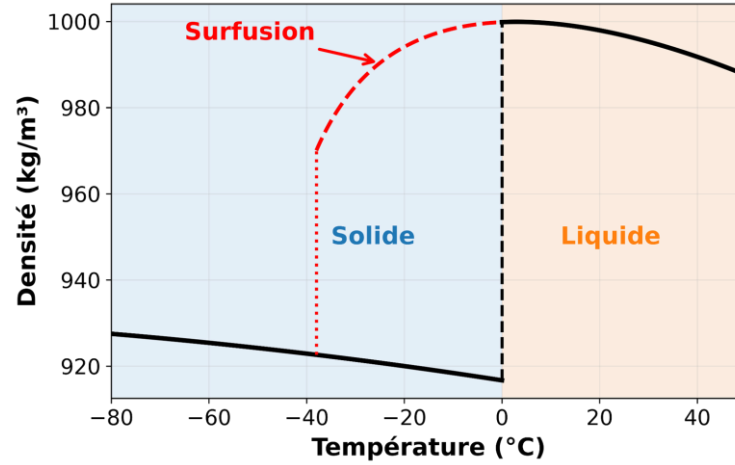
# Métastabilité: surfusion...

---





# Métastabilité: surfusion...



$$\tau_{1 \rightarrow 3} \propto e^{\frac{\Delta E}{T}}$$

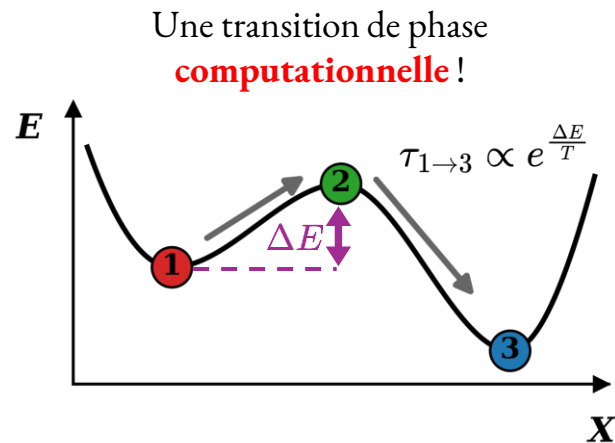
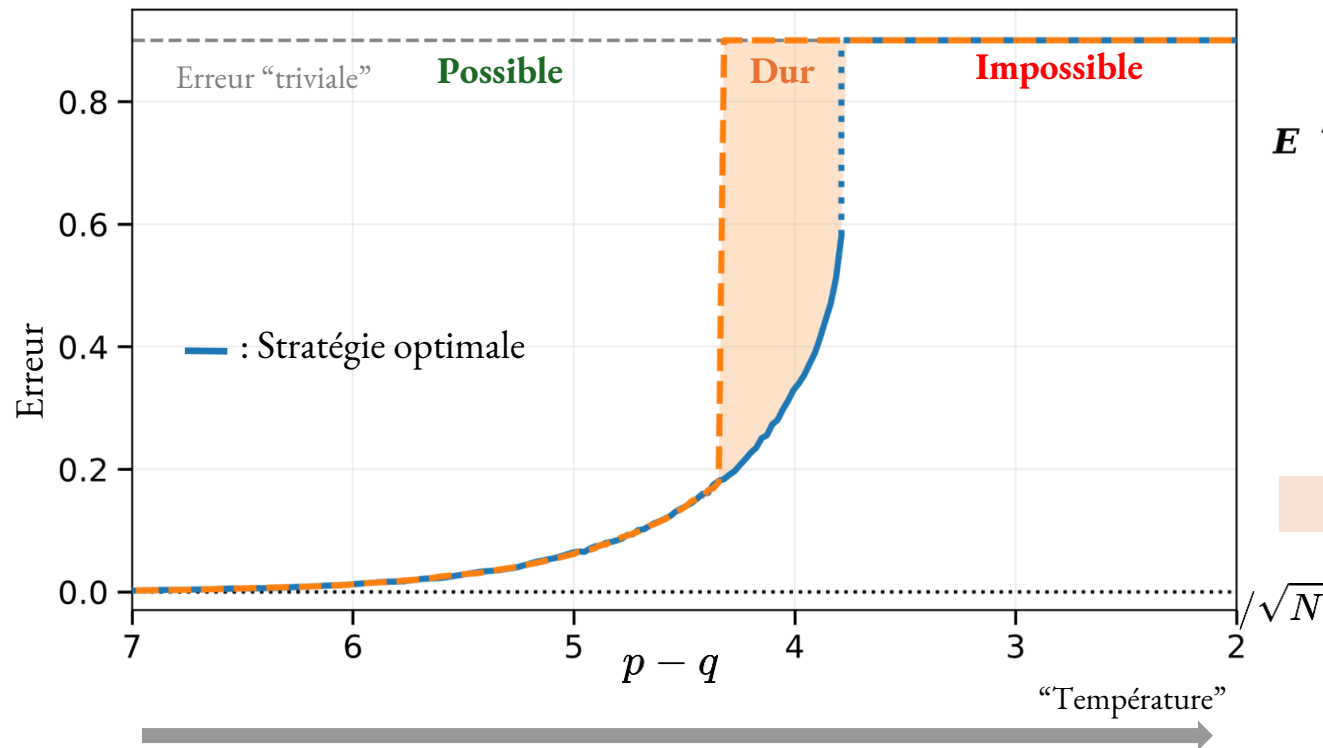


Loi  
d'Arrhenius  
(1889)



# Métastabilité: ... et algorithmes

10 équipes,  $q = 0.25$

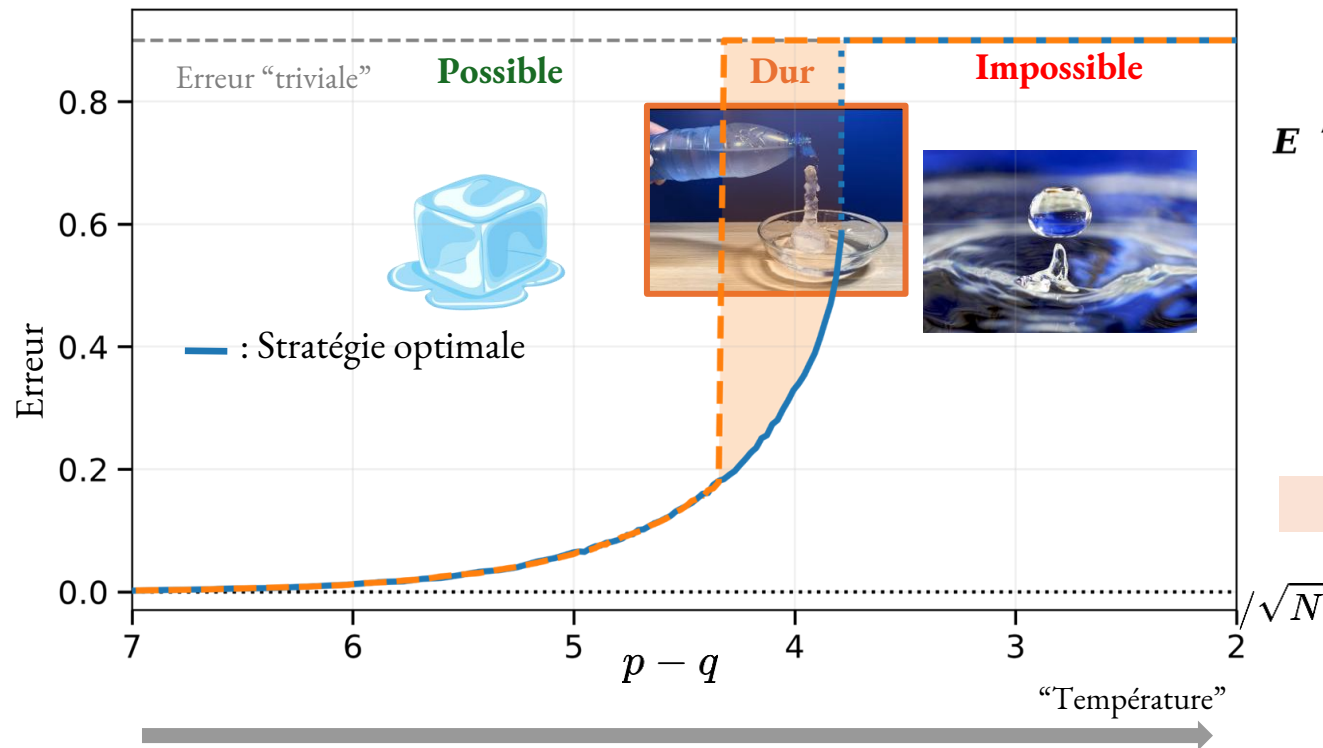


Orange box: Métastabilité; "Phase dure"  
Algorithms "bloqués" pour un temps exponentiel en  $N$

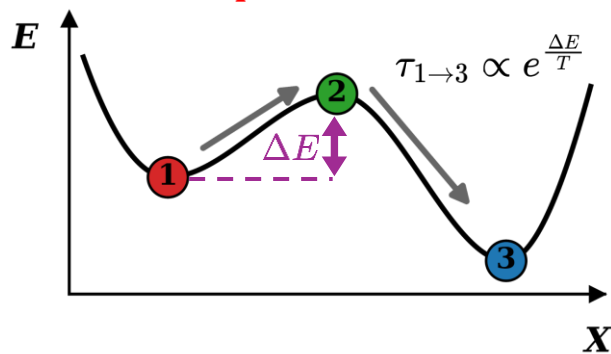


# Métastabilité: ... et algorithmes

10 équipes,  $q = 0.25$



Une transition de phase  
**computationnelle!**



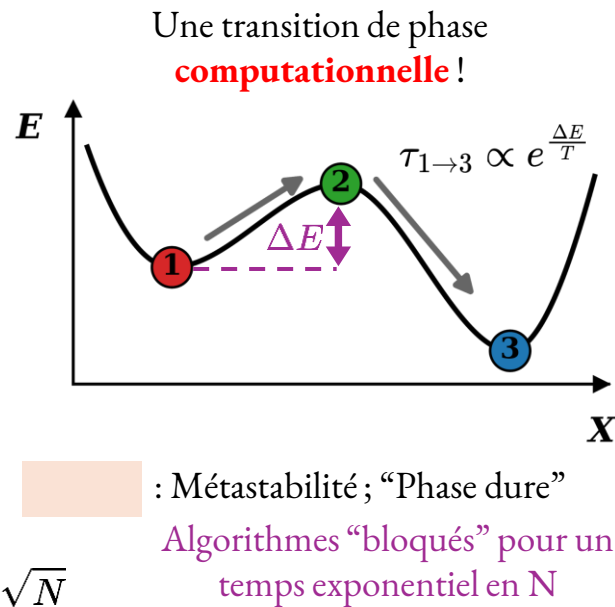
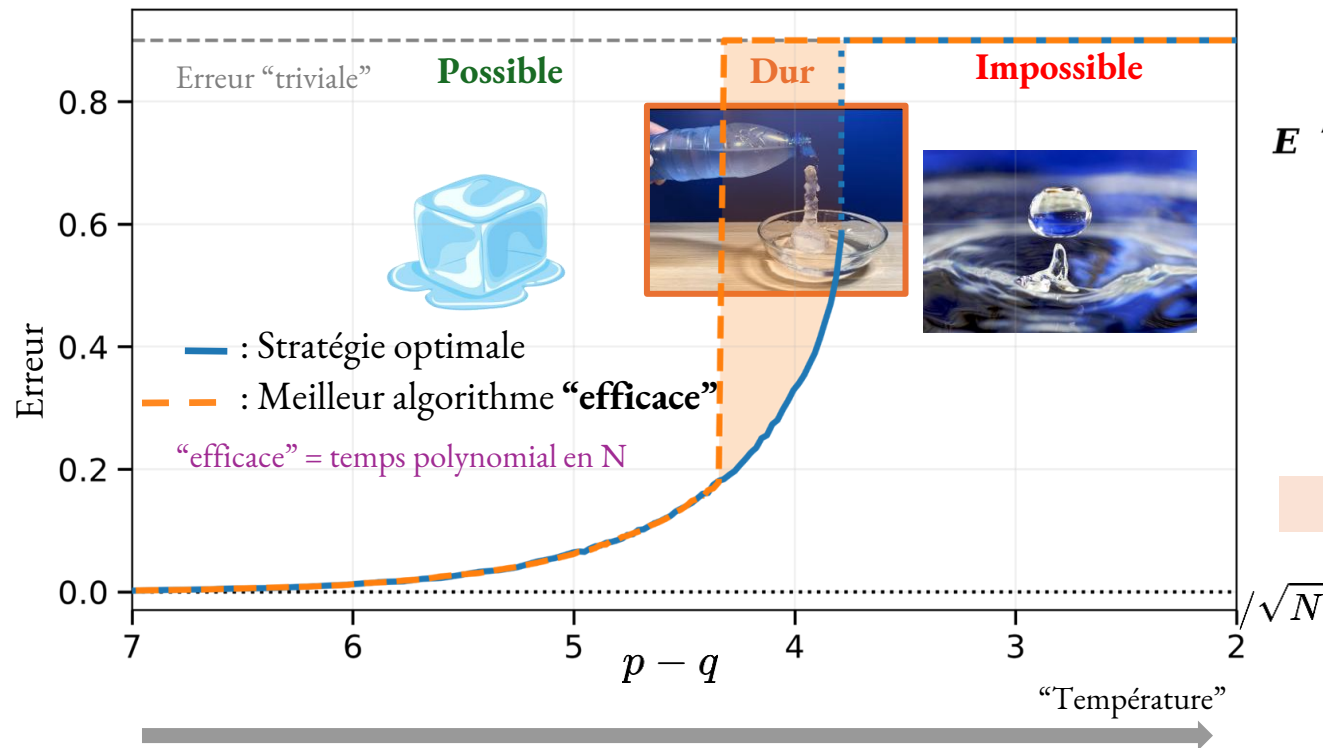
: Métastabilité; "Phase dure"

Algorithmes "bloqués" pour un  
temps exponentiel en  $N$



# Métastabilité: ... et algorithmes

10 équipes,  $q = 0.25$





# Théorie physique de l'apprentissage machine ?

---



# Théorie physique de l'apprentissage machine ?

---

Physique du **frigo** ?



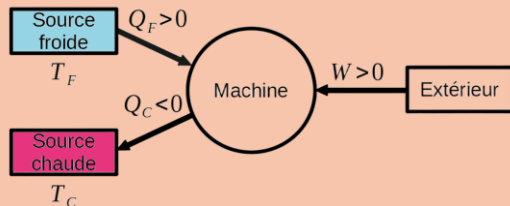


# Théorie physique de l'~~apprentissage machine~~ ?

Physique du frigo ?



Physique

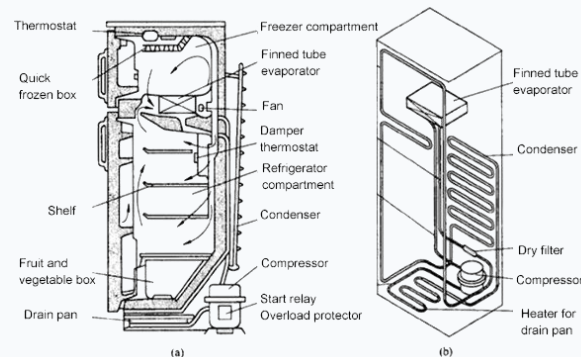


Lois fondamentales de la thermodynamique



Ingénierie

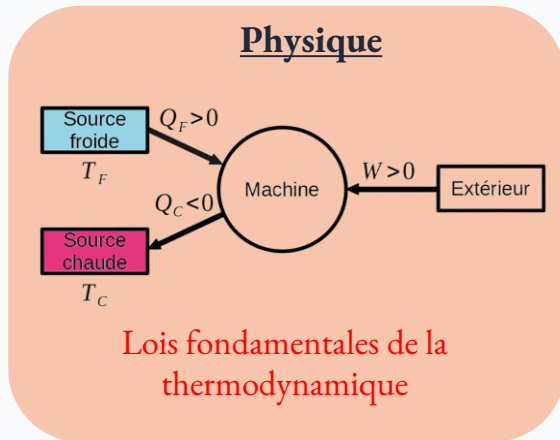
Comment construire un bon frigo ?





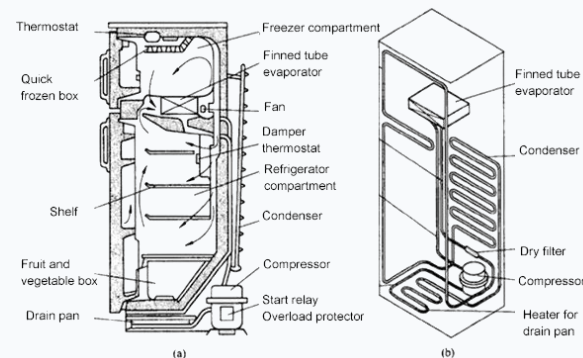
# Théorie physique de l'apprentissage machine ?

Physique du frigo ?

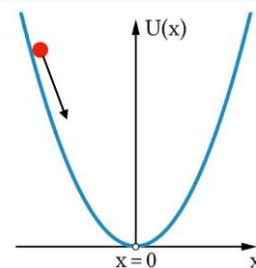


**Ingénierie**

Comment construire un bon frigo ?



Oscillateur harmonique



Simplification



Inexactitude

Machine/phénomène  
complexe



Modèles simplifiés, résolubles  
mathématiquement, pour  
expliquer un phénomène donné



# Une théorie de l'apprentissage machine ?

---



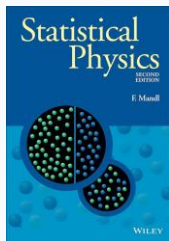
*There Will Be a Scientific Theory of Deep Learning, J. Simon & al (2026)*

# Une théorie de l'apprentissage machine ?

Très grands modèles



Beaucoup de données



Machine/phénomène  
complexe



Modèles simplifiés, résolubles  
mathématiquement, pour  
expliquer un phénomène donné

*There Will Be a Scientific Theory of Deep Learning, J. Simon & al (2026)*

“Physique”

Lois fondamentales de  
l'apprentissage machine ?

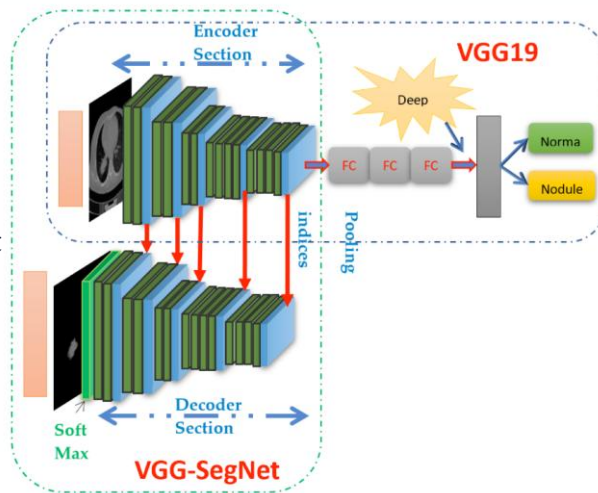


Ingénierie

Comment  
construire/entraîner un  
réseau de neurones résolvant  
au mieux mon problème ?

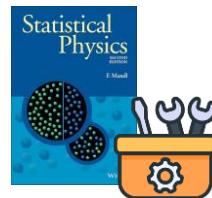


ChatGPT



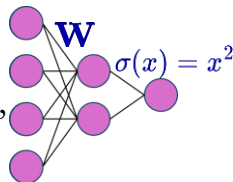


# Un “diagramme de phase”

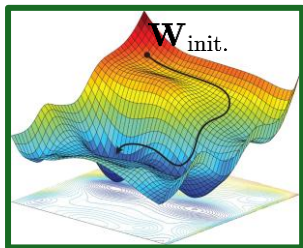


M., Bonnaire & Biroli (2026)

- Réseau à une couche
- Données “synthétiques”



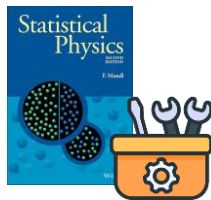
## Algorithme d'apprentissage supervisé



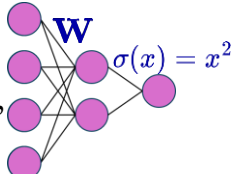
“Minimiser l’erreur sur les données d’entraînement”



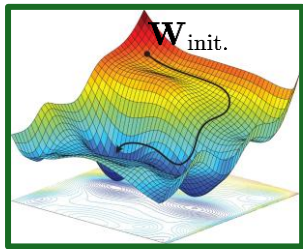
# Un “diagramme de phase”



M., Bonnaire & Biroli (2026)

- Réseau à une couche
  - Données “synthétiques”
- 

## Algorithme d'apprentissage supervisé



“Minimiser l’erreur sur les données d’entraînement”

Performance de généralisation de  $\mathbf{W}_{\text{init.}}$

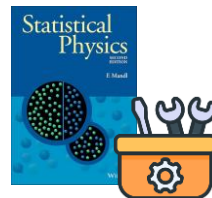
Géométrie du “paysage” d’optimisation



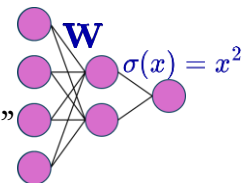
$\frac{\# \text{données}}{\# \text{paramètres}}$



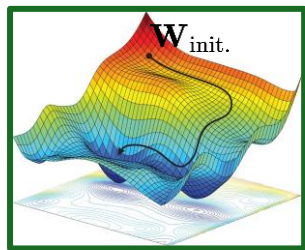
# Un “diagramme de phase”



M., Bonnaire & Biroli (2026)

- Réseau à une couche
  - Données “synthétiques”
- 

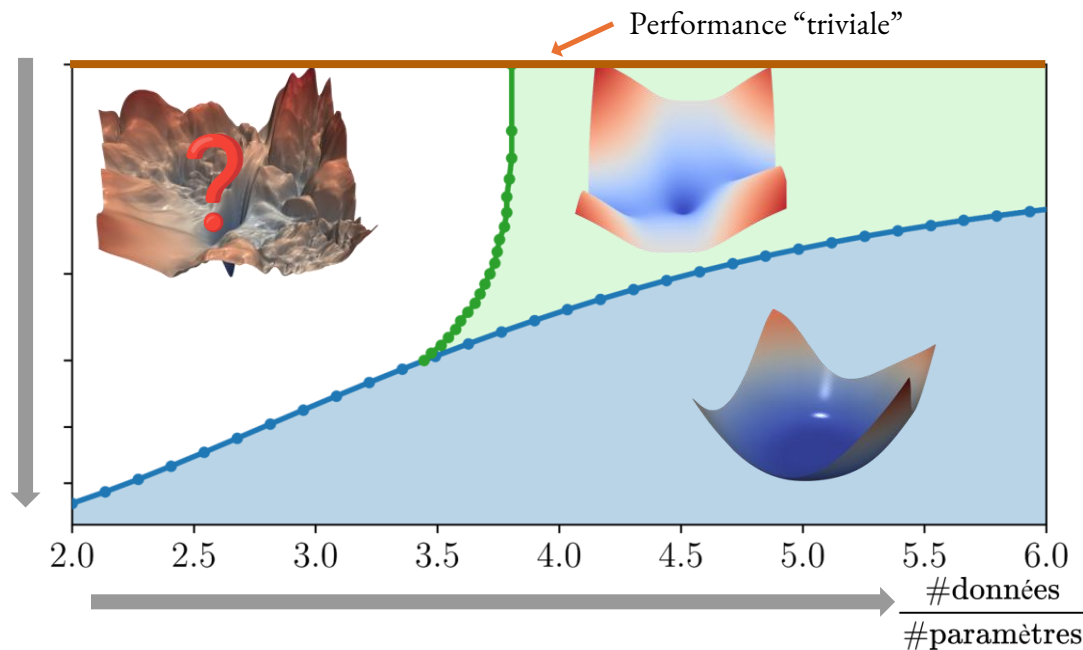
## Algorithme d'apprentissage supervisé



“Minimiser l’erreur sur les données d’entraînement”

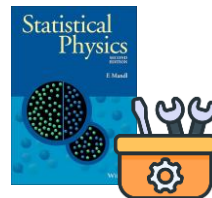
Performance de généralisation de  $\mathbf{W}_{\text{init.}}$

Géométrie du “paysage” d’optimisation

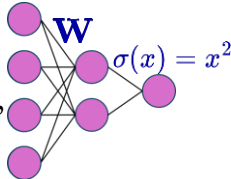




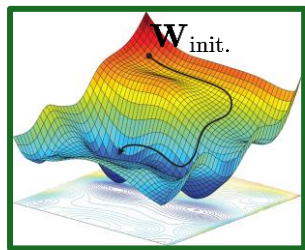
# Un “diagramme de phase”



M., Bonnaire & Biroli (2026)

- Réseau à une couche
  - Données “synthétiques”
- 

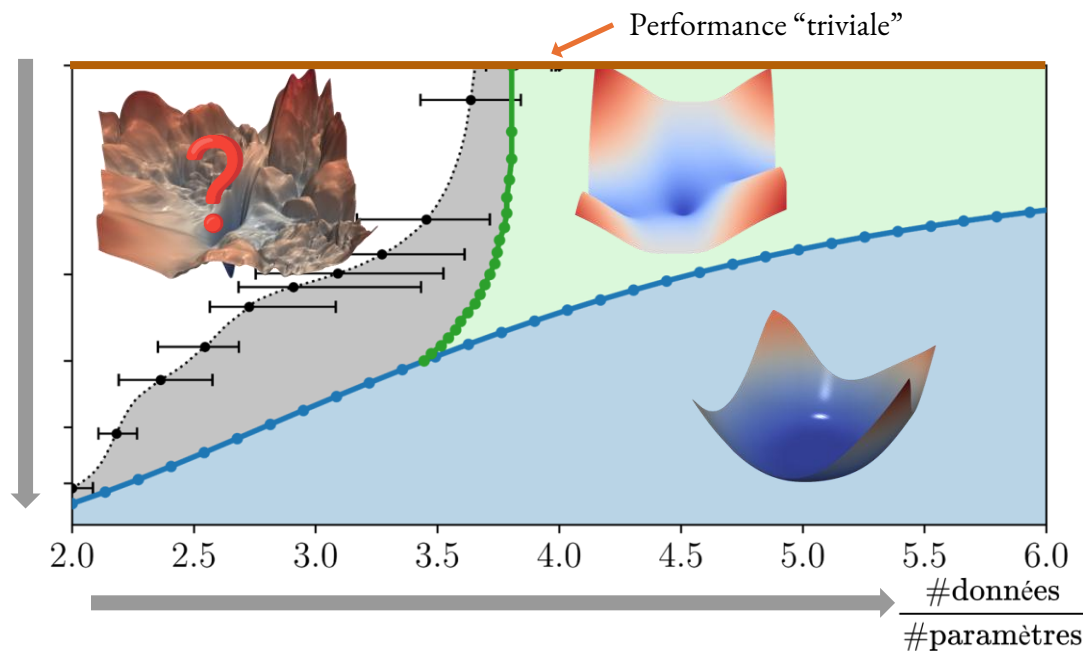
## Algorithme d'apprentissage supervisé



“Minimiser l’erreur sur les données d’entraînement”

Performance de généralisation de  $\mathbf{W}_{\text{init.}}$

Géométrie du “paysage” d’optimisation



(Expériences) : L’apprentissage marche aussi dans cette région !





# Quelques (autres) exemples...

## Modèles de diffusion

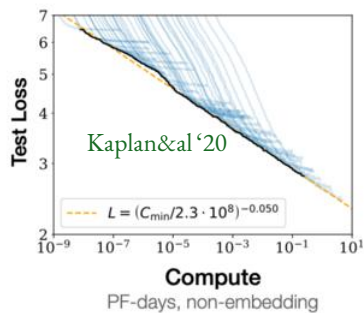


- Généralisation/mémorisation    Biroli&al '24, Bonnaire&al '25, Goldt&M. '26, ...
- Dynamique du débruitage

## Lois d'échelles

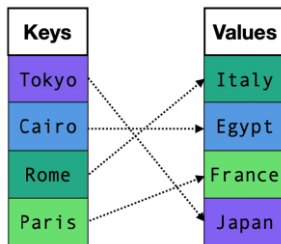
Émergence à partir de séquences de transitions de phases

Ren&al '25 ; Defilippis, K., L., M.&al '26; Barbier&al '26; Ben Arous&al '25, ...



## Modèles de langage

- Mémoires associatives (récupération de faits)
- Compétition sémantique ↔ positionnel
- ...



Cui&al '24, Cabannes&al '25, Giorlandino, G.&M. '26, ...

**Et beaucoup,  
beaucoup, d'autres...**

