

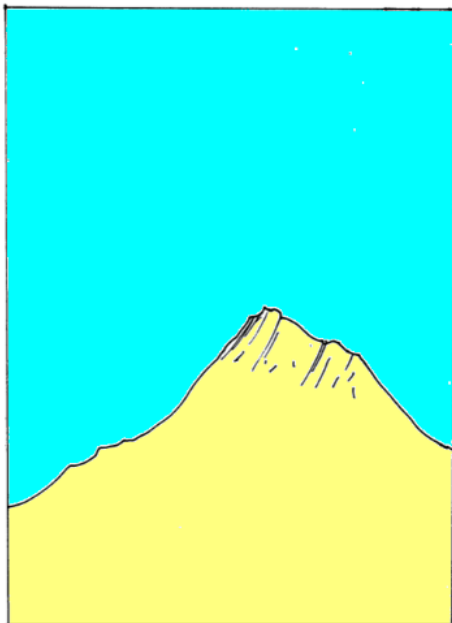
CORRÉLATIONS

PLAN

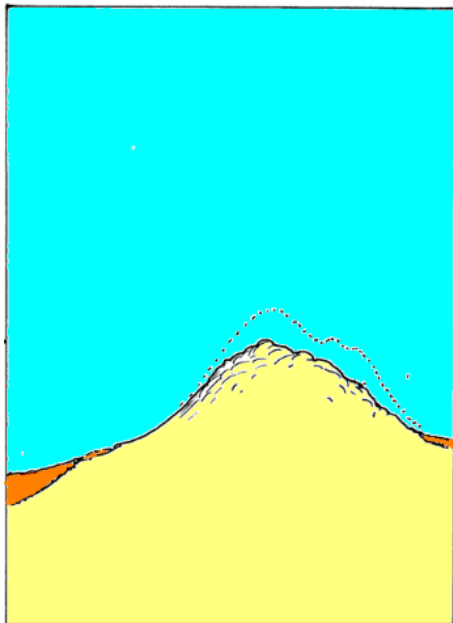
- ➔ Équilibre Thermodynamique
- ➔ Aimantation
- ➔ Frustration
- ➔ Corrélations classiques / quantiques

LA FLÈCHE DU TEMPS

FORCE DE GRAVITÉ



FORCE DE GRAVITÉ



GRAVITÉ

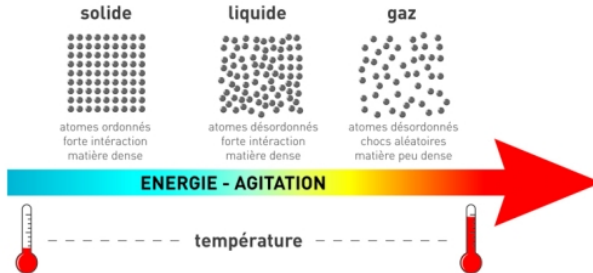




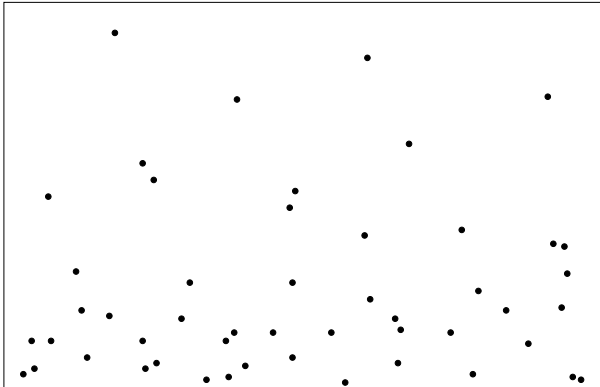
EXISTENCE D'UN ÉTAT D'ÉQUILIBRE

Équilibre entre la gravité et l'agitation thermique

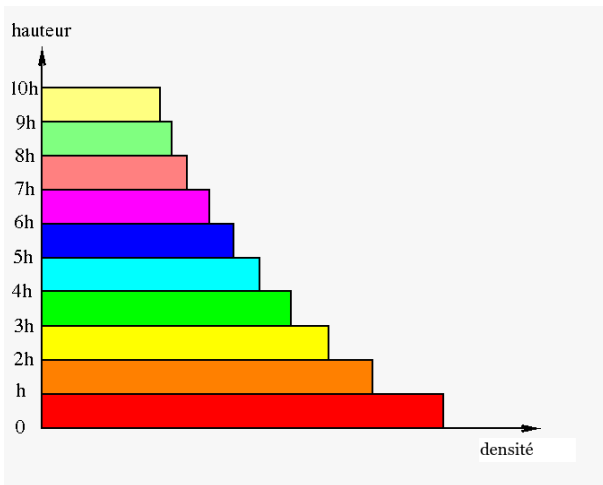
AGITATION THERMIQUE



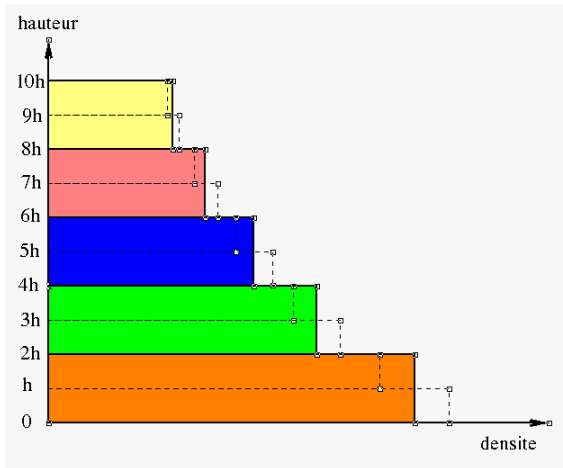
RÉPARTITION SCHEMATIQUE DES PARTICULES D'UN GAZ SOUMIS À LA GRAVITÉ



DISTRIBUTION STATISTIQUE

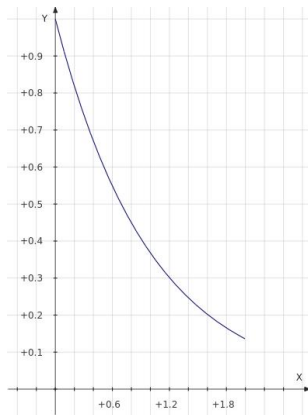


COMMENT DÉCOUPER LES TRANCHES ?



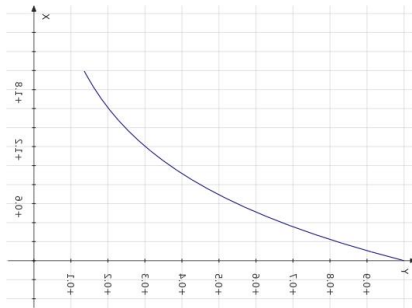
QUELLE FONCTION ?

EXPONENTIELLE



$$y = e^{-x}$$

EXPONENTIELLE



- $y \rightarrow$ densité
- $x \rightarrow$ hauteur

$$\text{densité} \simeq e^{-\text{hauteur}}$$

FACTEUR DE BOLTZMANN

$$\text{densité(hauteur)} = \frac{1}{Z} e^{-\frac{\text{Énergie(hauteur)}}{\text{Énergie de référence}}}$$

Modèle très général appelé « PHYSIQUE STATISTIQUE »

Elle dit que le comportement macroscopique de la matière peut s'expliquer simplement par un comportement aléatoire des particules qui la constitue.

Comme il y a beaucoup de ces particules, ils obéissent à la
« Loi des grands nombres »

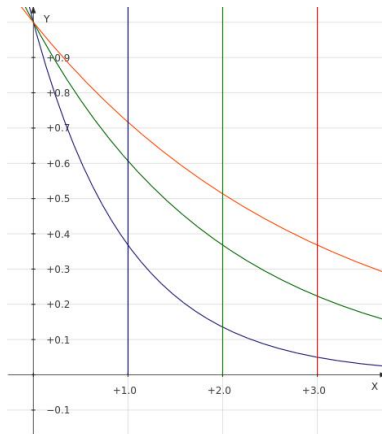
ÉNERGIE POTENTIELLE D'UNE PARTICULE À UNE CERTAINE HAUTEUR

$$E_p(\text{hauteur}) = \text{masse} \times g \times \text{hauteur}$$

ÉNERGIE DE RÉFÉRENCE : TEMPÉRATURE

$$E_{\text{référence}} = k \times \text{Température}$$

RÔLE DE LA TEMPÉRATURE

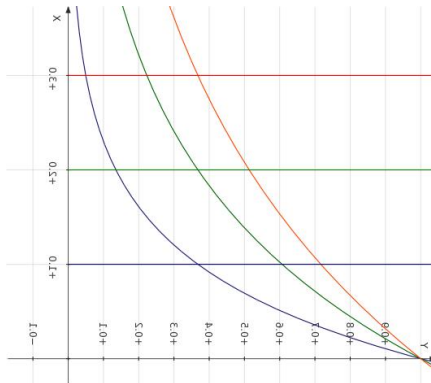


① $y = e^{-x}$

② $y = e^{-\frac{x}{2}}$

③ $y = e^{-\frac{x}{3}}$

RÔLE DE LA TEMPÉRATURE



1 $y = e^{-x}$

2 $y = e^{-\frac{x}{2}}$

3 $y = e^{-\frac{x}{3}}$

« NORMALISATION »

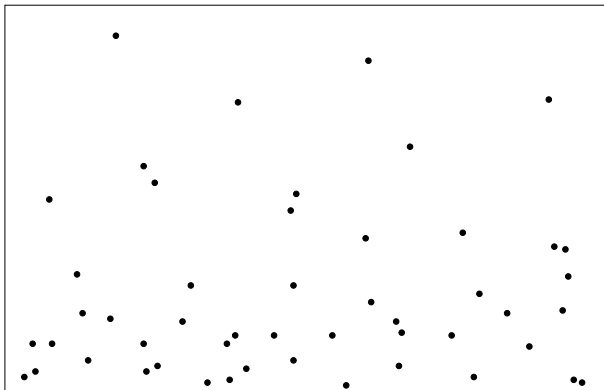
$$Z = ???$$

$$\sum_H \text{densité}(H) = \text{Nombre total de particules}$$

$$\int \text{densité}(z) \, dz = \text{Nombre total de particules}$$

$$\frac{1}{Z} \times \int e^{-\frac{Mgz}{kT}} \, dz = \text{Nombre total de particules}$$

GAZ DE BOLTZMANN



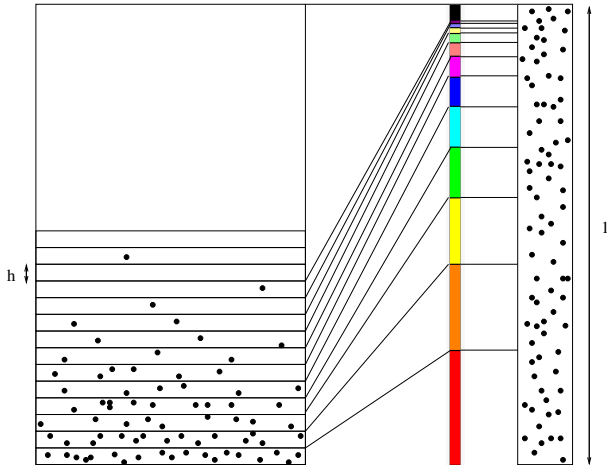
$$\text{densité(H)} = \frac{1}{Z} e^{-\frac{MgH}{kT}}$$

COMMENT SIMULER LA DISTRIBUTION ?

COMMENT SIMULER LA DISTRIBUTION ?

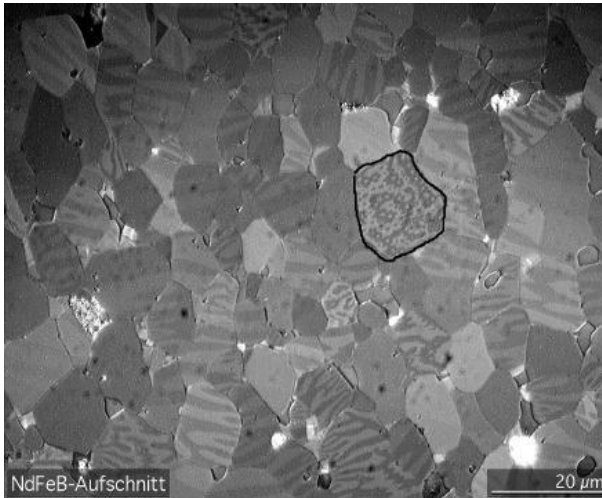


COMMENT SIMULER LA DISTRIBUTION ?



FERROMAGNÉTISME

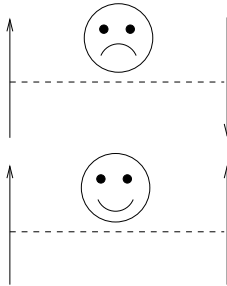
FERROMAGNÉTISME



➔ « NdFeB - Domains » par Gorchy - Travail personnel. Sous licence CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons - [https://upload.](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/NdFeB-Domains.jpg)

[wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/NdFeB-Domains.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/NdFeB-Domains.jpg)

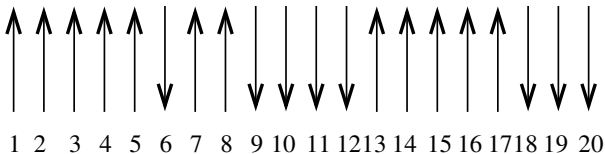
MODÈLE DU FERROMAGNÉTISME



Équilibre statistique entre

- ❶ la force magnétique qui aligne les spins dans le même sens
- ❷ l'agitation thermique
 - ➔ modèle aléatoire microscopique avec probabilités

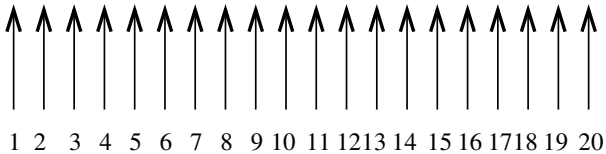
DOMAINES MAGNÉTIQUES



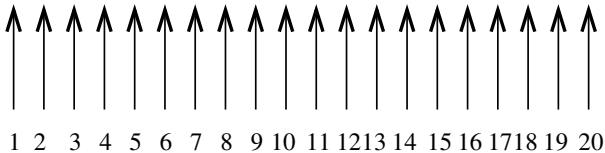
- ❶ $\text{Proba}(\uparrow\uparrow) = \text{Proba}(\downarrow\downarrow) = \frac{p}{2}$
- ❷ $\text{Proba}(\uparrow\downarrow) = \text{Proba}(\downarrow\uparrow) = \frac{1-p}{2}$
- ❸ $\text{Proba}(\text{même sens}) = p$
- ❹ $\text{Proba}(\text{sens opposé}) = 1 - p$

DOMAINES MAGNÉTIQUES

configuration 1



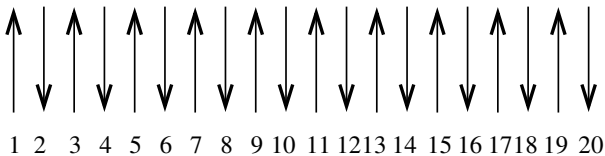
DOMAINES MAGNÉTIQUES
configuration 1



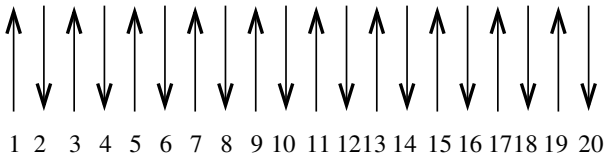
$$\text{Proba}(\text{configuration 1}) = p^{19}$$

DOMAINES MAGNÉTIQUES

configuration 2



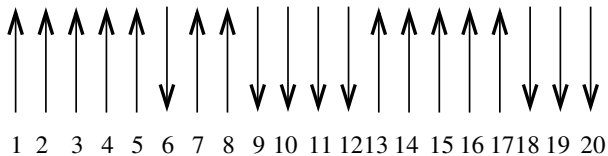
DOMAINES MAGNÉTIQUES
configuration 2



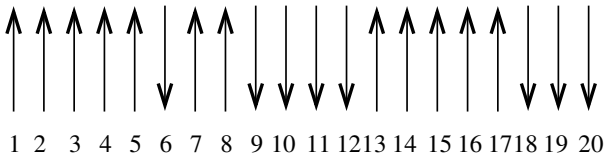
$$\text{Proba}(\text{configuration 2}) = (1 - p)^{19}$$

DOMAINES MAGNÉTIQUES

configuration 3



DOMAINES MAGNÉTIQUES
configuration 3



$$\text{Proba}(\text{configuration 3}) = p^5(1 - p)^{14}$$

ÉNERGIE ET TEMPÉRATURE

- ① Énergie ϵ
- ② Température T

$$p = \frac{1}{Z} e^{+\frac{\epsilon}{kT}}$$

$$1 - p = \frac{1}{Z} e^{-\frac{\epsilon}{kT}}$$

$$Z = e^{+\frac{\epsilon}{kT}} + e^{-\frac{\epsilon}{kT}}$$

$$kT = 2\epsilon \frac{1}{\ln \frac{p}{1-p}}$$

POIDS STATISTIQUE DES CONFIGURATIONS

$$\text{Proba}(k \text{ paires de meme sens}) = p^k (1 - p)^{N-k}$$

$$\text{Proba}(k \text{ paires de meme sens}) = \frac{1}{Z^N} e^{k \frac{\epsilon}{kT} - (N-k) \frac{\epsilon}{kT}}$$

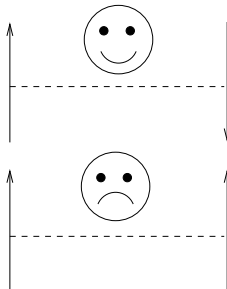
$$\text{Proba}(k \text{ paires de meme sens}) = \frac{1}{Z^N} e^{(2k-N) \frac{\epsilon}{kT}}$$

ÉNERGIE D'UNE CONFIGURATION

$$\text{Proba}(k \text{ paires de meme sens}) = \frac{1}{Z^N} e^{\frac{-(N-2k)\epsilon}{kT}}$$

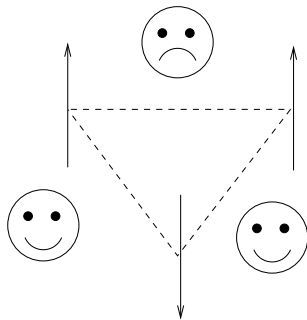
$$\text{Énergie} = (N - 2k)\epsilon$$

ANTIFERROMAGNÉTISME



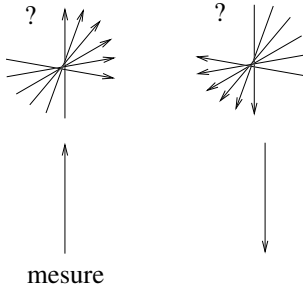
➡ la force magnétique aligne les spins dans le sens opposé

FRUSTRATION



COMMENT SE PROPAGE LA FORCE MAGNÉTIQUE ?

COMPORTEMENT QUANTIQUE



➡ instantanément synchronisés à grande distance (comme s'il n'y avait pas de distance)