

Transformations de Phases

Cours I: Introduction

Cyril Cayron

*Laboratoire de Métallurgie Thermo Mécanique
Institut des matériaux (LMTM)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*

Comment se situe ce cours dans votre plan d'étude?

Les cours que vous avez pris

Thermodynamics for materials science

MSE-204 / Section MX

Stellacci

Métaux et alliages

MSE-236 / Section MX

Mortensen

Structure of materials

MSE-238 / Section MX

Liebi, Sorin

Les cours que vous prenez cette année

Crystalline materials: structures and properties

MSE-306 / Section MX

Stolichnov

Déformations des matériaux

MSE-310 / Section MX

Logé

Introduction à la microscopie + TP

MSE-352 / Section MX

Cantoni, Hessler-Wyser

Transformations de phase

MSE-302 / Section MX

Cayron

Les cours que vous allez prendre

Advanced metallurgy

MSE-422 / Section MX

Leinenbach

Options:

Advanced phase transformations

MSE-483 / Section MX

Raju Natarajan

Electron microscopy: advanced methods

MSE-450 / Section MX

Alexander

Material science at large scale facilities

MSE-435 / Section MX

Liebi, Van Petegem

Contenu du cours

N° cours	Titre	N° cours	Titre
1	Introduction / Physique	8	Diffusion
2	Thermodynamique	9	Transformations diffusives
3	Diagrammes de phases	10	Cristallographie, espace réciproque
4	Germination	11	Transformations displacives, matrices
5	Solidification	12	Alliages à mémoire de forme
6	Dendrites	13	Martensite
7	Eutectiques / Péritectiques		

Bibliographie

Général:

- D.A. Porter, K.E. Easterling, M.Y. Sherif, “*Phase Transformations in Metals and Alloys*”, 3rd or 4th edition, CRC Press.
- A.H. Cottrell, “*Métallurgie structurale théorique*”

Solidification:

- W. Kurz, D.J. Fisher, “*Fundamentals of Solidification*”, 4th edition, Trans Tech Publications

Diffusion:

- H. Mehrer, “*Diffusion in Solids*”, Springer, 2007.

Transformations martensitiques:

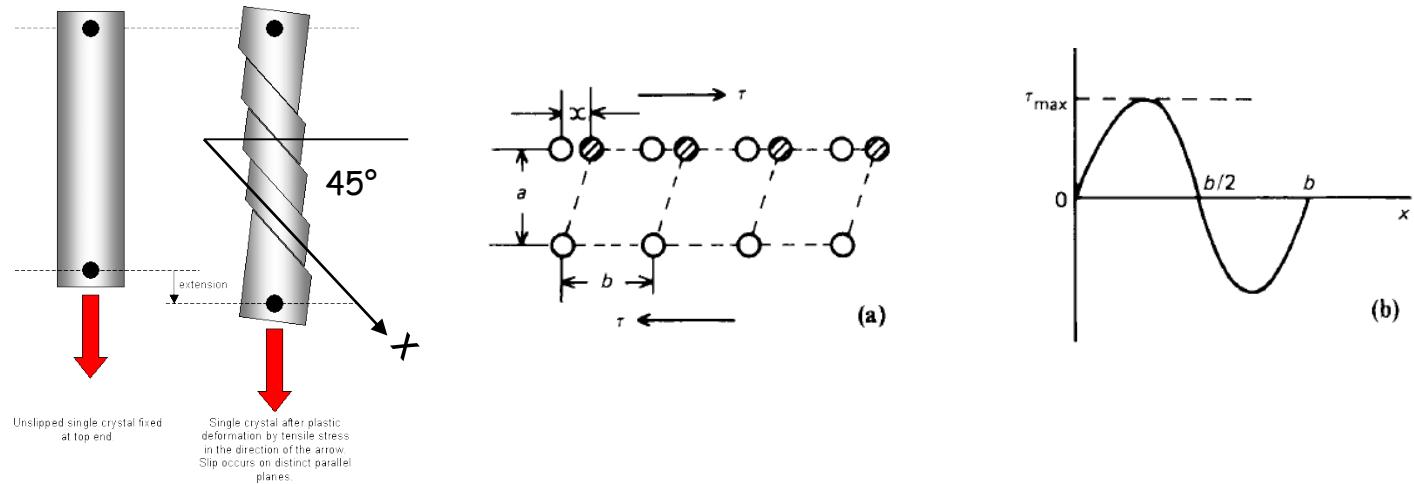
- Bhadeshia, H.K.D.H. “*Worked Examples in the Geometry of Crystals*”, 2nd ed.; The Institute of Metals: Brookfield, VT, USA, 1987.
- My own research.

A propos de votre enseignant

- 1992-1995: Ecole des Mines de Nancy (France). DEA en science des matériaux.
- 1996-2000 PhD thèse au EPFL-CIME sur la précipitation des alliages d'aluminium 2xxx et 6xxx.
- 2000-2014 Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (France). Ingénieur de recherche, microscopiste, suivi de projets, chef de groupe.
 - Alliages titane, aciers, aciers ODS.
 - Lignes d'interconnexion en cuivre pour la micro-électronique
 - *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFC), *Proton Exchange Membrane Fuel Cells* (PEMFC)
 - Silicium pour application PV: Nanofils de silicium, silicium en couche mince, silicium métallurgique.
 - Batterie au lithium (LiFePO_4)
- 2014-: EPFL-LMTM en tant que collaborateur scientifique. Sujets de recherche: cristallographie des transformations de phase, martensite, maclage, mémoire de forme
 - EBSD et TKD couplés à des essais mécaniques simples.
 - Transformations martensitiques dans les aciers, titanes, ors rouges, NiTi.
 - Maclage de déformation dans les métaux hcp comme Mg et Zn, et bcc comme Fe et Mo.
 - Glissement anormal (non Schmid) dans les métaux bcc (Nb, Mo, V)
 - Math: Théorie des groupes, optimisation dans multiplicateurs de Lagrange, réduction de réseau, densités de probabilités...

Gardez votre esprit critique

A propos de la «preuve»
(Frenkel J., Z. Phys.
1926;37:572-609.) de
l'existence des dislocations:
«sans l'aide des dislocations
la limite élastique serait de
l'ordre de grandeur du
module élastique de
cisaillement»



“The shearing force required to move a plane of atoms over the plane below will be periodic, since for displacements $x < b/2$, where b is the spacing of atoms in the shear direction, the lattice resists the applied stress but for $x > b/2$ the lattice forces assist the applied stress. The simplest function these properties is a sinusoidal relation of the form $\tau = \tau_m \sin(\frac{2\pi x}{b})$, where τ_m is the maximum shear stress at the displacement $b/4$. For small displacements $\tau \approx \tau_m \frac{2\pi x}{b}$ and the elastic shear strain given by $\tau = \mu \frac{x}{a}$ from Hooke's law, where μ is the shear modulus, so that $\tau_m = \frac{\mu}{2\pi} \frac{b}{a}$ and since $b \approx a$, the theoretical strength of a perfect crystal is of the order of $\mu/10$.”

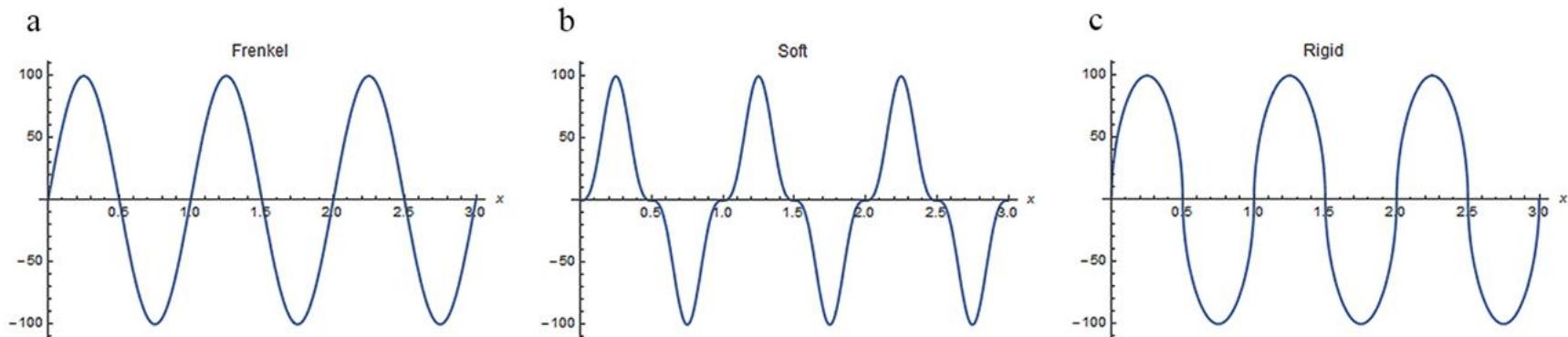
From Smallman RE, Bishop R.J. Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering.
6th edition, Butterworth-Heinemann; 1999, chapter 4 “Defects in Solids”.

Gardez votre esprit critique

Cet argument ressemble à une preuve, mais elle n'en n'est pas. Le tour de passe-passe est dans l'hypothèse “*the simplest function these properties is a sinusoidal relation*”.

La fonction périodique $\text{Sin}(x)$ a été choisie pour avoir le résultat voulu! Cette fonction a la particularité que sa dérivée en $x = 0$ et le maximum valent tous les deux 1, et on crée donc artificiellement et sans justification un couplage entre la partie élastique et la partie plastique du comportement mécanique. On pourrait tout à fait découpler τ_m de μ avec d'autres fonctions périodiques qui donneraient alors des résultats complètement différents.

Periodic functions $\tau(x)$ with different slopes μ at $\tau_{(x=0)}$, all with the same maximum value τ_m .



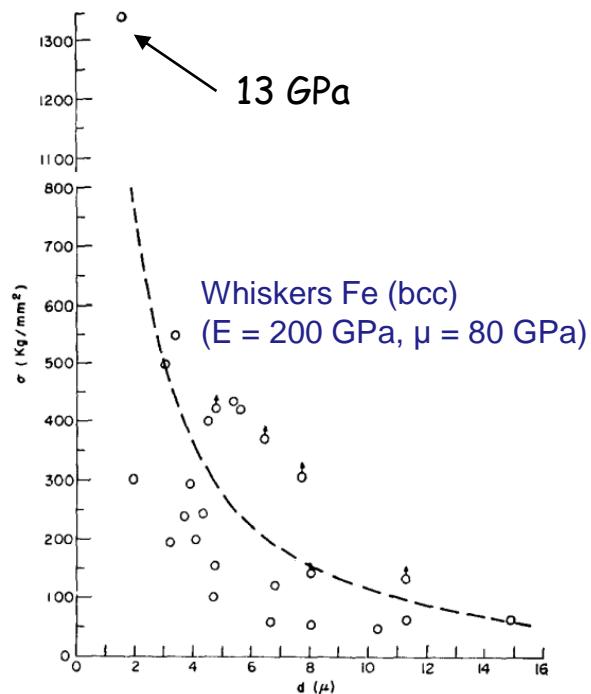
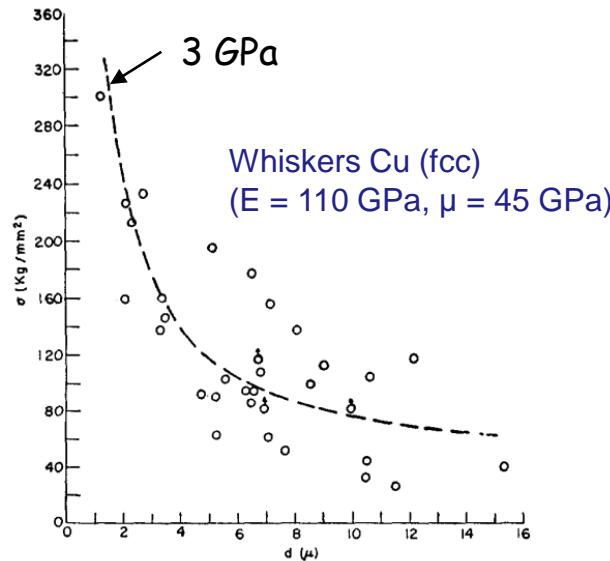
→ Oui, c'est vrai, sans dislocations, la contrainte à rupture serait très élevée, mais la raison est à chercher dans la forme du potentiel interatomique, pas dans la périodicité!

Gardez votre esprit critique

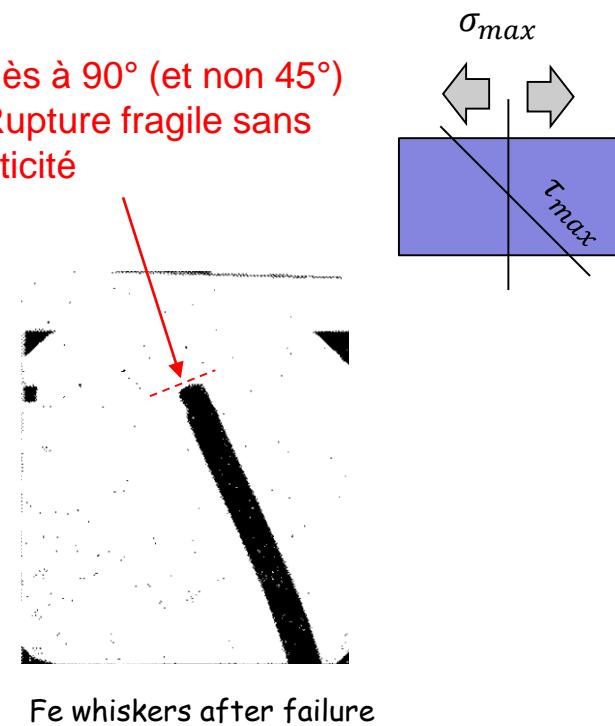
Quelle est la contrainte maximale dans un métal « parfait » ?

Les *whiskers* (= fils monocristallins de diamètre de quelques microns, Fe, Cu etc) ont un comportement quasi-élastique avec rupture brutale à des taux de déformation de 5 % (très élevé, mais malgré tout inférieur à $x < a/4$), et la contrainte à rupture pour les *whiskers* est $< \mu/30$.

Note: la valeur de σ_{max} dépend du diamètre du fil !



Faciès à 90° (et non 45°)
→ Rupture fragile sans plasticité



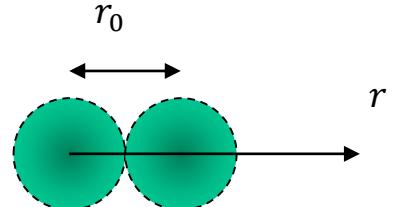
S. Brenner, Tensile Strength of Whiskers, J. Appl. Phys. 1956

Gardez votre esprit critique

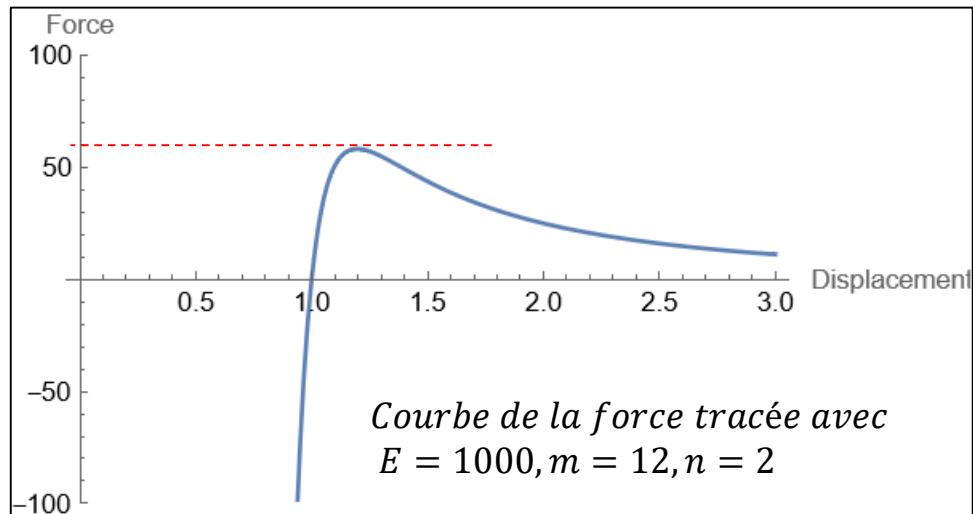
Si on prend en compte une forme plus réaliste du potentiel atomique et qu'on calcule la contrainte nécessaire pour rompre les liaisons atomiques (donc sans influence de la périodicité):

$$F(r) = K \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^n - \left(\frac{r_0}{r} \right)^m \right]$$

r_0 distance d'équilibre ($F = 0$)
 n coef. d'attraction
 m coef. de répulsion, $m > n$



- $\frac{dF}{dr} = K \left[-n \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} + m \left(\frac{r_0}{r} \right)^{m+1} \right] \rightarrow \text{Module Young } E = \frac{dF}{dr}_{(r=r_0)} = K(m-n)$
- $\frac{dF}{dr} = 0 \text{ for } r_1 = r_0 \left(\frac{m}{n} \right)^{1/(m-n)} \rightarrow \sigma_{max} = F(r_1) = \frac{E}{m-n} \left[\left(\frac{n}{m} \right)^{\frac{n}{m-n}} - \left(\frac{n}{m} \right)^{\frac{m}{m-n}} \right]$



- $\varepsilon_{max} = 20 \%$
 - $\sigma_{max}/E = 6 \%$
- ⇒ Bon accord avec les observations
- Des lois plus précises de $F(r)$ donnent encore de meilleurs résultats

Transformation de phase

Transformation de phase (science des matériaux) = Transition de phase (physique).
= changement d'état du système sous l'action d'un changement de conditions extérieures (changement de température, déformation etc).

Effet de la température:

$$F = U - T \cdot S$$

F Energie de Helmholtz, est minimum en conditions isotherme et isochore (pour les physiciens)

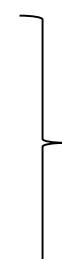
$$G = \textcolor{blue}{H} - T \cdot \textcolor{red}{S}$$

G Energie libre de Gibbs, est minimum en conditions isotherme et isobare (pour les chimistes et métallurgistes)

$G \downarrow$ si $H \downarrow$ et $S \uparrow$

$H \downarrow$ avec la mise en ordre

$S \uparrow$ avec la mise en désordre

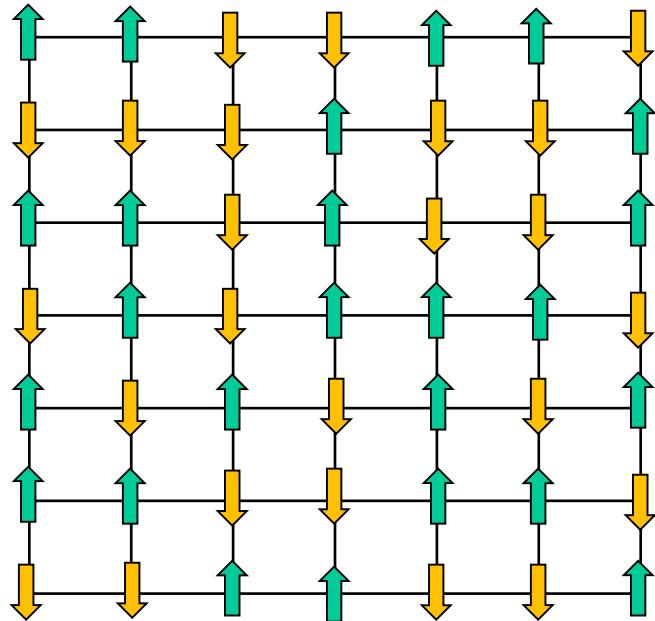


Si un système a deux état possibles, l'état ordonné sera observé aux basses températures et l'état désordonné aux hautes températures

Modèle d'Ising 2D et ferromagnétisme

Les transitions de phases résultent d'un **phénomène multi-échelles**.

Montrons- le avec un modèle d'Ising:



Spins : $s_i = \pm 1$

Energie: $E(\{s_i\}) = -H \sum_{i=1}^N s_i - J \sum_{\langle i,j \rangle} s_i s_j$

Probabilité: $p(\{s_i\}) = \frac{1}{Z} e^{\frac{-E(\{s_i\})}{kT}}$

Fonction de partition: $Z = \sum_{\{s_i\}} e^{\frac{-E(\{s_i\})}{kT}}$

H = champ magnétique extérieur au système

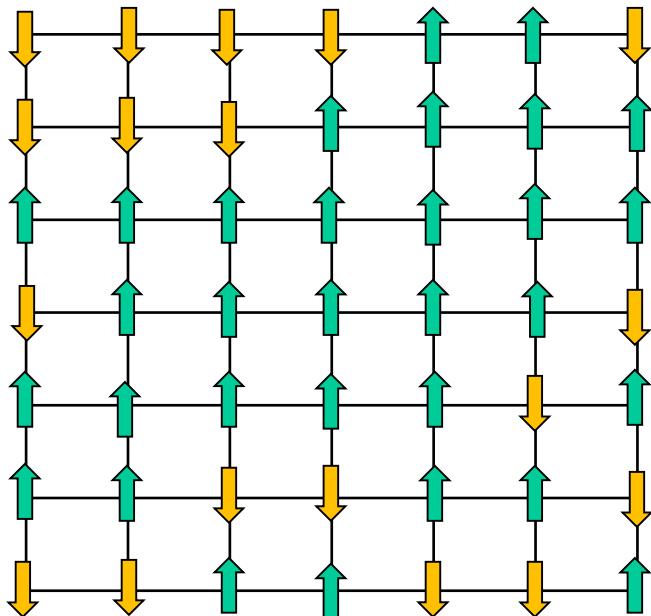
J = couplage magnétique entre spins voisins, $J > 0$ (favorise les pairs de spins parallèles)

- Dans quel état est le système aux hautes températures ? Aux basses températures ?
- Quel paramètre pourrait-on introduire pour quantifier l'état du système ?
- Comment sera la transition, douce ou abrupte ?

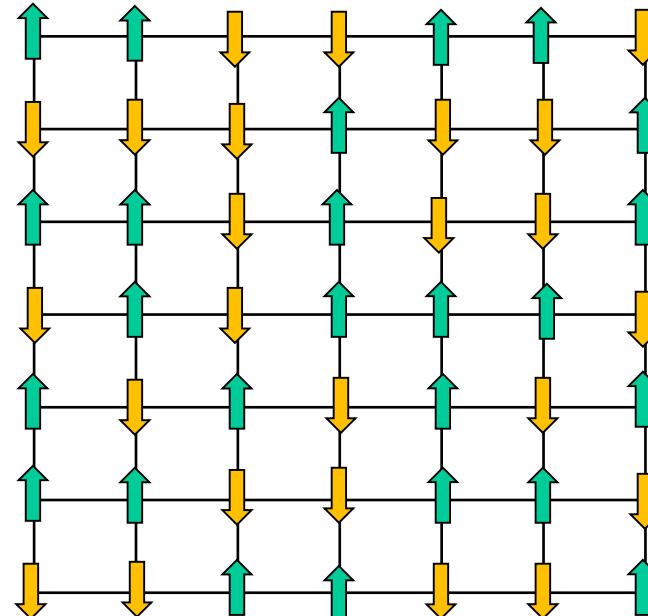
Modèle d'Ising 2D

- La transition de phase résulte d'un **effet collectif**.
- **Des interactions à courtes distances créent des couplages à longues distances**, surtout à des températures proches de la température de transition T_{Curie} .

Magnétisation $M = \sum_{i=1}^N s_i$



$T < T_{\text{Curie}}$, $M \neq 0$



$T > T_{\text{Curie}}$, $M = 0$

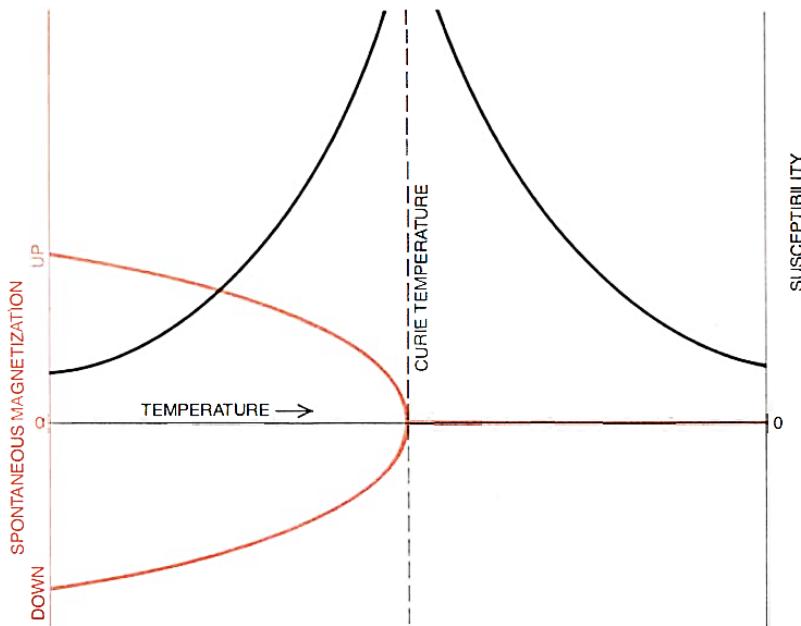
Modèle d'Ising 2D

Problems in Physics with Many Scales of Length

Physical systems as varied as magnets and fluids are alike in having fluctuations in structure over a vast range of sizes. A novel method called the renormalization group has been invented to explain them

by Kenneth G. Wilson

1979 SCIENTIFIC AMERICAN, INC, 158-179



Modèle d'Ising 2D

- **Magnétisation M** (paramètre d'ordre) = nombre spins up – nombre spins down.

As the iron is cooled, the magnetization remains zero until the Curie temperature is reached, and then the material becomes magnetized. If the temperature is reduced further, the strength of the magnetization increases smoothly.

- **Susceptibilité χ** = changement de la magnétisation induite par un champ H très faible.

Well above the Curie point the susceptibility is small because the iron cannot retain any magnetization; well below the Curie temperature the susceptibility is small again because the material is already magnetized and a weak applied field cannot change the state of the system very much. At temperatures close to the Curie temperature however, the susceptibility rises to a sharp peak, and at the Curie point itself the susceptibility becomes infinite.

- **Longueur de corrélation** = distance d'influence d'un retournement forcé de spin sur le système.

It can be measured by observing the orientation of many spins that are all at the same large distance from the fixed one. If reversing the orientation of the fixed spin from up to down increases the number of down spins in the distant population, then the spins are said to be correlated. The maximum distance over which such a correlation can be detected is called the correlation length.

2D Ising model

- **Fluctuations:** îlots de spins orientés dans la même direction.

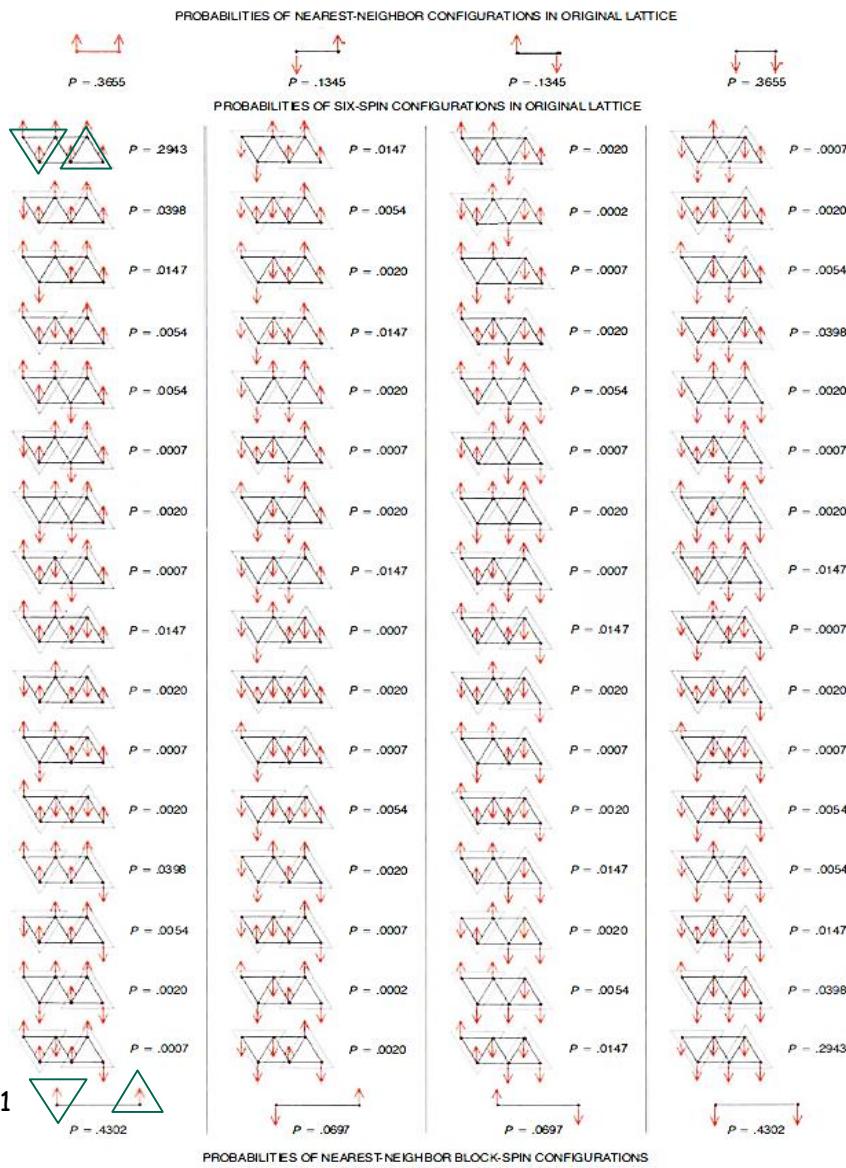
A very high temperature the correlation length is close to zero. The distribution of spins is nearly random, and the magnetization is zero. As the temperature falls and the coupling strength increases correlations over larger distances begin to appear. They take the form of spin fluctuations. As the temperature approaches the Curie point the correlation length grows rapidly. The maximum size of the spin fluctuations increases, the smaller fluctuations are not suppressed; they merely become a finer structure superimposed on the larger one.

When the temperature is precisely equal to the Curie temperature, the correlation length becomes infinite. Any two spins are correlated, no matter what the distance between them is. Nevertheless, fluctuations persist at all smaller scales of length. The system remains unmagnetized, but it is exquisitely sensitive to small perturbations.

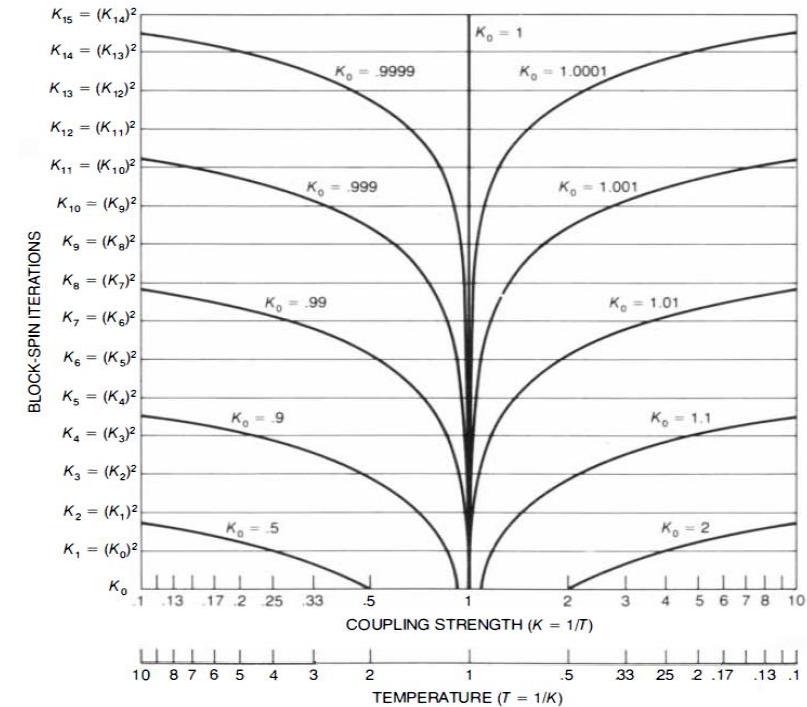
Just below the Curie temperature the system becomes magnetized even in the absence of an outside perturbation, but there is no immediate change in the appearance of the lattice. Smaller-scale fluctuations persist; they are remnants of the lakes and islets of opposite spin direction. Merely by looking at the lattice one cannot detect the magnetization. Only when the system is cooled further does the bias become obvious, as the increasing coupling strength coerces more of the spins into conformity with the majority. At zero temperature complete uniformity is attained.

Transitions de phase et Renormalisation

Step n



- On suppose connue la loi qui lie la probabilité $p(\uparrow\uparrow)$ à la force de couplage K . On suppose aussi $K=1/T$.
- On calcule après un pas de renormalisation la nouvelle probabilité $p' = f_1(p)$ et couplage $K' = f_2(K)$, par ex. $K' = K^2$
- Pour le système tout se passe comme si la température avait changé par $T'=1/K'$.

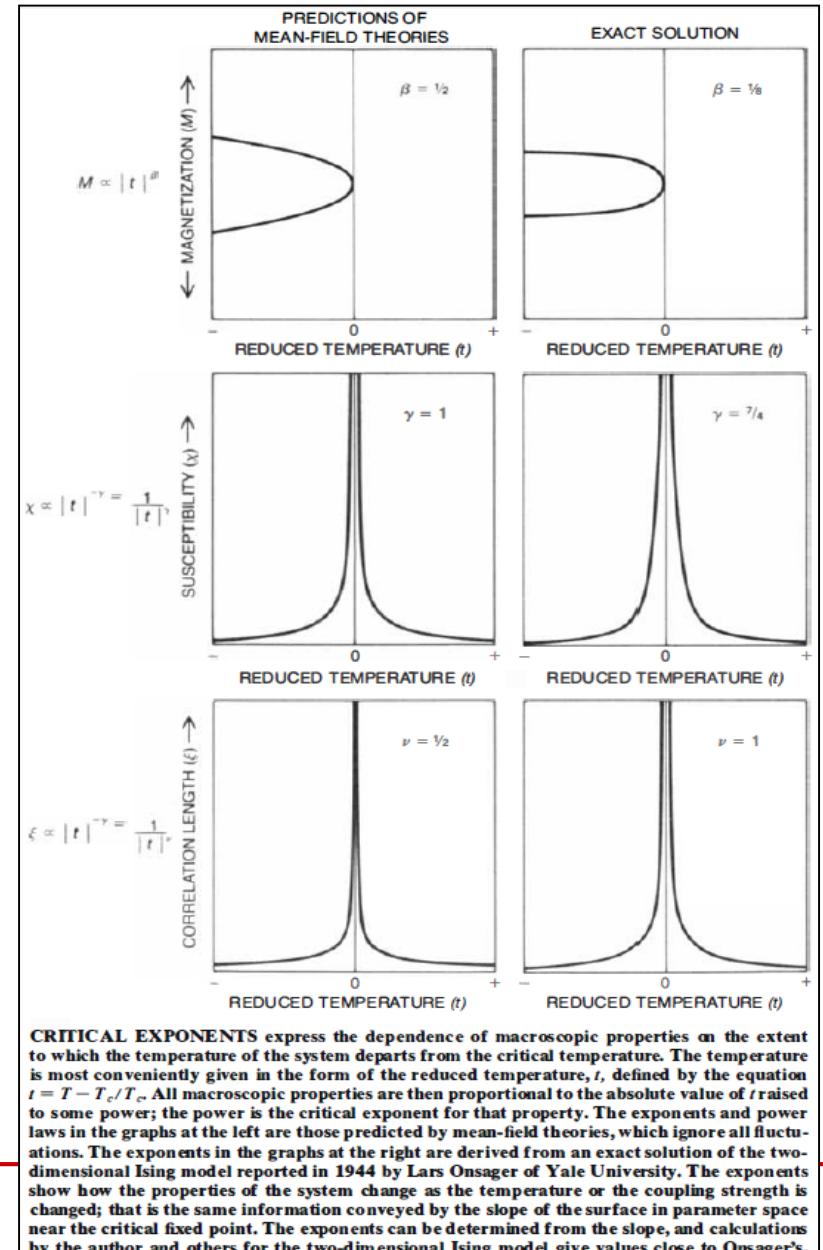


⇒ La température effective change à chaque étape de renormalisation

Renormalisation et exposants critiques

Température réduite $t = (T-T_c)/T_c$

- ✓ La renormalisation permet de calculer les exposants critiques. Les résultats sont indépendants du réseau choisi (carré, hexagonal etc)
- ✓ Le résultat sur le modèle d'Ising 2D est en parfait accord avec la solution analytique démontrée par Onsager
- ✓ Le gros avantage de la renormalisation est qu'elle permet de faire des calculs sur des réseaux 3D et aussi d'établir des analogies entre phénomènes physiques à priori très différents (transition magnétique et superfluidité par exemple).



Introduction aux modèles en champ moyen

Cas de non interaction entre spins $J = 0$

L'énergie vaut $E = -H \sum_{i=1}^N s_i$

La fonction de partition par spin (tous les spins sont indépendents) vaut $Z = e^{H/kT} + e^{-H/kT}$

La magnétisation par spin vaut $\frac{M}{N} = m = \langle s \rangle = 1 p_{(s=1)} + (-1) p_{(s=-1)} = \frac{e^{H/kT} - e^{-H/kT}}{e^{H/kT} + e^{-H/kT}} = \tanh\left(\frac{H}{kT}\right)$

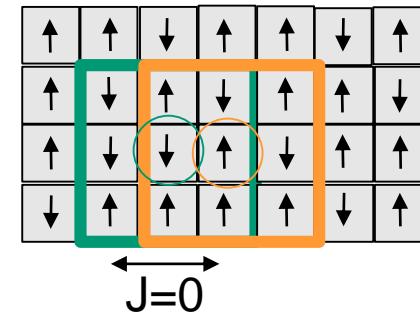
Cas $J \neq 0$ (en modèle en champ moyen)

$$E = -H \sum_{i=1}^N s_i - J \sum_{\langle i,j \rangle} s_i s_j = - \sum_{i=1}^N s_i \left(H + J \sum_{\langle j \rangle} s_j \right)$$

$$\approx - \sum_{i=1}^N s_i (H + zJ\langle s_j \rangle) \approx -(H + zJm) \sum_{i=1}^N s_i$$

\uparrow
 \uparrow
 $z = \text{nombre de spins en proche voisins}$

$$\langle s_j \rangle \approx m$$

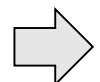


<https://web.stanford.edu/~peastman/statmech/phasetransitions.html>

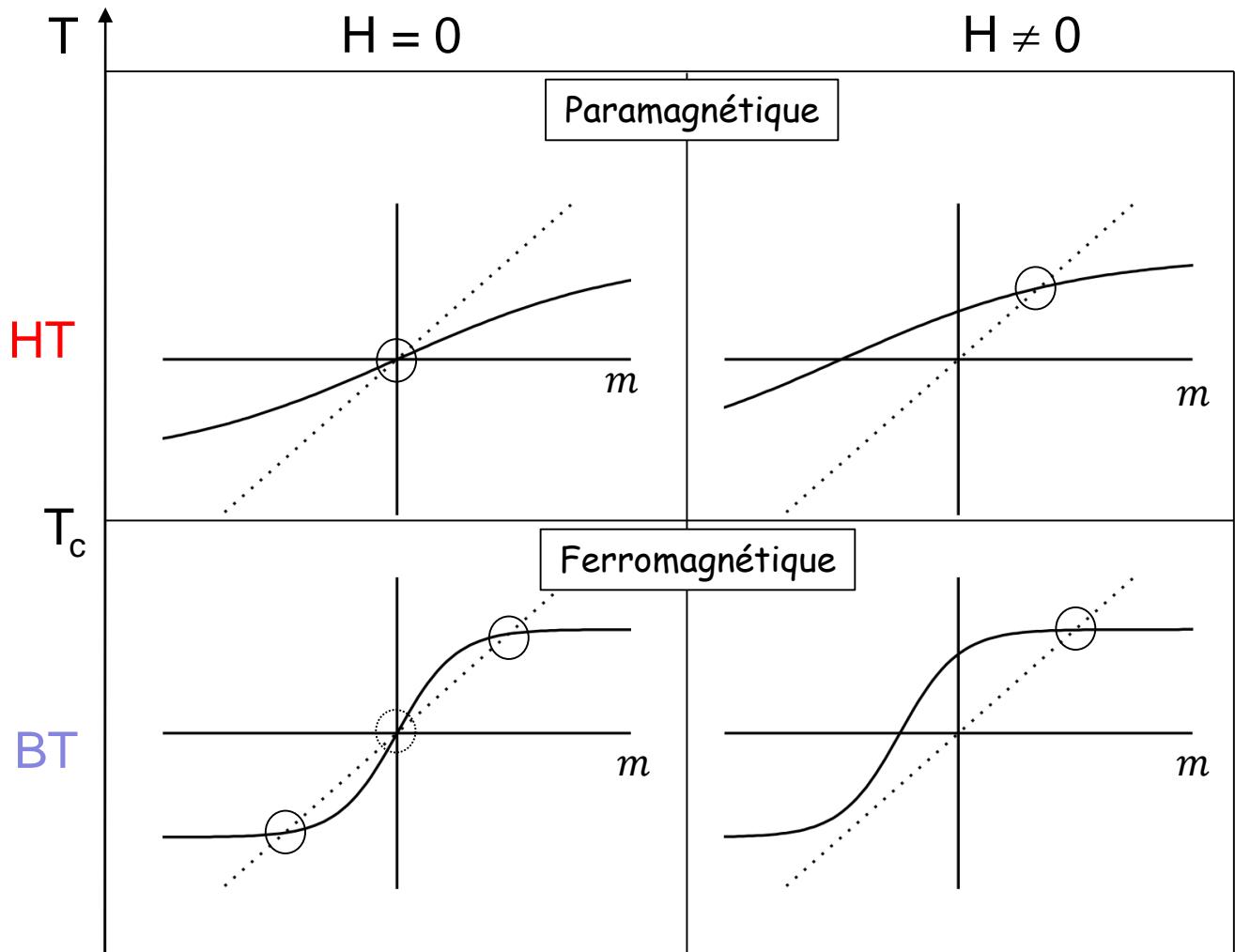
Introduction aux modèles en champ moyen

Donc la magnétisation par spin doit vérifier l'équation

$$m = \tanh\left(\frac{H+zJm}{kT}\right)$$



$$T_c = \frac{zJ}{k}$$



Classification thermodynamique des transformations de phase

- Transformations du 1^{er} ordre

$$\left(\frac{dG}{dT}\right)_{T_c-} \neq \left(\frac{dG}{dT}\right)_{T_c+}$$

La 1^{ère} dérivée de l'énergie de Gibbs est discontinue à la transition ($\exists \Delta S, \Delta H, \Delta V, \dots$). Transformation « **brutale** ». Souvent, pas de relation de groupe à sous-groupe entre les symétries de la phase BT et la phase HT.

Exemples:

- Solidification, Sublimation
- Eutectique / eutectoïde
- Précipitation
- Transformations martensitiques

- Transformations du 2nd ordre

$$\left(\frac{d^2G}{dT^2}\right)_{T_c-} \neq \left(\frac{d^2G}{dT^2}\right)_{T_c+}$$

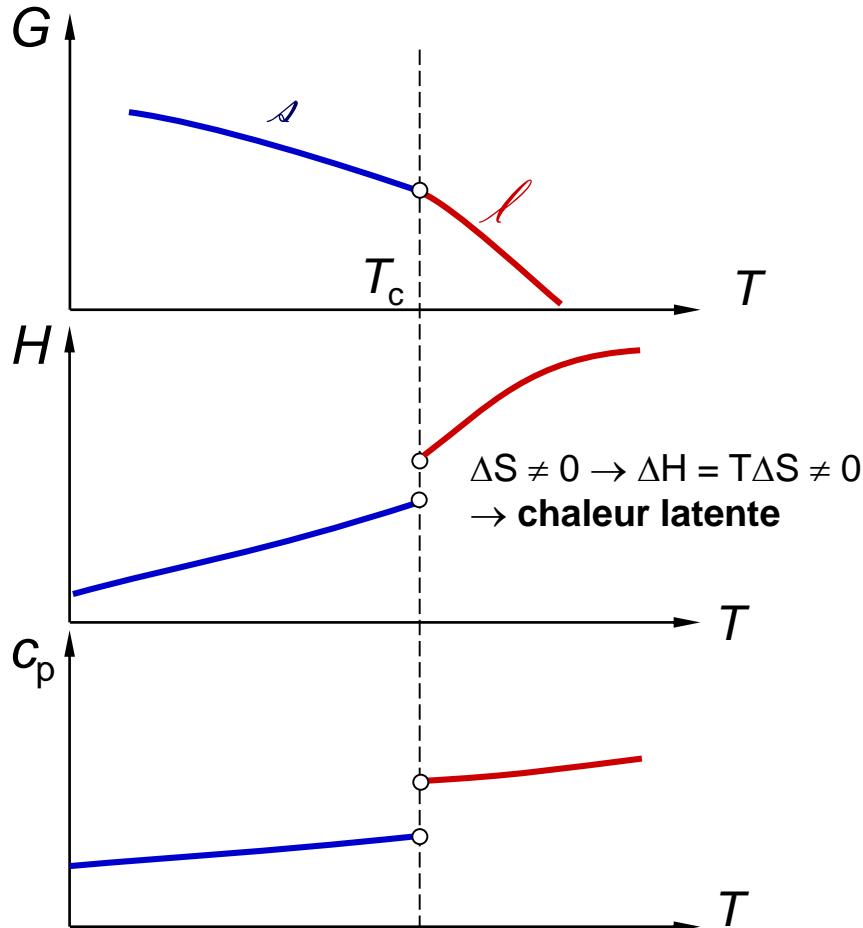
La 2^{ème} dérivée de l'énergie de Gibbs est discontinue à la transition ($\exists \Delta c_p, \Delta \alpha, \Delta \chi, \dots$). Transformation « **douce** ». Souvent, relation de groupe à sous-groupe entre les symétries de la phase BT et la phase HT.

Exemples:

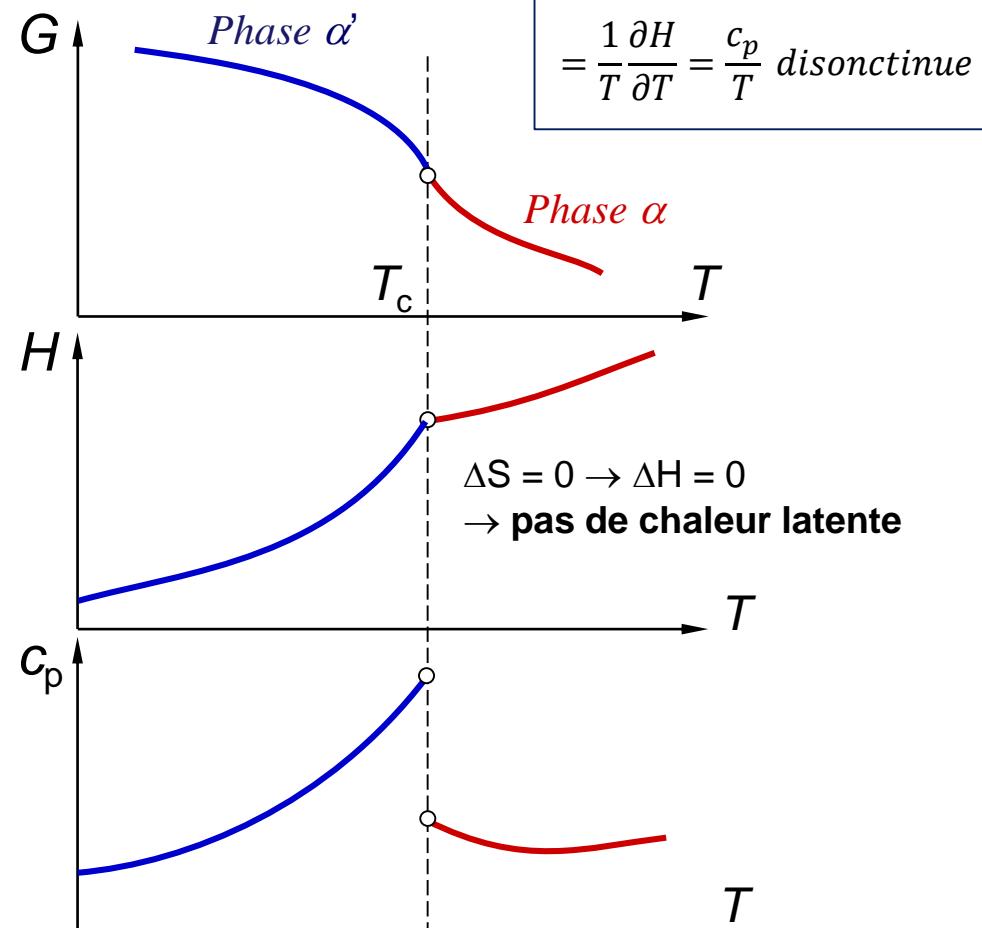
- Ferro-Paramagnétique (Ising)
- Transitions vitreuses
- Superfluidité (He)
- Supraconductivité (Type I and II)

Classification thermodynamique des transformations de phase

Transitions du 1 ^{er} ordre	G continue mais $-\frac{\partial G}{\partial T} = S$ discontinue
--------------------------------------	---



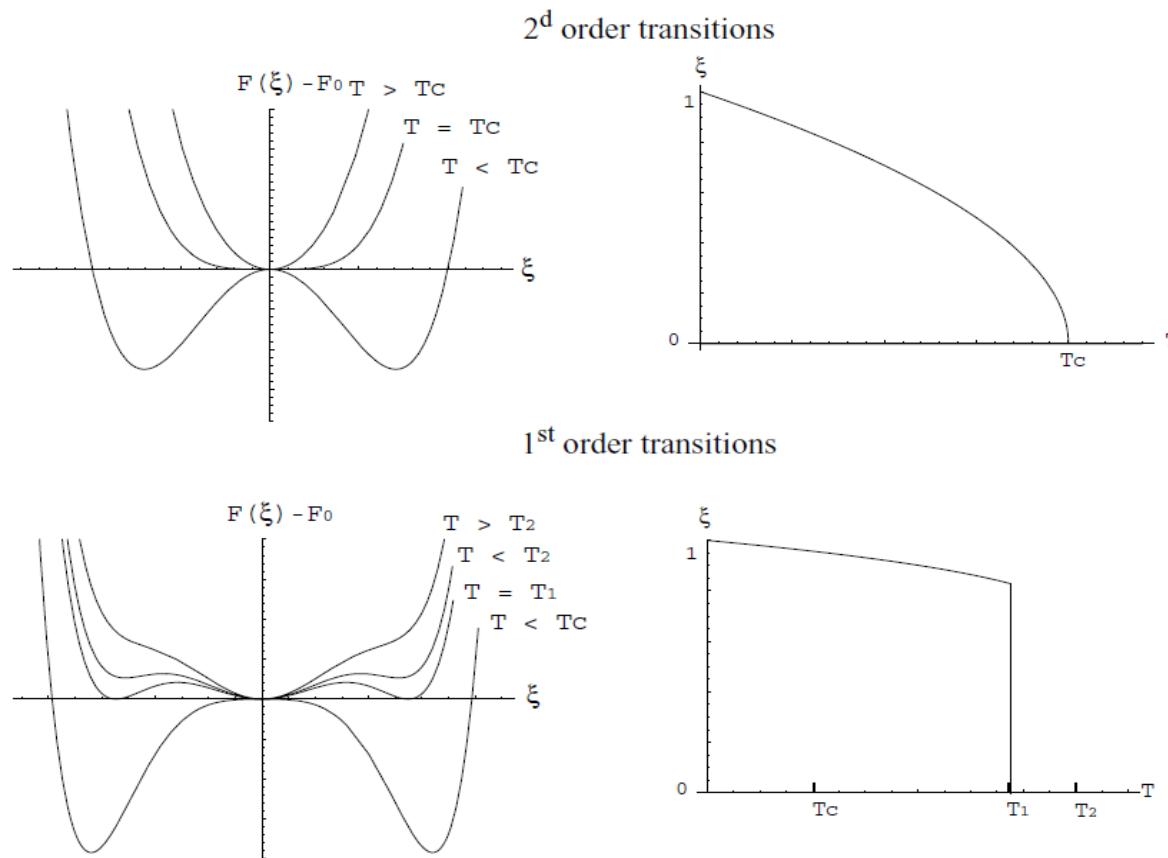
Transitions du 2 ^{ème} ordre	G et $\frac{\partial G}{\partial T}$ continues mais $-\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} = \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{T} \frac{\partial H}{\partial T} = \frac{c_p}{T}$ discontinue
---------------------------------------	--



Cristallographie ↔ Thermodynamique: travail en cours....

La théorie de Landau est phénoménologique. Elle se base sur les hypothèses:

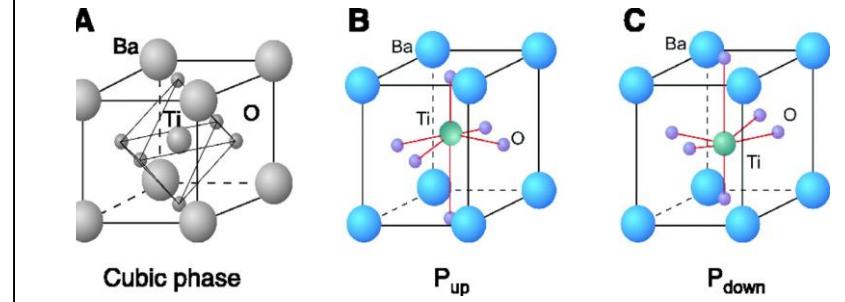
- Existence d'un paramètre d'ordre ξ .
- L'énergie libre F prend la forme d'une série de Taylor en ξ .
- $F(\xi)$ est invariante par les symétries de la phase haute température.



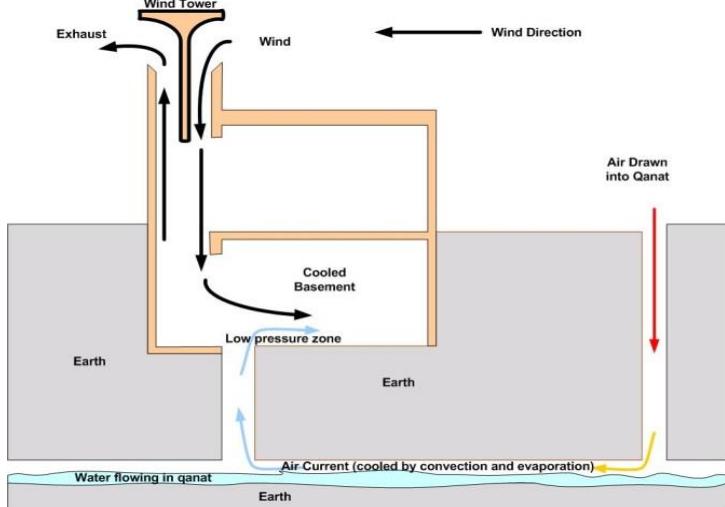
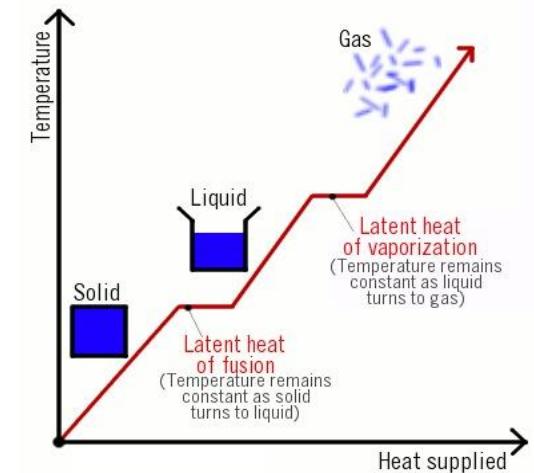
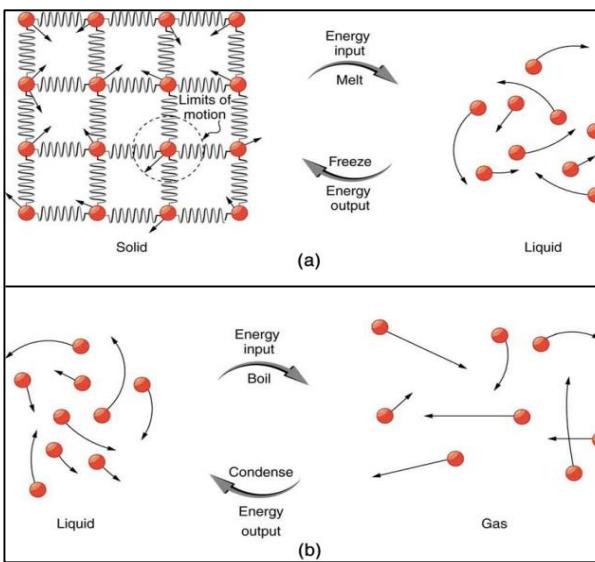
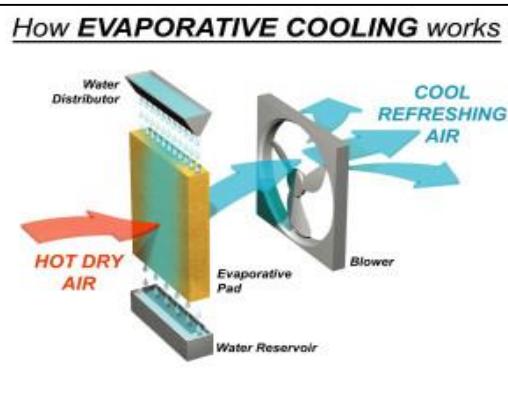
ξ = paramètre d'ordre =

- Para/ ferroélectriques: Polarisation
- Para/ ferromagnétiques: Magnétisation
- Ordre/Désordre: Probabilité d'occupation

Exemples de transition para-ferroélectrique:
 BaTiO_3 (1^{er} ordre), PbTiO_3 (2^d ordre)



Transformation liquide-gaz, systèmes de refroidissement



Ancien "windcatcher" iranien utilisé pour rafraîchir les habitations



Swiss designer Thibault Faverie's Cold Pot

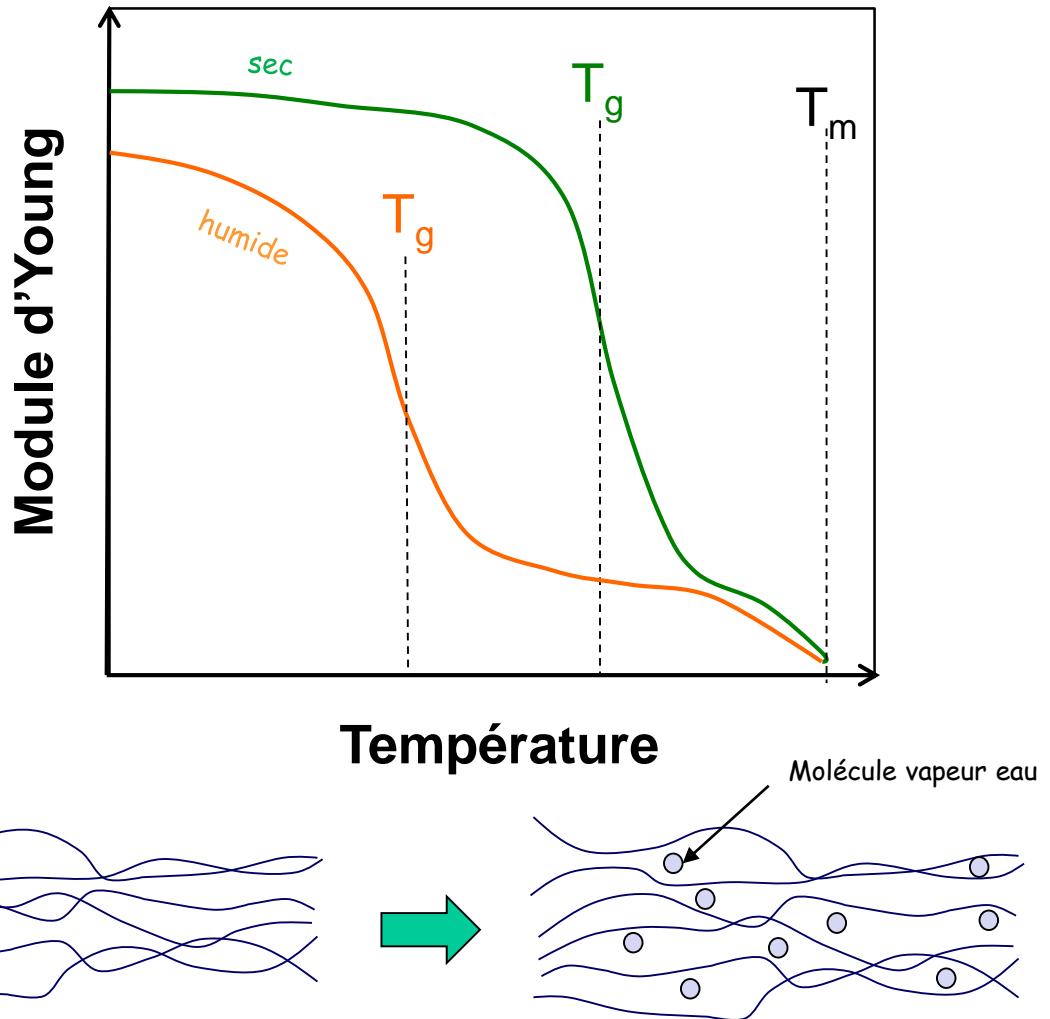


Tour de refroidissement de centrale nucléaire Belleville (France)

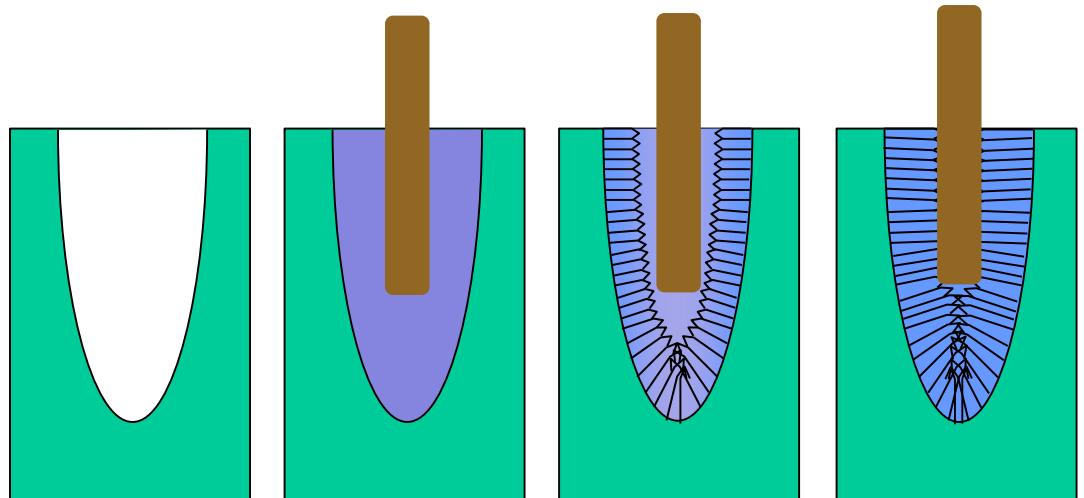
Repassage à la vapeur, influence de l'humidité sur T_g



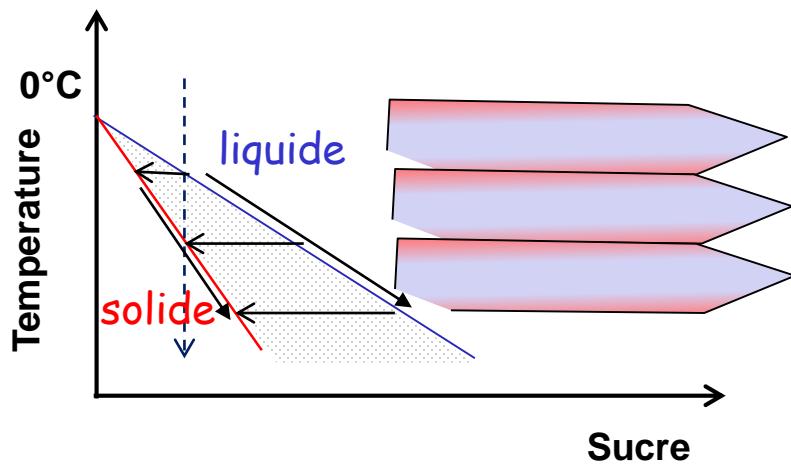
La vapeur entre dans les chaînes polymériques du vêtement () et abaisse la température de transition vitreuse:



Solidification d'une glace à l'eau

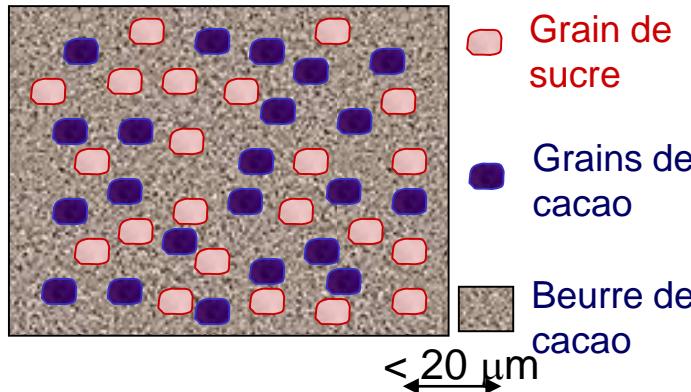


Etapes de solidification, croissance de grains



- Les zones inter-cristaux de glace (intergranulaires) sont enrichies en sucre ou en saveurs.
- Elles ont une température de solidification plus basse.
- Le sucre se retrouve concentré dans les zones intergranulaires ainsi que la dernière zone à solidifier près du bâton
- Lors du réchauffement lors de la dégustation de la glace, les cristaux de glace sont « fades », et une des 1ères zones à fondre est autour du bâton....

Phases métastables dans le chocolat

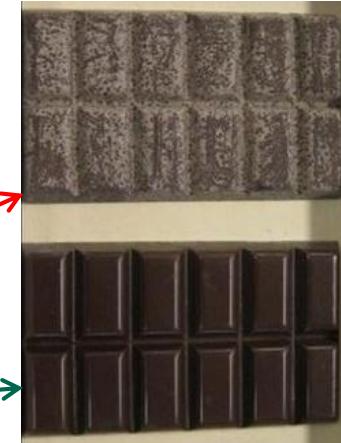


Le beurre de cacao forme la matrice du chocolat.

La phase β_1 (IV) est molle, pâteuse, et fond à 29°C (donc dans la main)

La phase β'_1 (VI) est la plus stable, mais elle donne l'aspect blanchâtre "bloom" d'un chocolat

Seule la phase β_2 (V) fond dans la bouche, pas dans la main.



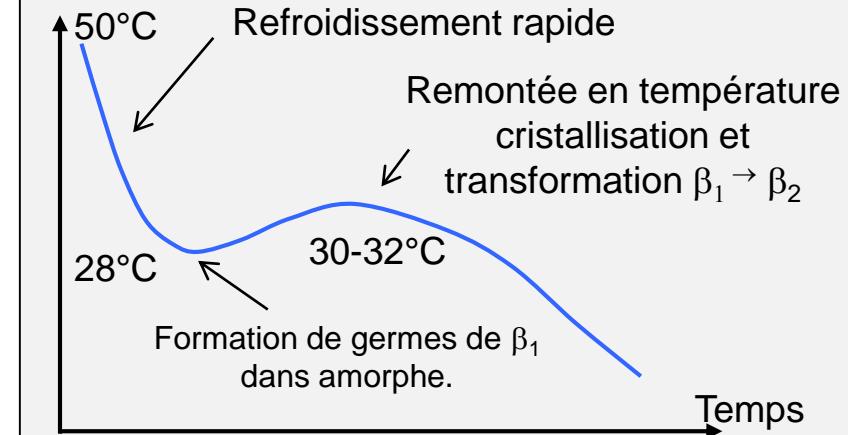
stabilité ↓

Polymorphic forms of cocoa butter

		Melting point (°C)
Form I	β'_2	16–18
Form II	α	21–22
Form III	Mixed	25.5
Form IV	β_1	27–29
Form V	β_2	34–35
Form VI	β'_1	36



Opération de tempérage du chocolat

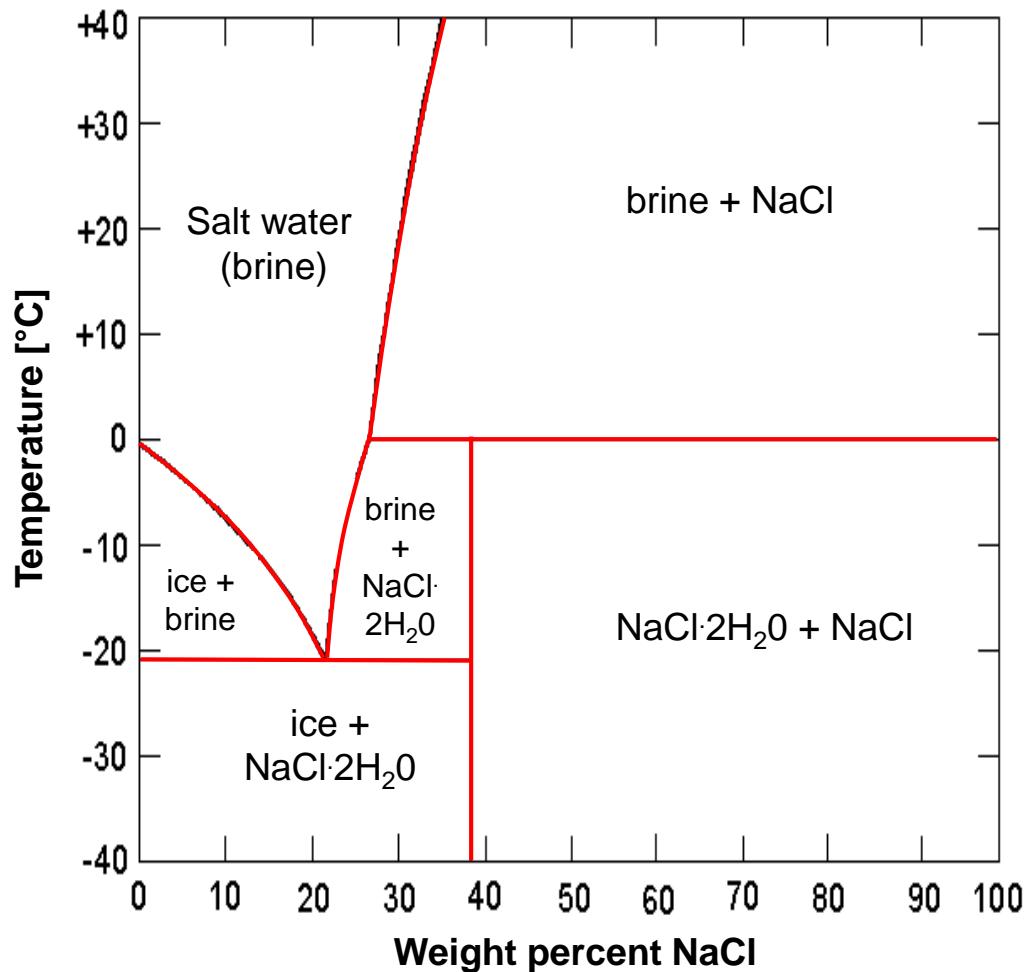


Le salage des routes en hiver

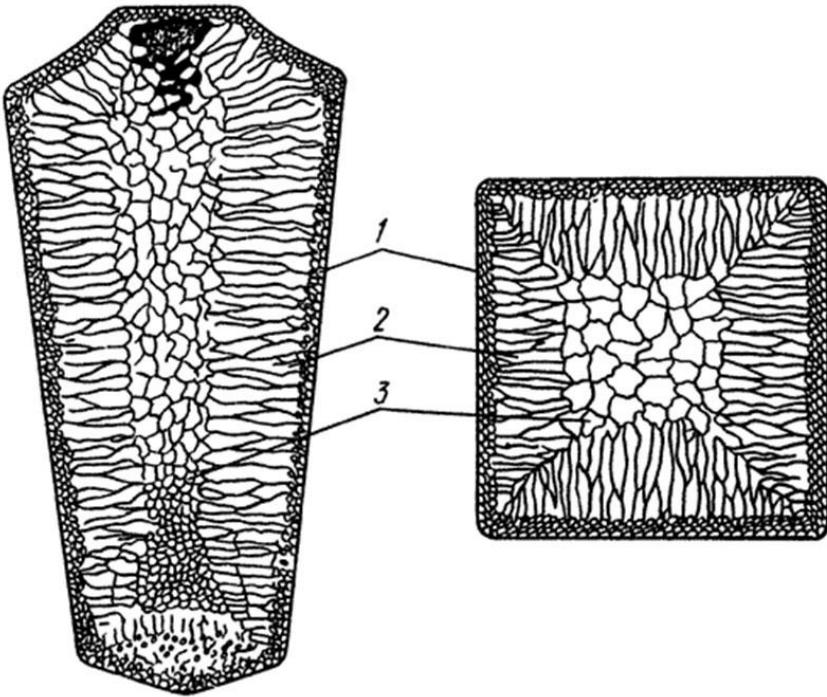


Le sel sert à abaisser le point de fusion de l'eau pour qu'elle reste liquide même sous 0°C.

Note: Attention à la cinétique de dissolution du sel. Mieux vaut saler les routes quand les routes sont encore mouillées que déjà verglacées !

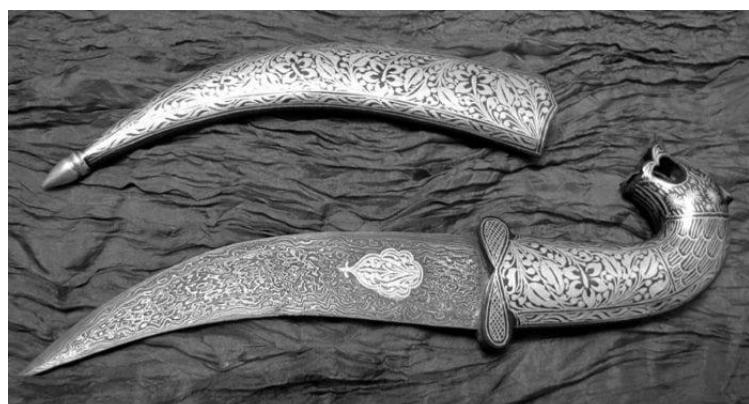
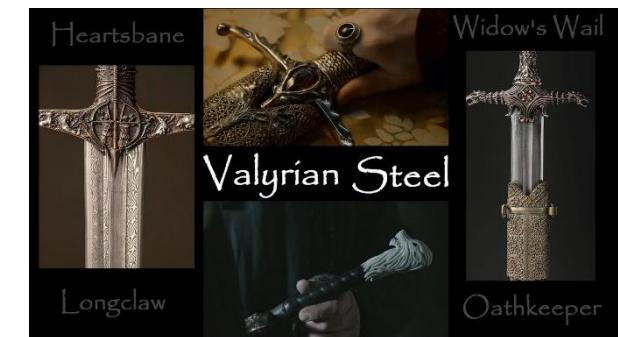


Solidification d'un alliage en lingotière



- Pourquoi cette morphologie de grains en fonction de la position dans le lingot?
- Quelles différences entre la solidification d'un métal pur et celle d'un alliage?

Precipitation/Carburation et aciers damassés



<https://www.monde-du-couteau.ch/fr/>

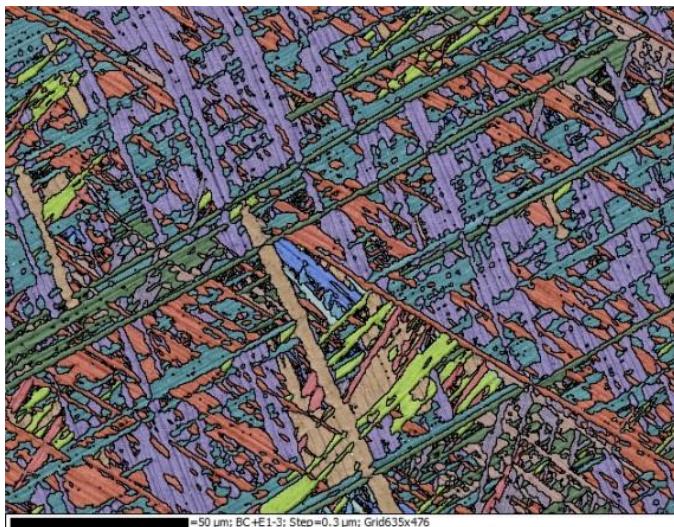
<https://lesavoirperdusanciens.com/2018/06/le-wootz-le-mysterieux-metall-qui-a-ete-utilise-dans-les-lames-de-damas/>

Phase transformations I - 29

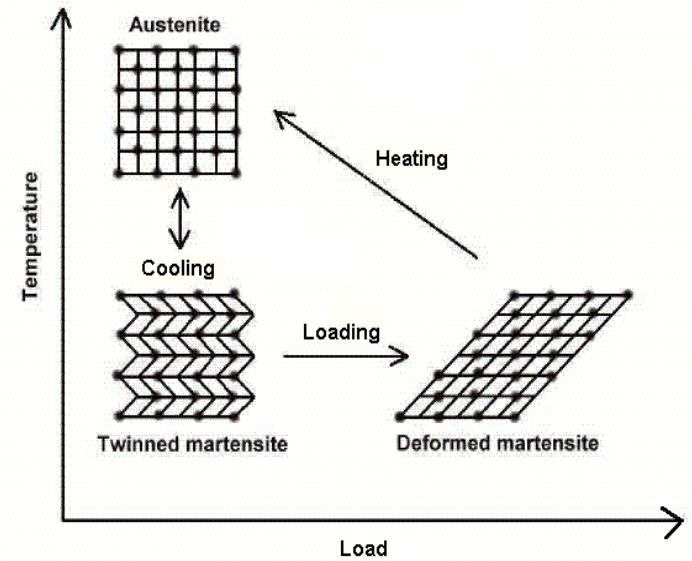
Transformations martensitiques et maclage



Martensite en papillons
dans un acier FeNiC
(image TEM)



Martensite α' dans un alliage
titane (carte EBSD)

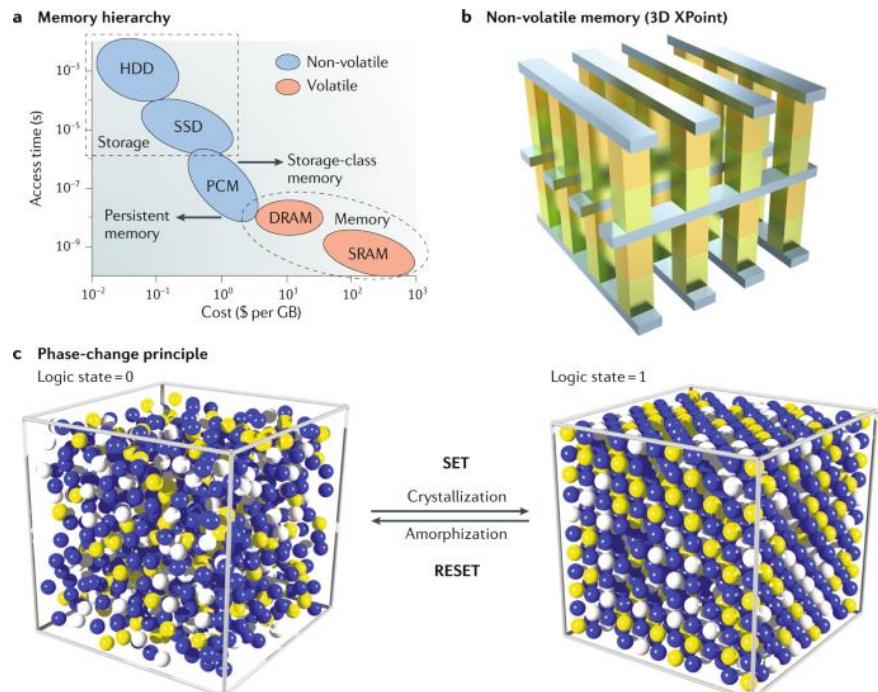


- Comment la martensite se forme ?
- Pourquoi des motifs en lattes ou plaquettes enchevêtrées ?
- Comment déterminer le nombre de variants de martensite (cristallographie) ?
- La martensite est-elle toujours dure et cassante ? Non: voir les alliages à mémoire de forme.

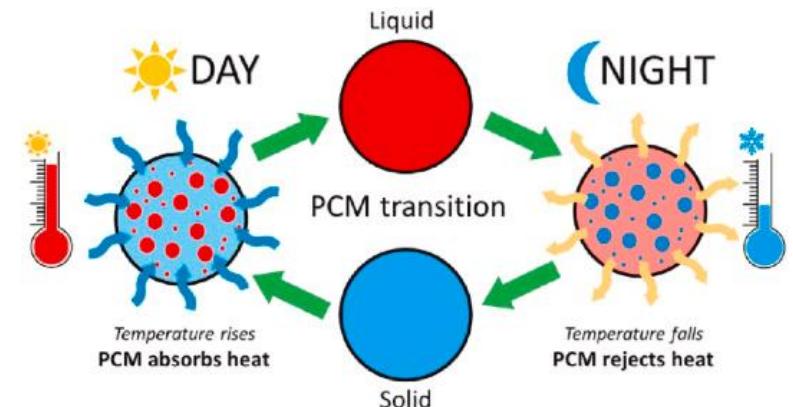
Les matériaux à transformation de phase et innovation

Les transformations de phases sont aux cœur de beaucoup d'innovation en science des matériaux et systèmes

Cristallin ↔ Amorphe
pour les mémoires optiques ou résistives



Cristallin ↔ Liquide, Cristallin ↔ Cristallin
pour stockage de chaleur



Résumé

- Une transformation de phase traduit un changement d'état ou de structure qui peut être brutal et hétérogène (1st ordre) ou progressif et homogène (2^d ordre).
- Elle peut être déclenchée par un changement de conditions externes comme T, p... mais aussi σ (contraintes).
- Une transformation de phase résulte d'un effet collectif. Des interactions à courte distance peuvent avoir des effets à longue distances et induire des changements macroscopiques d'état et de propriété.
- Le degré de transformation peut être quantifié par l'introduction d'un « paramètre d'ordre » qui dépend du type de transformation (magnétisation, polarisation, degré d'ordre etc.)
- Les transformation de phases sont au cœur de la science des matériaux. Leur compréhension est clef pour développer de nouveaux matériaux (propriétés mécaniques des métaux et alliages, mémoires électriques, magnétiques, optiques, stockage électrique, stockage de chaleur).

Quelques ordres de grandeurs

Storage material	Energy Type	Specific energy (MJ/kg)	Energy density (MJ/L)	Direct uses
Uranium (in breeder)	Nuclear fission	80,620,000	1,539,842,000	Electric power plants (nuclear reactors)
Thorium (in breeder)	Nuclear fission	79,420,000	929,214,000	Electric power plants (Nuclear reactors)
Hydrogen (compressed at 70 MPa)	Chemical	142	5.6	Rocket & automotive engines, grid storage& conversion
Diesel/Fuel oil	Chemical	48	35.8	Automotive engines, power plants
LPG (including Propane/Butane)	Chemical	46.4	26	Cooking, home heating, auto engines, lighter fluid
Jet Fuel	Chemical	46	37.4	Aircraft
Gasoline (Petrol)	Chemical	44.4	32.4	Automotive engines, power plants
Ethanol (E100)	Chemical	26.4		Flex-fuel, racing, stoves, lighting
Coal	Chemical	24		Electric power plants home heating
Methanol fuel (M100)	Chemical	19.7		Racing, model engines, safety
Wood	Chemical	16.2		Heating, outdoor cooking
TNT	Chemical	4.6		Explosives
Gunpowder	Chemical	3		Explosives
Lithium non-rechargeable)	Electrochemical	1.8	4.32	Portable electronic devices, flashlights
Lithium-ion battery	Electrochemical	0.36 - 0.875	0.9 - 2.63	Laptops, mobile devices, modern electric vehicles
Alkaline battery	Electrochemical	0.67	1.8	Portable electronic devices, flashlights
Nickel-metal hydride battery	Electrochemical	0.288	0.504 - 1.08	Portable electronic devices, flashlights
Lead-acid battery	Electrochemical	0.17	0.34	Automotive engine ignition

Quelques unités

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ W.s}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ} = \text{énergie pour chauffer 1 l d'eau de } 1^\circ\text{C}$$

L'énergie et notre vie de tous les jours

- Consommation électrique annuelle d'un foyer est environ de 5 MWh par an
- Densité énergie du pétrole 30 MJ/l
- Voiture électrique 20-100 kWh
- Coût d'électricité est entre 0,1 - 0,4 CHF du kWh
- Production anneau solaire 1 m² est 220 - 328 kWh par an
- Production des 5 réacteurs nucléaires suisses 25'000 GWh nets

Unité	Symbol	Valeur en joules
Électron-volt	eV	$1,602 \cdot 10^{-19}$
Erg	erg	10^{-7}
Calorie	cal	4,1855
British Thermal Unit	Btu	$1,055 \cdot 10^3$
Kilowatt-heure	kWh	$3,6 \cdot 10^6$
Thermie	th	$4,1855 \cdot 10^6$
Therm	thm	$105,5 \cdot 10^6$
Tonne de TNT		$4,1855 \cdot 10^9$
Tonne équivalent charbon	tec	$29,30 \cdot 10^9$
Tonne équivalent pétrole	tep ou toe	$41,86 \cdot 10^9$

$$100 \text{ kJ/mol} \approx 1 \text{ eV/atome}$$