

# Matériaux pour l'ingénieur :

## Physique des matériaux métalliques

Baptiste Bergeot

Maître de Conférences - [baptiste.bergeot@insa-cvl.fr](mailto:baptiste.bergeot@insa-cvl.fr) - bureau D03

---

4A Centre Val de Loire (FISE et FISA)



# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

Propriétés mécaniques

# Plan du cours

## Introduction

1.1 Généralités

1.2 Classification des matériaux et des propriétés

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

Propriétés mécaniques

# Plan du cours

## Introduction

1.1 Généralités

1.2 Classification des matériaux et des propriétés

Composition et structure des matériaux

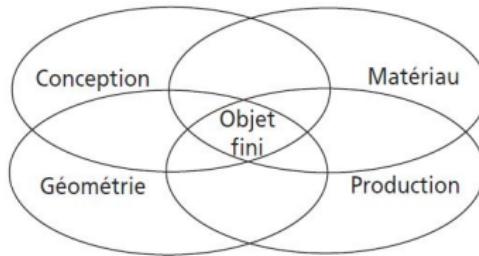
Diffusion à l'état solide

Propriétés mécaniques

# Introduction

Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée.

La notion de **matériau** est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini.



# Définition d'un matériau

## Définition symbolique et résumée

Un matériau est une matière dont on fait un matériel.

## Définition plus précise et plus complète

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée et à fonction préméditée.

## Étude des matériaux = étude interdisciplinaire

- Propriétés des matériaux gouvernées par des phénomènes physiques, chimiques, mécaniques...
- À la frontière entre les domaines plus fondamentaux de la **physique du solide**, de la mécanique des milieux continus, des mathématiques... et la démarche pragmatique utilisée en conception ou en évaluation des coûts.

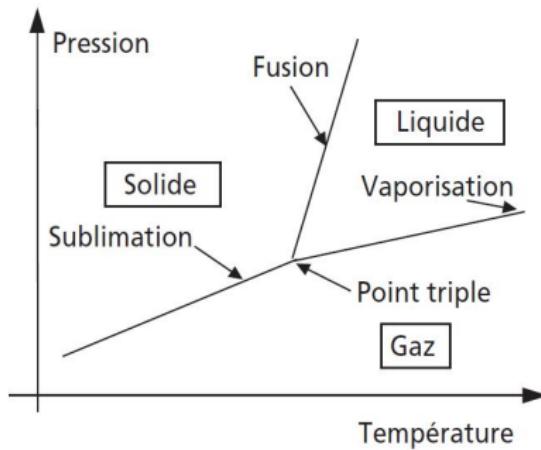
# Propriété des matériaux

## Origine des propriétés des matériaux

- Composition chimique (nature des espèces atomiques qui constituent le matériau)
- Microstructure (organisation des atomes constitutifs)

## Facteurs influençant la microstructure (l'état physique de la matière)

- Température
- Pression



# Influence de la température

La **température** = mesure le degré d'agitation et de désordre (ou entropie) des atomes. Lorsqu'elle s'élève, les atomes vibrent à la fréquence de Debye  $v_D$ , occupant un espace plus important (d'où la **dilatation thermique**) et se déplaçant plus facilement, d'où la **diffusion**. Ce n'est qu'au **zéro absolu** de l'échelle Kelvin que les atomes sont immobiles.

À **température élevée**, la matière est à l'**état gazeux**, état caractérisé par une **distance importante** entre atomes ou molécules disposés alors en **désordre**. Un gaz est donc compressible et très fluide.

À **température plus basse**, les forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires deviennent non négligeables devant l'agitation thermique et peuvent provoquer le passage à l'**état liquide**. Les atomes ou molécules sont alors en désordre, mais à courte distance. Un liquide est donc fluide et peu compressible.

À **température encore plus basse**, les forces d'attraction interatomiques devenant encore plus prépondérantes, la matière peut passer à l'**état solide cristallisé**, augmentant ainsi en général sa compacité. Les atomes sont alors ordonnés et à courte distance. Un solide cristallin est donc très peu fluide et très peu compressible.

Si l'**abaissement de température s'effectue rapidement par rapport à la mobilité atomique**, les atomes n'ont pas la possibilité de s'ordonner avant que l'arrêt de la diffusion ne les immobilise. Le liquide se fige alors en **solide amorphe ou vitreux**, les atomes y sont en **désordre à courte distance**.

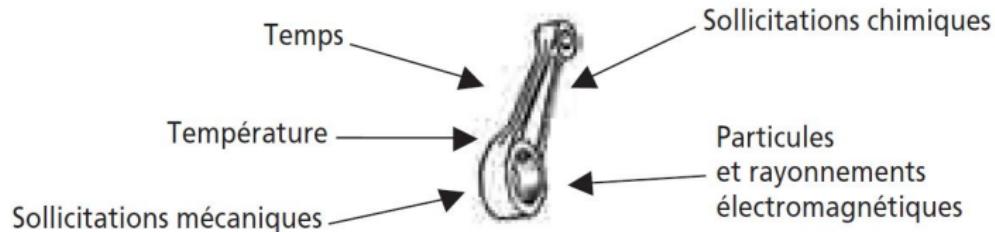
## Influence de la pression

La pression joue également un rôle dans les changements d'état de la matière :

Une **augmentation de pression tend à éléver les températures de changement d'état**, car son action stabilise les états condensés (solide, liquide), par rapport à l'état dispersé (gazeux). Cet effet est perceptible sur la plupart des matériaux (à l'exception notable de la glace, forme solide de l'eau).

---

Les matériaux sont destinés à la réalisation d'objets capables de résister aux manipulations et au moins aux sollicitations de leur propre poids. La figure ci-dessous montrent les principales sollicitations que peut subir une pièce.



# Plan du cours

## Introduction

1.1 Généralités

1.2 Classification des matériaux et des propriétés

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

Propriétés mécaniques

## Les grandes classes de matériaux

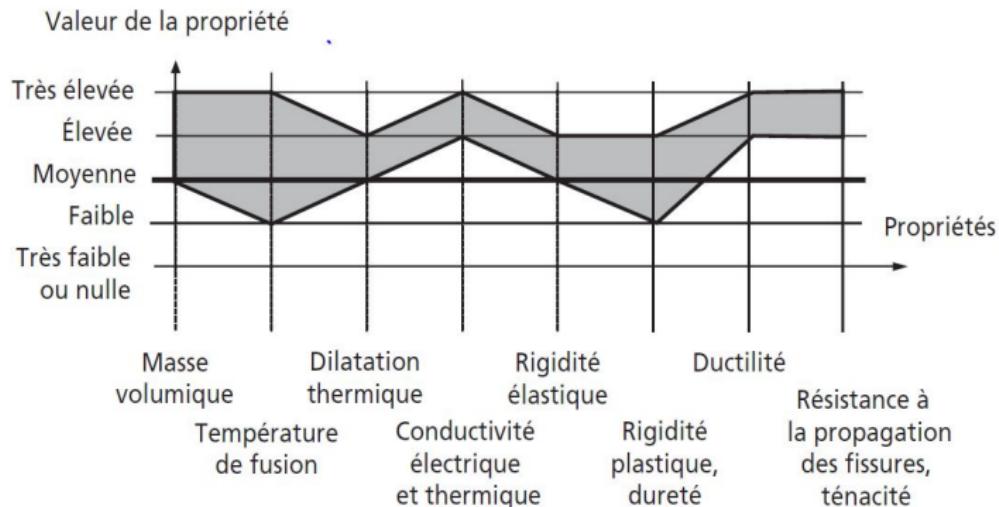
Propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent.

C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux :

- **Matériaux métalliques.** Ce sont les métaux purs et leurs mélanges, ou alliages, comportant essentiellement des liaisons métalliques.
- **Matériaux polymères.** Ce sont les matériaux d'origine biologique, les polymères et élastomères de synthèse, comportant des liaisons covalentes et des liaisons faibles.
- **Matériaux minéraux.** Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes.
- **Matériaux composites.** Ils associent de manière structurée à fine échelle des matériaux différents, appartenant éventuellement à des classes différentes parmi les trois précédentes.

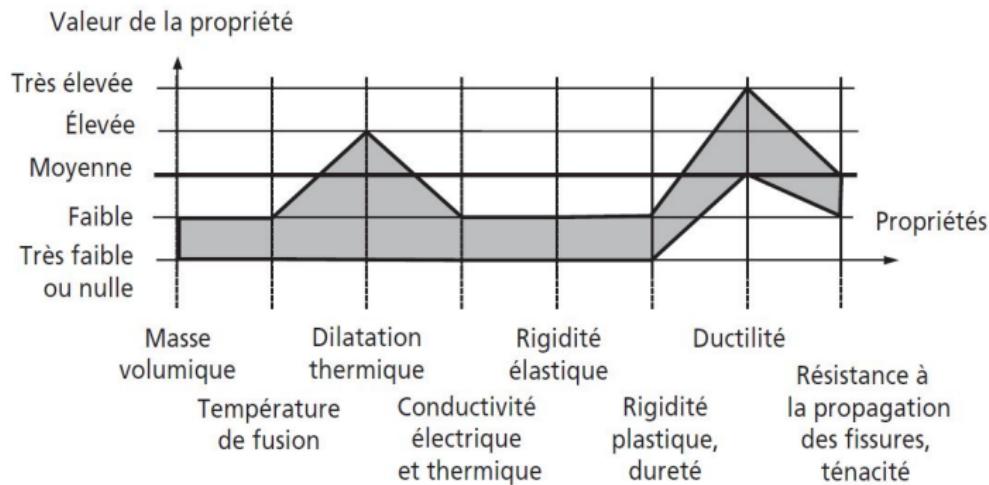
# Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

## Matériaux métalliques



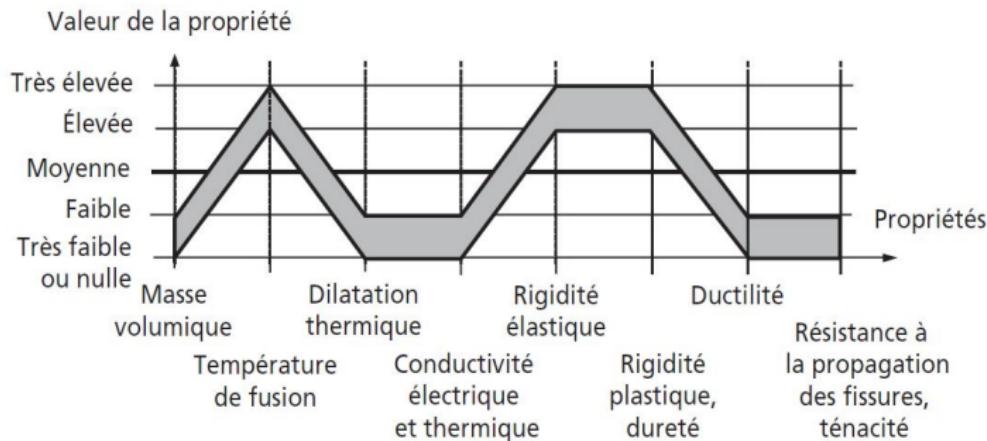
# Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

## Matériaux polymères



# Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

## Matériaux minéraux



# Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

## Matériaux composites

Selon leur structure et la nature de leurs composants, les propriétés des matériaux composites sont extrêmement variables :

- **Intermédiaires** entre les propriétés des matériaux qui les constituent.
- Parfois **émergentes**.

# Plan du cours

## Introduction

## Composition et structure des matériaux

- 2.1 Classification des éléments chimiques
- 2.2 Liaison chimique
- 2.3 Structure des matériaux solides
- 2.4 Défauts dans les solides cristallins

## Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

# Plan du cours

## Introduction

## Composition et structure des matériaux

- 2.1 Classification des éléments chimiques
- 2.2 Liaison chimique
- 2.3 Structure des matériaux solides
- 2.4 Défauts dans les solides cristallins

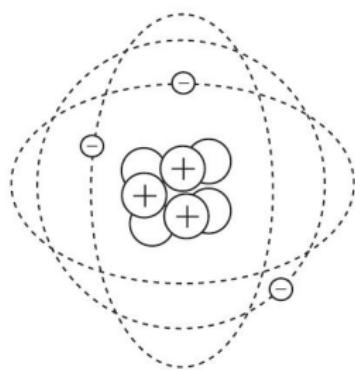
## Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

# Brique de la matière : l'atome

## Structure de l'atome

- **noyau** : **protons** et éventuellement **neutrons** ;
- **cortège électronique** gravitant autour du noyau : électrons en nombre égal aux protons dans un atome à l'équilibre.



- 3 électrons  
- 3 protons  
⇒ **numéro atomique (nombre de protons)  $Z = 3$**   
**Noyau :**  
- 3 protons  
- 4 neutrons  
⇒ **masse atomique (nombre de protons et de neutrons)  $A = 7$**

*Exemple de l'atome de lithium.*

## Brique de la matière : l'atome

Les protons sont chargés positivement et les électrons négativement, de charges élémentaires égales en valeurs absolues, de sorte que l'atome est électriquement neutre à l'état d'équilibre.

La masse de l'électron est négligeable devant celle du proton ou du neutron.

Particule	Masse (au repos)	Charge électrique
Électron	$9,110 \cdot 10^{-31}$ kg	$-1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Proton	$1,673 \cdot 10^{-27}$ kg	$+1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Neutron	$1,675 \cdot 10^{-27}$ kg	0

Les orbites des électrons occupent dans un atome des couches successives, correspondant à des niveaux d'énergie discrets, qui deviennent des **bandes** dans les solides regroupant plusieurs atomes.

Ces niveaux ne peuvent contenir qu'un nombre limité d'électrons : **deux pour le premier, huit pour les niveaux suivants** (du moins lorsqu'ils se trouvent en position externe), et ils sont séparés par des **bandes interdites**.

## Classification périodique des éléments chimiques

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMÉNTS

<http://www.periodni.com/fr/>

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENS

<http://www.periodni.com/fr/>

18 VIII

2 4.0026

HÉLIUM

10 20.160

1 1.0079	IA	TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENS																	18 VIII																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
I	PERIODE																	2 4.0026																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	GROUPE																	HÉLIUM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	1.0079	IA	MASSE ATOMIQUE RELATIVE (1)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2	H	IIA	GROUPE IUPAC																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3	HYDROGÈNE	2	III A	13	10.811	GROUPE CAS	NOMBRE ATOMIQUE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
4	Li	Be	BERYLLEUM	14	9.0122	SYMBOLIQUE	B	BOIRE	ETAT PHYSIQUE (25 °C; 101 kPa)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
5	LITHIUM	11	22.990	12	24.305	NOM DE L'ÉLÉMENT	NE - gaz Fe - solide Hg - liquide Tc - synthétique																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
6	Na	Mg	MAGNÉSIUM	3	3.016	III B	4	IV B	5	VB	6	VI B	7	VIB	8	VII B	9	10	II	IB	12	IIIB	13	26.982	14	28.086	15	30.974	16	32.065	17	35.453	18	39.948																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
7	SODIUM	CALCIUM	19	39.098	20	40.078	21	44.956	22	47.867	23	50.942	24	51.996	25	54.938	26	55.845	27	58.933	28	58.893	29	63.546	30	65.38	31	69.723	32	72.64	33	74.922	34	78.96	35	79.904	36	83.798																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
8	K	Ca	SCANDIUM	4	40.078	5	41.982	6	42.967	7	43.996	8	44.956	9	45.996	10	46.996	11	47.996	12	48.996	13	50.942	14	51.996	15	52.996	16	53.996	17	54.996	18	55.996	19	56.996	20	57.996	21	58.996	22	59.996	23	60.996	24	61.996	25	62.996	26	63.996	27	64.996	28	65.996	29	66.996	30	67.996	31	68.996	32	69.996	33	70.996	34	71.996	35	72.996	36	73.996	37	74.996	38	75.996	39	76.996	40	77.996	41	78.996	42	79.996	43	80.996	44	81.996	45	82.996	46	83.996	47	84.996	48	85.996	49	86.996	50	87.996	51	88.996	52	89.996	53	90.996	54	91.996	55	92.996	56	93.996	57	94.996	58	95.996	59	96.996	60	97.996	61	98.996	62	99.996	63	100.996	64	101.996	65	102.996	66	103.996	67	104.996	68	105.996	69	106.996	70	107.996	71	108.996	72	109.996	73	110.996	74	111.996	75	112.996	76	113.996	77	114.996	78	115.996	79	116.996	80	117.996	81	118.996	82	119.996	83	120.996	84	121.996	85	122.996	86	123.996	87	124.996	88	125.996	89	126.996	90	127.996	91	128.996	92	129.996	93	130.996	94	131.996	95	132.996	96	133.996	97	134.996	98	135.996	99	136.996	100	137.996	101	138.996	102	139.996	103	140.996	104	141.996	105	142.996	106	143.996	107	144.996	108	145.996	109	146.996	110	147.996	111	148.996	112	149.996	113	150.996	114	151.996	115	152.996	116	153.996	117	154.996	118	155.996	119	156.996	120	157.996	121	158.996	122	159.996	123	160.996	124	161.996	125	162.996	126	163.996	127	164.996	128	165.996	129	166.996	130	167.996	131	168.996	132	169.996	133	170.996	134	171.996	135	172.996	136	173.996	137	174.996	138	175.996	139	176.996	140	177.996	141	178.996	142	179.996	143	180.996	144	181.996	145	182.996	146	183.996	147	184.996	148	185.996	149	186.996	150	187.996	151	188.996	152	189.996	153	190.996	154	191.996	155	192.996	156	193.996	157	194.996	158	195.996	159	196.996	160	197.996	161	198.996	162	199.996	163	200.996	164	201.996	165	202.996	166	203.996	167	204.996	168	205.996	169	206.996	170	207.996	171	208.996	172	209.996	173	210.996	174	211.996	175	212.996	176	213.996	177	214.996	178	215.996	179	216.996	180	217.996	181	218.996	182	219.996	183	220.996	184	221.996	185	222.996	186	223.996	187	224.996	188	225.996	189	226.996	190	227.996	191	228.996	192	229.996	193	230.996	194	231.996	195	232.996	196	233.996	197	234.996	198	235.996	199	236.996	200	237.996	201	238.996	202	239.996	203	240.996	204	241.996	205	242.996	206	243.996	207	244.996	208	245.996	209	246.996	210	247.996	211	248.996	212	249.996	213	250.996	214	251.996	215	252.996	216	253.996	217	254.996	218	255.996	219	256.996	220	257.996	221	258.996	222	259.996	223	260.996	224	261.996	225	262.996	226	263.996	227	264.996	228	265.996	229	266.996	230	267.996	231	268.996	232	269.996	233	270.996	234	271.996	235	272.996	236	273.996	237	274.996	238	275.996	239	276.996	240	277.996	241	278.996	242	279.996	243	280.996	244	281.996	245	282.996	246	283.996	247	284.996	248	285.996	249	286.996	250	287.996	251	288.996	252	289.996	253	290.996	254	291.996	255	292.996	256	293.996	257	294.996	258	295.996	259	296.996	260	297.996	261	298.996	262	299.996	263	300.996	264	301.996	265	302.996	266	303.996	267	304.996	268	305.996	269	306.996	270	307.996	271	308.996	272	309.996	273	310.996	274	311.996	275	312.996	276	313.996	277	314.996	278	315.996	279	316.996	280	317.996	281	318.996	282	319.996	283	320.996	284	321.996	285	322.996	286	323.996	287	324.996	288	325.996	289	326.996	290	327.996	291	328.996	292	329.996	293	330.996	294	331.996	295	332.996	296	333.996	297	334.996	298	335.996	299	336.996	300	337.996	301	338.996	302	339.996	303	340.996	304	341.996	305	342.996	306	343.996	307	344.996	308	345.996	309	346.996	310	347.996	311	348.996	312	349.996	313	350.996	314	351.996	315	352.996	316	353.996	317	354.996	318	355.996	319	356.996	320	357.996	321	358.996	322	359.996	323	360.996	324	361.996	325	362.996	326	363.996	327	364.996	328	365.996	329	366.996	330	367.996	331	368.996	332	369.996	333	370.996	334	371.996	335	372.996	336	373.996	337	374.996	338	375.996	339	376.996	340	377.996	341	378.996	342	379.996	343	380.996	344	381.996	345	382.996	346	383.996	347	384.996	348	385.996	349	386.996	350	387.996	351	388.996	352	389.996	353	390.996	354	391.996	355	392.996	356	393.996	357	394.996	358	395.996	359	396.996	360	397.996	361	398.996	362	399.996	363	400.996	364	401.996	365	402.996	366	403.996	367	404.996	368	405.996	369	406.996	370	407.996	371	408.996	372	409.996	373	410.996	374	411.996	375	412.996	376	413.996	377	414.996	378	415.996	379	416.996	380	417.996	381	418.996	382	419.996	383	420.996	384	421.996	385	422.996	386	423.996	387	424.996	388	425.996	389	426.996	390	427.996	391	428.996	392	429.996	393	430.996	394	431.996	395	432.996	396	433.996	397	434.996	398	435.996	399	436.996	400	437.996	401	438.996	402	439.996	403	440.996	404	441.996	405	442.996	406	443.996	407	444.996	408	445.996	409	446.996	410	447.996	411	448.996	412	449.996	413	450.996	414	451.996	415	452.996	416	453.996	417	454.996	418	455.996	419	456.996	420	457.996	421	458.996	422	459.996	423	460.996	424	461.996	425	462.996	426	463.996	427	464.996	428	465.996	429	466.996	430	467.996	431	468.996	432	469.996	433	470.996	434	471.996	435	472.996	436	473.996	437	474.996	438	475.996	439	476.996	440	477.996	441	478.996	442	479.996	443	480.996	444	481.996	445	482.996	446	483.996	447	484.996	448	485.996	449	486.996	450	487.996	451	488.996	452	489.996	453	490.996	454	491.996	455	492.996	456	493.996	457	494.996	458	495.996	459	496.996	460	497.996	461	498.996	462	499.996	463	500.996	464	501.996	465	502.996	466	503.996	467	504.996	468	505.996	469	506.996	470	507.996	471	508.996	472	509.996	473	510.996	474	511.996	475	512.996	476	513.996	477	514.996	478	515.996	479	516.996	480	517.996	481	518.996	482	519.996	483	520.996	484	521.996	485	522.996	486	523.996	487	524.996	488	525.996	489	526.996	490	527.996	491	528.996	492	529.996	493	530.996	494	531.996</

## *Classification périodique des éléments (tableau de Mendéléiev).*

# Classification périodique des éléments chimiques

## Propriétés des groupes

Les éléments du groupe **VIII A (18)**, appelés **gaz rares**, sont caractérisés par une couche externe complète ; ceci leur confère une stabilité chimique exceptionnelle.

Les éléments du groupe **I (1) A** ne possèdent qu'un seul électron sur leurs couches externes : ils ont tendance à s'en défaire pour avoir une couche extérieure saturée et donner des ions positifs ou **cations**.

Cette tendance s'étend aussi à tous les éléments de la partie gauche du tableau, appelés **métaux**, qui sont tous donneurs d'électrons.

Les éléments du groupe **VII A (17)** possèdent sept électrons sur leurs couches externes : ils ont tendance à la compléter en captant un électron disponible dans leur voisinage pour donner des ions négatifs ou **anions**.

Cette tendance s'étend aussi à certains éléments de la partie droite du tableau, appelés **non-métaux**, tous accepteurs d'électrons.

Certains éléments situés à la limite entre ces deux zones présentent des caractères mixtes, variables selon le champ électrique auquel ils sont soumis (ils sont semi-conducteurs).

**Remarque :** I 1, II A, ..., VIII A (ancienne notation) et 1,2, ..., 18 (nouvelle notation).

# Plan du cours

## Introduction

## Composition et structure des matériaux

- 2.1 Classification des éléments chimiques
- 2.2 Liaison chimique
- 2.3 Structure des matériaux solides
- 2.4 Défauts dans les solides cristallins

## Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

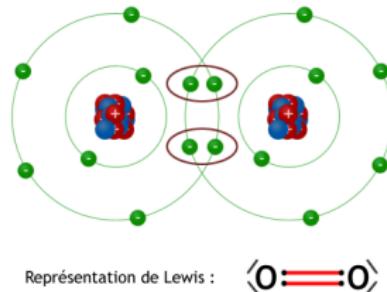
# Liaisons fortes

## Liaison covalente

Elle est assurée par la mise en commun de deux électrons pour compléter la couche externe de chaque atome.

Elle apparaît entre deux atomes de non-métaux (liaison assurée par des électrons de la bande de valence)

**Exemple.** La molécule de dichlore O<sub>2</sub>.

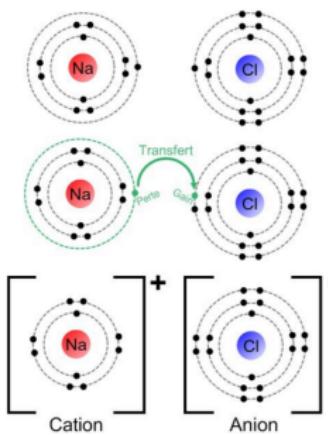


## Liaison ionique

Elle est assurée par le transfert d'un électron d'un atome à l'autre.

Elle apparaît entre un atome d'un métal et un atome d'un non-métal. Après leur liaison, les deux atomes deviennent des ions chargés électriquement.

**Exemple.** Le chlorure de sodium NaCl.



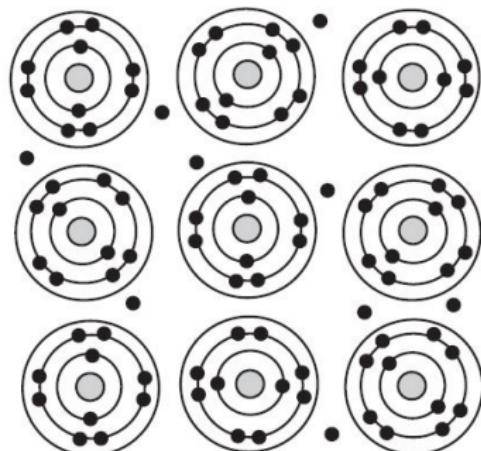
# Liaisons fortes

## Liaison métallique

Elle est assurée par la mise en commun d'électrons de la couche périphérique ; le « gaz » constitué par ces électrons libres et délocalisés assure la cohésion de l'ensemble des cations restants.

Elle apparaît entre les éléments d'un amas d'atomes métalliques (liaison assurée par les électrons de la bande de conduction). Les électrons de la liaison métallique sont mobiles et disponibles pour assurer la circulation éventuelle d'un courant électrique.

**Exemple.** Cristal de sodium Na.



# Liaisons faibles ou secondaires

Ce sont de simples attractions électrostatiques entre charges électriques de signes opposés.

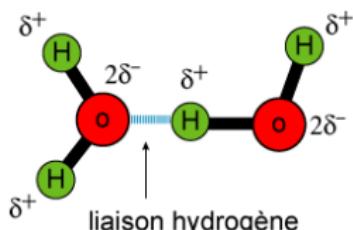
Elles apparaissent entre les pôles + et - de molécules à répartitions de charges inhomogènes ou polarisables.

Elles agissent à plus longue distance, mais avec une intensité plus faible que les liaisons fortes.

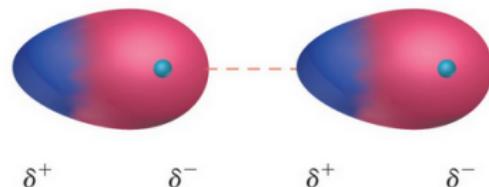
*Exemple :*

- **Liaisons-hydrogène** entre molécules d'eau H<sub>2</sub>O dans la glace.
- **Liaisons de Van der Waals** entre macromolécules dans un polymère.

## Liaison hydrogène



## Liaison de Van der Waals



# Plan du cours

## Introduction

## Composition et structure des matériaux

- 2.1 Classification des éléments chimiques
- 2.2 Liaison chimique
- 2.3 Structure des matériaux solides**
- 2.4 Défauts dans les solides cristallins

## Diffusion à l'état solide

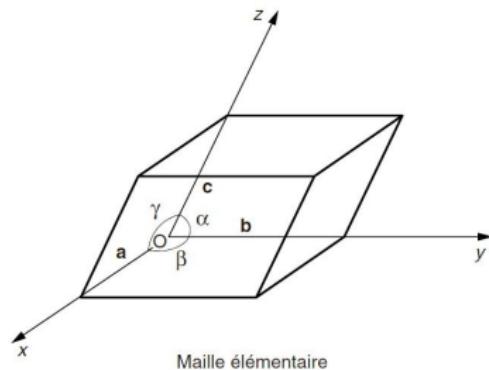
## Propriétés mécaniques

# Structure des matériaux solides

- Dans un solide cristallin, chaque ion ou chaque atome occupe une position bien définie dans l'espace, non seulement par rapport à ses premiers voisins, mais aussi par rapport à tous les autres atomes.
- Existence d'un **ordre à grande distance**.
- Répartition des atomes symétrique  $\Rightarrow$  structure décrite par la translation selon trois axes d'un motif constant.

De façon tout à fait générale, ce motif peut être défini par un parallélépipède :

- trois vecteurs **a**, **b** et **c**,
- porté par trois axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$ ,
- trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$

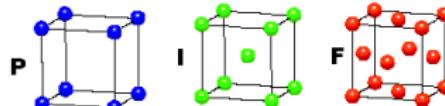


# Structure des matériaux solides

## Les 14 réseaux de Bravais

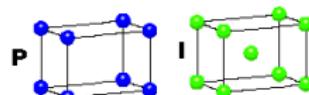
### Cubique

$a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



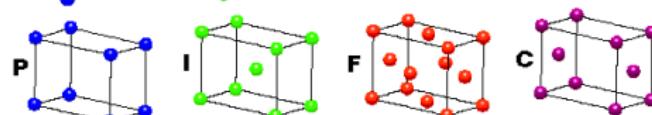
### Quadratique

$a = b \neq c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



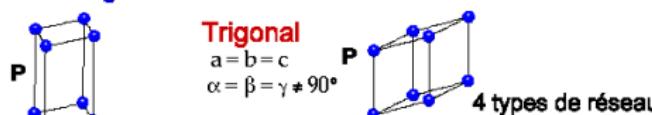
### Orthorhombique

$a \neq b \neq c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



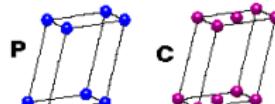
### Hexagonal

$a = b \neq c$   
 $\alpha = \beta = 90^\circ$   
 $\gamma = 120^\circ$



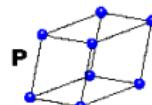
### Monoclinique

$a \neq b \neq c$   
 $\alpha = \gamma = 90^\circ$   
 $\beta \neq 120^\circ$



### Triclinique

$a \neq b \neq c$   
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



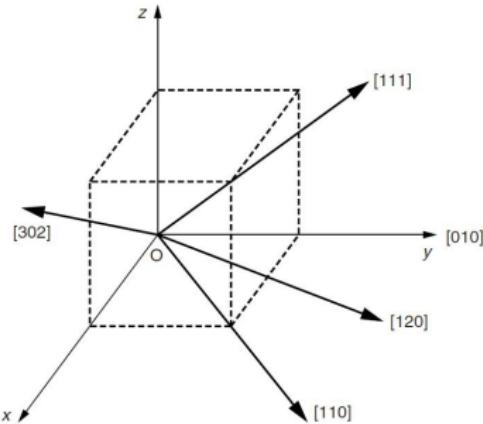
### 4 types de réseau

- P Primitif
  - I centré
  - F toutes faces centrées
  - C 1 face centrée
- + 7 systèmes cristallins  
= 14 réseaux de BRAVAIS

# Repérage des directions et des plans

## Repérage des directions

- **Système d'axe utilisé** : toujours celui correspondant aux trois vecteurs de translation  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  et  $\mathbf{c}$ .
- **Origine** : située à un nœud arbitraire.
- **Direction (ou rangée) réticulaire** désignée par trois indices  $[uvw]$ .  
= Direction d'une droite passant par l'origine et le point de coordonnées  $u$ ,  $v$  et  $w$  (on retient les entiers les plus petits).
- **Indices négatifs** :  $u = 1$ ,  $v = -2$  et  $w = 1 \Rightarrow [1\bar{2}1]$ .



# Repérage des directions et des plans

## Repérage d'un plan

Prenons un nœud du réseau comme origine et considérons un plan réticulaire particulier passant par trois nœuds situés sur les trois axes. **Le plan coupe les trois axes :**

- $A_1(p, 0, 0)$  l'intersection du plan avec l'axe des abscisses,
- $A_2(0, q, 0)$  l'intersection du plan avec l'axe des ordonnées,
- $A_3(0, 0, r)$  l'intersection du plan avec l'axe des cotes.

avec  $p$ ,  $q$  et  $r$  entiers. L'équation de ce plan est

$$\frac{x}{p} + \frac{y}{q} + \frac{z}{r} = 1$$

Équation équivalente si multiplié par le **Plus Petit Commun Multiple (PPCM)** de  $p$ ,  $q$  et  $r$ , pour que l'équation du plan ainsi obtenue devient à coefficients entiers.

On pose donc :

$$h = \frac{\text{PPCM}(p, q, r)}{p} \quad k = \frac{\text{PPCM}(p, q, r)}{q} \quad l = \frac{\text{PPCM}(p, q, r)}{r} \quad \text{avec } p, q \text{ et } r \neq 0$$

L'équation d'un plan réticulaire est donc de la forme :

$$hx + ky + lz = n \text{ avec } h, k \text{ et } l : \text{Indices de Miller et } n = \text{PPCM}(p, q, r)$$

**Remarque 1 :**  $n = 0$  pour les plan qui passe par l'origine.

**Remarque 2 :** Deux plans réticulaires parallèles successifs ont pour équations  $hx + ky + lz = n$  et  $hx + ky + lz = n + 1$

## Repérage des directions et des plans

**Le plan est parallèle à un axe du repère (ex :  $(Oz)$ )** : l'indice de l'axe correspondant (ex :  $l$ ) est nul et 2 points suffisent :

- $A_1(p, 0, 0)$  l'intersection du plan avec l'axe des abscisses,
- $A_2(0, q, 0)$  l'intersection du plan avec l'axe des ordonnées,

avec  $p$ ,  $q$  et  $r$  entiers. L'équation de ce plan est

$$\frac{x}{p} + \frac{y}{q} = 1$$

Équation équivalente si multiplié par le **Plus Petit Commun Multiple (PPCM)** de  $p$  et  $q$ , pour que l'équation du plan ainsi obtenue devient à coefficients entiers.

On pose donc :

$$h = \frac{\text{PPCM}(p, q)}{p} \quad k = \frac{\text{PPCM}(p, q)}{q} \quad l = 0 \quad \text{avec } p \neq 0 \text{ et } q \neq 0$$

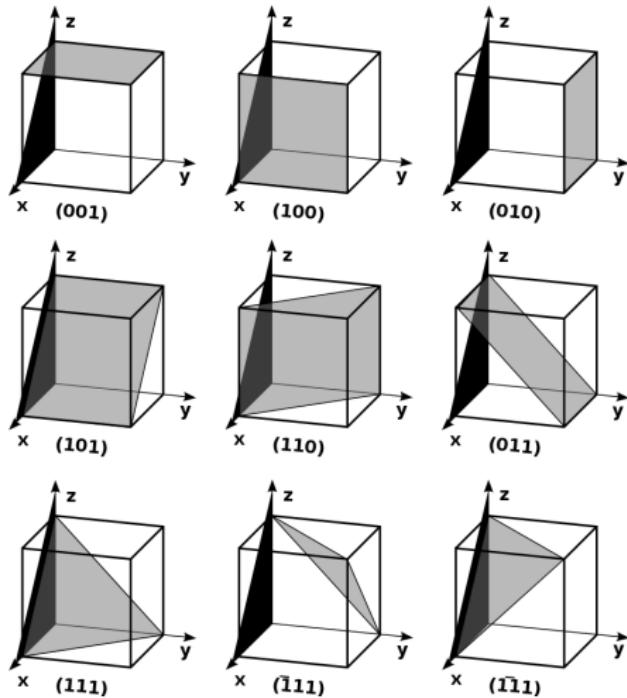
L'équation d'un plan réticulaire est donc de la forme :

$$hx + ky = n \quad \text{avec } h, k \text{ et } 0 : \text{Indices de Miller et } n = \text{PPCM}(p, q)$$

**Le plan est parallèle à un plan du repère (ex :  $(yOz)$ )** : les indices correspondant (ex :  $k$  et  $l$ ) sont nul et 1 point suffit. Ex :  $x = 1$ , les indices de Miller sont (100).

# Repérage des directions et des plans

Exemple de plan réticulaires avec leurs indices de Miller



# Repérage des directions et des plans

## Cas des Cristaux à symétrie cubique

**Cristal à réseau cubique** : les quatre diagonales sont équivalentes, les trois faces du cube sont équivalentes, etc. On peut donc permuter ou prendre les opposés des indices de direction ou de Miller, cela représentera immuablement une direction ou un plan ayant les mêmes propriétés.

- L'ensemble des directions obtenu par permutations ou oppositions est appelé « famille de directions » et noté entre chevrons :  
 $\langle uvw \rangle$  désigne les directions  $[uvw]$ ,  $[u\bar{w}]$ ,  $[\bar{u}vw]$ ,  $[v\bar{w}u]$ ,  $[\bar{w}uv]$ ,  $[\bar{w}\bar{v}u]$  ainsi que toutes leurs combinaisons obtenues en changeant des signes.

**Exemple** :  $\langle 100 \rangle$  désigne les directions  $[100]$ ,  $[\bar{1}00]$ ,  $[010]$ ,  $[0\bar{1}0]$ ,  $[001]$  et  $[00\bar{1}]$ .

- L'ensemble des plans obtenu par permutations ou oppositions est appelé « famille de plans » et noté entre accolades :  
 $\{hkl\}$  désigne les plans  $(hkl)$ ,  $(hlk)$ ,  $(khl)$ ,  $(klh)$ ,  $(lhk)$ ,  $(lkh)$  ainsi que toutes leurs combinaisons obtenues en changeant des signes.

**Exemple** :  $\{100\}$  désigne les plans  $(100)$ ,  $(\bar{1}00)$ ,  $(010)$ ,  $(0\bar{1}0)$ ,  $(001)$  et  $(00\bar{1})$ .

# Repérage des directions et des plans

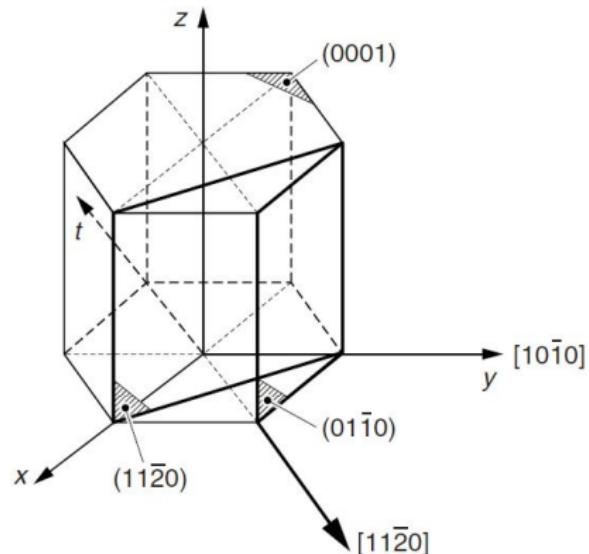
## Cas des Cristaux à symétrie hexagonale

Pour mieux distinguer sa symétrie, les plans sont désignés par quatre indices appelés indices de Miller-Bravais.

On utilise ici **quatre axes** :

- les trois premiers  $a_1 = a$ ,  $a_2$  et  $a_3 = b$  sont dans le plan de base et à  $120^\circ$
- le quatrième axe  $a_4$  est normal au plan de base
- Les indices sont notés  $h, k, i, l$  et obtenus de la même façon que les indices de Miller ; on notera que les trois premiers indices ne sont pas indépendants :

$$i = -(k + h).$$



# Repérage des directions et des plans

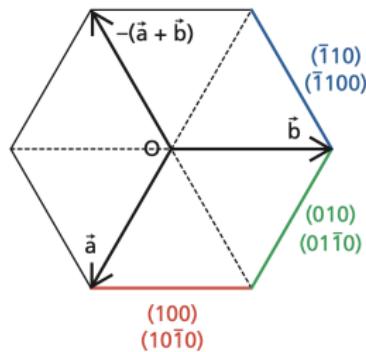
## Cas des Cristaux à symétrie hexagonale (suite 1)

Ce schéma à quatre indices pour l'étiquetage des plans dans un réseau hexagonal rend apparentes les symétries de permutation par rapport à ( $Oz$ ).

Par exemple, la similitude entre  $(110) \equiv (1\bar{1}0)$  et  $(1\bar{2}0) \equiv (1\bar{2}\bar{1}0)$  est plus évidente lorsque l'indice redondant est affiché. Cela donne la famille de plans  $\{1120\}$  (6 plans dans la maille).

Cette notation permet d'appliquer des permutations circulaires d'indices pour définir des familles de plans comme dans le cas de la maille cubique (mais seulement sur les trois premiers indices  $h$ ,  $k$  et  $i$ )

**Exemple :**  $\{1120\}$ ,  $\{0001\}$  (1 plan dans la maille),  $\{1100\}$  (3 plans dans la maille, cf. figure ci-dessous)



**Figure.** En notation à trois indices,  $(100)$  devient  $(010)$  puis  $(1\bar{1}0)$  dans les rotations autour de l'axe 3 ou 6; en notation à quatre indices,  $(10\bar{1}0)$  devient la famille  $(01\bar{1}0)$  puis  $(\bar{1}100)$  dans les rotations autour de l'axe 3 ou 6.

# Repérage des directions et des plans

## Cas des Cristaux à symétrie hexagonale (suite 2)

Pour les rangée on va passer d'une représentation à 4 indices également :

$$\vec{R} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} = A_1\vec{a} + A_2\vec{b} + A_3\vec{t} + A_4\vec{c}$$

avec  $\vec{a} + \vec{b} + \vec{t} = \vec{0}$

$[uvw]$  : indices de Miller

$$A_1 = \frac{2u - v}{3}$$

$$A_2 = \frac{2v - u}{3}$$

$$A_3 = -(A_1 + A_2)$$

$$A_4 = w$$

⇒ Indices de Miller-Bravais :

$$[UVTW] \text{ avec } U = nA_1, V = nA_2, T = nA_3 \text{ et } W = nA_4 \text{ et } n = \text{PPCM}\left(\frac{1}{A_1}, \frac{1}{A_2}, \frac{1}{A_3}, \frac{1}{A_4}\right)$$

Miller	Miller-Bravais	Miller	Miller-Bravais
[100]	[2110]	[010]	[1210]
[110]	[1120]	[1̄10]	[1100]
[001]	[0001]	[101]	[2113]
[011]	[1213]	[111]	[1123]
[210]	[1010]	[120]	[0110]
[211]	[1011]	[112]	[1126]

## Repérage des directions et des plans

- Indice de Miller :  $[uvw] = [100]$  :

$$A_1 = \frac{2}{3}$$

$$A_2 = -\frac{1}{3}$$

$$A_3 = -\frac{1}{3}$$

$$A_4 = 0$$

$$\text{PPCM} \left( \frac{3}{2}, -3, -3 \right) = 3 \quad \Rightarrow \text{Indice de Miller-Bravais : } [2\bar{1}\bar{1}0]$$

- Indice de Miller :  $[uvw] = [101]$  :

$$A_1 = \frac{2}{3}$$

$$A_2 = -\frac{1}{3}$$

$$A_3 = -\frac{1}{3}$$

$$A_4 = 1$$

$$\text{PPCM} \left( \frac{3}{2}, -3, -3, 1 \right) = 3 \quad \Rightarrow \text{Indice de Miller-Bravais : } [2\bar{1}\bar{1}3]$$

# Structures cristallines des métaux

**Liaisons métalliques** : liaisons moyennement fortes et non directionnelles.

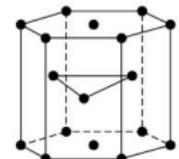
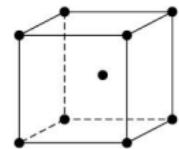
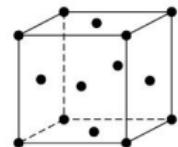
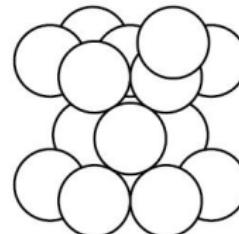
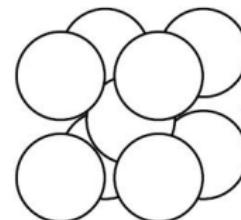
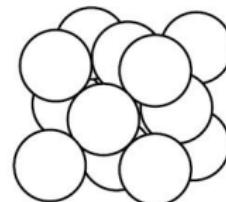
Atomes entourer d'un grand nombre de premiers voisins (de 8 à 12) :

⇒ ensembles compacts

⇒ densité élevée des métaux

Les métaux se limitent aux trois systèmes suivants :

- **Assemblages compacts** : cubique à faces centrées (CFC) et hexagonal compact (HC)
- **Assemblage non compact** : cubique centré (CC)



## Sites dans les réseaux cristallins

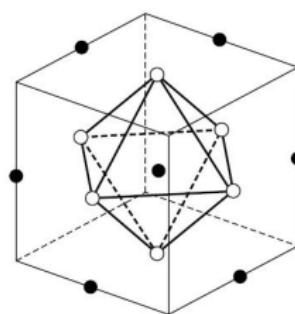
Dans un réseau cristallin métallique dont les atomes sont assimilés à des sphères dures, il existe des espaces libres laissés entre ces atomes ; ces espaces sont appelés **sites**.

Ils sont importants car, comme nous le verrons ultérieurement, c'est dans ces régions que pourront se glisser des ions de faibles dimensions (**interstitiels**).

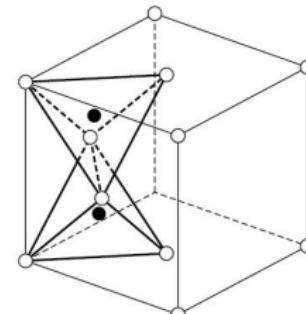
Les atomes voisins de ces sites forment un polyèdre.

Exemples :

- système cubique simple, le site situé au centre du cube est appelé **site cubique**.
- système cubique à faces centrées, on trouvera des sites **octaédriques** et **tétraédriques**.



(a)



(b)

# Quelques définitions

## Coordinence

La **coordinence** d'un atome (ou d'un ion) au sein d'un réseau cristallin est le nombre de plus proches voisins que possède cet atome (ou cet ion).

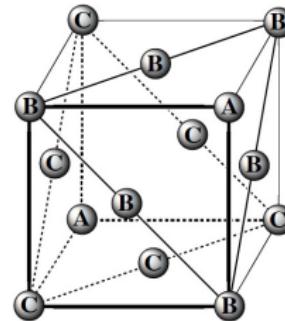
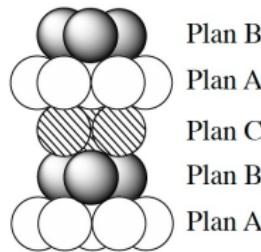
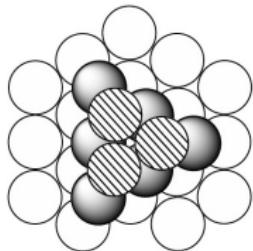
**Remarque :** *Dans un métal pur, tous les atomes possèdent la même coordinence, mais ce n'est pas le cas dans un alliage ou un cristal ionique, dans lesquels les atomes ou les ions peuvent avoir des coordinences différentes.*

## Compacité

La **compacité** d'un solide cristallisé est la fraction de volume occupée par la matière en considérant les atomes et les ions comme des sphères dures :

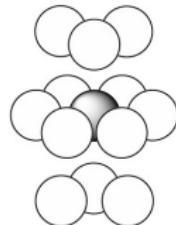
$$C = \frac{\text{volume occupé par les atomes}}{\text{volume de la maille}}$$

## Assemblages compacts - Réseau CFC



### Coordinence

$$M_{CFC} = 12$$



### Compacité

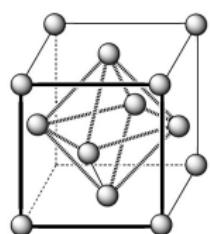
Trois atomes sont accolés sur la diagonale d'une face du cube

$$C_{CFC} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,74$$

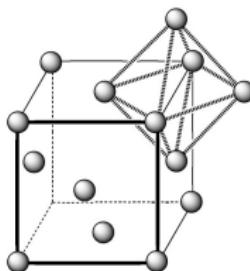
# Assemblages compacts - Réseau CFC

## Sites cristallographiques

### Site octaédrique

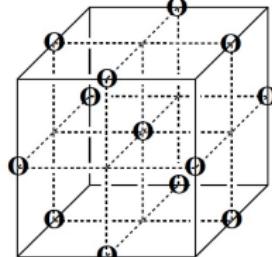
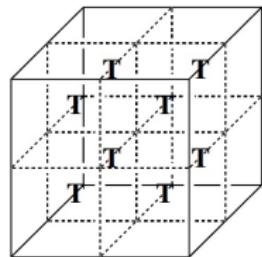
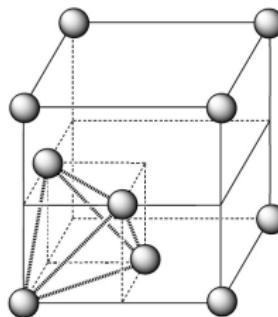


Site octaédrique central



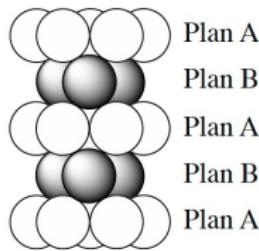
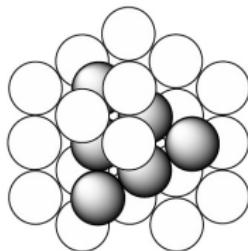
Site octaédrique latéral

### Site tétraédrique



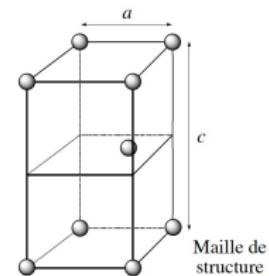
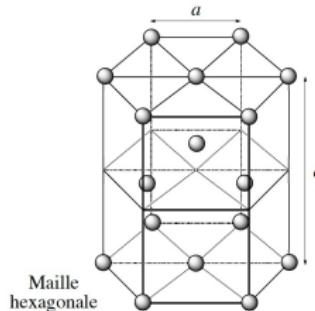
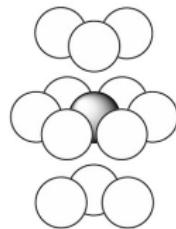
- $12 \times \frac{1}{4} + 1 = 4$  sites octaédriques
- 8 sites tétraédriques

# Assemblages compacts - Réseau HC



**Coordinence**

$$M_{HC} = 12$$



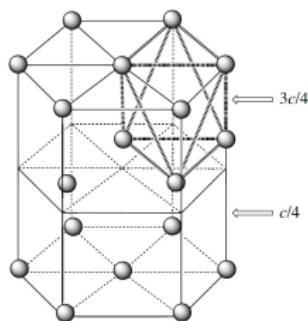
**Compacité**  
Identique à celle de la maille CFC

$$C_{HC} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,74$$

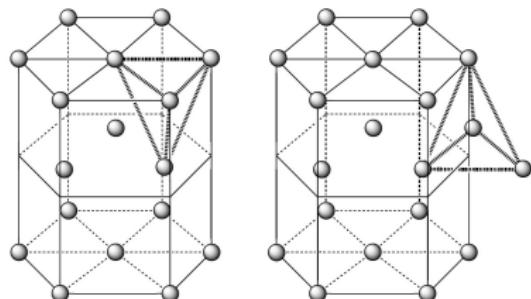
# Assemblages compacts - Réseau HC

## Sites cristallographiques

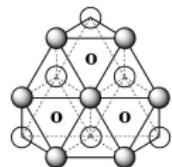
### Site octaédrique



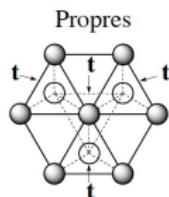
### Site tétraédrique



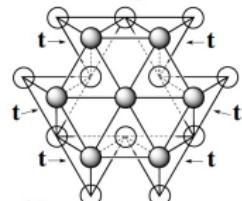
### Sites octaédriques



### Sites tétraédriques Propres



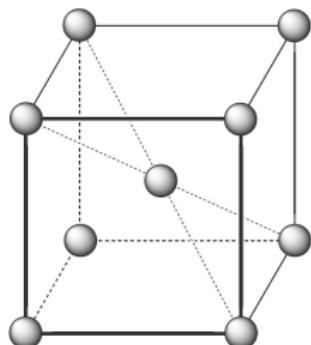
### Partagés



- Atomes formant la base de la maille (plan A)
- Atomes du plan B

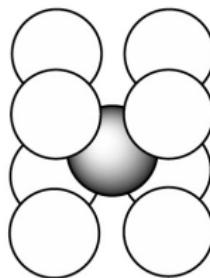
- 6 sites octaédriques
- $2 \times 1 + 6 \times 1 + 12 \times \frac{1}{3} = 12$  sites tétraédriques par maille hexagonale

# Assemblage non compact - Réseau CC



Coordinence

$$M_{CC} = 8$$



Compacité

Trois atomes sont accolés sur la diagonale du cube

$$C_{CC} = \frac{\sqrt{3}\pi}{8} \approx 0,68$$

# Transformations allotropiques

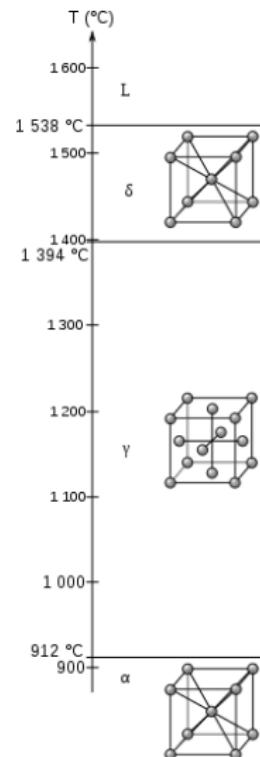
Selon la température ou la composition, les métaux peuvent cristalliser dans des systèmes différents. Par exemple :

- Le fer pur cristallise dans le système CC jusqu'à 910 °C, dans le système CFC entre 910 et 1 394 °C et de nouveau dans le système CC au-dessus de 1 394 °C (*cf. figure ci-contre*).

Le passage d'un système à l'autre au chauffage ou au refroidissement est appelé **transformation allotropique** ou **transformation de phase**.

Cette transformation est due à un déplacement des atomes à l'état solide, à la suite de **mécanismes de diffusion**.

Ces transformations allotropiques entraînent dans tous les cas des **changements de volume**.



# Structures cristallines des principaux métaux

## Paramètre de maille

### Structure

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Li	Be											B
cc	hc											
Na	Mg											Al
cc	hc											cfc
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga
cc	cfc	hc	hc	cc	cc	-	cc	hc	cfc	cfc	hc	-
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In
cc	cfc	hc	hc	cc	cc	hc	hc	cfc	cfc	cfc	hc	-
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl
cc	cc	-	hc	cc	cc	hc	hc	cfc	cfc	cfc	-	hc

Métaux	Structures	Paramètres (nm)	
		a	c
Fer $\alpha$	CC	0,287	
Fer $\gamma$	CFC	0,366	
Aluminium	CFC	0,405	
Chrome	CC	0,288	
Nickel	CFC	0,352	
Cuivre	CFC	0,361	
Magnésium	HC	0,321	0,521
Molybdène	CC	0,315	
Tungstène	CC	0,316	
Titane $\alpha$	HC	0,295	0,468
Titane $\beta$	CC	0,330	
Zirconium $\alpha$	HC	0,323	0,515
Zirconium $\beta$	CC	0,361	
Or	CFC	0,408	
Argent	CFC	0,409	
Palladium	CFC	0,389	
Plomb	CFC	0,495	
Platine	CFC	0,392	
Rhodium	CFC	0,380	
Iridium	CFC	0,384	
Osmium	HC	0,274	0,432
Ruthénium	HC	0,271	0,428

# Alliages (solutions solides)

## Définition d'un alliage

Produit résultant du mélange d'un métal avec d'autres éléments métalliques ou non

## Quelques alliages

- **Acier** : Fer allié à une quantité de carbone inférieure à 1,7 %.
- **Acier inoxydable** : Acier contenant du chrome pour résister aux agents de corrosion.
- **Acier rapide** : Acier très dur contenant du tungstène, du chrome, du vanadium et du molybdène, employé pour la fabrication des outils.
- **Alpax** : Alliage d'aluminium et de silicium qui se moule très facilement.
- **Amalgame** : Alliage du mercure avec un autre métal.
- **Bronze** : Alliage de cuivre et d'étain (4 à 22 %).
- **Cupro-nickel** : Alliage de cuivre et de nickel utilisé pour la fabrication des pièces de monnaie.
- **Cupro-plomb** : Alliage de cuivre et plomb.
- **Fonte** : Alliage de fer et de carbone (1.7 à 6.67%) obtenu dans les hauts fourneaux. Les fontes grises (3,5 à 6 % de carbone) sont relativement faciles à usiner ; les fontes blanches (2,5 à 3,5 % de carbone) sont destinées à la fabrication du fer et de l'acier.

# Alliages (solutions solides)

On considère un mélange de deux constituants A et B à l'état solide.

## Concentration atomique ou molaire

La concentration molaire ou atomique de chaque constituant est donnée par :

$$x_A = \frac{N_A}{N} = \frac{N_A/\mathcal{N}}{N/\mathcal{N}} = \frac{n_A}{n}$$

$$x_B = \frac{N_B}{N} = \frac{N_B/\mathcal{N}}{N/\mathcal{N}} = \frac{n_B}{n}$$

Avec  $N_A$  (resp.  $n_A$ ) le nombre d'atomes (resp. la quantité de matière) de A dans le mélange ;  $N_B$  (resp.  $n_B$ ) le nombre d'atomes (resp. la quantité de matière) de B dans le mélange et  $N = N_A + N_B$  (resp.  $n = n_A + n_B$ ) le nombre total d'atomes du mélange (resp. la quantité de matière totale).  $\mathcal{N}$  est le nombre d'Avogadro  $\simeq 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

## Concentration massique

La concentration massique de chaque constituant est donnée par :

$$u_A = \frac{m_A}{m}$$

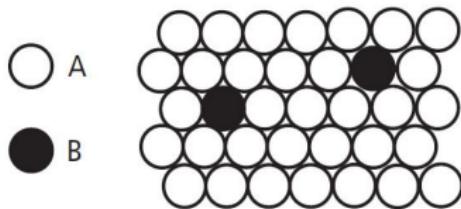
$$u_B = \frac{m_B}{m}$$

Avec  $m_A$  la masse de A dans le mélange ;  $m_B$  la masse de B dans le mélange et  $m = m_A + m_B$  la masse totale du mélange.

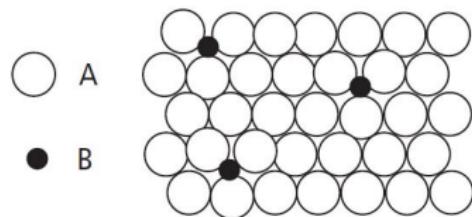
## Alliages (solutions solides)

- Si  $x_A \gg x_B$ , les atomes B se disposent en général aléatoirement en **solution solide** dans le cristal de A. L'élément B est le **soluté**, A est le **solvant**.
- Si les rayons atomiques des deux types d'atomes sont voisins ( $r_B \approx r_A$ ), les atomes B prennent la place d'atomes A dans le réseau cristallin de A; on obtient une **solution solide de substitution**.
- Si  $r_B \ll r_A$ , les atomes B peuvent s'insérer dans les interstices ou **sites interstitiels** du réseau A, entre les atomes A en place; on obtient une **solution solide d'insertion**. Les atomes de petite taille peuvent facilement se placer en solution solide d'insertion dans de nombreux réseaux cristallins.

Qu'elles soient de substitution ou d'insertion, les solutions solides sont souvent limitées à une concentration de soluté appelée **limite de solubilité**.



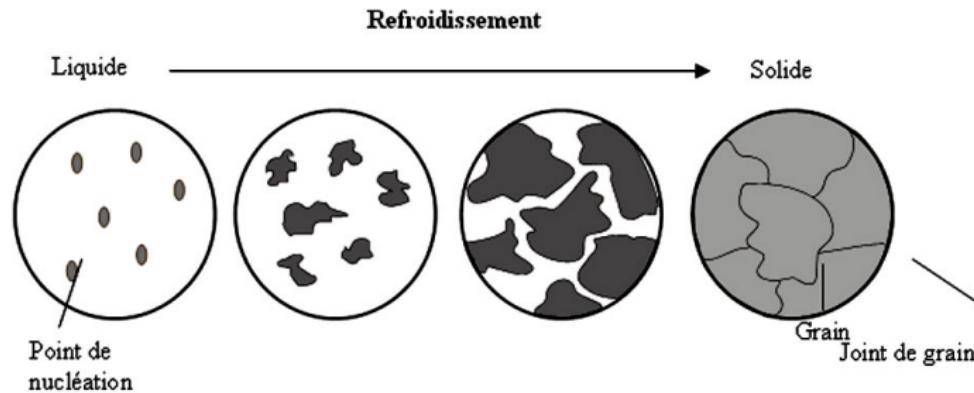
*Schéma à deux dimensions d'une solution solide de substitution de B dans A*



*Schéma à deux dimensions d'une solution solide d'insertion de B dans A.*

## Notion de grain

- Tout ce que nous venons de dire concerne un cristal (en particulier un cristal métallique).
- Les métaux industriels sont en général formés à un moment donné à partir de liquide ; dans ce cas, le solide apparaît sous forme de **germes**.
- Tous ont bien la structure cristalline du solide, tel que définie ci-dessus, mais n'ont aucune raison d'avoir la même orientation dans l'espace ; ainsi chaque germe donnera lieu à un cristal d'orientation variable, appelé **grain**.



# Plan du cours

## Introduction

## Composition et structure des matériaux

- 2.1 Classification des éléments chimiques
- 2.2 Liaison chimique
- 2.3 Structure des matériaux solides
- 2.4 Défauts dans les solides cristallins

## Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

## Défauts ponctuels

**Lacune.** Site vide à un emplacement où devrait normalement se trouver un atome.

**Interstitiel.** Atome excédentaire disposé en un emplacement normalement inoccupé dans le cristal.

Sauf au zéro absolu, les **lacunes** et les **intersticiels** dans un cristal sont produits par l'agitation thermique (on parle alors d'**auto-intersticiels**).

Leur concentration d'équilibre croît avec la température. Si  $n$  est le nombre de défauts (lacunes ou intersticiels) et  $N$  le nombre total de sites du cristal, la concentration en défaut est donnée par :

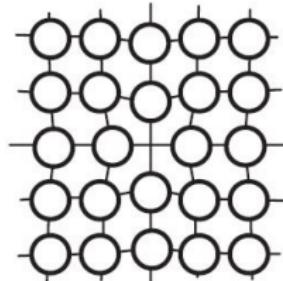
$$C_{eq} = \frac{n}{N} = A \exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right)$$

avec  $A$  constante sans dimension,  $E_f$  énergie de formation du défaut ponctuel (J/mole).

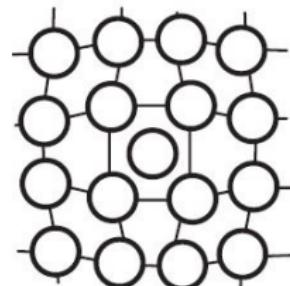
Les  $E_f$  intersticiels  $\approx 4 E_f$  lacunes  $\Rightarrow C_{eq}$  lacunes  $> C_{eq}$  intersticiels.

Pour  $T \approx T_{fus}$ ,  $C_{eq} \approx 10^{-4}$  à  $10^{-3}$ .

Lacune



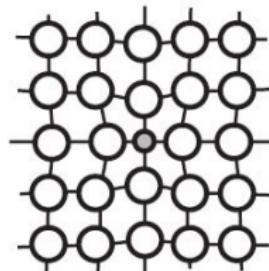
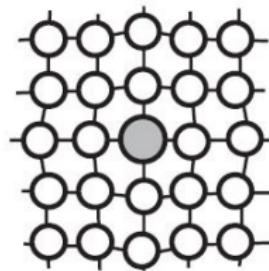
Auto-interstitiel



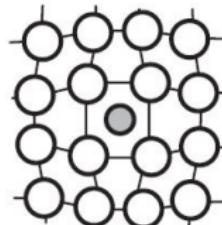
## Défauts ponctuels

Les **atomes d'impuretés en solution solide** constituent également des défauts ponctuels.

- deux exemples d'atomes d'impuretés en substitution dans un cristal :



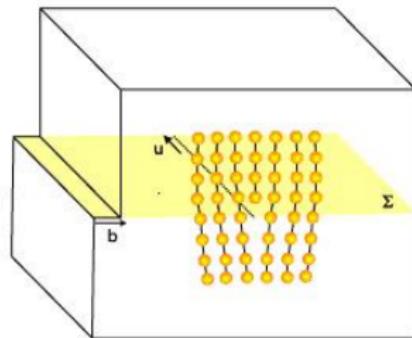
- atome d'impureté en insertion dans un cristal (ou **hétéro-interstitiel**) :



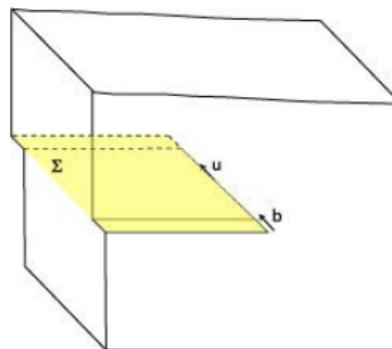
## Défauts linéaires

Ils constituent des sortes de « plis » des plans atomiques dans le cristal, dont l'amplitude, égale à un nombre entier de distances interatomiques, permet de retrouver le cristal parfait à longue distance. On les appelle **dislocations**. Il existe deux types de dislocation élémentaire :

- Une **dislocation coin** est le défaut linéaire résultant de l'absence d'un demi-plan atomique (en fait, les demi-plans sont décalés d'un côté). La dislocation est constituée par la ligne sur laquelle se termine le plan supplémentaire. Au voisinage de la dislocation, le cristal est déformé entraînant des contraintes de compression d'un côté et de tension de l'autre.
- Une **dislocation vis** est le résultat d'un cisaillement du réseau parallèlement à la ligne de dislocation. Ici encore, cela entraîne une déformation locale du réseau en forme d'hélice le long de la dislocation.



(a) Dislocation coin



(b) Dislocation vis

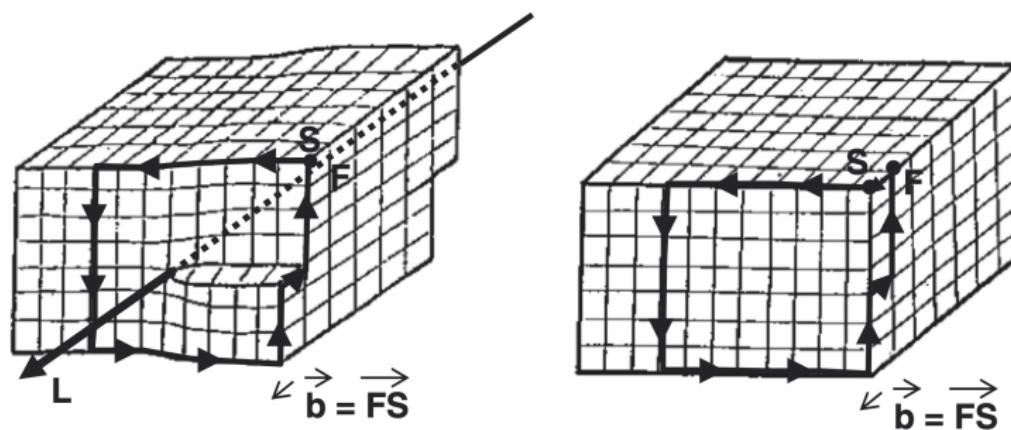
# Défauts linéaires

## Vecteur de Bürgers

Une dislocation est caractérisée par sa direction et son **vecteur de Bürgers**  $\mathbf{b}$ . Ce dernier est défini comme le défaut de fermeture d'un circuit tracé autour de la dislocation dans un plan perpendiculaire à celle-ci. Dans un cristal parfait, un tel circuit se refermerait sur lui-même. On constate que le vecteur de Bürgers est :

- perpendiculaire à la dislocation dans le cas d'une **dislocation coin**,
- parallèle à la dislocation dans le cas d'une **dislocation vis**.

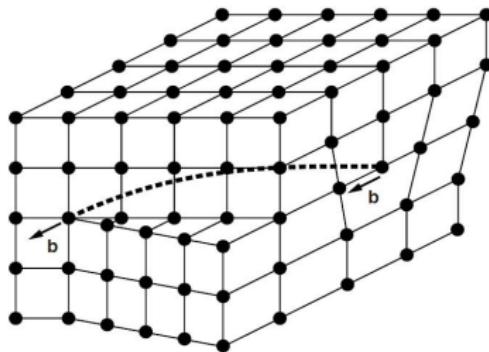
Ce vecteur de Bürgers ne peut prendre que des longueurs correspondant à des distances entre deux atomes ou nœuds du réseau.



## Défauts linéaires

Dans les cristaux réels, les dislocations ne sont en général pas rectilignes.

Comme le vecteur de Burgers est le même tout le long de la dislocation, on trouvera des parties de dislocation purement coin ( $b$  perpendiculaire à la dislocation), des parties purement vis ( $b$  parallèle à la dislocation) ou mixtes.



Burgers a défini une méthode qui permet de préciser la norme, la direction et le sens du vecteur de Burgers.

On utilise dans ce cours les conventions **FSRH** (acronyme de *Final Start Right Hand*).

# Défauts linéaires

## Réseau de Franck

À l'intérieur d'un cristal, les dislocations forment donc un réseau tridimensionnel appelé **réseau de Frank**

- La densité  $\rho$  de dislocations contenue dans un cristal se mesure par la longueur des lignes de dislocations contenues dans un volume donné du cristal, en  $\text{cm}/\text{cm}^3$  ( $= \text{cm}^{-2}$ ).
- Un cristal brut contient une densité de dislocations de  $10^2$  à  $10^3 \text{ cm}/\text{cm}^3$ , produites lors de la formation du cristal en raison de perturbations thermiques ou mécaniques.
- Un cristal métallique déformé plastiquement (**écrouissage**) peut contenir une densité de dislocations allant jusqu'à  $10^9$  ou  $10^{12} \text{ cm}/\text{cm}^3$ , car la déformation plastique s'accompagne d'une multiplication rapide du nombre de dislocations. Le réseau de Frank devient alors extrêmement serré, avec des lignes de dislocations séparées par seulement quelques milliers de distances interatomiques.

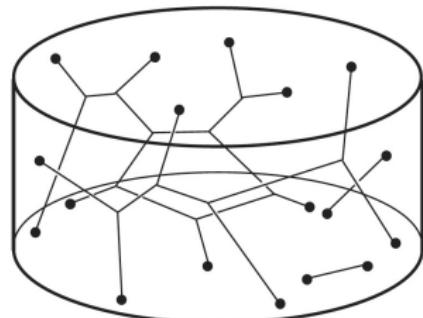


Schéma de réseau de Frank constitué par des dislocations à l'intérieur d'un cristal.

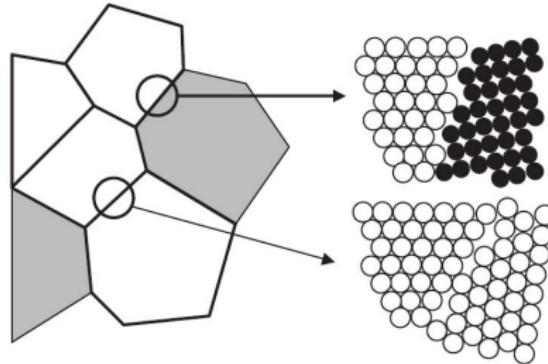
# Défauts surfaciques

## Joint de grains, joint de phases

Sauf élaboration particulière, la quasi-totalité des solides cristallins est constituée d'un agglomérat de cristaux, ou **grains** accolés avec des orientations différentes.

La taille des grains varie de quelques microns à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration.

- Si ces cristaux sont de **nature identique**, leur surface d'accolement est appelée **joint de grains**.
- Si les cristaux sont de **nature différente**, leur surface d'accolement est appelée **joint de phases**.

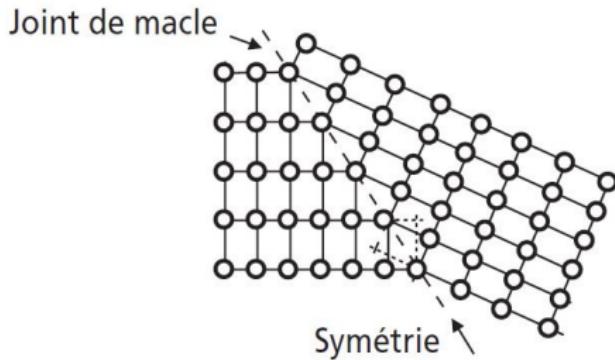


# Défauts surfaciques

## Joint de macle

Il peut exister des plans cristallographiques particuliers autorisant le cristal à se disposer indifféremment dans le prolongement de son orientation initiale ("**cristal mère**") ou en position symétrique par rapport à ce plan particulier ("**cristal maclé**").

Les joints de macle sont aisément reconnaissables à leur tracé rectiligne.



## Défauts volumiques

**Porosités et cavités diverses :** parmi les défauts en volume on compte aussi des porosités et cavités diverses : on retrouve sous cette étiquette différents défauts :

- des bulles de gaz formées au cours de la solidification d'un métal sursaturé en ce gaz et non refermées par une déformation à chaud ;
- des pores subsistant entre les grains d'un mélange soumis au frittage ;
- des cavités engendrées par une agglomération de lacunes (notamment sous irradiation).

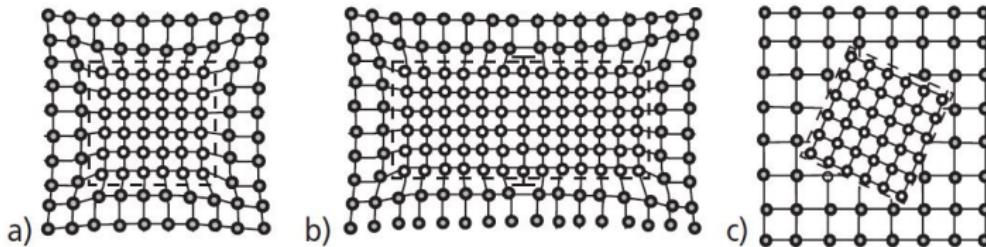
## Inclusion et Précipité

**Inclusion :** elles sont formées involontairement et sont constituées, généralement, par des résidus de l'élaboration du métal (ces inclusions sont donc souvent des oxydes, des sulfures...).

## Défauts volumiques

**Précipité** : ils sont formés volontairement pour agir sur les propriétés d'un métal et que l'on classe en :

- précipités cohérents pour lesquels il existe une relation d'orientation cristallographique définie entre la particule précipitée et la matrice environnante
- précipités incohérents : les particules précipitées ont une structure différente de celle de la matrice



*a) Précipité cohérent : continuité de certains plans cristallins entre le précipité et la matrice.*

*b) Précipité semi-cohérent : les déformations sont relaxées par la présence de dislocations aux interfaces. c) Précipité incohérent.*

# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

## Diffusion à l'état solide

- 3.1 Mécanisme de la diffusion
- 3.2 Lois de Fick
- 3.3 Coefficient de diffusion

Propriétés mécaniques

# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

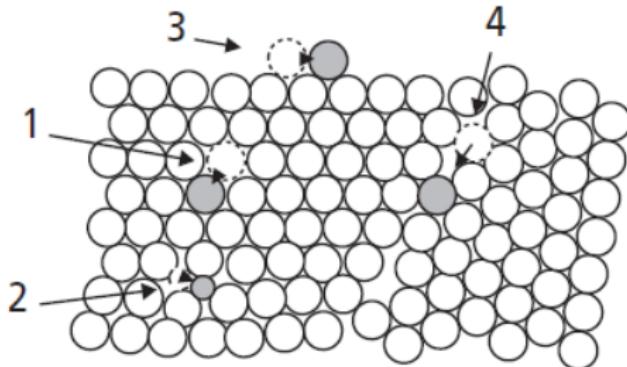
## Diffusion à l'état solide

- 3.1 Mécanisme de la diffusion
- 3.2 Lois de Fick
- 3.3 Coefficient de diffusion

Propriétés mécaniques

Sous l'effet de l'**agitation thermique**, les atomes d'un solide peuvent effectuer des **sauts d'un site à un site voisin** au sein d'un solide, ce qui provoque leur migration progressive.

Les déplacements au sein du cristal, par mécanisme lacunaire ou interstitiel, sont moins rapides que ceux qui peuvent s'effectuer en surface ou dans les joints.



Mécanismes de diffusion les plus fréquents dans un solide cristallin :

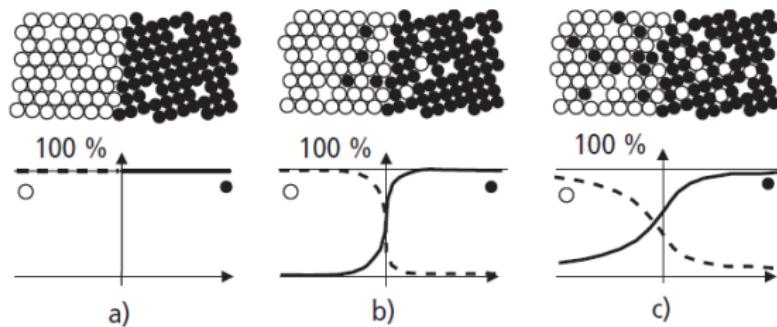
- 1** Mécanisme lacunaire ;
- 2** mécanisme interstitiel (envisageable uniquement pour des solutés de petite taille) ;
- 3** diffusion superficielle ;
- 4** diffusion dans un joint de grains.

## Deux types de diffusion

- **Autodiffusion** : déplacement des atomes d'un élément pur ou majoritaire.
- **Hétérodiffusion** pour le déplacement des atomes d'un **soluté** au sein d'un **solvant**.

Dans tous les matériaux, l'agitation thermique et la mobilité atomique qu'elle entraîne commencent à avoir des effets perceptibles au-dessus d'une certaine fraction de la **température absolue de fusion**  $T_F$  du matériau considéré :

- $T > 0.4 \text{ à } 0.5 \times T_F$  pour l'autodiffusion dans les éléments purs ;
- $T > 0.5 \text{ à } 0.7 \times T_F$  pour l'hétérodiffusion dans les solides contenant plusieurs types d'atomes.



*Mise en contact de deux solides de nature chimique différente. Interdiffusion progressive de deux solides purs et profils de concentration correspondants.*

a)  $t = 0$ ; b)  $t_1 > 0$ ; c)  $t_2 > t_1$ .

# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

## Diffusion à l'état solide

- 3.1 Mécanisme de la diffusion
- 3.2 Lois de Fick
- 3.3 Coefficient de diffusion

Propriétés mécaniques

## Première loi de Fick

La **première loi de Fick** énonce que le **flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration** : lorsqu'il existe, dans une phase, un **gradient de concentration**, la mobilité des atomes ou des molécules entraîne un **flux de matière dans la direction du gradient**, ce qui tend à diminuer l'enthalpie libre du système et à égaliser les concentrations.

Mathématiquement, première loi de Fick s'exprime de la manière suivante :

- soit un milieu B dans lequel se trouve une espèce chimique A, soit une surface S ;
- si  $C_A(x, y, z, t)$  est la concentration de A (exprimée en moles par  $\text{m}^3$  en un point  $(x, y, z)$  donné et à un instant  $t$  donné) ;
- on appelle  $\vec{j}_A$  ( $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) le **vecteur densité de courant de particules** de A ;
- la première loi de Fick s'écrit :

$$\vec{j}_A = -D_{AB} \cdot \vec{\nabla} C_A$$

La grandeur  $D_{AB}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) est le **coefficent de diffusion** de A dans le milieu B considéré ; il dépend de la température, du milieu et de A.

## Première loi de Fick

À une dimension (par exemple en se plaçant sur l'axe des  $x$ ), cette équation devient :

$$j_{A_x} = -D_{AB} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial x}$$

Ce vecteur donne accès au flux de particules de A à travers une surface S quelconque, c'est-à-dire le nombre de particules de A traversant cette surface par unité de temps : si on note  $J_A$  ce flux, cela donne :

$$J_A = \iint_S \vec{j}_A \cdot d\vec{S} \quad \text{en mol/s}$$

### Remarque

Dans les ouvrages sur les matériaux, on considère souvent une diffusion à une dimension (par exemple selon  $x$ ) et on confond la composante du **vecteur densité de courant de particules**  $j_{A_x}$  (en mol/m<sup>2</sup>/s) et le flux de particules  $J_A$  (en mol/s).

## Seconde loi de Fick

La **loi de la conservation des espèces** indique que l'**opposé de la variation par unité de temps de la quantité de particules A** :

$$-\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V C_A \cdot dV$$

dans un volume donné V est égale au **flux sortant**

$$\iint_S \vec{j}_A \cdot d\vec{S}$$

du vecteur densité de courant de particules  $\vec{j}_A$  à travers la surface fermée S délimitant le volume V. On obtient la **deuxième loi de Fick** en identifiant les intégrants ci-dessous :

$$-\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V C_A \cdot dV = \iint_S \vec{j}_A \cdot d\vec{S} = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_A dV$$

La deuxième égalité ci-dessus est due au **théorème de flux-divergence**, dit de **Green-Ostrogradsky**, et le signe moins provient du fait que la concentration diminue quand le flux sortant augmente. On a donc :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_A = 0$$

## Seconde loi de Fick

À une dimension, l'équation devient :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{\partial j_{A_x}}{\partial x} = 0.$$

En utilisant la première loi de Fick on obtient :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-D_{AB} \cdot \vec{\nabla} C_A) = 0.$$

Si coefficient de diffusion  $D_{AB}$  est constant, l'équation précédente s'écrit finalement :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} - D_{AB} \Delta C_A = 0,$$

qui devient à une dimension :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} - D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = 0$$

L'équation ci-dessus constitue la **deuxième loi de Fick**, elle prend la forme d'une **équation de diffusion** (comme celle de la chaleur par exemple) qui se caractérise par la présence d'une dérivée première par rapport au temps et de dérivées seconde (représenté par l'opérateur Laplacien  $\Delta$ ) par rapport à l'espace.

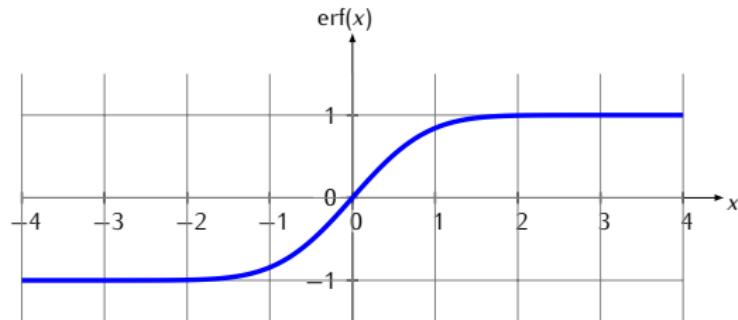
## Seconde loi de Fick

La seconde loi de Fick, permet de calculer les concentrations en tout point et à tout instant,  $C_A(x, t)$ .

En utilisant le changement de variable  $u = \frac{x}{2\sqrt{D_{AB}t}}$ , on montre que la solution de la deuxième loi de Fick dans l'espace semi-infini  $x > 0$  s'écrit sous la forme :

$$C_A(x, t) = C_A(0, t) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{AB}t}} \right) \right] \quad (1)$$

où  $\operatorname{erf}(x)$  est la fonction erreur De plus, on considère que la concentration de A dans B tend vers 0 quand  $x$  tend vers  $+\infty$ .



# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

## Diffusion à l'état solide

- 3.1 Mécanisme de la diffusion
- 3.2 Lois de Fick
- 3.3 Coefficient de diffusion

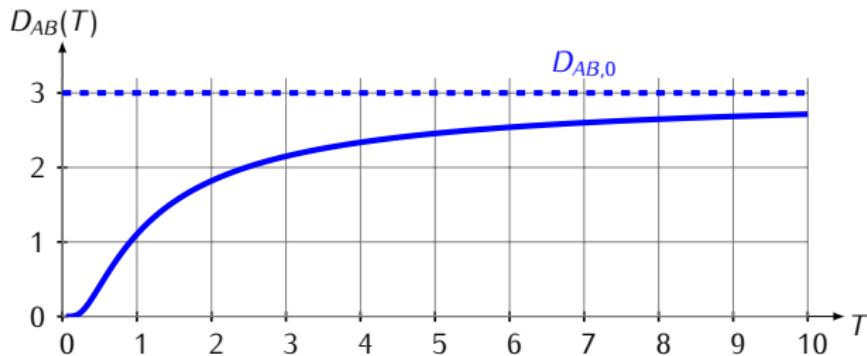
Propriétés mécaniques

## Coefficient de diffusion

La variation du coefficient de diffusion  $D_{AB}$  obéit à la loi d'Arrhenius :

$$D_{AB} = D_{AB,0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

- $D_{AB,0}$  : constante indépendante de la température et de la concentration mais fonction du système cristallin, des liaisons interatomiques, de l'ensemble de la structure
- $E_a$  : énergie d'activation (en J/mol) de la diffusion concernée
- $T$  : température absolue (en K).



# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

- 4.1 Courbes de traction
- 4.2 Déformation élastique des solides
- 4.3 Déformation plastique des solides

# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

4.1 Courbes de traction

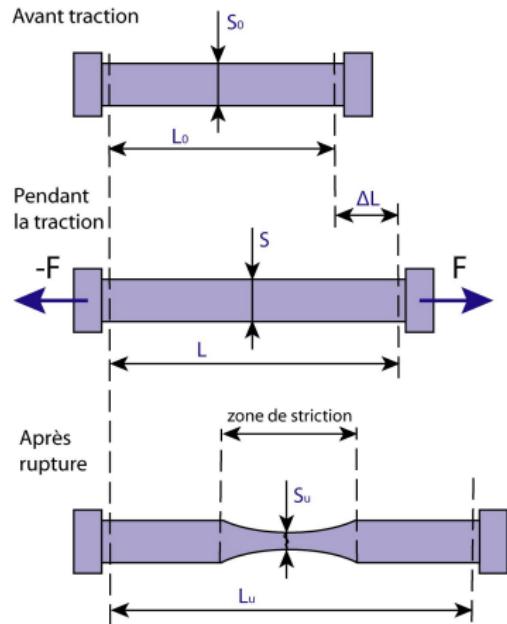
4.2 Déformation élastique des solides

4.3 Déformation plastique des solides

# Essai de traction uni-axiale

- Moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée.
- Éprouvettes en forme de barreau cylindrique ou prismatique avec une partie centrale calibrée à section constante  $S_0$  et longueur  $L_0$  raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante.
- La machine impose un allongement croissant à l'éprouvette, et enregistre simultanément l'effort appliqué  $F$  et l'allongement  $\Delta L = L - L_i$  ( $L_i = L_c$  ou  $L_0$ ).
- L'essai est généralement poursuivi jusqu'à rupture, après quoi on mesure un **allongement ultime rémanent A%** :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0}$$



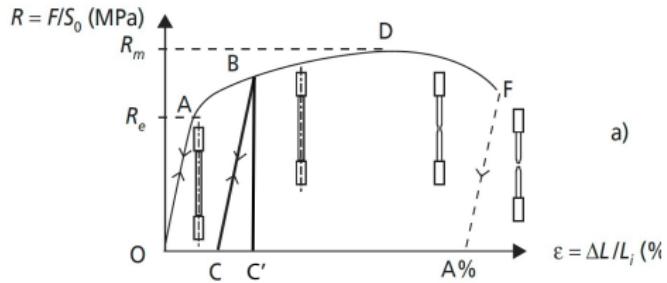
$L_0, \Delta L, L, L_u$ : Longueurs en mm  
 $S_0, S, S_u$ : Sections en  $\text{mm}^2$

# Courbes de traction

Courbe obtenue à partir de l'enregistrement  $F$  et  $\Delta L$  en cours d'essai

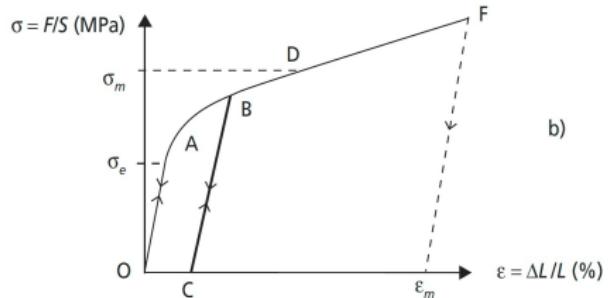
## Courbe de traction conventionnelle

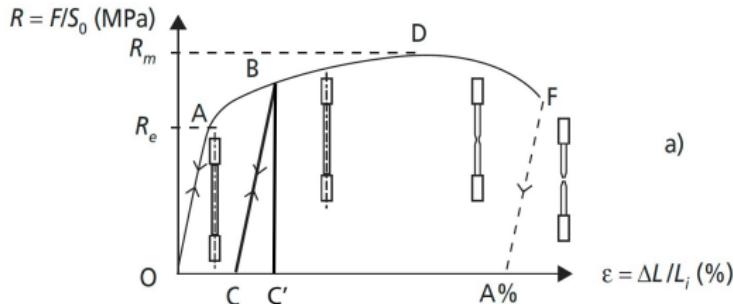
- Abscisse :  $R = F/S_0$
- Ordonnée :  $e = \Delta L/L_i$



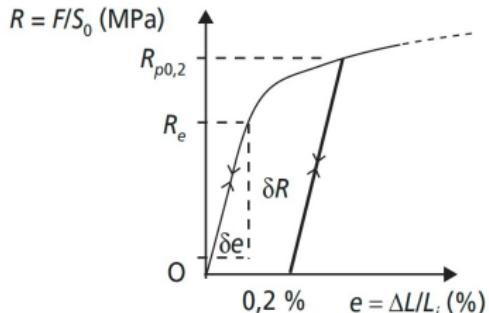
## Courbe de traction rationnelle

- Abscisse :  $\sigma = F/S$
- Ordonnée :  $\epsilon = \Delta L/L$





a)



**OA** : allongement élastique linéaire, réversible.

**Au-delà de A** : déformation plastique permanente + déformation élastique. La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB). OC' est l'allongement total qui inclut la déformation élastique.

**R<sub>e</sub> = F<sub>e</sub>/S<sub>0</sub>** : limite apparente d'élasticité (MPa).

**R<sub>p0,2</sub>** : limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique.

**AD** : allongement élastique + allongement plastique réparti.

**R<sub>m</sub> = F<sub>m</sub>/S<sub>0</sub>** : résistance à la traction (MPa).

**DF** : apparition et progression d'une striction dans les matériaux ductiles.

**F** : rupture.

**A % = ΔL<sub>u</sub>/L<sub>i</sub>** : allongement résiduel en pour cent après rupture (%).

**E = δR/δε ≈ δσ/δε** : module de Young .

# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

- 4.1 Courbes de traction
- 4.2 Déformation élastique des solides
- 4.3 Déformation plastique des solides

# Origine physique

Dans un cristal l'interaction entre les atomes est modélisée par un ressort.

- La distance moyenne  $d$  entre deux atomes s'établit à une valeur  $d_0$  fonction de la nature des liaisons.
- Si on impose aux atomes un déplacement au voisinage de leur position d'équilibre, la force d'interaction les rappelle à la distance  $d_0$  (sauf si  $d > d_d$ , distance de dissociation).
- De telles **déformations élastiques** nécessitent l'application d'une force extérieure pour vaincre la force de rappel et sont **réversibles** lorsque cette force est supprimée.

# Origine physique

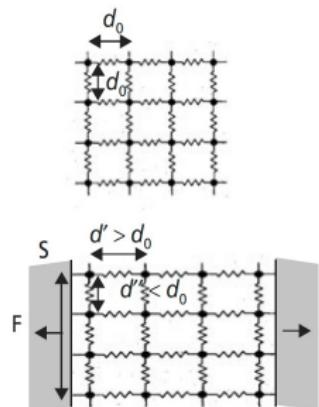
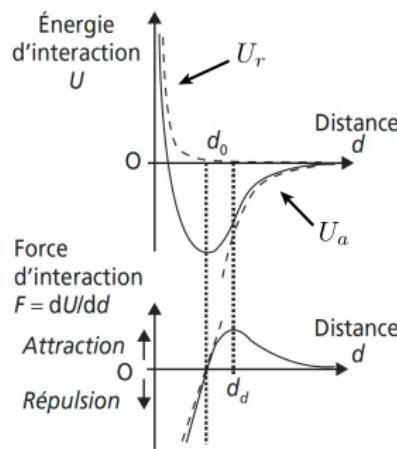
Le potentiel (ou énergie)  $U$  d'interaction entre deux atomes est constitué de la superposition de deux parties, l'une répulsive dominante à faible distance  $U_r$  et l'autre attractive dominante à plus grande distance  $U_a$ .

## Potentiel d'interaction interatomique

$$U(d) = U_a(d) + U_r(d)$$

avec

$$U_a(d) = -\frac{A}{d} \quad \text{et} \quad U_r(d) = \frac{B}{d}$$



## Élasticité linéaire isotrope

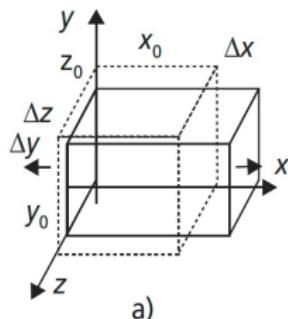
Dans un cristal l'interaction entre les atomes est modélisée par un ressort.

- Pour de faibles déplacements, la force de rappel peut être considérée comme proportionnelle au déplacement  $d - d_0$ .
- Les allongements (ou raccourcissements) relatifs ou **déformations**  $\epsilon$  du solide (sans dimension), sont alors proportionnels à la densité surfacique de force, ou **contrainte**  $\sigma$ , ce que traduit la **loi de Hooke** :

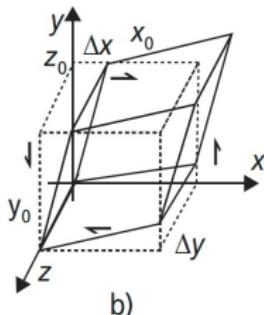
$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{d - d_0}{d_0} = E\epsilon$$

- Les contraintes s'expriment en MPa (ou N/mm<sup>2</sup>) et les déformations sont sans dimensions.
- $E$  : **module d'élasticité à la traction** ou **module de Young** du matériau (en MPa).
- Simultanément à la déformation dans la direction d'application de la force, des déformations de signe opposé se produisent dans les directions orthogonales.

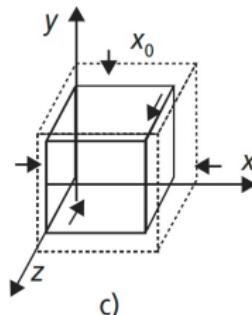
# Élasticité linéaire isotrope



Contrainte de traction uni-axiale



Contrainte de cission



Pression hydrostatique

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{\sigma_x}{E}$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0} = \epsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0} = -\nu \epsilon_x = -\frac{\nu}{E} \sigma_x$$

$\nu$  : coefficient de Poisson  
(sans dimension)

$$\gamma = \frac{\Delta y}{x_0} + \frac{\Delta x}{y_0} = \frac{\tau}{G}$$

$G$  : module d'élasticité au cisaillement du matériau  
(en MPa)

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{p}{K}$$

$K$  : module de compressibilité (en MPa)

# Plan du cours

Introduction

Composition et structure des matériaux

Diffusion à l'état solide

## Propriétés mécaniques

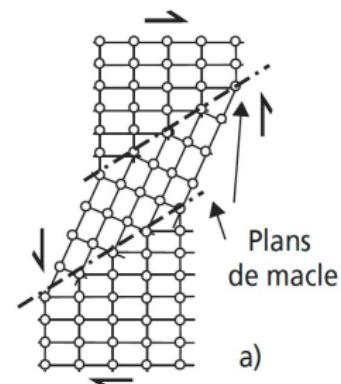
- 4.1 Courbes de traction
- 4.2 Déformation élastique des solides
- 4.3 Déformation plastique des solides

# Mécanismes de déformation plastique

Seules les **composantes de contrainte tangentielle** au plans réticulaires s'avèrent capables d'activer des mécanismes de déformation permanente.

## Maclage mécanique

- Le cristal accorde les efforts qu'il supporte par combinaison de **maclages**.
- Mécanisme possible que dans les cristaux où existent des plans de macle.



# Mécanismes de déformation plastique

## Glisement

Des feuillets constitués de plans denses glissent les uns par rapport aux autres dans les directions atomiques de forte densité, (décalage d'un nombre entier de distances inter atomiques).

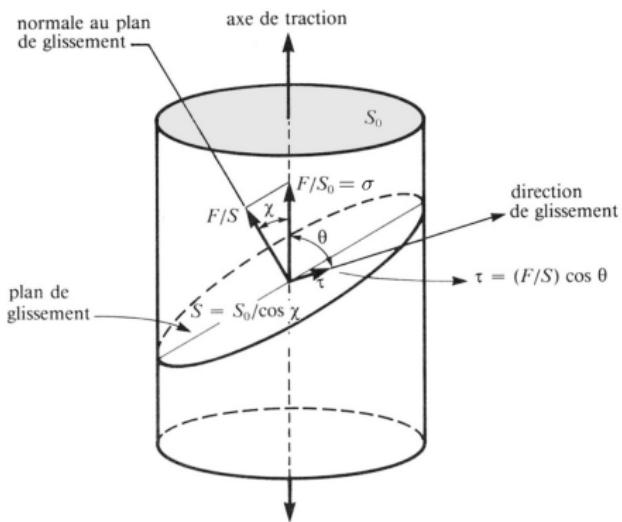
### Facteur de Schmid

On applique une force  $F$  sur la surface  $S_0$  d'une éprouvette, la contrainte est donc  $\sigma = F/S_0$ . Comme le décollement n'est pas possible et que le glissement se fait uniquement suivant la direction de glissement, seule la contrainte  $\tau$  suivant cette direction peut agir. Après projection de  $F$  sur la direction de glissement, cette contrainte vaut :  $\tau = (F \cos \theta)/S$

On peut montrer que  $S = S_0 / \cos \chi$ . Donc :

$$\tau = \frac{F \cos \chi \cos \theta}{S_0} = \sigma \cos \chi \cos \theta$$

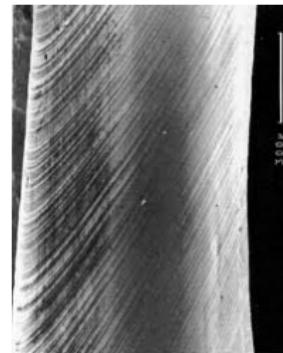
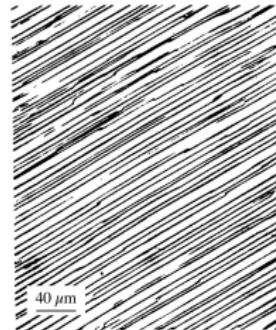
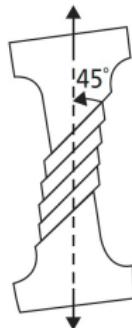
$f = \cos \chi \cos \theta$  : **facteur de Schmid**



# Mécanismes de déformation plastique

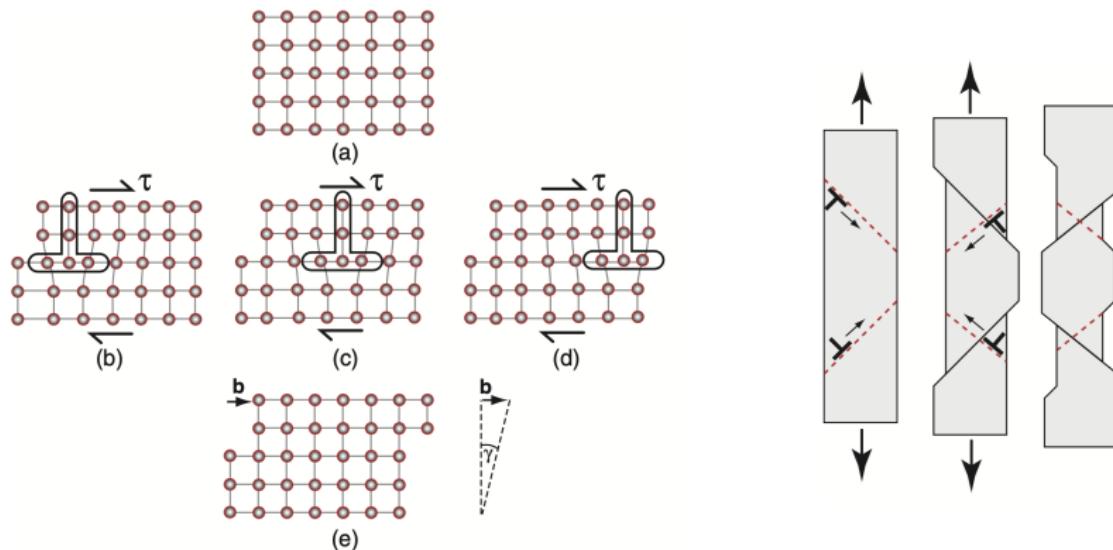
Les angles  $\chi$  et  $\theta$  ne sont pas indépendants,  $f$  est nul pour  $\chi = 0^\circ$  et  $\theta = 90^\circ$ , et prend sa valeur maximale  $f = 0.5$  pour  $\chi = \theta = 45^\circ$ .

Les premiers glissements, ou **glissements primaires**, se produisent donc dans les plans denses et selon les directions denses du cristal qui sont les plus proches de cette condition de facteur de Schmid maximum.



# Mécanismes de déformation plastique

## Glissement à l'échelle atomique



*Gauche) Mécanisme de glissement d'une dislocation coin dans un cristal cubique simple. Le plan de glissement contient la ligne de dislocation et son vecteur de Burgers. Droite) Déplacement des dislocations par glissement dans les plans de glissement d'un monocristal en traction.*

Figure tirée de [Ashby *et al.* (2007). Materials Engineering. Science, Processing and Design]

# Mécanismes de déformation plastique

## Glissement à l'échelle atomique

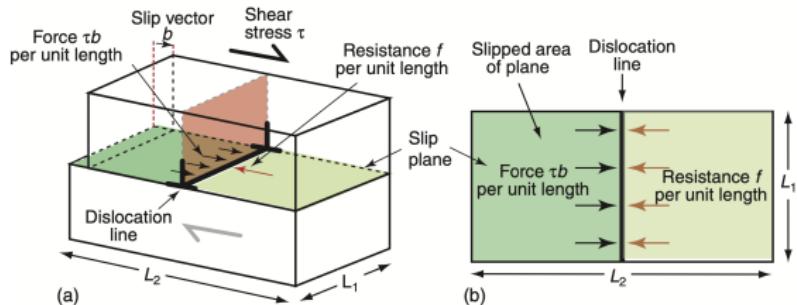
- Mouvement de la dislocation dans la direction perpendiculaire à la dislocation.
- La traversée du matériau par une dislocation induit donc une translation élémentaire d'amplitude  $b$  (vecteur de Burgers) ; c'est le passage de très nombreuses dislocations qui permet la création d'une marche visible à l'échelle macroscopique.

$$F = \tau b$$

$\tau$  : contrainte de cisaillement à l'extérieur d'un cristal

$F$  : Force appliquée à la dislocation (par unité de longueur).

$b$  : vecteur de Burgers

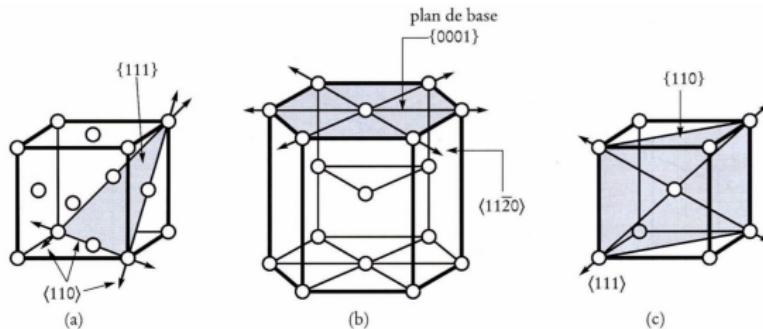


Pour toutes dislocations : si la contrainte de cisaillement  $\tau$  dépasse la valeur critique  $\tau_c = f/b$ , elle fera bouger les dislocations et provoquera le cisaillement du cristal.

Figure tirée de [Ashby et al. (2007). Materials Engineering. Science, Processing and Design]

# Mécanismes de déformation plastique

## Plan de glissement dans les métaux



cubique faces  
centrées (CFC)

hexagonal  
compact (HC)

cubique centré  
(CC)

**Système de glissement = plan + direction**

CFC

HC

CC

{111}, {110}

{0001}, {1120}

{110}, {111}

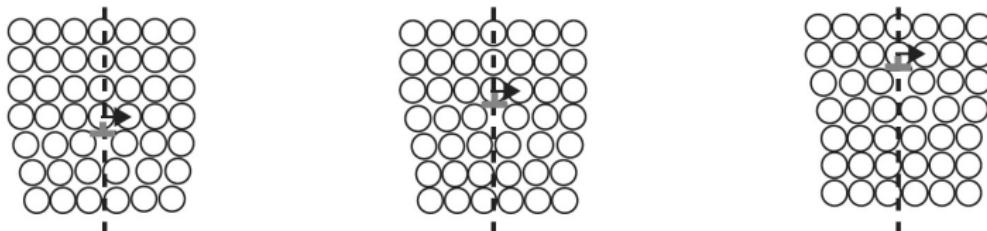
12 systèmes

3 systèmes

12 systèmes

# Mécanismes de déformation plastique

## Montée des dislocations



*Mécanisme de montée d'une dislocation coin dans un cristal cubique simple. De gauche à droite, arrivée de lacunes sur le demi-plan supplémentaire ; de droite à gauche, arrivée d'interstitiels sur le demi plan supplémentaire. Le plan de montée contient la ligne de dislocation et est perpendiculaire au vecteur de Burgers.*

Le déplacement des dislocations, par **montée** ou par **glissement**, provoque toujours une **déformation permanente** par transport du décalage.

C'est par glissement des dislocations que se déforment les alliages métalliques lors de la mise en forme à froid d'une pièce.

# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

La **limite d'élasticité** est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

La limite d'élasticité d'un matériau cristallin coïncide avec les premiers déplacements irréversibles de dislocations ; tous les mécanismes capables de rendre plus difficile ce déplacement élèvent donc la limite d'élasticité.

## Friction de réseau

- C'est la **résistance à la rupture et à la reconstitution des liaisons atomiques** que doit vaincre la dislocation pour glisser :
  - Faible pour les matériaux métalliques
  - Élevée pour les matériaux à liaisons fortes localisées (ioniques ou covalentes) : *dans les céramiques, les dislocations ne peuvent pas glisser avant que la contrainte appliquée n'atteigne la limite de rupture du cristal, d'où un comportement intrinsèquement dur et fragile.*
  - La friction de réseau décroît lorsque la température s'élève.

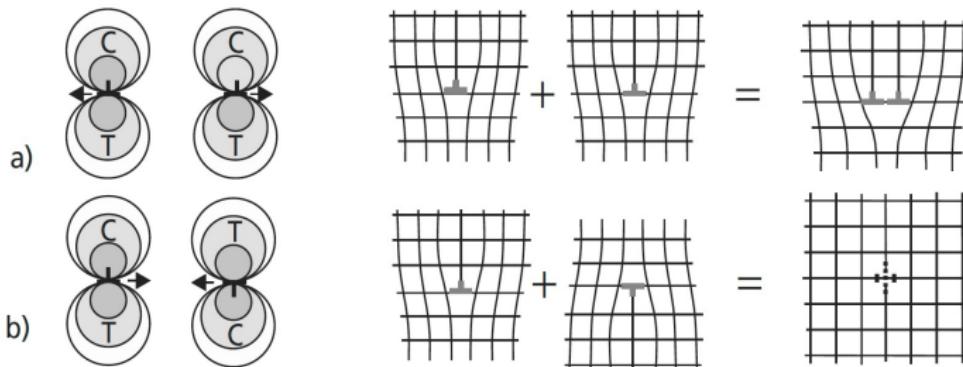
# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

## Interactions élastiques entre dislocations

Les champs de contraintes et de déformations qui entourent les lignes de dislocations interagissent de manière répulsive ou attractive.

Pour minimiser l'énergie interne totale du système :

- **deux dislocations identiques se repoussent** (les rapprocher produirait une dislocation de vecteur de Burgers double, représentant une énergie de ligne plus importante)
- **deux dislocations opposées s'attirent** (les rapprocher provoque leur annihilation, et la disparition de toute énergie de déformation).



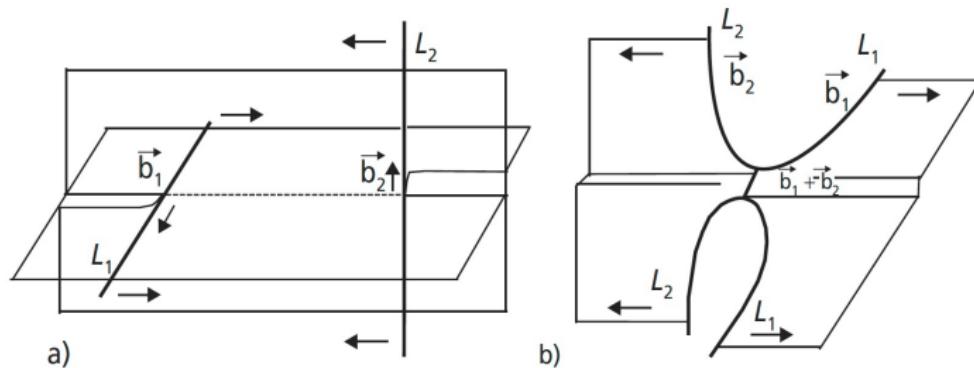
# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

## Interactions topologiques entre dislocations

Deux dislocations qui se croisent lors de leur déplacement créent sur chacune un cran d'amplitude égale au vecteur de Burgers de l'autre.

Très souvent, ces crans ne peuvent pas suivre les dislocations dans leurs plans de glissement et donnent lieu à la formation de **jonctions** fixes, qui ancrent chaque ligne de dislocation.

Ces jonctions constituent les nœuds du réseau de Frank; les dislocations qui y sont ancrées ne peuvent plus glisser que sous forme d'arcs de cercles passant par les points d'ancrage.



# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

## Écrouissage : courbure et multiplication des dislocations

Un segment de dislocation AB fixé en ses extrémités, par exemple par un défaut ponctuel.

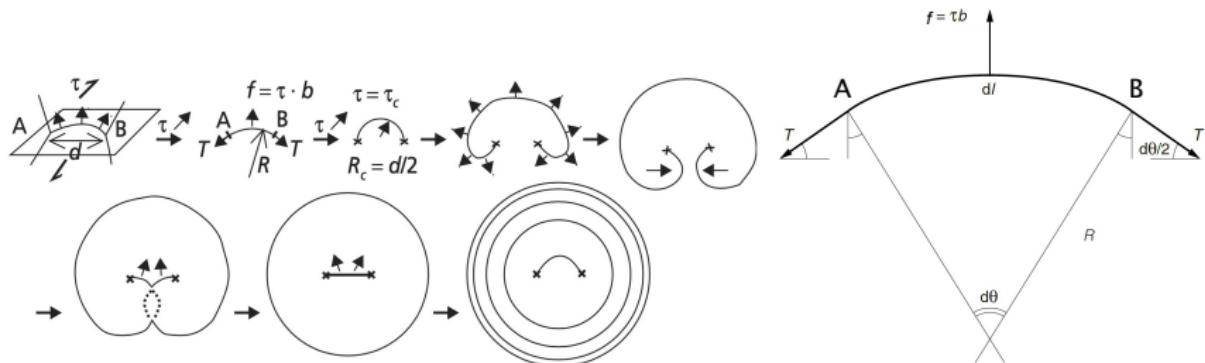
On applique une contrainte de cisaillement parallèle au plan de glissement

Équation d'équilibre du segment  $dl$  de la dislocation :

$$fdl = 2T \sin \frac{d\theta}{2} \approx 2T \frac{d\theta}{2}$$

Comme  $f = \tau b$  et  $R = dl/d\theta$ , on a finalement :

$$\tau = \frac{T}{bR} \Rightarrow \tau_c = \frac{T}{bR_c} = \frac{2T}{bd}$$



# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

## Écrouissage : courbure et multiplication des dislocations

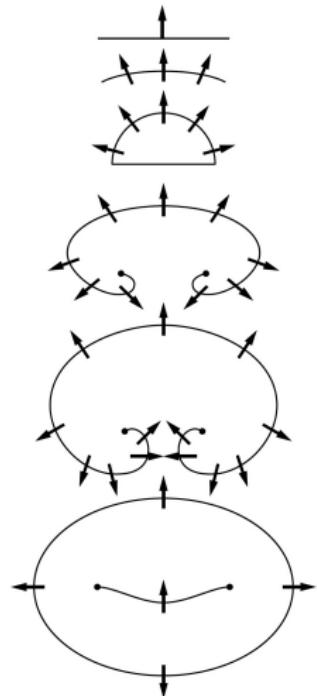
Rayon de courbure minimal :

$$R_{\min} = \frac{d}{2}$$

La **contrainte critique**  $\tau_c$  est :

$$\tau_c = \frac{T}{bR_c} = \frac{2T}{bd}$$

- Si  $\tau < \tau_c$ , le mouvement de la dislocation est réversible si  $\tau$  est annulé, et le cristal n'a subi aucune déformation permanente.
- Si  $\tau > \tau_c$ , la limite d'élasticité est franchie : il se développe spontanément de manière irréversible dans le plan de glissement pour se refermer sur lui-même. Les branches opposées s'annihilent en se rejoignant, et le processus peut recommencer, provoquant l'émission de centaines de boucles de dislocation concentriques.



# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

## Interactions entre dislocations et joints de grains ou joints de phases

Compte tenu de la discontinuité des plans cristallins, les joints de grains et de phases sont des obstacles infranchissables pour les dislocations.

Dans un polycristal, plus les grains sont fins, plus il y a d'obstacles à un déplacement généralisé des dislocations. D'où une élévation de la limite d'élasticité  $R_e$  lorsque le diamètre moyen des grains  $D$  diminue, suivant la loi de **Hall-Petch** :

$$R_e = \sigma_0 + \frac{C}{\sqrt{D}}$$

- $\sigma_0$  : limite d'élasticité du monocristal du même matériau
- $C$  : constante en MPa.m<sup>1/2</sup> (aussi liée au matériau considéré)

Dans le cas des joints de phases cohérents ou semi-cohérents, la continuité de certains plans cristallins peut permettre le cisaillement du joint par des lignes de dislocations.

# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

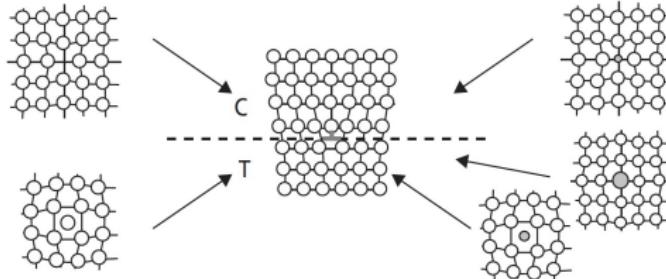
## Interactions entre dislocations et défauts ponctuels

Les défauts ponctuels dans un cristal sont tous entourés d'un champ de déformations élastiques qui interagit avec le champ de déformations entourant la dislocation.

Dans un cristal impur, les dislocations peuvent se trouver « épinglées » en place par une série de défauts ponctuels. L'élévation de limite d'élasticité  $\Delta R_e$  qui en résulte est approximativement :

$$\Delta R_e = G \frac{R_{\text{soluté}} - R_{\text{solvant}}}{R_{\text{solvant}}} \sqrt{x_{\text{soluté}}}$$

$G$  : module de cisaillement du cristal;  $R$  : les rayons atomiques;  $x_{\text{soluté}}$  : concentration atomique en soluté.



*Interactions élastiques entre une dislocation coin et des défauts ponctuels. Selon le cas, pour minimiser l'énergie totale, les défauts ponctuels sont plutôt attirés par la zone en traction (T) ou en compression (C), au voisinage immédiat de la dislocation.*

# Limite d'élasticité des monocristaux et polycristaux

## Interactions entre dislocations et précipités

Faute de continuité des plans cristallins, les dislocations sont arrêtées dans leur déplacement par des précipités incohérents.

Dans le cas du glissement, elles les contournent pour poursuivre leur déplacement, et laissent au passage une boucle de dislocation autour du précipité (mécanisme d'Orowan).

La présence de précipités nombreux dans un matériau élève donc sa limite d'élasticité d'une valeur  $\Delta R_e$  dont l'ordre de grandeur est :

$$\Delta R_e = \frac{bG}{D}$$

