

Cours de déformation

MSE-310

I. Introduction

Roland Logé

Laboratoire de Métallurgie Thermomécanique (LMTM)

The logo of EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) is displayed in a bold, red, sans-serif font.

Objectifs principaux

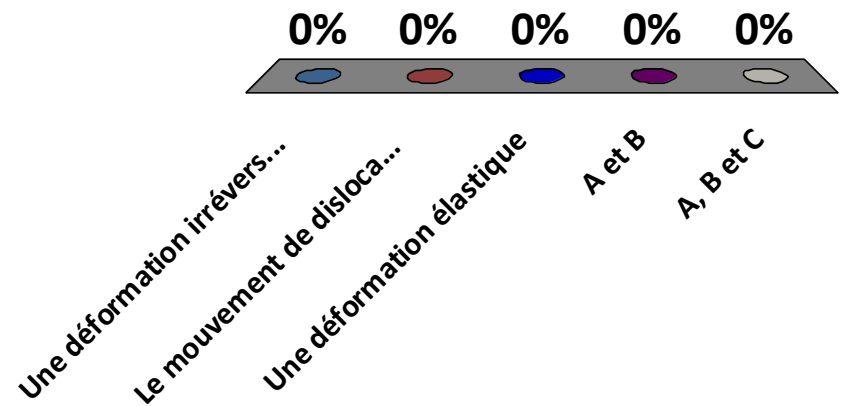
- Connaître et comprendre l'utilité des **essais mécaniques** de base
- Appréhender la nature physique des phénomènes de déformation.
- Relier **déformation plastique** et théorie des dislocations / macles.
- Comprendre l'impact de la **température** et du mode de sollicitation sur les mécanismes de déformation

Utilisation des clickers par smartphone

1. Avec un navigateur Web, utiliser l'url <http://responseware.eu> et saisir le numéro de session
2. Pour l'application pour smartphone, **choisir la zone "Europe"** au premier lancement (Peut être réglé dans les paramètres)
3. **NE PAS CRÉER DE COMPTE et NE PAS S'IDENTIFIER SUR LE SITE OU L'APPLICATION, l'utilisation du système doit se faire de façon anonyme. Cette étape est essentielle afin de respecter la loi Suisse sur la protection des données.**

Une déformation plastique dans un matériau cristallin implique

- A. Une déformation irréversible
- B. Le mouvement de dislocations
- C. Une déformation élastique
- D. A et B
- E. A, B et C



Introduction

- **L'acier** est, après le béton, le matériau le plus produit au monde.
- **Micro- et nano-structures** optimales donnent des propriétés jusqu'ici jamais atteintes
- Nouvelles voies de fabrication, **nouveaux matériaux** (verres métalliques, mousses, etc.)
- Les matériaux très résistants aux hautes températures permettent d'améliorer le **rendement** des moteurs, turbines, etc.
- Matériaux « intelligents » (smart), propriétés **fonctionnelles**

MAIS

- Les exigences écologiques et de santé imposent de modifier les **compositions chimiques** de matériaux bien établis
- Limitation de **ressources**, importance croissante du recyclage

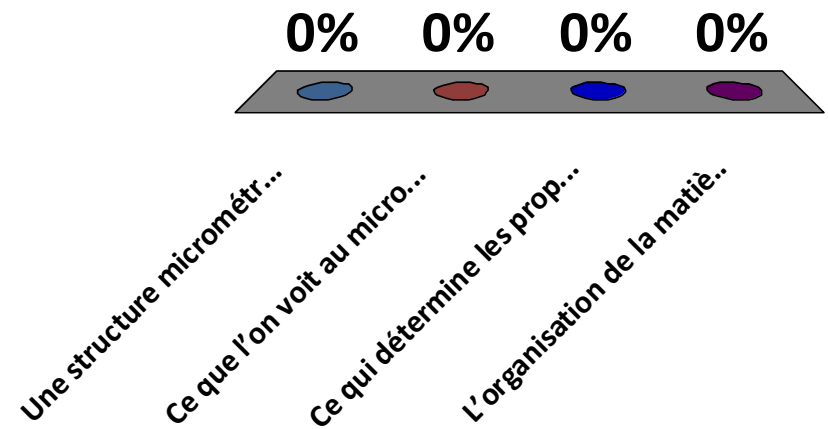
Introduction

- **Production mondiale de métaux, comparaison avec le silicium (en millions de tonnes / an) :**

– Steel	1129.
– Aluminum	32
– Copper	30
– Zinc	9.7
– Lead	5
– Titanium	2
– Nickel	1.3
– Magnesium	0.6
– Cobalt	0.05
– Silicon	5.

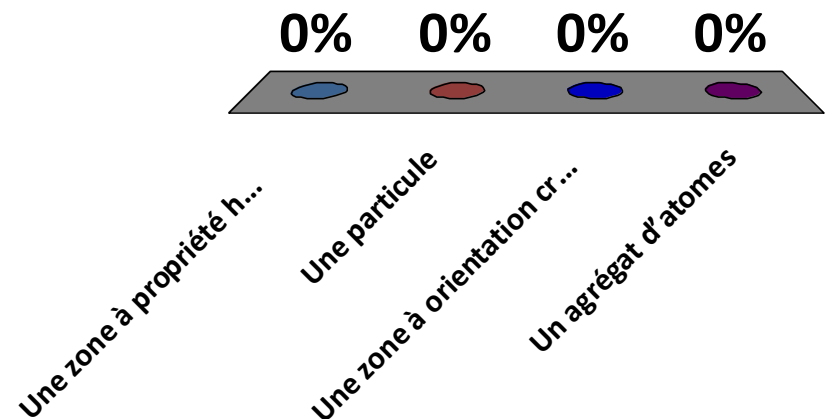
Qu'est-ce qu'une microstructure ?

- A. Une structure micrométrique
- B. Ce que l'on voit au microscope
- C. Ce qui détermine les propriétés d'un matériau
- D. L'organisation de la matière à l'échelle de ses composants



Qu'est-ce qu'un grain dans un métal ou une céramique ?

- A. Une zone à propriété homogène
- B. Une particule
- C. Une zone à orientation cristallographique homogène
- D. Un agrégat d'atomes



Introduction

Exemples d'alliages (ici Aluminium)

Alliage = métal plus d'autres éléments (métalliques ou non) :

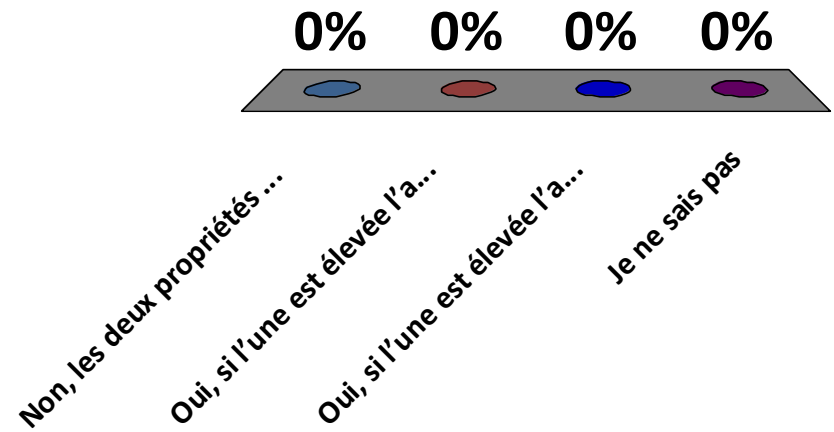
Nuance / Composition [% mass.]	Limite élastique [MPa]	Contrainte à rupture [MPa]	Elongation à rupture [%]	Module élastique [GPa]	Conduct. électrique [%IACS*]
Al pur 99.99%	10	45	50	70	65
Al pur 99.6%	50	70	43	70	61
2024-O (4.4Cu1.5Mg0.6Mn)	75	185	20	73	50.5
2024-T3	345	485	18	73	30
2024-T861	490	515	6	73	38.5

Certaines propriétés dépendent de la microstructure du matériau, d'autres pas !

* IACS ... "International Annealed Copper Standard".

Y a-t-il un lien entre limite élastique et élongation à rupture (ductilité) ?

- A. Non, les deux propriétés sont différentes
- B. Oui, si l'une est élevée l'autre aussi
- C. Oui, si l'une est élevée l'autre est faible
- D. Je ne sais pas



Déroulement global

- Il est **attendu de chacun** : une **participation** aux séances de cours, incluant des questions-réponses (QCM), et aux séances d'exercices. Les cours et séances de QCM **enregistrés** des années 2020 et 2021 seront disponibles sur Moodle pour aider aux révisions.
- Questions : sur rendez-vous, ou lors des cours/exercices.
- Examen oral en fin de semestre, qui peut comprendre
 - des questions conceptuelles
 - des exercices (courts)
- **Préparation de l'examen oral** pendant le semestre (voir slide 12)
- **Notes de cours** distribuées sur Moodle.
Polycopié de référence :
A. Mortensen & T. Kruml, « Deformation et Rupture des Matériaux » (3 tomes), Cours EPFL (2014)

Séances d'exercices et présentations orales

- Les séances d'exercices commencent la 2^e semaine de cours. Ces séances de 2h auront lieu le plus souvent mercredi (voir planning détaillé du semestre sur Moodle).
- **Séries classiques**
- **Présentations orales de 15 min** sur la matière vue antérieurement, volontaires. Compter 10 min de présentation et 5 min de questions pour chacun. Cet exercice vous permet de préparer l'examen oral.
- S'inscrire auprès de l'assistant pour réserver le moment où vous souhaitez faire cet exercice (voir horaires possibles sur le planning du semestre, disponible sur Moodle). S'il se passe bien, cela mène aussi à une pondération vers le haut de l'examen oral.
- Dès la 1ere semaine, envoyez un email à l'assistant pour dire si vous comptez vous présenter pendant le semestre, et quand : yandong.jing@epfl.ch (ne parle que l'anglais)

Plan du cours

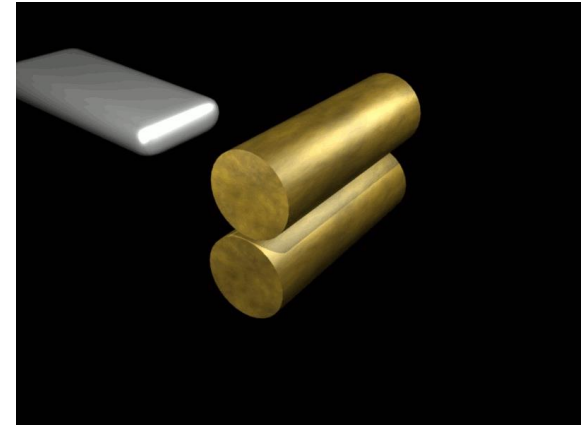
- I. Introduction
- II. Essais mécaniques
- III. Elasticité
- IV. Dislocations
- V. Maclage et plasticité de transformation
- VI. Déformation plastique à basse température
- VII. Sollicitations cycliques
- VIII. Phénomènes thermiquement activés
- IX. Déformation à chaud

Introduction : Formage des métaux

Forgeage

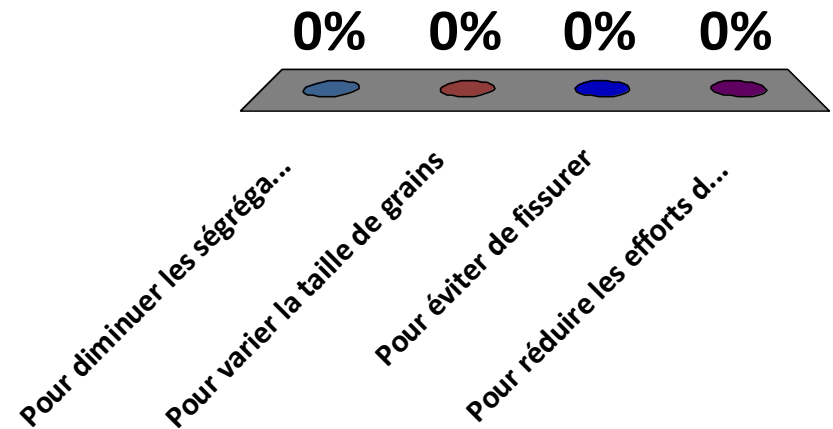


Laminage



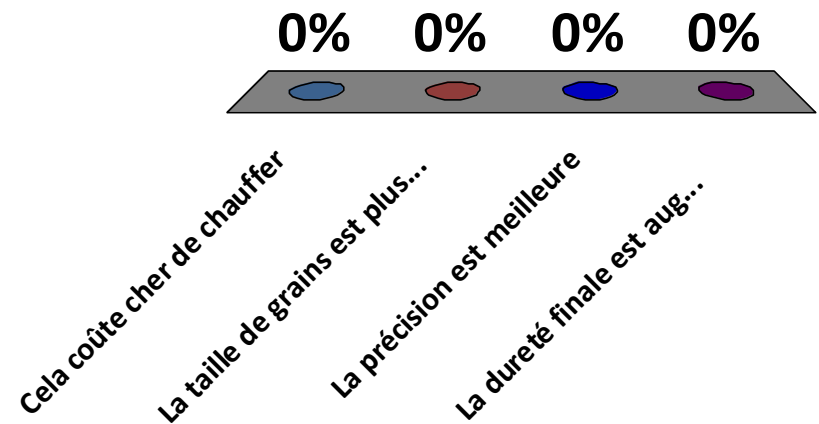
Pourquoi déforme-t-on à haute température ?

- A. Pour diminuer les ségrégations chimiques
- B. Pour varier la taille de grains
- C. Pour éviter de fissurer
- D. Pour réduire les efforts de déformation



Pourquoi déforme-t-on à basse température ?

- A. Cela coûte cher de chauffer
- B. La taille de grains est plus stable
- C. La précision est meilleure
- D. La dureté finale est augmentée

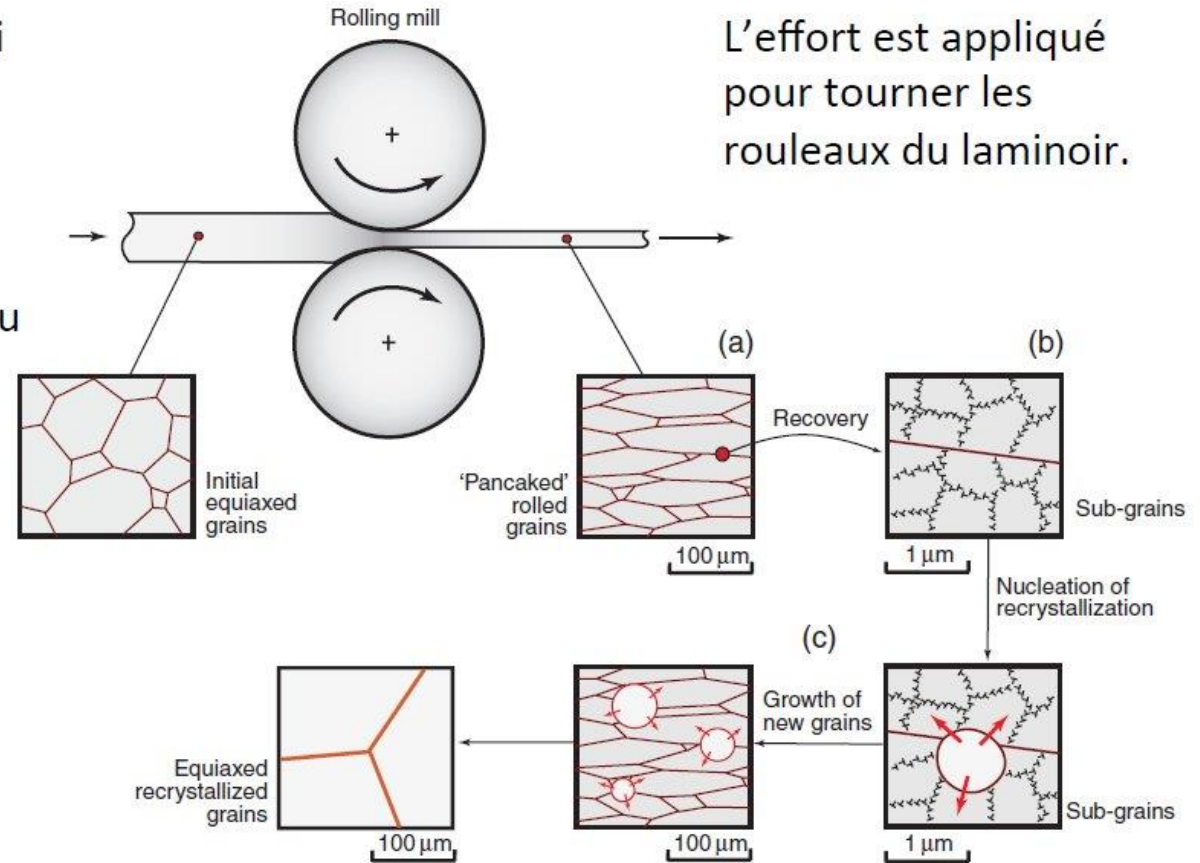


Le laminage

- Fabrication de tôles, mais aussi de certains profilés (p.ex. rails).
- Permet l'élimination de porosités dues à la coulée ;
- Laminage à chaud / à froid ... dépend s'il y a recristallisation ou pas.

• A chaud : nécessite moins d'effort ; pas d'écrouissage, nécessite donc pas de recuit entre les passes ; déformation de l'acier dans la phase γ (plus ductile) ; permet aussi de jongler entre les phases, p.ex. α et γ dans les aciers.

• A froid : meilleur état de surface ; utilisé pour des passes finales et pour des tôles minces.



Normalement la taille des grains recristallisés est inférieure à celle de départ, car on cherche à limiter leur croissance.

Le forgeage

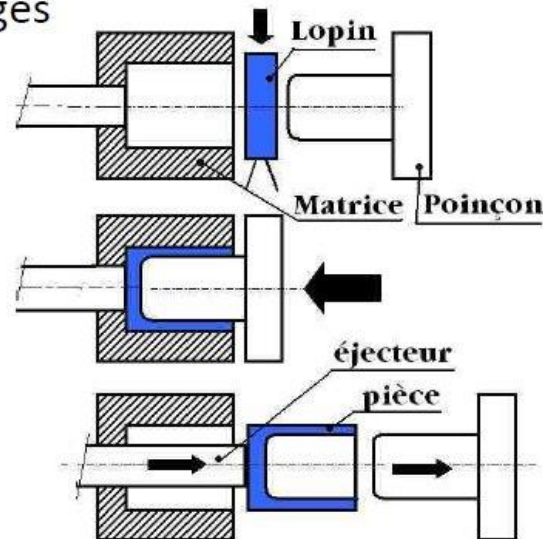
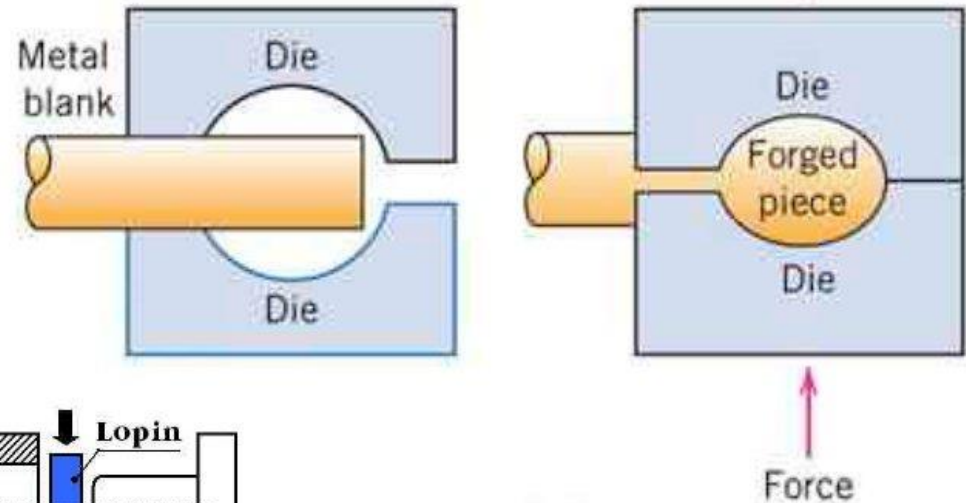
Plus ancien procédé de mise en forme ;
Caractéristiques similaires au laminage
(on peut considérer le laminage comme un cas spécifique du forgeage).

On distingue, dans le cas des aciers :

- forgeage à chaud : $T > 950\text{ °C}$;
- à mi-chaud : entre 750 à 950 °C ;
- à froid : à T_{amb} , mais chauffe jusqu'à 150 °C dû au travail investi.

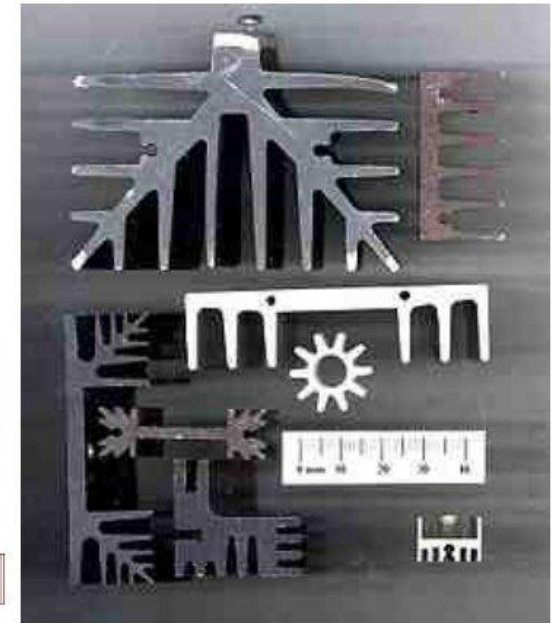
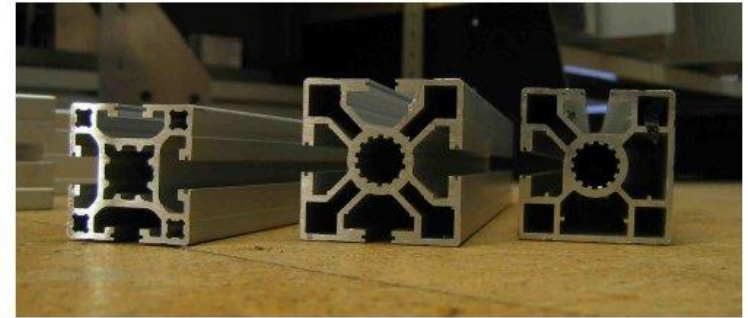
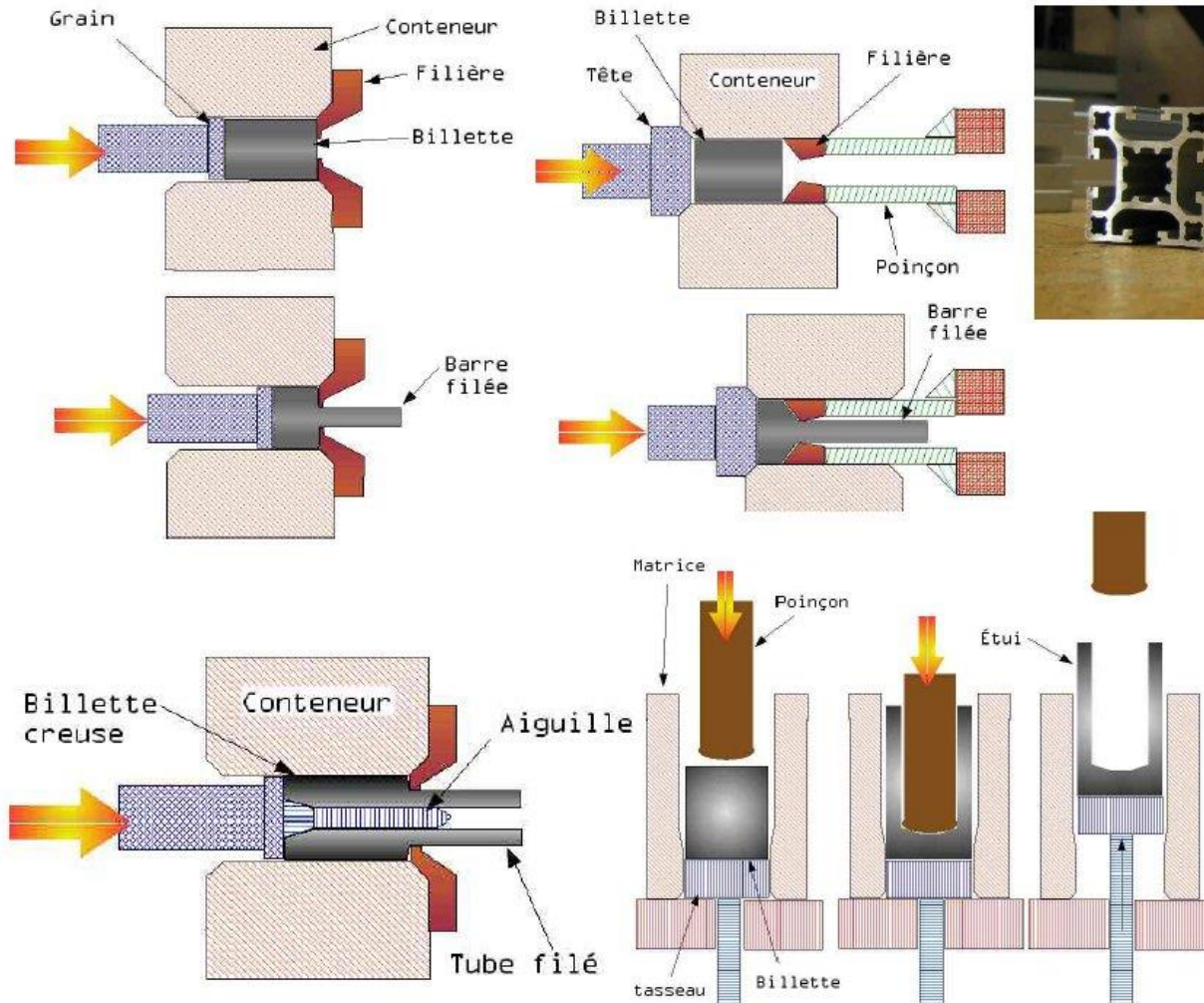
Forgeage des autres métaux/alliages souvent à froid.

L'effort est appliqué sur les matrices (ou sur le marteau dans le cas du forgeage libre).



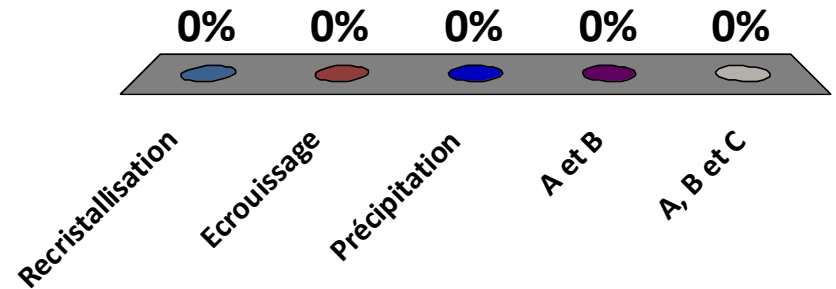
Le filage (extrusion)

Plusieurs variantes ; permet la fabrication de barres, de tubes sans soudures voire de profilés complexes ; l'effort est appliqué pour pousser la matière à travers l'outil (la filière).



Quels sont les phénomènes microstructuraux qui peuvent être induits par une déformation plastique à chaud (métaux) ?

- A. Recristallisation
- B. Ecrouissage
- C. Précipitation
- D. A et B
- E. A, B et C



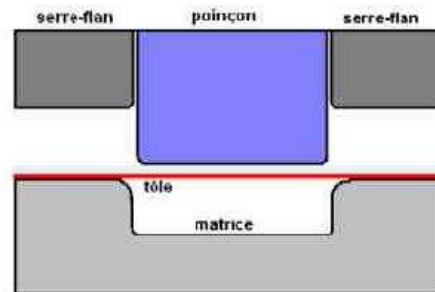
L'emboutissage

Déformation à froid, à partir de tôles laminées à froid. Ces tôles ont typiquement une texture (lors du laminage les grains subissent une déformation qui tend à les orienter, d'où une anisotropie globale de la tôle), ce qui peut résulter en des irrégularités lors de l'emboutissage. Une certaine anisotropie est tout de même bénéfique (on préfère des tôles qui se déforment dans le plan au lieu de s'amincir).

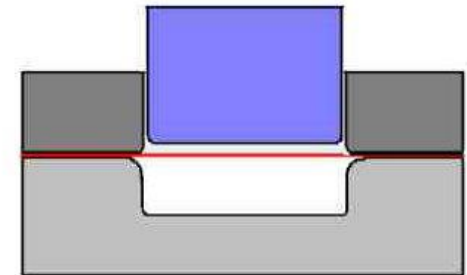
L'effort est d'abord appliqué pour appuyer sur le serre-flan, puis aussi pour descendre le poinçon.



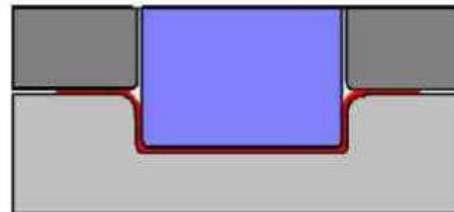
Phase 1 :
Le poinçon et le serre-flan sont relevés.
La tôle est posée sur la matrice.



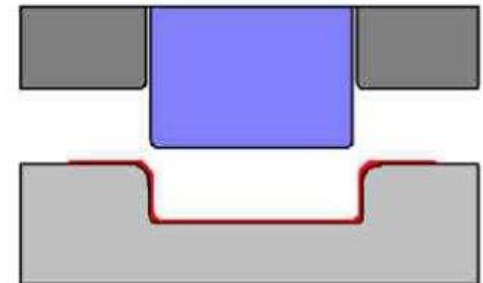
Phase 2 :
Le serre-flan descend et vient serrer le pourtour de la tôle sur la matrice.



Phase 3 :
La tôle étant maintenue (avec glissement possible entre le serre-flan et la matrice), le poinçon est abaissé et vient plaquer la tôle, en la déformant, contre le fond de la matrice.

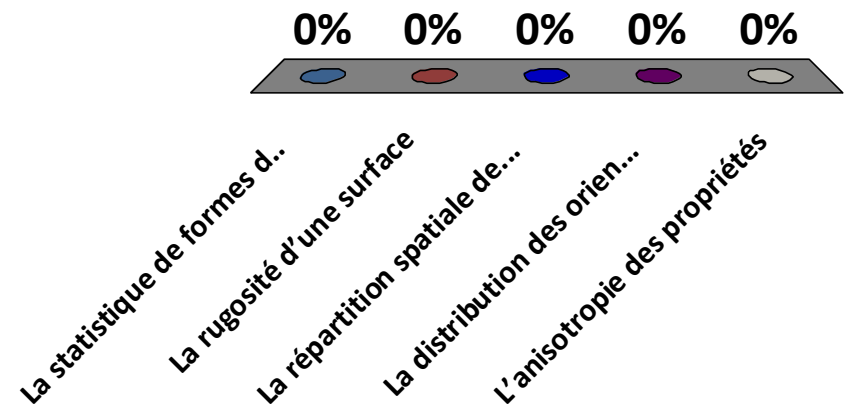


Phase 4 :
On relève le poinçon et le serre-flan : la pièce reste formée au fond de la matrice. Il ne reste qu'à la sortir et la détourer.



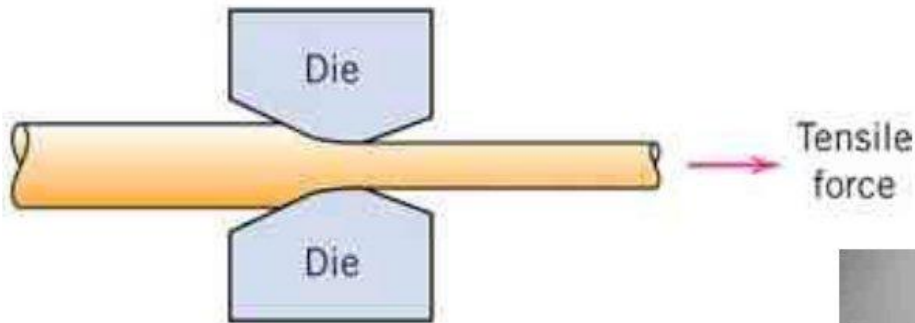
Qu'appelle-t-on texture cristallographique ?

- A. La statistique de formes des grains
- B. La rugosité d'une surface
- C. La répartition spatiale des précipités
- D. La distribution des orientations de la maille unitaire des grains
- E. L'anisotropie des propriétés



Le tréfilage

- Destiné à la production de fils ;
- normalement effectué à froid ;
- le taux de réduction est nettement inférieur par rapport au filage (généralement il faut donc de multiples passes) ;
- l'effort est appliqué pour tirer le fil à travers la filière (contraire au filage).



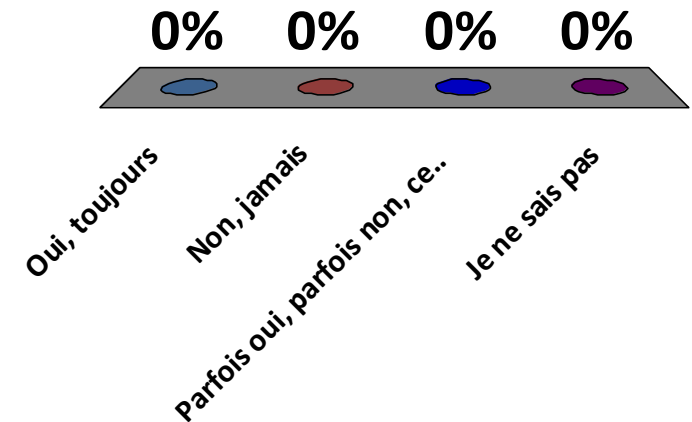
Pneu de voiture



Historiquement, la production de fils de fer était importante surtout pour fabriquer des cottes de maille (antiquité puis moyen âge).

Le tréfilage induit-il une texture cristallographique ?

- A. Oui, toujours
- B. Non, jamais
- C. Parfois oui, parfois non, cela dépend du matériau
- D. Je ne sais pas



Remarques

- On constate une très grande **diversité de procédés de mise en forme**, qui doivent être sélectionnés en se basant sur la géométrie, la taille, les fonctionnalités des objets à fabriquer.
- Les **sollicitations mécaniques et thermiques** des matériaux lors de procédés de fabrication sont majeures car elles ont des conséquences importantes sur la **microstructure** des matériaux, les défauts que l'on peut y générer, et les processus de diffusion.
- Les microstructures induisent des **propriétés**, donc rechercher des propriétés optimales passe par la recherche des microstructures optimales.

Vision globale sur Les méthodes de fabrication

Grosso modo, on peut classer les procédés comme suit :

- procédés de fonderie : la pièce obtient sa forme finale lors de la solidification ;
- procédés de corroyage : mise en forme par un travail appliqué ; (thermomécanique)
- métallurgie des poudres : cas un peu spécial ; mise en forme par compactage d'une poudre + frittage ; Procédés de fabrication additive
- usinage : séparation de matière ;
- assemblage : liaison de matière ;
- application de revêtements ;
- traitements thermiques : destinés au changement de la microstructure.

La plupart de ces procédés, s'ils ne sont pas destinés spécifiquement pour ça, influencent aussi la microstructure. Il faut en tenir compte lors de la conception.

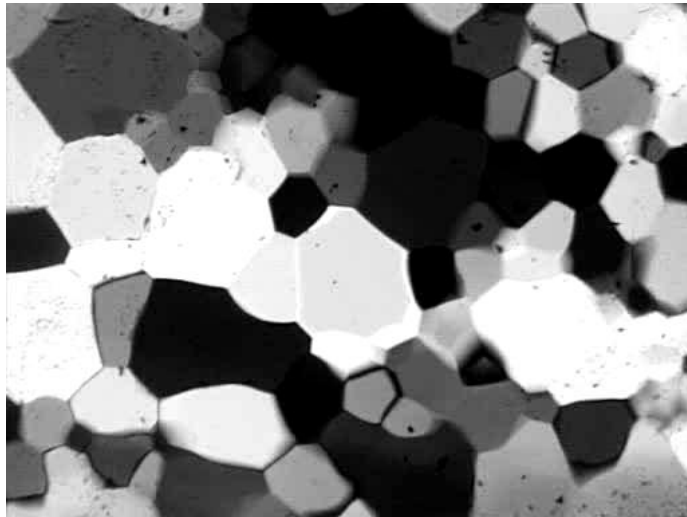
Formage des métaux

Evolutions de microstructure

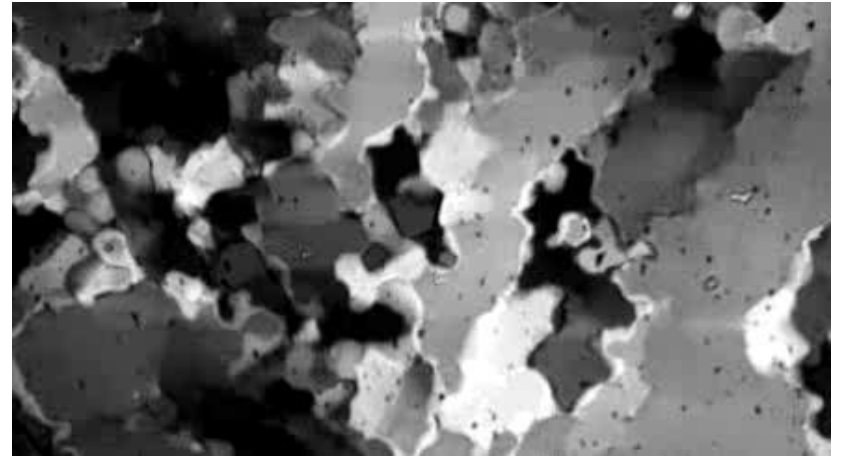
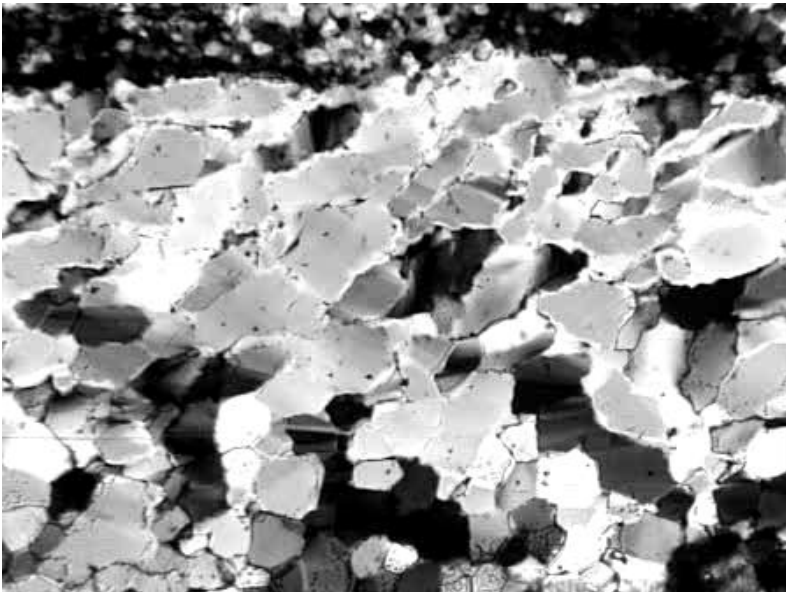


Acier, aluminium, superalliage base Nickel, etc.

Effet d'une déformation à chaud : recristallisation dynamique



Effet d'un maintien en température après déformation:
recristallisation post-dynamique ou statique



Traitement thermique d'un alliage



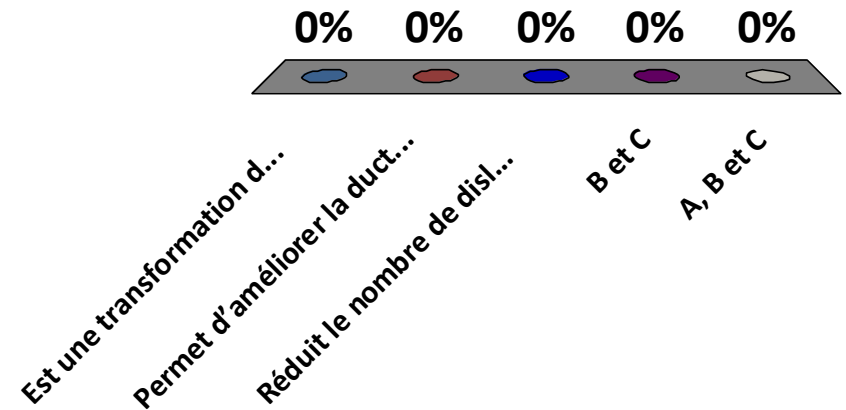
Recristallisation



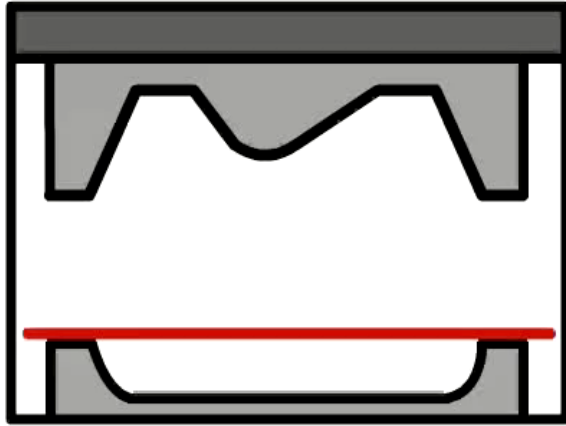
Zoom

La recristallisation dans les métaux :

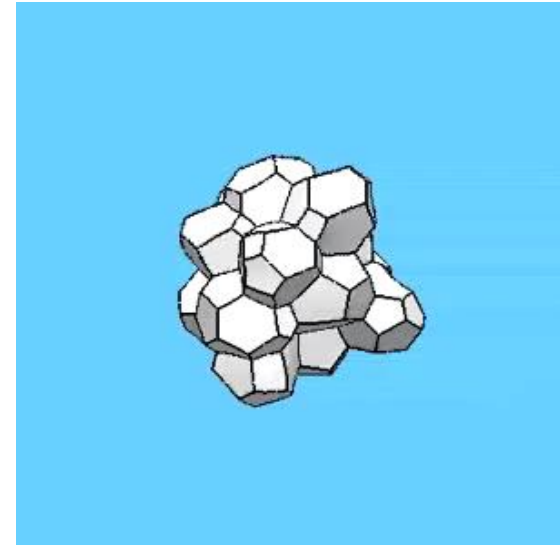
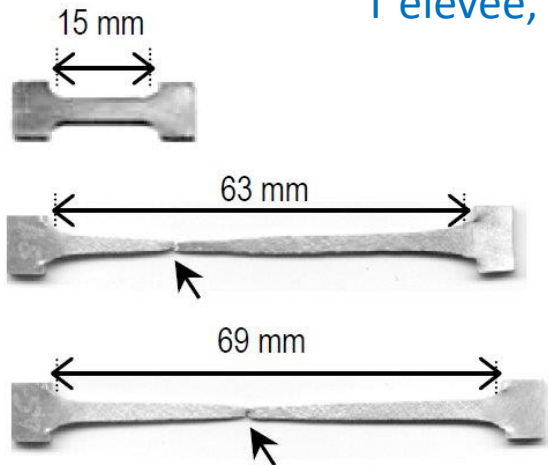
- A. Est une transformation de phase
- B. Permet d'améliorer la ductilité
- C. Réduit le nombre de dislocations
- D. B et C
- E. A, B et C



formage superplastique



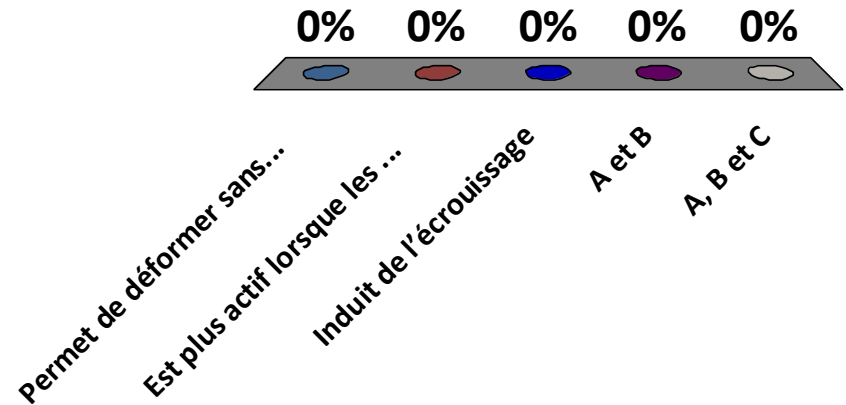
T élevée, vitesse faible



L'accommodation de la déformation se fait par **diffusion aux joints de grain**. Les grains « glissent comme des billes ».

Le glissement aux joints de grain :

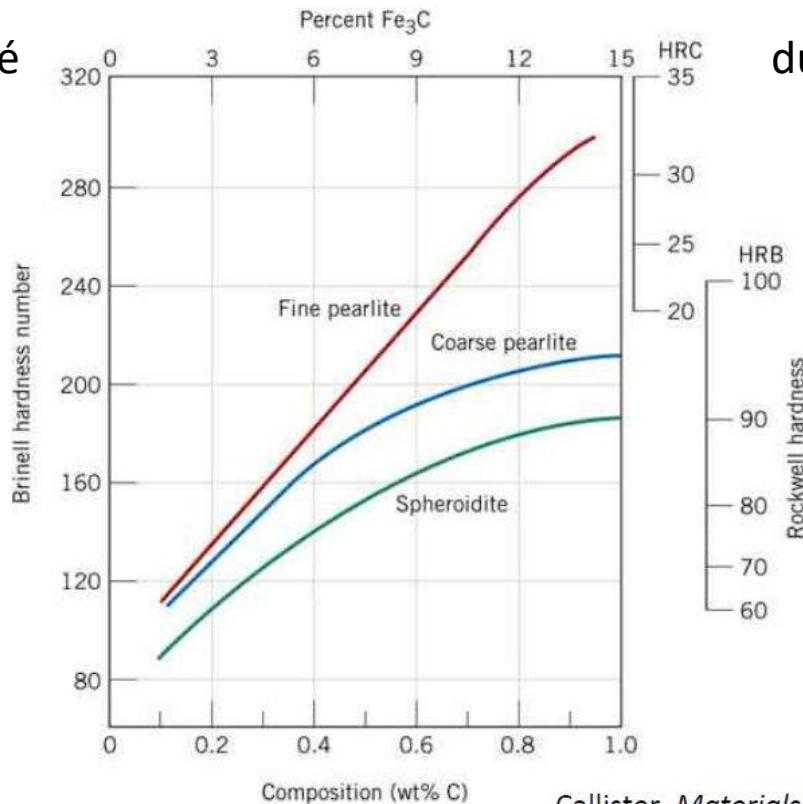
- A. Permet de déformer sans déplacer de dislocations
- B. Est plus actif lorsque les grains sont grands
- C. Induit de l'écroutissage
- D. A et B
- E. A, B et C



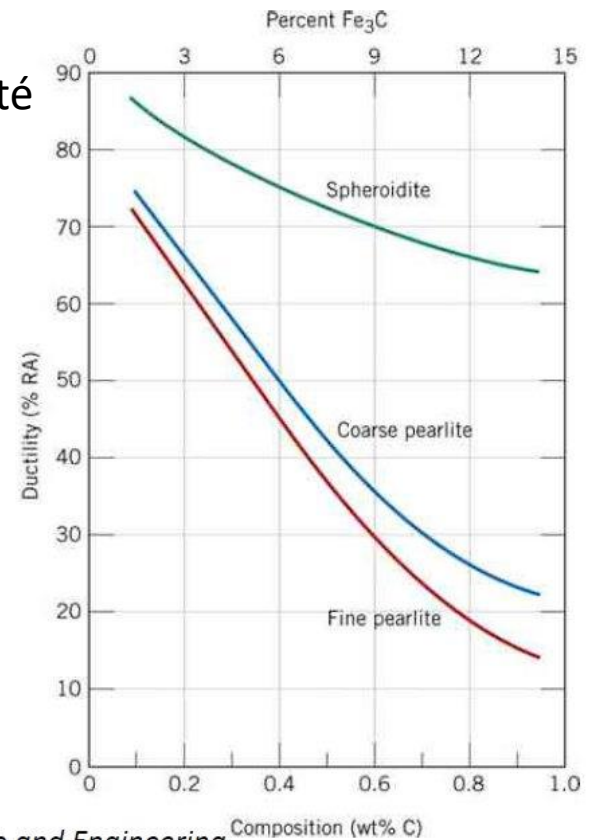
Compromis dureté - ductilité

Après transformation de phase, l'acier forme de la perlite. La perlite fine est plus **résistante** tandis que l'acier sphéroïdisé est plus **ductile**. Compromis à trouver !

dureté



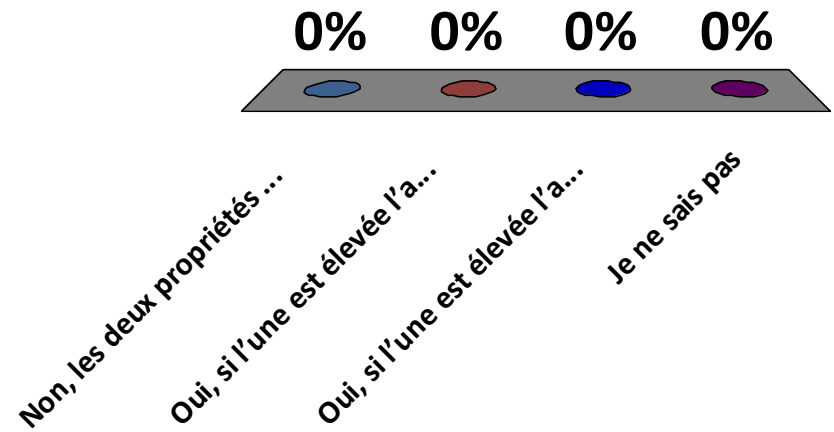
ductilité



Callister, *Materials Science and Engineering*.

Y a-t-il un lien entre limite élastique et élongation à rupture (ductilité) ?

- A. Non, les deux propriétés sont différentes
- B. Oui, si l'une est élevée l'autre aussi
- C. Oui, si l'une est élevée l'autre est faible
- D. Je ne sais pas



Références bibliographiques principales

- A. Mortensen & T. Kruml, *Déformation et Rupture des Matériaux, Cours EPFL, 2014.*
- M. Ashby & D.R.H. Jones, *Matériaux 1. Propriétés, applications et conception*, Dunod 4^e édition, 2013.
- M. Ashby & D.R.H. Jones, *Matériaux 2. Microstructures et procédés de mise en œuvre*, Dunod 4^e édition, 2014.
- W.F. Hosford, *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge University Press, 2nd edition, 2010.
- G. Dieter, *Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition*, McGraw-Hill, 1988.
- J-P. Bailon & J-M. Dorlot, *Des matériaux*, Presses Internationales Polytechnique, 3^e édition, 2000.
- T.H. Courtney, *Mechanical Behavior of Materials*, McGraw-Hill, 1990.
- M. Meyers & K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge University Press, 2nd edition, 2009.
- R.E. Smallman and A.H.W. Ngan, *Modern physical metallurgy*, Elsevier, 8th edition, 2014.
- J. et Julia R. Weertman, *Théorie élémentaire des dislocations*, Masson et Cie, 1970.