

UTBM – branche GMC

# Final MA42

Printemps 2025

## Consignes :

- Le QCM de la page 10 compte pour la note des TP. Il est conseillé de ne pas passer plus de 15 minutes sur cet exercice et il compte pour 4 points de la note de TP.
- Il est conseillé de faire la partie 1 pour s'imprégner du contexte du sujet. La formule de la question 1.2 peut être considérée comme acquise si vous n'arrivez pas à la démontrer.
- Les parties 2 et 3 sont indépendantes
- Une feuille recto-verso de notes de cours est autorisée
- La durée de l'examen est de **1h30**.
- **Le sujet est à remplir et à rendre avec son nom en pied de chaque page. Les cases grisées sont prévues pour les réponses. S'il vous manque de la place, ajouter la réponse sur la copie d'examen.**

## Barème :

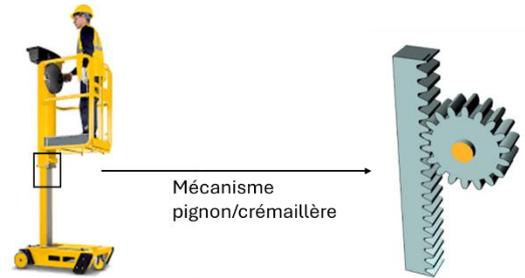
- Partie 1 / 4 points
- Partie 2 / 8 points
- Partie 3 / 6 points
- Partie 4 / 3 points

Rédigé par Olivier MARCONOT  
01/06/2025

## Contexte de l'étude :

Cette étude vise à évaluer les différents traitements thermiques et de surface à réaliser pour assurer la fiabilité des dents d'un système pignon/crémaillère utilisé dans une nacelle élévatrice d'une capacité de 5000 kg. Après avoir dressé le cahier des charges en Partie 1, deux matériaux seront étudiés :

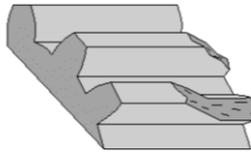
- Un acier allié (Partie 2)
- Un acier au carbone pour procédé de cémentation (Partie 3)



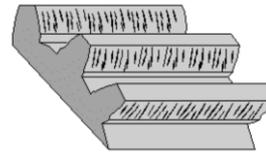
## Partie 1 : propriétés mécaniques d'un engrenage

Dans cette partie, on établit les prérequis sur le matériau pour éviter :

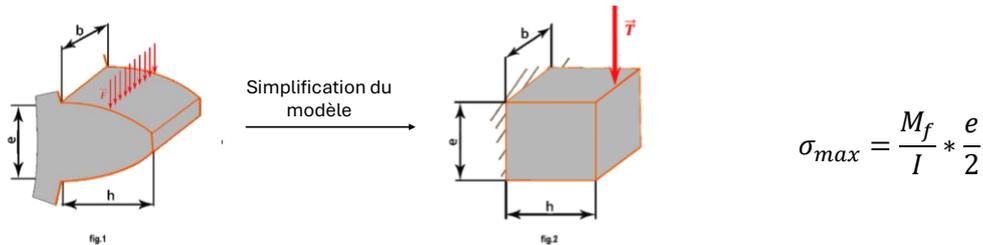
(a) La rupture de la dent



(b) L'abrasion de la dent



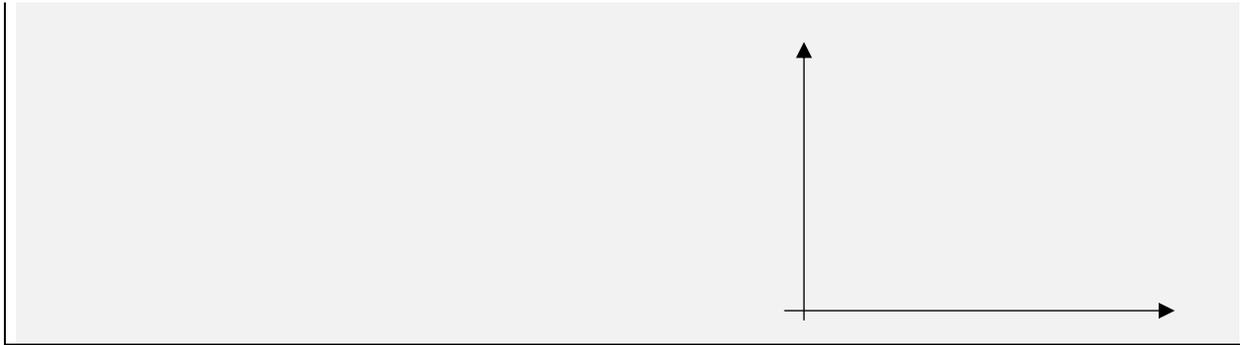
En première approximation, une dent est assimilée à une poutre encastrée, fléchi par un effort "T" (Effort Tangentiel concentré) supposé situé au sommet, afin de se placer dans des conditions défavorables (surdimensionnement).



Avec  $M_f = T * h$  le moment maximal de flexion et  $I = \frac{b * e^3}{12}$  le moment d'inertie de la dent.

I.1. Quelle contrainte maximale est admissible pour assurer un fonctionnement normal du mécanisme sans déformation plastique ? Sans rupture ? Quel comportement doit être évité pour éviter une rupture subite ? Justifier alors que l'engrenage doit présenter un allongement à la rupture minimal de 10 %. Tracer les valeurs mentionnées sur une courbe typique d'essai de traction.

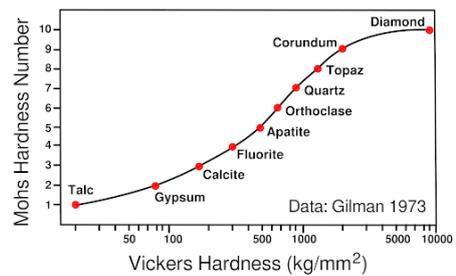
Nom, prénom :



I.2. Pour une hauteur de dent  $h = 16 \text{ mm}$ , une épaisseur moyenne  $e = 12 \text{ mm}$ , une masse soulevée de  $1000 \text{ kg}$  (soit un effort de  $10 \text{ kN}$ ), montrer que la largeur  $b$  du mécanisme pignon/crémaillère est reliée à la limite élastique  $\sigma_{el}$  en MPa du matériau par la relation :

$$b \text{ (en mm)} = \frac{3,75 \cdot 10^4}{\sigma_{el}}$$

Suivant les conditions de travail, des poussières comme du sable (essentiellement composé de quartz) peut venir se coincer dans les mécanismes. Grâce à une lubrification qui diminue le frottement, nous considérons que la dureté équivalente du sable est abaissée de moitié. Le graphique ci-contre montre l'équivalence obtenue entre l'échelle de Mohs et la dureté Vickers.



I.3. Estimer la dureté cible d'une dent. Doit elle être superficielle ou doit-elle pénétrer à cœur ? Argumenter.

Nom, prénom :

## Partie 2 : étude d'un acier allié :

Après revue d'un catalogue d'un fournisseur d'acier, nous trouvons cette description pour l'acier 35NiCr18-4 :

« Acier de traitement au nickel-chrome ayant une résistance de 1300 à 1500 N/mm<sup>2</sup>. Il est utilisé pour les roues dentées, pignons, vilebrequins, pièces d'engrenages et de chaînes ainsi que pour d'autres pièces mécaniques fortement sollicités à la flexion et à la torsion »

Notre premier choix se porte naturellement sur cette nuance. On rappelle les dénominations pour les aciers alliés :

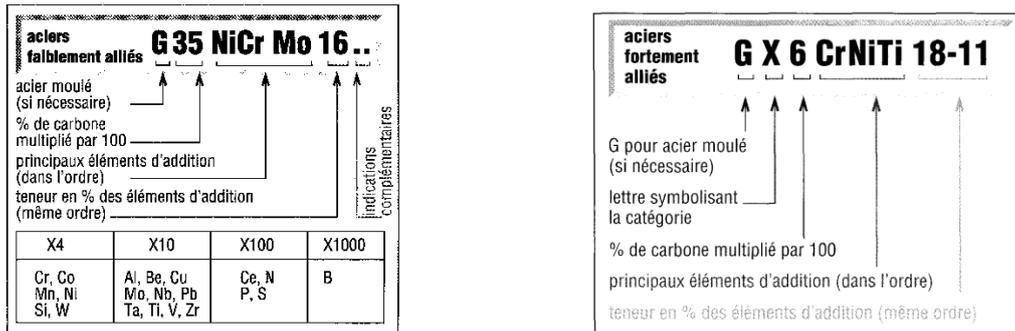


Figure 1 : nomenclature des aciers alliés

2.1. En s'aidant des nomenclatures des aciers alliés, donner la composition de l'acier considéré.

Le diagramme de Schaeffler permet de déterminer rapidement la structure interne de l'acier en utilisant des taux équivalents de nickel Ni et de chrome Cr donnés par la teneur de chaque élément :

- $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0.5(\%Mn) + 21(\%C) + 11,5(\%N)$
- $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 3(\%Si) + (\%Mo)$

Nom, prénom :

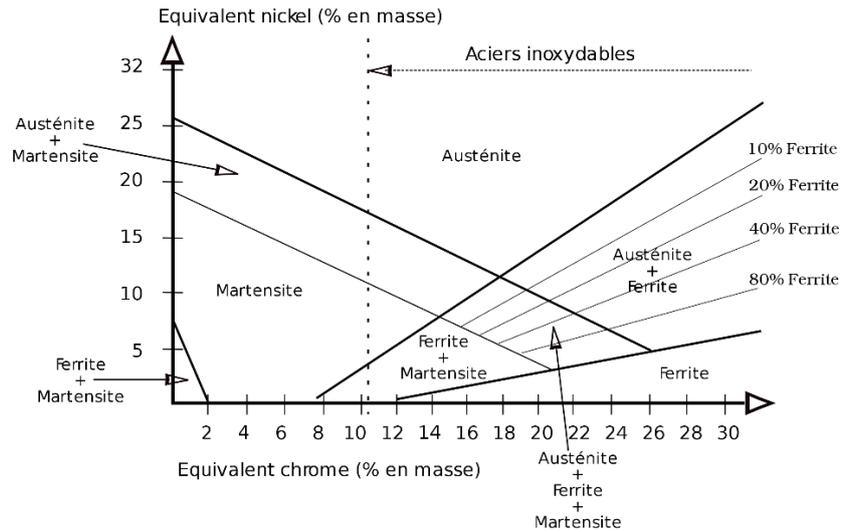


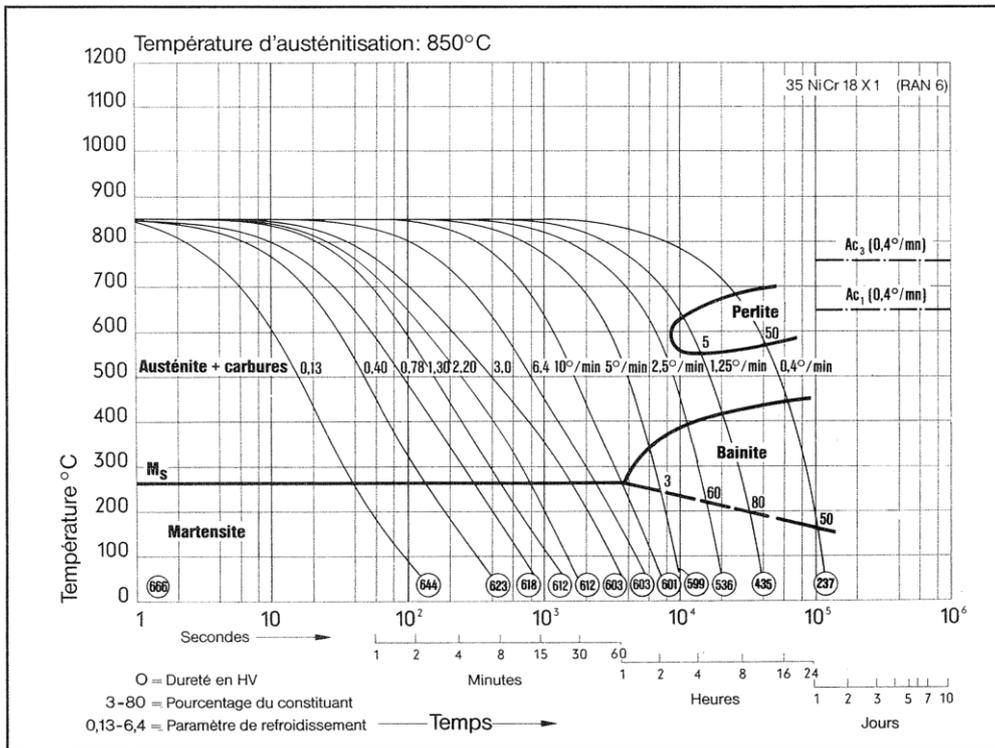
Figure 2 : diagramme de Schaeffler des aciers alliés

2.2. Calculer les pourcentages de chrome et de nickel équivalent puis placé l'acier sur le diagramme de Schaeffler. Est un acier inoxydable ? Est-ce un acier martensitique, austénitique, ferritique ou duplex (mélange de phase) ?

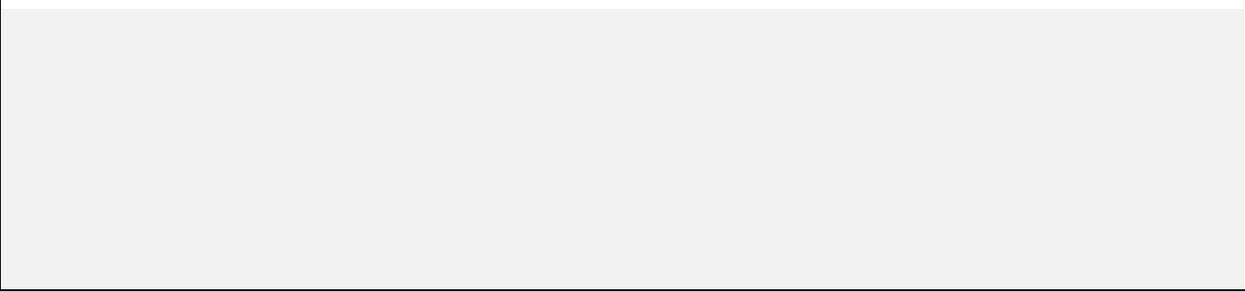
Le diagramme TRC (Traitement en Refroidissement Continu) permet de prédire la microstructure de l'acier suivant le temps de refroidissement après une austénisation.

2.3. Le diagramme TRC est-il cohérent avec la réponse de la question 2.2 ? Que faudrait il pour obtenir un matériau mou après austénisation afin de pouvoir le mettre en forme par usinage ( $HV < 300$ ) ? Tracer la courbe de refroidissement correspondante sur le TRC. D'un point de vue pratique, comment fait-on ce traitement thermique ?

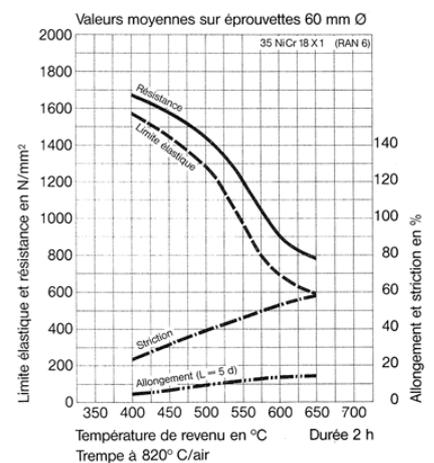
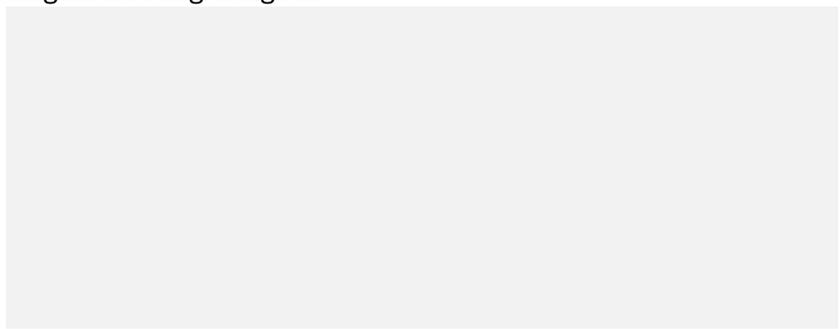
Nom, prénom :



2.4. Après mise en forme, comment peut-on durcir le matériau pour obtenir 100% de martensite ? Tracer le refroidissement limite nous permettant de l'obtenir sur le diagramme TRC. Quel milieu suggérez-vous pour ce refroidissement ?



2.5. Après le traitement thermique de durcissement le matériau est trop fragile. Quel revenu proposez-vous pour assurer un allongement minimal de 10% conforme au cahier des charges ? En reprenant l'expression montrée en question 1.2, estimer la largeur de l'engrenage b.



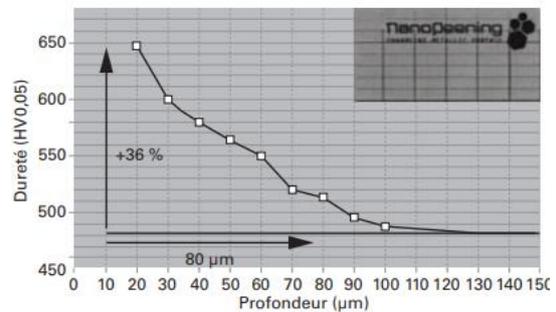
Nom, prénom :

Dans le cas des aciers, la dureté HV est reliée à la limite à la rupture par la relation :

$$R_m = 3,3 * HV$$

2.6. Estimer la dureté en surface après revenu. Est-elle conforme au cahier des charges ?

Afin d'augmenter la dureté en surface, nous procédons à un grenailage. Ce procédé consiste à « bombarder » la surface par des microbilles de verre. A chaque impact, le matériau se déforme. La figure ci-dessous montre un procédé de grenailage et une filiation de dureté depuis la surface de la pièce :



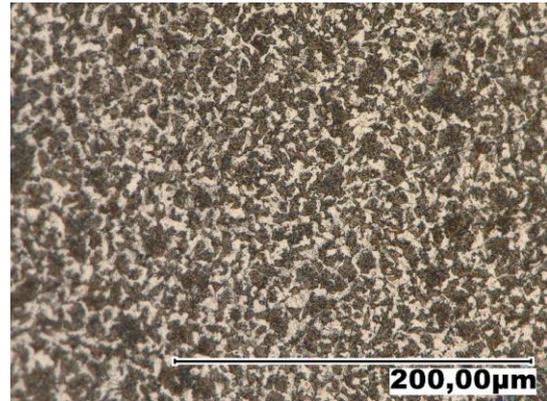
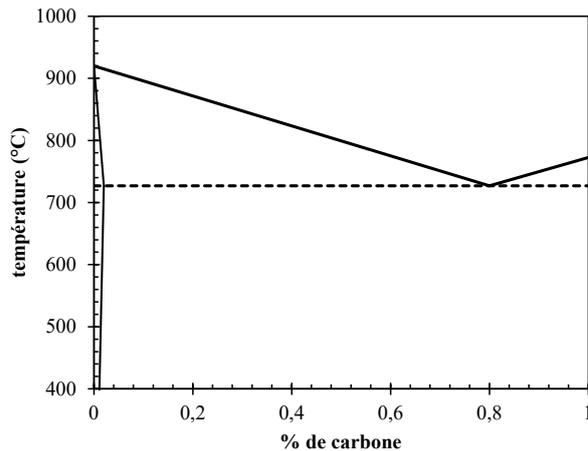
2.7. Expliquer par quels mécanismes ce procédé permet d'augmenter la dureté en surface du matériau. Est-ce que la dureté obtenue en surface permet d'atteindre le cahier des charges imposée en partie 1 ?

Nom, prénom :

## Partie 3 : cémentation d'un acier doux au carbone :

Afin d'optimiser les coûts de production, on décide d'utiliser un acier doux au carbone. Vous ne disposez pas de la composition de l'acier mais vous réalisez un traitement thermique à 900°C avec un refroidissement lent puis observez la microstructure ci-dessous. Par traitement d'image, vous obtenez 40% de domaines noirs et 60% de domaines blancs. Vous obtenez une dureté HV=150, on rappelle que la résistance mécanique est reliée empiriquement par la relation :

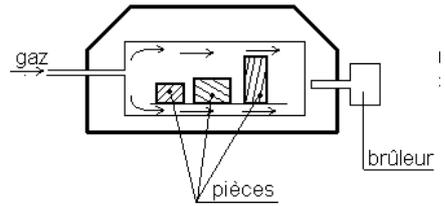
$$R_m = 3,3 * HV$$



3.1. Déterminer la composition de l'acier. Tracer la règle des segments inverses sur le diagramme d'équilibre ci-dessus et préciser à quoi correspondent les domaines noirs et blancs. Est-ce que la dureté mesurée est cohérente avec la composition ? Remplit-elle les requis techniques posés en question 1.3 ? Dimensionner la largeur  $b$  des dents pour remplir le requis technique de la question 1.2 en supposant que  $\sigma_{el} \approx 0.8 R_m$ .

Nom, prénom :

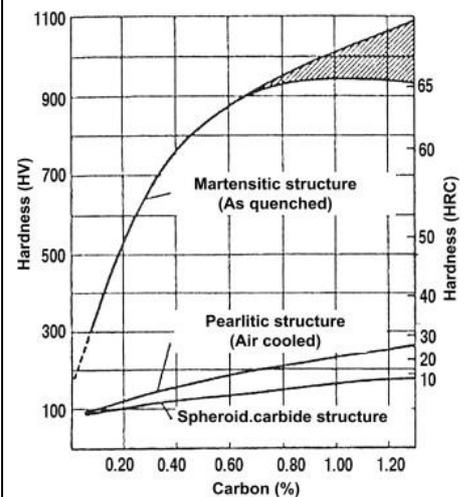
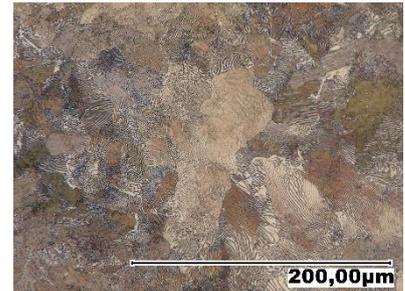
Afin d'augmenter la dureté en surface de l'acier pour résister à l'abrasion, l'engrenage est placé dans un four à acétylène en présence de monoxyde de carbone. Par décomposition de ce dernier, la surface de la pièce est enrichie en carbone. Afin de prédire les conditions optimales, on simplifie le problème de diffusion de carbone dans la pièce par la première loi de Fick :



$$x(t) = \sqrt{D * t} \text{ Avec } D = 2 * 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s à } 920^\circ\text{C}$$

3.2. Estimer le temps nécessaire pour que le carbone diffuse sur 0,1 mm de profondeur. Qualitativement, que se passe-t-il si la température augmente ?

3.3. Après traitement de cémentation, vous observez la microstructure ci-contre en extrême surface de la pièce. Est-ce que cette structure est celle que vous attendiez ? Proposer un traitement thermique qui ne durcira que la surface de la pièce en vous aidant du diagramme d'équilibre. En vous aidant du diagramme ci-contre, quelle dureté vous attendez-vous à obtenir en surface et à cœur ? Justifier.



Nom, prénom :

## Partie 4 : analyse critique des deux méthodes utilisées :

4.1. Comparer les deux méthodes pour identifier les avantages et les inconvénients des deux méthodes sur différents points. On pourra parler de la facilité des traitements thermiques et de la mise en forme des pièces, des propriétés mécaniques obtenues, de l'aspect économique.

### QCM sur les TP (4 points de la note finale de TP)

Pas de points négatifs mais une erreur entraîne une note de 0 sur la question. Plusieurs réponses possibles pour les questions 2,3,4.

1. Afin de mener à bien une étude métallographique sur un alliage, classer par ordre chronologique de 1 à 7 les différentes étapes du processus. Plusieurs réponses sont possibles pour la microdureté, n'en donner qu'une.

Ponçage	Attaque chimique	Polissage	Découpe	Enrobage	Microscope

2. Une étude de diffusion d'un métal dans un autre permet d'étudier :

- Les propriétés de dureté de différentes compositions d'alliage	
- L'impact de l'écroutissage sur le métal pur	
- Etudier la robustesse d'un assemblage obtenue par brasage de deux matériaux	
- Etudier la coulabilité d'un métal dans un moule en cuivre	

3. Le traitement thermique avec le refroidissement à l'air d'une soudure par point permet :

- D'homogénéiser la composition chimique de l'alliage	
- De passer de phases hors-équilibre à des phases prévues par le diagramme d'équilibre	
- De passer de phases prévues par le diagramme d'équilibre à des phases hors-équilibre	
- D'effacer l'historique thermique correspondant à la fusion du point de soudure	

4. Après un traitement thermique sur du cuivre pur écroui à 500°C :

- La dureté passe de 90HV à 45HV car le cuivre est restauré puis cristallisé	
- La dureté passe de 90HV à 45HV car les éléments d'alliage sont dissouts	
- La dureté passe de 90HV à 45HV grâce à la trempe à l'eau	
- La ductilité du cuivre est plus faible car les dislocations se sont multipliées lors du traitement th.	

Nom, prénom :