

+0/1/60+



Ens. Eric Boillat - Procédés de production

Date 04.07.2022 - durée : 3h00

Table No.

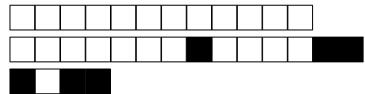
## Examen

Nom :

Attendez s'il vous plaît le début de l'examen avant de tourner cette page. Ce document est imprimé recto-verso, il contient 13 pages, les dernières pages sont peut-être vides. Vous êtes priés de n'enlever l'agrafe sous aucun prétexte.

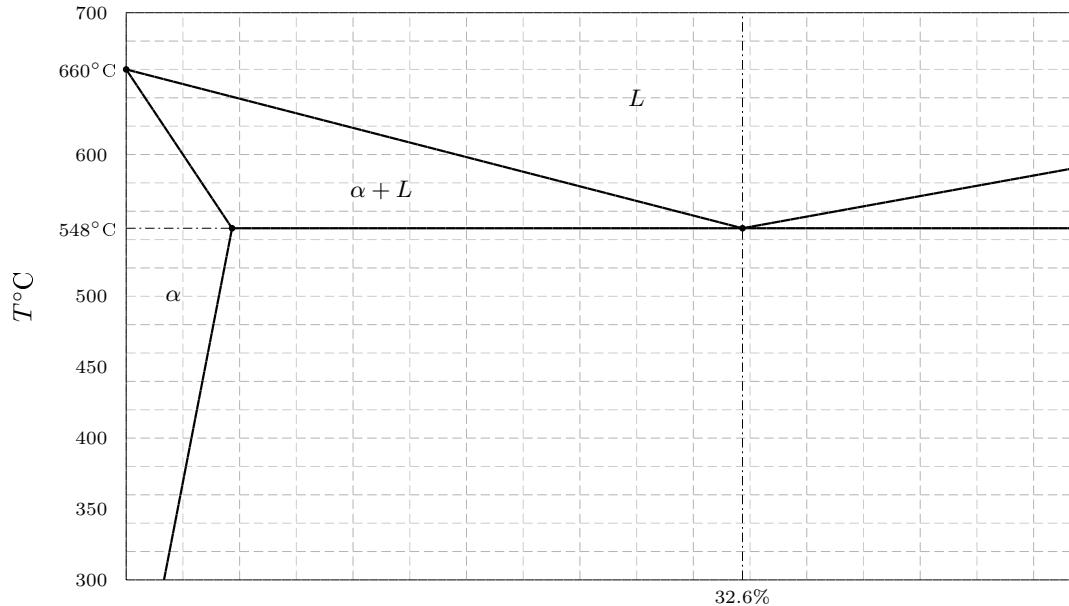
- On vous demande de rédiger proprement vos réponses dans les cases prévues à cet effet.  
Dans le cas de questions nécessitant un développement, il est recommandé de ne pas vous servir des cases officielles comme brouillon. Ne les utilisez que pour y écrire la version définitive de votre solution.
- Ne répondez pas au hasard aux QUESTIONS À MALUS. Une réponse fausse donne un point négatif!
- Après l'examen, l'enseignant se réserve le droit d'annuler toute question qu'il considérera finalement comme mal posée.

Question	Nombre de points
1)	
2)	
3)	
<b>Total</b>	



**Question 1** Procédés de fondue: propriétés thermiques des matériaux

- a) La Fig. 1 représente le diagramme de phase de l'alliage Al-Cu jusqu'à une concentration massique de 50% de Cu.



*c*: concentration de Cu dans Al

Figure 1: Diagramme de phase de l'alliage Al-Cu ( $c < 50\%$ )

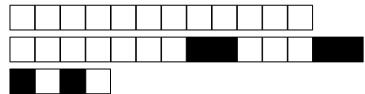
- 1) D'après la Fig. 1, quelle est la température de fusion de l'aluminium pur?

- 2) Déterminez la plus grande température en-dessous de laquelle la phase liquide n'est plus un état d'équilibre possible. Par quel adjectif qualifie-t-on cette température?

- 3) Calculez la pente  $m$  du liquidus et précisez son unité.

- b) Pour déterminer la constante de ségrégation  $k$  du cuivre dans l'aluminium, vous mesurez la fraction liquide lors de la solidification d'un alliage de titre  $c^* = 10\%$ . A la température de  $T = 600^\circ$ , vous trouvez  $f_L = 48.4\%$ . Calculez  $k$  à partir de cette information (i.e. sans la lire sur le graphique de la Fig. 1).

**N.B.** La vitesse de refroidissement qui a été appliquée était si faible qu'à son échelle de temps, la diffusion du cuivre dans la matrice d'aluminium est quasi instantanée.



- c) Que vaut la solubilité maximale  $c_{\text{max}}$  du cuivre dans l'aluminium?

- d) Si le cuivre n'a plus le temps de diffuser dans la matrice d'aluminium à l'échelle de temps à laquelle la solidification a lieu, la fraction liquide  $f_L$  observée à  $T = 600^\circ$  sera supérieure à la valeur donnée à l'item b). Peut-on estimer la plus grande valeur que  $f_L$  peut atteindre? Dans ce cas, donnez cette valeur.

- e) Vous pratiquez à la coulée continue d'un barreau en Al-Cu au titre  $c^* = 10\%$ . Vous observez une solidification en front plan à l'abscisse  $x = x_s$  (cf. Fig. 2)

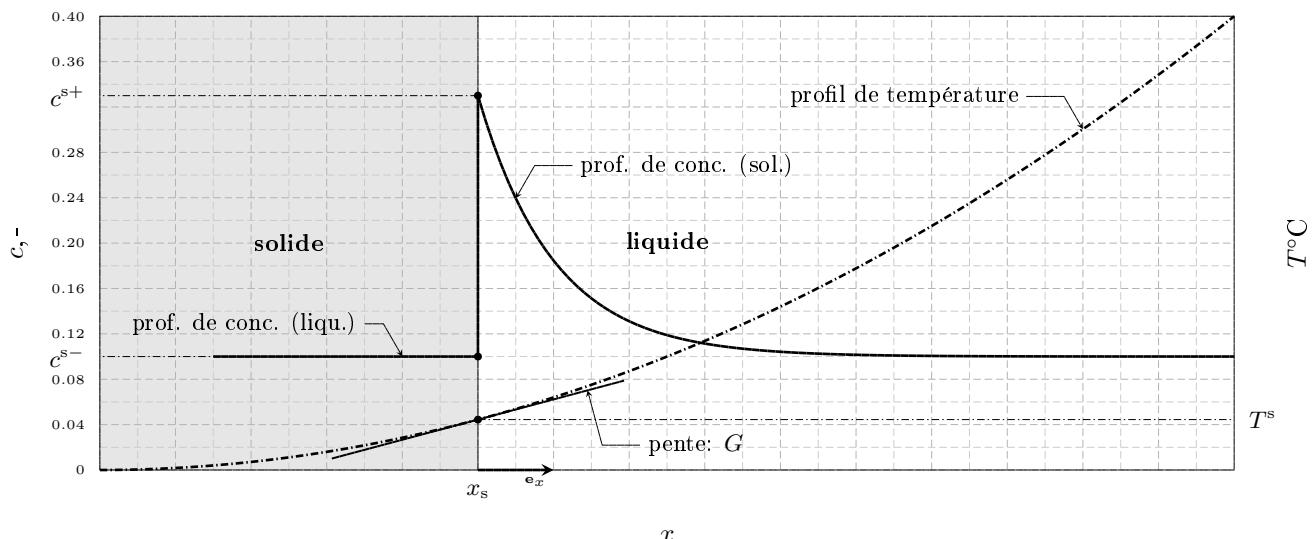
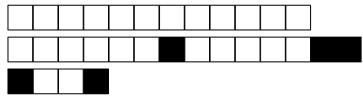


Figure 2: Coulée continue de l'alliage Al-Cu ( $c^* = 10\%$ ) - solidification en front plan



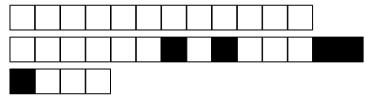
- 1) La courbe en trait plein sur la Fig. 2 représente le profil de concentration massique de Cu (dans notre cas, la concentration ne dépend que de l'abscisse  $x$  et est constante dans la partie solide, à l'exception éventuelle du début de coulée). Déterminez la concentration  $c^{s-}$  à la gauche du front (cf. Fig. 2).

- 2) Déterminez la température  $T^s$  du front.

- 3) Déterminez la concentration  $c^{s+}$  à la droite du front (côté liquide cf. Fig. 2).

- 4) Pour que le front plan soit **stable**, il faut que la pente  $G$  du profil de température imposée (courbe en traitillé sur la Fig. 2) soit supérieure à une certaine valeur  $G_{\min}$ . Déterminez cette valeur limite en utilisant que le profil de concentration massique de Cu dans le liquide est donné par l'équation

$$c(x) = c^* + (c^{s+} - c^*)e^{-\frac{x-x_s}{\ell}} \quad \text{avec} \quad \ell = 0.1 \text{ mm.} \quad (1)$$



+0/5/56+

- 5) On ajoute l'information que la section du tube de coulée est  $S_0 = 10'000 \text{ mm}^2$  et que le coefficient de diffusion du cuivre dans l'aluminium liquide vaut  $D = 10^{-4} \text{ g/mm/s}$ . Dans ces conditions, on vous demande de calculer la masse  $\dot{M}$  de matière que vous produisez par unité de temps.

**Question 2** Procédés de fromage: propriétés mécaniques des matériaux, calcul économique

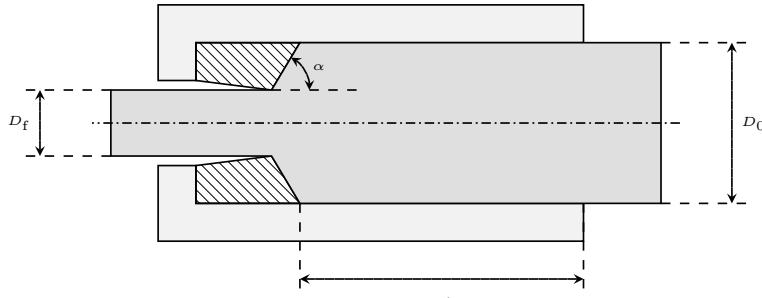


Figure 3: Extrusion de barres en aluminium

On produit par extrusion à chaud ( $T_{\text{form}} \simeq 225^\circ\text{C}$ ) des profilés en alliage d'aluminium à partir de barres brutes de diamètre  $D_0 = 100$  mm. On peut approcher la forme exacte du profilé par un disque de diamètre  $D_f = 50$  mm. En outre, le demi-angle d'ouverture de la filière utilisée vaut  $\alpha = 60^\circ$  et la longueur de contact entre le lopin et le container est de  $L' = 1'250$  mm (cf. Fig. 3).

- a) La Tab. 1 récapitule les propriétés de l'alliage:

module d'Young	tx. de déf. réel en lim. élas.	coeff. de Poisson
$E = 32 \text{ GPa}$	$\varepsilon_e = 0.00125$	$\nu = 0.34$
masse volumique	chaleur spécifique	chaleur latente
$\rho = 2.9 \text{ g/cc}$	$C_p = 0.8 \text{ J/g/}^\circ\text{C}$	$L = 376 \text{ J/g}$

Table 1: Propriétés mécaniques et thermiques de l'alliage (@225°C)

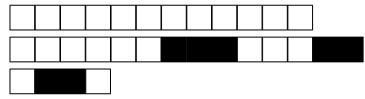
On vous indique que le comportement plastique de cet alliage est non loin d'être **idéal**. Compléter les informations de la Tab. 1 en indiquant les valeurs des quantités suivantes:

- 1) la limite élastique réelle  $\sigma_e$  (à 225°C),

- 2) la limite élastique nominale  $R_e$  (à 225°C),

- 3) le coefficient d'écrouissage  $n$ ,

- 4) le module d'écrouissage  $K$ ,

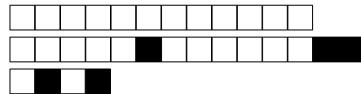


5) la résistance  $R_m$  (sous l'hypothèse de Considère).

- b) La vitesse maximale à laquelle la presse pousse le lopin dans la filière est de  $v_0^{\max} = 1 \text{ m/min}$ . On vous demande de calculer la vitesse de sortie  $v_f$  de la pièce en tenant compte que l'alliage **n'est pas incompressible**:  $\nu = 0.34 \neq 0.5$  (cf. Tab. 1).

- c) On ajoute l'information que le coefficient de frottement entre l'alliage et la filière est  $\mu = 0.1$  et on vous demande de calculer l'énergie **mécanique**  $E_{\text{mec}}$  (en unité de kWh) que nécessite la fabrication d'une unité de longueur de profilé.

- d) Calculez la puissance mécanique de la presse lorsqu'elle travaille à vitesse maximale  $v_0 = v_0^{\max} = 1 \text{ m/min}$ .



- e) Utilisez les informations données à la Tab. 1 pour calculer l'énergie **thermique**  $E_{\text{th}}$  que le dispositif de chauffage de la presse doit fournir, afin d'amener la matière nécessaire à fabriquer 1 m de profilé de la température ambiante  $T_a \simeq 20^\circ\text{C}$  à la température de formabilité  $T_{\text{form}} \simeq 225^\circ\text{C}$ .

- f) Votre service comptable vous fournit différentes informations économiques qui sont résumées aux Tabs. 2 et 3.

Presse			
Prix	nb. d'années d'amort.	taux d'intérêt	utilisation
$P_{pr} = 2'000 \text{ kFr}\text{s}$	$n = 15 \text{ ans}$	$i = 5\%/\text{an}$	$6'570 \text{ h/an}$
loyer des locaux	prix d'une filière	prix de la mat. première	prix de l'énergie
$Lr = 240 \text{ Frs}/\text{an}/\text{m}^2$	$P_{fil} = 25 \text{ kFr}\text{s}$	$p_m = 5 \text{ Frs}/\text{kg}$	$c_e = 0.04 \text{ Frs}/\text{kWh}$

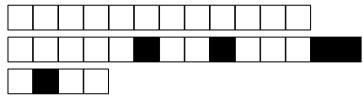
Table 2: Données économiques

	technicien niv. 1	technicien niv. 2	ingénieur	personnel administratif
équi. plein temps	$n_{t1} = 0.4$	$n_{t2} = 0.2$	$n_i = 0.05$	$n_a = 0.05$
sal. annuel, kFr\$ /an	$W_{t1} = 80$	$W_{t2} = 90$	$W_i = 150$	$W_a = 100$

Table 3: Ressources humaines impliquées dans une production de profilés

- 1) Calculez le coût matière  $P_m$  et le coût énergétique  $P_e$  par mètre de profilé produit. Qu'observez-vous?

- 2) Déterminez le coût d'outillage  $P_o$  si la commande de votre client correspond à une longueur totale de  $L_{tot} = 1.5$  km de profilés.

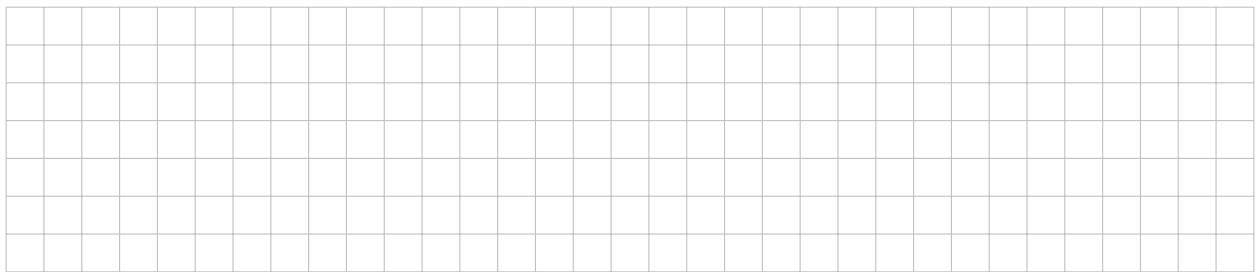
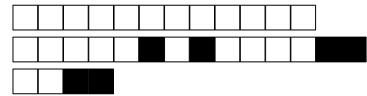


- 3) Calculez le taux horaire de la main d'oeuvre  $R_{mdo}$ .

- 4) Déterminez le taux horaire  $R_{\text{pr}}$  de la presse. Dans ce calcul vous tiendrez compte qu'un loyer est dû (cf. Tab. 2) pour les locaux de surface au sol  $S_{\text{sol}} = 60 \text{ m}^2$  que la presse et ses périphériques occupent.

- 5) Calculez  $P$ , le prix de revient par mètre de profilé lorsque la presse fonctionne à la vitesse maximale  $v_0^{\max} = 1 \text{ m/min}$ .

- 6) Peut-on réduire les coûts en utilisant la presse à une vitesse moindre? Justifiez votre réponse.



- g) A partir de quelle commande totale est-il favorable d'utiliser deux filières à la sortie de la presse plutôt qu'une seule (cf. Fig. 4) et que vaudra le prix de revient d'un mètre de profilé dans ce cas?

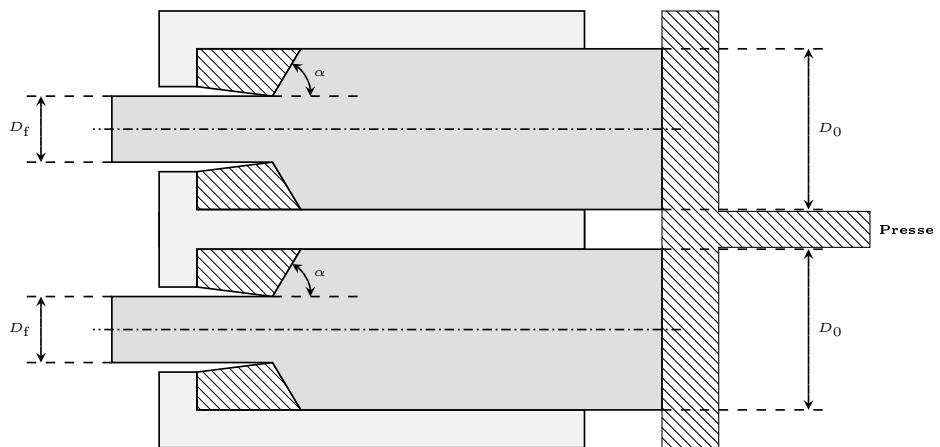
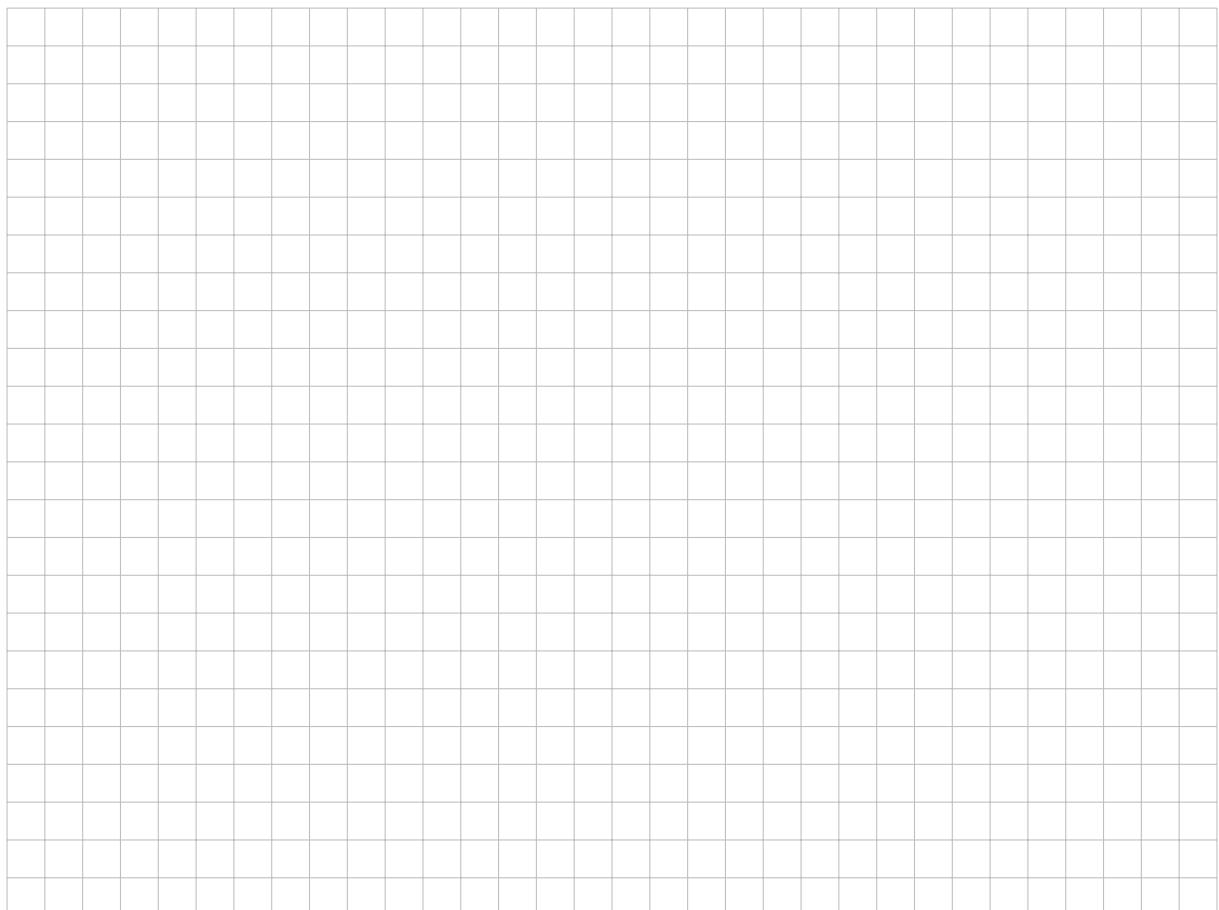
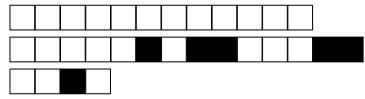


Figure 4: Dispositif à deux filières





h) Lorsqu'on utilise deux filières, quelle force la presse doit-elle appliquer?

A large grid of 10 columns and 20 rows, designed for students to write their answers in. The grid is composed of small squares, providing a clear structure for handwriting practice.

**Question 3** Procédés de coupe: modèle orthogonal et coupe à angle négatif

La Fig. 5 est l'ébauche d'un modèle de coupe orthogonal avec un angle de coupe  $\alpha$  négatif.

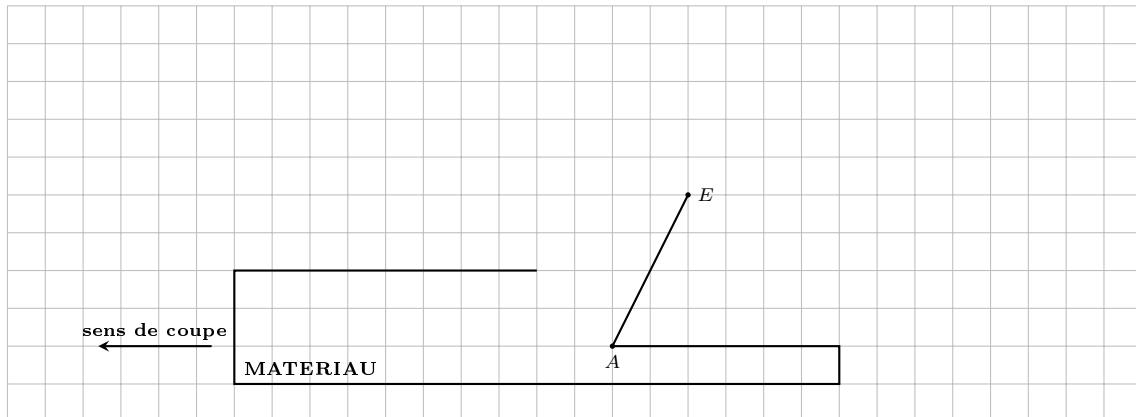
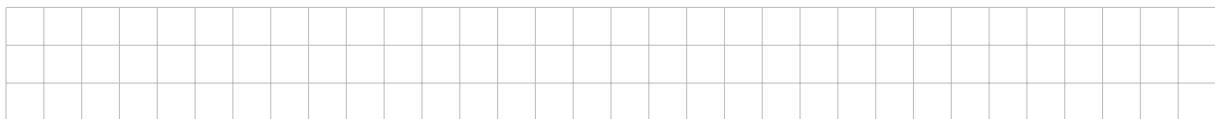


Figure 5: Modèle orthogonal de coupe avec angle de coupe négatif

- a) Quel nom donne-t-on au segment  $AE$  déjà représenté sur la Fig. 5?



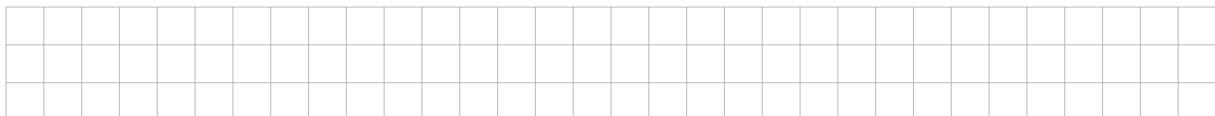
- b) On vous demande de compléter la Fig. 5 en y ajoutant les éléments suivants:

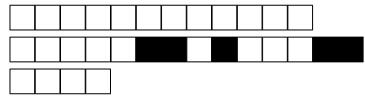
- i) la perpendiculaire au sens de coupe passant par l'arête de coupe,
- ii) l'angle de coupe  $\alpha$  de sorte à ce qu'il soit **négatif**,
- iii) le plan de cisaillement,
- iv) l'angle de cisaillement  $\Phi$ ,
- v) le copeau.

- c) **Question à malus.** Pour laquelle (lesquelles) des raisons ci-dessous peut-il être recommandé d'utiliser des angles de coupe négatifs?

- parce que la force d'avance nécessaire est plus faible pour des angles de coupe négatifs que pour des angles de coupe positifs.
- parce que la force de coupe nécessaire est plus faible pour des angles de coupe négatifs que pour des angles de coupe positifs.
- parce qu'un angle de coupe négatif a une influence bénéfique sur l'écrouissage et l'état de la surface usinée.
- parce que l'énergie spécifique de coupe est plus faible pour des angles de coupe négatifs que pour des angles de coupe positifs.

- d) **Question à malus.** Donner (au moins) un exemple de matériau qu'il est souvent recommandé de couper avec un angle de coupe négatif.





- e) On coupe un matériau sur un tour de décolletage avec un angle de coupe  $\alpha = -70^\circ$ . Le coefficient de frottement lame-copeau vaut

$$\mu \simeq 0.5.$$

On suppose que le matériau est homogène et isotrope et on vous demande d'estimer l'angle de cisaillement  $\Phi$ .

