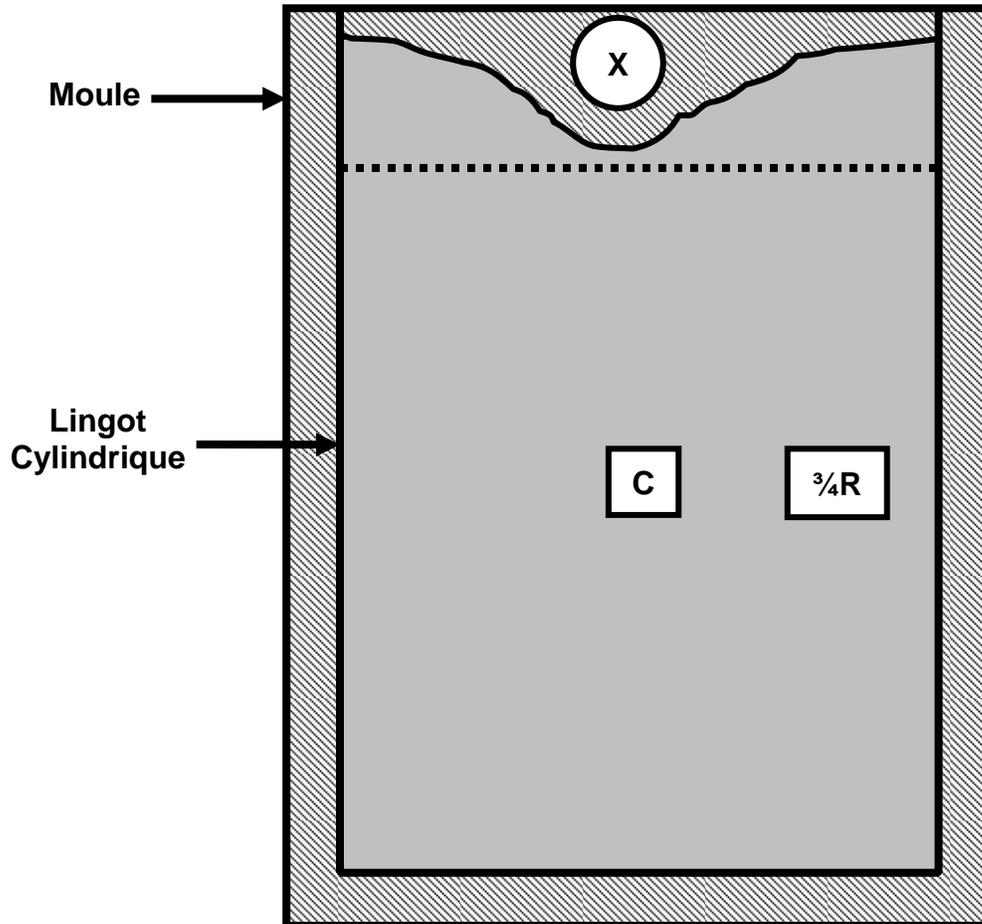


<i>Identification de l'étudiant(e)</i>				<b>Réservé</b>
Nom :		Prénom :		Q1
Signature :		Matricule :	Groupe :	/14
				Q2
				/14
				Q3
				/7
				<b>/35</b>
<i>Sigle et titre du cours</i>		<i>Groupe</i>		<i>Trimestre</i>
MTR2000 Matériaux métalliques		Tous		Hiver 2011
<i>Professeurs</i>		<i>Local</i>		<i>Téléphone</i>
Richard Lacroix		A-476		4771
<i>Jour</i>	<i>Date</i>		<i>Durée</i>	<i>Heures</i>
Mercredi	27 avril 2011		2 h 30	13 h 30 - 16 h 00
<i>Documentation</i>		<i>Calculatrice</i>		
<input checked="" type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toute <input type="checkbox"/> Voir directives particulières		<input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toutes <input checked="" type="checkbox"/> Non programmable		Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits.
<i>Directives particulières</i>				
1. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de <b>35</b> points. 2. <b>Pour les questions nécessitant des calculs ou une justification, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit.</b> 3. Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs.				
<b>Important</b>	Cet examen contient <b>3</b> questions sur un total de <b>10</b> pages. (excluant cette page)			
	La pondération de cet examen est de <b>35</b> %			
	Vous devez répondre sur : <input checked="" type="checkbox"/> le questionnaire <input type="checkbox"/> le cahier <input type="checkbox"/> les deux			
	Vous devez remettre le questionnaire : <input checked="" type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non			

**Question N°1****Solidification et forgeage****(14 points)**

Vous travaillez pour une entreprise manufacturière qui fabrique des pièces d'aluminium. Vous avez pour mandat l'étude d'un procédé de fonderie visant à fabriquer des lingots d'aluminium destinés à être mis en forme par déformation plastique par la suite. Vous effectuez la coulée de divers échantillons témoins de forme cylindrique afin d'étudier l'effet de divers paramètres sur la microstructure. Pour tous les essais, une dénivellation centrale apparaît sur la surface libre supérieure du lingot. Ce défaut est montré sur la figure ci-dessous et est identifié par X.



- a) Comment appelle-t-on le défaut identifié par X ? (0,5 point)

**Retassure ouverte.**

- b) Qu'est-ce qui explique la présence de ce défaut ? Expliquez également pourquoi le défaut est apparu à cet endroit. (1 point)

**Ce défaut est causé par la contraction du métal lors de la solidification. Il apparaît là où se trouve le dernier liquide. Comme l'extraction de chaleur est plus faible sur le dessus (pas de contact avec le moule), la solidification se terminera sur le dessus et le défaut apparaîtra à cet endroit.**

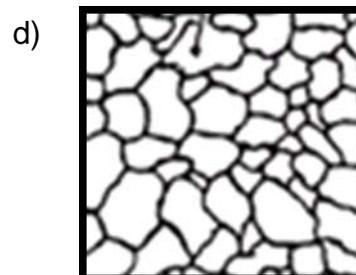
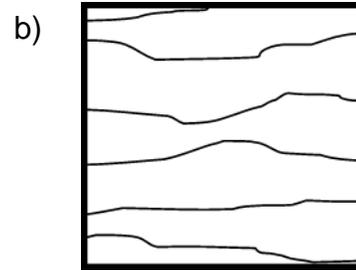
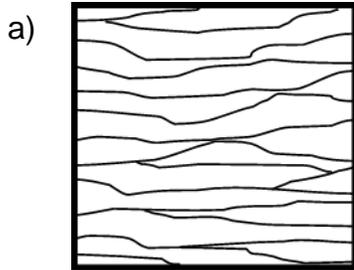
Les paramètres à l'étude sont les suivants :

- La nature du moule : moule en sable ou moule en acier
- L'alliage utilisé : alliage A (0,05 % Cu) et l'alliage B (4,5 % Cu)
- L'ajout ou non d'une poudre très fine de titane

Les 5 cas suivants sont étudiés :

CAS	MOULE	ALLIAGE	AJOUT DE POUDRE
1	Sable	A	NON
2	Acier	A	NON
3	Sable	B	NON
4	Acier	B	NON
5	Acier	A	OUI

- c) On vous demande de prévoir la microstructure dans la pièce à deux endroits (C : cœur et  $\frac{3}{4}$  Rayon) pour chaque combinaison de paramètres. Pour ce faire, associez une des 4 images suivantes aux endroits C et  $\frac{3}{4}$ R.



Inscrivez vos réponses (a, b c ou d) dans le tableau ci-dessous.

(5 points)

CAS	C : Cœur	$\frac{3}{4}$ Rayon
1	i) <b>b</b>	<b>b</b>
2	<b>a</b>	ii) <b>a</b>
3	iii) <b>d</b>	<b>b</b>
4	<b>c</b>	iv) <b>a</b>
5	v) <b>c</b>	<b>c</b>

- d) Justifiez vos réponses à la question précédente pour les cases identifiées en fond gris. (2,5 points)
- i) Cas 1, à cœur :

---

**L'alliage étant presque pur (intervalle de solidification très faible), il n'y a pas de surfusion structurale. Le front de solidification est donc plan et les grains sont colonnaires. Comme le refroidissement est lent, la structure est grossière.**

---

- ii) Cas 2, au  $\frac{3}{4}$  rayon :

**Le métal étant presque pur (intervalle de solidification très faible), il n'y a pas de surfusion structurale. Le front de solidification est donc plan et les grains sont colonnaires. Comme le refroidissement est rapide, la structure est fine.**

---

- iii) Cas 3, à cœur :

**L'alliage présente un intervalle de solidification plus important, ce qui engendre une surfusion structurale. Cette dernière est assez importante au centre de la pièce pour favoriser une structure équiaxe. Le refroidissement étant lent, la microstructure sera grossière.**

---

- iv) Cas 4, au  $\frac{3}{4}$  rayon :

**L'alliage présente un intervalle de solidification plus important, ce qui engendre une surfusion structurale. Cette dernière est moins importante au début de la solidification car le gradient de température dans le liquide est élevé. Cela favorise une structure basaltique fine, la vitesse de refroidissement étant grande.**

---

- v) Cas 5, à cœur :

**La poudre ajoutée à l'alliage agit comme inoculant. La germination hétérogène est fortement favorisée. Il y a donc formation de grains fins et équiaxes dans toute l'épaisseur de la pièce.**

---

Pour tous les cas, une analyse chimique est effectuée aux endroits C et  $\frac{3}{4}R$ . Une variation de la teneur en cuivre est observée, mais cette variation n'est pas aussi importante pour tous les cas.

- e) Quel est le nom utilisé en métallurgie pour décrire cette variation ? (1 point)

**La ségrégation (rejet de Cu devant le front de solidification).  
Macroségrégation ou ségrégation majeure.**

- f) Pour lequel des 5 cas étudiés la variation de la teneur en cuivre entre le cœur (C) et une position au  $\frac{3}{4}$  du rayon est-elle la plus importante ? Dites pourquoi ? (1 point)

**L'alliage B présente une teneur en Cu plus importante et par conséquent son intervalle de solidification plus important favorise la ségrégation. Cette dernière dépend de la diffusion, qui est plus importante lorsque la vitesse de refroidissement est faible (moule en sable). Il s'agit du cas 3.**

Le procédé actuellement utilisé correspondait au cas 3.

Une fois la solidification complétée, le lingot est coupé le long de la ligne pointillée puis il est soumis à un forgeage à chaud pour obtenir la forme finale d'une pièce.

- g) Le forgeage est un procédé plus dispendieux que le moulage. Quels sont cependant les avantages du forgeage ? (1 point)

**Le forgeage à chaud permet d'obtenir des propriétés mécaniques plus élevées car le corroyage transforme la microstructure grossière et colonnaire de fonderie en une microstructure composée : de grains fins, dépourvue de porosités et avec un fibrage parallèle aux surfaces forgées.**

- h) Expliquez pourquoi le forgeage est réalisé « à chaud ». (1 point)

**Il est réalisé à chaud pour corroyer la microstructure et pour diminuer la contrainte d'écoulement.**

- i) Proposez une méthode qui permettrait d'augmenter la résistance mécanique finale de la pièce coulée et forgée à chaud. (1 point)

**Pour un alliage d'aluminium comportant du cuivre en quantité suffisante comme c'est le cas pour l'alliage B, il est possible d'augmenter la résistance mécanique par un traitement de durcissement structural. La pièce doit donc être mise en solution, trempée et vieillie.**

---

**Question N°2****Tubes d'acier****(14 points)**

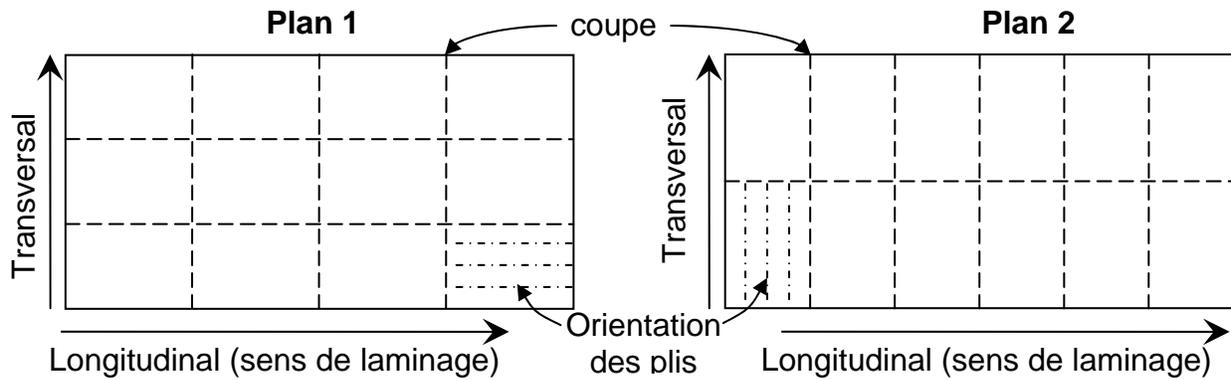
Un ingénieur s'occupant de la conception de tubes de section carrée en acier inoxydable austénitique 316 avec une microstructure à l'état O (état recuit et recristallisé) désire les fabriquer à partir de tôles minces de 1220 mm × 2440 mm × 1,5 mm obtenues par laminage à chaud et à froid et livrées à l'état H18 (fortement écrouies, à l'état écroui 4/4 dur). Les tubes seront fabriqués par pliage et soudage de plaques de 400 mm × 600 mm × 1,5 mm prélevées sur les tôles par découpage.

- a) Quelles sont les textures qui se sont développées lors des opérations de mise en forme des tôles ? (2 points)

**Le laminage à froid produit une texture morphologique (allongement des grains dans le sens du laminage) et une texture cristallographique (rotation des grains selon une orientation cristallographique commune).**

**Le laminage à chaud produit une texture morphologique seulement; il s'agit du fibrage inclusionnaire.**

L'ingénieur propose les plans de découpe suivants :



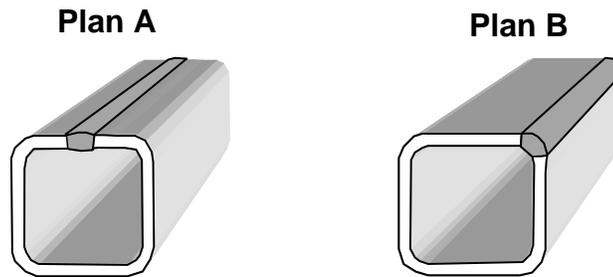
- b) Pour faciliter le pliage, quel traitement thermique peut-on recommander ? Dans quel but ? (2 points)

**Les tôles sont reçues à l'état H18, ce qui signifie qu'elles ont été durcies par écrouissage. Pour rendre le métal ductile, il suffit de porter l'alliage à l'état O, c'est-à-dire à l'état recuit et recristallisé. Un recuit de recristallisation est donc le traitement thermique indiqué. Ce traitement permet de porter la microstructure à l'équilibre formant de petits grains équiaxes à faible densité de dislocations.**

- c) Quel plan de découpe devrait-on choisir ? Dites pourquoi ? (2 points)

**Le plan de découpe 2 est préférable. Les plis doivent être orientés perpendiculairement au sens du laminage afin d'éviter la fissuration. À cause du fibrage inclusionnaire, il est plus facile de fissurer la tôle de métal lorsque cette dernière est pliée dans le sens parallèle au sens du laminage.**

L'ingénieur qui a décidé de joindre les bouts des plaques par soudage propose deux plans de pliage menant à des positions de soudure différentes :



De plus, l'ingénieur sait que deux des principaux problèmes rencontrés lors du soudage d'aciers inoxydables austénitiques sont la fissuration à chaud et la sensibilisation à la corrosion.

d) Quelle est la cause de la fissuration à chaud ? (2 points)

**Les aciers inoxydables austénitiques sont sensibles à la fissuration à chaud en raison de la présence d'un film liquide enrichi en impuretés par ségrégation séparant les grains en cours de solidification. Cet effet s'ajoute à la forte contraction à la solidification subie par l'acier inoxydable austénitique 316 et entraîne la fissuration du cordon de soudure.**

e) Quelle est la cause de la sensibilisation ? (1 point)

**Ces aciers peuvent être le siège, dans la zone affectée thermiquement (ZAT), d'une sensibilisation (à la corrosion) due à la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains austénitiques accompagné d'un appauvrissement en chrome dans les zones adjacentes.**

- f) Par quels moyens peut-on éviter ces problèmes ? (2 points)

**On peut :**

- 1. souder avec une énergie de soudage H faible pour limiter la grandeur du bain de fusion et de la zone affectée thermiquement (ZAT) et diminuer le temps de séjour à haute température. Cela minimise la ségrégation dans le bain de fusion (minimisant la fissuration à chaud) ainsi que la diffusion des atomes dans la ZAT (minimisant la sensibilisation).**
- 2. utiliser la nuance à bas carbone de l'acier inoxydable austénitique 316, la nuance 316L, pour éviter le problème de sensibilisation.**

---

L'ingénieur veut automatiser l'opération de soudage.

- g) Dans les deux plans de pliage, A et B, qui vous sont proposés, lequel choisira-t-on et pourquoi ? (1 point)

**Les distorsions dues au soudage seront moins importantes pour le plan A.  
De plus, il est plus facile de souder sur une surface plane que sur un coin.**

- 
- h) À la fin de l'assemblage, quelle opération faut-il effectuer pour avoir les tubes dans l'état demandé ? (3 points)

**Les tubes doivent être livrés au client à l'état O, recuit et recristallisé.**

**On fera un recuit à une température assez élevée (au-dessus de 1025 °C) pour dissoudre les carbures de chrome et homogénéiser la concentration de chrome dans l'acier qui sera suivi d'un refroidissement rapide. Ce recuit aura aussi pour effet d'éliminer les effets de l'écrouissage sur la microstructure des zones déformées par pliage.**

### Question n° 3      Aciers de traitement thermique      (7 points)

La figure ci-dessous montre les courbes de trempabilité Jominy de trois aciers de traitement thermique (1040, 4340 et 9260) ainsi qu'un abaque de correspondance pour les ronds de trempé.

- a) Indiquez à quel acier correspond chaque courbe. (1,5 point)

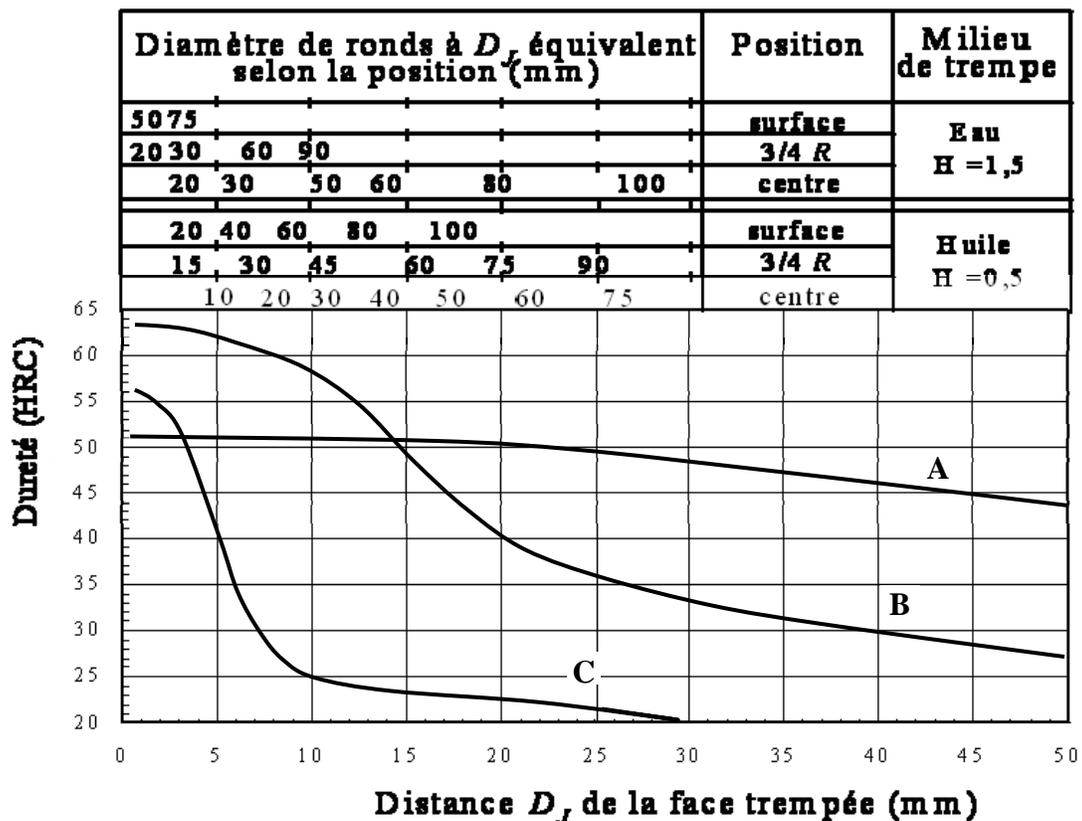
<b>Courbe A</b>	<b>4340</b>
<b>Courbe B</b>	<b>9260</b>
<b>Courbe C</b>	<b>1040</b>

- b) Pour quelle raison la courbe de l'acier C diminue plus rapidement que celles des deux autres ? (1 point)

**L'acier 1040 est un acier au carbone qui a une faible trempabilité.**

- c) Pour quelle raison l'acier B a-t-il une dureté plus élevée que celle de l'acier C à proximité de la face trempée ? (1 point)

**Parce que la dureté de la martensite augmente avec la teneur en carbone.**



- d) Pour quelle raison l'acier A a-t-il une dureté plus faible que celle de l'acier C à proximité de la face trempée ? (1,5 point)

**Parce qu'il n'y a pas eu dissolution complète du carbone lors de l'austénitisation, c'est-à-dire qu'une partie du carbone de cet acier allié est encore sous forme de carbures.**

- 
- e) Si vous connaissiez la composition chimique de ces trois aciers mais que vous n'aviez pas leurs courbes Jominy, comment pourriez-vous évaluer quantitativement leur soudabilité ? (2 points)

**On pourrait calculer le carbone équivalent de chaque acier.**

**Plus la valeur du carbone équivalent d'un acier est faible, plus cet acier est soudable.**

---

Bonne Chance,

Richard Lacroix, chargé de cours.