

CHAPITRE XIX : FLUAGE (TD)

A.-F. GOURGUES-LORENZON

EXERCICE 1 : FLUAGE D'UN ALLIAGE FER-CHROME-ALUMINIUM POUR CONVERTISSEURS CATALYTIQUES METALLIQUES

Cet exercice s'appuie sur la thèse d'Angelos Germidis, soutenue à l'Ecole des Mines de Paris en 1996, en partenariat avec Rosi (actuellement Arvin Meritor). Les questions sont en italiques.

Le convertisseur catalytique est un organe de traitement des gaz de combustion venant du moteur, destiné à limiter le rejet d'espèces polluantes dans l'atmosphère. Il est placé sur la ligne d'échappement, entre le moteur et le silencieux. Il est chargé de traiter trois sortes d'émissions gazeuses particulièrement nocives pour l'environnement : CO, les hydrocarbures HC et les oxydes d'azote NOx. Il est constitué d'une structure à grande surface d'échange, recouverte de la couche qui contient le catalyseur (métaux précieux). Celui-ci n'est efficace qu'à haute température.

1.1 Analyse fonctionnelle du convertisseur catalytique

- *Quelles sont les fonctions de la structure du convertisseur catalytique ?*
- *Déterminer les sollicitations (mécaniques, thermiques, chimiques...) imposées à ces pièces lors de l'utilisation du véhicule.*
- *En déduire les propriétés attendues de ces structures.*

1.2 Choix du matériau

La structure elle-même du convertisseur, appelée « monolithe », peut être réalisée soit dans un matériau céramique, soit dans un matériau métallique.

La structure des convertisseurs en céramique est une cordiérite, mélange d'oxydes tels que la magnésie, l'alumine et la silice. Le procédé de mise en forme peu coûteux et les conditions de service imposent une géométrie simple et une épaisseur de paroi de l'ordre de 100 à 200 μm . Le convertisseur en céramique est apparu le premier et représente encore une partie très importante du marché.

La structure des convertisseurs métalliques est réalisée dans un alliage Fe-20Cr-5Al, par empilement alterné de feuilles minces lisses et de feuilles minces ondulées. Après enroulement et fixation des feuilles les unes aux autres, la structure ressemble à celles représentées sur la Figure 1. L'épaisseur des parois est de 40 à 50 μm ; elle conduit à une structure légère (malgré la densité du fer) et à de faibles pertes de charge aérodynamiques lors du passage des gaz.

Quels sont les avantages et les inconvénients respectifs des structures métalliques et céramiques en termes de propriétés mécaniques, de stabilité thermique et chimique, de coût ?

Dans la suite de l'exercice, on s'intéressera au fluage de l'alliage Fe-Cr-Al constitutif des convertisseurs catalytiques métalliques.

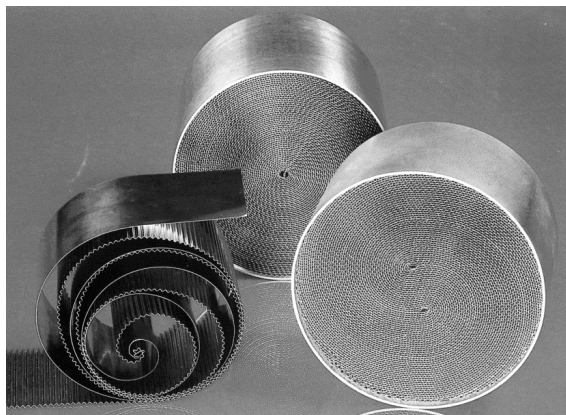


Figure 1 : Structure du convertisseur catalytique métallique, d'après Arvin Meritor.

1.3 Lois de fluage

La Figure 2 présente les résultats d'essais de fluage sur cet alliage, en termes de vitesse de déformation stationnaire en fonction de la contrainte. On a utilisé une échelle logarithmique. Les données expérimentales sont reproduites sur le Tableau 1.

- Quelles formes de lois dégagerez-vous de ces résultats expérimentaux ?
- Déterminer les exposants correspondants.
- Calculer la valeur de l'énergie d'activation pour les différents domaines de fluage. Si l'on augmente la température de 100°C, de combien la vitesse de déformation augmente-t-elle ?

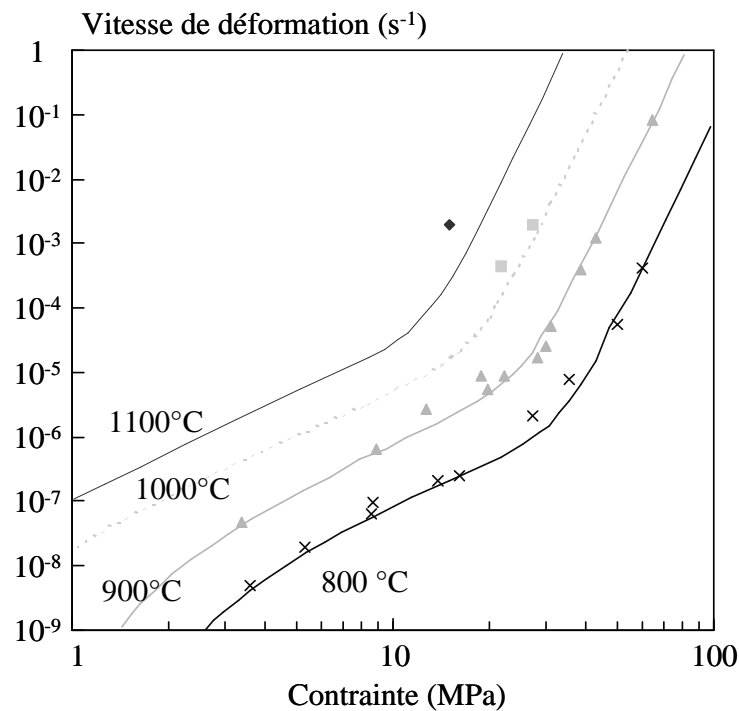


Figure 2 : Variation de la vitesse de déformation stationnaire en fonction de la contrainte pour l'alliage Fe-Cr-Al.

TABLEAU 1 : DONNEES EXPERIMENTALES DE FLUAGE DE L'ALLIAGE FER-CHROME-ALUMINIUM

T = 800°C		T = 900°C		T = 1000°C		T = 1100°C	
σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	σ (MPa)	eps pt (s^{-1})
60,1	$4,26 \cdot 10^{-4}$	64,2	$8,32 \cdot 10^{-2}$	27,3	$1,99 \cdot 10^{-3}$	15,1	$1,98 \cdot 10^{-3}$
49,8	$5,48 \cdot 10^{-5}$	43,1	$1,20 \cdot 10^{-3}$	21,8	$4,37 \cdot 10^{-4}$		
35,2	$8,06 \cdot 10^{-6}$	38,5	$3,84 \cdot 10^{-4}$				
27,3	$2,17 \cdot 10^{-6}$	31,0	$5,28 \cdot 10^{-5}$				
16,1	$2,52 \cdot 10^{-7}$	30,1	$2,52 \cdot 10^{-5}$				
13,9	$2,06 \cdot 10^{-7}$	28,3	$1,74 \cdot 10^{-5}$				
8,7	$9,47 \cdot 10^{-8}$	22,2	$8,89 \cdot 10^{-6}$				
8,5	$6,33 \cdot 10^{-8}$	19,9	$5,55 \cdot 10^{-6}$				
5,3	$1,95 \cdot 10^{-8}$	18,9	$8,88 \cdot 10^{-6}$				
3,6	$5,06 \cdot 10^{-9}$	12,7	$2,64 \cdot 10^{-6}$				
		8,9	$6,43 \cdot 10^{-7}$				
		3,4	$4,80 \cdot 10^{-8}$				

eps pt : vitesse de déformation stationnaire en fluage

1,4 Interprétation des mécanismes de déformation

Les différents mécanismes de déformation sont schématiquement représentés sur la Figure 3 en fonction de la température et de la contrainte appliquée. Une telle représentation est une compilation de données expérimentales prises dans la littérature, confrontées à des modèles de type loi puissance. La carte de la Figure 3 est relative au fer pur avec une taille de grains de 100 μm , en éliminant le domaine où le fer est de structure cubique à faces centrées (entre 912 et 1438°C), car ce domaine n'existe pas pour les alliages Fe-Cr-Al, du fait de leur forte teneur en chrome qui stabilise la phase cubique centrée,

- Replacer les données de fluage déterminées précédemment sur la carte d'Ashby du fer pur pour $T = 900^\circ\text{C}$, On prendra le module de cisaillement approximativement égal à 60 GPa à 900°C ,
- Les valeurs de vitesse de fluage sont-elles cohérentes avec celles prévues par la carte d'Ashby ?
- En déduire les possibilités et les limites de l'utilisation de la carte relative au fer pur pour l'alliage Fe-Cr-Al,

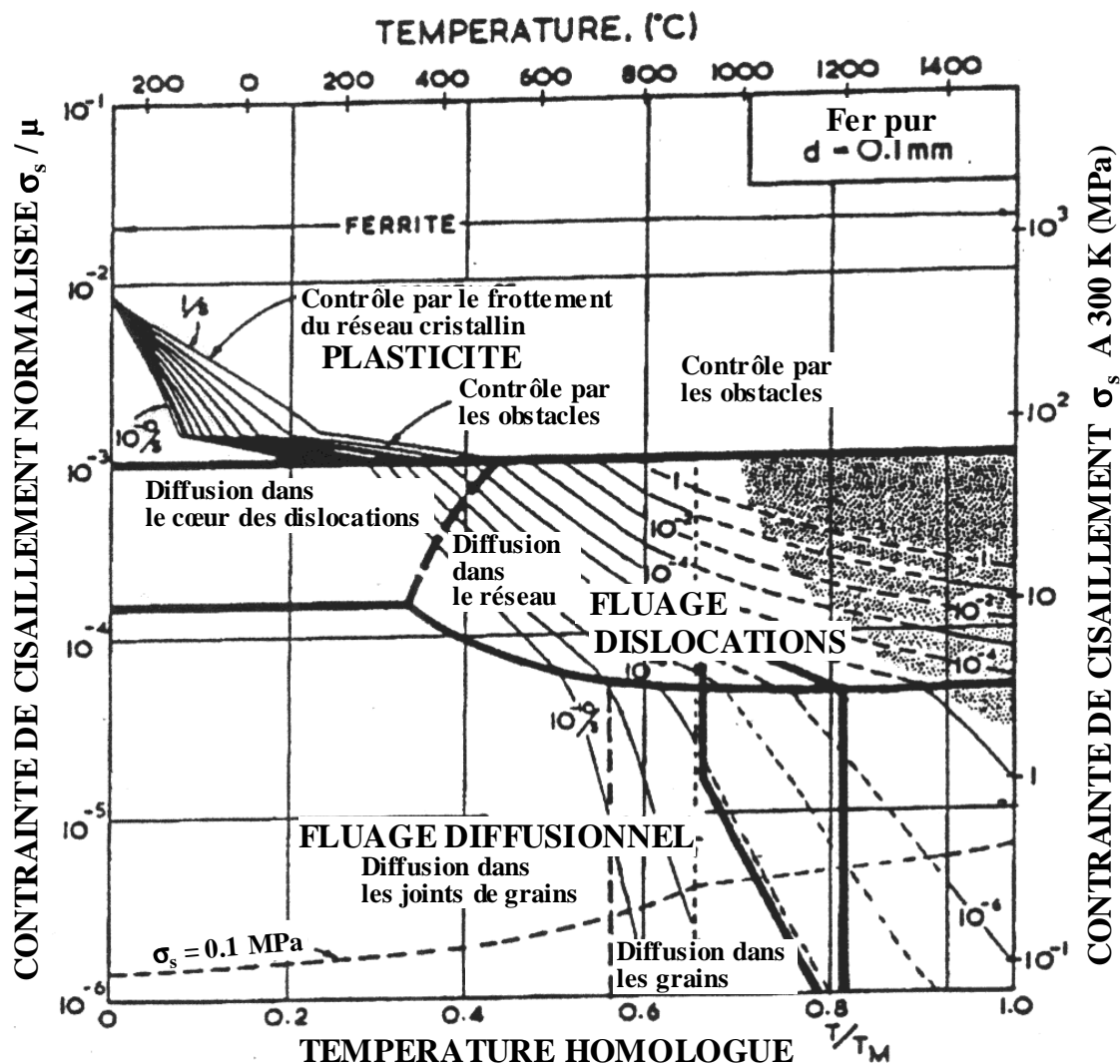


Figure 3 : Carte de mécanismes de déformation (« carte d'Ashby ») du fer pur, avec omission du changement de phase allotropique de la ferrite (cubique centrée) en austénite (cubique à faces centrées), T_M est la température de fusion du matériau (en K), D'après Frost et Ashby (1982), La contrainte de cisaillement normalisée est égale à la contrainte de traction divisée par le module de cisaillement à la température considérée et par $\sqrt{3}$, La vitesse de déformation normalisée est égale à la vitesse de déformation en traction multipliée par $\sqrt{3}$, Les lignes d'iso-vitesse de déformation sont de décade en décade (séparées les unes des autres par un facteur 10),

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- H,J, Frost, M,F, Ashby, *Deformation-mechanism maps*, Pergamon Press, Oxford, 1982,
A, Germidis, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1996,

CHAPITRE XIX : FLUAGE (CORRIGE)

A.-F. GOURGUES-LORENZON

La réponse attendue est parfois accompagnée d'indications complémentaires (non demandées, mais pour l'information du lecteur), qui figurent *en italiques*.

EXERCICE 1 : FLUAGE D'UN ALLIAGE FER-CHROME-ALUMINIUM POUR CONVERTISSEURS CATALYTIQUES METALLIQUES

1.1 Analyse fonctionnelle du convertisseur catalytique

Le convertisseur catalytique doit laisser passer les gaz tout en permettant les réactions chimiques de dépollution. La structure doit donc notamment :

- Présenter une faible résistance à l'écoulement gazeux (éviter les pertes de charge)
- Servir de support à la couche contenant les catalyseurs
- Résister aux températures élevées, à la corrosion à haute température par les gaz oxydants, carburants ou nitrurants, aux sollicitations mécaniques liées à l'écoulement des gaz et aux vibrations du véhicule.

Pour information, la température des gaz à la sortie du moteur induit un fonctionnement à 800 ou 900°C, en particulier lors des transitoires (conduite en ville par exemple) ; de forts gradients thermiques existent également dans les pièces, induisant des gradients de déformation et donc un chargement mécanique supplémentaire.

Les sollicitations sont donc de natures variées :

- thermiques : hautes températures, cyclage thermique
- mécaniques : fluage, fatigue à température variable
- chimiques : corrosion dite « sèche » par les différents gaz qui y circulent.

1.2 Choix du matériau

Les avantages respectifs des structures métalliques et des structures céramiques sont les suivants :

Structure céramique :

- bonne résistance à la corrosion (oxydes relativement inertes dans ces conditions) ;
- faible coefficient de dilatation thermique, donc moins de risque d'écaillage de la couche contenant les catalyseurs lors des cycles thermiques de fonctionnement ;
- faibles coûts du matériau et de la mise en œuvre, donc coût de revient nettement plus bas (*pour information : 20%*). *C'est le convertisseur utilisé sur les véhicules de grande série.*

Structure métallique :

- meilleure résistance aux chocs et aux vibrations (moindre fragilité) ;
- masse réduite, malgré la densité du fer car les parois sont nettement plus minces que dans le cas de la cordiérite ;
- meilleure conduction de la chaleur, qui entraîne une activation rapide (le catalyseur est rapidement efficace après démarrage) car la structure chauffe plus vite.

Pour information, cette structure induit en outre une perte de charge réduite, une compacité plus élevée d'où une plus grande souplesse de positionnement dans la ligne d'échappement. C'est la solution du « haut de gamme ».

1.3 Lois de fluage

En coordonnées logarithmiques, les courbes peuvent raisonnablement être modélisées par des segments de droite. On peut donc dégager une évolution de la vitesse de déformation comme une loi puissance en fonction de la contrainte appliquée, ce qui est courant dans de nombreux alliages métalliques.

On écrit la loi de fluage sous la forme :

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT}\right) \text{ où } n \text{ est l'exposant de Norton et } \Delta H \text{ est l'énergie d'activation.}$$

Si l'on relève deux points sur chaque courbe avec pour indices respectifs 1 et 2, en prenant le quotient des deux lois et en passant au logarithme on obtient :

$$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right) = n \ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)$$

D'où il vient :

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}$$

Les valeurs numériques correspondantes sont reportées sur le Tableau 2. Les contraintes normalisées sont les contraintes de cisaillement divisées par le module de cisaillement à 900°C ; les déformations normalisées sont les déformations de cisaillement.

TABLEAU 2 : DEPOUILLEMENT DES ESSAIS DE FLUAGE

T = 900°C

Domaine des fortes contraintes

σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	σ normalisée)	eps pt normalisée (s^{-1})	n
31.0	$5.28 \cdot 10^{-5}$	$2.98 \cdot 10^{-4}$	$9.15 \cdot 10^{-5}$	10.1
64.2	$8.32 \cdot 10^{-2}$	$6.18 \cdot 10^{-4}$	$1.44 \cdot 10^{-1}$	

domaine des contraintes plus faibles

σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	σ normalisée	eps pt normalisée (s^{-1})	n
3.40	$4.80 \cdot 10^{-8}$	$3.27 \cdot 10^{-5}$	$8.32 \cdot 10^{-8}$	2.7
8.90	$6.43 \cdot 10^{-7}$	$8.56 \cdot 10^{-5}$	$1.11 \cdot 10^{-6}$	

eps pt : vitesse de déformation stationnaire

Effet de la température :

Dans le domaine des contraintes élevées on repère deux points à 900 et 1000°C pour une contrainte appliquée de 28 MPa. En supposant que le paramètre B ne dépend pas de la température il vient :

$$\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right)$$

D'où, en passant aux logarithmes :

$$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right) = \ln\left[\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^n\right] - \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \text{ d'où l'on déduit la valeur de } \Delta H :$$

$$\Delta H = R \frac{\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right) - \ln\left[\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^n\right]}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

Les valeurs correspondantes sont données dans le Tableau 3.

TABLEAU 3 : DETERMINATION DES ENERGIES D'ACTIVATION ENTRE 900 ET 1000°C

Domaine des fortes contraintes				
σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	T ($^{\circ}C$)	n	ΔH (kJ/mol)
28,3	$1,74 \cdot 10^{-5}$	900	10,1	633
27,3	$1,99 \cdot 10^{-3}$	1000		
domaine des contraintes plus faibles				
σ (MPa)	eps pt (s^{-1})	T ($^{\circ}C$)	n	ΔH (kJ/mol)
8,5	$6,33 \cdot 10^{-8}$	800	2,7	230
8,9	$6,43 \cdot 10^{-7}$	900		

eps pt : vitesse de déformation stationnaire

Les valeurs sont très élevées pour le régime des fortes contraintes. Pour le régime des faibles contraintes, l'exposant de 3 fait penser à du fluage dislocations, la valeur de l'énergie d'activation est courante pour la diffusion dans les métaux.

Si l'on augmente la température de 100°C, on multiplie la vitesse de fluage par un facteur 10 dans le régime des faibles contraintes et par un facteur 100 dans le régime des fortes contraintes.

1.4 Interprétation des mécanismes de déformation

Les données sont replacées dans la figure ci-dessous. Les valeurs numériques ont été tirées du Tableau 2.

Les vitesses de fluage sont nettement surestimées par la carte d'Ashby : quasiment d'un facteur 10. Le domaine des basses contraintes, réputé lié au fluage diffusionnel, n'est pas compatible avec un exposant de 2.7 déterminé expérimentalement. Les frontières entre les domaines, aussi bien que les vitesses de fluage « absolues », sont donc modifiées par les éléments d'alliage et/ou par la taille de grains du matériau.

Il est donc hasardeux d'utiliser cette carte du fer pur pour en déduire des données quantitatives pour l'alliage Fe-Cr-Al : il faut tracer sa propre « carte d'Ashby ».

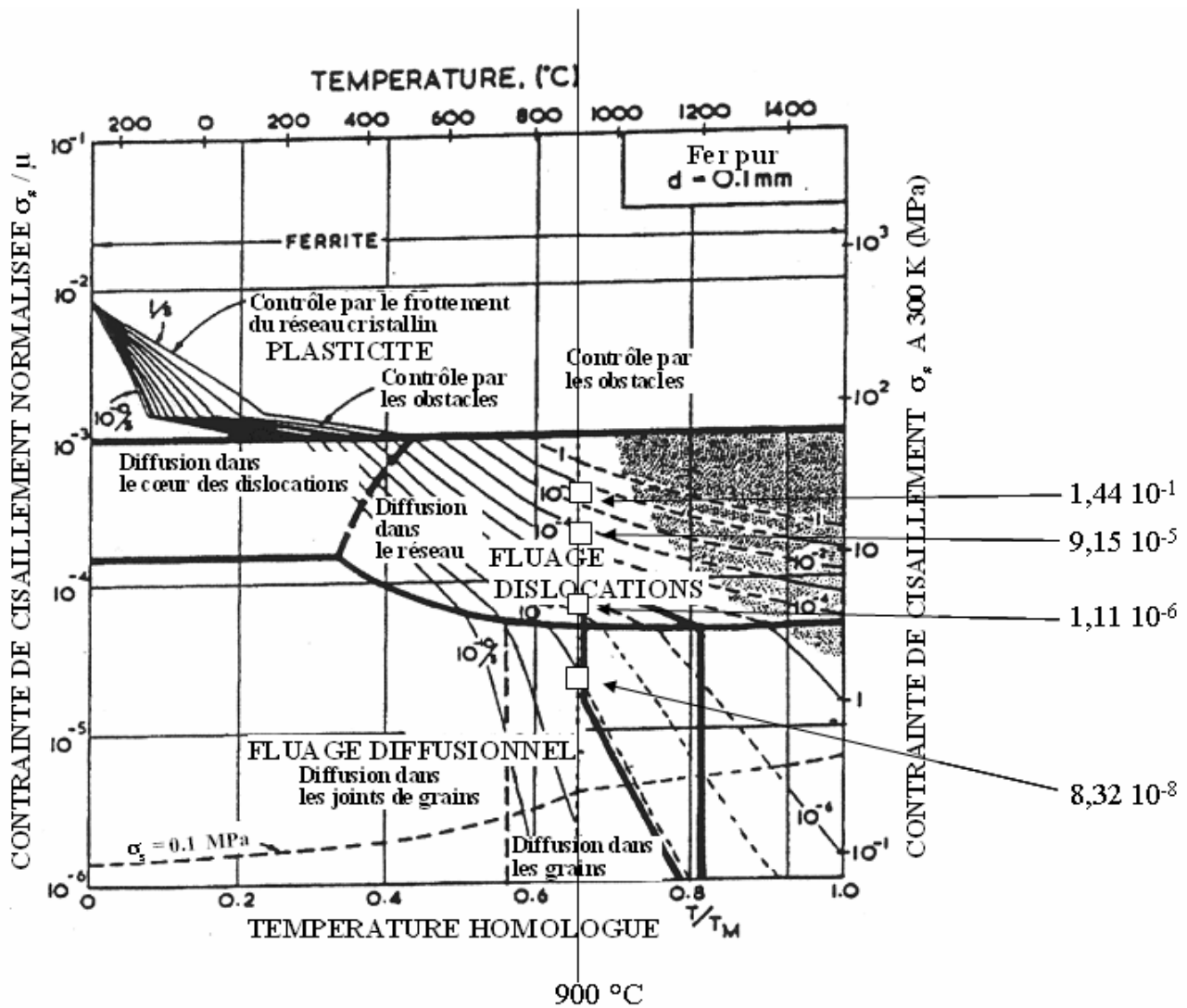


Figure 3 du corrigé : Carte de mécanismes de déformation (« carte d'Ashby ») du fer pur, avec omission du changement de phase allotropique de la ferrite (cubique centrée) en austénite (cubique à faces centrées). On a reporté (carrés blancs) les quatre valeurs expérimentales relevées à 900°C et indiqué les vitesses de déformation (en cisaillement) correspondantes.