

50 376
1 993
360

50376
1993
360

UNIVERSITE DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES DE LILLE I

U.F.R. PHYSIQUE FONDAMENTALE
SCIENCES PHYSIQUES

N° D'ORDRE : 132

THESE

présentée par

Bernard BAYLE

pour obtenir le

DIPLOME SUPERIEUR DE RECHERCHE DE L'UNIVERSITE

OPTION SCIENCES DES MATERIAUX

ETUDE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE A CHAUD DE BRONZES DE TYPE INDUSTRIEL ET A CARACTERE ARCHEOLOGIQUE EN COMPRESSION UNIAXIALE ISOTHERME

soutenue à Villeneuve d'Ascq le 30 novembre 1993



composition du jury

Monsieur	J. FOCT	Président
Monsieur	T. MAGNIN	Rapporteur
Messieurs	J. M. WELTER	Examineur
	M. PERNOT	Examineur
	F. MONTHEILLET	Examineur

A Christiane

A Corinne et Thierry

Philippe et Pascale

Richard

Ce travail a été effectué dans les laboratoires du département Matériaux de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, sous la direction de monsieur T. MAGNIN Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour l'amitié qu'il m'a témoignée, mais aussi pour sa compétence, sa disponibilité et la confiance dont il m'a gratifié. Je le remercie également d'avoir accepté d'être rapporteur de cette étude.

J'adresse mes remerciements profonds à monsieur F. MONTHEILLET Directeur de recherche C.N.R.S. à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne tant pour sa compétence et sa disponibilité au cours de nombreuses et très fructueuses discussions, que pour la confiance et l'amitié qu'il m'a témoignées. Je le remercie d'avoir bien voulu participer à ce jury.

J'exprime toute ma gratitude à :

Messieurs : J. FOCT Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille pour avoir accepté de présider ce jury.

M. PERNOT Directeur de recherche C.N.R.S. au Laboratoire des Musées de France, Palais du Louvre, pour avoir permis l'ouverture de ce travail sur l'archéométalurgie et pour avoir accepté de faire partie du jury.

J.M. WELTER Directeur Recherche et Développement de la société Tréfimétaux qui s'est intéressé à ce travail et a accepté de participer au jury.

Je remercie :

Messieurs P. RIEUX et A. GIRINON pour les encouragements permanents qu'ils m'ont prodigués et pour toutes les tâches auxquelles ils ont suppléés avec beaucoup de discrétion, d'efficacité et d'amitié.

Je remercie également toutes les personnes qui de près ou de loin , ont contribué à ce travail et plus particulièrement :

Madame J. PAIRE, monsieur G. BLANC pour leurs conseils en métallographie.

Monsieur A. DUTARTRE et tous le service d'atelier mécanique ainsi que monsieur M. VARILLON au service élaboration.

Madame F. AVONDO, monsieur A. LOUBET et ses collaborateurs pour leur efficace contribution à la mise en forme de cet ouvrage.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I - GENERALITES SUR LES BRONZES

I - 1 Généralités

I - 2 - Les premiers bronzes

I - 2 - 1 Intérêt culturel

I - 2 - 2 Intérêt industriel

I - 3 - Les alliages étudiés :

I - 3 -1 Bronze pur

I - 3 - 2 Bronze peu pollué

I - 3 - 3 Bronze de type archéologique

I - 3 - 4 Cuivre OFHC

I - 3 - 5 Caractéristiques mécaniques des bronzes BR-1 et BR-2

II - ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

II - 1 - Quelques données bibliographiques

II - 2 - Expérimentation

II - 2 - 1 La machine d'essai et son dispositif de compression à chaud

II - 2 - 2 Les essais réalisés

II - 3 - Etude des courbes contrainte - déformation

II - 3 - 1 Détermination du coefficient de frottement

II - 3 - 2 Détermination et étude des courbes contrainte-déformation

II - 3 - 2 - 1 Calcul de la déformation

II - 3 - 2 - 2 Calcul de la contrainte

II - 3 - 2 - 3 Analyse des courbes contrainte-déformation

II - 3 - 2 - 4 Etude du coefficient de sensibilité à la vitesse

II - 3 - 2 - 5 Etude de la sensibilité à la température

II - 3 - 2 - 6 Calcul de l'énergie d'activation apparente

II - 4 - Discussion et conclusion

III - ETUDE MICROSTRUCTURALE DES ETATS DEFORMES

III - 1 - Données bibliographiques

III - 1 - 1 Restauration et recristallisation

III - 1 - 1 - 1 Restauration dynamique

III - 1 - 1 - 2 Recristallisation dynamique

III - 2 - Résultats de l'étude qualitative des états déformés

III - 2 - 1 Méthode expérimentale

III - 2 - 2 Résultats obtenus pour les bronzes et le cuivre

III - 2 - 2 - 1 Le bronze peu pollué BR-1

III - 2 - 2 - 2 Le bronze industriel BR-2

III - 2 - 2 - 3 Le bronze à caractère archéologique BR-3

III - 2 - 2 - 4 Le cuivre OFHC

III - 3 Discussion et conclusion

IV - CONCLUSION GENERALE

ANNEXE - 1 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT PAR LA METHODE DE L'ANNEAU

- Méthode de l'anneau**
- Résultats**

ANNEXE - 2 EVALUATION DE L' ECHAUFFEMENT AU COURS DE L'ESSAI DE COMPRESSION

- A2-1 - Calcul de la contrainte corrigée de l'échauffement
- A2-2 - Calcul de la sensibilité à la vitesse corrigée
- A2-3 - Calcul de la sensibilité à la température corrigée
- A2-4 - Calcul des différentes valeurs corrigées

ANNEXE - 3 PROGRAMME DE DEPOUILLEMENT D'UN ESSAI DE COMPRESSION

**à partir des courbes force-contraction relative aux courbes
contrainte-déformation corrigées du coefficient de sensibilité
à la vitesse de déformation et du coefficient de frottement.**

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Les bronzes sont de nos jours peu utilisés, tout au plus par certaines industries comme l'électronique, pour la soudure des composants, la construction navale (hublots et quelques petites hélices), la mécanique (paliers), l'ameublement et la décoration ainsi que la fabrication des cloches, mais on ne peut oublier le passé prestigieux de cet alliage de cuivre qui conditionna durant des millénaires la vie de peuples de culture et d'implantation géographique souvent très éloignées. On ne peut ignorer non plus l'impact technologique sur notre civilisation moderne, de la découverte de ce que l'on appelle aujourd'hui "la métallurgie".

L'archéologie traditionnelle traite des relations socioculturelles, ou commerciales des peuples anciens, au travers des différents objets collectés lors de fouilles. Dans ce contexte l'archéologue parle le plus souvent en termes d'analyses chimiques de composition, et tente de démontrer le cheminement des matériaux et des influences technologiques. En comparant divers objets retrouvés en des lieux éloignés les uns des autres, mais de même facture, on peut étayer les hypothèses suivantes: soit d'un commerce plus ou moins important, soit de la domination d'un peuple par un autre. Quant à la provenance des matériaux, s'ils ne sont pas de production locale, l'analyse chimique permet à partir de certaines impuretés révélées, de déterminer les origines géographiques des sites de production. Dans le même temps y a-t-il transfert du savoir faire technique d'une société vers une autre société, et que sait-on de ces techniques purement expérimentales ? L'archéologue est là très souvent démuné de réponses et doit faire appel aux connaissances récentes de la science de la mécanique et de la métallurgie.

L'archéométallurgie est une approche de la connaissance des techniques du passé. Elle utilise d'une part les connaissances et les méthodes de l'archéologie et d'autre part celles de la science des matériaux. C'est pour répondre à la question : " comment est fabriqué un objet durant la période de la Tène finale ?", et plus généralement, pendant notre protohistoire "nationale", soit dans le temps approximativement du 1^{er} millénaire av. J.- C. jusqu'aux tous premiers siècles de notre ère, ceci plus précisément pour étudier des

fabricats tels les Fibules du Mont Beuvrais (site archéologique national) qu'une collaboration a été établie entre : le Laboratoire de Recherche des Musées de France, au Palais du Louvre, la Société Tréfinmétaux, E D F, l'Université des Sciences et Technologies de Lille I et l'Ecole des Mines de Saint-Etienne .

Durant une très longue période le martelage représenta le moyen quasiment unique de transformation par déformation plastique d'un objet à partir d'une ébauche brute de coulée, de forme proche ou non de celle de l'objet fini. Peut-on à partir des objets retrouvés reconnaître les différentes étapes de leur fabrication? En particulier étaient-ils martelés à froid ou à chaud, à froid avec un recuit de recristallisation entre chacune des passes de martelage ? Si de ces techniques artisanales rien ne nous est parvenu, le travail du bronze de manière industrielle aujourd'hui n'a pas encore résolu tous ses problèmes. Le plus courant étant le criquage au court du laminage à chaud, technique pratiquement abandonnée depuis plus d'une dizaine d'années.

Pour le paléométallurgiste, une des méthodologies possibles pour la lecture technologique des objets ainsi que la quête d'informations sur les pratiques artisanales, passe le plus souvent par l'expérimentation. Cette ligne de pensée, développée par les préhistoriens comme LEROI-GOURHAN, implique avant tout la connaissance des matériaux. Or pour l'ensemble des bronzes il n'existe pratiquement pas de bibliographie récente, ce qui justifie pour ces matériaux un peu marginaux, une étude permettant de mieux en connaître les paramètres rhéologiques.

Le présent travail consiste plus particulièrement en l'étude expérimentale du comportement rhéologique à chaud de deux bronzes modernes à caractère industriel, d'un bronze de type archéologique et à titre de comparaison, d'un cuivre OFHC. Le choix de la méthode d'essais par compression à chaud se justifie autant par la simplicité de son

analyse mécanique que par sa similitude avec le chemin de déformation au cours de la mise en forme par forgeage ou par laminage industriel, ou encore par martelage artisanal. Les vitesses de déformation mises en jeu restent de deux à trois ordres de grandeurs supérieurs, particulièrement pour le laminage, à celles réalisables avec la machine d'essai.

L'hétérogénéité de la déformation au cours de l'essai de compression, due à l'apparition d'un bombé en forme de " tonneau " est étroitement liée au frottement entre les tas de presse et l'échantillon. Il s'est avéré important de reconsidérer la technologie et la méthode de travail, afin d'en minimiser les effets.

Le **chapitre I** traitera d'une part de l'historique succinct des bronzes, et de leur intérêt depuis le monde de la protohistoire jusqu'à nos jours, et d'autre part présentera les matériaux étudiés.

Tout au long du **chapitre II** sera présentée l'étude expérimentale du comportement rhéologique des différents matériaux avec :

- des données bibliographiques pour le calcul des paramètres rhéologiques;
- les moyens technologiques mis en oeuvre et les différents types d'essais réalisés;
- l'étude et la présentation des courbes contrainte-déformation;
- la détermination et l'analyse des différents paramètres rhéologiques tels que la sensibilité à la vitesse et à la température;

Dans le **chapitre III** sera traitée l'étude microstructurale des différents états déformés des bronzes et du cuivre, ce qui permettra de déterminer les mécanismes régissant leur mode de déformation, et enfin après synthèse des résultats il nous sera possible de présenter une conclusion générale de notre travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES BRONZES

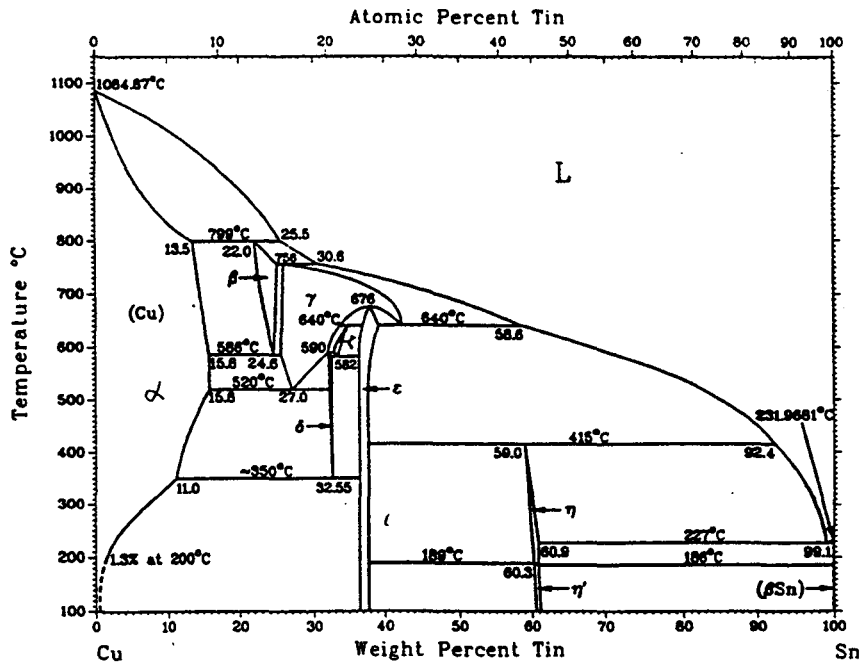


Fig. - 1 Diagramme d'équilibre quasi parfait Cu-Sn après recuit très prolongé. MASSALSKI (1986)

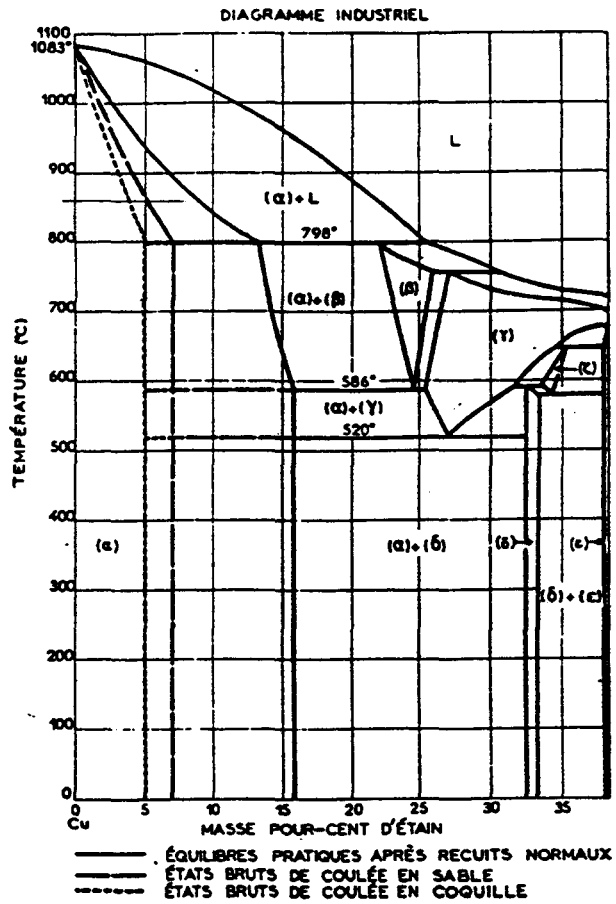


Fig. - 2 Diagramme d'équilibre pratique Cu - Sn. ARNAUD (1989)

I - LE BRONZE

I - 1 Généralités

Le bronze est un alliage de cuivre et d'étain, pour l'essentiel en solution solide de substitution, dont la structure cristallographique est du type cubique à faces centrées (C.F.C). Dans le diagramme de phases (Fig. 1) proposé par MASSALSKI (1986), à l'état d'équilibre quasi parfait après recuit très prolongé, il subsiste, à température ambiante, une seconde phase intermétallique ($\text{Cu}_3 \text{Sn}$) de structure orthorhombique (phase ϵ). La solubilité maximale de l'étain est de 15,8% à 520° C et 1,3% à 200° C.

Une proportion croissante d'étain durcit très sensiblement les alliages binaires, la charge à rupture augmente alors que l'allongement à rupture diminue fortement (Tab I), ARNAUD (1989)

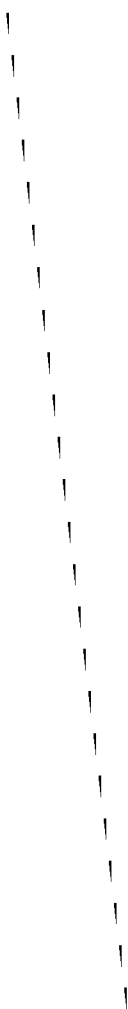
Sn %	R_m MPa	$R_{p0.2}$ MPa	A %	HBS
5	192	-	20	65
9	254	103	19,5	76
11	263	127	16	88
13	254	137	3	95
16	250	170	1,4	118

Tab . I Influence de la teneur en étain sur les caractéristiques mécaniques des bronzes binaires. ARNAUD (1989)

Les structures des bruts de coulée sont influencées par la vitesse de refroidissement et, si l'on compare les diagrammes (Fig. 2) ARNAUD (1989) on observe qu'après recuit normalisé l'alliage devient monophasé jusqu'à des teneurs en étain de 15,8% ce qui lui confère des propriétés mécaniques très supérieures : accroissement de la charge à rupture et de l'allongement (Tab II) ARNAUD (1989).

État	R_m MPa	A %
Brut de fonderie (Sable)	273	7
Recuit (6 h à 650 °C)	397	33

Tab - II Evolution des caractéristiques mécaniques d' un bronze Cu -12% Sn dans différents états. ARNAUD (1989)



Le domaine monophasé α se réduit en fonction du mode de coulée pratiqué et fait place à un domaine biphasé. Une phase δ métastable, apparaît et constitue un eutectoïde, plus ou moins lamellaire, avec la phase α ce qui conduit à un alliage de composition $\alpha-(\alpha+\delta)$.

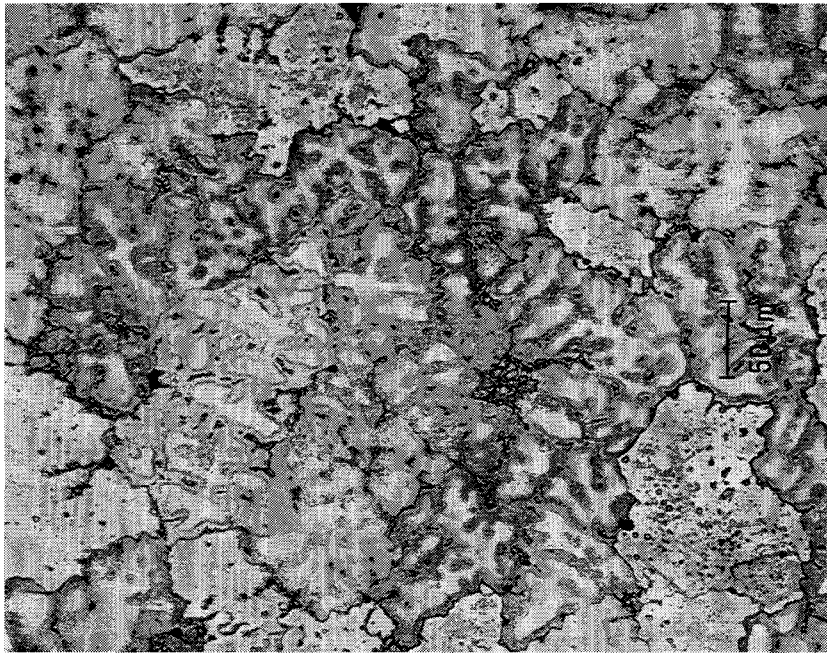
I - 2 Les premiers bronzes

Ce rappel très succinct de l'histoire de la métallurgie s'appuie en grande partie sur l'ouvrage de MOHEN (1990).

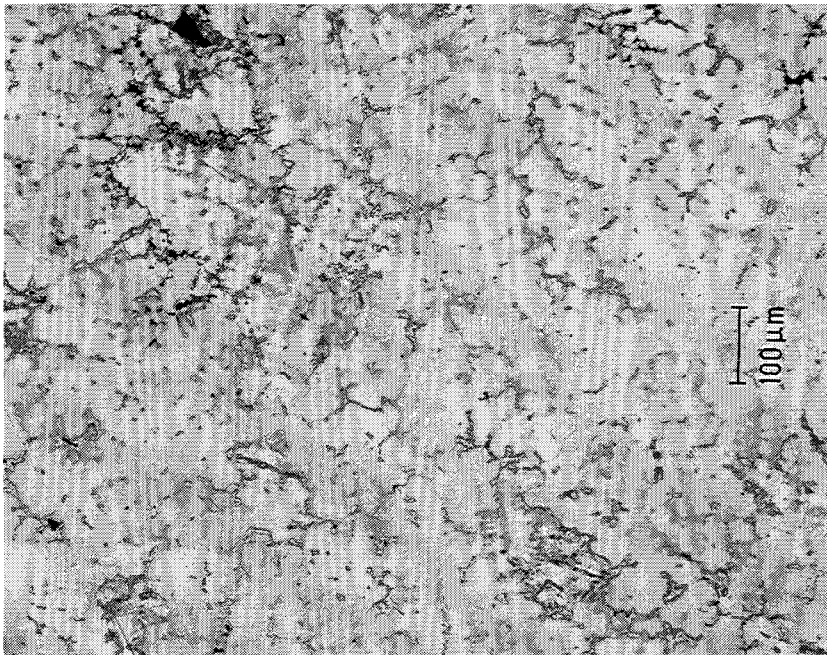
L'environnement de notre monde moderne est fait, en grande partie, de métaux et de leurs alliages dont personne ne pourrait imaginer qu'ils ne puissent exister. Leurs techniques d'élaboration deviennent de plus en plus sophistiquées et plus performantes. Pourtant la découverte du métal il y a 10000 ans est récente eu égard à l'histoire de l'humanité. De l'intérêt porté à une pierre différente, brillante, l'homme du néolithique, Age de la Pierre polie, découvre le métal à l'état natif, cuivre, or dans les cours d'eau. Peut être comme il le faisait depuis longtemps pour extraire des colorants afin d'omer les grottes de peintures rupestres, tenta-t-il de broyer ces nouveaux matériaux et découvrit-il ainsi la première transformation à froid par martelage (KNAUTH, 1985).

Bien que le feu fût connu et maîtrisé il y a 800 000 ans environ, il faut à l'homme attendre plusieurs siècles pour savoir réduire la malachite et ainsi obtenir le premier cuivre. L'ère de la métallurgie débute vers 6000 ans av. J.- C. sur les sites de Catal Hüyük (Anatolie) ainsi qu'au nord de la Mésopotamie à Yarim Tépe en territoire soviétique. C'est l'Age du Cuivre ou chalcolithique. Cette technologie éprouvée, l'homme peut dorénavant progresser vers la pratique de réduction de nouveaux minerais.

Quelques très rares bronzes à 6% et 10% d'étain sont repérés en Roumanie et en Bulgarie datant du V^{ème} millénaire. L'apparition des alliages cuivre-étain élaborés se situe vers le milieu du III^{ème} millénaire dans les tombes royales de Ur, et ne cessera de se développer tant en quantité qu'en qualité. De nombreux objets usuels sont alors produits : Vaisselle, outils, armes, parures, les formes se compliquent et le forgeron devient orfèvre. Certains peuples se spécialisent (la Chine qui devient maître en l'art de la fonderie). Au cours du II^{ème} millénaire avant notre ère, malgré une métallurgie beaucoup plus difficile, le fer va, en quelques siècles, très rapidement supplanter le bronze. Dans la protohistoire nationale, cette suprématie du fer apparaît vers le VIII^{ème} siècle av. J.-C. La production du bronze jusqu'à nos jours va dorénavant stagner et ne représenter qu'une fraction de plus en plus faible du tonnage des matériaux métalliques.

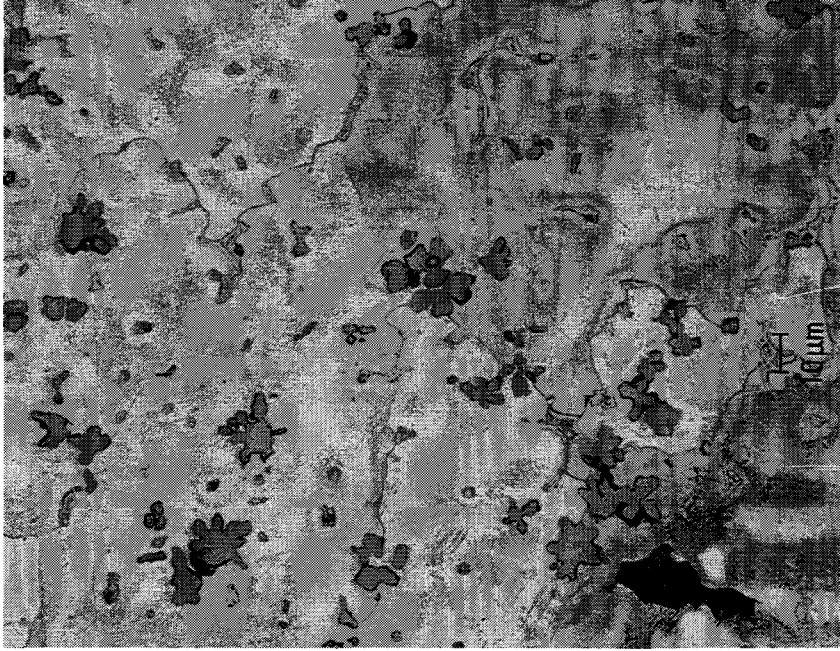


- a - Alliage Cu - 9 % Sn (pur) BR-1

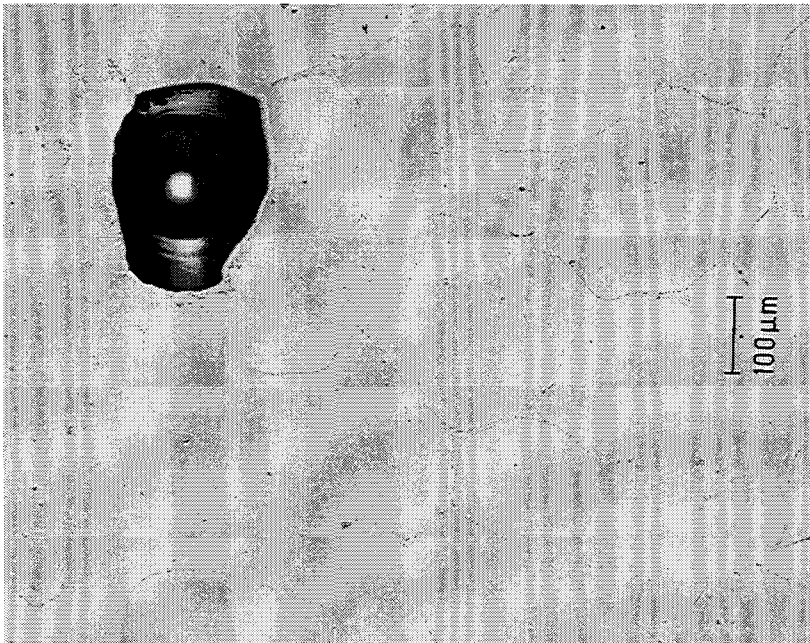


- b - alliage Cu - 9 %Sn (peu pollué) BR-2

Fig. - 3 Structure dendritique de deux alliages Cu - 9 %Sn
à l'état brut de coulée



- c - Alliage Cu 9%Sn (à caractère archéologique) BR-3



- d - Cuivre OFHC

Fig. 3 Structure dendritique du bronze à caractère archéologique
et d'un Cuivre OFHC à l'état brut de coulée

I - 2 - 1 Intérêt culturel

La fusion du métal et la réalisation des premiers alliages ouvrirent le chemin d'une immense révolution socioculturelle. Plusieurs millénaires de gestes longuement appris, d'innovations techniques, la recherche de performances supérieures des outils et des armes, l'accroissement des besoins, ont conduit à de nombreux changements dans l'environnement des sociétés. L'homme exploite les mines, crée des centres importants de réduction du minerai et de transformation à utilité locale ou à des fins d'échanges avec d'autres sociétés. Les prémices du monde moderne industriel apparaissent. La recherche et la compréhension des techniques purement orales de cette période, associées aux connaissances relatives à la religion, à l'art et au social constituent une approche plus fine pour caractériser le mode de vie et les modes de pensée d'une entité culturelle (PERNOT et MONTHEILLET, 1993).

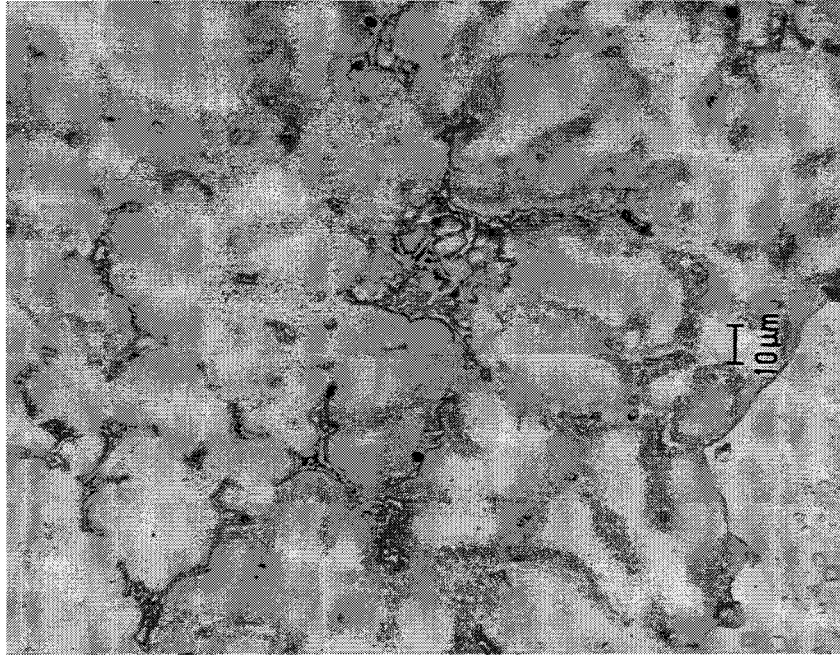
I - 2- 2 Intérêt industriel

L'abandon progressif de l'utilisation du bronze au cours des siècles est étroitement lié à deux facteurs importants, l'un par l'avènement et la suprématie du fer, l'autre très probablement dû à des problèmes économiques, l'étain restant un matériau à prix élevé. Les alliages base cuivre restent encore très méconnus de nos jours et peu d'études de leur comportement mécanique à haute température ont été réalisées depuis ces dernières décennies. Or il semble très important d'en connaître les paramètres rhéologiques, liés à la mise en forme des cuivreux, afin de déterminer les conditions optimales de leur transformation à chaud et les limites de leur forgeabilité.

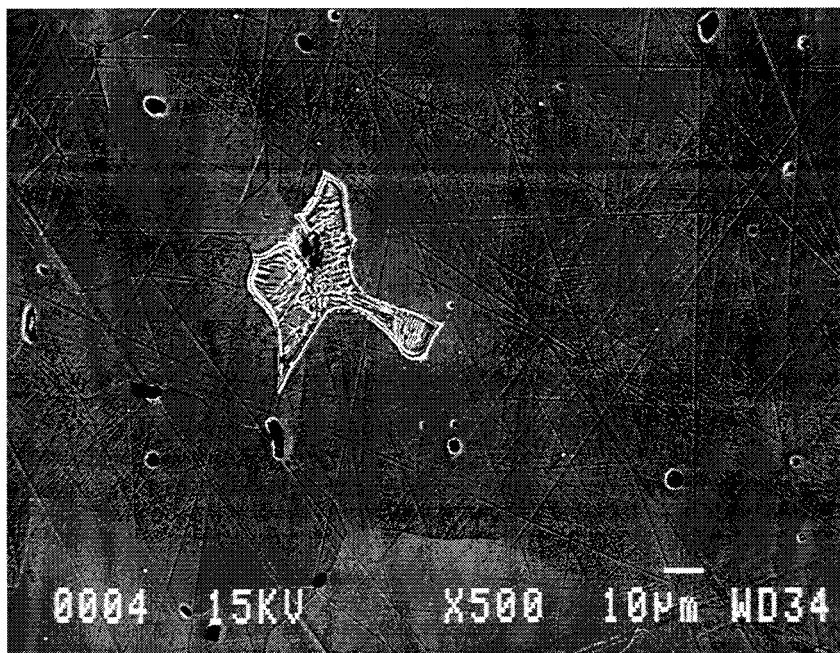
I - 3 Les alliages étudiés

L'ensemble des bronzes a été fourni par la société TREFIMETAUX sous forme de plaques fraisées de dimensions : 15 mm d'épaisseur, 200 mm de large et 300 mm de hauteur, coulées verticalement en moules de graphite préchauffés à 300 °C. La teneur en étain a été fixée à 9% , ce qui correspond aux produits industriels les plus couramment utilisés, et se rapproche de la teneur des bronzes archéologiques (10% Sn).

Les alliages ainsi élaborés n'ont subi aucun traitement mécanique ni thermique après la coulée et sont utilisés en l'état. Ils sont biphasés par décomposition de type eutectoïde et se présentent avec une structure dendritique dont la taille de grains atteint 200 à 300 μm (Fig. 3,a,b,c,d). Un composé intermétallique appelé phase δ (Fig. 4) dur, de système cubique, sous forme $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (PEARSON, 1964), dont la maille cristalline



- a - Alliage Cu - 9 % Sn BR-1



- b - alliage Cu - 9 % Sn BR-2

Fig. - 4 Plages d'eutectoïde α - δ dans la matrice α de structure dendritique de deux alliages Cu - 9% Sn à l'état brut de coulée

comporte :416 atomes, soit 328 de Cu et 88 de Sn, est réparti sous forme d'eutectoïde α - δ de manière hétérogène dans les espaces inter-dendritiques, ainsi qu'aux joints de grains. Sa taille est de 5 μ m de largeur et de 50 μ m de longueur, elle atteint parfois 100 μ m. On remarquera une porosité souvent assez fine, quelques μ m, pouvant aller jusqu'à quelques millimètres de diamètre, se situant soit dans la matrice, soit dans les plages de seconde phase. D'autres porosités correspondant à des vides inter-dendritiques, de répartition aléatoire, peuvent mesurer 100 μ m de longueur (Fig. 5).

I - 3 - 1 Le bronze pur

Repéré BR-1. Tous les éléments autres que Cu, Sn et Zn ont une teneur inférieure à 50 ppm. Il est à noter toutefois que la prévision de la teneur en Zn était inférieure à 50 ppm. Nous relativiserons donc son appellation de bronze "pur" par rapport à l'ensemble des autres bronzes de l'étude.

I - 3 - 2 Le bronze peu pollué

Repéré BR-2. C'est un alliage industriel actuel de bonne qualité le plus fréquemment employé. La teneur en zinc est d'un ordre de grandeur supérieur à la prévision (teneur standard: quelques centaines de ppm de Zn). La phase δ est moins abondante et de forme plus compacte que dans la plaque BR-1.

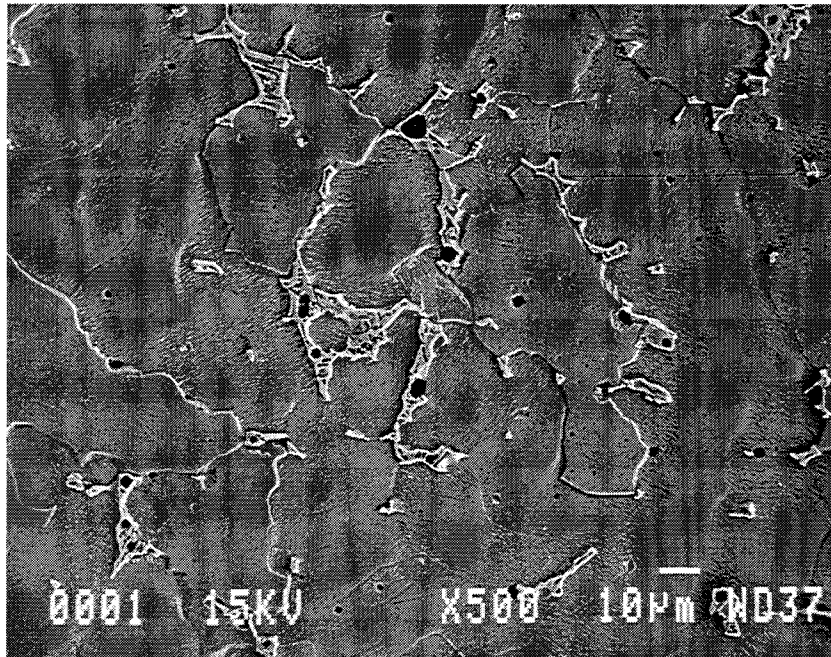
I - 3 - 3 Le bronze archéologique

Repéré BR-3. Alliage le plus souvent rencontré dans les inventaires des collections archéologiques, plus particulièrement durant l'époque du dernier millénaire av. J.-C. au V^{ème} siècle ap. J.-C. de notre "protohistoire nationale".

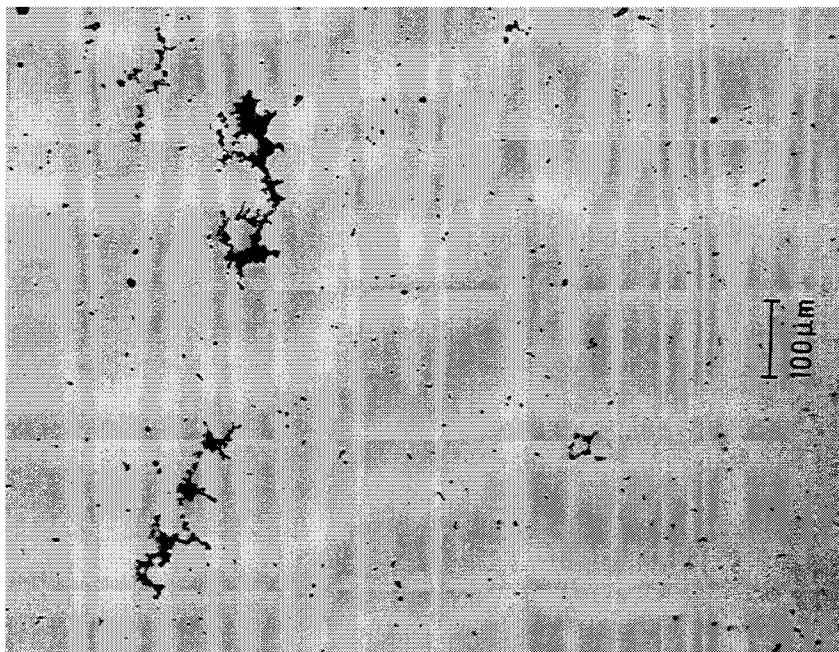
I - 3 - 4 Le Cuivre OFHC

Repéré Cu OFHC. Il s'agit d'un cuivre élaboré à l' E.N.S.M.S.E. par refusion sous vide de cuivre O.F.H.C. en nacelle de graphite, puis refroidi sous atmosphère d'argon-hydrogène. Lors de la solidification la retassure a été maintenue vers l'extrémité du barreau. La taille des grains est importante, de l'ordre de 1 à 2 millimètres. On peut penser que cette taille aura des conséquences importantes sur le comportement du matériaux.

Le tableau III représente l'ensemble de ces analyses.



- a - Alliage Cu - 9% Sn BR-1



- b - alliage Cu - 9% Sn BR-2

Fig. - 5 Taille et répartition des porosités dans la matrice de structure dendritique de deux alliages Cu - 9% Sn à l'état brut de coulée .

I - 3- 5 Caractéristiques mécaniques des bronzes BR-1 et BR-2

Les caractéristiques mécaniques standard obtenues par l'essai de traction à vitesse de traverse constante de 2 mm / minute sur éprouvettes normalisées sont reportées dans le tableau IV. Une dispersion notable sur un lot de dix éprouvettes est à relier aux défauts de structure (porosités). Les valeurs de la colonne de gauche représentent les valeurs minimales, celle de droite les valeurs maximales. Pour le bronze BR-3 aucun résultat n'a pu être exploité.

	Rm		Rp 0.2		A	
	MPa		MPa		%	
BR - 1	281	312	85	110	13,7	40
BR - 2	284	356	83	94	12,3	25

Tab .IV Caractéristiques mécaniques en traction
des bronzes Cu -9%Sn à l' état brut de coulée

Cette étude est pleinement justifiée par le manque de données récentes sur ces matériaux, tant dans ses applications industrielles actuelles, en termes de transformations thermomécaniques que pour l'approche, par des études expérimentales, de la connaissance des techniques des peuples anciens.

Les deux premiers bronzes seront étudiés de manière classique afin de déterminer les paramètres rhéologiques tels : le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, la sensibilité de la contrainte vis-à-vis de la température ou l'énergie d'activation apparente. Les résultats du bronze à caractère archéologique ainsi que ceux obtenus sur le cuivre OFHC, seront comparés aux résultats précédents .

Nota :Toutes les analyses ont été réalisées au Laboratoire d 'Analyse Chimique du Département Matériaux de l 'E.N.S.M.S.E. (A . REYNAUD)

Les valeurs sont données en % en masse

NUANCE	Sn	Zn	S	P	Pb	Cu
BR-1	9,2	0,026	0,0015	< 0,004	< 0,005	Balance
BR-2	9,1	0,26	0,003	0,042	< 0,005	Balance
BR-3	9,2	0,005	0,50	< 0,004	< 0,005	Balance
Cu OFHC	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	Balance

Tab. III Analyses chimiques des matériaux de l'étude

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

II - ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'étude du comportement rhéologique que nous abordons maintenant, tentera d'apporter des éléments nouveaux, nécessaires et utiles pour le forgeron. Nous y analyserons plus particulièrement les paramètres tels que: le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, la sensibilité de la contrainte vis-à-vis de la température, et enfin l'énergie d'activation apparente.

L'étude bibliographique présentée dans une première partie, ne concerne qu'une des facettes de la connaissance des cuivreux. Actuellement en l'état de nos recherches, tant auprès des spécialistes du bronze que des banques de données, dont la COOPER DATA BANK (USA), il s'est avéré impossible de trouver des références bibliographiques récentes concernant la rhéologie à chaud des bronzes.

L'expérimentation sera détaillée, avec d'une part la description de la machine d'essais et ses limitations, et d'autre part le dispositif de compression à chaud. Nous expliciterons les calculs, en les justifiant, permettant le passage des courbes force-contraction relative (déformation en %) aux courbes contrainte-déformation.

Avant l'étude des ces courbes et de l'évolution des différents paramètres rhéologiques qui en découlent, une attention particulière sera portée à l'effet du frottement, paramètre important régissant les conditions de l'homogénéité de la déformation, au cours de l'essai de compression.

Enfin nous discuterons les résultats des essais réalisés et apporterons une conclusion à ce chapitre.

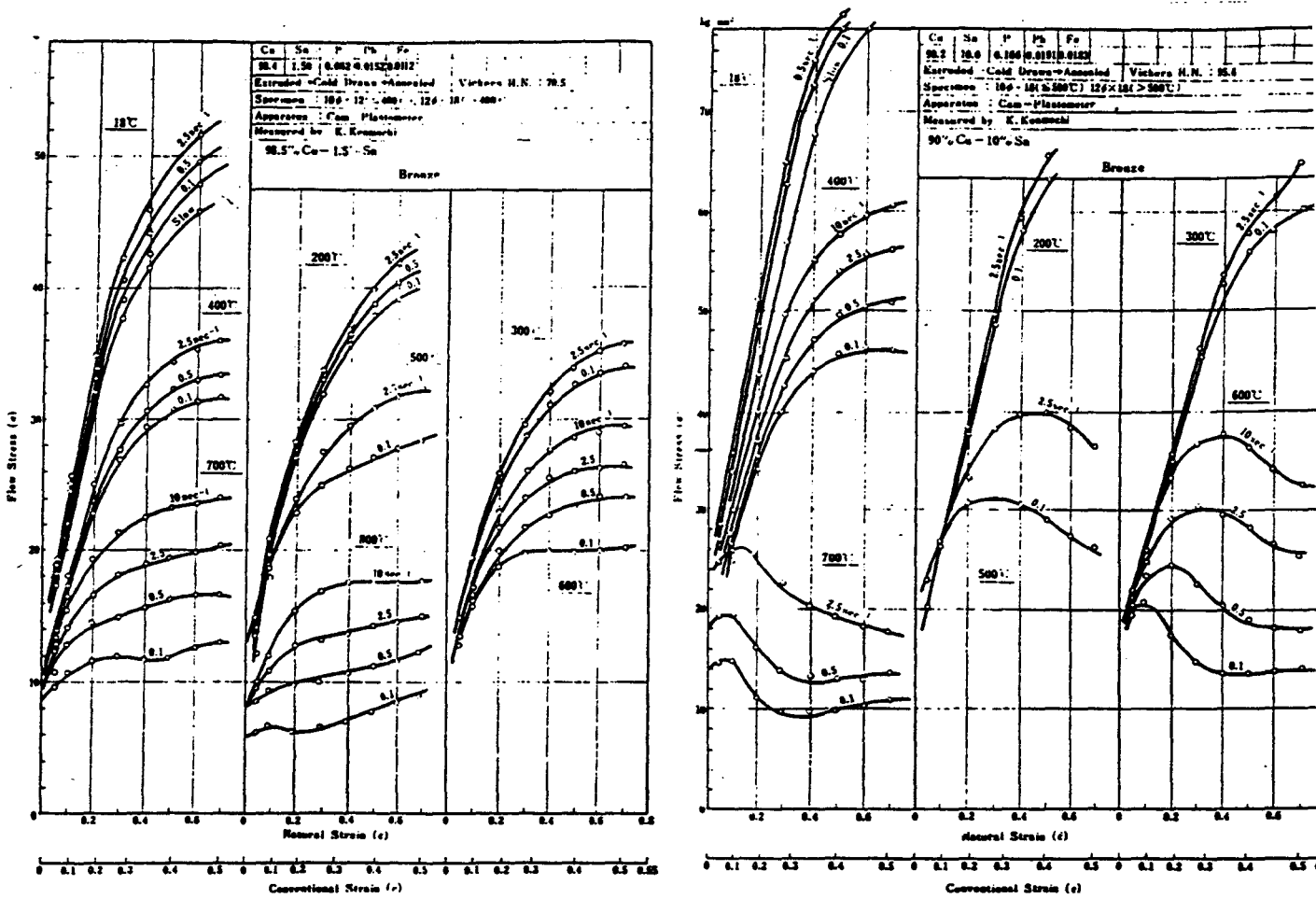


Fig. 6 Evolution des courbes contrainte - déformation de bronzes à 1,5% et 10% Sn (T, $\dot{\epsilon}$) par SUZUKI et al. (1968)

II - 1 - Quelques données bibliographiques

Nombre d'études traitent, pour le cuivre et ses alliages, le laiton plus particulièrement, de la fragilité à chaud et de l'influence de la taille des grains sur la ductilité. Par contre, il n'existe que peu de données rhéologiques, surtout en ce qui concerne les bronzes, ces derniers étant considérés actuellement comme pratiquement non transformables à chaud .

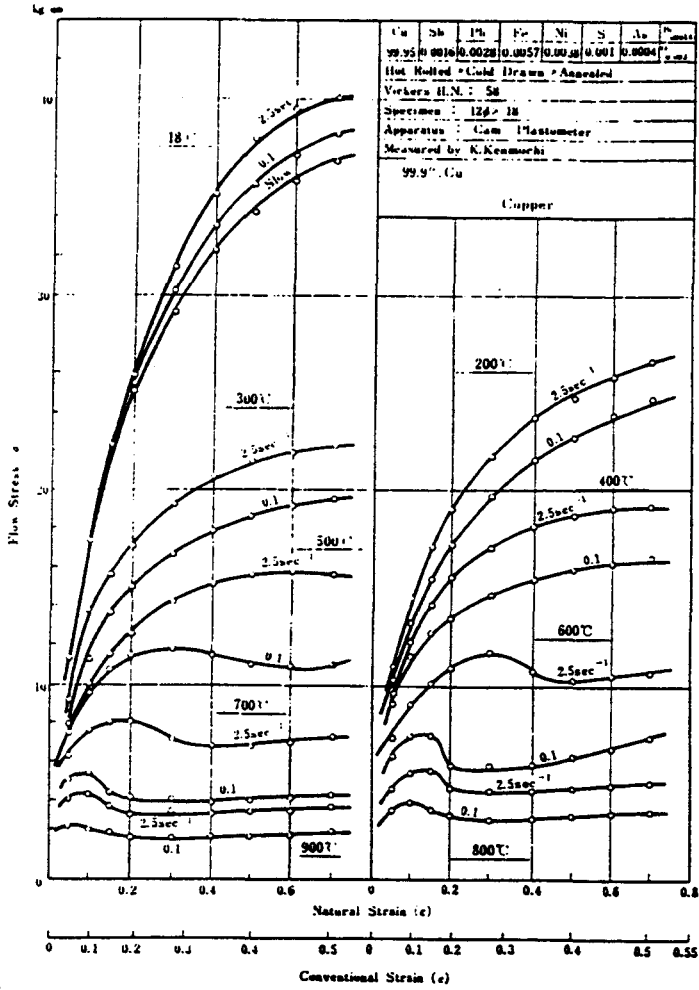
Il est donc intéressant de pouvoir étudier séparément l'influence de divers paramètres comme : la microstructure initiale, la température, la vitesse de déformation, ou la déformation, agissant sur le comportement des matériaux lors d'une transformation à chaud. Les trois types d'essais pratiqués en laboratoire (Mc QUEEN et JONAS, 1971) ne permettent pas toujours d'aborder simplement l'étude des courbes contrainte déformation. Il faut, dans la plupart des cas, apporter des corrections, pour tenir compte : de l'hétérogénéité de la vitesse de déformation au cours de l'essai de torsion ou de la déformation dans l'essai de traction (striction).

La porosité, parfois localement très importante de nos matériaux, rend difficile voire impossible l'essai de traction. Des résultats obtenus par BORHAN (1993) en torsion montrent également, sur un lot d'une quinzaine d'éprouvettes, une grande dispersion. Cela justifie d'autant mieux, pour nos matériaux, l'essai de compression qui apparaît alors comme le plus simple et le plus adapté pour l'étude du comportement rhéologique, en condition isotherme.

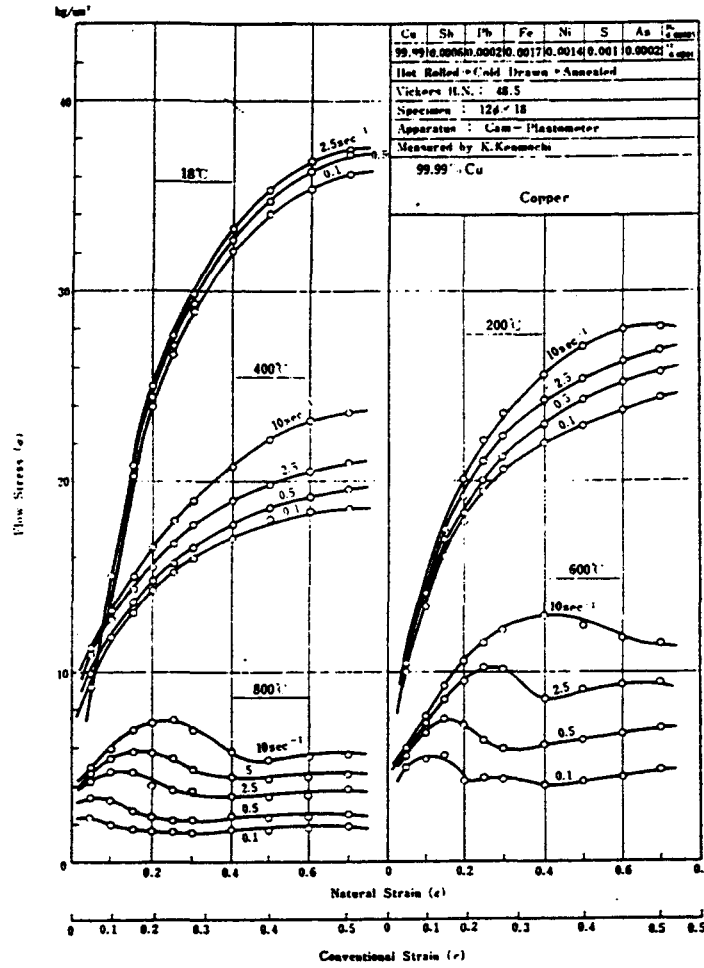
Des essais ont été réalisés en compression par SUZUKI et al. (1968) à l'aide d'un plastomètre à came, sur des bronzes de teneur en étain variant de 1,5% à 10%, et sur des cuivres plus ou moins pollués (Figs. 6 et 7), préalablement laminés à froid et recuits. Les vitesses de 0,1 à 10 s⁻¹, correspondent à la mise en forme par forgeage ou laminage, dans l'intervalle de température 18°C - 700° C. L'analyse de ces courbes permet d'observer les influences suivantes:

- de la température: on notera deux aspects des courbes, l'un de l'ambiante à 400°C où la contrainte croît constamment, et un autre de 500 C à 700°C où elle atteint une valeur maximum puis s'adoucit dynamiquement plus ou moins rapidement.

- de la vitesse de déformation, qui apparaît plus importante quand la température augmente, à la fois sur la valeur de la contrainte et sur les mécanismes régissant l'évolution microstructurale.



Cu 99,9%



Cu 99,99%

Fig. 7 Evolution des courbes contrainte - déformation de cuivres de différentes puretés (T, $\dot{\epsilon}$) par SUZUKI et al. (1968)

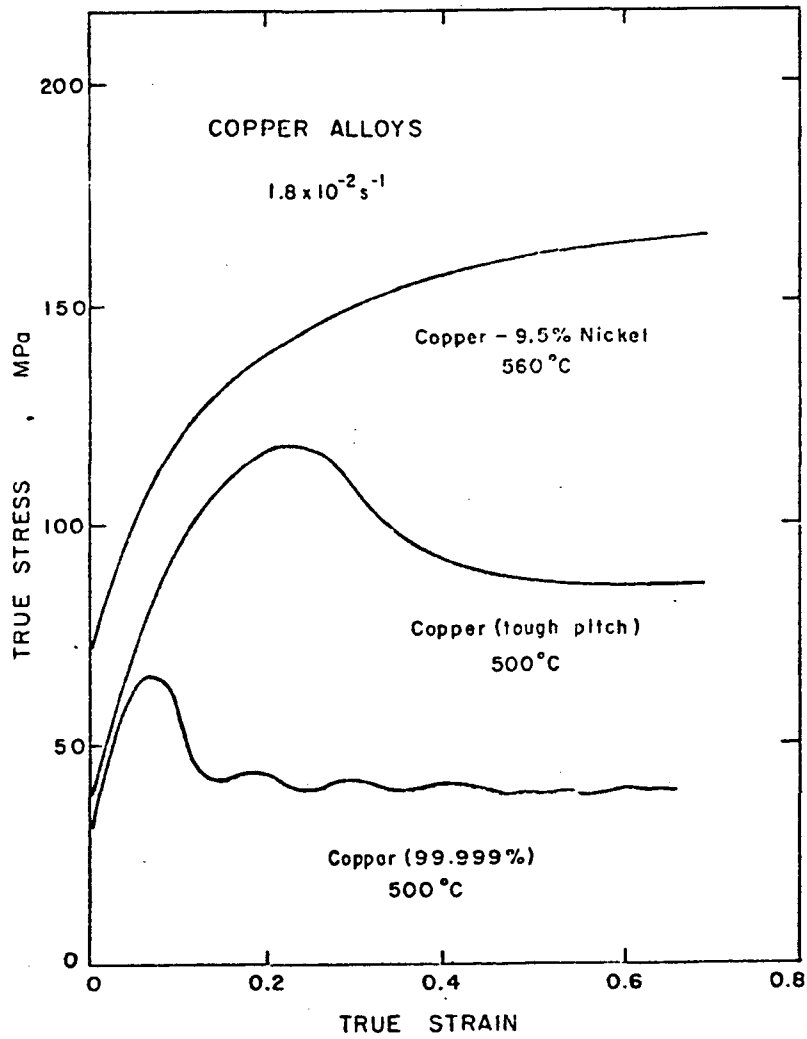


Fig. 8 Evolution des courbes contrainte - déformation de cuivres de différentes puretés à 500°C ($\dot{\epsilon} = 1,8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) PETKOVIC-LUTON (1975)

- l'influence des impuretés : qui augmentent la présence des précipités, ou celle des solutés, ou les deux simultanément. Ceci joue un rôle important sur la mobilité des dislocations activée ou non thermiquement. Des résultats, relatifs à cette influence, obtenus pour le cuivre par PETKOVIC-LUTON (1975), sont représentés par la Fig. 8. On peut y observer que l'influence des impuretés joue à la fois sur le niveau des contraintes et sur la forme des courbes, et par ce fait sur le mécanisme régissant l'évolution des microstructures.

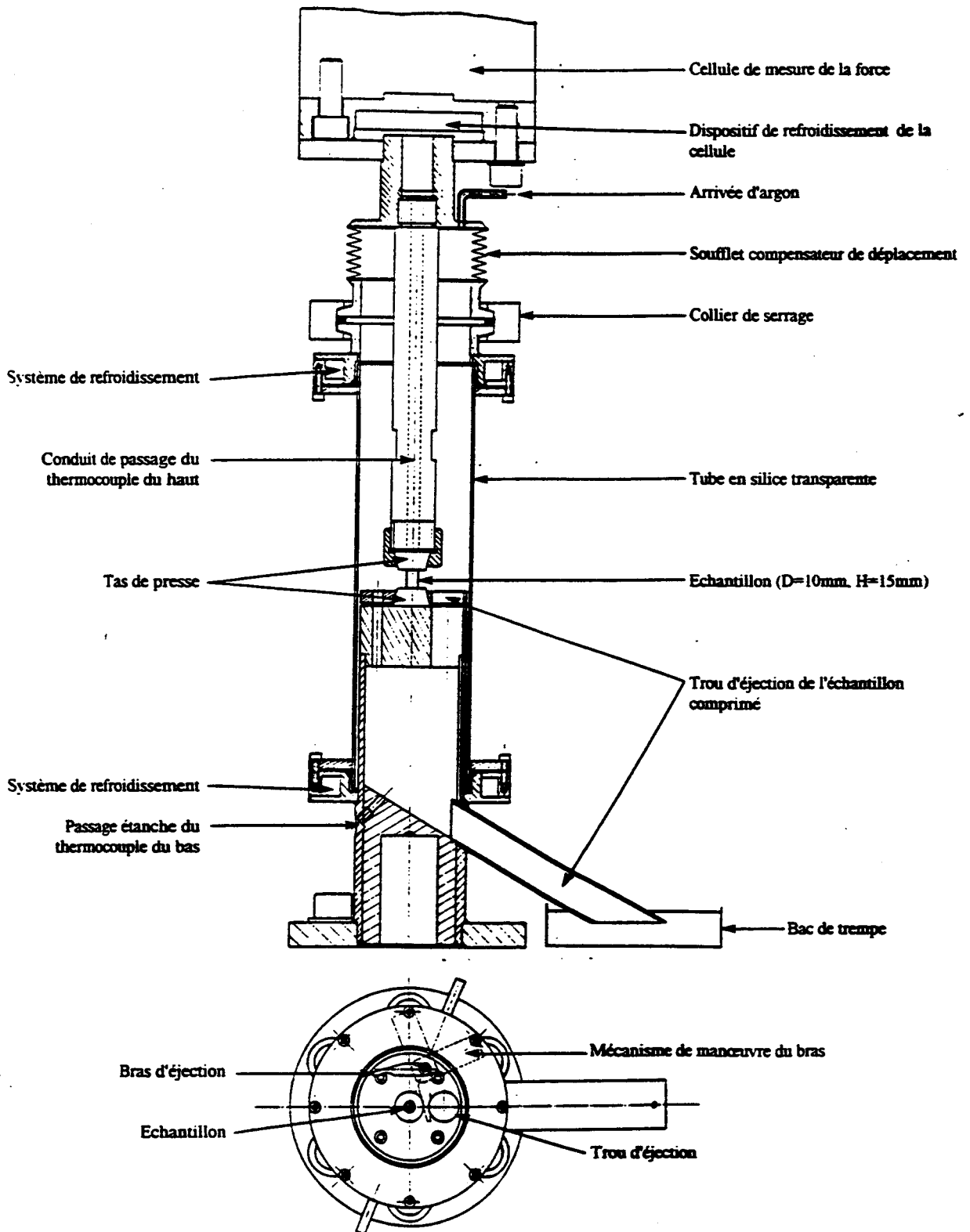


Fig. 9 - Dispositif de compression à chaud

II - 2 - Expérimentation

II - 2 - 1 La machine d'essai et le dispositif de compression à chaud

L'ensemble des essais a été réalisé sur une machine universelle électromécanique de marque INSTRON, d'une puissance de 200 kN. Elle est asservie par informatique, sans toutefois permettre de travailler à vitesse de déformation imposée constante. La plage des vitesses théoriques de la machine s'étend de 0,02 mm par minute à 500 mm par minute. En pratique il s'est avéré impossible de pouvoir atteindre des vitesses supérieures à 100 mm par minute. Au début de l'essai, un effet de " pompage " lié à l'électronique d'asservissement de la machine, induit des variations de la vitesse instantanée d'un ordre de grandeur supérieur à celle demandée, ce qui ne peut convenir, si l'on s'intéresse à la sensibilité des matériaux à la vitesse de déformation. Pour cette raison nous ne rendrons pas compte des essais réalisés à 300 mm / min.

Afin d'enregistrer durant les essais les courbes force - contraction relative de l'échantillon, nous avons utilisé un capteur de déplacement de type inductif. Celui-ci mesure en fait le déplacement de la traverse, et par là même, la déformation de l'ensemble dispositif de compression et éprouvette. La mesure après écrasement de l'échantillon et de l'enregistrement du déplacement de la traverse sont en très bon accord, de l'ordre de un à deux pour cent, si l'essai a été bien conduit.

Le dispositif (Fig. 9) actuellement utilisé pour la réalisation d'essais de compression isotherme, a été étudié et conçu à l' E.N.S.M.S.E, et plus particulièrement dans le cadre de la thèse de DAJNO (1991). Il répond à des impératifs précis dont nous ne décrivons ici que les plus importants à savoir :

- Avoir une grande rigidité à chaud, ce que traduit, comme nous l'avons précédemment dit, la bonne corrélation entre le déplacement de la traverse et la contraction de l'échantillon. Ceci implique un choix de matériaux adaptés pour les pièces soumises à haute température, jusqu'à 1050° C, ici un acier inoxydable de type Cr- Ni (25-20).

- assurer l'homogénéité thermique de l'échantillon. Les tas de presse sont en alliage à base de molybdène (TZM) et comportent en leur centre, suivant l'axe de compression, un évidement, jusqu'à 0,5 mm de la surface, pour le passage des thermocouples.

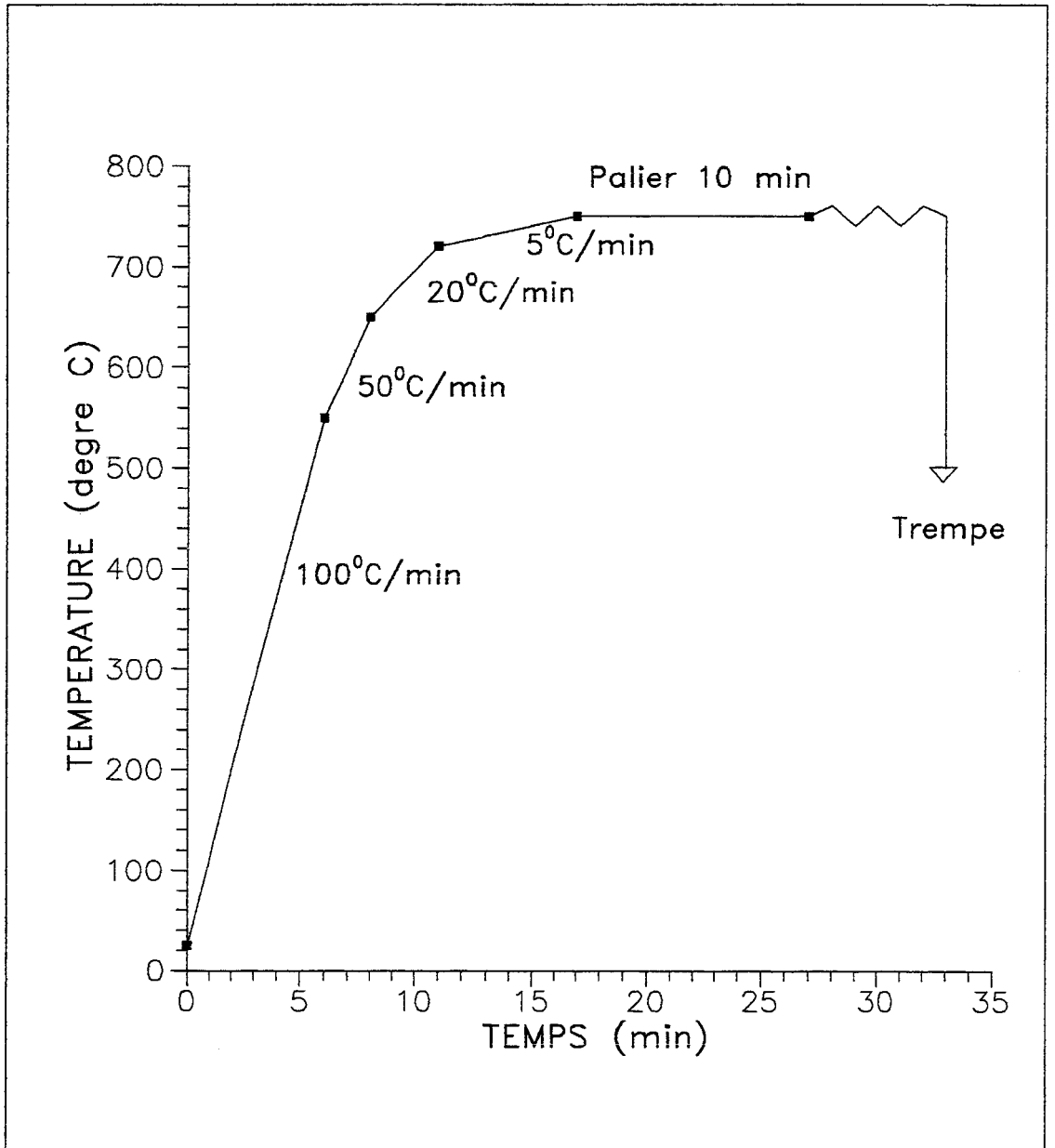


Fig. 10- Schéma du cycle thermomécanique utilisé au cours des essais sur tous les matériaux de l'étude. Exemple pour la température de 750°C

La mesure des températures ainsi effectuée, proche de la tête et du pied de l'échantillon permet de garantir un écart inférieur à deux degrés ($\pm 1^{\circ}\text{C}$).

- Permettre une trempe rapide afin de figer les structures de déformation. Pour cela un doigt mobile éjecte au travers d'une goulotte, l'éprouvette comprimée dans un bac rempli d'eau à température ambiante. Le temps global pour effectuer l'ensemble de l'opération est d'environ deux à trois secondes.

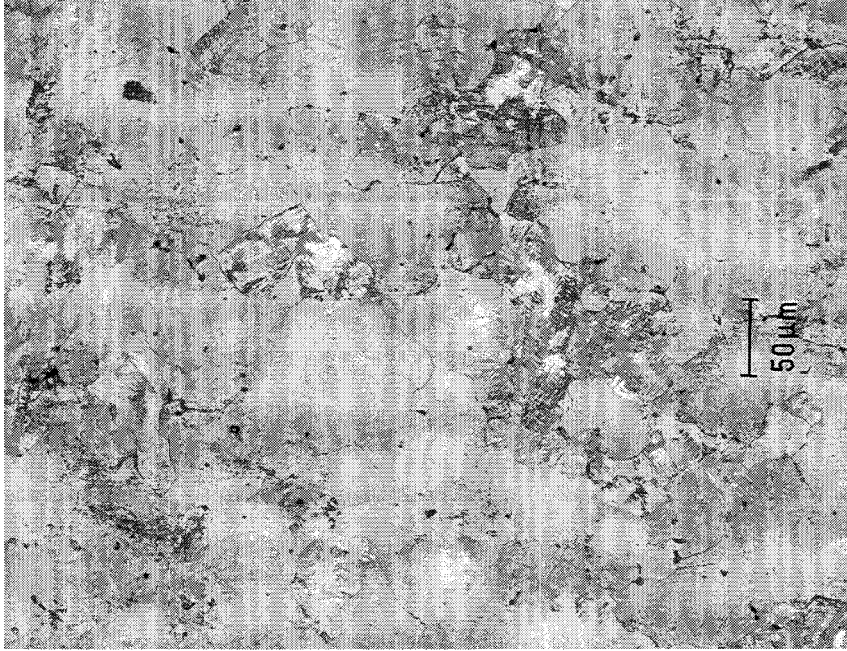
Enfin le chauffage est assuré par un four à rayonnement muni de six lampes à infrarouge, placées chacune au foyer d'un cylindre parabolique. Grâce aux rayons réfléchis parallèlement entre eux, on obtient une zone de chauffe homogène plus étendue. Le four est géré par un programmeur qui autorise des cycles thermiques complexes et des montées en température rapides. Cet ensemble enferme un tube de quartz qui contient le dispositif de compression. Un balayage continu d'argon protège de l'oxydation l'échantillon et le montage.

Ces conditions fixées et réalisées vont permettre d'effectuer des essais rigoureux et reproductibles.

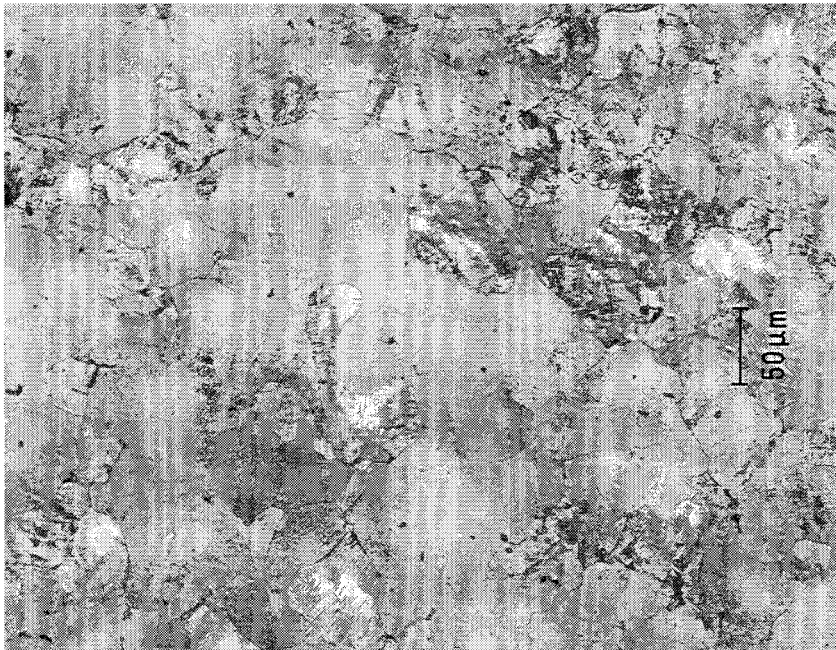
II - 2 - 2 Les essais réalisés

Les échantillons de diamètre 10 mm et de hauteur 15 mm ont été prélevés de façon telle que l'axe de compression soit parallèle à la plus grande dimension des plaques. Avant déformation, ils ne subiront aucun traitement thermique, leurs microstructures seront donc celles des alliages bruts de coulée, dendritiques, comportant une proportion variable de seconde phase δ suivant les nuances utilisées.

Le cycle thermomécanique utilisé lors de ces essais (Fig. 10), sur l'ensemble des alliages, permet théoriquement d'atteindre rapidement l'équilibre thermique dans les échantillons. Des essais de maintien en température de 10 min. à 750°C sur le matériau BR-1, d'une part dans le dispositif de compression suivant le cycle thermomécanique décrit précédemment, et d'autre part, dans un four à résistances mis préalablement en température, conduisent à observer dans les deux cas, une microstructure (Fig. 11), partiellement recristallisée où la seconde phase est totalement remise en solution. La taille des grains ainsi recristallisés est comprise entre 25 et 50 μm . Nous avons admis ce résultat comme valide pour tous les bronzes.



- A -



- B -

Fig. 11 Microstructure du bronze BR-1 sans déformation suivi d'une trempe
A - Dans le dispositif de compression B - Dans un four préchauffé

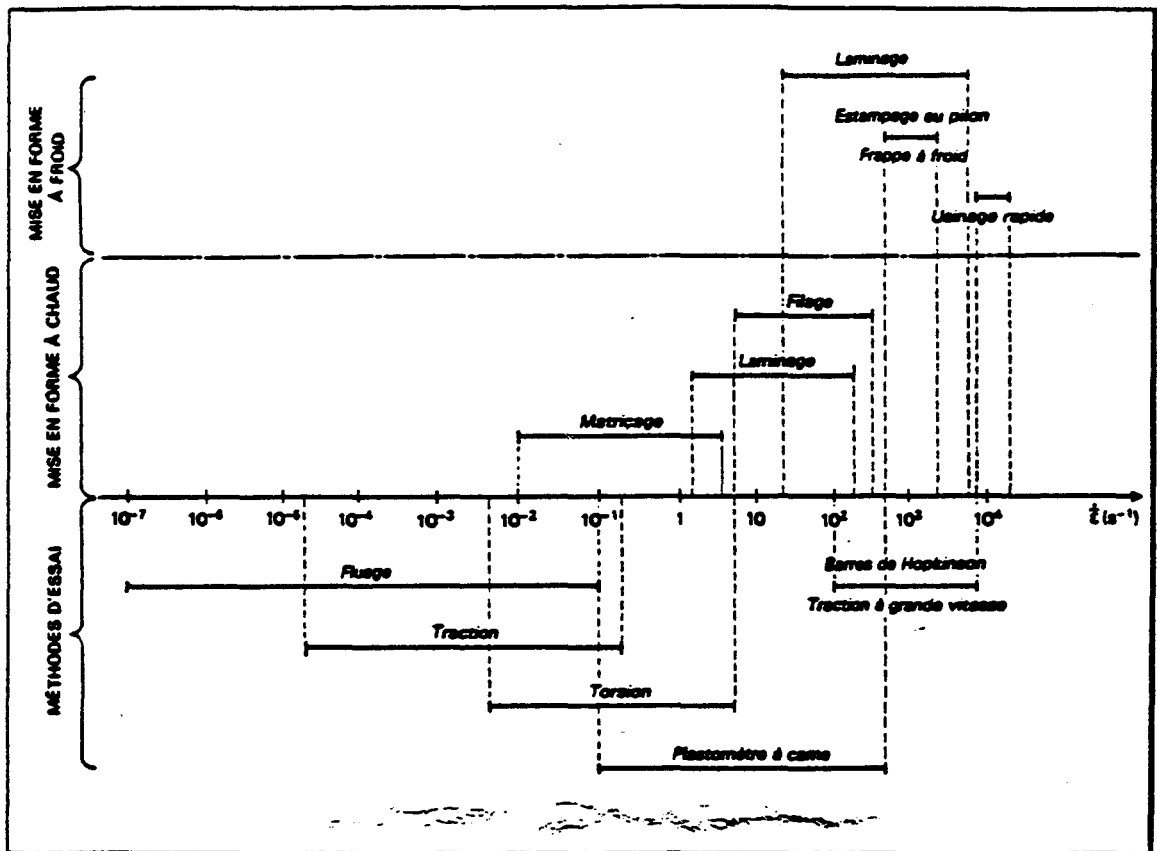


Fig. 12 - Comparaison entre les gammes de vitesses équivalentes imposées en mise en forme et celles accessibles par les méthodes d'essai classiques (MONTHEILLET 1981)

La principale température d'essai a été fixée à 750°C, soit à la valeur correspondante de 0,9 Tf. La température du solidus a été extrapolée sur le diagramme de phase, et considérée comme commune aux trois bronzes, car il y a peu de différence dans leur composition chimique. La gamme des vitesses de déformation s'étage entre 10^{-3} et 10^{-1} s^{-1} . Ce qui est d'un ordre de grandeur inférieur à celle utilisée ordinairement au cours du forgeage ou du matriçage industriel (Fig. 12) .

II - 3 - Etude des courbes contrainte - déformation

A partir des courbes contrainte - déformation, il est possible d' étudier en plus des contraintes nécessaires liées à la mise en forme des matériaux, des paramètres comme la sensibilité à la vitesse ou la sensibilité à la température. Afin de les caractériser avec le plus de précision possible, il est important de minimiser l'effet du frottement sur la détermination de la contrainte d'écoulement.

Par ailleurs s'il est habituellement admis qu'un auto-échauffement n'est significatif qu'au delà des vitesses de l'ordre de 10^{-1} s^{-1} , nous tenterons, tout au moins pour les plus grandes vitesses de notre étude, d'en apprécier l'incidence éventuelle sur la modification du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation.

II - 3 - 1 Détermination du coefficient de frottement

Il y a lieu avant d' entreprendre des essais de compression de se prémunir, dans la mesure du possible, des effets dus au frottement, entre les tas de presse et les faces de l'échantillon. Ce frottement engendre un gradient de déformations, visualisé par l'apparition d'un bombé en forme de "tonneau", dont l'importance est croissante avec l'augmentation du coefficient de frottement. La mesure expérimentale de ce coefficient (cf. Annexe I.) se fait en comprimant des anneaux de mêmes nuances que les matériaux de l'étude, dans des conditions de vitesses et de températures identiques à celle-ci. La mesure de la variation du diamètre intérieur des anneaux ainsi déformés, permet de quantifier la valeur d'un coefficient de frottement μ , à partir de l'abaque de MALE et COCKCROFT (1964) , puis, suivant le modèle de TRESCA, de déterminer celle de \bar{m} (cf. Annexe I pour la relation entre μ et \bar{m}), en fonction du lubrifiant adopté. Pour le bronze et le cuivre le lubrifiant utilisé est un aérosol d'un vernis réfractaire, à base de graphite lamellaire pur, se polymérisant à l'air, et utilisable jusqu'à 1000° C (PULVE GRAPH D 31 A).

TEMPERATURE °C	DEFORMATION %	$\Delta D/D$ %	LUBRIFIANT	\bar{m}
750	20	0	EM	0.095
	37	0	EM	0.095
	30	-6.66	PG	0.05
	38	-1.3	PVGR	0.066
	53	-1.45	PVGR	0.066
700	24	-6.66	PG	0.043
	50	-1.35	PVGR	0.066
600	20	-6.66	PG	0.034
400	20	-4	PG	0.05
	20	-2.6	PVGR	0.066
200	15	-2.6	PVGR	0.051
25	10	0	EM	0.095
	20	-1.3	PG	0.036
	20	+6.6	NL	0.259
	12	-2.6	PVGR	0.052

EM = EMDU BN 4479
 PG = PAPIER GRAPHITE
 NL = NON LUBRIFIE
 PVGR = PULVE GRAPH D 31 A

$$\bar{m} = \mu\sqrt{3}$$

μ : obtenu à partir de l'abaque de
 dépouillement du test de l'anneau
 (MALE et COCKCROFT 1964)

Fig. 13 Etude de l'évolution de \bar{m} en fonction de la température
 et de la déformation pour différents lubrifiants

Le coefficient de frottement ne varie pas de façon significative, ni avec la température ni avec la déformation (Fig. 13), tout au moins jusqu'à des valeurs de cette dernière de l'ordre de 0,6. Pour le dépouillement des courbes, la valeur retenue est $\bar{m}=0,09$, la correction apportée sur la contrainte varie de 2% en début de courbe à 6% pour des déformations de $\varepsilon = 1$.

II - 3 - 2 Détermination et étude des courbes contrainte - déformation

Les courbes contrainte-déformation sont déterminées à partir des courbes force-contraction relative, obtenues par des essais effectués à vitesse de traverse constante. Ce qui implique, lors du dépouillement des courbes, de tenir compte de l'évolution de la vitesse de déformation, qui croît avec la déformation. Elle varie de $\dot{\varepsilon}_0 = v / H_0$ jusqu'à $\dot{\varepsilon}_t = v / H_t$, où v représente la vitesse de la traverse, H_0 la hauteur initiale de l'échantillon, et H_t sa hauteur à l'instant t . Par exemple pour une déformation de 1 la vitesse de déformation est près de trois fois supérieure à la vitesse initiale. La correction ainsi apportée n'est valide que si l'on admet comme hypothèse que la déformation reste homogène dans l'échantillon.

Pour développer les calculs concernant les valeurs de la déformation et de la contrainte d'écoulement en compression, en tenant compte des corrections liées à la variation de la vitesse de déformation et au frottement, les notations suivantes seront utilisées:

D, H et S	diamètre, hauteur et section de l'échantillon
$\dot{H} = -v$	vitesse de la traverse
F	force de compression
e	contraction de l'échantillon $e = (h_0 - h) / h_0$
ε	déformation vraie
$\dot{\varepsilon}$	vitesse de déformation
σ_c	contrainte de compression expérimentale

Les valeurs indicées 0 correspondent aux valeurs initiales

II - 3 - 2 - 1 Calcul de la déformation

S'il y a homogénéité de la déformation dans le matériau, on peut alors écrire la déformation équivalente de von Mises :

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

$$e = \frac{H_0 - H}{H} \Rightarrow \frac{H_0}{H} = (1-e)^{-1} \quad \text{et} \quad \varepsilon = -\ln(1-e) \quad (1)$$

ε représente une déformation viscoplastique irréversible en déformation à chaud. Il est donc nécessaire de retrancher des courbes force - contraction relative expérimentales, la valeur de la déformation élastique réversible. Cette valeur est mesurée graphiquement et n'excède jamais un pour cent .

II - 3 - 2 - 2 Calcul de la contrainte

La contrainte de compression expérimentale s'écrit

$$\sigma_c = \frac{F}{S}$$

Si l'on considère le matériau incompressible, la conservation du volume entraîne $HS = H_0 S_0$ d'où :

$$\sigma_c = \frac{F H}{S_0 H_0} = \frac{F}{S_0} (1-e) = \sigma_n (1-e) \quad (2)$$

$$\text{ou } \sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad \text{est la contrainte nominale.}$$

La contrainte d'écoulement est dépendante de la vitesse de déformation instantanée.

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{\dot{H}}{H}$$

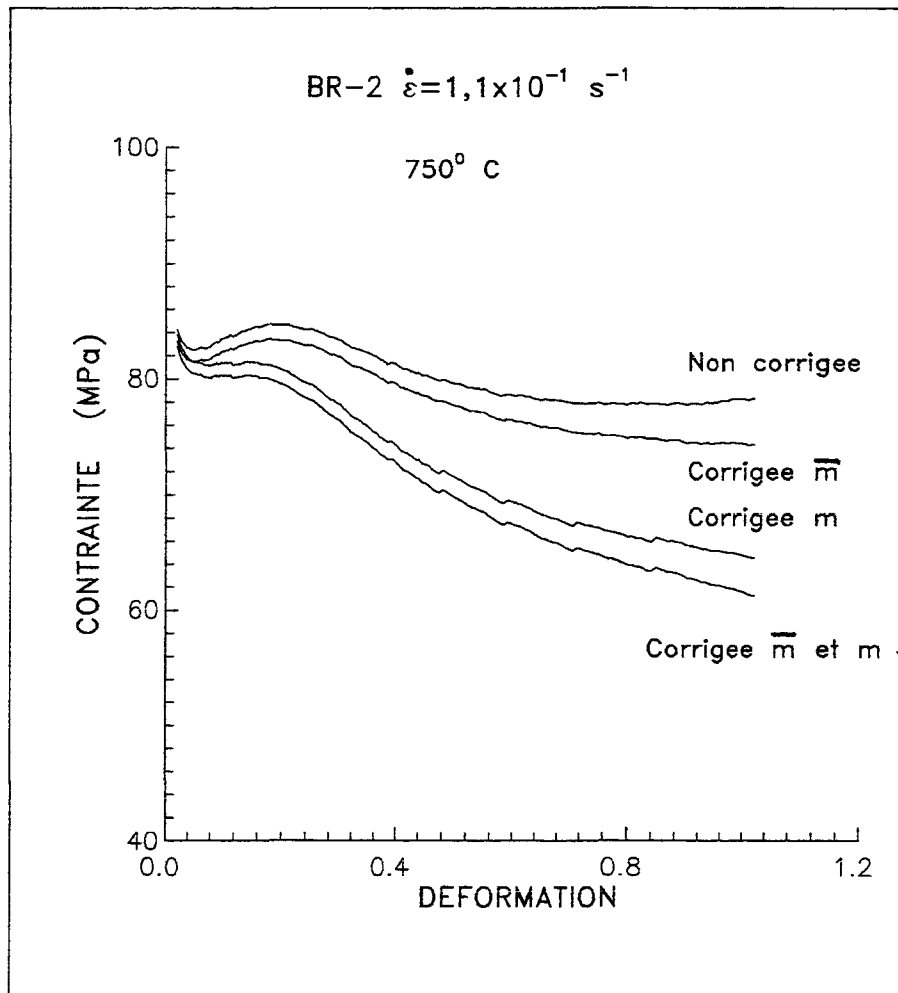


Fig. 14 Exemple de la variation de la contrainte en fonction des différentes corrections apportées par les coefficients de frottement et de sensibilité à la vitesse

Celle-ci varie tout au long de l'essai conduit à vitesse de traverse constante. Or, la contrainte d'écoulement qui nous intéresse est celle qui caractériserait le matériau pour la vitesse de déformation initiale $\dot{\epsilon}_0$. La relation entre contrainte d'écoulement et vitesse de déformation généralement admise en déformation à chaud est du type pseudoplastique, c'est à dire qu'elle suit une loi de comportement de type puissance exprimée sous la forme:

$$\sigma = k \dot{\epsilon}^m$$

où m est le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation. Dans ces conditions la contrainte d'écoulement relative à la vitesse $\dot{\epsilon}_0$ peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\sigma(\dot{\epsilon}_0) = k \dot{\epsilon}_0^m = k \dot{\epsilon}_0^m \left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \right)^m = \sigma_c \left(\frac{H}{H_0} \right)^m = \sigma_c (1 - e)^m$$

en introduisant le résultat de (2) on obtient :

$$\sigma_c(\dot{\epsilon}_0) = \sigma_n (1 - e)^{m+1}$$

Par ailleurs, aux interfaces tas de compression-échantillon, le frottement engendre une augmentation de la contrainte d'écoulement apparente. Pour en tenir compte nous utilisons une correction proposée par CHEN et COYNE (1976).

$$\sigma_\alpha = \sigma_c(\dot{\epsilon}_0) \left(1 + \frac{\bar{m} D}{3\sqrt{3} H} \right)^{-1}$$

Avec \bar{m} coefficient de frottement de TRESCA.

Comme la conservation de volume implique $D^2 H = D_0^2 H_0$ on a :

$$\sigma_\alpha = \sigma_c(\dot{\epsilon}_0) \left(1 + \frac{\bar{m} D_0 H_0^{1/2}}{3\sqrt{3} H^{3/2}} \right)^{-1}$$

si l' on prend : $H = H_0(1 - e)$

$$\sigma_\alpha = \sigma_c(\dot{\epsilon}_0) \left(1 + \frac{\bar{m} D_0}{3\sqrt{3} H_0 (1 - e)^{3/2}} \right)^{-1}$$

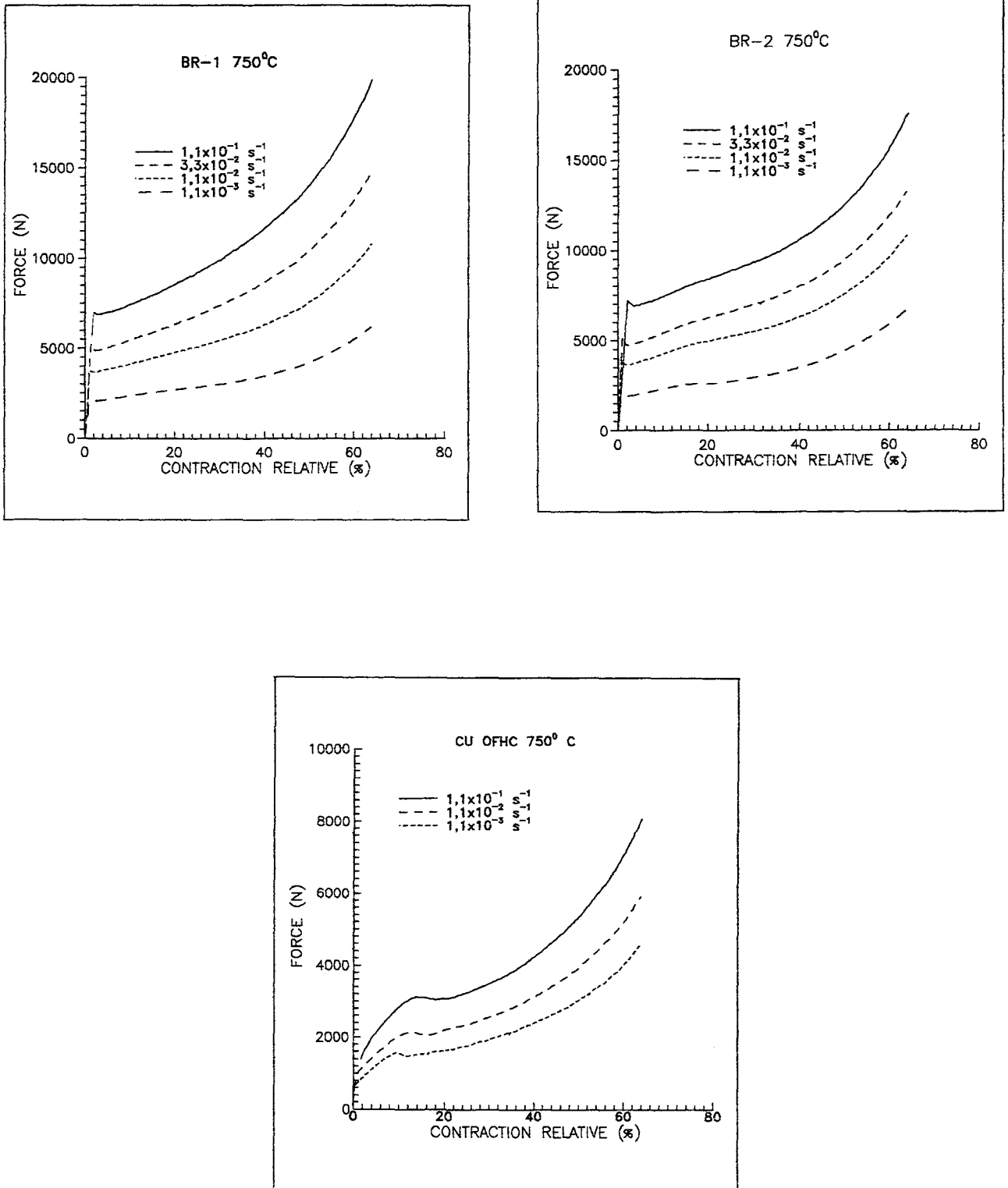


Fig. 15 - Courbes force- contraction relative obtenues par compression à chaud des bronzes BR -1, BR- 2 et Cu OFHC. T = 750°C.

La correction de la vitesse de déformation implique la connaissance du coefficient de sensibilité du matériau vis-à-vis de celle-ci :

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}(\varepsilon, T)$$

mais les courbes contrainte - déformation ne sont pas connues a priori. Une évaluation de m en première approximation (m_p) est donc effectuée pour tout le domaine des vitesses de déformation, puis m est redéterminé à partir des courbes contrainte -déformation corrigées à l'aide de m_p .

Un exemple des corrections apportées d'une part par le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, et d'autre part par la correction due au frottement est représenté en Fig. 14. Les valeurs de ces corrections, apportées par m et \bar{m} , sont à $\varepsilon = 0,1$ pour m de 4% et pour \bar{m} de 1,5 à 2%. Pour $\varepsilon = 1$ elles passent respectivement à 19% et 6%. La correction globale de la contrainte d'écoulement est de 25% pour une déformation de l'ordre de l'unité.

Pour effectuer ces différents calculs un logiciel a été étudié et mis au point par A. BELKEBIR et B. BAYLE (E. N. S. M. S. E. , 1993) (cf. Annexe-3)

II - 3 - 2 - 3 Analyse des courbes contrainte - déformation

On a pu observer tout d'abord la bonne reproductibilité des essais. Les courbes force-contraction relative enregistrées sur table traçante, sont présentées en Fig. 15. Généralement après un pic, la force croît de façon monotone et de plus en plus rapidement, ce qui peut être relié à l'augmentation de la section de l'échantillon ainsi qu'à celle de la vitesse de déformation au cours de l'essai, et dans une proportion moindre, à l'augmentation du coefficient de frottement au delà de 40 à 45% de contraction .

Etudions maintenant les courbes contrainte - déformation, calculées d'après la méthode décrite précédemment, pour les bronzes BR -1, BR- 2, et le Cuivre (Fig. 16) .

- Le maximum de la contrainte est très rapidement atteint pour les trois premiers matériaux ($\varepsilon = 0,05$). Elle croît aussi très sensiblement avec la vitesse, par exemple pour des variations de $\dot{\varepsilon}_0$ de 1 à 10 et de 1 à 100, σ_{ef} est multipliée respectivement par 1,9 et par 3,5 (valeur à $\varepsilon = 0,4$).

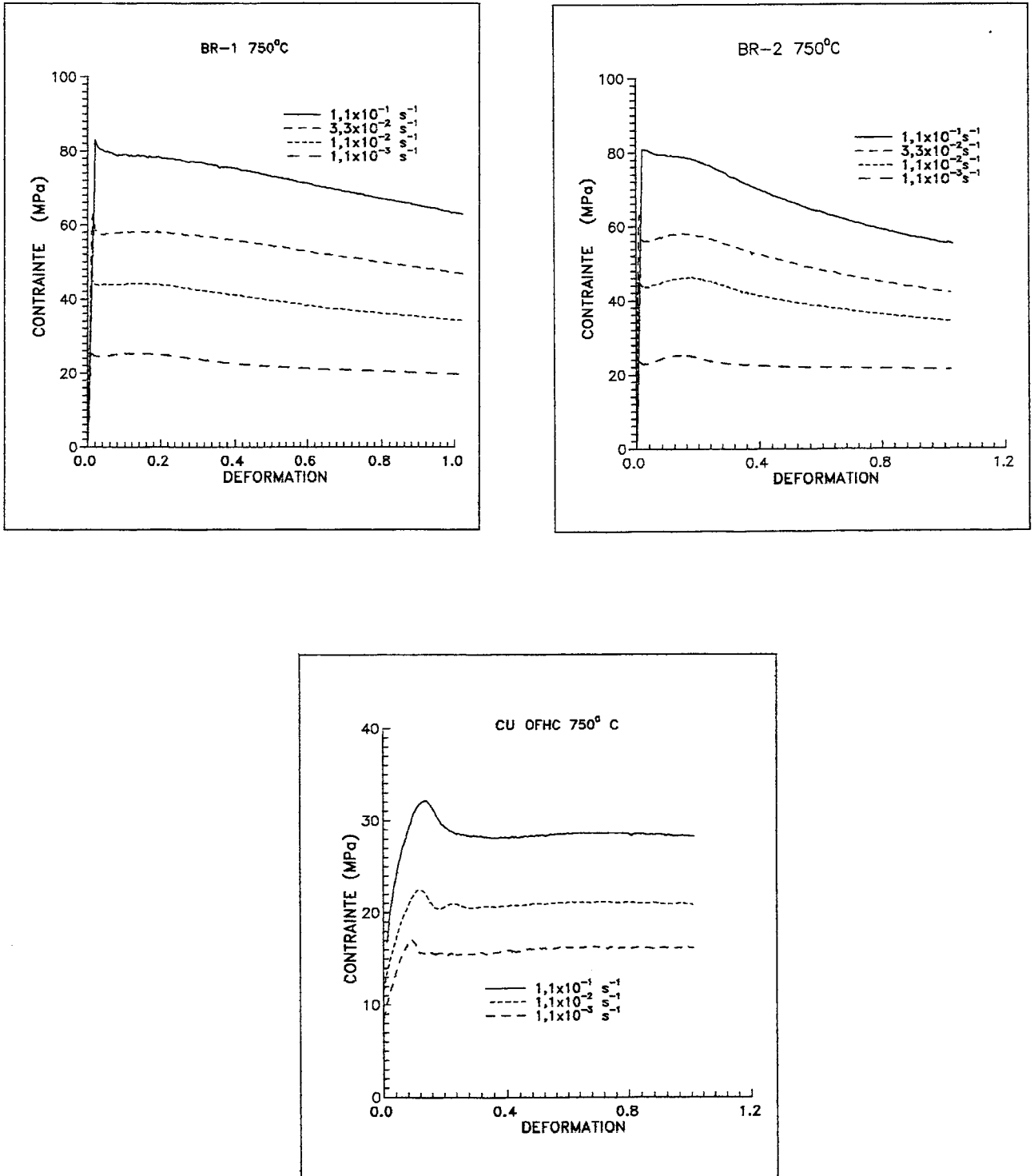


Fig. 16 - Courbes contrainte-déformation obtenues par compression à chaud des bronzes BR-1, BR-2 et Cu OFHC. T = 750°C.

- Les bronzes ont un comportement comparable pour des vitesses de déformation identiques. Après un léger pic, la contrainte diminue rapidement pour croître de nouveau jusqu'à environ $\varepsilon = 0,13$, un peu plus pour le bronze BR- 2. Ensuite, elle diminue d'autant plus que la vitesse d'essai est plus élevée. La contrainte d'écoulement stationnaire n'est jamais atteinte pour $\varepsilon = 1$. La tendance à un adoucissement plus prononcé aux vitesses plus grandes, pourrait en partie, s'expliquer par un léger échauffement "adiabatique" .

Quant au Cuivre OFHC, les pics observés, plus dilatés, s'étagent sur des déformations allant de 0,09 à 0,2 . La contrainte, en fonction de la vitesse, évolue moins vite que pour les bronzes, de 1 à 1,8 pour des variations de la vitesse de 1 à 100. Des oscillations de la contrainte, d'amplitudes décroissantes, se manifestent jusqu'au maximum de la déformation atteinte pour la vitesse de déformation la plus faible, alors que pour la plus grande vitesse, on n'observe plus sur la courbe, qu'un seul pic. Nous expliciterons ce phénomène au chapitre suivant

II - 3 - 2 - 4 - Etude du coefficient de sensibilité à la vitesse

Il est dorénavant possible de déterminer avec précision les valeurs du coefficient de sensibilité à la vitesse m , qui est une valeur instantanée, à partir des courbes contrainte - déformation dont nous avons vu la méthode de calcul au chapitre II - 3 - 2 - 2 , et ensuite d'en étudier les variations avec la déformation et la vitesse de déformation à la température de 750°C .

En première approximation et au vu de la Fig. 17, on peut observer que ce coefficient ne varie pas sensiblement avec la vitesse de déformation, pour une valeur de ε donnée. On peut admettre dès lors, que la valeur de m est la pente d'une droite dans le diagramme $\ln \sigma / \ln \dot{\varepsilon}$ pour tout le domaine de vitesse à chaque valeur de déformation.

Une étude plus fine représentée par la Fig. 18 de la valeur de m , en fonction de la déformation, indique pour tous les alliages cuivre-étain, une valeur maximum se situant vers $\varepsilon = 0,13$, suivie d'une décroissance rapide jusqu'à $\varepsilon = 0,2$. Pour le bronze BR- 1 cette valeur remonte, puis diminue assez peu au delà de 0,5 de déformation. Dans le cas de BR -2 à partir de 0,3, m décroît de manière continue, alors que pour le Cu OFHC elle atteint un plateau aux environs de $\varepsilon = 0,5$. Celle-ci est nettement moins élevée ($m = 0,13$ en moyenne) que pour les bronzes qui atteignent des valeurs de l'ordre de 0,23 à 0,24.

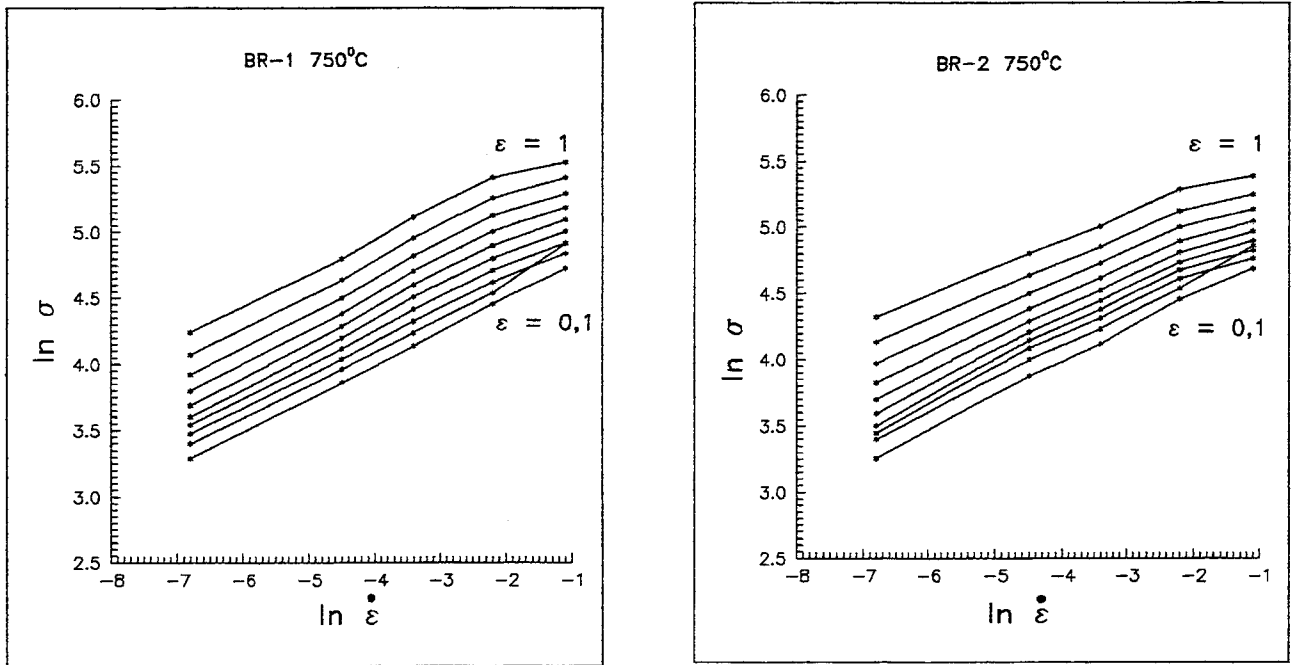


Fig. 17 Variation du coefficient de sensibilité à la vitesse en fonction de la vitesse de déformation

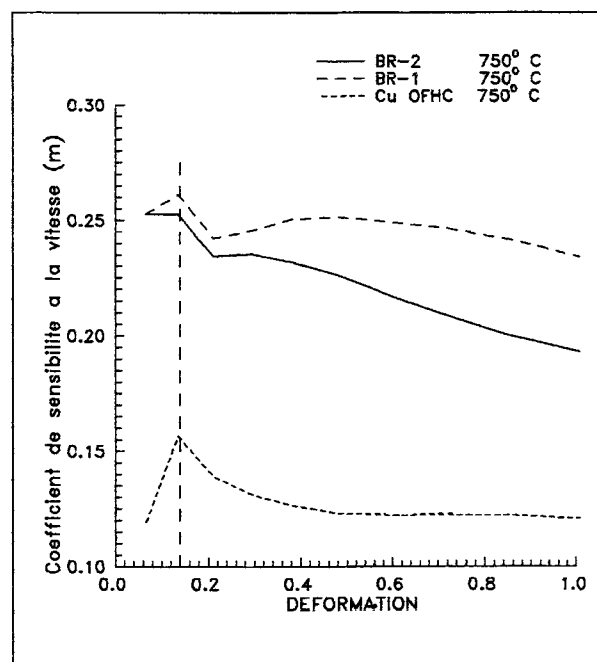


Fig. 18 Variation du coefficient de sensibilité à la vitesse en fonction de la déformation

D'une manière générale, le coefficient de sensibilité à la vitesse des bronzes étudiés ne varie pas avec la vitesse de déformation, et diminue en des proportions inégales avec l'augmentation de la déformation, si l'on admet qu'il n'y a pas d'auto-échauffement au cours de l'essai. Si l'on considère comme réaliste une élévation de la température au cours de l'essai, tout au moins pour la plus grande des vitesses de l'étude, il y a lieu de quantifier la variation de la valeur du coefficient de sensibilité à la vitesse, en fonction de la température. Ce qui impliquera aussi une correction sur la contrainte d'écoulement. Nous calculerons à l'annexe II l'élévation de la température et ses conséquences sur les différents paramètres rhéologiques, ainsi que sa signification.

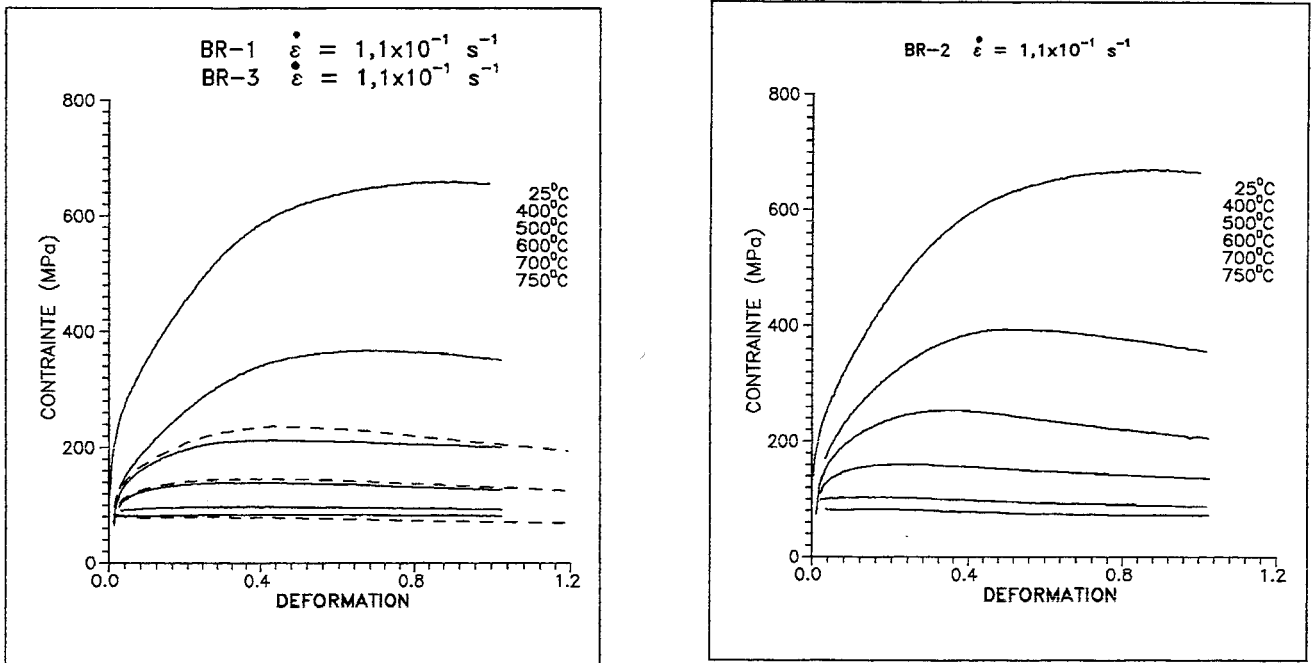
II - 3 - 2 - 5 - Etude de la sensibilité à la température

Le dernier paramètre rhéologique qu'il est nécessaire de connaître est la valeur de l'énergie d'activation apparente.

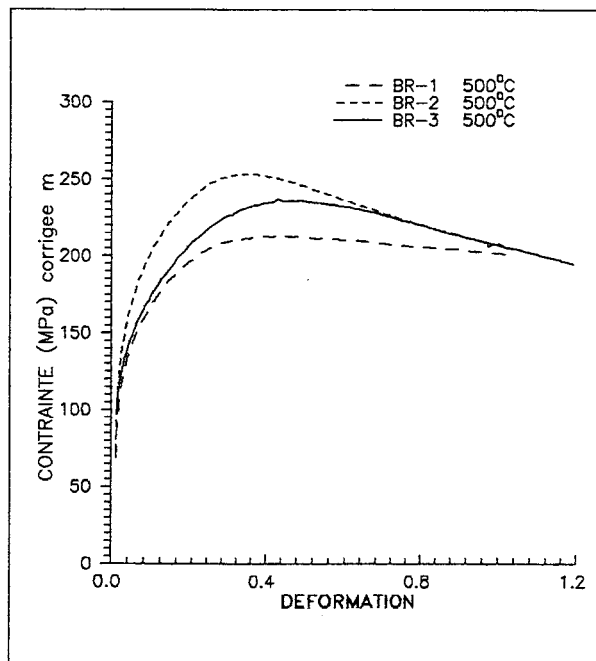
Des essais à différentes températures, entre l'ambiante et 750°C, ont été réalisés, à même vitesse de traverse constante, soit 100 mm /min ($\dot{\epsilon}_0 = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) jusqu'à la déformation $\epsilon = 1$. Les courbes contrainte - déformation relatives aux trois bronzes (pur, industriel, et archéologique) dont quelques exemples sont présentés par la Fig. 19, ne sont pas corrigées du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, celui-ci n'ayant pas été déterminé aux différentes températures.

D'une façon générale on constate qu'à température ambiante, la contrainte augmente de façon continue. Vers 400°C un début d'adoucissement se dessine, plus marqué dans l'intervalle de température 400 - 600°C, dont un exemple est donné Fig. 20 (à 500°C, courbe BR-3 d'après S. ANDRIEU). L'étude de ces courbes met en évidence une cinétique différente de comportement pour les trois bronzes. Les vitesses d'écrouissage varient du bronze industriel (BR-2), la plus rapide, au bronze pur (BR-1), la plus lente. La contrainte maximale atteinte varie dans le même ordre. L'adoucissement, qui débute vers une déformation de 0,35 pour BR- 2 et à 0,45 pour BR -1 et BR- 3, conduit la contrainte d'écoulement à une valeur identique pour $\epsilon = 1$, comme à toutes températures (Fig. 21). A l'ambiante comme à toutes températures, les courbes se superposent quasiment. L'écart mesuré de la contrainte ne dépasse pas 5 à 10 MPa .

Le rôle de la température et de la vitesse de déformation sur le niveau des contraintes est bien connu (σ croît quand T diminue ou $\dot{\epsilon}$ augmente), il est à relier à la mobilité des dislocations, sensible aux précipités ou solutés de la matrice ainsi qu'à l'activation thermique.



**Fig. 19 - Courbes contrainte - déformation à différentes températures
vitesse de déformation de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$**



**Fig. 20 Etude de l'évolution de la courbe contrainte - déformation
à 500°C. Vitesse de déformation $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$**

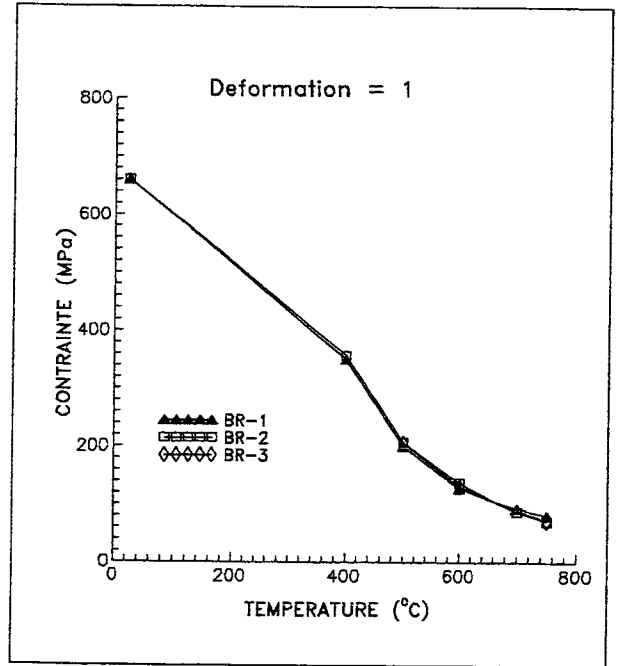
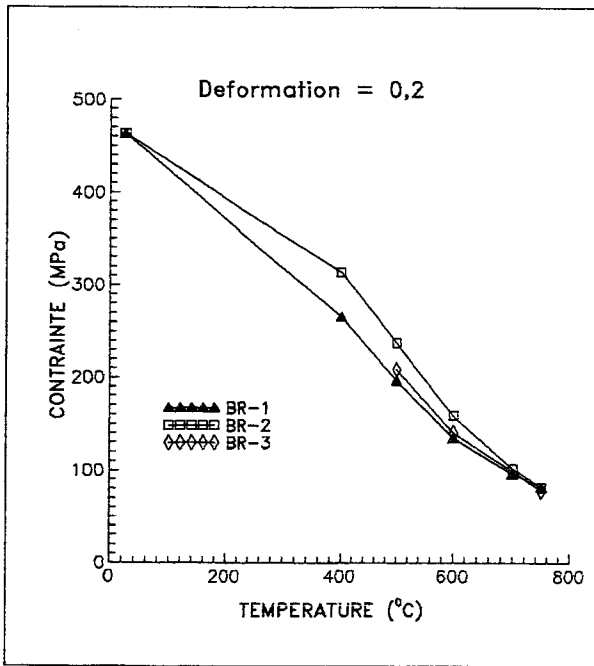


Fig. 21 Evolution de la contrainte à $\varepsilon = 0,2$ et 1 en fonction de la température. Vitesse de déformation $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

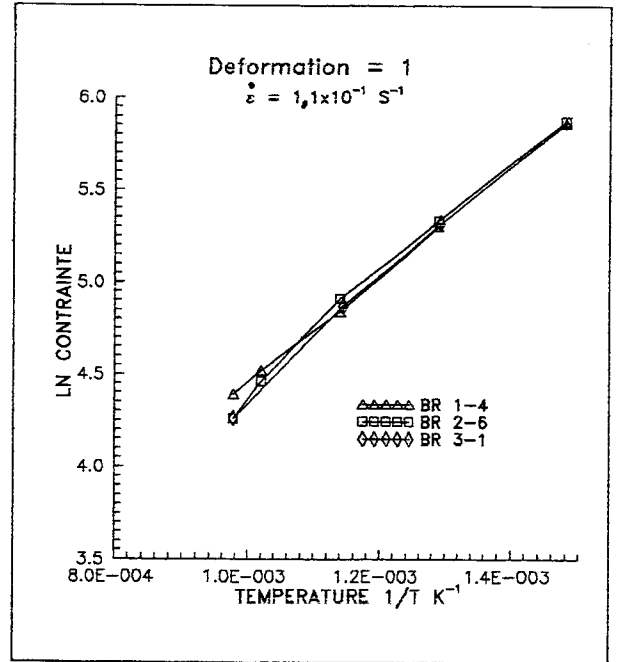
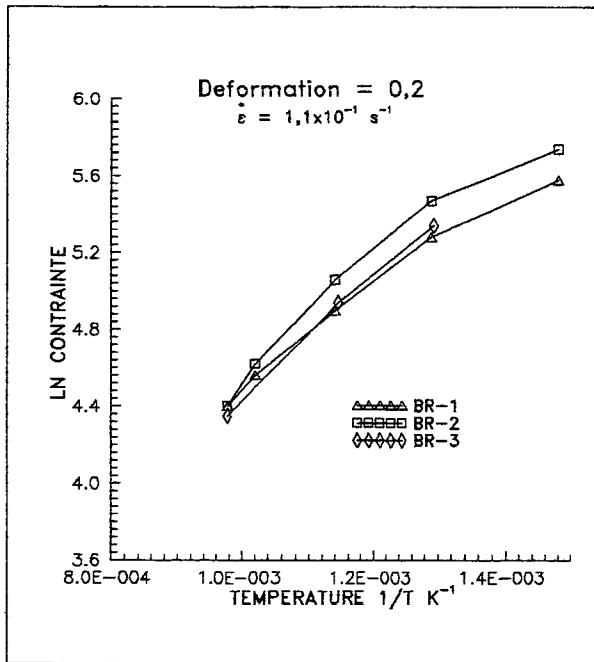


Fig. 22 Courbes $\ln \sigma - 1/T$ à $\varepsilon = 0,2$ et 1. Vitesse de déformation $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

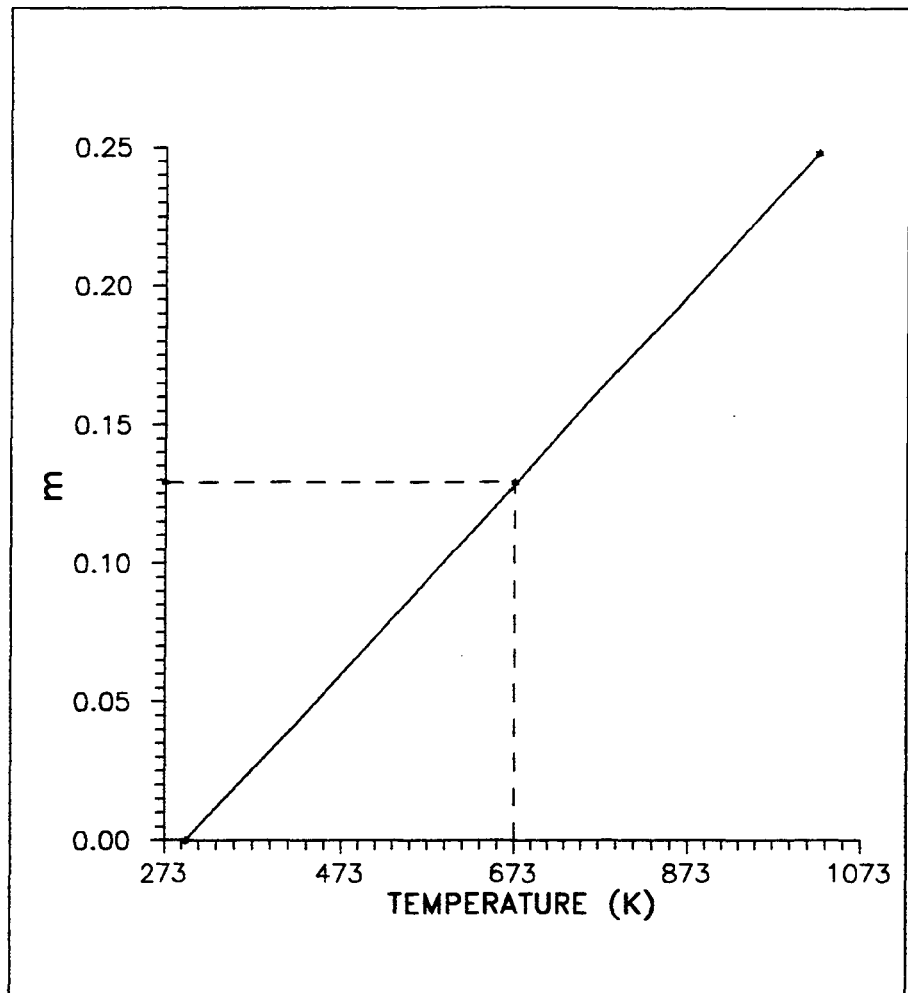


Fig. 23 Méthode graphique pour le calcul de m
en fonction de la température

II - 3 - 2 - 6 Calcul de l'énergie d'activation apparente

Il est habituel de représenter les courbes, $\ln \sigma$ en fonction de l'inverse de la température $1/T$ (K^{-1}) (Fig. 22), afin de déterminer la valeur de l'énergie d'activation apparente Q , définie suivant la loi d'ARRHENIUS :

$$Q = \frac{R}{m} \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right) \text{ En kJ / mol}$$

où R est la constante des gaz parfaits et vaut $8,314 \text{ J / (mol } \cdot \text{K)}$, m le coefficient de sensibilité à la vitesse, et enfin T , la température absolue exprimée en degrés Kelvin.

Celle-ci est sensible aux valeurs du coefficient de sensibilité à la vitesse variant avec la température. On peut tenter de les interpoler, en supposant cette variation de m linéairement croissante avec la température (Fig. 23). Si l'on considère qu'à la température ambiante m vaut sensiblement 0, la droite passant par l'origine et une valeur déterminée expérimentalement permet, graphiquement, une approche raisonnable. Ce qui est en bon accord avec la méthode de calcul, et les résultats obtenus par OUSSOUADI et KLEPACZKO (1991) pour le cuivre.

Les valeurs moyennes de Q obtenues pour les bronzes, dans tout le domaine des températures (de l'ambiante à 750°C) sont de :

$$\begin{aligned} \text{pour } \varepsilon = 0,2 \quad Q &= 120 \text{ kJ / mol} \\ \text{et à } \varepsilon = 1 \quad Q &= 180 \text{ kJ / mol} \end{aligned}$$

Néanmoins ces valeurs sont nettement plus élevées si l'on considère uniquement l'intervalle $700 - 750^\circ\text{C}$, de l'ordre de 350 kJ / mol .

Les valeurs de l'énergie d'activation apparente moyennes sont identiques pour les trois bronzes. Elles sont d'autre part comparables à la valeur habituellement admise comme étant celle du mécanisme lié au phénomène de restauration dynamique, ce dont nous traiterons au chapitre suivant

II - 4 Discussion et conclusion

Les deux alliages, bronze pur (BR-1) et bronze industriel (BR-2), ont été caractérisés du point de vue rhéologique à partir d'une approche classique, précédemment décrite, et plus particulièrement l'évolution des différents paramètres comme :

la sensibilité à la vitesse, pour une température (750°C),
la sensibilité à la température, à une vitesse de 10^{-1} s^{-1}
et enfin la valeur de l'énergie d'activation apparente.

Pour le bronze à caractère archéologique seule l'étude en température a été réalisée.

Les bronzes BR-1 et BR-2 présentent, à 750°C, après un domaine d'écrouissage limité aux premiers pour cent, un pic de faible importance suivi d'un adoucissement rapide. La contrainte augmente de nouveau faiblement pour atteindre un maximum vers $\bar{\epsilon} = 0,2$, valeur à partir de laquelle elle décroît de manière continue, sans jamais atteindre un domaine stable. Le cuivre, quant à lui, présente un pic plus dilaté, bien marqué suivi d'une série d'adoucissements et de durcissements créant des ondulations s'atténuant avec la déformation jusqu'à environ $\bar{\epsilon} = 0,4-0,5$ où la contrainte d'écoulement stationnaire s'établit, ce qui est en bon accord avec la littérature .

L'étude du coefficient de sensibilité à la vitesse permet de mettre en évidence la diminution de celui-ci en fonction de la déformation pour tout le domaine des vitesses. Il reste néanmoins indépendant de la vitesse, quelle que soit celle-ci.

Les courbes contrainte - déformation à différentes températures montrent une cinétique différente de comportement entre les trois bronzes. Dans le domaine de température étudié, l'adoucissement, quand il existe, est retardé quand la température diminue. Mais les contraintes tendent progressivement à retrouver un niveau identique pour une déformation de 1 et ceci à chaque température .

Les valeurs moyennes de l'énergie d'activation apparente sont comprises entre:

120 kJ / mol à 0,2 de déformation
et 180 kJ / mol à 1 de déformation

Celles - ci, comparées à celle de l'aluminium (150 kJ / mol), pour laquelle le mécanisme d'évolution microstructural mis en jeu est la restauration dynamique, et à celle du cuivre (300 kJ / mol) qui implique une recristallisation dynamique complète très rapide, ne permet pas, avant l'étude microstructurale, de déterminer par quel type de mécanisme l'évolution de la structure de nos matériaux est régie.

Par ailleurs, au cours des essais réalisés au laboratoire, aucun incident tels que: criquage ou apparition de fissures voir éclatement des échantillons, n'a été observé. Ce qui, sans conclure de manière formelle, sans l'étude des microstructures, permet de supposer une bonne forgeabilité à haute température des trois bronzes.

2



CHAPITRE III

ETUDE MICROSTRUCTURALE DES ETATS DEFORMES

III - ETUDE MICROSTRUCTURALE DES ETATS DEFORMES

Les propriétés mécaniques des matériaux métalliques dépendent, pour une grande partie, des évolutions de leur microstructure, qui se produisent pendant, ou après une mise en forme à haute température, c'est-à-dire au delà de $0,5 T_f$ où T_f représente la température du solidus du matériau à transformer.

Durant un essai, réalisé en condition isotherme et à vitesse de déformation imposée constante, la contrainte que subit le matériau évolue avec la déformation. Ce qui implique une évolution de la microstructure, dont la formation est elle-même contrôlée par les mécanismes microscopiques mis en jeu pendant la déformation. Ces microstructures de transformation à chaud conditionnent, sur le plan pratique, les efforts mis en jeu au cours de chacune des étapes de la mise en forme.

Dans une première partie bibliographique de ce chapitre, nous ferons une synthèse des évolutions des microstructures que l'on peut observer lors d'une mise en forme à chaud. Nous aborderons la restauration dynamique et plus particulièrement la recristallisation dynamique. Ensuite on caractérisera les mécanismes intervenant au cours des essais de compression réalisés sur les différents matériaux de notre étude.

Nous discuterons les résultats et enfin, nous concluerons sur les conséquences de telles évolutions microstructurales pour la mise en forme de nos matériaux.

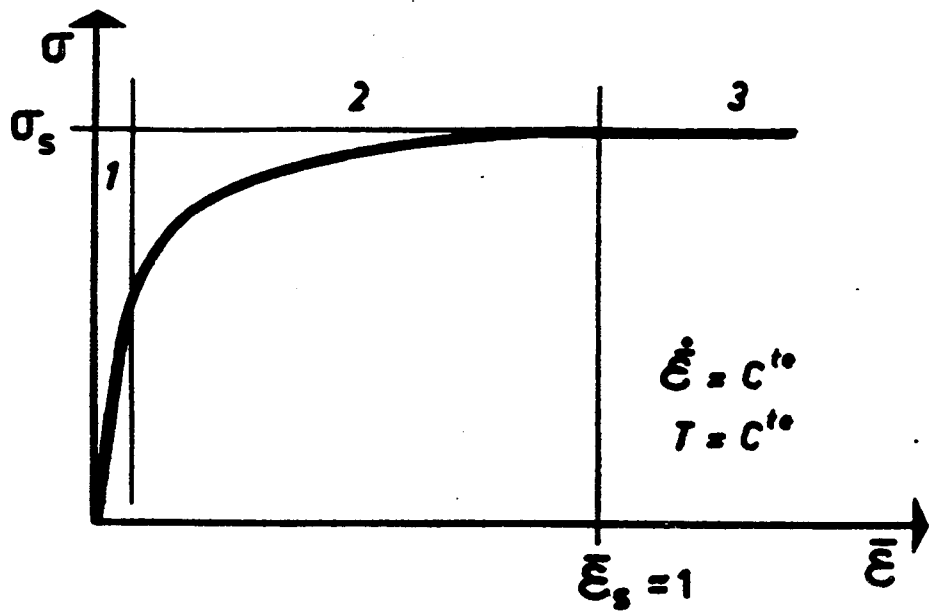


Fig. 24 Représentation schématique d'une courbe σ - ϵ , relative à un matériau subissant au cours d'une transformation à chaud, le seul processus de restauration dynamique

III - 1 - Données bibliographiques

Au cours d'une déformation à chaud, on peut considérer que les mécanismes susceptibles d'intervenir sont de deux types : la restauration et la recristallisation. Ces deux mécanismes tendent à adoucir les matériaux par réorganisation et élimination des dislocations produites par la déformation. Ils dépendent, pour une part, des conditions de la transformation, vitesse de déformation, température, et d'autre part, de paramètres métallurgiques comme la microstructure initiale et l'énergie de défaut d'empilement.

Il reste à définir l'instant où se produisent ces différents processus d'évolution des microstructures. Selon qu'ils ont lieu au cours de la transformation ou après celle-ci, on distinguera la restauration et la recristallisation dynamiques et statiques.

III - 1 - 1 Restauration et recristallisation

III - 1 - 1 - 1 Restauration dynamique

Les matériaux qui subissent le seul phénomène de restauration dynamique, sont ceux qui, généralement, possèdent une forte énergie de défaut d'empilement de l'ordre de 10^{-1} J/m² (exemples : Al et certains de ses alliages). Les dislocations sont suffisamment mobiles pour que, par montée et glissement dévié, elles puissent s'annihiler et s'arranger. Les courbes contrainte-déformation observées sur ces matériaux présentent, après un domaine élastique, un durcissement suivi d'un plateau où la contrainte d'écoulement atteint un régime stationnaire. Un exemple est donné Fig. 24.

Ce mécanisme débute dès la mise en charge du matériau, par une augmentation progressive de la densité des dislocations qui, durant la phase de durcissement, migrent pour former des sous-joints délimitant, à l'intérieur des grains initiaux, des sous-grains. En régime stationnaire de la contrainte d'écoulement, ces sous-grains conservent une densité de dislocations, une taille moyenne et une désorientation variant faiblement au cours de la déformation, ce qui implique qu'ils se détruisent et se reconstituent de manière continue, (McQUEEN et JONAS, 1975). Ce processus appelé parfois "repoligonisation" permet d'expliquer que l'on observe toujours des sous-grains équiaxes alors que les grains initiaux tendent à s'allonger. Il y a alors équilibre entre l'écrouissage qui crée des dislocations et la restauration, mécanisme par laquelle ces dislocations se réarrangent et s'annihilent. Aux déformations très élevées, les sous-joints peuvent se désorienter suffisamment pour devenir des joints de grains, ce qui a été observé notamment pour l'aluminium.

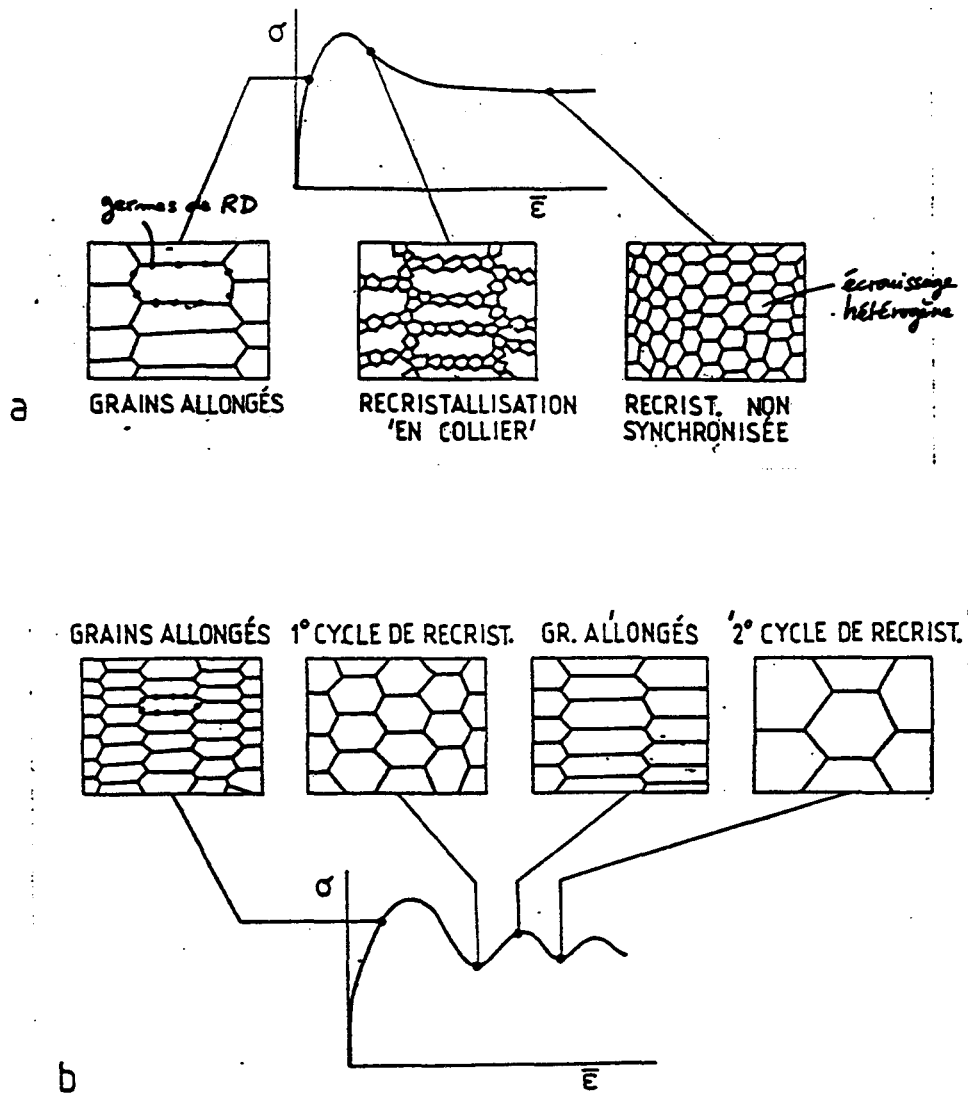


Fig. 25 Représentation schématique de l'évolution microstructurale au cours du processus de recrystallisation dynamique d'après SAKAI et JONAS (1986).

- a - Dans le cas où $D_0 > 2D_s \Rightarrow$ recrystallisation dynamique "en collier"

\Rightarrow courbes σ - ϵ à un seul pic

- b - Dans le cas où $D_0 < 2D_s \Rightarrow$ courbes σ - ϵ à pics multiples

\Rightarrow plusieurs cycles de recrystallisation synchronisés

III - 1 - 1 - 2 Recristallisation dynamique

Un tel mécanisme est observé essentiellement pour les matériaux à faible énergie de défaut d'empilement de l'ordre de 10^{-2} J/m² (exemples : laiton, aciers austénitiques.....) pour lesquels existent deux formes typiques de courbes contrainte-déformation. L'une à pic unique, à partir duquel la contrainte diminue rapidement, puis devient stationnaire, est associée à un affinement des grains, et une autre, à pics multiples, caractérisée par une succession de phases d'adoucissement et de durcissement, est associée à un grossissement des grains .

A température et à vitesse de déformation données, la taille des grains initiaux (D_0), joue un rôle prépondérant pour l'observation de l'une ou l'autre des formes des courbes σ - ε , la taille finale des grains (D_S = taille stable des grains) étant identique dans les deux cas. La restauration dynamique active au début de la déformation n'est pas suffisamment efficace pour éliminer les dislocations à une vitesse telle que la germination et la croissance de nouveaux grains ne puissent pas se réaliser. Quand D_0 est grande, le nombre de sites de germination est relativement faible par unité de volume de grain. Dès que la valeur de la déformation critique de recristallisation dynamique est atteinte, des grains croissent jusqu'à atteindre leur taille stable, sans envahir entièrement le volume des grains initiaux. Si la déformation est poursuivie, le processus continue vers l'intérieur du grain initial, et tend à le remplir progressivement. Ce type de recristallisation dynamique non synchronisée est dit "en cascade" ou "en collier".

De manière générale si $D_0 > 2D_S$, les courbes sont à simple pic et si $D_0 < 2D_S$, elles sont à pics multiples. La condition critique du passage d'un type de courbe à l'autre est définie par $D_0 = 2D_S$ (Fig. 25, d'après SAKAI et JONAS, 1986 et Fig. 26, BLAZ et al. 1983).

Il faut aussi prendre en compte les effets de la température et de la vitesse de déformation sur la forme des courbes σ - ε . Pour D_0 donnée, les courbes évoluent d'un simple pic à des courbes à pics multiples quand la température augmente, (un exemple est donné à la Fig. 27, BLAZ et al. 1983) ou quand la vitesse de déformation diminue, car dans les deux cas la taille des grains D_S augmente.

En fait il existe d'autres modes d'évolution des microstructures pour lesquels nous ne donnerons ici que de brèves informations. Il s'agit entre autres :

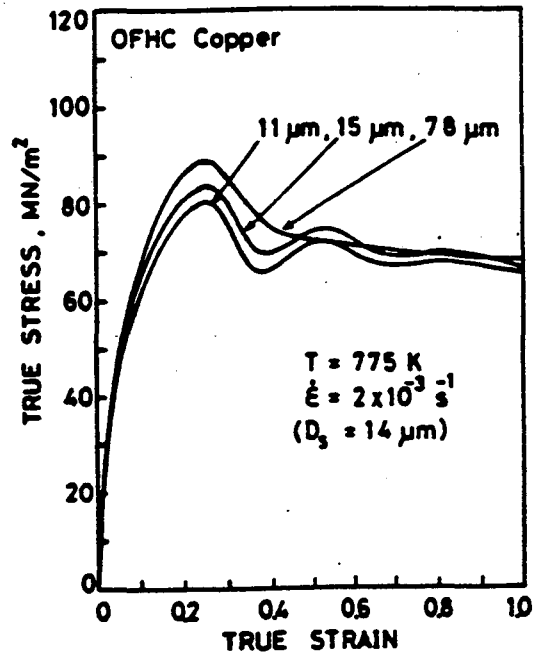


Fig. 26 Influence de la taille des grains initiaux (D_0) sur l'évolution de la forme des courbes $\sigma - \epsilon$ (BLAZ et al. 1983)

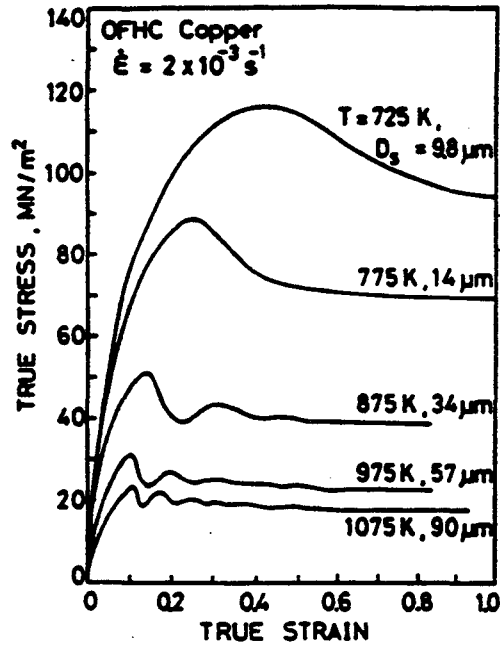


Fig. 27 Influence de la température sur l'évolution de la forme des courbes $\sigma - \epsilon$. (BLAZ et al. 1983)

- de la recristallisation continue que certains auteurs, (PERDRIX, PERRIN et MONTHEILLET, 1981) apparentent, pour des matériaux à forte énergie de défaut d'empilement, à une restauration dynamique. Ce mécanisme ne comporte pas de phase de germination et croissance.

- de la recristallisation dynamique géométrique proposée par McQUEEN et al. 1985, et SOLBERG et al. 1989, observée pour de très grandes déformations sur des échantillons d'aluminium.

- enfin des phénomènes statiques, intervenant après déformation, c'est-à-dire durant la phase de refroidissement des matériaux ou entre des passes de déformation à chaud, par exemple de laminage ou de forgeage.

III - 2 Résultats de l'étude qualitative des états déformés

III - 2 - 1 Méthode expérimentale

Afin de compléter l'étude rhéologique, il est important de pouvoir déterminer le mécanisme qui est mis en jeu, au cours d'une déformation par compression à chaud de nos matériaux. Les échantillons de bronze BR - 1 et BR - 2 sont comprimés à différents taux de déformation ($\epsilon = 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,2$), à 750°C et à vitesse identique de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. Le cuivre quant à lui, a été étudié pour différentes vitesses à température constante (750°C) et une seule déformation ($\epsilon=1$). Tous les échantillons sont trempés dès la fin de l'essai. Ils sont ensuite découpés suivant un plan passant par l'axe de compression. Ce qui permet l'observation et du centre et de sa périphérie.

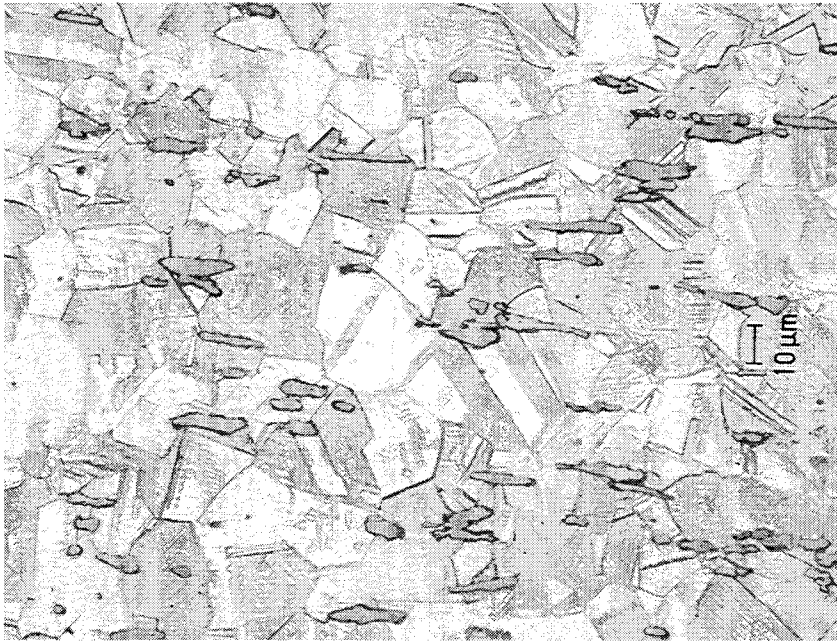
Les demi-échantillons sont ensuite enrobés avec une résine époxy, polymérisant lentement (15 heures) puis, ils sont surfacés au papier abrasif (p240CSi). Le polissage final est obtenu sur une machine VIBROMET durant 15 minutes avec support Mastertex et comme abrasif, le produit Masternet de graduation $0,06 \mu\text{m}$. Le passage du surfacage au polissage final est assuré par une machine semi automatique utilisant des supports de types Texmet et Perforet jusqu'à la graduation $3 \mu\text{m}$.

Cette méthode donne des résultats acceptables et surtout reproductibles dans le temps, ceci pour l'ensemble des bronzes. Elle s'est révélée difficilement adaptable pour le cuivre. Pour celui-ci nous avons dû mettre au point une autre technique, et plus



- a -

Axe de compression ↓



- b -

Fig. 28 Microstructures d'états déformés à 750°C et $\epsilon=1$, bronze BR-3

Observation des sulfures -a- dans la zone au contact des tas de presse

-b- au centre de l'échantillon

particulièrement en ce qui concerne la phase finale du polissage, assurée avec un disque Mastertex et un abrasif Masterpolish de graduation 0,06 μm .

Les réactifs d'attaque chimique utilisés pour révéler les microstructures sont :

- pour les bronzes :

FeCl ₃	.....	20 cm ³
HCl	.....	2 cm ³
C ₂ H ₅ OH	.....	96 cm ³

Les attaques chimiques sont réalisées au tampon durant environ 10 secondes, avec une solution diluée quatre fois dans de l'alcool éthylique 95%

- pour le cuivre

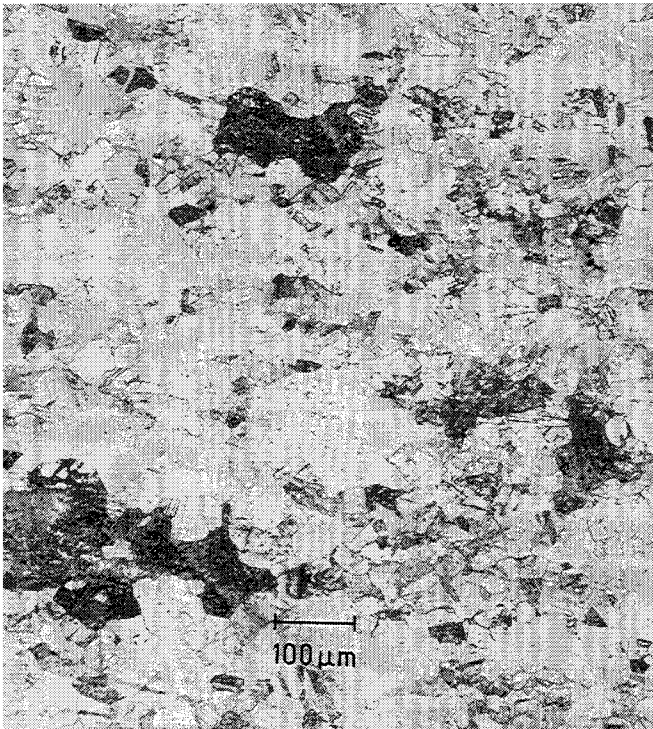
HNO ₃	.....	30% en volume
H ₂ O distillée	.....	70% en volume

Temps d'attaque 20 à 60 secondes, observation en lumière polarisée.

III - 2 - 2 Résultats obtenus pour les bronzes et pour le cuivre

L'étude des microstructures des états déformés montre, d'une manière générale et aux fortes déformations ($\epsilon = 1$ par exemple), l'existence d'une zone moins déformée, proche de la surface, en contact avec les tas de presse. Ceci est visible pour le cuivre dont les joints de grains initiaux restent très marqués après déformation: au centre de l'échantillon ils sont allongés perpendiculairement à l'axe de compression, alors que dans cette zone, appelée aussi "zone morte", ils restent plus équiaxes. Ce résultat est aussi bien mis en évidence pour le bronze BR-3, par l'observation des sulfures Fig. 28.

Mais on sait par ailleurs que la contrainte d'écoulement corrigée, d'après CHEN et COYNE, prend bien en compte la déformation, comme une déformation moyenne. Actuellement un modèle, prenant en compte et en tout point de l'échantillon l'hétérogénéité de la déformation, c'est-à-dire relié au "bombé" induit par le frottement, est en cours de réalisation à l' E.N.S.M.S.E. par B. DUMANOWSKI (thèse en cours, communication personnelle).

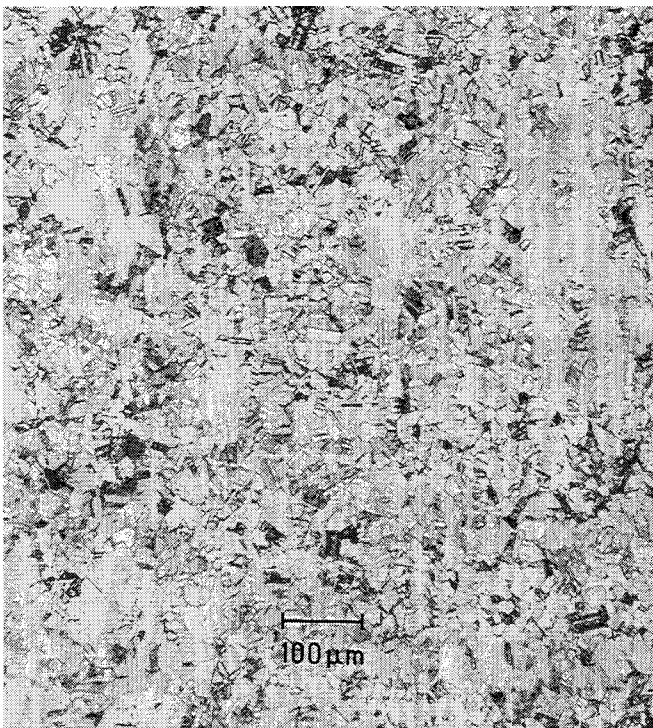


$\varepsilon = 0,25$

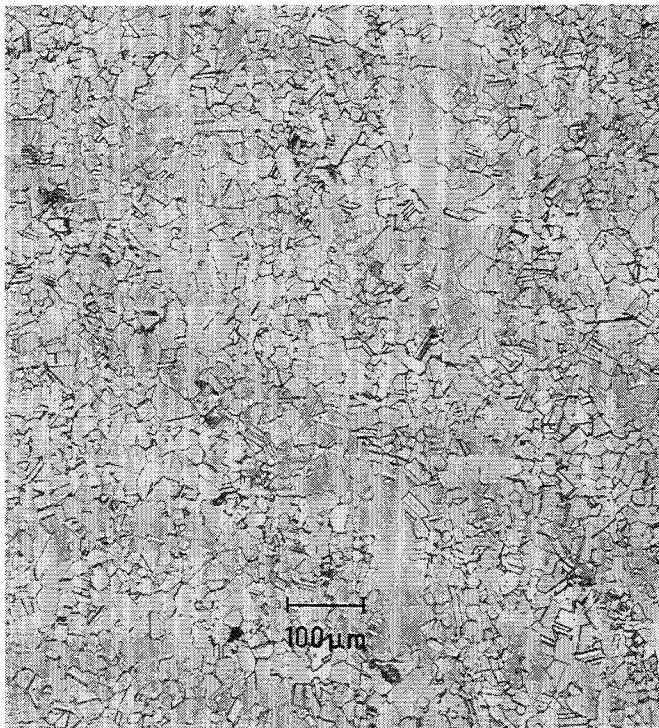


$\varepsilon = 0,5$

Axe de compression \Rightarrow



$\varepsilon = 0,75$



$\varepsilon = 1,2$

Fig. 29 Bronze BR-1 Microstructures des états déformés à 750°C, $\dot{\varepsilon} = 1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ et à différents taux de déformation

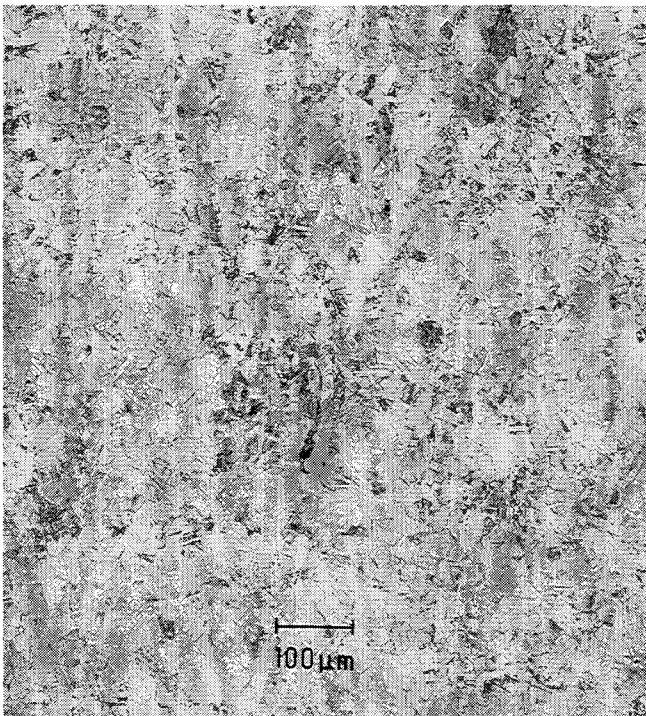


$\varepsilon = 0,25$

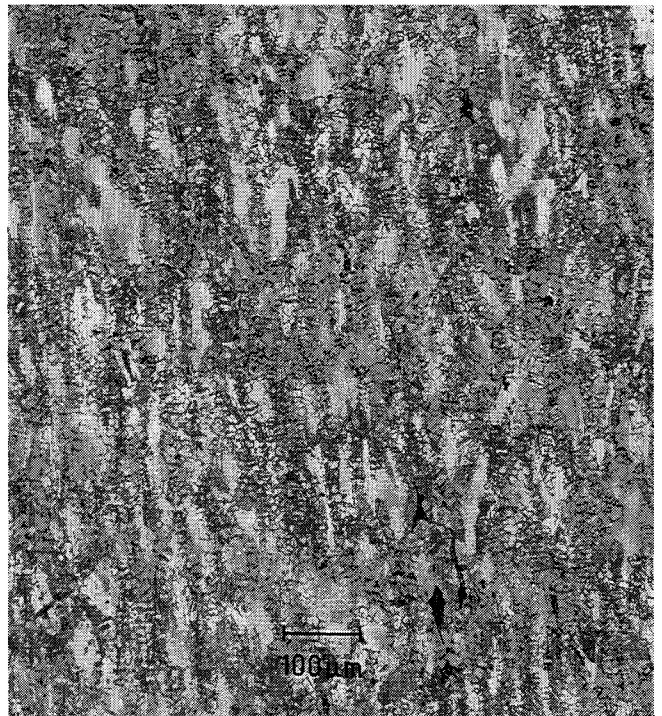


$\varepsilon = 0,5$

Axe de compression \Rightarrow



$\varepsilon = 0,75$



$\varepsilon = 1,2$

Fig. 30 Bronze BR-2 Microstructures des états déformés à 750°C, $\dot{\varepsilon} = 1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ et à différents taux de déformation

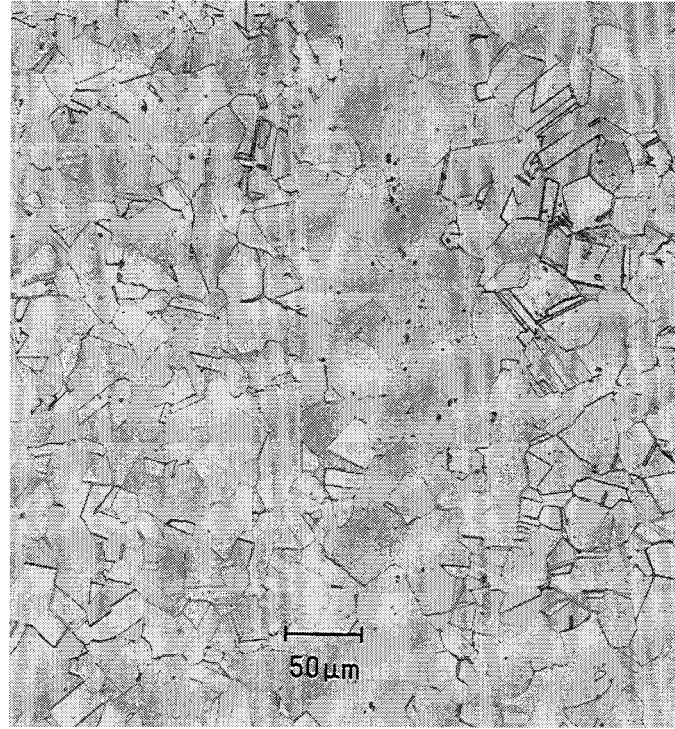
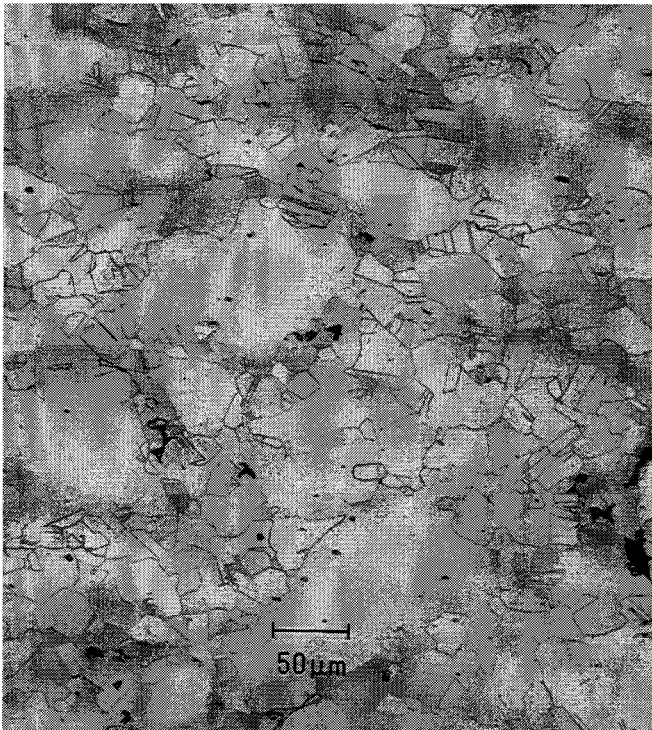
BR-1 $\epsilon = 0,25$ BR-1 $\epsilon = 1,2$ Axe de compression \Rightarrow BR-2 $\epsilon = 0,25$ BR-2 $\epsilon = 1,2$

Fig. 31 Bronze BR-1 et BR-2 Microstructures des états déformés à 750°C, $\dot{\epsilon} = 1,1 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$
 comparaison de leurs évolutions

III - 2 - 2 - 1 Le bronze peu pollué BR-1

Les microstructures obtenues après trempe des échantillons déformés, présentées à la Fig. 29, montrent à $\varepsilon = 0,25$, la formation de petits grains équiaxes, se situant à la périphérie des grains initiaux. Leur taille moyenne est d'environ de 30 - 35 μm . Jusqu'à la déformation maximale de nos essais ($\varepsilon = 1,2$), on observe un envahissement progressif des grains initiaux, allant du bord vers le centre de ceux-ci. La taille des nouveaux grains reste, durant toute la déformation, quasiment inchangée.

Toutefois le processus n'apparaît pas totalement achevé, certaines zones n'étant pas encore complètement garnies de nouveaux grains.

III - 2 - 2 - 2 Le bronze industriel BR-2

Pour ce matériau, l'évolution microstructurale présentée en Fig. 30 est d'une manière générale, pour le remplissage des grains initiaux, identique au bronze précédent. La taille des nouveaux grains, aux faibles déformations, reste du même ordre de grandeur (20 - 25 μm), par contre l'étude des structures finales appelle deux remarques :

- la première, qui concerne la taille des grains aux grandes déformations. Jusqu'à environ $\varepsilon = 0,5$ la taille des nouveaux grains ne semble pas évoluer de manière significative, par contre la structure finale à $\varepsilon = 1,2$ montre un affinement du grain très prononcé (taille $\approx 10-15 \mu\text{m}$). De plus, il apparaît que la fraction moyenne recristallisée est moins importante que dans le matériau précédent (Fig. 31).

- la seconde remarque concerne l'observation d'une seconde phase, en faible proportion, ceci quelle que soit la déformation. En l'état actuel de nos investigations, il ne nous a pas été possible de l'identifier (Fig.31). Des essais complémentaires pour apprécier la remise en solution de cette seconde phase ont été réalisés. D'une part dans un four en température (750° C) et d'autre part dans le montage de compression suivant le cycle thermomécanique de nos essais. Pour les deux types d'essais, après 10 minutes de maintien en température, suivi d'une trempe rapide, la seconde phase n'est pas totalement remise en solution (Fig. 32). En revanche, après 15 minutes de maintien, aucune trace de cette phase n'a pu être décelée.

Dans les états déformés cette seconde phase perd son caractère lamellaire observé dans le brut de coulée, au profit d'une structure plutôt globulaire.

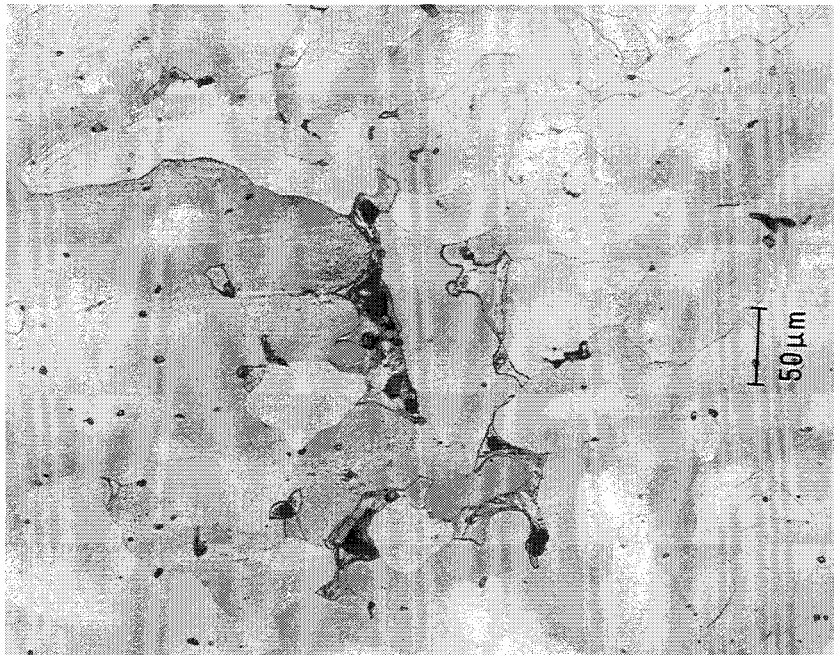


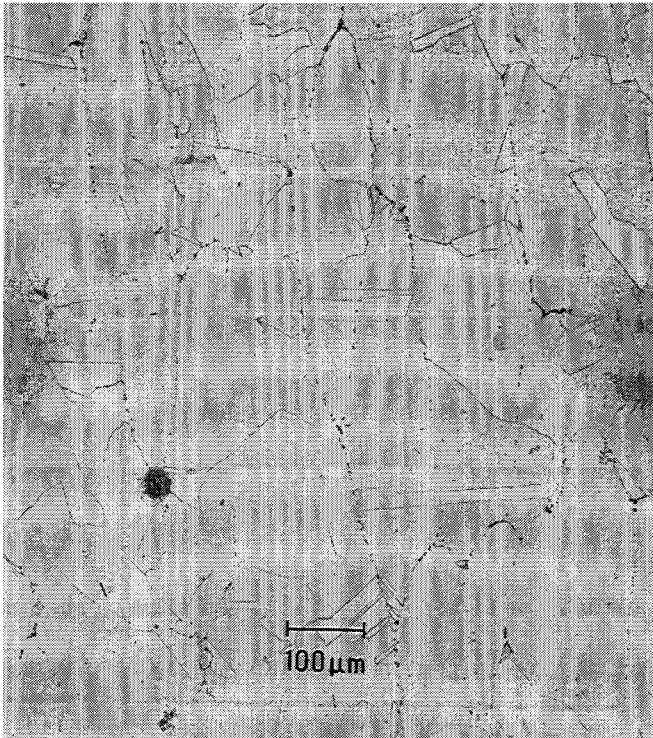
Fig. 32 Microstructure obtenue pour le bronze BR-2, brut de coulée après maintien dans un four à 750°C pendant 10 min, trempé eau.

III - 2 - 2 - 3 Le bronze à caractère archéologique BR-3

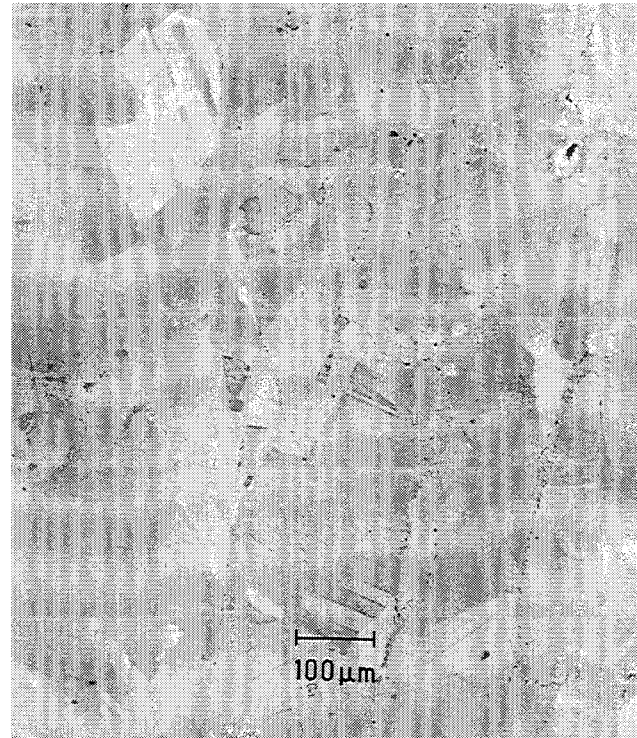
Ce matériau est régi par la même évolution microstructurale que les deux précédemment décrits. La taille finale des grains est d'environ 25-30 μm , par contre le phénomène de remplissage des grains initiaux semble quasiment achevé, il ne subsiste pas de zone non recristallisée. Les sulfures sont moins déformés au contact des tas de presse, alors qu'au centre de l'échantillon, ils s'allongent perpendiculairement à l'axe de compression. Ces sulfures ont, très probablement, une dureté proche de celle de la matrice, ce qui n'induit aucune fissure lors de la mise en forme à chaud.

III - 2 - 2 - 4 Le cuivre OFHC

L'étude des microstructures a été réalisée sur des échantillons ayant subi une déformation de $\varepsilon = 1$ à la température de 750°C, et ceci pour des vitesses de déformation initiales de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ à $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. On peut y distinguer deux types de recristallisation dynamique par la simple observation de la taille des grains D_S . Aux vitesses les plus grandes, D_S est très inférieure à celle des grains initiaux alors qu'aux vitesses les plus basses, ces grains ont une taille sensiblement égale à $D_0/2$. Ceci permet de prévoir, pour le premier cas, une recristallisation dynamique en collier, ce qui est en accord avec la courbe à simple pic obtenue lors des essais. Dans le second cas, aux faibles vitesses de déformation, le processus mis en jeu est une recristallisation dynamique se développant en plusieurs vagues successives dans le domaine de transition des deux mécanismes. Un exemple des microstructures obtenues est présenté à la Fig. 33. Il est à remarquer que les joints des grains initiaux, très décorés, sont de remarquables traceurs pour la déformation. Cette décoration consiste en un ensemble de microcavités, apparues au cours du refroidissement. Après fusion et début de la solidification sous vide, il a été introduit, à haute température, un mélange de gaz argon-hydrogène. On peut alors penser que l'hydrogène diffuse très rapidement dans la matrice, sous forme d'interstitiels, puis ségrège, au cours du refroidissement, dans les joints de grains et plus particulièrement aux noeuds triples Fig. 34.



$$\dot{\epsilon} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

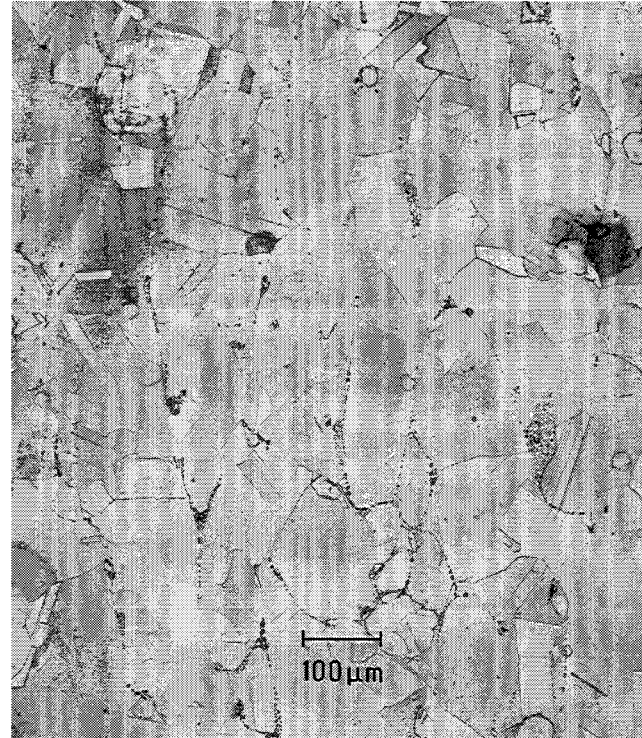


$$\dot{\epsilon} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Axe de compression \Rightarrow



$$\dot{\epsilon} = 3,3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$



$$\dot{\epsilon} = 1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Fig. 33 Cuivre OFHC. Microstructures des états déformés à 750°C, $\epsilon = 1$ et à différentes vitesses de déformation

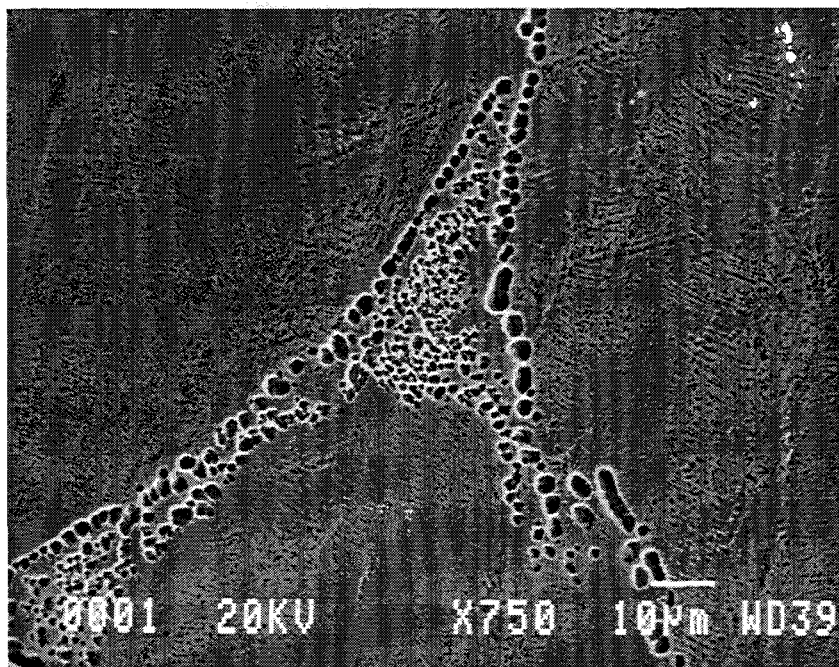
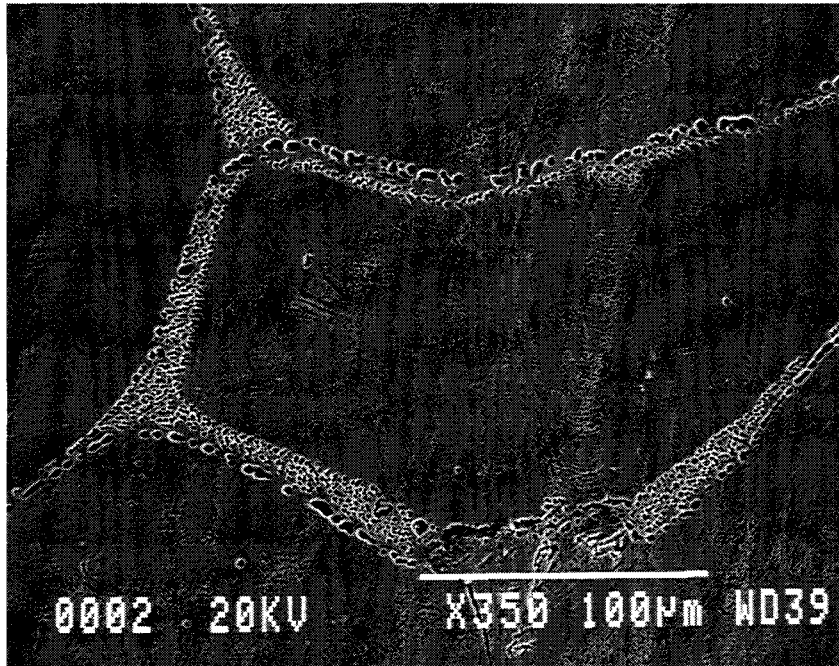


Fig. 34 Structure des joints de grains du cuivre OFHC, brut de coulée.
Observation effectuée par Microscopie Electronique à Balayage

III - 3 Discussion et conclusion

A partir de l'étude qualitative des états déformés, nous avons pu confirmer une observation désormais classique, à savoir l'existence d'une "zone morte" au voisinage de la surface de contact avec les tas de presse, dans laquelle les structures se déforment moins. Ceci traduit une hétérogénéité de la déformation dans les échantillons, en raison de laquelle les courbes contrainte-déformation ne sont que la représentation d'un comportement moyen du matériau en compression (cf. remarque II - 2 - 2).

L'étude des microstructures des états déformés a permis de conclure sur les mécanismes de déformation de nos matériaux au cours d'une compression à chaud isotherme. Elles peuvent se définir de la façon suivante :

- pour les bronzes BR-1 et BR-3, on observe dès le début de la déformation, l'apparition de petits grains, se situant principalement au pourtour des joints de grains initiaux. Ils se propagent au fur et à mesure que croît la déformation vers l'intérieur des grains. Leur taille stable D_S est atteinte dès la première vague de recristallisation et n'évolue pratiquement plus quelle que soit la déformation atteinte au cours de nos essais. Ce processus n'est pas achevé aux déformations maximales atteintes ($\epsilon=1,2$). La relation $D_0 > 2D_S$ est respectée, et cette remarque associée à la forme des courbes contrainte-déformation à un seul pic observée durant notre étude, démontre que le mécanisme qui régit ces deux matériaux est bien une "recristallisation dynamique en collier". Ce résultat correspond parfaitement au modèle proposé par SAKAI et JONAS (1986).

- En ce qui concerne le bronze industriel, BR-2, le mécanisme général est le même que précédemment. Il est à noter, toutefois, que si la première vague de recristallisation génère une taille de grains stable, celle-ci s'affine très rapidement, probablement au cours d'une deuxième vague de recristallisation; l'on n'observe plus dès lors d'évolution de ces derniers grains. Ce mécanisme ne semble pas avoir été observé ou, tout au moins, décrit dans la littérature. D'autre part on observe, sur les courbes contrainte-déformation inhérentes à ce matériau, une décroissance plus rapide de la contrainte et sa valeur moyenne est plus faible que pour les autres bronzes de l'étude. Ceci est en contradiction avec la loi expérimentale qui relie la contrainte d'écoulement à la taille des grains recristallisés par la loi $\sigma = \frac{1}{D^{0.75}}$: si D diminue, la contrainte d'écoulement augmente.

Nous tentons d'émettre ici une hypothèse permettant d'expliquer ce comportement. La taille importante des grains de ce matériau pourrait créer en son sein une hétérogénéité de déformation telle que la déformation critique de recristallisation



dynamique n'est atteinte que localement aux joints de grains, lieu où l'écroutissage est le plus important. Le nombre de germes par unité de volume des grains, est alors faible. Une première vague de recristallisation localisée se développe, des grains croissent jusqu'à des tailles égales à D_S . Ensuite, de nouveaux germes apparaissent simultanément, à l'interface entre le coeur des grains initiaux déformés et les nouveaux grains et, de plus dans les joints des nouveaux grains. Il se déclenche donc une deuxième vague de recristallisation dynamique dans les petits grains de la vague précédente. Il semble que la progression de la recristallisation vers le centre des grains initiaux soit plus difficile que la génération de grains à l'intérieur de ceux déjà recristallisés. Ces derniers petits grains ne peuvent pas croître jusqu'à une taille stable, car ils sont trop nombreux. La structure est donc constituée d'un "collier" recristallisé une seconde fois (donc plus "mou") enserrant le coeur des grains initiaux, non recristallisé (donc plus "dur"). On peut penser que la déformation est alors localisée dans le "collier", les coeurs des grains initiaux se comportant comme des inclusions faiblement déformables. Il en résulte un adoucissement, plus prononcé que pour BR-1, que l'on observe sur les courbes contrainte-déformation.

Pour le cuivre OFHC, nous avons mis en évidence une recristallisation dynamique, dans le domaine de transition des courbes à pic unique aux courbes à pics multiples. La taille des grains recristallisés correspond sensiblement à $D_S = D_0/2$, ils sont obtenus en une seule vague de recristallisation. Les courbes ne présentent que de très faibles oscillations.

Après avoir apporté ces quelques lumières sur les mécanismes qui régissent nos matériaux, il nous est maintenant possible d'aborder la conclusion générale.

CHAPITRE IV

CONCLUSION GENERALE

IV - CONCLUSION GENERALE

Nous avons tenté, au travers de cette étude, de répondre d'une part, à la problématique posée par l'archéométaballurgie, qui réside dans la question suivante: " les objets en bronze de la Tène finale étaient-ils fabriqués à froid avec des recuits entre chaque passe de travail, ou bien étaient-ils transformés à chaud", et d'autre part, de comprendre ce qui fait de ces bronzes, des matériaux de très mauvaise réputation. Ceci étant dû à la grande difficulté que rencontrent les industriels actuels pour les transformer à chaud.

Il y avait donc lieu, dans un premier temps, de mieux connaître les bronzes, tant du point de vue de la rhéologie que du point de vue microstructural, ce qui est l'essentiel de notre étude.

Pour cela des essais de compression, réalisés à la température de 750°C et jusqu'à la déformation de $\varepsilon = 1$, pour des vitesses de déformation comprises entre 10^{-3}s^{-1} et 10^{-1}s^{-1} , ont permis de caractériser complètement le comportement rhéologique de deux bronzes BR-1 et BR-2, partiellement BR-3 et, à titre de comparaison, un cuivre OFHC.

Le bronze BR-1 ou bronze "pur" est légèrement pollué en zinc. Ce qui fait que sa composition chimique se rapproche le plus des bronzes industriels actuels.

Le bronze BR-2, bronze à "caractère industriel" pour lequel la teneur en zinc est dix fois supérieure à la teneur désirée.

Le bronze BR-3 à caractère "archéologique" à forte teneur en soufre

Les principaux résultats obtenus par l'expérimentation, du point de vue rhéologique, sont les suivants :

- Les courbes contrainte-déformation présentent, après un pic peu important, un adoucissement rapide suivi d'un durcissement modéré jusqu'à environ $\varepsilon=0,2$. A partir de cette valeur, la contrainte décroît de manière continue sans atteindre un régime stationnaire. Cette décroissance est nettement plus marquée pour le bronze BR-2.

- Le coefficient de sensibilité à la vitesse diminue avec la déformation, à partir de $\varepsilon = 0,14$ ceci pour les deux bronzes et le cuivre. Ce coefficient n'est pas dépendant de la vitesse, tout au moins dans le domaine des vitesses étudiées.

Les observations effectuées sur les états déformés, par microscopie optique et par microscopie électronique à balayage, ont permis de conclure sur le mécanisme de déformation des différents bronzes et du cuivre OFHC.

Le bronze peu pollué (BR-1) et le bronze à caractère archéologique (BR-3) sont régis par un mécanisme de recristallisation dynamique "en collier", pour lequel la taille des grains stables est atteinte en une seule vague, se développant vers l'intérieur des grains initiaux. Ce mécanisme n'est pas achevé pour BR-1, aux déformations que nous avons atteintes ($\varepsilon=1,2$).

Nous avons observé, pour le bronze BR-2, un mécanisme différent, bien qu'apparenté à une recristallisation dynamique en "collier", dans lequel la taille des grains stables est obtenue en une seule vague, s'affinant avec l'augmentation de la déformation, conduisant à un adoucissement continu de la contrainte d'écoulement, ceci dans les conditions expérimentales limitées du domaine de l'étude.

Dans cette étude nous n'avons fait qu'aborder le comportement du bronze à caractère "archéologique" (BR-3), celui-ci étant actuellement étudié par Sandra Andrieu, doctorante au Laboratoire des Musées de France, Palais du Louvre.

L'ensemble des résultats rhéologiques et microstructuraux ainsi obtenus trouveront leur utilité, tant chez l'archéométallurgiste pour la modélisation du martelage artisanal, que dans le monde industriel par leur nouveauté.

D'une manière générale, nous avons démontré que ces matériaux, malgré la mauvaise réputation qu'ils ont d'être difficilement transformables à chaud, peuvent, à 750°C, se forger ou se laminier, dans les conditions expérimentales du laboratoire, sans apparition de fissures malgré leur porosité, voir comme pour BR-2, la conservation d'une seconde phase réputée dure. Cela implique aussi, qu'il n'y a pas d'impossibilité majeure à ce que les forgerons de la Tène finale aient utilisé cette technique.

Des études ultérieures pourraient contribuer, d'une part, à apporter des éclaircissements sur la limite en température de cette forgeabilité, et d'autre part, sur le mécanisme de recristallisation du bronze industriel, et permettre une modélisation prédictive de ce comportement. Enfin l'ensemble de ces contributions pourrait permettre, par l'optimisation des gammes de transformation à chaud, le renouveau d'une pratique aujourd'hui abandonnée par les industriels du bronze.

ANNEXE I

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT PAR LA METHODE DE L'ANNEAU

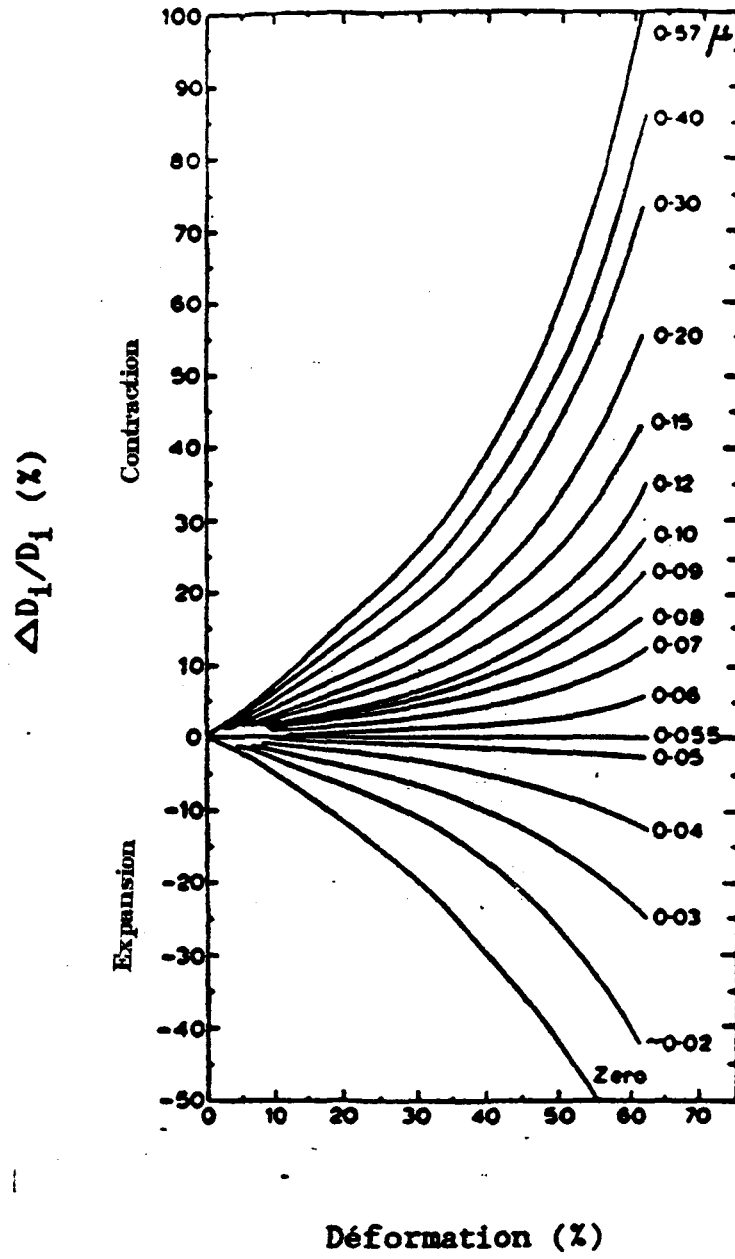


Fig. A1-1 - Abaque de dépouillement du test de l'anneau (MALE et COCKCROFT 1964)

Lecture directe de la valeur de μ

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT PAR LA METHODE DE L'ANNEAU

Nous avons vu, au cours de notre étude, l'importance du frottement entre l'échantillon et les tas de presse. Nous rappelons ici l'essentiel des motivations qui nous ont amené à étudier ce coefficient de frottement, et son impact sur les essais de compression à chaud. Lors des essais effectués en laboratoire, l'échantillon ne se déforme pas de manière homogène. On remarque en effet une déformation en "tonneau" qui apparaît d'autant plus importante que le coefficient de frottement est élevé, ce qui induit un gradient de la déformation dans l'échantillon. L'évaluation de la correction apportée par ce coefficient sur les contraintes est, pour nos matériaux et dans les conditions de l'étude, de l'ordre de 6% pour une déformation de $\varepsilon = 1$. Certains auteurs signalent, pour d'autres matériaux, que cette correction peut atteindre 35%. Afin de limiter ces effets, l'expérimentateur aura comme souci de tendre à réduire le frottement, par l'apport d'un lubrifiant. Il existe souvent plusieurs solutions dans le choix d'un lubrifiant, à partir des critères suivants; il doit être :

- non réactif avec l'échantillon,
- utilisable dans toute la gamme des températures de l'étude,
- et enfin conserver son pouvoir lubrifiant quelles que soient la déformation et la vitesse de déformation.

Il s'avère donc nécessaire de comparer qualitativement les lubrifiants et de quantifier la valeur du coefficient de frottement pour chacun d'entre eux. Pour cela on utilisera un test qui consiste à écraser un anneau de métal pour lequel les interfaces métal-outil sont préalablement lubrifiées. Ce test utilisé pour la première fois par KUNOGI (1956), a depuis été très largement analysé mécaniquement par différents auteurs comme AVITZUR (1964), MALE et COCKCROFT (1964), HAWKYARD et JOHNSON (1967), MALE et DEPIERRE (1970); toutefois l'ensemble de ces analyses donnent des résultats voisins.

Aujourd'hui le test le plus couramment utilisé est la méthode de détermination du frottement proposée par MALE et COCKCROFT (1964). Cette méthode géométrique dont la mise en oeuvre est très facile, relie la variation du diamètre intérieur (D_i) d'un anneau déformé par compression ($\Delta D_i / D_i$) au coefficient de frottement μ de MALE et COCKCROFT lu sur l'abaque présenté en Fig. A1-1. Soit, sous une autre forme, au coefficient de frottement de TRESCA \bar{m} en Fig.A1-2 de HAWKYARD et JOHNSON (1967). Ceci pour chacun des deux abaques, en fonction du taux de déformation auquel est soumis l'échantillon. On constate expérimentalement que la déformation de l'anneau, en particulier la variation du diamètre intérieur, a une dépendance très forte vis-à-vis des conditions du frottement.

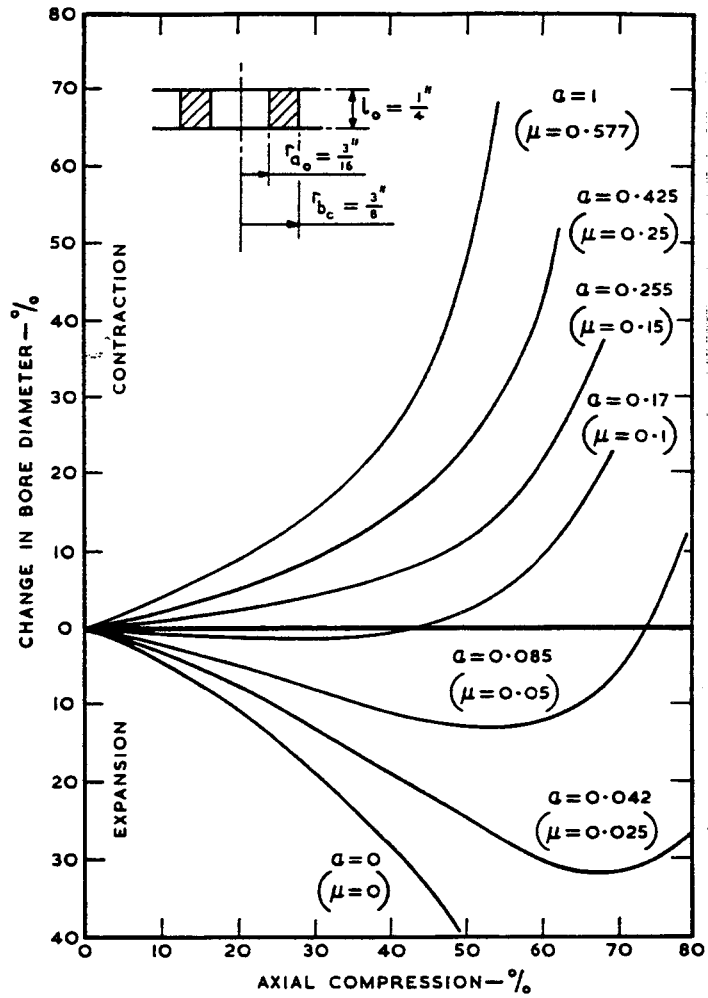


Fig. A1 - 2 Abaque de dépouillement du test de l'anneau (HAWKYARD and JOHNSON 1967)
Lecture directe de la valeur de \bar{m} (ici noté α)

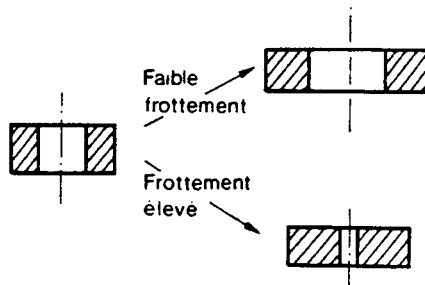


Fig.A1 - 3 Représentation schématique de l'évolution de la géométrie de l'anneau selon les conditions de frottement

D_i diminue quand le frottement est élevé et augmente s'il reste faible (Fig.A1-3). Il est à noter que les dimensions des anneaux se doivent d'être homothétiques aux dimensions des anneaux ayant servi à élaborer l'abaque. Dans notre étude, ils ont pour cotes :

Diamètre extérieur	15 mm
Diamètre intérieur	7,5 mm
Epaisseur	5 mm

Si nous savons maintenant déterminer μ , il reste à connaître la valeur du coefficient de frottement de TRESCA (\bar{m}) qui est relié à μ par la relation suivante :

τ_f = cission de frottement
 τ_0 = cission d'écoulement

σ_f = contrainte de frottement
 σ_0 = contrainte d'écoulement

$$\mu = \frac{\tau_f}{\sigma_0} = \frac{\tau_f}{\sqrt{3} \tau_0} \quad 0 < \mu < 1/\sqrt{3}$$

$$\bar{m} = \frac{\tau_f}{\tau_0} = \frac{\sigma_f}{\sigma_0} \quad 0 < \bar{m} < 1$$

$$\bar{m} = \frac{\tau_f}{\tau_0} = \mu\sqrt{3}$$

$$\bar{m} = \mu\sqrt{3}$$

Si $\bar{m} = 0$ il y a glissement sans frottement et il n'y a pas de bombé, la déformation est homogène.

Si $\bar{m} = 1$ il y a frottement maximum et un fort bombé.

RESULTATS OBTENUS LORS DE NOTRE ETUDE

Nous avons présenté au chapitre II - 3 - 1 (Fig. 13) un résumé des valeurs du coefficient de frottement de TRESCA. Pour cette étude, nous avons fait varier trois paramètres, la température de l'ambiante à 750°C, la déformation, et enfin la nature des

lubrifiants. Nous justifions ci-après notre choix en matière de lubrification, répondant le mieux aux critères définis précédemment. Le meilleur lubrifiant testé est le papier graphité (PG), se présentant sous la forme de feuille de 0,5 mm d'épaisseur et avec lequel la valeur du coefficient de frottement atteint 0,08 à l'ambiante et 0,05 pour toutes les températures et déformations testées. Par contre, il a un inconvénient majeur au delà d'une déformation de 0,3 -0,4 : le feuillard se cisaille sur le bord de l'éprouvette et la partie restante s'incruste dans le métal. Il a donc été rejeté. Le produit retenu est un aérosol à base de graphite lamellaire (PVGR), avec lequel les valeurs du coefficient de frottement n'évoluent ni avec la déformation ni avec la température, compte tenu de la précision des mesures.

En conclusion et afin de corriger les courbes contrainte-déformation, on pourra prendre pour les trois bronzes et pour l'ensemble des essais de caractérisation rhéologique, une valeur unique du coefficient de frottement de TRESCA égale à 0,09 et 0,15 pour le cuivre OFHC.

ANNEXE II



EVALUATION DE L'ECHAUFFEMENT AU COURS D'UN ESSAI DE COMPRESSION

96

Nous avons considéré comme réaliste un léger auto-échauffement au cours de l'essai de compression. Nous voulons d'une part estimer la perturbation résultante de la contrainte et d'autre part l'incidence de celle-ci sur la valeur du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation.

A2 - 1 CALCUL DE LA CONTRAINTE CORRIGEE DE L'ECHAUFFEMENT

La contrainte s'écrit :

$$\sigma = A \dot{\varepsilon}^m \exp\left(\frac{mQ}{RT}\right)$$

ou pour simplifier les calculs ultérieurs,

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \exp(-\delta T)$$

Si l'on impose que les deux fonctions, ainsi que leurs dérivées par rapport à T soient confondues en $T=T_0$ cela implique :

$$A \dot{\varepsilon}^m \exp\left(\frac{mQ}{RT_0}\right) = K \dot{\varepsilon}^m \exp(-\delta T_0) \Rightarrow A \exp\left(\frac{mQ}{RT_0}\right) = K \exp(-\delta T_0) \quad (1)$$

$$\text{et } \underbrace{A \dot{\varepsilon}^m \exp\left(\frac{mQ}{RT_0}\right)}_{\sigma(T_0)} \cdot \left(-\frac{mQ}{RT_0^2}\right) = \underbrace{K \dot{\varepsilon}^m \exp(-\delta T_0)}_{\sigma(T_0)} \cdot (-\delta)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{mQ}{RT_0^2}$$

De l'équation (1) on peut extraire la valeur de K

$$K = A \exp\left(\frac{2mQ}{RT_0}\right)$$

On utilise maintenant la forme simplifiée de la loi de comportement qui n'est valable que localement et qui s'écrit :

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \exp(-\delta T) \text{ dans laquelle } K, m \text{ et } \delta \text{ sont des constantes.}$$

Au cours d'une déformation $d\varepsilon$, l'échauffement, supposé adiabatique, produit une élévation de la température dT telle que :

$$\sigma d\varepsilon = \rho C dT \Rightarrow \frac{dT}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{\rho C} = \frac{K \dot{\varepsilon}^m}{\rho C} \exp(-\delta T)$$

Maintenant considérons $\dot{\varepsilon}$ constant, ce qui permet d'intégrer cette équation différentielle en $T(\varepsilon)$

$$\Rightarrow \exp(\delta T) dT = \frac{K \dot{\varepsilon}^m}{\rho C} d\varepsilon \Rightarrow \frac{\exp(\delta T)}{\delta} = \frac{K \dot{\varepsilon}^m}{\rho C} \varepsilon + \text{cte}$$

$$\varepsilon = 0 \Rightarrow T = T_0 \quad (\text{température nominale de l'essai})$$

$$\Rightarrow \frac{\exp(\delta T_0)}{\delta} = \text{cte et} \quad \exp(\delta T) = \frac{\delta}{\rho C} K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon + \exp(\delta T_0)$$

ou encore

$$T = \frac{1}{\delta} \ln \left[\frac{\delta}{\rho C} K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon + \exp(\delta T_0) \right]$$

La contrainte mesurée, perturbée par l'échauffement s'écrit alors :

$$\sigma = \frac{K \dot{\varepsilon}^m}{\frac{\delta}{\rho C} K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon + \exp(\delta T_0)} = \frac{K \dot{\varepsilon}^m \exp(-\delta T_0)}{\frac{\delta}{\rho C} K \dot{\varepsilon}^m \exp(-\delta T_0) \varepsilon + 1}$$

$$\text{ou} \quad \sigma = \frac{\sigma_0}{\frac{\delta}{\rho C} \sigma_0 \varepsilon + 1}$$

Dans cette équation σ_0 désigne la contrainte d'écoulement que l'on mesurerait au cours d'un essai en condition isotherme à la température T_0 , Cette équation s'inverse, ce qui donne la contrainte d'écoulement corrigée de l'échauffement. Elle s'écrit alors :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{1 - \frac{\delta}{\rho C} \sigma \varepsilon}$$

A2-2 CALCUL DE LA SENSIBILITE A LA VITESSE CORRIGEE

Nous étudions maintenant la variation du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, résultant de la correction apportée par l'effet d'auto-échauffement sur la contrainte d'écoulement.

m_0 = coefficient de sensibilité à la vitesse corrigée.

$$m_0 = \frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$$

$$\text{et } \ln \sigma_0 = \ln \sigma - \ln \left(1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon\right) \Rightarrow$$

$$m_0 = m - \dot{\epsilon} \frac{-\frac{\delta}{\rho c} \epsilon \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon} = m + \sigma \frac{\frac{\delta}{\rho c} \epsilon m}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon} = m \left(1 + \frac{\frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon}\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{m_0 = \frac{m}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon}}$$

soit $m_0 > m$

A2-3 ETUDE DE LA SENSIBILITE A LA TEMPERATURE CORRIGEE

$$\delta_0 = -\frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial T}$$

$$\Rightarrow \delta_0 = \delta + \frac{-\frac{\delta}{\rho c} \epsilon \frac{\partial \sigma}{\partial T}}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon} = \delta + \sigma \frac{\frac{\delta}{\rho c} \epsilon \delta}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon} = \delta \left(1 + \frac{\frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \epsilon}\right)$$

Soit

$$\delta_0 = \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{\rho c} \sigma \varepsilon}$$

A2- 4 CALCUL DES DIFFERENTES VALEURS CORRIGÉES

A2 - 4 - 1 Calcul de σ_0 :

ρ = masse volumique en kg /m³ C = chaleur spécifique en J / (kg x K)

avec $m = 0,2$

$\rho = 8950 \text{ kg / m}^3$

$Q = 180 \text{ kJ / mol}$

$C = 450 \text{ J / (kg x K)}$ (Laiton à 800°C)

$R = 8,314 \text{ J / (mol x K)}$

$C = 450 \text{ J / (kg xK)}$ (Cuivre à 800°C)

$T = 750 + 273 = 1023 \text{ K}$

soit $C = 420 \text{ J / (kg x K)}$ (extrapolée pour le bronze à 750°C, Centre d'Information du Cuivre)

Calcul de δ

$$\delta = \frac{mQ}{RT_0^2}$$

$$\delta = (0,2 \times 180000) / [(8,314 \times (1023)^2)] = 4,13 \cdot 10^{-3}$$

Calcul de ρC

$$\rho C = 8950 \times 420 = 3,759 \cdot 10^6$$

Calcul de $\frac{\delta}{\rho C} \sigma \varepsilon$ avec $\sigma = 56 \text{ MPa}$ et $\varepsilon = 1$

$$\frac{\delta}{\rho C} \sigma \varepsilon = 0.061$$

Calcul de σ_0 pour le bronze BR-1 par exemple

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{1 - \frac{\delta}{\rho C} \sigma \varepsilon} = \frac{56}{1 - 0,061} = \frac{56}{0,937} = 59,8 \text{ MPa}$$

La correction ainsi apportée sur la valeur de la contrainte d'écoulement, qu'il faut considérer comme étant une borne supérieure, vaut dans cet exemple 6,3%. Les valeurs de m_0 et de δ_0 augmentent dans les mêmes proportions que la contrainte. Si nous tentons maintenant d'évaluer la variation de la température à partir de l'équation (2), nous obtenons un échauffement de 15°C, pour un essai réalisé à 750°C.

En conclusion, il ne semble pas que l'adoucissement relevé sur les courbes contrainte-déformation soit uniquement relié à un phénomène d'auto-échauffement, mais aussi vraisemblablement à un effet métallurgique.

ANNEXE III

Programme de dépouillement
d'un Essai de Compression
depcompl.for

A. Belkebir f B. Bayle ver Janvier 93

Variables utilisées.

```
# forc      : force enregistrée.
# elong1   : déformation relative en % enregistrée.
# time     : temps enregistré.
# def-decal : Déformation en (%) de décalage de la courbe
             : contrainte-déformation.
# Vit_trav : vitesse de traverse en (mm/mn)

# Haut0    : Hauteur initiale de l'éprouvette.
# Haut     : Hauteur à l'instant t de l'éprouvette.
# Diam0    : Diamètre initial de l'éprouvette.
# S0       : section initiale de l'éprouvette.
# frot     : coefficient de frottement .
# mb       : coefficient de sensibilité à la vitesse déterminé à partir de la
             : contrainte nominale sigma_nom corrigée simplement par le
             : frottement,  $mb = (dLn(sigma\_nom)/dLn(eps0))$  .
# mr       : coefficient de sensibilité à la vitesse déterminé à partir de la
             : contrainte rationnelle sigma_rat corrigée et par frottement et
             : par le coefficient mb,  $mr = (dLn(sigma\_rat)/dLn(eps0))$  .
# strai    : déformation rationnelle calculée,  $Ln(H/H0)$ .
# epsp     : vitesse de déformation calculée.
# signomf  : contrainte nominale corrigée seulement par le frottement.
# signomb  : contrainte nominale non corrigée par le frottement.
# strssf   : contrainte rationnelle corrigée seulement par le frottement.
# strssc   : contrainte rationnelle corrigée et par le frottement et par
             : le coefficient de sensibilité à la vitesse.
# strssb   : contrainte rationnelle non corrigée ni par le frottement ni par
             : le coefficient de sensibilité à la vitesse.
# strssm   : contrainte rationnelle corrigée par le coefficient de sensibilité
             : à la vitesse.
```

Données principales.

Hauteur initiale des Eprouvettes (mm)	Haut0
Diamètre Initial des Eprouvettes (mm)	Diam0
Coefficient de frottement	frot
Nombre de vitesses de traverse	total_vit
Vitesse de traverse (mm/mn)	Vit_trav

Fichier source: (Force ,Déformation, temps)
 Déformation en (%) de décalage de la courbe def_decal

STRUCTURE DES FICHIERS DONNEES

***> Fichier des données: extention .PAR

constantes

AUTO = ?
 IAMO = ?
 PROT = ?
 DEFMAX = %?
 DEFPAS = %?

DATA_SRCE

TOTAL_VIT = N
 FILES_SCE(1) = '1er fichier '
 FILES_SCE(2) = '2eme fichier '
 FILES_SCE(3) = '3eme fichier '

.
 .
 .
 .

FILES_SCE(N) = 'Neme fichier '

VIT_TRAV(1) = ?
 VIT_TRAV(2) = ?
 VIT_TRAV(3) = ?

.
 .
 .
 .

VIT_TRAV(N) = ?

DEF_DECAL(1) = %?
 DEF_DECAL(2) = %?
 DEF_DECAL(3) = %?

.
 .
 .
 .

DEF_DECAL(N) = %?

FILES_RES


```

FILE_MB      = 'coef mb'
FILES_STR(1) = 's1er fichier '
FILES_STR(2) = 's2eme fichier'
FILES_STR(3) = 's2eme fichier'
file_TXT     = 'fichier txt'

```

nom du fichier
données constantes.

```

HAUTO : hauteur initiale en mm.
DIAM0 : diamètre initial en mm.
FROT  : coefficient de frottement.
DEFMAX : Déformation maxi  $e=(H_0-H_f)/H_0$  atteinte pour tous les essais.
DEFPAS : Pas en % de déformation e pour le calcul du coefficient de
sensibilité à la vitesse.

```

données sources.

```

TOTAL_VIT : total des vitesses de traverse utilisées .
FILES_SCE : liste des fichiers sources (Force, déformation, temps).
VIT_TRAV  : liste des vitesses de traverse en mm/s.
DEF_DECAL : liste des déformations en %, de décalage des courbes .

```

fichiers résultats.

```

FILE_MB : nom commun des fichiers d'enregistrement du coefficient
          mc et mr
FILES_STR : liste des fichiers résultats (Contraintes,déformations)
          rationnelles.
file_TXT : Fichier résumé texte du dépouillement.

```

```

HAUTO=?
Diam0=?
frot =?

```

lignes suivantes:

Nom du 1er fichier source (Force,déformation,temps)

```
V(1)      elong0(1)
```

```

.
.
.
.
.

```

Nom du nième fichier source (Force,déformation,temps)

```
V(nv)      elong0(nv)
```

...> Autres données

max: Déformation relative maximale atteinte $(H_0-H_f)/H_0$
et commune à tous les essais.

pas : le Pas d' enregistrement du coefficient m

STRUCTURE DES FICHIERS RESULTATS

.....> Fichier coefficient mb

type : fichier indexé par la lettre B
 contenu: déformation rationnelle; coefficient mb; déformation relative

.....> Fichier Ln(sigma_nom)/Ln(eps0)

type : 10 fichiers indexés de B0 à B9.
 contenu: Ln(sigma_nom); Ln(eps0); ,déform-rat imposée; déforma-rat trouvée

.....> Fichier coefficient mr :

type : fichier indexé par la lettre R
 contenu: déformation rationnelle; coefficient mr; déformation relative

.....> Fichier Ln(sigma_rat)/Ln(eps0)

type : 10 fichiers indexés de R0 à R9.
 contenu: Ln(sigma_rat); Ln(eps0); déform_rat imposée; déform_rat trouvée

fichier Converti: Déformation et Contraintes rationnelles
 strai, strssc, strssb, strssf, strssm

.....> Fichier Résumé du dépouillement:

type : extention *.txt

contenu:

Date

heure

Nom du dit Fichier (*.txt)

Nom du Programme utilisé: *.exe; version mois année

1-Hauteur initiale des Eprouvettes HO
 2-Diamètre Initial des Eprouvettes DO
 3-Coefficient de frottement mf
 4-Coefficient de sensibilité à la vitesse m
 5-Nombre de vitesses de traverse NV
 6-Déformation relative maximale atteinte commune à tous les essais
 7-le Pas d' enregistrement du coefficient m
 8-Nombre de valeurs utilisées ou calcluées du coef m Nm

#-Nom du fichier contenant mb.

#-Nom du fichier contenant mr.

#-tableau de Valeurs des coefficients mb, mr, et des déformations

Déformation	mb	mr
-------------	----	----

- Vitesse de traverse No I en (mm/min)

Fichier (force, déformation, temps)
 # déformation de décalage force/déf
 # Fichier (défor, contraintes) rationnelles

Définition des sousroutines du Programme Principal -----

conver1 : permet de convertir un fichier connaissant la courbe
 $m=f(\text{déformation})$.

coefm : calcul du coefficient mb pour 10 vitesses de traverse au
 maximum.

coefmr : calcul du coefficient mr après correction de la contrainte.

converfile: conversion des fichiers sources.

convercomp: gère la conversion de plusieurs fichiers sources.

Clear : Effacement de l'écran

grapher : permet d'accéder au logiciel grapher

Editeur : permet d'accéder à l'éditeur du DOS 5.0, " EDIT "

ecran : Manipulation d'un écran 25x80

test_nvit : teste le nombre de vitesse de traverse proposé.

coefm_e : Détermination du couple (déformation e; coefficient $m = (Xmc)$)
 pour la correction de la courbe contrainte_déformation suivant
 l'intervalle d'allongement relatif.

lectfile : lecture du fichier (*.par) englobant toutes les données .

menul : propose un menu.

indexfile : permet d'ouvrir 10 fichiers avec un nom commun choisi et de
 et de les numéroter par un indice alphanumérique .

datafile : ouvrir un fichier résumé des données d'un dépouillement.

linearliss: permet de lisser une courbe par une droite de régression
 avec N points expérimentaux.

debug

```
initialisevar.for 22 décembre 92
```

initialise les variables avant lecture

```
subroutine initialisevar
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
parameter(nvt=10)
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+ Def_decal(nvt),NT(NVT)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt

character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
```

initialisation des variables

```
haut0      =0.
dima0      =0.
frot       =0.
total_vit  =0
```

do 10 i=1,nvt

```
vit_trav(I) =0.
files_sce(I) = ' '
Files_str(I) = ' '
def_decal(I) =0.
NT(I)       =0
```

```
file_mb = ' '
file_txt = ' '
```

```
return
end
```

```
datacomp.for 22 décembre 92
```

permet de lire des données stockés dans un fichier ou par écran

```
subroutine datacomp(dataerr,nv)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
parameter(l=8)
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
character txt*50, dataerr*1,TXTT*13
call initialisevar
if(txtt(7:7).NE.'K') then
TXT(1) = 'désolé!!! Vous ne pouvez pas utiliser le programme'
CALL ECRAN(15,15,1,TXT,37,1,41,1,5,1,1,0,40)
stop
endif
```

```
TXT(1) = '
TXT(2) = '
TXT(3) = '
TXT(4) = '
TXT(5) = '
          lecture des Données:
          f = par fichier ( par défaut )
'
```



```

TXT(6) = '      e = par écran      '
TXT(7) = '
TXT(8) = '
IL=5
IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,8,TXT,36,2,43,1,0,1,1,0,40)
TXT(1) = '      Votre Réponse, puis valider par Return?:      '
CALL ECRAN(IL+1,15,1,TXT,37,1,42,1,0,0,1,0,40)
  READ(*,'(A)')REP2
  if ( (rep2.eq.'e').or.(rep2.eq.'E') ) then

```

==> lecture des données par ecran

```
call lectscrdata(nv)
```

```
else
```

==> lecture des données par fichier

```

call lectfildata(dataerr)
endif
if ((dataerr.eq.'x').or.(dataerr.eq.'X')) return
call affdata(dataerr)
return
end

```

lectfildata.for 10 décembre 92

permet de lire des données stoqués dans un fichier

```

subroutine lectfildata(dataerr)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
parameter(nvt=10)
parameter(l=8)
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
common/divers/      fildata,filerr
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+                   Def_decal(nvt),NT(NVT)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt

character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
character*12 fildata,dataerr*1
character txt*50,TXTT*13

namelist /CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
namelist /DATA_srce/  total_vit,Files_sce,Vit_trav,Def_decal
namelist /Files_res/  file_mb,Files_str,file_txt

00  TXT(1) = '
TXT(2) = '      Données:  par lecture d un fichier      '
TXT(3) = '
IL=5
IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,3,TXT,37,1,41,2,0,1,1,0,40)
  WRITE(*,'(15X,A,$)')
+   'NOM du fichier à Lire :( Nom.par ou X pour annuler) ?'

```



```

READ(*,'(A)') fildata
if ((fildata.eq.'X').or.(fildata.eq.'x')) then
  dataerr='X'
  return
endif
call TESTFILE(fildata,filerr)
if(filerr.eq.1) goto 100
OPEN(13,FILE=fildata,STATUS='unknown')
rewind(13)
read(13,CONSTANTES)
read(13,DATA_SRCE )
NV=INT4(total_vit)
do 10 i=1,nv
  call TESTFILE(files_sce(I),err2)
  if( err2.eq.1) then
    dataerr='X'
    return
  endif
  continue
read(13,FILES_RES )

rewind(13)
close(13)
return
end

```

lectsrcdata.for 22 décembre 92

permet de lire les données par dialogue ecran

```

subroutine lectsrcdata(nv)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
parameter(nvt=10)
parameter(l=8)
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+ Def_decal(nvt),NT(NVT)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt

character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
character txt*50,tx1*30,TXTT*13

```

==> lecture des données par ecran

```

call clear(37,44)
WRITE(*,'(10X,A,$)')
+ 'Hauteur initiale des Eprouvettes HAUTO=?'
  READ(*,*)HAUTO
WRITE(*,'(10X,A,$)')
+ 'Diamètre Initial des Eprouvettes DIAMO=?'
  READ(*,*)Diam0
WRITE(*,'(10X,A,$)')
+ 'Coefficient de frottement frot=?'
  READ(*,*)frot
WRITE(*,'(10X,A,$)')
+ 'Nombre de vitesses de traverse NV=?'

```



```
READ(*,*)total_vit
nvtt=int4(total_vit)
```

```
if((nv.eq.1).and.(NVtt.Ne.1)) then
```

```
WRITE(*,'(15X,A,I2)')
```

```
+ 'Nombre de vitesses de traverse choisi NV=',NV
```

```
TXT(1) ='
```

```
TXT(2) ='
```

```
TXT(3) ='
```

```
TXT(4) ='
```

```
TXT(5) ='
```

```

+-----+
|                                     |
|           Vous ne pouvez traiter qu un seul          |
|           Fichier à la fois (NV=1).                 |
|                                     |
+-----+

```

```
IL=3
```

```
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,31,1,47,1,0,0,1,0,40)
```

```
TX1 = '          Nombre incorrect !!!          '
```

```
IL=4
```

```
IC=25
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,1,TX1,31,1,40,1,5,0,1,0,40)
```

```
TXT(1) ='
```

```
          Return pour continuer
```

```
IL=8
```

```
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,37,1,42,1,0,0,1,0,40)
```

```
pause'■'
```

```
call clear(37,44)
```

```
goto 103
```

```
endif
```

```
call clear(32,40)
```

```
do 10 I=1,NVtt
```

```
call clear(37,40)
```

```
TXT(1) ='
```

```
TXT(2) ='
```

```
TXT(3) ='
```

```
TXT(4) ='
```

```

+-----+
|  Données:  Vitesse de traverse;                    |
|  Fichier:  *.dat (Force ,allongement, temps)      |
+-----+

```

```
IL=1
```

```
IC=5
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,34,2,47,2,0,0,1,0,40)
```

```
WRITE(*,'(5X,A,I2,A,$)')
```

```
+ 'Vitesse de traverse No',I,' en (mm/mn)           Vt=?'
```

```
READ(*,*)vit_trav(I)
```

```
WRITE(*,'(5X,A,$)')
```

```
+ 'fichier source à Lire :( Nom.dat ou X pour annuler) ?'
```

```
READ(*,'(A)')files_sce(I)
```

```
if((files_sce(I).EQ.'X').or.(files_sce(I).EQ.'x')) return
```

```
call TESTFILE(files_sce(I),err2)
```

```
if( err2.eq.1) goto 105
```

```
WRITE(*,'(5X,A,$)')
```

```
+ 'Fichier converti à créer (défor,contraintes) '//
```

```
+ ' Si non return: '
```

```
read(*,'(a,$)') FILES_str(I)
```

```
WRITE(*,'(5X,A,$)')
```

```
+ 'Déformation de décalage de la courbe force/défor (%) '//
```

```
+ 'def_decal=?'
```

```
READ(*,*)def_decal(I)
```

```
CONTINUE
```

```
NVtt=INT4(total_vit)
```

```
if( nvtt-1) 106,106,102
```

```
TXT(1) ='
```

```

+-----+

```



```

TXT(2) = '      fichier pour enregistrer le paramètre      '
TXT(3) = '      m = dLn(signom)/dLn(eps0) = F(Déformation);  '
TXT(4) = '      maximum 10 caractères y compris le .dat ?  '
TXT(5) = '      '
      IL=8
      IC=5
CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,37,1,42,1,0,1,1,0,40)
      WRITE(*,'(/5X,A,$)')
+      'NOM du fichier à créer:( Nom.dat ): ?'
      READ(*,'(A)')file_mb
      LC=LEN_trim(file_mb)-4
      If(LC-7)104,102,102

04      WRITE(*,'(5X,A,$)')
+      'Fréquence en % de déformation pour l enregistrement '//
+      'de m: defpas=?'
      READ(*,*)defpas
06      WRITE(*,'(5X,A,$)')
+      'Déformation maxi 100x(H0-Hf)/H0 '//
+      'réalisée (toute vitesse) defmax en % =?'
      READ(*,*)defmax
      WRITE(*,'(5X,A,$)')
+      'Fichier texte résumé du dépouillemet; Si non return: '
      read(*,'(a,$)') FILE_txt
      TXT(1) = '      Return pour continuer      '
      IL=23
      IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,37,1,42,1,0,0,1,0,40)
      pause' '
      return
      end

subroutine charnp(moulay)
character moulay*13
moulay(8:13)=char(69)//char(66)//char(73)//char(82)
return
end

```

affdata.for 10 décembre 92

permet d'afficher les données lues par fichier ou ecran

```

subroutine affdata(dataerr)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
parameter(nvt=10)
parameter(l=8)
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+      Def_decal(nvt),NT(NVT)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt

character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
character txt*50,TXTT*13
character dataerr*1

```



```

      nv = int( total_vit)
      call clear(37,44)
      WRITE(*,'(20X,A/)')
+ 'Vérification de la lecture des données'
      WRITE(*,'(10X,A,E9.3)')
+ '1-Hauteur initiale des Eprouvettes           :',HAUTO
      WRITE(*,'(10X,A,E9.3)')
+ '2-Diamètre Initial des Eprouvettes           :',DIAMO
      WRITE(*,'(10X,A,E9.3)')
+ '3-Coefficient de frottement                   :',frot
      WRITE(*,'(10X,A,I2)')
+ '4-Nombre de vitesses de traverse choisi       :',nv
      WRITE(*,'(10X,2A/)')
+ '5 Fichier texte résumé du dépouillemet       : ',FILE_txt
      if(nv-1) 2,2,1
1      WRITE(*,'(10X,A,E9.3)')
+ '6-Déformation maxi en % atteinte (tout vitesse) :',defmax
      WRITE(*,'(10X,A,E9.3)')
+ '7-Fréquence % de Déformation pour le calcul de m: ',defpas
      WRITE(*,'(10X,2A/)')
+ '8 Fichier coefficient mb                       : ',FILE_mb
      J=8
      goto 3
2      J=5
3      do 10 i=1,nv
      if (i.eq.3) then
      pause'Suite , taper return '
      call clear(37,43)
      endif

      WRITE(*,'(9X,I2,A,I2,A,E9.3)')
+ I+J,'-Vitesse de traverse No',I,' en (mm/mn) : ',
+ Vit_trav(I)
      WRITE(*,'(10X,2A)')
+ '# Fichier source (force,déformation,temps) : ',
+ FILES_sce(I)
      WRITE(*,'(10X,2A)')
+ '# Fichier converti(déformation,contraintes) : ',
+ FILES_str(I)
      WRITE(*,'(10X,A,E9.3/)')
+ '# déformation % de décalage force/déf : ',
+ def_decal(I)

      TXT(1) =' Return pour continuer ou X pour annuler '
      IL=23
      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,37,1,42,1,0,0,1,0,40)
      READ(*,'(A,$)') dataerr
      return
      end

```

SUBROUTINE TESTFILE(NOM,err)

permet de tester l'ouverture d'un nouveau ou d'un ancien fichier

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Y)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)

```



```

IMPLICIT LOGICAL(z)
CHARACTER*12 NOM, TXT*50(1)
err=0
test d'existence
INQUIRE(FILE=NOM,EXIST=ZEXIST)
IF(.NOT.ZEXIST)THEN
err=1
WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7),CHAR(7)
TXT(1) =NOM//': fichier non trouvé !!!'
CALL ECRAN(23,15,1,TXT,37,2,41,2,5,1,1,0,40)
PAUSE'                               Enter Pour Continuer'
RETURN
ELSE
err=0
return
ENDIF
END

```

fichier coefmb.for ; version 20 novembre 92

```

=====
*****
*                programme Coefmb.for                *
*      calcule le coefficient de sensibilité          *
*      à la vitesse de déformation à partir          *
*      de plusieurs essais effectués                  *
*      à différentes vitesses de traverse             *
*                                                    *
*****
=====

```

debug

```

subroutine coefmb(errnv)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
PARAMETER(NN=200)
PARAMETER(l=8)
parameter(NVt=10)
PARAMETER (PI=3.141592654)

common/TEXTE/TXT(1),TXTT
COMMON/VALCOEFM_e/Xm(10),ec(10),NXm
COMMON/VALCOEFMR_e/Xmr(10),epsc(10)
COMMON/FILM_e/FILME(11),NOM2(2)
COMMON/tab1/elong(NN),var(NN),dlsignom(NN),dlepsp(NN)
COMMON/tab2/Ylsignom(NVT),Xlepsp(NVT)
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+ Def_decal(nvt),NT(NVT)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt

character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
CHARACTER*12 NOM1,NOM2,FILME
CHARACTER TXT*50,TXTT*13
character*1 rep,rep2

```

```

000 TXT(1) = '
      Détermination du paramètre m
      pour la correction de la contrainte.
      '

```



```
TXT(4) = ' | 10 vitesses de traverse au maximum. | '
TXT(5) = ' | _____ | '
TXT(6) = ' | _____ | '

```

```
IL=8
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,6,TXT,34,2,47,1,0,1,1,0,40)
TXT(1) = ' Return pour continuer ou X pour annuler '
```

```
IL=14
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,30,2,42,2,0,0,1,0,40)
```

```
READ(*,'(A)')REP2
```

```
if ( rep2.eq.'x').or.(rep2.eq.'X' ) return
```

```
nv = INT4( total_vit)
```

```
call test_nvit(Nv,errnv)
```

```
if(errnv.eq.1) then
```

```
return
```

```
endif
```

```
NOM2(1)=file_mb
```

```
NOM2(2)=file_mb
```

```
S0=(PI*Diam0**2)/4d0
```

```
DO 15 I=1,NV
```

```
OPEN(I,FILE=files_sce(I),STATUS='OLD',ERR=91)
```

```
NT(I) =0
```

```
TXT(1) = ' | _____ | '
TXT(2) = ' | Voulez-vous enregistrer les valeurs | '
TXT(3) = ' | [ Ln(eps0); Ln(sigma_nomi); déformation] | '
TXT(4) = ' | _____ (O/N):? _____ | '
TXT(5) = ' | _____ | '
TXT(6) = ' | _____ | '

```

```
IL=8
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,6,TXT,37,1,43,1,0,1,1,0,40)
```

```
READ(*,'(A)')REP
```

```
TXT(2) = ' | mb = dLn(signom)/dLn(eps0) = F[(H0-Hf)/H0] | '
TXT(3) = ' | calcul en Cours du paramètre mb | '
TXT(4) = ' | _____ | '

```

```
IL=2
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,37,1,44,1,0,1,1,0,40)
```

```
====> début du calcul de m = (Xm)
```

```
NXm=NINT(defmax/defpas)
```

```
write(*,'(10X,a,I4)')
```

```
+ 'nbre de valeurs du Coefficient m : NXm=',NXm
```

```
pause
```

```
====> Indexation par la lettre b du fichier:
```

```
coefficient m, déformation eps
```

```
iunit2=12
```

```
call indexfile(NOM2(1),FILME,Iunit2,11,66)
```

```
do 11 I=1,NXm
```

```
filme(I)=' non crée '
```

```
if ( (rep.eq.'O').or.(rep.eq.'o') ) then
```

```
====> Indexation par 0, 1, 2, ... ,9 des fichiers
```

```
Ln(eps),Ln(SIGMA_nominale)
```



```

    iunit1=11
    call indexfile(NOM2(1),FILME,iunit1,I,66)
    endif
    e=I*defpas/100d0
    ec(I) = e
    epsc(I)= -dlog(1.-e)
initialisation des variables
do 12 jj=1,NV
do 13 II=1,NN
    var(II)      =0.
    elong(II)    =0.
    dlsignom(II)=0.
13    dlefsp(II) =0.
    J=0
    K=0
31    READ(JJ,*,END=191,ERR=81) Forc1,xelong1,time1
        elong1= vit_trav(JJ)*time1/(HAUTO*60d0)
    If(Xelong1.GE.def_decal(JJ)) then
        xelong1 = (xelong1-def_decal(JJ))/100d0
        elong1 = xelong1

        IF(elong1) 1,1,2
        eps1=-DLOG(1.- e)

2        if( DABS((e-elong1)/elong1).LE.1E-1) then
            J=J+1
            var(J)      =DABS(e-elong1)/elong1
            elong(j)    =elong1
==> correction de la contrainte nominale
        par le coefficient frot (frottement)

            H          =HAUTO-vit_trav(JJ)*time1/60d0
            H          =HAUTO*(1d0 - xelong1)
            Z1         =(frot/(3d0*DSQRT(3d0)))*Diam0
            Z2         =DSQRT(HAUTO)*H**(-1.5)
            ZZ         =1d0+Z1*Z2
            dlsignom(J)= DLOG(forc1/(S0*ZZ))
            dlefsp(J)  = DLOG(vit_trav(JJ)/(HAUTO*60d0))
        endif
    endif
    NT(JJ)=NT(JJ)+1
1    GOTO 31
191  REWIND (JJ)
    call MINIM(J,var,varmin,K)
    Xlefsp(JJ) =dlefsp(K)
    Ylsignom(JJ)=dlsignom(K)

    if ( (rep.eq.'0').or.(rep.eq.'o') ) then
        write(11,'(1x,4(E14.6,2x))')
+    dlefsp(K),dlsignom(K),-DLOG(1.-elong(K)),-dlog(1-e)
    endif
2    continue
Lissage des courbes [Ln(eps),Ln(signom)] par une droite de regression
    call linearliss(Xlefsp,Ylsignom,nv,A0,XM(I))
    write(12,'(1x,4(E14.6,2x))')
+    -dlog(1-elong(K)),XM(I),elong(k)

    WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7)
    TXT(2) =' || Lissage par une droite de regression; || '
    TXT(3) =' || Valeur de m pour 1 allongement relatif: || '

```



```

      IL=8
      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,37,2,45,1,0,0,1,0,40)
      write(*,'(20X,a,e9.3)')
+   'Allongement relatif [(H0-H)/H0]=' ,e
      write(*,'(20X,a,e9.3)')
+   'Coefficient de sensibilité : mb=' ,Xm(I)
      write(*,'(20X,2a)')
+   'Fichier:(déformation, Coef m; e): ',filme(11)
1   write(*,'(20X,2a)')
+   'Fichier: [Ln(signom),Ln(eps0)] : ',FILME(I)
      do 14 j=1,nv
14  REWIND (J)
      close(J)
      close(Iunit1)
      close(Iunit2)
      WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7)
      TXT(2) = ' || m = dLn(signom)/dLn(eps0) = F[(H-Hf)/H0] || '
      TXT(3) = ' || fin du calcul du paramètre m || '
      IL=17
      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,31,2,47,2,0,0,1,0,40)
      WRITE(3,'(15X,A,2x,f7.2)') 'coefficient moyen calculé m=' ,Xmmoy
      TXT(1) = ' Return pour continuer '
      IL=24
      IC=15
      CALL ECRAN(IL+1,IC,1,TXT,37,1,43,1,0,0,1,0,40)
      pause ' '
      call delay( INT2( 300 ) )
      call clear(37,40)
      NOM2(1)=filme(11)
01   return
01   NOM1=files_sce(I)
      CALL ERRLECFILE(NOM1)
      call clear(37,40)
      return
31   NOM1=files_sce(JJ)
      NT=NT(JJ)
      goto 97
97   WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7),CHAR(7)
      TXT(1)=' Anomalie de lecture du fichier : '
      CALL ECRAN(10,IC,1,TXT,37,1,41,2,1,0,1,0,40)
      CALL ECRAN(10,53,1,NOM1,32,1,44,2,5,0,1,0,40)
      TXT(1) = ' Ligne No: '
      CALL ECRAN(11,IC,1,TXT,34,2,47,2,1,0,1,0,40)
      write(*,'(48X,I3)')NT
      call delay( INT2( 400 ) )
      call clear(37,40)
      return
      END

```

```

subroutine test_nvrit(Nv,err)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
  PARAMETER(l=8)
  common/TEXTE/TXT(1),TXTT
  CHARACTER TXT*50,TXTT*13
  CHARACTER TX1*30
  err=0

```



```

    if((nv.le.1).or.(nv.gt.10)) then
      err=1
      call clear(37,44)
      WRITE(*,'(15X,A,I2)')
+ 'Nombre de vitesses de traverse choisi NV=',NV
      TXT(1) = '
      TXT(2) = '
      TXT(3) = '
      TXT(4) = '
      TXT(5) = '
      IL=3
      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,31,1,47,1,0,0,1,0,40)
      TX1 = '
      IL=4
      IC=25
      CALL ECRAN(IL,IC,1,TX1,31,1,40,1,5,0,1,0,40)
      TXT(1) = '
      IL=8
      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,37,1,42,1,0,0,1,0,40)
      pause'■'
      call clear(37,44)
      endif
      return
    end

```

Le nombre total des vitesses de traverse;
doit être compris entre 2 et 10

subroutine linearliss(X,Y,N,A0,A1)

permet de lisser une courbe par une droite de régression
avec N points expérimentaux

(X,Y): tableaux des points expérimentaux.

N : total des points expérimentaux.

Xm : moyenne des X

Xm2 : moyenne des X**2

Ym : moyenne des Y

Ym2 : moyenne des Y**2

XYm : moyenne des produits Xi*Yi

la droite est $g(x) = A0 + A1 * x$

implicit real*8(a-h,o-z)

implicit integer*4(i-n)

dimension X(*),Y(*)

A0=0d0

A1=0d0

Xm = 0d0

Ym = 0d0

Xm2 = 0d0

Ym2 = 0d0

XYm = 0d0

do 10 I=1,N

Xm = Xm+X(I)

Ym = Ym+Y(I)

Xm2 = Xm2+X(I)**2

Ym2 = Ym2+Y(I)**2

XYm = XYm+X(I)*Y(I)

Xm = Xm/N

Ym = Ym/N

Xm2 = Xm2/N

Ym2 = Ym2/N

XYm = XYm/N


```

A0=(Ym*Xm2-Xm*XYm)/(Xm2-Xm*Xm)
A1=(XYm-Xm*Ym)/(Xm2-Xm*Xm)
return
end

```

A. Belkebir

Fichier indexfile.for; version juillet 92

```

subroutine indexfile(NOM1,FILME,Iunit,I,I3)

```

permet d'ouvrir 10 fichiers avec un nom commun choisi (NOM1) et les indexer de 0 à 9 .

NOM1 : Nom commun des fichiers à ouvrir.

IUNIT: unité choisie pour ouvrir les 10 fichiers(1 à 9).

I : indice ou pas d'incrémentatation des numéros des fichiers(=1).

I2 : indice en ascii d'incrémentatation des fichiers(=47,48, ...).

I3 : indice en ascii du type du fichiers(=R ou M).

rep : permet d'éviter l'écrasement d'un ancien fichier qui existe déjà sur le répertoire courant.

```

CHARACTER*12 NOM1,FILME(11)

```

```

I2=47

```

```

if(I-11) 5,4,4

```

```

I2=I2+I+19

```

```

goto 6

```

```

I2=I2+I

```

```

LC=LEN_trim(NOM1)-4

```

```

If(LC-6)1,2,2

```

```

FILME(I)=NOM1(1:6)//char(I3)//char(I2)//'.dat'

```

```

goto 3

```

```

FILME(I)=NOM1(1:LC)//char(I3)//char(I2)//'.dat'

```

```

OPEN(IUNIT,FILE= FILME(I),STATUS='unknown',ERR=99)

```

```

return

```

```

end

```

A. Belkebir

Fichier convercomp.for; version juin 92

```

*****
* subroutine convercomp.for
*****

```

```

SUBROUTINE CONVERCOMP(rep1)

```

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

```

```

IMPLICIT INTEGER*4(I-N)

```

```

PARAMETER(NN=200)

```

```

PARAMETER(l=8)

```

```

PARAMETER(Nvt=10)

```

```

common/TEXTE/TXT(1),TXTT

```

```

common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas

```

```

common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+ Def_decal(nvt),NT(nvt)

```

```

common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt

```

```

character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt

```

```

CHARACTER TXT*50,TXTT*13

```

```

CHARACTER*1 rep1

```

```

TXT(1) = '

```

```

TXT(2) = ' Conversion des fichiers sources

```

```

TXT(3) = ' (Force, déformation, temps)

```

```

TXT(3) = ' _____ en _____

```



```

TXT(4) = ' ( Déformation, Contraintes) rationnelles '
TXT(5) = '
  IL=1
  IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,37,1,43,2,0,1,1,0,40)

```

```

TXT(1) = '
TXT(2) = ' Correction de la contrainte avec
TXT(3) = ' les mêmes valeurs du paramètre m: O/N
TXT(4) = '
  IL=IL+1
  IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,33,1,44,2,0,0,1,0,40)
  READ(*,'(A)')REPL
  if ( (repl.eq.'O').or.(repl.eq.'o') ) then

```

```

# files_sce(J): nom du fichier à convertir
# Vit_trav(J) : vitesse de traverse
# J : indice de la vitesse ou du fichier

```

```

  nv = INT4( total_vit)
do 10 J=1,nv
  call converfile(J)
continue
else
call clear(37,40)
  RETURN
endif
end

```

ebug

```

A. Belkebir
Fichier converfile.for; version juillet 92

```

```

=====
*****
*          Soubroutine Converfile          *
*      ( Force, allongement, temps)      *
*              en                          *
*          Contrainte, déformation        *
*              rationnelles                *
*          -----                          *
*****
=====

```

```

SUBROUTINE CONVERfile(I)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
PARAMETER(NN=200)
PARAMETER(Nvt=10)
PARAMETER (PI=3.141592654)
PARAMETER(l=8)
COMMON/VALCOEFM_e/Xm(10),ec(10),NXm
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+ Def_decal(nvt),NT(nvt)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt
character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
CHARACTER TXT*50,TXTT*13

```



```

CHARACTER tx1*32,TXT2*65(2)
I          : indice de vitesse ou du fichier source
Files_sce(I) : référence ou nom du fichier à convertir
Vit_trav(I) : vitesse de traverse
def_decal(I) : Déformation de décalage de la courbe force/défor (%)
==> lecture des données

00      OPEN(1,FILE=Files_sce(I),STATUS='OLD',ERR=98)
      TXT(1) = '
      TXT(2) = '
      TXT(3) = '
      TXT(4) = '
      TXT(5) = '
      Conversion en Courbe rationnelle
      ( Déformation,Contraintes) rationnelles
==> ouverture des fichiers résultats
      fichier: déformation,contraintes rationnelles
      TXT2(1)='* Référence Fichier source :(Force,allong,temps); '//
+ Files_sce(I)
      TXT2(2)='* Fichier à CONVERTIR en :(déform,contraintes); '//
+ 'rationnelles'
      IL=5
      IC=15
      IUNIT=2
      call SAUVER3(files_str(I),IUNIT,IL,IC,1,TXT2)
      TXT(1)='* Référence Fichier source :(Force,allong,temps)'
      CALL ECRAN( 2, 5,1,TXT(1),37,1,42,1,1,1,0,40)
      CALL ECRAN( 2,56,1,Files_sce(I),37,1,42,1,1,0,1,0,40)
      TXT(1)='* Référence Fichier converti :(déform,contraintes)'
      CALL ECRAN( 3, 5,1,TXT(1),33,1,44,1,1,0,1,0,40)
      CALL ECRAN( 3,56,1,files_str(I),37,1,44,1,1,0,1,0,40)
      TXT(1) = '
      TXT(4) = '
      TXT(5) = '
      ( Déformation,Contraintes) rationnelles
      TX1 = '
      Conversion en Cours
      IL=10
      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,35,2,47,2,0,0,1,0,40)

      IL=11
      IC=24
      CALL ECRAN(IL,IC,1,TX1,34,1,40,1,5,0,1,0,40)

==> début de la conversion

      Variables utilisées.

# forc      : force enregistrée.
# elong1    : déformation relative en % enregistrée.
# time      : temps enregistré.
# Vit_trav  : vitesse de traverse
# Haut0     : Hauteur initiale de l'éprouvette.
# H         : Hauteur à l'instant t de l'éprouvette.
# Diam0     : Diametre initial de l'éprouvette.
# S0        : section initiale de l'éprouvette.
# frot      : coefficient de frottement.
# xmc       : coefficient de sensibilité à la vitesse.
# strai     : déformation rationnelle calculée.
# epsp      : vitesse de déformation calculée.
# signomf   : contrainte nominale corrigée seulement par le frottement.
# signomb   : contrainte nominale non corrigée par le frottement.

```



```

# strssf : contrainte rationnelle corrigée seulement par le frottement.
# strssc : contrainte rationnelle corrigée et par le frottement et par
           le coefficient de sensibilité à la vitesse.
# strssb : contrainte rationnelle non corrigée ni par le frottement ni par
           le coefficient de sensibilité à la vitesse.
# strssm : contrainte rationnelle corrigée par le coefficient de sensibilité
           à la vitesse.

```

```

fichier entrée: forc,elong1,time
fichier sortie: strai,strssc,strssb,strssf,strssm.

```

```

S0=(PI*Diam0**2)/4d0
REWIND (1)
NT=0
30 READ(1,*,END=99,ERR=97) forc,elong1,time
   NT=NT+1
   If(elong1.GE.def_decal(I)) then
     elong1 = (elong1-def_decal(I))/100d0
     Signomb = forc/(S0)
     Strssb = forc*(1d0 - elong1)/S0
====> correction de la contrainte rationnelle
       par le coefficient frot(frottement)
         H = Haut0*(1d0 - elong1)
         Z1 = (frot/(3d0*DSQRT(3d0)))*Diam0
         Z2 = DSQRT(Haut0)*H**(-1.5)
         ZZ = 1d0+Z1*Z2
         Signomf = forc/(S0*ZZ)
         Strssf = forc*(1d0 - elong1)/(S0*ZZ)
correction de la contrainte par Xmc=dln(signom)/dln(epsp0)
       call coefm_e( elong1,Xmc )
         Strssc = signomf*(1d0 - elong1)**(Xmc+1d0)
         Strssm = signomb*(1d0 - elong1)**(Xmc+1d0)
         Strai = -DLOG(1d0 - elong1)
         epsp = Vit_trav(I)/(60d0*Haut0*(1d0 - elong1))
         write(2,'(1x,5(E12.4,2x))')
+       strai,strssc,strssb,strssf,strssm
       endif

GOTO 30
99 close(1)
   close(2)
   WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7)
   TX1 = ' Conversion terminée '
   IL=10
   IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,32,1,47,1,0,0,1,0,40)
   IL=11
   IC=24
CALL ECRAN(IL,IC,1,TX1,30,2,42,2,5,0,1,0,40)
   call delay( INT2( 150 ) )
   RETURN
98 CALL ERRLECFILE(Files_sce)
   call clear(37,40)
   GOTO 100

97 WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7),CHAR(7)
   TXT(1)=' Anomalie de lecture du fichier : '
   IL=IL+3
CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,37,1,41,2,1,0,1,0,40)
CALL ECRAN(IL,53,1,Files_sce,32,1,44,2,5,0,1,0,40)

```



```

TXT(1) = '
CALL ECRAN(10,IC,1,TXT,34,2,47,2,1,0,1,0,40)
write(*,'(48X,I3)')NT
call delay( INT2( 400 ) )
call clear(37,40)
GOTO 100
END

```

Ligne No: '

```

A. Belkebir
Fichier coefm_e.for; version juillet 92
subroutine coefm_e(e,Xmc)

```

Détermination du couple (déformation e; coefficient m= (Xmc))
pour la correction de la courbe contrainte_déformation suivant
l'intervalle d'allongement relatif.

====> variables utilisées

```

# e      : déformation relative à la quelle on veut ajuster le coef m
# Xmc    : valeur du coef m pour la déformation e
# ec(10):tableaux représentant l'intervalle de déforamtion pour lequel
le coef m est connu.
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
COMMON/VALCOEFM_e/Xm(10),ec(10),NXm
common/const2/defmax,defpas
N=NXm
do 10 i=1,N
if(I-1)1,1,2
    ecr=0.
    goto 3
    ecr=ec(I-1)
if((e.le.ec(I)).and.(e.Ge.ecr)) then
if(Xm(I).LT.0.) Then
    Xmc=0d0
else
    Xmc=Xm(I)
endif
return
endif
continue
return
end

```

```

A. Belkebir
Fichier sauver3.for; version 3; juillet 92

```

```

*****
*           Soubroutine SAUVER3           *
*****
Propose un menu pour ouvrir un fichier

```

```

NOM  : nom du fichier à créer.
iunit: unité logique .
IL   : numéro de ligne pour affichage à l'écran.
IC   : numéro de colonne pour affichage à l'écran.
isc  : =1; ou 0 servant de test pour effacer l'écran
préalablement.
txt2 : référence du fichier à créer
SUBROUTINE SAUVER3(NOM,IUNIT,ILO,IC,isc,TXT2)
PARAMETER(l=8)

```



```

common/TEXTE/TXT(1),TXTT
Character*(*) TXT2(*), NOM
CHARACTER TXT*50,TXTT*13
CHARACTER REP1*1,REP2*1

```

```

lc=len_trim(nom)
if(lc) 20,20,21
  IL1=ILO
  IC=5

```

```
CALL ECRAN(1,5,1,TXT2(1),37,2,43,2,0,isc,1,0,40)
```

```
CALL ECRAN(2,5,1,TXT2(2),31,2,47,2,5,0 ,1,0,40)
```

```

TXT(1) = '
TXT(2) = '
TXT(3) = '
TXT(4) = '

```

maximum 12 caractères (Nom+extension)
--

```
IL=IL1
```

```
CALL ECRAN(IL,15, 4,TXT,37,2,44,2,0,0,1,0,40)
```

```
TXT(1) = ' Taper Le Nom Du Fichier a Créer: ? '
```

```
IL=IL+1
```

```
CALL ECRAN(IL,15,1,TXT,33,2,47,2,0,0,1,0,40)
```

```
READ(*,'(A)')NOM
```

```
CALL ECRAN(1,5,2,TXT2,37,1,44,2,0,isc,1,0,40)
```

```

TXT(1) = '
TXT(2) = '
TXT(3) = '

```

NOM du Fichier à créer:

```
IL=IL1
```

```
CALL ECRAN(IL,15, 3,TXT,37,1,45,2,1,0,1,0,40)
```

```
IL=IL+1
```

```
CALL ECRAN(IL,50, 1,NOM,34,1,40,2,5,0,1,0,40)
```

```

TXT(1) = '
TXT(2) = '
TXT(3) = '
TXT(4) = '
TXT(5) = '
TXT(6) = '
TXT(7) = '
TXT(8) = '

```

Ce Choix Vous Convient-il ? -----
1 = Non
2 = Oui ou Taper Enter Pour Continuer

```
IL=IL+1
```

```
CALL ECRAN(IL,15,8,TXT,32,1,44,1,0,0,1,0,40)
```

```
TXT(1) = ' Entrer Votre Reponse?: '
```

```
IL=IL+3
```

```
CALL ECRAN(IL,15,1,TXT,32,1,47,1,0,0,1,0,40)
```

```
READ(*,'(A)')REP1
```

```
IF (REP1.EQ.'1') THEN
```

```
CALL CLEAR(37,40)
```

```
GOTO 20
```

```
ENDIF
```

```
OPEN(IUNIT,FILE=NOM,STATUS='new',ERR=99)
```

```
RETURN
```

```
CALL CLEAR(37,40)
```

```
CALL ERROUVFILE(NOM,rep2)
```

```
CALL ECRAN(1,5,1,TXT2(1),37,2,43,2,0,0,1,0,40)
```

```
CALL ECRAN(2,5,1,TXT2(2),31,2,47,2,0,0,1,0,40)
```

```
IF ((REP2.EQ.'y').OR.(REP2.EQ.'Y')) THEN
```

```
OPEN(IUNIT,FILE=NOM,STATUS='UNKNOWN',ERR=99)
```

```
else
```

```
goto 20
```

```
endif
```

```
return
```

```
END
```



```
*****
```

```
*           Soubroutine  MENUm           *
```

```
*****
```

propose un menu de lecture avec en retour en argument la réponse choisie, lecture par ecran; par fichier, ou retour au menu précédent.

```
TXT(2): titre du menu
rep   : réponse choisie
IL    : première ligne  d'affichage à l'ecran
IC    : première colonne d'affichage à l'ecran
```

```
SUBROUTINE MENU(IL,IC,REP)
```

```
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
```

```
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
```

```
PARAMETER(l=8)
```

```
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
```

```
CHARACTER TXT*50,TXTT*13
```

```
CHARACTER REP*1
```

```
00  TXT(1) = ' _____ ' ,
```

```
TXT(3) = ' _____ ' ,
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,3,TXT,33,1,40,2,0,1,1,0,40)
```

```
TXT(1) = ' _____ ' ,
```

```
TXT(2) = ' 1 - Valeur du coefficient m _____ ' ,
```

```
TXT(3) = '      (m=0 Converion sans correction de vitesse) _____ ' ,
```

```
TXT(4) = ' _____ ' ,
```

```
TXT(5) = ' 2 - Lecture d un fichier _____ ' ,
```

```
TXT(6) = ' _____ ' ,
```

```
TXT(7) = ' 3 - Retour au Menu Précédent ou Taper Return _____ ' ,
```

```
TXT(8) = ' _____ ' ,
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,8,TXT,32,2,40,2,0,0,1,0,40)
```

```
TXT(1)= ' _____ Entrer Votre Reponse?: _____ ' ,
```

```
IL=IL+1
```

```
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,1,TXT,31,2,47,2,0,0,1,0,40)
```

```
READ(*,'(A)')REP
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
subroutine READFILME(Xm,ec,NXm,NOM)
```

```
programme permettant de lire le fichier
```

```
Nxm valeurs du coefficient m et de
```

```
l'allongement correspondant
```

```
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
```

```
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
```

```
PARAMETER(l=8)
```

```
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
```

```
dimension Xm(*),ec(*)
```

```
CHARACTER TXT*50,TXTT*13
```

```
CHARACTER NOM*12
```

```
00  WRITE(*,'(/15X,A,$)')
```

```
+   'NOM du fichier à Lire :( Nom.dat):? '
```

```
READ(*,'(A)')NOM
```

```
OPEN(2,FILE=NOM,STATUS='OLD',ERR=98)
```

```
REWIND (2)
```

```
NXm=0
```

```
30  READ(2,*,END=99,ERR=97) XX,YY,ZZ
```

```
NXm=NXm+1
```

```
ec(NXm) =1d0-dexp(-XX)
```



```

      Xm(NXm) =YY
      GOTO 30
99  close(2)
      TXT(1)=' *** Lecture terminée du fichier ***: '
      CALL ECRAN( 7, 5,1,TXT,34,2,47,2,1,0,1,0,40)
      CALL ECRAN( 7,55,1,NOM,33,1,44,2,5,0,1,0,40)
      call delay( INT2( 220 ) )
      RETURN
98  CALL ERRLECFEILE(NOM)
      close(2)
      call clear(37,40)
      GOTO 100
97  WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7),CHAR(7)
      TXT(1)=' Anomalie de lecture du fichier : '
      CALL ECRAN(10,IC,1,TXT,37,1,41,2,1,0,1,0,40)
      CALL ECRAN(10,53,1,NOM,32,1,44,2,5,0,1,0,40)
      TXT(1) = '
      CALL ECRAN(10,IC,1,TXT,34,2,47,2,1,0,1,0,40)
      write(*,'(48X,I3)')NXm
      call delay( INT2( 400 ) )
      close(2)
      call clear(37,40)
      GOTO 100
END

```

Ligne No: '

lebug

A. Belkebir

Fichier conver1.for; version octobre 92

```

*****
*          Soubroutine          *
*          conversion d'un fichier          *
*          ( Force, allongement, temps)    *
*          en                    *
*          (Contrainte, déformation,vitdefor) *
*          connaissant la courbe m=f(déformation) *
*****

```

```

subroutine conver1(dataerr)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
  PARAMETER(l=8)
  PARAMETER(Nvt=10)
  COMMON/VALCOEFM_e/Xm(10),ec(10),NXm
  COMMON/VALCOEFMR_e/Xmr(10),epsc(10)
  COMMON/FILM_e/FILME(11),NOM2(2)
  common/TEXTE/TXT(1),TXTT
  common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
  common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+      Def_decal(nvt),NT(nvt)
  common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt
  character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
  CHARACTER TXT*50,TXTT*13
  CHARACTER*1 rep,NOM2*12,filme*12,dataerr
  NOM2(2)='XXXXX.XX'
  nv=1
  call datacomp(dataerr,nv)

  if ((dataerr.eq.'x').or.(dataerr.eq.'X')) return
  TXT(1) = '
  TXT(2) = ' || Coefficient de sensibilité à la vitesse m : ? || '

```



```

TXT(8) = ' _____ '
IL=2
IC=15
call MENUL(IL,IC,REP)
if (rep.eq.'1') then
  Nxm=1
  WRITE(*,'(10X,A,$)')
+ 'Coefficient de sensibilité à la vitesse          m=?'
  READ(*,*)xm(1)
  ec(1)= defmax
else if (rep.eq.'2') then

TXT(1) = '
TXT(2) = ' Coefficient de sensibilité à la vitesse m : ?
TXT(3) = ' # lecture d un fichier ( déformation, coef m ).
TXT(4) = '
TXT(5) = '          maximum 10 valeurs.
  IL=1
  IC=15
  CALL ECRAN(IL,IC,5,TXT,33,1,44,2,0,1,1,0,40)
lecture d'un fichier existant
  call readFILME(Xm,ec,Nxm,NOM2(1))
  else
    return
  endif
  call converfile(1)
return
end

```

A. Belkebir

Fichier coefmr.for; version juillet 92

```

=====
*****
*          programme Coefmr.for          *
*      calcule le coefficient de sensibilité *
*      à la vitesse de déformation à partir *
*      de plusieurs essais effectués      *
*      à différentes vitesses de traverse *
*      constantes après correction de la  *
*      contrainte (forttement,et sensibilité *
*      la vitesse de déformation)      *
*****
=====

```

```

subroutine coefmr(nv)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
PARAMETER(NN=200)
PARAMETER(NVt=10)
PARAMETER (PI=3.141592654)
PARAMETER(l=8)
common/FILM_e/FILME(11),NOM2(2)
COMMON/VALCOEFMR_e/Xmr(10),epsc(10)
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+ Def_decal(nvt),NT(NVT)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt
character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
COMMON/tab1/eps(NN),var(NN),dlstrss(NN),dlepsp(NN)
COMMON/tab2/Ylstrss(NVT),Xlepsp(NVT)

```



```

common/TEXTE/TXT(1),TXTT
CHARACTER*50 TXT,TXTT*13
CHARACTER*12 NOM1,filme,NOM2,rep*1,rep2
100 TXT(1) = '
      Détermination du paramètre m
      après correction de la contrainte
      pour plusieurs vitesses de compression:?'
      (O/N)
TXT(2) = '
TXT(3) = '
TXT(4) = '
TXT(5) = '
TXT(6) = '
      IL=8
      IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,6,TXT,30,2,42,2,0,1,1,0,40)
      READ(*,'(A)')REP
      if ( (rep.eq.'O').or.(rep.eq.'o') ) then
      TXT(1) = '
      Voulez-vous enregistrer les valeurs
      [ Ln(eps0); Ln(sigma_ration); déformation]
      (O/N):?'
      TXT(2) = '
      TXT(3) = '
      TXT(4) = '
      TXT(5) = '
      TXT(6) = '
      IL=8
      IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,6,TXT,37,1,41,1,0,1,1,0,40)
      READ(*,'(A)')REP2
      call clear(37,44)
      S0=(PI*Diam0**2)/4d0
      NV=INT4(total_vit)
do 10 I=1,NV
      NT(I) =0
      OPEN(I,FILE=files_str(I),STATUS='OLD',ERR=91)

      TXT(2) = ' mr = dLn(sigma_rat)/dLn(eps0)=F(déformation)
      TXT(3) = ' calcul en Cours du paramètre m
      TXT(4) = '
      IL=2
      IC=15
CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,37,1,44,1,0,1,1,0,40)

==> début du calcul de m = (Xmr)
NXmr = total des points (elong,xm) calculés
      NXmr=NINT(defmax/defpas)
==> Indexation par la lettre r du fichier:
      coefficient m, déformation eps

      iunit2=12
      call indexfile(NOM2(2),FILME,Iunit2,11,82)

do 11 I=1,NXmr
      filme(I)=' non crée '
==> Indexation par 0, 1, 2, ... ,9 des fichiers
      Ln(eps),Ln(Sigma)

      if ( (rep2.eq.'O').or.(rep2.eq.'o') ) then
      iunit1=11
      call indexfile(NOM2(2),FILME,iunit1,I,82)
      endif

      e=I*defpas/100d0
      eps1=-DLOG(1.- e)
      epsc(I)=-DLOG(1.- e)

```


initialisation des variables

```
do 12 jj=1,NV
  do 13 II=1,NN
    var(II)      =0.
    eps(II)      =0.
    dlstrss(II) =0.
13    dleppsp(II) =0.
```

```
    J=0
```

```
    K=0
```

```
31    READ(JJ,*,END=191,ERR=81)
+    strai,strssc,strssb,strssf,strssm
    IF(strai) 1,1,2
```

```
2    if( DABS((eps1-strai)/strai).LE.1E-1) then
      J=J+1
      var(J)      =DABS((eps1-strai)/strai)
      eps(j)      =strai
==> attention calcul avec vitesse initiale de déformation
      dlstrss(J) = DLOG(strssc)
      dleppsp(J) = DLOG(Vit_trav(JJ)/(Haut0*60d0))
    endif
```

```
    NT(JJ)=NT(JJ)+1
```

```
1    GOTO 31
```

```
191  REWIND (JJ)
```

==> recherche du mnimum du tableau Var(I) i=1,J

```
call MINIM(J,var,varmin,K)
Xleppsp(JJ) =dleppsp(K)
Ylstrss(JJ)=dlstrss(K)
if ( (rep2.eq.'0').or.(rep2.eq.'o') ) then
  write(iunit1,'(1x,4(E14.6,2x))')
+  dleppsp(K),dlstrss(K),eps(K),eps1
endif
```

```
12  continue
```

Lissage des courbes [Ln(eps),Ln(signom)] par une droite de regression

```
call linearliss(Xleppsp,Ylstrss,nv,A0,XMr(I))
write(iunit2,'(1x,4(E14.6,2x))')
+  eps(k),XMr(I),1.-dexp(-eps(k))
```

```
TXT(2) =' ||           Lissage par une droite de regression           ||'
TXT(3) =' ||  Valeur de m pour la déformation rationnelle: ||'
```

```
  IL=8
```

```
  IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,37,2,45,1,0,0,1,0,40)
```

```
write(*,'(20X,a,e9.3)')
```

```
+ 'Déformation           Ln(H/H0)=' ,eps(k)
```

```
write(*,'(20X,a,e9.3)')
```

```
+ 'Coefficient de sensibilité : mr=' ,XMr(I)
```

```
write(*,'(20X,2a)')
```

```
+ 'Fichier: déformation; Coef m; e): ',filme(11)
```

```
11 write(*,'(20X,2a)')
```

```
+ 'Fichier:[Ln(sigma_rat),Ln(eps0)] : ',FILME(I)
```

```
do 14 j=1,nv
```

```
REWIND (J)
```

```
14 close(J)
```

```
close(iunit1)
```

```
close(iunit2)
```

```
WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7)
```

```
TXT(2) =' ||  mr = dLn(sigma_rat)/dLn(eps0)=F(déformation) ||'
```

```
TXT(3) =' ||           fin du calcul du paramètre mr           ||'
```

```
  IL=17
```



```

      IC=15
      CALL ECRAN(IL,IC,4,TXT,37,1,43,1,0,0,1,0,40)
      TXT(1) = '          Return pour continuer
      IL=22
      IC=15
      CALL ECRAN(IL+1,IC,1,TXT,37,1,43,1,0,0,1,0,40)
      pause'
      call clear(37,40)
      NOM2(2)=filme(11)
      return
1      NOM1=files_str(I)
1      CALL ERRLECFI(LE(NOM1))
      call clear(37,40)
      GOTO 100
1      NOM1=files_str(JJ)
      NT=NT(JJ)
      goto 97
97      WRITE(*,'(1X,A)') CHAR(7),CHAR(7)
      TXT(1)=' Anomalie de lecture du fichier : '
      CALL ECRAN(10,IC,1,TXT,37,1,41,2,1,0,1,0,40)
      CALL ECRAN(10,53,1,NOM1,32,1,44,2,5,0,1,0,40)
      TXT(1) = '
      CALL ECRAN(11,IC,1,TXT,34,2,47,2,1,0,1,0,40)
      write(*,'(48X,I3)')NT
      call delay( INT2( 400 ) )
      call clear(37,40)
      GOTO 100
      else
      NOM2(2)=' Non crée '
      return
      endif
      END

```

Ligne No: '

A. Belkebir
Fichier file_resume.for; version juillet 92

ouvrir un fichier résumé des données d'un dépouillement.

debug

file_resume.for 23 juillet 92

```

subroutine file_resume
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT INTEGER*4(I-N)
PARAMETER(Nvt=10)
PARAMETER(l=8)
common/TEXTE/TXT(1),TXTT
common/divers/      fildata,filerr
COMMON/VALCOEFM_e/Xm(10),ec(10),NXm
COMMON/VALCOEFMR_e/Xmr(10),epsc(10)
COMMON/FILM_e/FILME(11),NOM2(2)
common/CONSTANTES/ Haut0,Diam0,frot,defmax,defpas
common/data_source/ total_vit,Files_sce(nvt),Vit_trav(nvt),
+      Def_decal(nvt),NT(nvt)
common/Files_result/file_mb,Files_str(nvt),file_txt
character*12 FILES_sce,FILES_str,file_mb,file_txt
character*12 FILdata
CHARACTER*50 TXT,TXTT*13
CHARACTER*12 NOM2,FILME,TXT2*65(2)

```



```
CHARACTER*18 cdate,cheure
```

```
nv=int4(total_vit)
```

```
TXT(1) ='
```

```
TXT(2) ='
```

```
TXT(3) ='
```

```
TXT(4) ='
```

```
TXT(5) ='
```

```
TXT(6) ='
```

```
TXT(7) ='
```

```
IL=8
```

```
IC=15
```

```
CALL ECRAN(IL,IC,7,TXT,34,2,47,2,0,1,1,0,40)
```

```
READ(*,'(A)')REP
```

```
IF ((REP.EQ.'o').or.(rep.eq.'O'))THEN
```

```
IUNIT = 1
```

```
IL=5
```

```
IC=15
```

```
ISC=1
```

```
TXT2(1)='*** ouverture du Fichier résumé du depouillement ***: '
```

```
TXT2(2)=' '
```

```
CALL SAUVER3(file_txt,IUNIT,IL,IC,isc,TXT2)
```

```
WRITE(1,'(7(10X,A/))')
```

```
+ /
+ /
+ /
+ /
+ /
+ /
+ /
```

```
Fichier Résumé du dépouillement
des essais de compression à chaud
```

```
cdate ='Date :'
```

```
cheure='Heure :'
```

```
CALL GETDAT(iyr,imon,iday)
```

```
CALL GETTIM( ih, imin, isec, itick0 )
```

```
WRITE(1,'(10X,A,2X,I2.2, 1H/, I2.2, 1H/, I4.2 )')
```

```
+ cdate,iday,imon,iyr
```

```
WRITE(1,'(10X,A,2X,I2.2, 1H:, I2.2, 1H:, I2.2 )')
```

```
+ cheure,ih,imin,isec
```

```
WRITE(1,'(10X,A,2X,A)')
```

```
+ 'Nom du Fichier :',file_txt
```

```
WRITE(1,'(10X,A,2X,A)')
```

```
+ 'Fichier données :',fildata
```

```
WRITE(1,'(10X,A,2X,A/))')
```

```
+ 'Programme utilisé:','depl.exe; version Janvier 93'
```

```
WRITE(1,'(10X,A/))')
```

```
+ '*****'
```

```
WRITE(1,'(10X,A,E9.3/))')
```

```
+ '1-Hauteur initiale des Eprovettes Haut0 =',Haut0
```

```
WRITE(1,'(10X,A,E9.3/))')
```

```
+ '2-Diamètre Initial des Eprovettes Diam0 =',Diam0
```

```
WRITE(1,'(10X,A,E9.3/))')
```

```
+ '3-Coefficient de frottement mf =',frot
```

```
if(nXm-1)4,4,2
```

```
 j=4
```

```
WRITE(1,'(10X,A,E9.3/))')
```

```
+ '4-Coefficient de sensibilité à la vitesse m =',xm(1)
```

```
 goto 3
```

```
WRITE(1,'(10X,A,I2/))')
```

```
+ '5-Nombre de vitesses de traverse NV =',NV
```

```
WRITE(1,'(10X,A,E9.3/))')
```

```
+ '6-Déformation maxi 100*(H0-Hf)/H0 defmax% =',defmax
```

```
WRITE(1,'(10X,A,E9.3/))')
```


BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

S. ANDRIEU

Laboratoire de Recherche des Musées de France, Palais du Louvre
Communication personnelle (1993)

B. ARNAUD

Fonderie et moulage des alliages de cuivre
Techniques de l'ingénieur M 800, (1 -1989)

B. AVITZUR

Forging of Hollow Discs.
Israel Journal of Technology, 2 295 (1964)

B. AVITZUR

Bulge in Hollow Disc Forging
Air Force Materials Laboratory.
Air Force Systems Command
Wright-Patterson Air Force Base, OHIO 45433. AFML-TR-69-261 (1969)

A. BORHAN

Laboratoire de Recherches de Tréfinmétaux
Communication privée (1993).

L. BLAZ , T. SAKAI , et J.J. JONAS

Effect of Initial Grain Size on the Dynamic Recrystallization of Copper.
Meta Sci. 17, 609-616 (1983)

CENTRE D'INFORMATION DU CUIVRE

58 Rue de Lisbonne 75008 Paris
Communication personnelle (1993)

C.C. CHEN et J.E. COYNE

Deformation Characteristics of Ti-6 Al-4V Alloy under Isothermal Forging
Conditions. Metall. Trans. 7A 1931 (1976).

D. DAJNO.

Rhéologie globale et structurale des alliages de Titane
TA6V et BETACEZ dans les domaines $\alpha + \beta$ et β .
Thèse INPG-ENSMSE (1991)

B. DUMANOWSKI

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
Communication personnelle (1993)

J.B. HAWKYARD et W. JOHNSON

An Analysis of the Changes in Geometry of a Short Hollow Cylinder
during Axial Compression
Int. J. Mech. Sci. 9, 163 (1967)

P. KNAUTH

Les origines de l'homme, La découverte du métal, Edition Time Life (1985)

A. KUNOGI

J. Sci. Res. Inst. 50 215 (1956)

A. LEROI - GOURHAN

L'homme et la matière, Albin Michel (1971)

A. LEROI - GOURHAN

Milieux et techniques, Albin Michel (1973)

T.B. MASSALSKI

Binary Alloy Phase Diagrams

American Society for Metals, Metals Park Ohio, USA. (1986)

H.J. Mc QUEEN et J.J. JONAS

Hot Workability Testing Techniques in Metal forming . Interrelation between Theory and Praticce. New-York. Plenum Press Ed. 1971

H.J. McQUEEN et J.J. JONAS

Treatise on Materials Science and Technology, Vol.6 Plastic Deformation of Materials; p. 393

ed. R.J. ARSENAULT, Academic Press, New York (1975)

H.J. Mc QUEEN, O. KNUSTAD, N. RYUM et J.K. SOLBERG

Microstructural Evolution in Al Deformed to Strains of 60 at 600°C
Scripta. Metall., 19 73 (1985)

A.T. MALE et M.G. COCKCROFT

A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation.

J. Inst. Metals, 93 38 (1964)

A. T. MALE et V. DEPIERRE

The Use of the Ring Compression Test for Defining Realistic Metal Processing Parameters.

Air Force Materials Laboratory.

Wright-Patterson Air Force Base, OHIO 45433. AFML-TR-70-129 (1970)

METAL HANDBOOK

9 th Edition, Vol 2, ASM 1979 p 355-356

J. P. MOHEN

Métallurgie Préhistorique. Collection Préhistoire. Masson (1990)

F. MONTHEILLET

Métallurgie et mise en forme. Lois de comportement et évolutions structurales. Techniques de l'ingénieur, 7 M600 (1981).

OUSSOUADI et J.R. KLEPACZKO

Journal de physique IV. Colloque C3.

Supplément au journal de physique III (1991), p 323

PETKOVIC-LUTON

Recovery and Recrystallization in FCC Metals after High Temperature Deformation.

McGill University. Montreal, Canada 1975.

M. PERNOT et F. MONTHEILLET

Article soumis pour publication aux Mémoires et Etudes Scientifiques de la Revue de Métallurgie (1993)

CH. PERDRIX, M.Y. PERRIN et F. MONTHEILLET

Comportement mécanique et évolution structurale de l'aluminium au cours d'une déformation à chaud de grande amplitude

Mém. Stud. Sci. Rev. Metal., 78 309 (1981)

PEARSON

Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals 4, 611 (1964)

T. SAKAI et J.J. JONAS

A Grain Refinement / Grain Coarsening Model for Dynamic Recrystallization. 7th RISO Int. Symp. on Metall. and Mater. Sci.

RISO Nat. Lab., ROSKILDE, Danemark (1986)

J.K. SOLBERG, H.J. Mc QUEEN, N. RYUM et E. NES

Influence of Ultra-High Strains at Elevated Temperatures on the Microstructures of Aluminium. Part I.

Phil.Mag., A60 447 (1989)

H. SUZUKI - S. HASHIZUME - Y. YABUKI

Y. ICHIHARA - S. NAKAJIMA and K. KENMOCHI

Studies of the Flow Stress of Metals and Alloy (1968)