

Métallurgie et emplois du titane

par B. DE GÉLAS,

Société CEZUS (Groupe Pechiney).

Le titane est un composant relativement nouveau pour l'industrie aéronautique puisque sa fabrication à l'échelle industrielle a débuté vers 1950. L'intérêt des alliages de titane réside dans l'association d'une densité ($4,5 \text{ g.cm}^{-3}$) située entre celles du fer (7,9) et de l'aluminium (2,7) à des caractéristiques mécaniques comparables à celles des aciers.

Le titane métal pour l'aéronautique ne représente qu'une fraction des emplois de cet élément : nous situerons donc ce secteur dans une première partie par rapport à l'ensemble de l'industrie du titane. La fabrication des demi-produits implique le recours à des techniques avancées d'élaboration qui seront ensuite évoquées.

L'INDUSTRIE DU TITANE.

Le titane est un élément très répandu dans l'écorce terrestre : neuvième dans l'ordre d'abondance des éléments, il occupe la quatrième place parmi les matériaux métalliques (tableau I). Les réserves mondiales sont actuellement évaluées à environ 240 millions de tonnes de titane métal. Il n'y a en conséquence aucune pénurie prévisible et il ne sera pas nécessaire de mettre en exploitation les gisements de la lune où sa teneur serait de l'ordre de 3 %... Les minerais sont constitués d'ilménite, mélange d'oxydes de fer et de titane, ou bien de rutil ou anatase, variétés d'oxyde de titane TiO_2 .

TABLEAU I

Concentration des éléments métalliques dans l'écorce terrestre :
% en masse

Al	8,1	Zn	0,013
Fe	5,0	Ni	0,008
Mg	2,09	Cu	0,007
Ti	0,44	W	0,007
Mn	0,10	Sr	0,004
Zr	0,022	Co	0,0023
Cr	0,020	Pb	0,0016
		Mo	0,0015

La répartition géographique des réserves minérales recensées est évoquée sur le tableau II dont il ne faut retenir que les ordres de grandeur en raison des incertitudes caractéristiques de ce type de données.

TABLEAU II :
Minerais de titane

	Répartition des réserves (%)	Structure production (%)
Australie	6	30
Canada	13	12
Norvège	10	17
Inde	18	3
USA	5	11
Brésil	38	1
Autres pays à économie de marché	5	14
Pays à économie dirigée	5	12
	100	100

Cette répartition ne correspond d'ailleurs pas à la structure de la production et encore moins à celle des exportations (tableaux III) qui traduisent en fait les facilités d'exploitation de chaque origine. Malgré quelques réserves d'ailleurs faibles, la France importe 100 % de sa consommation.

TABLEAUX III
Minerais de titane

	Production mondiale et exportations en (10 ⁶ t)	
	production totale annuelle	exportations
Ilménite	5	1
Rutile	0,3	0,2

Pays exportateurs (%)		
	Ilménite	Rutile
Australie	43	98
Canada	31	--
Norvège	23	p.m.

Près de 95% de la production de minerais de titane est destinée à l'industrie des pigments. Le dioxyde de titane TiO_2 constitue, en effet, la base colorante blanche universellement utilisée au lieu de l'ancien blanc de zinc beaucoup moins stable. Cette utilisation se répartit entre les fabrications de peintures (environ 50 %), de papier (environ 20 %), de matières plastiques, caoutchouc, céramiques, textiles et encres.

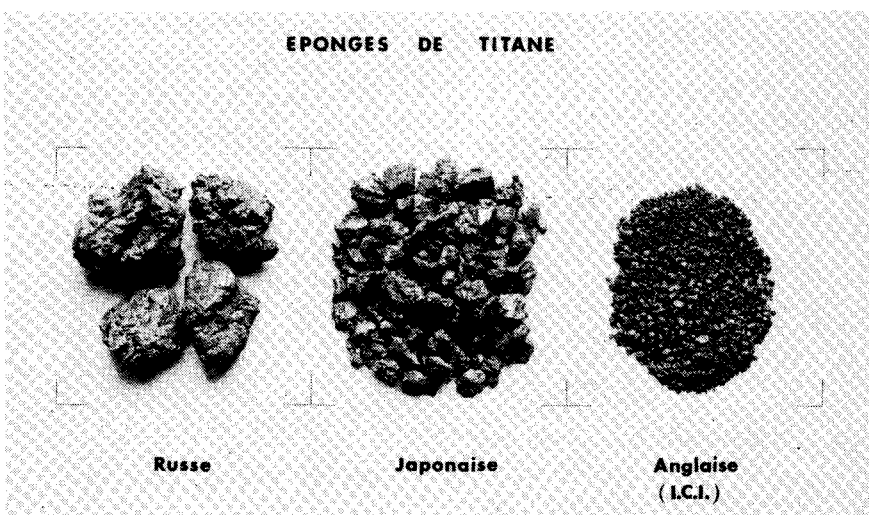
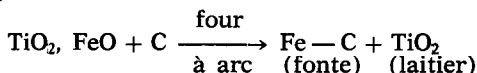


Fig. 1. — Aspect de diverses éponges de titane.

La fabrication de produits ouvrés en titane ou alliages de titane passe par une première étape de métallurgie extractive permettant d'obtenir le titane métal titrant au moins 99,6 % sous une forme communément appelée « éponge de titane » en raison de son aspect poreux (fig. 1). L'extraction du métal passe par

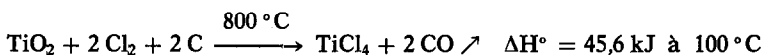
une chloration du minerai suivie d'une réduction du chlorure par le magnésium (« procédé Kroll ») ou le sodium (« procédé Hunter ») complétée par une purification finale. La mise en œuvre de ces opérations est assez complexe et nécessite le recours à la technologie du vide à haute température en raison de la réactivité du titane avec les gaz qui s'opposerait à l'obtention de la pureté requise. Ces difficultés ainsi que celles rencontrées au niveau de la fusion des lingots expliquent le développement relativement tardif de l'industrie du titane par rapport aux autres métaux courants. Nous pouvons aussi noter que la consommation totale d'énergie correspondante est d'environ 30 kWh par kg à comparer à 15 pour l'aluminium et 22 pour le magnésium.

Les bases théoriques de cette métallurgie extractive sont évoquées ci-après. Le point de départ est l'oxyde TiO_2 soit naturel (rutile) soit obtenu à partir d'ilménite (TiO_2 , FeO) par voie ignée par exemple :



1. Chloration.

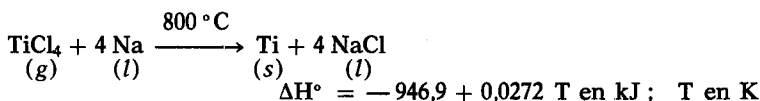
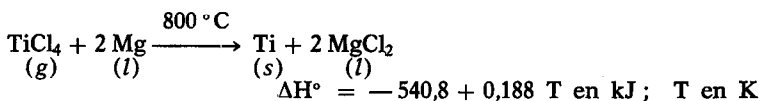
L'oxyde de titane est un composé très stable (enthalpie standard de formation env. $830 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) et la réduction à l'état métallique ne peut être obtenue par une opération directe. Il est nécessaire de passer par l'intermédiaire du chlorure (« chloration ») :



L'opération doit s'effectuer sous vide ou sous atmosphère inerte. Le tétrachlorure de titane obtenu est un liquide dont le point d'ébullition est à 136°C . On sépare les éléments étrangers (initialement contenus dans le minerai) à l'état de chlorures par distillation fractionnée.

2. Réduction et purification.

La réduction peut s'opérer à l'aide de l'une des deux réactions suivantes :



Le chlorure obtenu, étant plus dense que le titane à la température de la réaction, se rassemble au fond de l'enceinte réactionnelle. Cependant, le titane contient une teneur importante en chlorure qu'il est nécessaire d'éliminer. Cette opération s'effectue soit par distillation sous vide du chlorure (vers 1 000 °C), soit par lavage en solution acide. Le produit résiduel est broyé en grains d'éponge de titane (fig. 1).

Pour clarifier les mécanismes mis en jeu, nous avons reporté sur les tableaux IV et V les données thermodynamiques correspondantes.

TABLEAU IV

Données thermodynamiques :

F : température de fusion,
 L_F : chaleur latente de fusion,
 E : température d'ébullition,
 L_E : chaleur latente d'ébullition.

	F °C	L_F kJ mol ⁻¹	E °C	L_E kJ mol ⁻¹
Ti	1660	18,8	3260	
TiCl ₄	— 25	9,37	137	36,2
TiO ₂	1870	64,9		
Mg	650	8,8	1105	127,7
MgCl ₂	714	43,1	1418	136,9
Na	97,8	2,6	882	99,2
NaCl	801	28,0	1465	170,4

TABLEAU V

Enthalpies libres standard de formation en joules

$$\Delta G_f^\circ = A + BT \ln T + CT$$

Réaction de formation	A	B	C	Domaine de T(en K)
$Mg_{(l)} + Cl_{2(g)} \longrightarrow MgCl_{2(l)}$	618900	56,8	-304,6	987-1376
$Na_{(l)} + \frac{1}{2} Cl_{2(g)} \longrightarrow NaCl_{(s)}$	414400		-98,8	298-1073
$Ti_{(s)} + 2 Cl_{2(g)} \longrightarrow TiCl_{4(g)}$	761200	4,82	-133,3	298-1700

La répartition mondiale des capacités de production est indiquée sur le tableau VI. Le procédé de réduction au magnésium

concerne environ 70 % du total, le solde ayant recours au procédé au sodium ; les deux procédés sont d'ailleurs pratiquement équivalents en ce qui concerne la qualité du produit obtenu.

TABLEAU VI

Titane métal (éponge) : capacités de production 1984

	Milliers de tonnes
Etats-Unis	30
Japon	32
Autres pays à économie de marché (G.-B.)	4,0
Pays d'économie dirigée (U.R.S.S., Chine)	42

La moitié de la production d'éponge de titane est destinée à la réalisation de pièces pour l'aéronautique. Mais l'excellente résistance à la corrosion du titane, supérieure à celle des aciers inoxydables, a conduit à de nombreux autres débouchés pour ce métal commodément regroupés par opposition sous le vocable « industrie ». Ce secteur concerne notamment des condenseurs de centrales nucléaires situées en bord de mer, certaines unités de dessalement et de nombreux appareillages de génie chimique. La répartition des consommations est reportée au tableau VII.

TABLEAU VII

Titane métal ouvré : répartition des consommations (%).

MARCHÉ	U.S.A.	EUROPE	JAPON	ÉCONOMIE DIRIGÉE
Aéronautique	65	55	10	25 ?
Industrie	35	45	90	75 ?

PRODUCTION DES LINGOTS ET FABRICATION DE DEMI-PRODUITS POUR L'AERONAUTIQUE.

L'éponge de titane est un produit chimiquement pur mais qui ne présente pas la compacité et les propriétés mécaniques nécessaires pour la réalisation de pièces destinées aux moteurs ou aux cellules de l'industrie aéronautique. L'étape fondamentale pour l'obtention de ces propriétés est la fusion de lingots ; elle est complétée par la transformation en demi-produits : barres pour reforgeage ou usinage mécanique direct en pièces, barres de petit

diamètre et fils pour la réalisation de fixations, tôles et plaques pour éléments de structure divers et capotages.

De manière analogue à la métallurgie extractive, l'élaboration des lingots doit faire appel à la technique du vide à haute température pour préserver la pureté chimique du métal. En outre, cette élaboration fixe définitivement la composition chimique des alliages et par conséquent l'essentiel de leurs propriétés d'emploi. Les traitements thermomécaniques de transformations complètent l'obtention des caractéristiques requises, notamment par le contrôle des microstructures, mais en ce qui concerne l'analyse ne peuvent influencer que sur la seule teneur en hydrogène (*).

Le procédé de base de la fusion des lingots est dénommé « à électrode consommable » ; son principe est rappelé sur la fig. 2.

SCHEMA DE PRINCIPE DE LA FUSION AU FOUR A ELECTRODE CONSOMMABLE

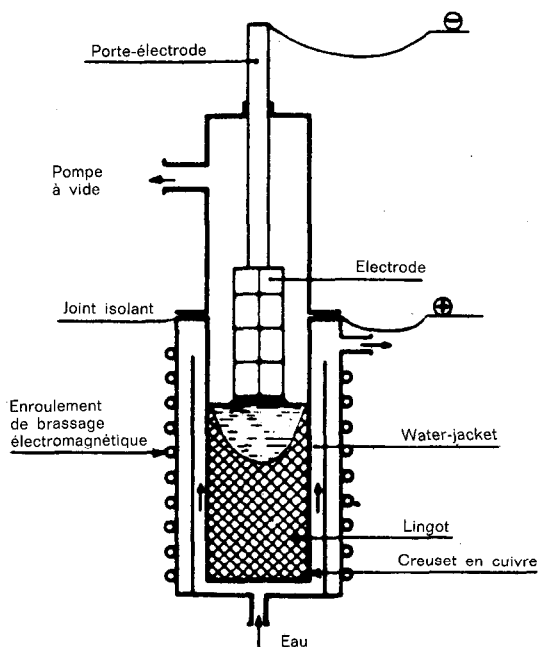


Fig. 2. — Schéma de principe de la fusion des lingots au four à électrode consommable.

(*) Voir référence bibliographique en fin de texte.

L'éponge de titane et les éléments d'addition correspondant aux alliages à élaborer sont comprimés à l'aide d'une presse hydraulique en éléments assemblés par soudage de manière à constituer une électrode. On crée un arc électrique entre cette électrode et le bain liquide : l'électrode fond progressivement et se « consomme » pour alimenter le bain liquide qui, lui-même, se solidifie progressivement pour constituer le lingot. L'obtention des lingots nécessite au moins deux fusions.

Une variante plus performante de la première fusion est dite « à électrode non consommable » et a donné son nom à un cycle d'élaboration rappelé comparativement sur la fig. 3 ; il autorise

COMPARAISON DES CYCLES EC - ENC

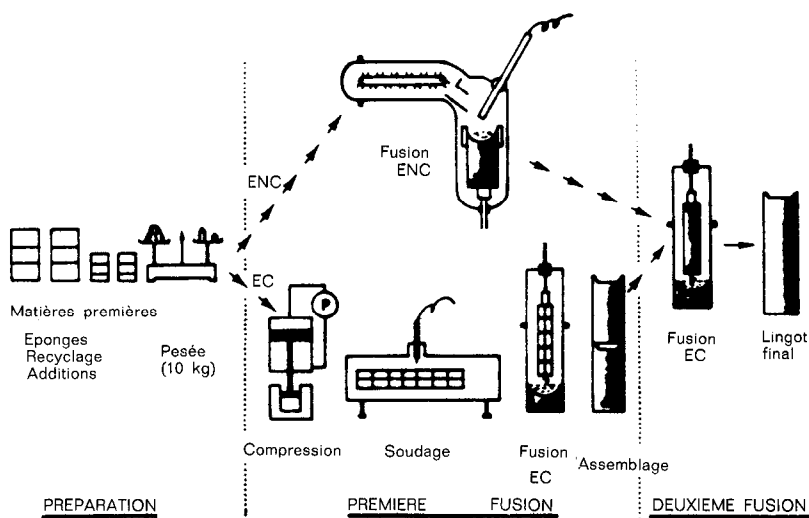


Fig. 3. — Comparaison des cycles d'élaboration des lingots à électrode consommable (EC) et à électrode non consommable (ENC).

des progrès de productivité notamment par une meilleure utilisation des chutes de production [2] [3]. L'opération de compactage en éléments assemblés par soudage pour former une électrode (système EC) est remplacé par une alimentation automatique directe du bain de fusion par un mélange d'éponge d'éléments d'addition et de chutes recyclées sous forme relativement divisée. L'arc électrique de fusion est alors disposé entre une électrode « non consommable » (« ENC ») fixe en cuivre refroidi par circulation d'eau et le bain liquide.

Les lingots courants ont des masses de 2 à 5 tonnes. La transformation des lingots en demi-produits utilise des procédés et outils conventionnels du secteur des aciers avec seulement des gammes de fabrication spécialement adaptées au titane. Les barres sont obtenues par forgeage ou pour les plus faibles sections ($\varnothing < 80$ mm environ), par laminage ; le laminage à chaud suivi, éventuellement, d'une finition à froid est également la technique de transformation utilisée pour les tôles et plaques.

Nous rappelons ci-après les caractéristiques dimensionnelles principales des demi-produits fabriqués pour l'industrie aéronautique en mentionnant dans chaque cas le pourcentage approximatif de la consommation française totale de ce secteur. Les nuances concernées sont le titane commercialement pur, désignation T 35 à T 60, l'alliage TA6V très couramment utilisé ainsi que divers alliages d'emploi plus spécialisé [1] :

- Barres (75 % de la consommation) : diamètre 20 à 350 mm et sections carrées ou rectangulaires comparables.
- Petites barres et fils (5 à 10 % de la consommation) : diamètre de 3 à 20 mm.
- Tôle et produits plats (10 - 15 % de la consommation) : épaisseur 0,4 à 5 mm, formats courants $1\,000 \times 2\,000$ mm pouvant aller jusqu'à $2\,000 \times 6\,000$ mm pour les tôles ; épaisseur 5 à 1 000 mm environ pour les plaques.
- Produits filés (sections courantes limitées à diamètre 50 mm environ) et pièces moulées (5 % de la consommation).

En France, le seul élaborateur et transformateur de demi-produits barres, fils, tôles est la Société CEZUS (Groupe Pechiney) usine d'Ugine (Savoie). Les produits filés sont transformés par la Société Vallourec (Usine de Persan - Oise). Les pièces moulées sont produites par Messier, fonderie d'Arudy - Pyrénées-Atlantiques. Les pièces obtenues par métallurgie des poudres, domaine qui semble prometteur pour l'avenir, n'ont pas encore atteint, de même que dans le reste du monde, le stade industriel.

TITANE NON ALLIÉ.

1.1. Propriétés physiques et mécaniques.

Le titane non allié, ou titane commercialement pur, titre au moins 99,5 % en masse de titane pur, avec quelques impuretés liées aux processus de fabrication de l'éponge : oxygène et fer principalement.

Les propriétés physiques du titane sont résumées dans le tableau VIII.

Les propriétés mécaniques du titane non allié peuvent être ajustées en fonction de la composition chimique comme le montre le tableau IX. Le réglage de la teneur croissante en oxygène ou fer (le rôle durcissant de ces deux éléments étant pratiquement équivalent) permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques croissantes.

Les caractéristiques mécaniques et analytiques détaillées du titane et de ses alliages sont spécifiées par les normes AECMA, AIR, ASTM, DIN, etc.

L'évolution de quelques propriétés mécaniques du titane non allié, en fonction de la température, est illustrée par les fig. 4 et 5 ; à titre de comparaison, des données relatives à l'alliage de titane le plus répandu et le plus caractéristique, le TA6V, sont également reportées.

Le titane non allié a une bonne tenue à la fatigue : le rapport de la limite de fatigue à 10^8 cycles à la charge de rupture est au moins égal à 0,5.

TABLEAU VIII

Caractéristiques physiques du titane non allié

Numéro atomique	22
Masse atomique	47,90
Masse volumique	4,507 g/cm ³
Température de fusion	1 670 °C
Température d'ébullition	3 535 °C
Capacité thermique massique	522,5 J. kg ⁻¹ . °C ⁻¹
Conductivité thermique	16,7 W. m ⁻¹ . °C ⁻¹
Résistivité électrique à 20 °C	$47,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Coefficient de dilatation linéique à 25 °C	$8,5 \times 10^{-6}$ par °C
Susceptibilité magnétique massique	$3,2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ (paramagnétique)
Module d'élasticité	110 000 MPa
Coefficient de Poisson	0,33
Température de transformation allotropique	882 °C (§ 2,1)
En dessous de cette température, la maille est de type hexagonal ($a = 0,295 \text{ nm}$; $c = 0,468 \text{ nm}$) ; elle est de type cubique centré ($a = 0,332 \text{ nm}$ à 900 °C) aux températures supérieures.	

La résilience du titane non allié, ainsi d'ailleurs que celle de ses alliages, est toujours élevée et la pratique courante néglige

d'en relever la valeur dans chaque cas. Cette propriété est conservée jusqu'aux très basses températures. Le titane non allié peut, en conséquence, être utilisé jusqu'à la température de l'hélium liquide (4,2 K sous la pression atmosphérique), de même que certains de ses alliages sous réserve d'une basse teneur en éléments interstitiels (H_2 , O_2 , N_2) et en fer.

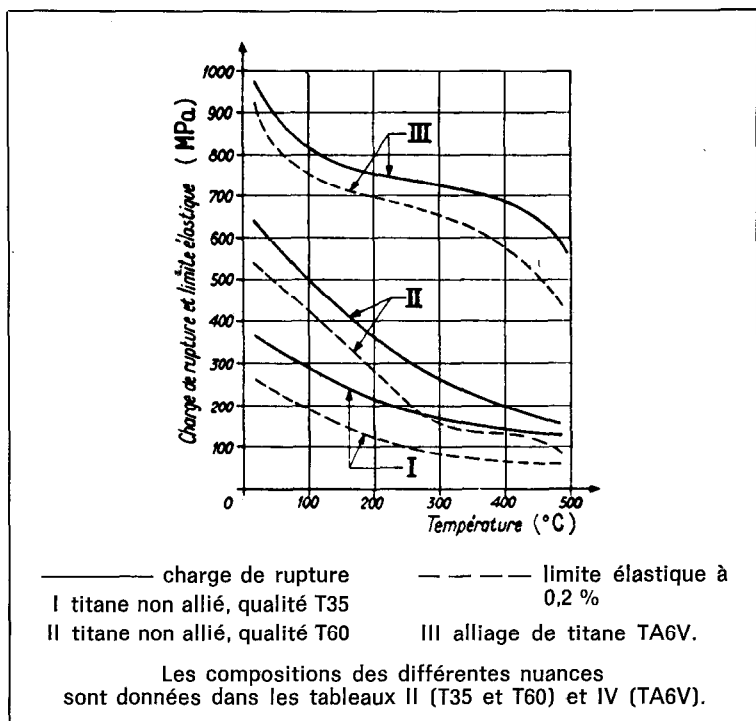


Fig. 4. — Evolution, en fonction de la température, des caractéristiques de traction du titane commercialement pur et de l'alliage TA6V.

La résistance à la corrosion du titane est excellente. Elle se présente comme nettement supérieure à celle des aciers inoxydables, notamment du fait d'une quasi insensibilité à l'action de l'ion chlore. Les principales caractéristiques en sont données ci-après.

Le titane est un métal extrêmement oxydable : dans la série des potentiels électrochimiques standard, le titane (Ti/Ti^{2+} , $-1,63$ V) se place au voisinage de l'aluminium (Al/Al^{3+} , $-1,66$ V),

entre le magnésium (Mg/Mg^{2+} , $-2,37$ V) et le zinc (Zn/Zn^{2+} , $-0,76$ V).

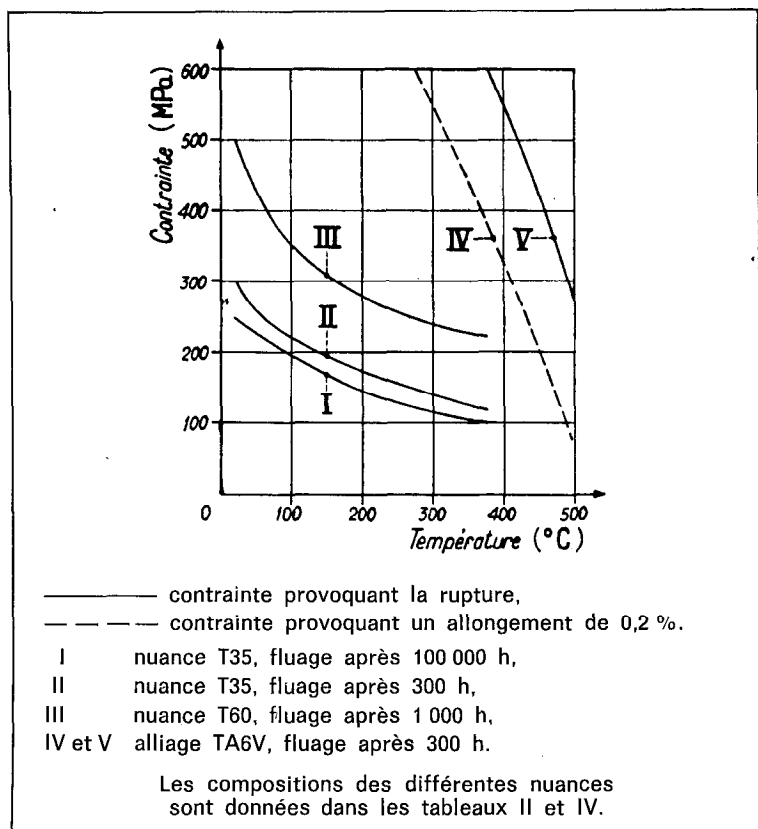


Fig. 5. — Caractéristiques de fluage du titane et de l'alliage TA6V.

TABLEAU IX

Caractéristiques mécaniques et analytiques types du titane non allié

Désignation Afnor	Résistance à la rupture MPa	Limite élastique à 0,2 % MPa	Allon- gement %	O ₂ % masse	Fe % masse
T35	350	260	40	0,080	0,080
T40	450	340	30	0,100	0,100
T60	640	530	25	0,250	0,200

La stabilité du titane en présence d'un milieu corrosif résulte en fait de la formation en surface d'un film de passivité : ce film est assimilable, en première approximation, à un film d'oxyde tel que TiO_2 , mais il est reconnu qu'il peut en fait contenir plusieurs oxydes différents ou de l'hydrure de titane en fonction du milieu corrosif considéré. Sous potentiel appliqué croissant, la stabilité est limitée par des phénomènes de claquage diélectrique et non par une transpassivité ; les tensions de claquage sont de l'ordre de 10 V en présence d'ion chlore et de 60 V en milieu sulfurique.

De manière générale et schématique, la tenue du titane vis-à-vis des agents chimiques peut être résumée de la manière suivante, le pouvoir oxydo-réducteur des milieux corrosifs étant apprécié en termes électrochimiques :

- stabilité parfaite vis-à-vis des milieux à caractère oxydant ou neutres (exemples : milieux organiques, chlore en solution aqueuse, eau de mer) ;
- stabilité limitée ou nulle vis-à-vis des milieux non oxydants (exemples : HCl et H_2SO_4 concentrés), ou au contraire très fortement oxydants (exemples : acide nitrique concentré chaud sous pression, milieux alcalins concentrés, chlorures concentrés chauds à bas pH) ;
- stabilité nulle vis-à-vis des ions fluor en solution aqueuse (exemple : acide fluorhydrique).

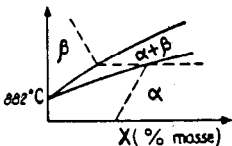
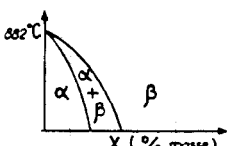
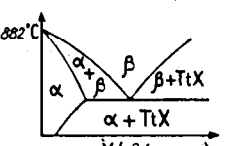
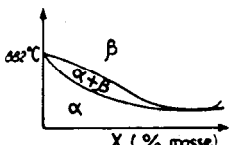
Il faut noter que la présence d'ions de métaux lourds (Fe^{3+} , Cu^{2+} , ...), susceptibles de créer des conditions oxydantes, augmentent de manière très importante la résistance à la corrosion du titane vis-à-vis d'acides non oxydants tels que les acides chlorhydrique ou sulfurique. De manière analogue, le caractère oxydant de l'acide nitrique permet au titane de résister parfaitement à l'eau régale (3 volumes d'acide chlorhydrique - 1 volume d'acide nitrique).

L'alliage de titane Ti - 0,2 % Pd, couramment utilisé, procure une amélioration nette dans le domaine de la tenue aux acides non oxydants (HCl , H_2SO_4).

Le titane est très peu sensible aux modes de corrosion particuliers tels que la corrosion caverneuse ou la corrosion par piqûres ; de tels phénomènes ne sont observés qu'en cas d'utilisation dans un domaine proche d'une limite pratique de tenue à la corrosion générale (exemple : saumures concentrées et chaudes). Il en est de même en ce qui concerne la corrosion liée à des couplages galvaniques où le titane est le plus souvent en position protégée (cathode). Le titane non allié est, dans la pratique industrielle actuelle, totalement insensible à la corrosion sous tension.

Les alliages de titane utilisés dans l'industrie aéronautique ont une résistance à la corrosion comparable à celle du titane non allié.

TABLEAU X
Classification des éléments d'alliage du titane

Éléments		Diagrammes d'équilibre (*)	Solutions solides d'insertion	Solutions solides de substitution
Alphagènes			O ₂ , N ₂ , B, C	Al
Bêtagènes	isomorphes			Mo, V, Nb, Ta
	eutectoides		H ₂	Mn, Fe, Cr, Co, W, Ni, Cu, Au, Ag, Si
Neutres				Sn, Zr.

2. ALLIAGES DE TITANE.

2.1. Classement des éléments d'alliage. Les principaux types d'alliages de titane.

Le titane non allié possède une structure hexagonale compacte dite phase alpha jusqu'à 882°C. Au-dessus de ce point de trans-

formation, parfois désigné par l'expression transus bêta, c'est une structure cubique centrée dite phase bêta qui est stable. Les éléments d'alliage sont alors classés en éléments alphagènes ou bêtagènes, suivant leur tendance à augmenter le domaine de stabilité de l'une des deux phases alpha ou bêta ; ceux qui sont plutôt indifférents de ce point de vue sont dits neutres. Les éléments à faible rayon ionique entrent en insertion dans le réseau alors que les autres forment des solutions solides de substitution (tableau X).

Les effets alphagènes ou bêtagènes des différents éléments sont approximativement additifs. Les alliages obtenus sont classés dans l'un des types alpha, alpha + composé (intermétallique), alpha + bêta ou bêta, suivant la nature des phases prédominantes à température ambiante à l'état d'utilisation.

Exemples : un alliage tel que Ti - 5 % Al - 2,5 % Sn (désignation Afnor norme A 02-004 : TASE) ne contient pratiquement que de la phase alpha à l'état recuit ; certains alliages alpha, résistant au fluage sont souvent désignés par l'expression super alpha, un peu ambiguë, qui désigne à la fois leurs performances améliorées et le fait qu'ils contiennent quand même une faible quantité de phase bêta à l'état d'utilisation trempé-revenu.

L'alliage Ti - 6 % Al - 4 % V (désignation Afnor : TA6V) est un alliage alpha + bêta caractéristique : il contient un mélange des phases alpha et bêta à ses deux états d'utilisation recuit ou trempé-revenu.

Le cas des alliages bêta est particulier : l'appellation souligne la possibilité de maintenir par trempe la phase bêta métastable à la température ambiante.

Le tableau XI indique les principaux alliages de titane actuellement utilisés, leurs caractéristiques de traction et la répartition de leur production. Il existe également de nombreux autres alliages de titane plus ou moins en développement.

Les caractéristiques essentielles des trois principaux types d'alliages de titane sont les suivantes :

* Les alliages alpha et super-alpha sont particulièrement aptes au soudage du fait de leur structure pratiquement monophasée à température ambiante. Ils sont très résistants au fluage jusque vers 550 °C, métallurgiquement stables sous contraintes à chaud et restent résistants et tenaces jusqu'aux températures cryogéniques. Par contre, ils sont difficiles à déformer à froid et ne durcissent pratiquement pas par traitement thermique, c'est-à-dire ont une résistance mécanique en traction relativement modeste. La limitation de la teneur en éléments alphagènes dans ces alliages provient de la nécessité d'éviter une précipitation de

phases microscopiques telles que Ti_3Al qui réduit notamment la ductilité en traction et la teneur à la corrosion sous tension.

* Les alliages bêta à l'état trempé sont soudables et possèdent une aptitude intéressante à la déformation à froid. Ils peuvent atteindre des caractéristiques mécaniques élevées à l'état trempé-revenu. Résistants à chaud pour des sollicitations de courte durée, ils sont par contre métallurgiquement instables au-dessus de $350^{\circ}C$. Leur structure cubique centrée explique l'apparition d'une fragilité en dessous de $-60^{\circ}C$ environ. Après avoir suscité de grands espoirs, leur mise au point a rencontré diverses difficultés et ils sont actuellement encore peu utilisés. La limite supérieure de concentration en éléments bêtagènes est liée à des considérations de poids (cas du molybdène) ou le prix de revient (vanadium) et aussi au fait que les alliages bêta stables, non susceptibles de durcissement, n'ont aucun intérêt du point de vue de la tenue mécanique.

* Les alliages alpha + bêta sont intermédiaires. Ils répondent aux traitements thermiques, sont assez résistants à chaud et métallurgiquement stables jusque vers $450^{\circ}C$. Ce sont actuellement les alliages de titane susceptibles de présenter la résistance mécanique la plus élevée pour les utilisations pratiques. Leur aptitude à la conformation à froid est limitée mais meilleure que celle des alliages alpha. Leur aptitude au soudage, bien que convenable, peut être limitée par les conséquences de transformations métallurgiques au soudage.

* Un compromis entre soudabilité, aptitude à la conformation à froid et résistance mécanique a été réalisée avec le seul alliage type alpha + composé utilisé en pratique : $Ti - 2,5\% Cu$. Comparable au titane non allié à l'état trempé, il est susceptible de durcissement par précipitation (du composé Ti_2Cu) au revenu pour atteindre un niveau de résistance mécanique un peu inférieur à celui des alliages alpha.

TABLEAU XI
Caractéristiques des principaux alliages de titane utilisés actuellement

Dénomination	Composition chimique % masse	Type	Etat d'utili- sation (1)	Traction (2)			Production U.S.A. Europe 1980 %	
				Rr MPa	Re 0,002 MPa	A %		
Ti non allié		a	R	450	330	35	29	40
TA5E	Ti - 5 Al - 2,5 Sn	a	R	900	800	20	5	≤ 5
TA8DV	Ti - 8 Al - 1 Mo - 1 V	Super a	TR	1 000	900	18	3	≤ 3
Ti - 6242	Ti - 6 Al - 2 Sn - 4 Zr - 2 Mo	Super a	TR	1 000	900	18	2	0
TA6ZD (685)	Ti - 6 Al - 5 Zr - 0,5 Mo - 0,2 Si	Super a	TR	1 050	950	12	0	≈ 8
TA6V	Ti - 6 Al - 4 V	a + β	R TR	1 000 1 150 1 050	900 1 050 950	15 12 12	52	40
Ti - 662	Ti - 6 Al - 6 V - 2 Sn	a + β	R TR	1 250 1 150	950 1 150	12 10	6	≤ 5
TA4DE	Ti - 4 Al - 4 Mo - 2 Sn - 0,5 Si	a + β	TR	1 120	1 050	15	0	≤ 5

(1) R = recuit ; T = trempé ; TR = trempé-revenu.

(2) Rr = charge de rupture ; Re 0,002 = limite élastique à 0,2 % ; A = allongement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. DE GÉLAS, M. ARMAND, L. SÉRAPHIN, R. TRICOT. — *Titane et alliages de titane*. Techniques de l'ingénieur - M 577 - 1 (1976).
 - [2] R. MOLINIER. — *L'élaboration des alliages de titane par première fusion en électrode non consommable*. Matériaux et Techniques - n° 11-12, déc. 1977, 673-680.
 - [3] B. CHAMPIN, L. GRAFF, R. MOLINIER. — *Economies de matières premières dans la fabrication du titane et de ses alliages*. Mém. Sci. Rev., mai 1980, 681-694.
 - [4] B. CHAMPIN, B. DE GÉLAS. — *Traitements thermiques des alliages de titane*. Techniques de l'ingénieur - M 1335 (1963).
-