Étude économique des différentes méthodes d'élaboration du niobium

Marcel Vanlaer, Roger Durand

► To cite this version:

Marcel Vanlaer, Roger Durand. Étude économique des différentes méthodes d'élaboration du niobium. *Revue de Physique Appliquée*, 1970, 5 (3), pp.487-494. 10.1051/rphysap:0197000503048700 . jpa-00243419

HAL Id: jpa-00243419

<https://hal.science/jpa-00243419>

Submitted on 1 Jan 1970

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉTUDE ÉCONOMIQUE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉLABORATION DU NIOBIUM

par Marcel VANLAER et Roger DURAND

Ugine Kuhlmann, Division Métaux non Ferreux, Brignoud, Isère

Résumé. — Par ses propriétés remarquables, le niobium présente un très grand champ d'applications. Chacune d'elles nécessite un métal plus ou moins pur qui, pour une technique donnée, sera plus ou moins cher.

Le procédé utilisé basé sur la réduction métallothermique du pyrochlore suivie d'une purification ou non par distillation des chlorures et terminée par une fusion par bombardement électronique paraît actuellement la plus intéressante. Certes, les prix obtenus sont encore élevés, ceci en raison du faible tonnage élaboré. Par un choix plus judicieux de la qualité en fonction de l'utilisation, on peut espérer augmenter la demande et rendre ce métal aussi compétitif que le zirconium, le molybdène et le tantale, et ce dans un plus grand domaine d'application.

Abstract. — Niobium has remarkable properties. It offers a wide range of applications, every of which needs different purities of metal, then different manufacturing processes with different costs.

The most interesting process actually seems to be : pyrochlore's metathesis reduction, followed or not by chlorides distillation, and finishing with an electron beam melting. That still gives high costs, indeed, because of low quantities which are worked out. We can hope that request will increase, if selecting more judiciously metal's purities in connexion with uses. Then niobium would be done as competitive as zirconium, molybdenum and tantalum, and that would be in a wider range of applications.

I. Introduction. — Le niobium est un métal relativement courant dans la croûte terrestre puisque sa concentration atteint le chiffre de $2,4 \times 10^{-3}$ et que les réserves équivalent au total celles du nickel et du molybdène. C'est aussi un métal aux qualités remarquables, que ce soit dans le domaine des hautes températures, de la corrosion, de la transmission des électrons et des neutrons. Ces deux caractéristiques : abondance et propriétés intéressantes devraient suffire à lui valoir une place de choix parmi les éléments métalliques. Or, à part son utilisation massive sous forme de ferro, il est encore d'un emploi très restreint comme métal de base. On ne peut pas dire que sa jeunesse en soit la cause car il est né en même temps que le tantale au siècle dernier, mais il a surtout vécu dans son ombre. En effet, le niobium était un sous-produit de la fabrication du fluotantalate de potassium mise au point par Marignac et, par la suite, il n'était connu que sous une forme particulièrement impure. Mais, depuis la dernière guerre mondiale, d'autres méthodes d'élaboration se sont développées et ont permis de le préparer avec un degré de pureté élevé. Ce n'est pas pour autant que cette industrie se soit développée rapidement.

Nous avons cherché les raisons de cette expansion médiocre et pensé que, outre les difficultés rencontrées dans certaines de ses applications, notamment sa protection contre l'oxydation à haute température, une des causes principales pouvait être son prix.

Nous nous sommes donc attachés à étudier le problème niobium sous l'angle économique. Qui dit prix de revient sous-entend la somme : prix de la matière première + frais de transformation. Or, ces frais de transformation dépendent essentiellement des procédés utilisés et de l'échelle à laquelle ils sont mis en œuvre ; ces deux facteurs sont d'ailleurs eux-mêmes fonction de la pureté désirée et des applications que le métal peut recevoir. En effet, plus le métal sera raffiné, plus les frais de transformation seront élevés, et ceci d'autant plus que le débouché sera faible. En définitive, le prix sera lié, outre à la matière première, à la pureté et à la facilité d'écoulement du produit.

C'est surtout sur cette relation du prix avec la pureté que nous insisterons car, si, le plus souvent, le niobium est considéré comme un métal cher, c'est que les utilisateurs exigent une qualité qui n'est pas toujours indispensable à l'application qu'ils veulent en faire et leur hésitation devant un investissement prohibitif se traduit par un renoncement pur et simple. De ce fait, le marché se résorbe, le développement de la production est entravé et l'évolution vers des prix meilleurs est freinée. C'est un cercle vicieux dont on ne peut sortir que par un effort d'information sur la qualité en fonction de l'utilisation. Mais nous parlerons également des nombreuses possibilités que ce métal présente dans des domaines très variés afin d'essayer d'en augmenter le champ d'application.

Notre plan se trouve ainsi fixé de la façon suivante :

- examen des applications,
- qualité nécessaire à chacune d'elles,
- procédés et minerais à mettre en œuvre pour obtenir la qualité requise,
- prix de revient en fonction des traitements subis et du tonnage,
- comparaison avec les prix des autres métaux afin de savoir dans quelle mesure le métal est compétitif.

II. Applications du niobium. — Le niobium présente des propriétés remarquables : densité relativement faible, température de fusion élevée, environ 2 500 °C, excellentes caractéristiques mécaniques à haute température, conductance élevée à basse température, bonne résistance à la corrosion en milieu acide ou en présence de métaux fondus, transparence aux neutrons thermiques, facilité de mise en forme même à froid ; avec le carbone, il forme un carbure très stable ; son oxydation ménagée conduit à un film d'oxyde très mince et particulièrement adhérent.

Toutes ces particularités font du niobium, soit à l'état pur, soit allié, un élément de choix dans des domaines très variés :

- celui des aciers sous forme de ferro comme élément stabilisant du carbone des 18/8 à la place du titane ; pour améliorer les propriétés à haute température des aciers du type ferritique utilisés en aéronautique ;

- comme élément de base dans les alliages haute température jusqu'à 1 400 °C à la place des alliages conventionnels limités à 900 °C et qui sont employés à la confection des réacteurs de fusée et des éléments de guidage des missiles ;

- dans l'industrie nucléaire, comme élément de gainage du combustible des breeders.

- en électrotechnique dans la réalisation des alliages supraconducteurs ;

- en électricité dans le domaine des condensateurs de type solide et des redresseurs, les capacités spécifiques du Nb étant le double de celles du tantale ;

- en électronique, comme getter ou émetteur d'électrons ;

- en génie chimique, comme échangeur ou condenseur sur des solutions acides ;

- en outre, ses dérivés tels que le carbure entrent dans la fabrication des outils de coupe et son oxyde dans l'industrie des verres optiques et la catalyse d'estérification.

Chacune de ces utilisations nécessite une qualité de métal particulière dont nous allons parler maintenant.

III. Considérations sur la qualité du métal en fonction de son utilisation. — Il est bien évident que la pureté du métal employé dépendra essentiellement de l'utilisation qu'on veut en faire.

- Ainsi, l'aciérie demandera un métal relativement impur, c'est-à-dire en général un ferro-niobium ayant une teneur en Nb de l'ordre de 60 à 70 % ; les autres impuretés seront sans importance étant donnée la faible proportion de Nb dans l'acier (1 à 2 %). Seul l'étain sera limité à une certaine teneur.

- Dans le cas des alliages réfractaires pour haute température, il ne sera évidemment pas question d'employer du ferro et on tolérera seulement certains métaux réfractaires tels que Ta, Mo, W et même Zr et Ti. On entre alors dans le domaine du Nb technique de pureté ≥ 97 %.

- Le génie chimique nécessitera un métal encore plus élaboré et ayant une teneur voisine de 99 % en (Nb + Ta).

- Les supraconducteurs du type NbTi n'admettent pas plus actuellement de 1 500 ppm de Ta, les autres éléments étant inférieurs à 1 000 ppm, soit environ 99,7 % Nb.

- L'énergie nucléaire exigera moins de 500 ppm de Ta, c'est-à-dire une qualité de niobium à 99,9 %.

- Enfin, pour des recherches fondamentales, les laboratoires souhaitent un niobium ultra pur, 99,98 %, renfermant moins de 20 ppm Ta, 20 ppm Mo, 20 ppm W et 100 ppm d'interstitiels. Dans des cas tout à fait exceptionnels, il sera possible de descendre aux 4 N.

En résumé, outre le ferro, on distinguera 3 qualités de Nb : le technique, le nucléaire et l'ultra pur.

Nous allons voir maintenant comment peuvent être élaborées ces différentes qualités de niobium. Mais d'abord, examinons quels sont les minerais que la nature met à notre disposition.

IV. Sources de niobium. — La composition des principaux minerais de niobium est consignée dans le tableau n° 1.

Deux sortes de minerais sont utilisés pour l'obtention du niobium :

- La colombite qui est un niobate de fer et de manganèse contenant de 40 à 75 % de Nb₂O₅, une proportion croissante de Ta₂O₅ de 2 à 40 % à mesure que la concentration en Nb₂O₅ chute, 10 à 20 % de FeO et de 0 à 10 % MnO, du titane, du W, du Mo et du Zr. En général, ces minerais servent à préparer simultanément le Nb et le Ta. Les gisements les plus importants se trouvent en Ouganda et au Nigeria où les réserves seraient de 600 000 t.

- Depuis 1960, un autre minerai, le pyrochlore, a été mis en exploitation au Brésil et au Canada. C'est un fluoniobate de Ca et Na contenant de 40 à 65 % de Nb₂O₅, 10 à 20 % de CaO, 2 à 6 % de Na₂O, 1 à 10 % de terres rares, du Ti, W, Mo et Zr et qui présente la caractéristique d'avoir une teneur très faible en tantale de 0,1 à 2 %. Il sera donc particulièrement intéressant dans la fabrication du Nb pur. Les réserves du Brésil seraient de l'ordre de 4×10^6 t.

TABLEAU I
Composition des principaux minerais de niobium

Minéral	Gamme usuelle de concentration %														F	Terres rares
	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	WO ₃	MoO ₃	FeO	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	NiO	MnO	SiO ₂	SnO ₂	TiO ₂	Na ₂ O ⁽¹⁾	CaO ⁽²⁾		
NIOBIO-TANTALITE (Fe, Mn) (Nb, Ta) ₂ O ₆ Structure : Orthorhombique	40 à 75	2 40	0,2 2	0,2 2	10 20	tr 1	0,5 5	tr tr	0,5 10	1 5	0,2 3	0,5 6	tr 0,5	tr 2	—	—
PYROCHLORE (Na, Ca) ₂ (Nb, Ta) ₂ O ₆ (OH F) Structure : Cubique	40 à 65	tr 2	tr 1	tr 1	2 10	1 8	tr 2	tr tr	tr 1	1 10	tr 0,5	5 10	2 6	10 20	2 5	1 10
EUXÉNITE (Y, Ca, Ce, U, Th ₁) (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆ Structure : Orthorhombique	4 à 45	0 45	—	—	—	—	—	tr tr	—	—	—	15 25	—	0,5 48	—	12 40
ILMÉNORUTILE (Ti, Fe, Nb) O ₂ Structure : quadratique	tr à 40	tr 35	—	—	5 15	tr tr	—	tr tr	tr —	tr tr	tr 2,5	36 66	—	—	—	—
LOPARITE (Na, Ce, Sr, Ca) (Nb, Ti) O ₃ Structure : Cubique	11,5	11,5	—	—	tr	tr	0,7	tr	tr	0,5	—	39	8 à 10	4 6	—	32 34

(1) Na₂O + K₂O. (2) CaO + SrO + BaO

— Une source accessoire est constituée par les scories de traitement de la cassitérite qui contiennent environ 14 % Nb₂O₅ et moins de 3 % de Ta₂O₅.

— Enfin, d'autres minerais contenant du Nb et du Ta, tels que l'euxénite, l'ilménorutile, la loparite, sont traités pour la récupération d'autres métaux ; titane, uranium, thorium, rhénium, et même le tantale dont les ressources sont relativement faibles.

En dehors des scories de cassitérite, tous ces minerais font l'objet d'une concentration sur le carreau de la mine soit par lévigation, triage magnétique ou électrostatique, flottation, car il n'est pas rare d'exploiter des gisements dits économiques alors que la concentration de la roche ne dépasse pas 0,1 % de Nb₂O₅.

Ceci permettra de comprendre pourquoi les prix des minerais sont très élevés, de l'ordre de 16 F/kg Nb alors que pour le Ta, ces chiffres atteignent presque 100 F/kg.

Quels vont être les traitements subis par ces différents minerais en vue d'obtenir les qualités de niobium énumérées précédemment ? C'est ce que nous allons examiner maintenant.

V. Elaboration du niobium. — Nous nous limiterons à l'emploi du pyrochlore car c'est à la fois la matière première la plus répandue, la plus concentrée en Nb et la moins chargée en tantale. Dans ce minerai, le niobium est associé à de nombreuses impuretés qui peuvent se classer en trois groupes :

— les alcalins, alcalinoterreux, métalloïdes et terres rares,

— les métaux moins réfractaires que le Nb : Al, Zr, Hf, Ti, Fe, Ni, Mn, Si, Sn,

— les métaux plus réfractaires : Mo, W, Ta, avec une mention particulière pour ce dernier qui a même structure électronique et même rayon atomique que Nb, donc des propriétés chimiques et physiques voisines, ce qui laisse supposer une séparation difficile.

Le cycle d'élaboration du métal jusqu'à l'état lingot comporte, en général, trois étapes :

- extraction du Nb sous forme d'un composé pur (séparation des impuretés métalliques),
- réduction de ce composé en métal brut,
- consolidation et affinage en interstitiels.

Nous allons retracer la voie qui a été suivie pour parvenir à chacune des trois qualités de niobium : technique, nucléaire et ultra pur.

L'ensemble des procédés mis en œuvre figure dans le tableau n° II.

1. OBTENTION DU NIOBIUM TECHNIQUE. — Elle consiste en une réduction directe du pyrochlore par métallothermie suivie d'une purification par fusion au four à bombardement électronique. La première étape d'extraction est donc by-passée. Au cours de la réduction se produit une élimination des terres rares, des alcalins, alcalino-terreux et une partie du zirconium. Il reste dans le métal brut obtenu des interstitiels : C, N₂, O₂, des éléments volatils : Al, Si, Fe, Ti, Zr, des éléments réfractaires : W, Mo, Ta.

TABLEAU II
Schéma de fabrication du niobium

La fusion par bombardement électronique (cf. Fig. 1 et 2) permet d'éliminer partiellement les deux premiers groupes d'impuretés sous forme élémentaire pour Fe, Ti, N₂, de sous-oxyde pour Al, Si, C ;

FIG. 1. — Vue générale du four à bombardement électronique de 200 kW.

une quantité appréciable d'oxygène s'en va à l'état de NbO, quant aux éléments réfractaires Ta, Mo, W, ils se concentrent.

On retrouve donc un métal plus ou moins riche en Ta, Mo, W, suivant la teneur du minerai en ces impuretés. En moyenne, Ta sera voisin de 1,5 %, Mo 0,5 % et W 0,5 %. En somme, le niobium obtenu titre environ 97 %.

2. OBTENTION DE NIOBIUM NUCLÉAIRE. — Le métal subit dans ce cas les trois étapes d'élaboration, c'est-à-dire extraction, réduction et affinage.

Au cours de l'extraction, le pyrochlore est réduit par métallothermie puis chloré. L'ensemble des chlorures solides à température ordinaire, mais gazeux et stables au-dessous de 350 °C, peut être soumis à une rectification fractionnée. Les températures d'ébullition des chlorures de Si, Fe, Ti, Mo, W,

FIG. 2. — Un « extracteur » du four à bombardement électronique (lingotière sous vide de 2×10^{-5} Torr).

Zr et Nb, sont suffisamment différentes pour permettre une excellente séparation.

Seul le chlorure de tantale bouillant à 235 °C, alors que le NbCl₅ bout à 248 °C, est assez difficile à éliminer. Il faut employer des colonnes de rectification ayant un grand nombre de plateaux théoriques et un taux de reflux suffisamment élevé pour recueillir un NbCl₅ contenant moins de 500 ppm de Ta (cf. Fig. 3).

Par la suite, ce chlorure peut être réduit directement par l'hydrogène pour obtenir de la poudre (cf. Fig. 4), soit transformé en oxyde, réduit par métallothermie ou carbothermie (cf. Fig. 5) et fondu par bombardement électronique.

Au cours de la fusion, on se retrouvera dans les conditions précédentes avec cependant nettement moins de fer, aluminium, silicium, tantale, molybdène, tungstène. Le tableau n° III montre d'ailleurs une analyse du produit brut, ainsi que l'évolution des différentes impuretés au cours de 3 fusions successives.

TABLEAU III

Affinage du niobium par bombardement électronique

Qualité du métal	Eléments $\times 10^{-6}$					Dureté HV 30
	O	C	N	Si	Fe	
Niobium brut	18 200	590	850	2 000	5 000	
Après 1 ^{re} fusion	1 380	16 à 32	261	102	100	150 à 170
Après 2 ^e fusion	575	8 à 22	91	27	35	80 à 100
Après 3 ^e fusion	175	6 à 14	39	8	< 20	60 à 70

FIG. 3. — Rectification fractionnée du chlorure de Niobium : Vue partielle des colonnes de distillation de l'Atelier industriel.

FIG. 4. — Chaîne pilote de production du Niobium « poudre » par réduction du chlorure par l'hydrogène.

Il se produit une élimination rapide de tous les éléments métalliques ou métalloïdes, sauf l'oxygène dont la diminution nécessite plusieurs fusions. Néanmoins, après 3 passages, cette teneur est réduite à moins de 200 ppm ce qui, compte tenu du tantale, conduit finalement à un niobium à 99,9 %.

Le métal présente alors une dureté HVN 30 de 60 à 70, ce qui le rend particulièrement apte à toute transformation.

3. OBTENTION D'UN NIOBIUM ULTRA PUR. — Le processus de fabrication est semblable à celui du

FIG. 5. — Réduction carbothermique de l'oxyde de Niobium. Vue d'un four industriel.

niobium nucléaire, avec toutefois une purification en tantale plus poussée : les fractions titrant 500 ppm subissent un recyclage dans une nouvelle rectification, ce qui permet de descendre à des concentrations inférieures à 20 ppm et aussi en sélectionnant certaines fractions de queue, on peut arriver au-dessous de 5 ppm.

D'autre part, au cours de l'affinage, le nombre de fusions passe de 3 à 6, de façon à réduire la quantité d'oxygène aux environs de 30 ppm.

Aussi obtient-on un niobium à 99,98 % et même à quatre neuf en prenant certaines précautions.

4. CONCLUSIONS. — Il apparaît donc que les trois méthodes d'élaboration sont basées principalement sur une extraction plus poussée du tantale, comme en témoigne le tableau d'analyse n° IV. La technique de fabrication exploitée par UGINE KUHLMANN est particulièrement apte à produire économiquement les trois qualités de niobium. En effet, le procédé mettant en œuvre la rectification des chlorures produit intermédiairement les qualités technique et nucléaire quand on passe du minerai au niobium ultra pur.

TABEAU IV

Analyse des différentes qualités de niobium

Qualité du métal	Pureté	Eléments $\times 10^{-6}$							Fe + Ni + Cr	Zr + Ti
		C	O ₂	N ₂	Ta	Mo	W			
Niobium technique	> 97	< 1 000	< 200	< 200	1,5 %	< 0,5 %	< 0,5 %		< 500	< 1 000
Niobium nucléaire	> 99,9	< 100	< 200	< 100	< 500	< 20	< 20		< 20	< 20
Niobium ultra pur	> 99,98	< 30	< 30	< 30	< 20	< 20	< 20		< 20	< 20

VI. Considérations sur les prix de revient en fonction de la qualité et du tonnage. — Nous avons vu qu'en fonction de la qualité désirée, les méthodes d'élaboration étaient plus ou moins compliquées et, par suite, coûteuses. A la lumière de notre expérience, nous avons chiffré les différents prix auxquels on arrivait dans chacune des trois qualités pour une production de quelques tonnes par an et pour un métal livré sous forme de tôles de 1 mm d'épaisseur. Deux chiffres ont été avancés : le prix au kilogramme et celui au m² ; nous verrons en effet l'intérêt de ce dernier dans la comparaison avec les autres métaux.

L'obtention du niobium technique nécessite deux étapes de procédés : la réduction et l'affinage, suivies évidemment des opérations de forgeage et de laminage : c'est la voie la plus courte et la moins chère car la réduction nécessite un matériel assez rudimentaire et l'affinage met en œuvre le four à bombardement d'électrons pour un nombre de fusions limité. De ce fait, les chiffres obtenus se situent aux environs de 2 300 F le m² ; étant donnée l'évolution actuelle du problème et les progrès en voie de réalisation, nous envisageons une diminution sensible de ce prix au cours des prochaines années pour atteindre 1 600 F/m². Dans l'hypothèse d'une production de plusieurs dizaines de tonnes par an, ce prix pourrait être facilement divisé par un facteur 2.

En ce qui concerne le niobium nucléaire, la technique d'obtention est beaucoup plus évoluée. Elle nécessite une étape d'extraction assez complexe

passant par les stades de chloration, de rectification et d'oxydation, opérateurs qui grèvent lourdement le prix de revient. Par la suite, l'étape affinage est également plus poussée. Ainsi, la valeur du métal obtenue sera sensiblement le double de celle du métal technique, c'est-à-dire environ 5 100 F/m². Ici encore le tonnage jouera son rôle et un débouché de 50 à 100 tonnes/an permettrait de réduire ce prix aux environs de 3 000 F/m².

Dans le domaine de l'ultra pur, chacun sait que les dernières ppm d'impuretés sont les plus difficiles à enlever, aussi faudra-t-il recourir à une extraction fine par rectifications successives et à l'affinage poussé par fusions multiples et prendre de multiples précautions pour éviter toute pollution lors de la transformation en tôle. Par ailleurs, comme il s'agit d'une élaboration à l'échelle pharmaceutique, le prix sera forcément très élevé : 5 500 F/kg et 45 000 F/m². Cependant, ce prix n'a rien de prohibitif si on le compare à celui pratiqué aux Etats-Unis et qui, pour un niobium à 99,98 %, répondant à l'analyse suivante : O₂ 20 ppm ; C 15 ppm ; N₂ 15 ppm ; H₂ 1 ppm ; Ta 50 ppm ; Fe 15 ppm ; Si 15 ppm ; Cr 10 ppm ; Mo 50 ppm ; s'élève à 11 000 F/kg pour du rond de 10 et 20 000 F/kg pour de la tôle, soit au m² : 171 400 F.

VII. Comparaison des prix du niobium et des autres métaux et alliages réfractaires. — Nous avons rassemblé également dans le tableau n° V les prix des diffé-

TABLEAU V

Tableau de comparaison de prix du niobium et des autres métaux et alliages réfractaires

Métal	Nuance	Densité	Tôle 1 mm épaisseur	
			> 1 t Prix/kg	Prix/m ² —
Acier inoxydable	18 Cr 10 Ni	7,99	6	48
Acier réfractaire	25 Cr 20 Ni (NS 30)	7,98	11	81,5
	1,5 Cr 25 Ni 1,2 Mo	—	28	225
	2 Ti (ATVS)	—	—	—
Nickel	Pur	8,9	44	400
Superalliage	20 Cr 10 Ni 15 W (ATGH)	9,25	68	545
	Hastelloy B (63 Ni 28 Mo 1 Cr	—	106	980
	6Fe 1 Mn 1 Si)	—	—	—
Titane	pur	4,54	80	360
Zirconium	nucléaire pur	6,5	185	1 200
	commercial pur	6,5	135	880
Molybdène	pur	10,2	384	3 916
Tantale	pur	16,6	650	10 800
	ultra pur 99,98	8,57	5 500	45 000
	nucléaire (en 1969)	—	600	5 100
Niobium	nucléaire (dans avenir)	—	350	3 000
	technique (en 1970)	—	270	2 300
	technique (dans avenir)	—	190	1 600
	technique (production très importante)	—	100	850

rents métaux et alliages réfractaires en partant des inoxydables classiques (type 18/8), en passant par les aciers réfractaires (type 25/20 au molybdène), le nickel pur, les superalliages à base nickel, le titane, le zirconium, le molybdène et le tantale.

Ces prix ont été établis, comme pour le niobium, à la fois au kg et au m² pour des tôles de 1 mm d'épaisseur livrées par quantité minimum de 1 t.

Evidemment, les chiffres au m² sont les plus significatifs car, dans toutes les applications, on s'intéressera davantage à la surface de tôle qu'on peut obtenir pour une somme donnée qu'au poids. Ainsi, par exemple, dans notre tableau on trouvera pour le tantale pur et le niobium de qualité nucléaire, des prix au kg identiques ; en fait, en raison d'un rapport de densité égal à 2, il sera plus intéressant de prendre du niobium car pour construire le même appareil, l'investissement sera moitié de celui nécessité par le tantale.

Ce tableau montre une gradation croissante des prix au m² en passant des aciers inox 18/10 à 48 F aux aciers réfractaires de 81 à 225 F, au titane à 360 F, au nickel à 400 F, aux superalliages de 545 à 980 F, au zirconium de 880 à 1 200 F suivant qu'il est hafnié ou non, au molybdène à 3 900 F, jusqu'au tantale à 10 800 F. Quant au niobium, suivant sa qualité, il se situe actuellement, pour le technique : entre le zirconium et le molybdène, pour le nucléaire : entre le molybdène et le tantale, et l'ultra pur défie évidemment toute concurrence.

Mais, dans la perspective de tonnage plus impor-

tant, on s'aperçoit que le nucléaire sera moins cher que le molybdène et que le technique chutera à un prix voisin de celui du zirconium.

Certes, ces comparaisons peuvent paraître arbitraires car chaque métal ayant des propriétés bien particulières et un champ d'application limite, il est bien souvent impossible de faire un choix en fonction du prix. Mais elles ont l'avantage de montrer que le niobium est somme toute un métal d'un prix abordable et d'autant plus que ses débouchés se développeront.

VIII. Conclusions. — Dans ce court exposé, nous avons essayé de montrer qu'en raison de l'abondance de ses minerais et de ses propriétés remarquables, le niobium pouvait être une solution à de nombreux problèmes posés par les techniques les plus modernes. Si son utilisation est encore réduite, c'est qu'il a la réputation d'être un métal cher. En fait, il faut tenir compte de la pureté qui met en jeu des méthodes de préparation plus ou moins élaborées et des débouchés offerts aux différentes qualités obtenues. Dans la gamme des produits élaborés par UGINE KUHL-MANN, il apparaît que le niobium supporte la comparaison avec d'autres métaux réfractaires ayant un éventail de possibilités beaucoup moins large. Mais il est bien certain qu'il ne deviendra vraiment compétitif que dans la mesure où de larges débouchés lui seront assurés.

Il appartient à chaque technicien de penser niobium afin que ce métal ne reste plus un métal d'avenir mais devienne un métal du présent.

QUESTIONS ET RÉPONSES FORMULÉES EN SÉANCE

M. X.... — Quelle est la consommation actuelle des Etats-Unis en Niobium pur ?

M. VANLAER. — Elle a été de 45 t en Niobium pur en 1964 alors que la production sous forme de ferro-niobium était 10 fois plus importante.

M. CRUSSARD. — L'écart de pureté, entre les qualités : technique et nucléaire, est très important (97 % et 99,9 %), ne serait-il pas préférable d'avoir des teneurs intermédiaires ?

M. VANLAER. — Les chiffres donnés ne sont que des valeurs particulières de pureté. Notre technique par rectification des chlorures présente l'intérêt de pouvoir fournir toutes les qualités intermédiaires par une rectification plus ou moins poussée.

M. X.... — Quel est le prix actuel du chlorure de niobium ?

M. VANLAER. — Environ 150 F/kg de niobium contenu dans le chlorure de qualité nucléaire.

M. BRUNETAUD. — Quel est le prix des alliages de niobium ?

MM. VANLAER et DURAND. — Les quantités produites actuellement sont trop faibles pour donner un prix valable. En fait, le prix des alliages dépend :

— du prix du niobium qui est fonction, comme nous l'avons montré, de la qualité et de la quantité,

— du prix de la transformation, donc des moyens à mettre en œuvre et de la mise au mille. Pour une production à l'échelle industrielle, ces frais doivent être comparables à ceux de la transformation des superalliages.