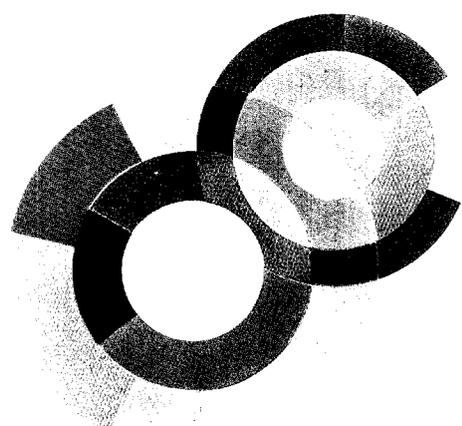
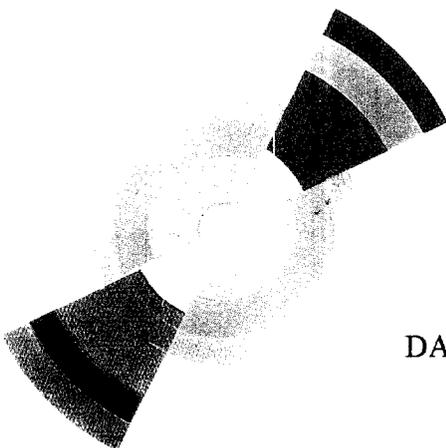


509829



DAPNIA/STCM 98-01

June 1998

ETUDE THERMIQUE D'UN PROFILEUR  
DE FAISCEAU A FIL

F.-P. Juster

DAPNIA

Le DAPNIA (**D**épartement d'**A**strophysique, de physique des **P**articules, de physique **N**ucléaire et de l'**I**nstrumentation **A**ssociée) regroupe les activités du Service d'Astrophysique (SAp), du Département de Physique des Particules Élémentaires (DPhPE) et du Département de Physique Nucléaire (DPhN).

Adresse :           DAPNIA, Bâtiment 141  
                          CEA Saclay  
                          F - 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

# ÉTUDE THERMIQUE D'UN PROFILEUR DE FAISCEAU À FIL

F.-P. Juster

*CEA/Saclay, DSM/DAPNIA/STCM*

*F-91191 Gif sur Yvette, France*

## INTRODUCTION

Le profileur de faisceau faisant l'objet du présent rapport est un dispositif constitué d'un filament de longueur 2 cm qui balaye une section droite d'un faisceau d'électrons. Les mesures successives de la gerbe électromagnétique créée par l'interaction du faisceau et du filament permettent de reconstruire le profil moyen du faisceau selon la direction parallèle au balayage. Pour pouvoir reconstruire le profil d'une section droite du faisceau, plusieurs dispositifs de ce type sont mis en série.

L'objet de notre étude est le calcul de l'échauffement du filament en fonction des caractéristiques du faisceau (intensité et diamètre), du filament (diamètre et composition) et de la vitesse de balayage.

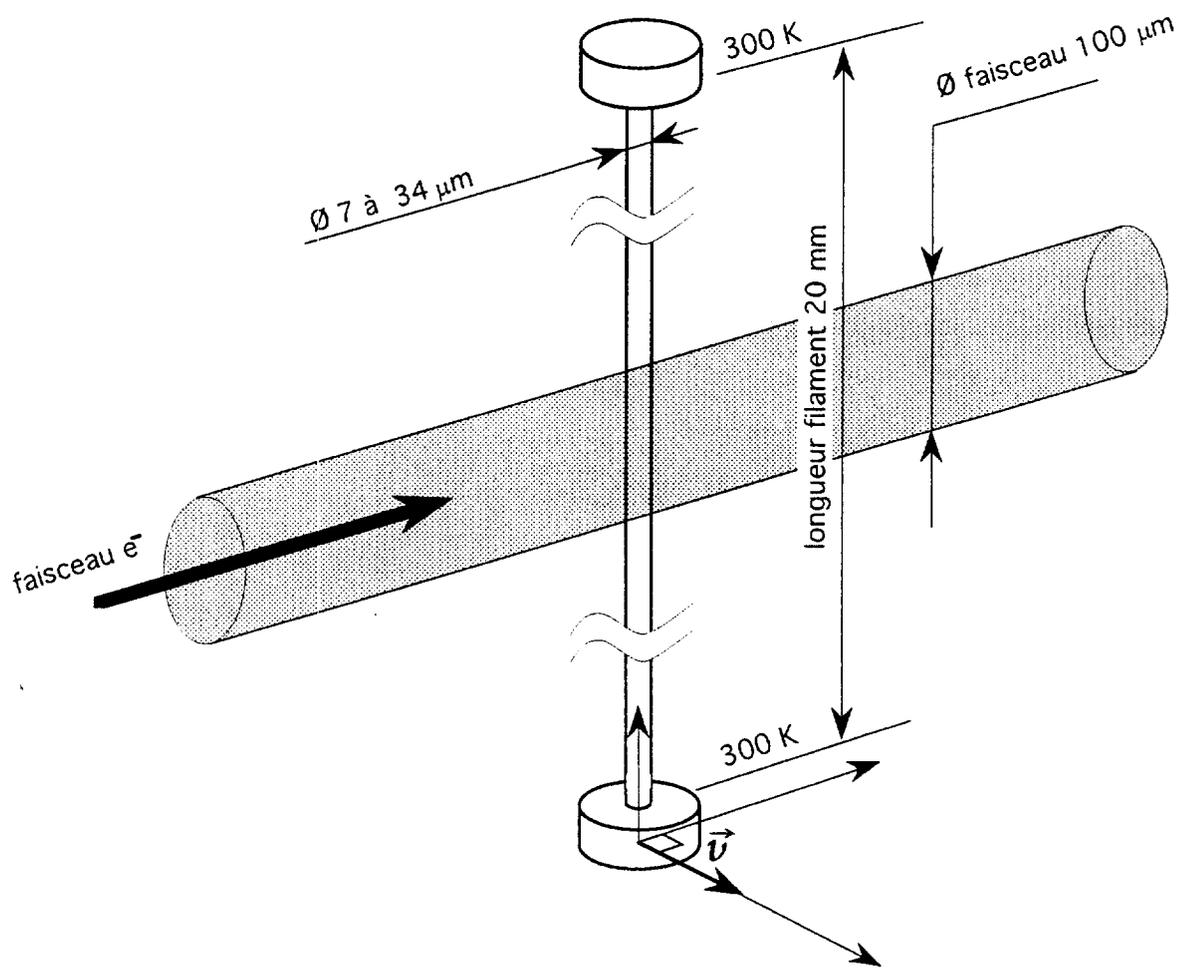
Les calculs de thermique non-linéaire en régime transitoire sont effectués par éléments finis en 3d à l'aide du code de calcul CASTEM 2000. On a étudié les cas de filaments en tungstène, carbone et fibre de carbone, dont les extrémités sont supposées thermalisées à 300 K.

Si  $E$  est la perte d'énergie dans le filament due au faisceau d'électrons (dans notre étude, il s'agit d'électrons de 4 GeV), la puissance volumique déposée dans le matériau de densité  $\rho$  par un faisceau d'intensité  $I$  et de section  $S$  s'écrit :

$$W \text{ (Watt/m}^3\text{)} = 100 \cdot E \text{ (Mev/g/cm}^2\text{)} \cdot I \text{ (\mu A)} \cdot \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} / S \text{ (cm}^2\text{)}$$

La partie chauffée évacue cette puissance par conduction vers les parties froides du fil et par rayonnement. On peut donc s'attendre à des comportements thermiques différents entre le tungstène (bonne conductibilité, émissivité moyenne et produit  $\rho \cdot E$  élevé) et les 2 types de carbone (conductibilité mauvaise pour le carbone "pur", bonne pour la fibre, émissivité élevée et produit  $\rho \cdot E$  faible). On examinera chacun des 3 cas successivement et étudierons enfin le cas réel d'un profileur en tungstène soumis au faisceau de l'accélérateur CEBAF.

On peut toutefois remarquer préalablement que, compte tenu des diffusivités thermiques des matériaux considérés (au mieux de l'ordre de  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s), le temps caractéristique de diffusion de la chaleur sur la longueur du filament est de l'ordre de la seconde. Pour les géométries et vitesses de balayage envisagées, la durée d'exposition au

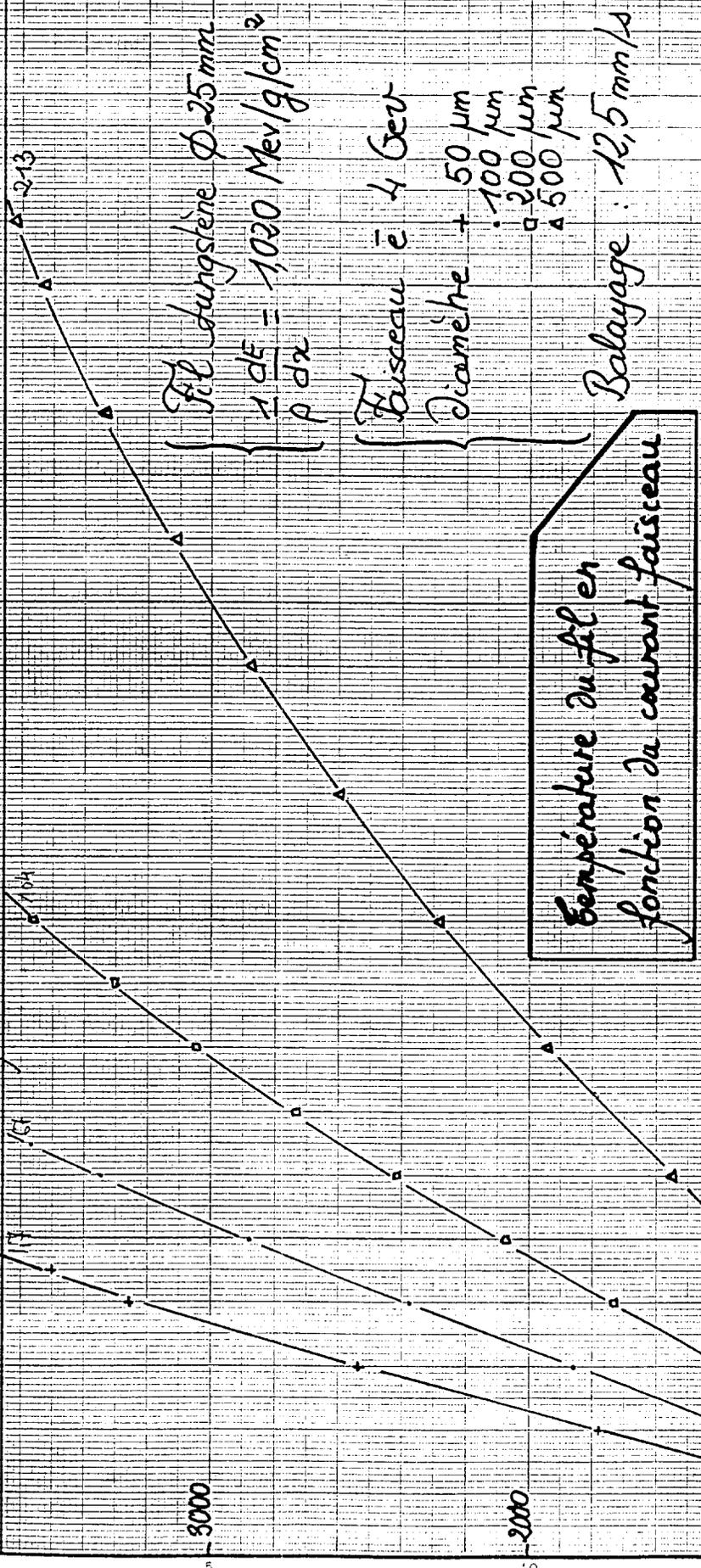


faisceau est de l'ordre de la dizaine de millisecondes, on peut donc déjà assurer que l'évacuation de chaleur par l'extrémité froide du fil n'a aucune incidence sur la température maximale atteinte et ne jouera éventuellement que sur la durée du refroidissement du filament après le balayage par le faisceau.

Figure n° 1

Température de fusion  $T_f = 3660 \text{ K}$

Kelvin



Diamètre faisceau variable Diamètre fil constant = 25 microns

Intensité (µA)	10	20	30	40	45	50	60	65	70	80	90	100
T. (K) Ø 50 µm	1022	1783	2537	3262	3606	-	-	-	-	-	-	-
T. (K) Ø 100 µm	802	1330	1862	2380	-	2877	3345	3569	-	-	-	-
T. (K) Ø 200 µm	-	1001	1365	1725	-	2074	2409	-	2726	3024	3303	3564

Diamètre faisceau = 500 microns Diamètre fil constant = 25 microns

Intensité (µA)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	210
T. (K) Ø 500 µm	712	1137	1550	1935	2284	2594	2869	3112	3328	3523	3614

(µA)

200

150

100

50

## A ) Cas du filament en tungstène

Les propriétés thermiques (conductibilité et capacité calorifique) sont fournies en annexe.

$$E = 1.020 \text{ Mev/g/cm}^2$$

$$\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$$

$$\varepsilon = 0.45 \text{ (émissivité)}$$

$$T_f = 3660 \text{ K (température de fusion)}$$

$$\lambda = 170 \text{ W/m.K (conductibilité à 300 K)}$$

### A-1) Étude du cas nominal

On suppose :

$$\text{diamètre du faisceau} : 100 \mu\text{m}$$

$$\text{diamètre du filament} : 25 \mu\text{m}$$

$$\text{vitesse de balayage} : 12.5 \text{ mm/s}$$

On a étudié la dépendance de la température maximale atteinte en fonction de l'intensité du courant du faisceau. Les résultats sont résumés sur la figure n°1. On y voit notamment que l'intensité maximale admissible est d'environ 67  $\mu\text{A}$ . On a tracé pour information sur la figure n°2 l'évolution de la température du point chaud en fonction du temps.

Sur la figure n° 3 on a tracé les évolutions normalisées suivantes : température du point chaud ( $T^*=T/T_{\text{max}}$ ), énergie déposée par le faisceau ( $E^*=E/E_{\text{max}}$  où  $E_{\text{max}}$  est l'énergie totale déposée à la fin du balayage), enthalpie de la partie du filament soumise au faisceau ( $H^*=H/E_{\text{max}}$ ), énergie évacuée de cette zone par conduction ( $C^*=C/E_{\text{max}}$ ) ou par rayonnement ( $R^*=R/E_{\text{max}}$ ). On a repris sur la figure n°4 les tracés précédents mais non plus pour ce qui concerne la seule zone chauffée mais la totalité du fil. On peut faire les remarques suivantes:

- c'est la **conduction solide qui est le mécanisme dominant de refroidissement de la partie chauffée** (cf. fig. n°3). Ce mécanisme est d'ailleurs particulièrement efficace puisque le calcul simple et pessimiste d'un échauffement adiabatique de la zone chauffée par le faisceau conduit à une intensité maximale admissible de 6  $\mu\text{A}$  environ,

- le comportement thermique du fil entier pendant la durée de chauffage (de  $t=0$  à 10 ms) est **quasiment adiabatique** (cf. fig. n°4) : environ 8% seulement de l'énergie déposée durant ces 10 ms est rayonnée . Compte tenu de la diffusivité thermique du tungstène, les profils de température s'étalent avec un temps caractéristique de l'ordre de 0.1 ms ( $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $D \approx 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $t \approx L^2/D \approx 0.1 \text{ ms}$ ), soit un temps significativement plus faible que la durée de chauffage. Cela freine l'augmentation de

X1.E3

4.00

*Kelvin*

3.50

3.00

2.50

2.00

1.50

1.00

.50

.00

*Figure n° 2*

*secondes*

1 2 4 6 1 2 4 6 1 2 4 6 1 2 4 6 1 2 4 6 1

10E-4

10E-3

10E-2

10E-1

10E0

10E1

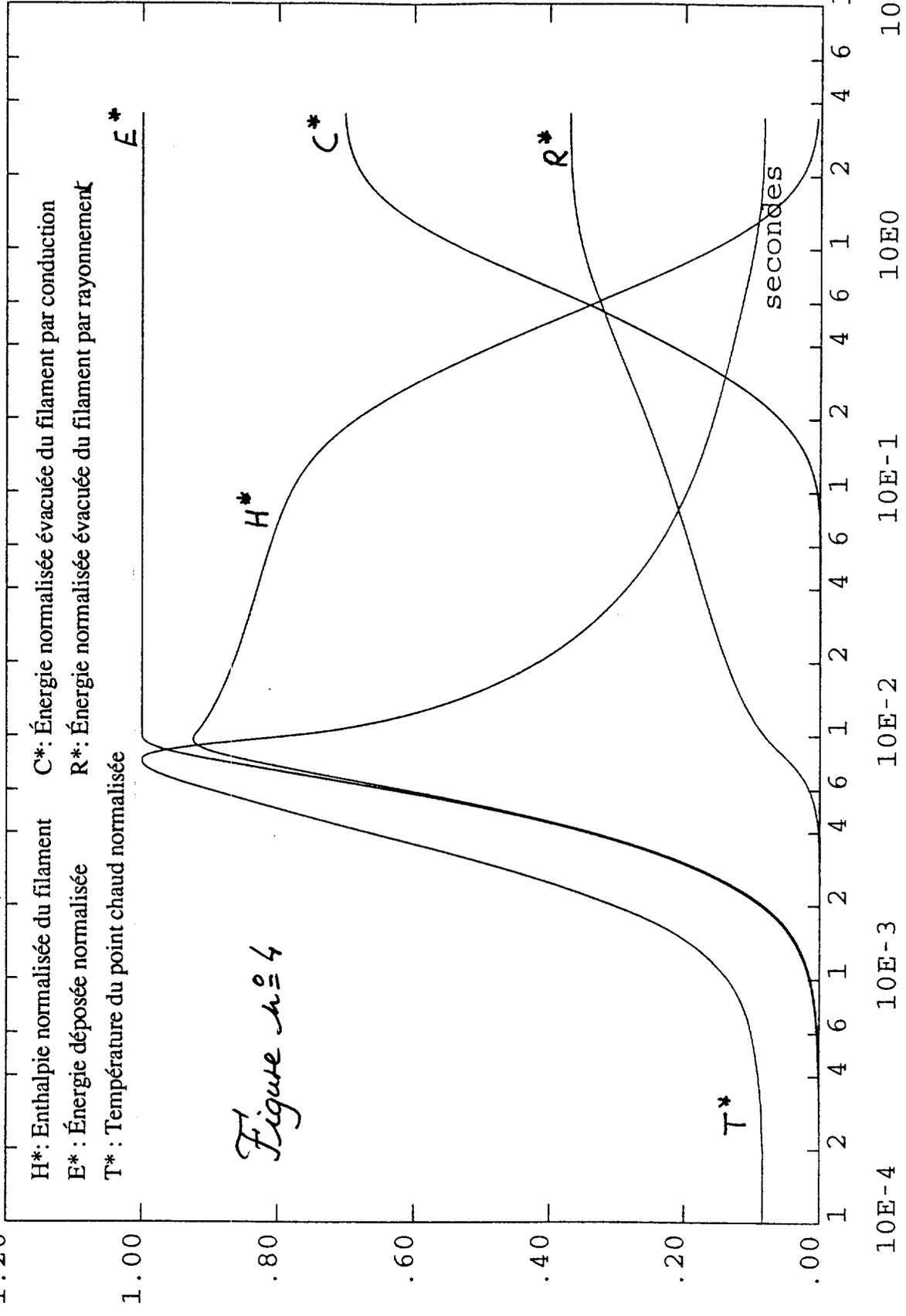
TUNGSTENE I = 65 microA / FAISCEAU 100 microns / FIL 25 microns / VITESSE=12.5 mm/;



1.20

H\*: Enthalpie normalisée du filament    C\*: Énergie normalisée évacuée du filament par conduction  
 E\*: Énergie déposée normalisée        R\*: Énergie normalisée évacuée du filament par rayonnement  
 T\*: Température du point chaud normalisée    E\*

*Figure n°4*



TUNGSTENE I = 65 microA / FAISCEAU 100 microns / FIL 25 microns / VITESSE=12.5 mm/

température de la zone chauffée et donc limite la contribution du rayonnement qui, variant comme la puissance quatrième de la température, est prépondérant aux températures élevées. C'est ce que montre la figure n°3 où l'on note que la quasi-totalité de la puissance déposée est évacuée de la zone chauffée par conduction et donc ne contribue pas à l'augmentation d'enthalpie donc de température de la dite zone.

- les deux tiers environ de cette énergie sont évacués par conduction par l'extrémité du fil supposée thermalisée à 300 K, le tiers restant étant évacué par rayonnement. Le rayonnement n'influe pas sur la température maximale atteinte mais permet de diminuer le temps de retour à la température ambiante après exposition au faisceau (2-3 secondes).

#### A-2) Influence du diamètre du faisceau

On se place dans le cas d'un diamètre de filament de 25  $\mu\text{m}$  et on étudie, les cas 50, 100  $\mu\text{m}$  (cas nominal § A-1), 200 et 500  $\mu\text{m}$ . Les résultats sont résumés sur la figure n°1 et dans le tableau ci-dessous. Comme attendu, on constate un **effet significatif** du diamètre du faisceau. En augmentant la taille du faisceau on diminue certes, pour une même valeur de température au centre les gradients thermiques et donc la puissance évacuée par conduction mais cet effet est largement compensé par la diminution de l'énergie volumique déposée.

Ø fil Tungstène 25  $\mu\text{m}$     Ø faisceau variable    Vitesse de balayage V = 12.5 mm/s

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	10	20	30	40	45	50	60	65	70	80	90	100
T. (K) Ø 50 $\mu\text{m}$	1022	1783	2537	3262	3606	-	-	-	-	-	-	-
T. (K) Ø 100 $\mu\text{m}$	802	1330	1862	2380	-	2877	3345	3569	-	-	-	-
T. (K) Ø 200 $\mu\text{m}$	-	1001	1365	1725	-	2074	2409	-	2726	3024	3303	3564

Ø fil Tungstène 25  $\mu\text{m}$     Ø faisceau = 500  $\mu\text{m}$     Vitesse de balayage V = 12.5 mm/s

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	210
T. (K) Ø 500 $\mu\text{m}$	712	1137	1550	1935	2284	2594	2869	3112	3328	3523	3614

#### A-3) Influence du diamètre du filament.

On fixe le diamètre du faisceau à 100  $\mu\text{m}$  et on étudie les cas 10, 25 (cas nominal § A-1) et 50  $\mu\text{m}$ . Les résultats sont résumés sur la figure n° 5. On constate une **incidence relativement faible** du diamètre du filament sur les échauffements calculés. En modifiant la taille du filament on modifie la puissance déposée à chaque instant par l'interaction avec le faisceau proportionnellement au volume chauffé donc à la section du filament mais on modifie dans le même rapport la puissance évacuée par conduction vers les parties froides. La température n'est donc que faiblement affectée par cette modification.

Kelvin

Température de fusion W 3660 K

Figure n° 5

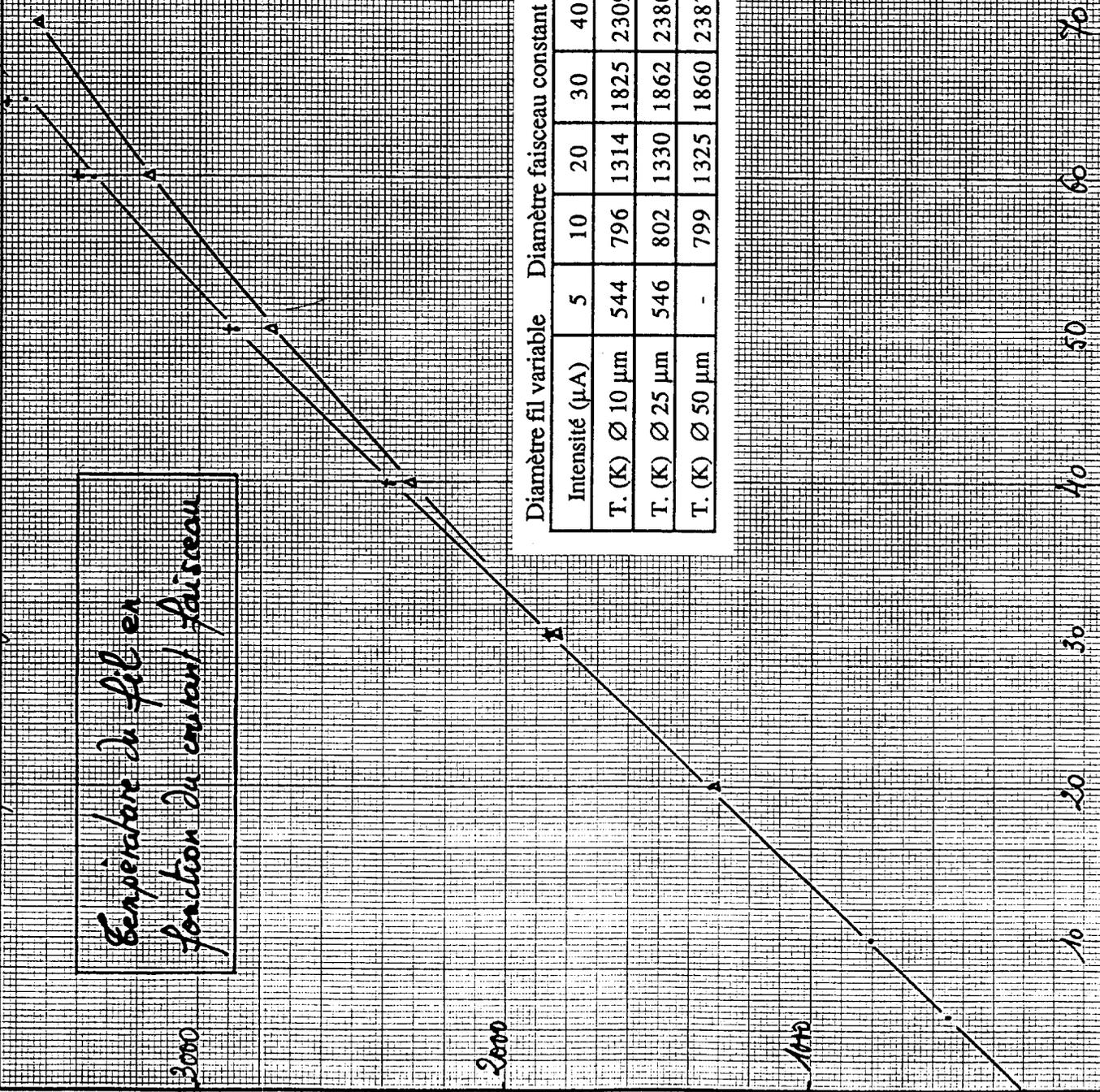
Température du fil en fonction du courant faisceau

Fil tungstène

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\Delta} = 1020 \text{ Kev/g/cm}^2$$

Diamètre  
50 μm  
35 μm  
10 μm

Faisceau 4 GeV  $\phi$  100 μm  
Balayage 12,5 mm/s

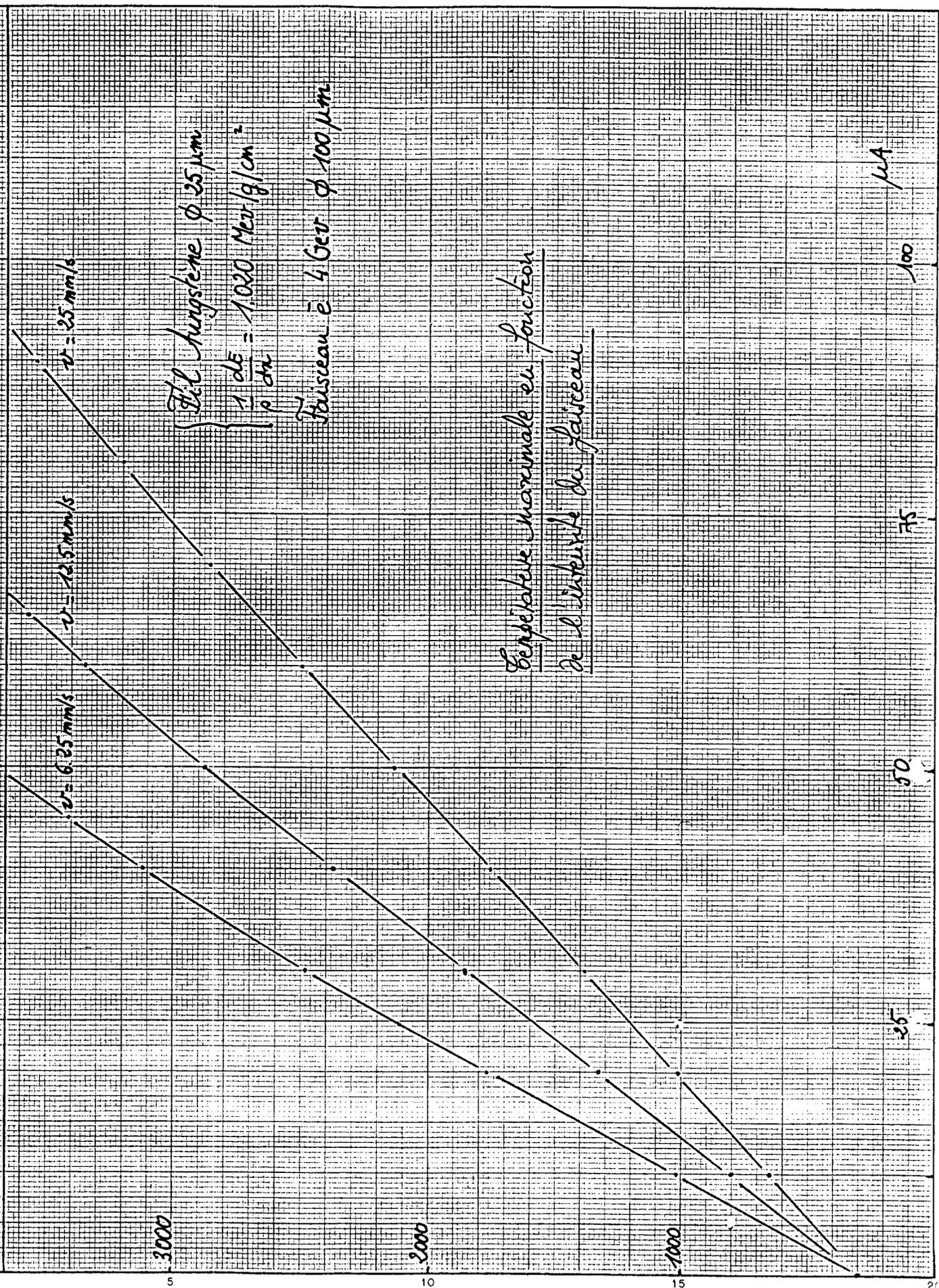


Diamètre fil variable Diamètre faisceau constant = 100 microns

Intensité (μA)	5	10	20	30	40	50	60	65	70
T. (K) $\phi$ 10 μm	544	796	1314	1825	2309	2756	3162	-	3529
T. (K) $\phi$ 25 μm	546	802	1330	1862	2380	2877	3345	3569	-
T. (K) $\phi$ 50 μm	-	799	1325	1860	2387	2901	3397	3637	-

Figure n° 6

Kébir  
 $T_f = 3660 K$



$\mu\text{A}$

100

75

50

25

#### A-4) Influence de la vitesse de balayage.

On se place dans le cas d'un diamètre de filament de 25  $\mu\text{m}$  et d'un diamètre de faisceau de 100  $\mu\text{m}$ . On étudie les cas 6.25 mm/s, 12.5 mm/s (cas nominal § A-1) et 25 mm/s. Les résultats sont résumés sur la figure n° 6 et dans le tableau ci-dessous. On constate un effet comparable à celui constaté lors de la modification du diamètre du faisceau : la multiplication ou la division par 2 de la vitesse de balayage a peu ou prou le même effet que la modification du diamètre du faisceau dans le même rapport. Dans la gamme des valeurs explorées, c'est l'énergie déposée par unité de volume lors d'un balayage qui détermine au premier ordre la température maximale atteinte. Pour des vitesses de balayage très élevées, donc des durées d'exposition au faisceau très faibles, ceci n'est plus valable car les mécanismes d'évacuation de la chaleur par conduction n'ont pas le temps de se mettre en place (temps caractéristique de l'ordre de 10 ms). Notons qu'il faudrait pour cela des vitesses de balayage de l'ordre du m/s.

Ø fil Tungstène 25  $\mu\text{m}$     Ø faisceau = 100  $\mu\text{m}$     Vitesse de balayage V variable

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	10	20	30	40	45	50	60	65	70	80	90
T. (K) 6.25 mm/s	1023	1771	2479	3119	3410	3683	-	-	-	-	-
T. (K) 12.5 mm/s	802	1330	1862	2380	-	2877	3345	3569	-	-	-
T. (K) 25.0 mm/s	648	1012	1385	1760	-	2131	2498	-	2856	3204	3543



$T_f = 3825 K$

Kelvin

Figure n° 17

3000

2000

1000

300

128

$\phi 34 \mu m$

$\phi 7 \mu m$

Fil de carbone

$\phi 7 \mu m \quad \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dn} = 1.305 \text{ MeV/cm}^2$

$\phi 34 \mu m \quad \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dn} = 1.376 \text{ MeV/cm}^2$

vitesse de balayage = 12.5 mm/s

Faisceau  $\bar{e}$  à 60V  $\phi 100 \mu m$

Température maximale en fonction de l'intensité du faisceau

50

100

150

200

$\mu A$

## B ) Cas du carbone

Les propriétés thermiques sont fournies en annexe, on notera que, compte tenu de la forte dispersion des mesures de conductibilité relevées dans la littérature, on a retenu pour le calcul des valeurs pessimistes. Dans tout ce paragraphe le diamètre du faisceau est fixe et vaut 100  $\mu\text{m}$ .

$$E = 1.305 \text{ Mev/g/cm}^2 \text{ (filament } \varnothing 7 \mu\text{m)}$$

$$E = 1.376 \text{ Mev/g/cm}^2 \text{ (filament } \varnothing 34 \mu\text{m)}$$

$$\rho = 2.24 \text{ g/cm}^3$$

$$\varepsilon = 0.80 \text{ (émissivité)}$$

$$T_f = 3823 \text{ K (température de fusion)}$$

$$\lambda = 1.7 \text{ W/m.K (conductibilité à 300 K)}$$

### B-1) Étude du cas nominal

On suppose :

diamètre du faisceau : 100  $\mu\text{m}$

diamètre du filament : 7 ou 34  $\mu\text{m}$

vitesse de balayage : 12.5 mm/s

Les résultats sont résumés sur la figure n° 7 et dans les tableaux ci-dessous. On constate que les intensités maximales admissibles sont plus élevées que dans le cas du tungstène : 128  $\mu\text{A}$  (diamètre 34  $\mu\text{m}$ ) et 220  $\mu\text{A}$  (diamètre 7  $\mu\text{m}$ ). L'amélioration de l'émissivité d'un facteur 2 et surtout la diminution de l'énergie déposée ( $\rho.E$ ) d'un facteur 6 environ compensent donc largement la baisse de conductibilité thermique (de 1 à 2 ordres de grandeur plus faible que pour le tungstène).

$\varnothing$  fil Carbone 34  $\mu\text{m}$   $\varnothing$  faisceau = 100 microns Vitesse de balayage = 12.5 mm/s

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
T. (K) $\varnothing$ 34 $\mu\text{m}$	809	1186	1522	1832	2120	2389	2640	2875	3095	3302	3497	3680

$\varnothing$  fil Carbone 7  $\mu\text{m}$   $\varnothing$  faisceau = 100 microns Vitesse de balayage = 12.5 mm/s

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
T. (K) $\varnothing$ 7 $\mu\text{m}$	1132	1697	2143	2495	2780	3015	3216	3391	3545	3683	3808

On a tracé sur les figures n° 8 et 9 les température et énergies normalisées avec les mêmes conventions qu'au § A-1) et dans le cas du diamètre de 7  $\mu\text{m}$ . On constate un comportement thermique très différent du tungstène :

Kelvin

1.20

T\* : Température du point chaud normalisée

E\* : Énergie déposée normalisée

H\* : Enthalpie normalisée de la zone chauffée

C\* : Énergie normalisée évacuée de la zone chauffée par conduction

R\* : Énergie normalisée évacuée de la zone chauffée par rayonnement

*Figure n° 8*

E\*

T\*

C\*

R\*

H\*

secondes

1

2

4

6

1

2

4

6

1

2

4

6

10E-4

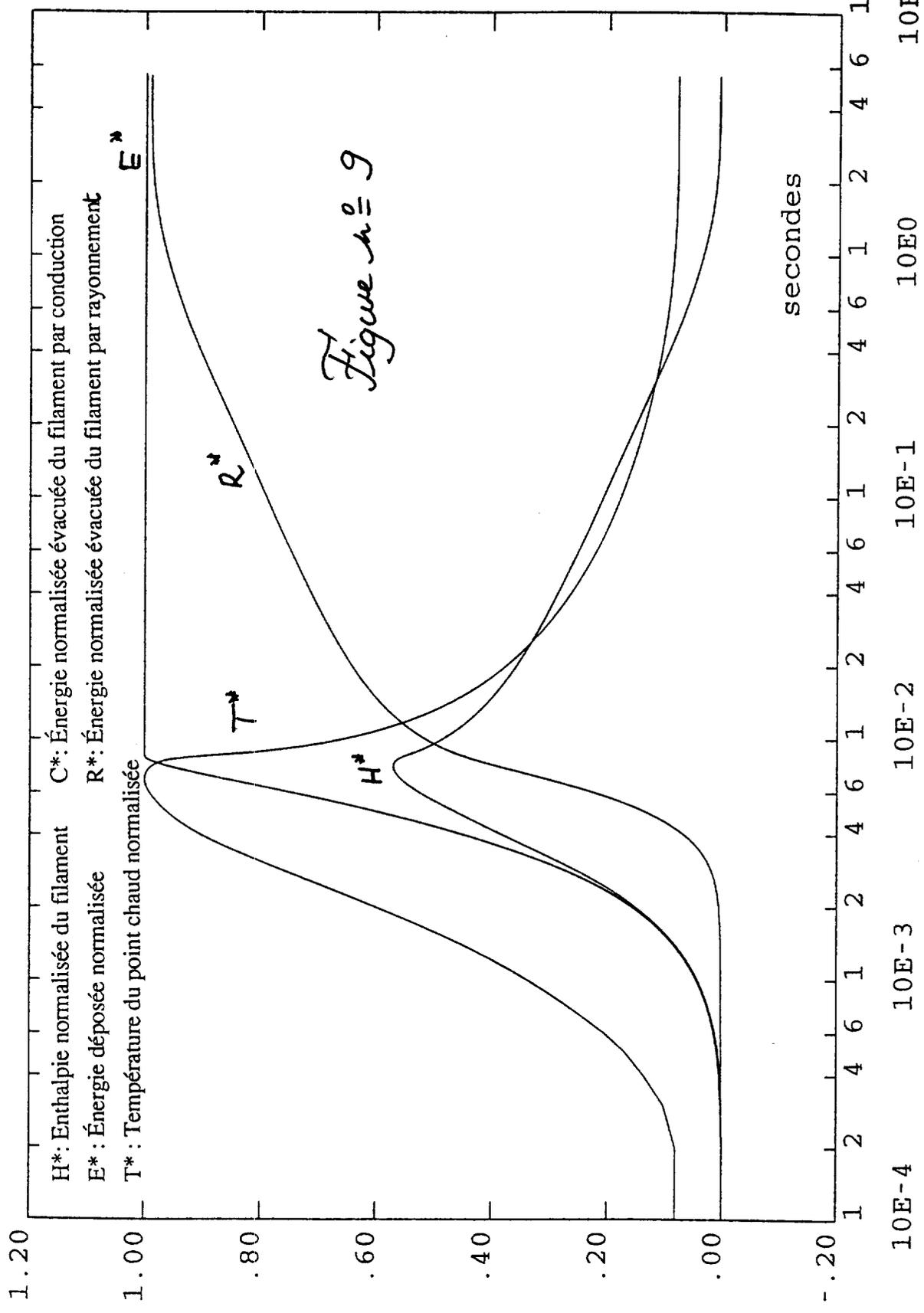
10E-3

10E-2

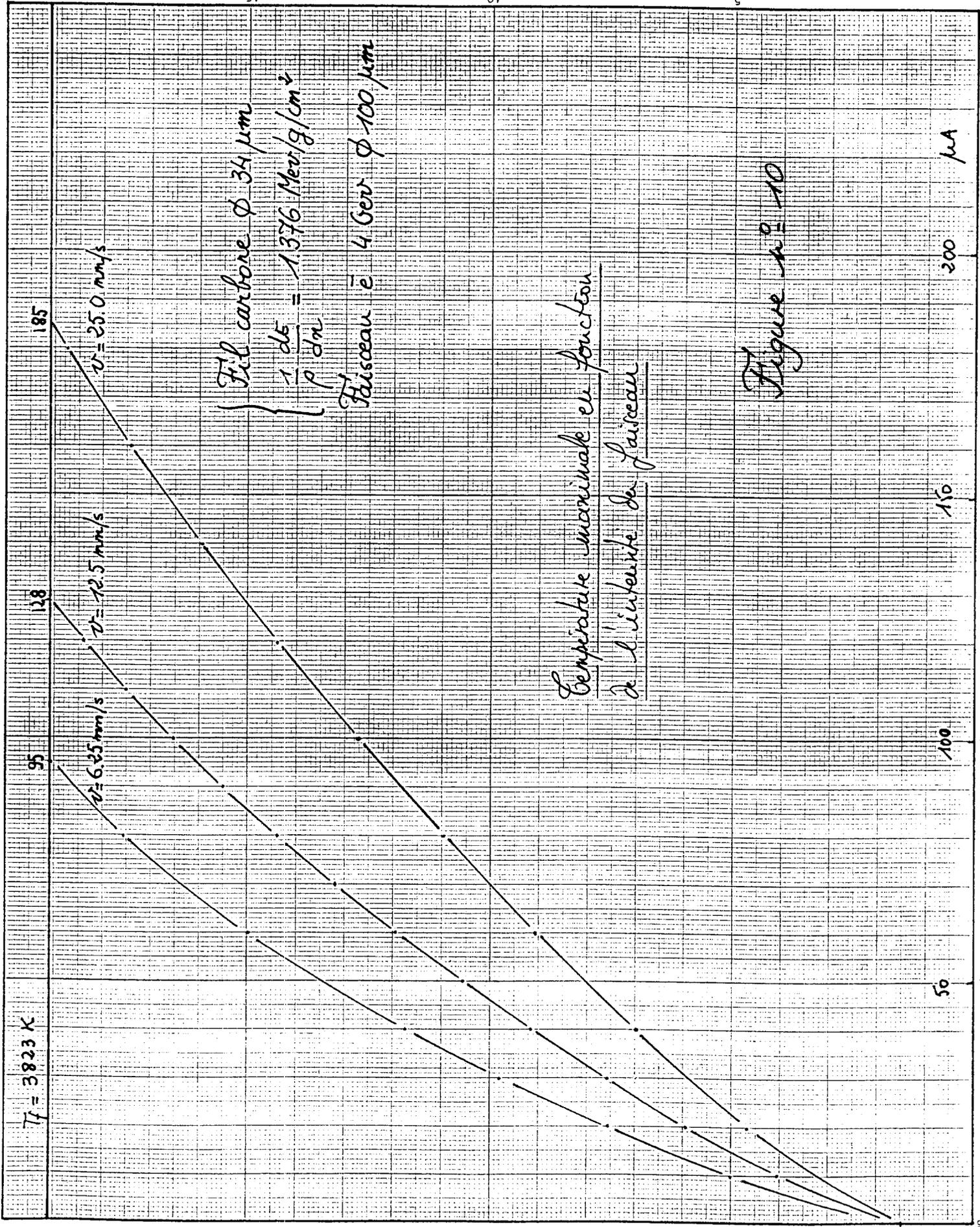
10E-1

CARBONE I = 200 microA / FAISCEAU 100 microns / FIL 7 microns / VITESSE=12.5 mm/s

KELVIN



CARBONE I = 200 microns / FAISCEAU 100 microns / FIL 7 microns / VITESSE=12.5 mm/s



50

100

150

200

$\mu\text{A}$

5

10

15

20

- l'évacuation de la puissance par **rayonnement** contribue au refroidissement de la zone chauffée dans les mêmes proportions que la conduction et l'augmentation d'enthalpie. Du fait de la mauvaise conductibilité thermique du carbone, le temps caractéristique de diffusion de la chaleur le long de la zone chauffée est cette fois-ci du même ordre de grandeur que la durée de chauffage, les profils de température s'étalent donc moins rapidement ce qui entraîne une augmentation d'enthalpie de la zone chauffée et une contribution du rayonnement plus importantes que pour le tungstène.

- le comportement thermique du fil entier pendant la durée de chauffage **n'est pas adiabatique**; à la fin de celle-ci la moitié de l'énergie déposée a déjà été évacuée par rayonnement,

- la quasi-totalité de l'énergie déposée est évacuée par rayonnement, la conduction n'intervient que dans l'étalement de la zone chaude. La durée de refroidissement (figure n° 8) est plus courte que pour le tungstène (1 seconde environ),

- l'importance du rayonnement dans le comportement thermique du filament implique une dépendance significative de l'élévation de température selon le diamètre du filament (figure n° 7) puisque l'énergie déposée varie quadratiquement avec le diamètre alors que l'énergie évacuée par rayonnement en dépend linéairement.

#### B-2) Influence de la vitesse de balayage.

Les résultats sont résumés sur les figures n° 10 ( $\varnothing$  34  $\mu$ m) et 11 ( $\varnothing$  7  $\mu$ m), et dans les tableaux ci-dessous. On constate que pour le fil "épais" les élévations de température sont, comme attendu, plus élevées que pour le fil fin.

$\varnothing$  fil Carbone 7  $\mu$ m     $\varnothing$  faisceau = 100 microns    Vitesse de balayage V variable

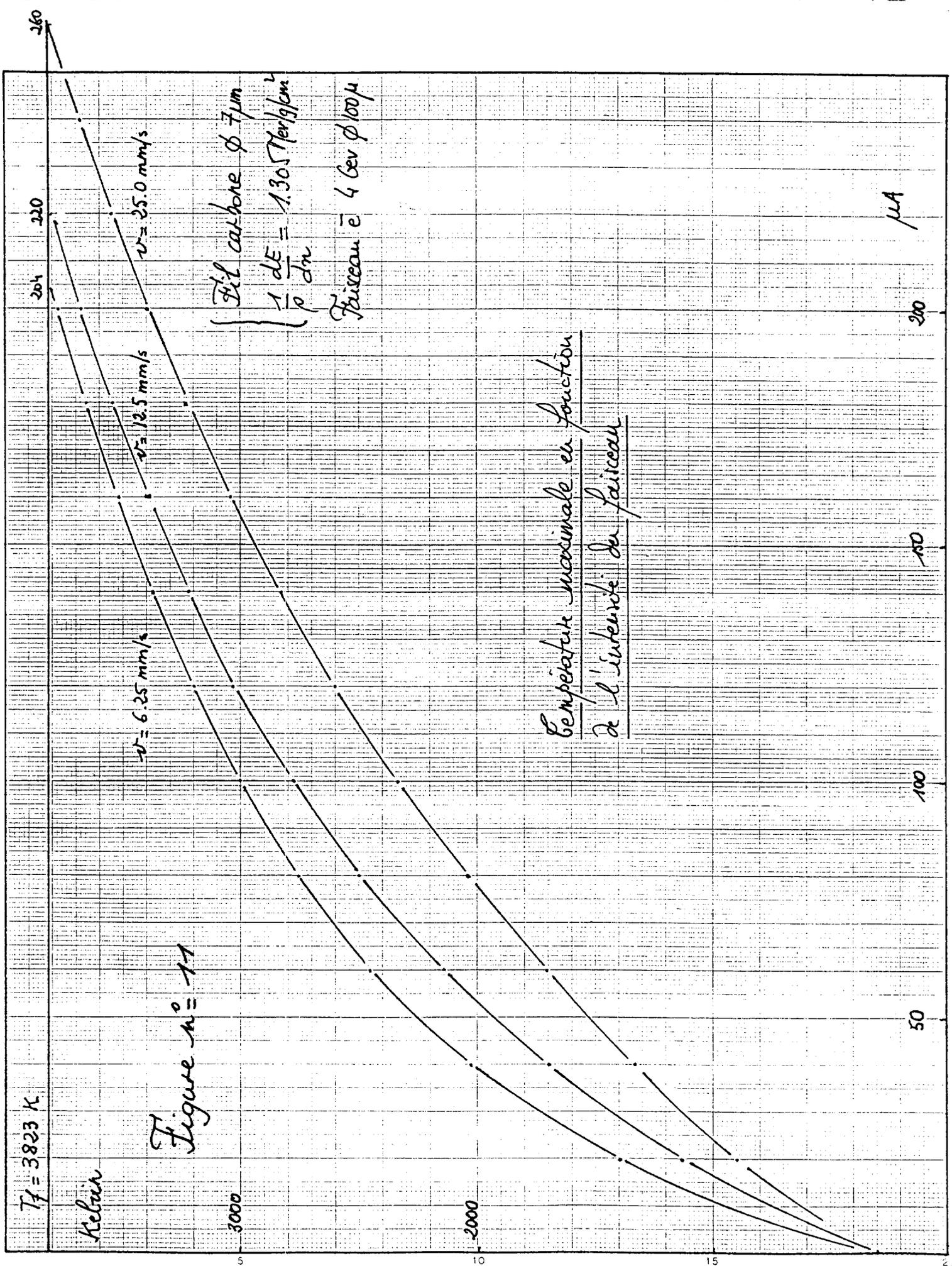
Intensité ( $\mu$ A)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
T. (K) V = 25 mm/s	896	1328	1705	2040	2337	2600	2832	3040	3226	3393	3546
T. (K) V = 6.25 mm/s	1398	2027	2448	2755	2997	3198	3371	3523	3659	3783	-

Intensité ( $\mu$ A)	240	260
T. (K) V = 25 mm/s	3683	3808

$\varnothing$  fil Carbone 34  $\mu$ m     $\varnothing$  faisceau = 100 microns    Vitesse de balayage V variable

Intensité ( $\mu$ A)	10	20	40	60	80	95	100	120	140	160	180
T. (K) V = 25 mm/s	-	930	1394	1811	2195	-	2551	2882	3191	3480	3748
T. (K) V = 6.25 mm/s	1004	1515	2347	2992	3505	3822					

On constate que le fil de petit diamètre est moins sensible à la variation de la vitesse de balayage que le fil de gros diamètre, ce qui est caractéristique d'un phénomène dominé par le rayonnement. En effet, une modélisation simplifiée permettant de



déterminer le courant maximal consiste à écrire que l'énergie totale déposée par le faisceau est la somme de la marge enthalpique de la zone chauffée entre 300 K et la température de fusion et de l'énergie rayonnée pendant le balayage par le faisceau. On néglige d'une part l'énergie évacuée par conduction et d'autre part la période transitoire d'augmentation de la température. Cette hypothèse se justifiant dès lors que le rayon du filament est "suffisamment" petit.

$$W_f \cdot \tau \cdot S = \Delta H \cdot S + W_r \cdot \tau \cdot P$$

Où :

-  $\tau$  est la durée de balayage ;  $\tau = D/v$  : diamètre faisceau/vitesse de balayage,  $D = 100 \mu\text{m}$ ,

-  $W_f$  est la puissance volumique déposée par le faisceau ;  $W_f$  est proportionnelle à l'intensité du courant à diamètre de faisceau fixé, dans notre cas  $W_f (\text{W/m}^3) = 3.71 \cdot 10^{10} \cdot I (\mu\text{A})$

-  $W_r$  est la puissance rayonnée par le filament à  $T = 3800 \text{ K}$ ,  $W_r (\text{W/m}^2) = 9.46 \cdot 10^6$

-  $\Delta H$  est la marge enthalpique du carbone entre 300 et 3800 K,  $\Delta H (\text{J/m}^3) = 1.16 \cdot 10^{10}$

-  $S$  et  $P$  sont respectivement la section du filament et le périmètre du filament.

On obtient finalement si  $R$  est le rayon du filament :

$$I = 4290 \cdot v + 510 \cdot 10^{-6} / R$$

Cette modélisation simplifiée indique que pour des valeurs de rayon de l'ordre du micron et des vitesses de l'ordre de la dizaine de mm/s, la détermination du courant maximal admissible est dominée par le second terme de l'égalité donc indépendante de la vitesse de balayage. Elle conduit aux courants maximaux admissibles  $I_{\text{max}}^*$  notifiés dans le tableau ci-dessous et comparés aux courants maximaux  $I_{\text{max}}$  calculés par éléments finis.

Vitesse (mm/s)	6.25		12.5		25.0	
$\varnothing$ fil Carbone ( $\mu\text{m}$ )	7	34	7	34	7	34
$I_{\text{max}}$ ( $\mu\text{A}$ )	204	95	220	128	260	185
$I_{\text{max}}^*$ ( $\mu\text{A}$ )	173	57	199	84	253	137
$(I_{\text{max}} - I_{\text{max}}^*) / I_{\text{max}}$	15 %	40%	9.5%	34%	2.7%	26%

On notera que l'accord est d'autant meilleur que le rayon est petit ou la vitesse de balayage élevée. Ces deux paramètres jouent sur la contribution de la conductibilité thermique : pour que le mécanisme d'évacuation de la chaleur par conduction soit

efficace, il faut d'une part que la section soit élevée et d'autre part que ce mécanisme opère en un temps significativement plus faible que la durée de chauffage. Hors, dans le cas d'une vitesse de 25 mm/s et d'un rayon de 7 microns, la durée de chauffage est de l'ordre de la milliseconde alors que le temps caractéristique de diffusion de la chaleur sur la longueur de la zone chauffée est de l'ordre de 10 ms (la diffusivité du carbone étant de l'ordre de  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s aux températures considérées).

### C ) Cas de la fibre de carbone

Nous ne disposons pas des propriétés thermiques à toutes températures de la fibre de carbone. Seule la valeur de la conductibilité longitudinale à 300 K fournie par le fabricant est connue. Elle vaut  $\lambda = 520 \text{ W/mK}$ . Par ailleurs ce milieu est orthotrope : la conductibilité longitudinale est significativement plus élevée que la conductibilité transverse (d'un facteur 300 environ).

Nous avons donc normalisé des courbes de conductivités longitudinale et orthogonale connues d'un graphite pyrolitique sur la valeur à 300 K (cf. annexe). On notera que contrairement au carbone, la conductibilité thermique de la fibre décroît avec la température.

On a supposé par ailleurs que la capacité calorifique et l'émissivité étaient celles du carbone, ainsi que la perte d'énergie lors de la traversée du faisceau.

Nous avons limité notre étude au cas :

- Ø faisceau = 100 microns
- Vitesse de balayage = 12.5 mm/s
- Ø filament = 7 ou 34 microns

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous et sur la figure n° 12.

Fibre de Carbone 7 ou 34  $\mu\text{m}$  Ø faisceau = 100  $\mu\text{m}$  Vitesse de balayage = 12.5 mm/s

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
T. (K) Ø 7 $\mu\text{m}$	408	522	642	765	896	1032	1172	1317	1465	1617	1772
T. (K) Ø 34 $\mu\text{m}$	419	548	685	831	986	1150	1323	1505	1696	1897	2104

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	240	260	280	300
T. (K) Ø 7 $\mu\text{m}$	1929	2086	2242	2396
T. (K) Ø 34 $\mu\text{m}$	2321	2542	2767	2989

On a également tracé sur les figures n° 13 et 14 les évolutions de la température du point chaud et des énergies normalisées. On peut faire les remarques suivantes :

- l'emploi de la fibre de carbone conduit à des élévations de température significativement plus faibles que celles calculées pour le tungstène et le carbone,
- le comportement thermique de la zone chauffée s'apparente à celui du tungstène, il est dominé par la **conduction longitudinale**, la relative mauvaise valeur de la conductibilité transverse n'étant pas gênante du fait des faibles diamètres considérés,

Figure n° 12

Kelvin

Fil fibre de carbone

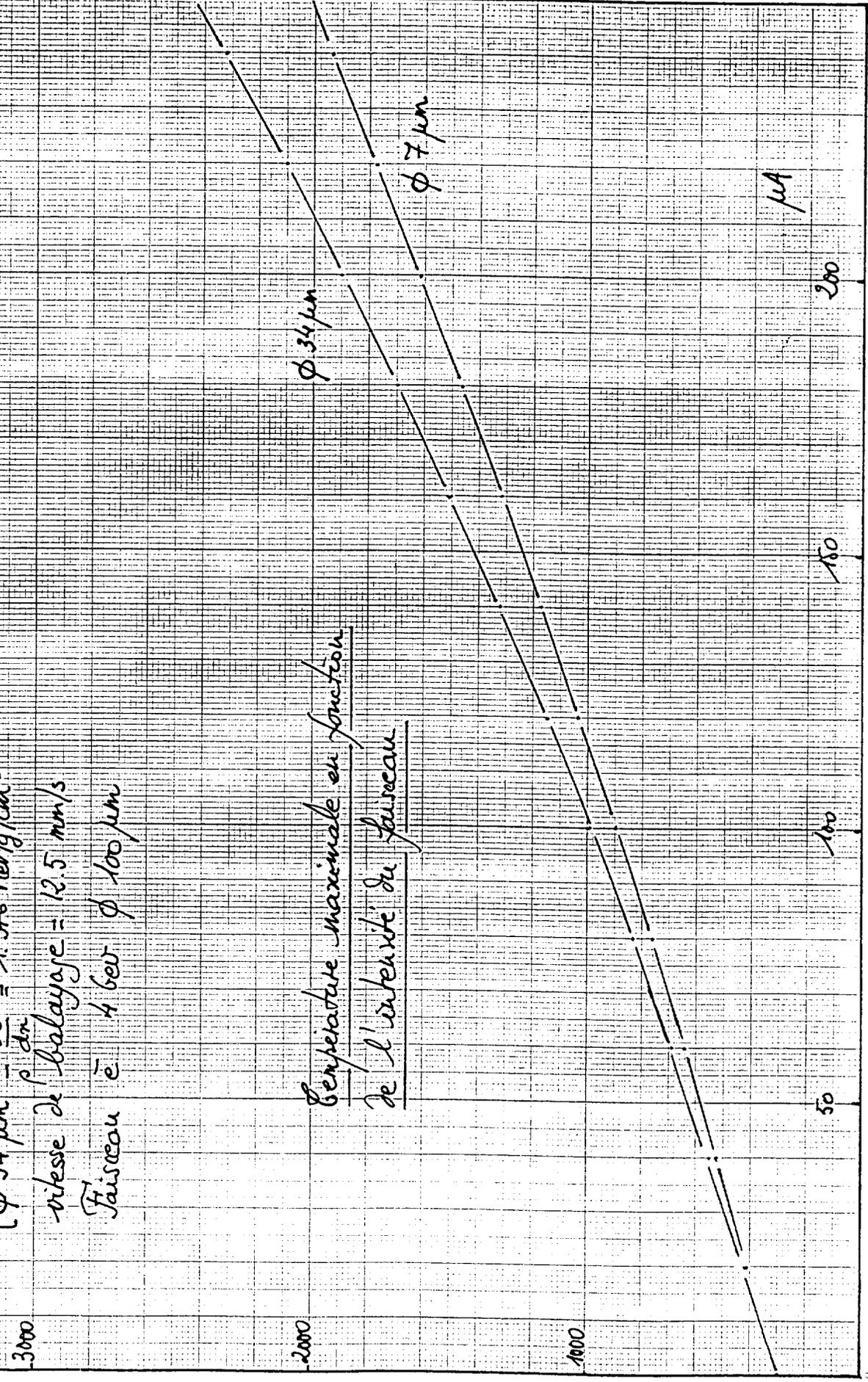
$$\left\{ \begin{array}{l} \phi \ 7 \ \mu\text{m} \\ \phi \ 34 \ \mu\text{m} \end{array} \right. \quad \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dn} = 1.305 \text{ MeV/g/cm}^2$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dn} = 1.376 \text{ MeV/g/cm}^2$$

vitesse de balayage = 12.5 mm/s

Faisceau  $\bar{e}$  4 GeV  $\phi$  100  $\mu\text{m}$

Température maximale en fonction de l'intensité du faisceau



- de même, le fil entier se comporte de façon **quasi-adiabatique** pendant la période de chauffage où 4% seulement de l'énergie déposée est évacuée par rayonnement,

- les contributions de la conduction et du rayonnement au refroidissement à 300 K du filament sont comparables, la durée de cette thermalisation est de l'ordre de la demie-seconde.

On notera que la bonne émissivité supposée de la fibre n'intervient ici que dans la vitesse de refroidissement et très peu dans la détermination de la température maximale. L'explication est la même que dans le cas du tungstène : une bonne diffusivité thermique conduit à un étalement rapide des profils de température et donc limite la contribution du rayonnement dans la détermination de la température maximale.

Kelvin

1.20

1.00

.80

.60

.40

.20

.00

-.20

T\* : Température du point chaud normalisée

E\* : Énergie déposée normalisée

H\* : Enthalpie normalisée de la zone chauffée

C\* : Énergie normalisée évacuée de la zone chauffée par conduction

R\* : Énergie normalisée évacuée de la zone chauffée par rayonnement

Figure n° 13

E\*

C\*

T\*

H\*

R\*

secondes

1

2

4

6

1

2

4

6

1

2

4

6

10E-4

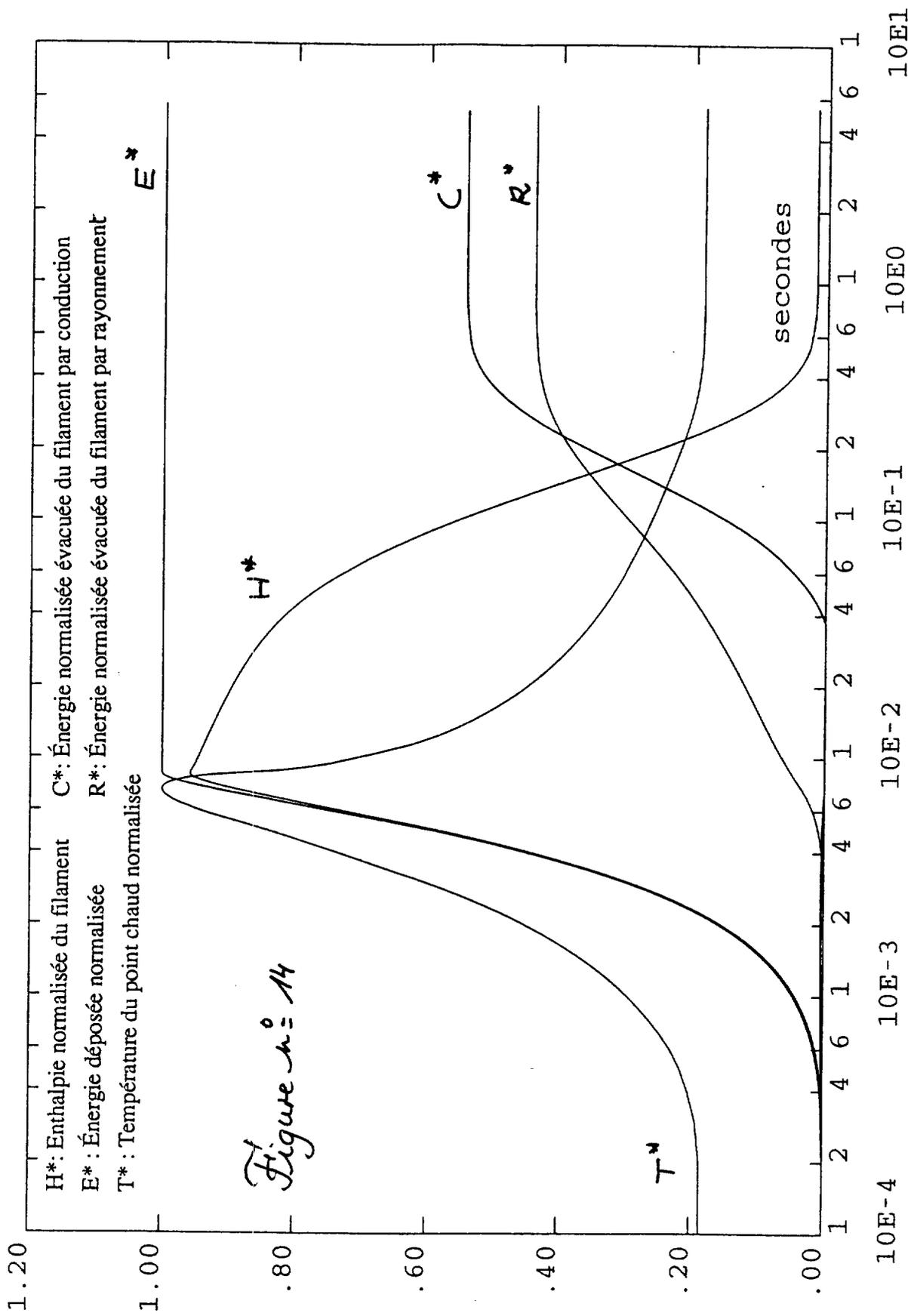
10E-3

10E-2

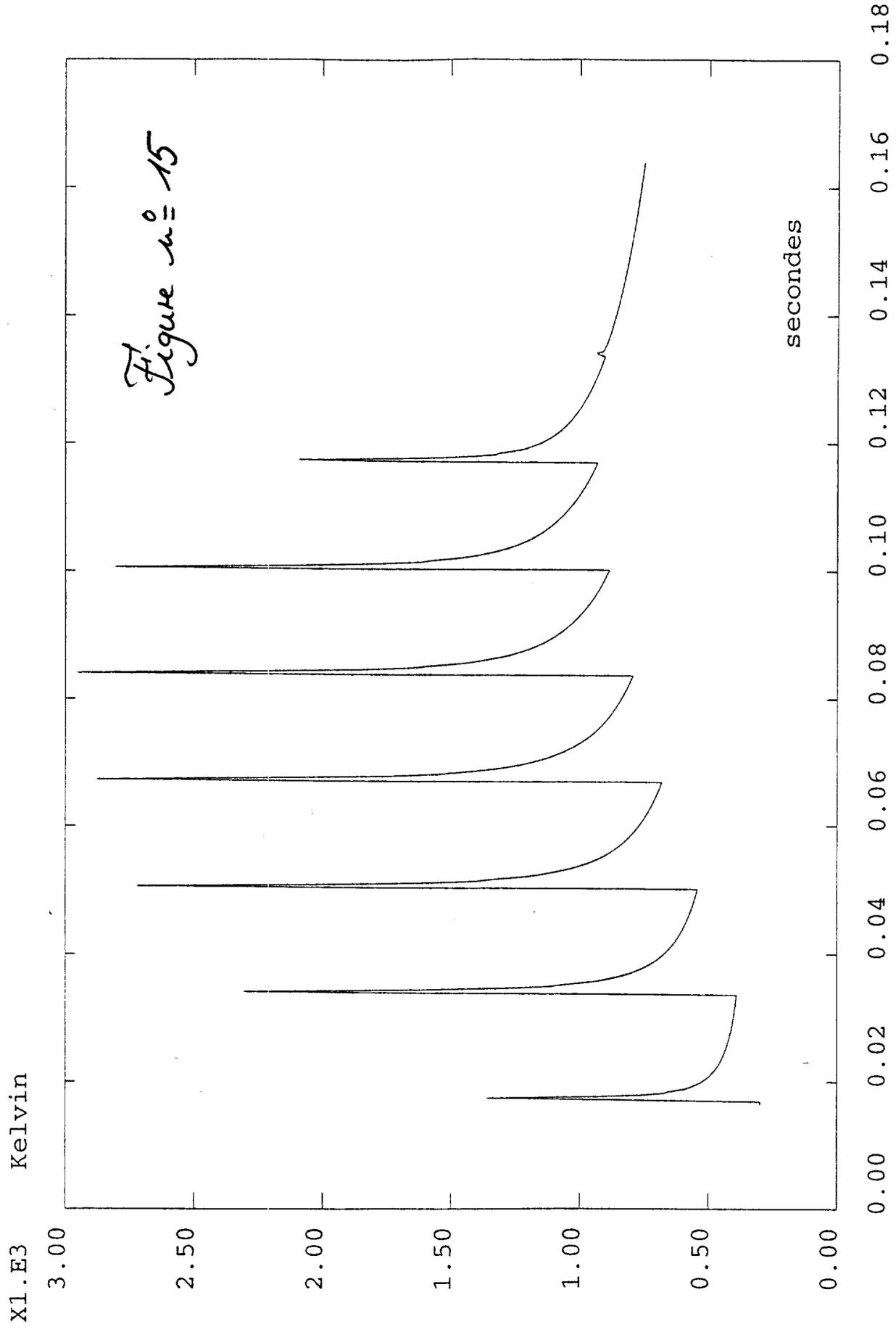
10E-1

FIBRE C / 200 microA / FAISCEAU=100 MIC / FIL=7 microns / VITESSE=12.5 MM/S

KELVIN



FIBRE C / 200 microA / FAISCEAU=100 MIC / FIL=7 microns / VITESSE=12.5 MM/S



tungstene dia. 21 microns /  $T_{max}=f(t)$  / 0.90 mm/s / I = 300.00 microA pulse

## D ) Cas particulier

On s'intéresse dans ce paragraphe à la modélisation du comportement thermique d'un profileur existant et soumis au faisceau de 4 GeV de CEBAF. Il s'agit d'un filament de tungstène de diamètre 21  $\mu\text{m}$ . Deux modes de fonctionnement sont à envisager :

- faisceau continu, vitesse de balayage = 15 mm/s
- faisceau pulsé, vitesse de balayage = 0.9 mm/s

### D-1) faisceau continu

L'intensité maximale admissible est de 74  $\mu\text{A}$ . Cette valeur est peu différente de la valeur obtenue dans le §A-1. On a vu que pour le tungstène, le diamètre du filament importait peu. La vitesse de balayage est légèrement plus élevée que la vitesse de 12.5 mm/s envisagée dans le §A-1, ce qui est bien sûr favorable. On constatera, comme attendu pour de faibles variations de vitesse, que le terme ( $I_{\text{max}}^2/\text{vitesse}$ ) est conservé entre 12.5 et 15 mm/s.

Les résultats complets sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Ø fil Tungstène 21  $\mu\text{m}$     Ø faisceau = 100  $\mu\text{m}$     Vitesse de balayage 15 mm/s

Intensité ( $\mu\text{A}$ )	10	20	30	40	50	60	70	74
T. (Kelvin)	755	1234	1717	2194	2654	3093	3508	3667

### D-2) faisceau pulsé

La fréquence est de 60 Hz, le cycle utile de 1.5%. Les pulses de courant durent donc 250 microsecondes et les fronts sont espacés de 16.67 ms. Ce mode de fonctionnement est thermiquement très favorable puisque la durée de 16.42 ms séparant chaque pulse est de 2 ordres de grandeur plus élevée que le temps caractéristique de diffusion de la chaleur (0.1 ms environ) le long de la zone chauffée (100  $\mu\text{m}$ ) : le filament a donc le temps de se refroidir entre deux pulses.

Nous avons étudié le cas d'un faisceau de 300  $\mu\text{A}$  crête (jamais réalisé en pratique). La figure n°15 indique l'évolution de la température du point chaud. La température maximale atteinte est de 2954 K.

## CONCLUSION

L'étude thermique montre comme attendu des comportements différents selon les matériaux employés tant pour ce qui concerne la phase de chauffage par le faisceau que la phase de refroidissement après balayage.

Dans le cas des matériaux possédant une **bonne conductibilité thermique** (tungstène et fibre de carbone), les profils de température s'étalent rapidement pendant et immédiatement après la période de balayage par le faisceau, ce qui inhibe l'évacuation de puissance par rayonnement pendant cette période. De fait on peut considérer dans ce cas, que l'échauffement du filament est **adiabatique**.

En revanche, dans le cas du carbone, mauvais conducteur, les profils de température sont plus étroits et ne s'étalent pas rapidement. Son émissivité étant élevée, l'évacuation de puissance par rayonnement est très efficace et l'échauffement du filament n'est plus adiabatique : la moitié environ de l'énergie déposée a déjà rayonnée lorsque le balayage se termine.

Le **tungstène**, en dépit d'une bonne conductibilité thermique est desservi par une énergie déposée par le faisceau élevée ( $\approx 20$  Mev/cm). L'intensité maximale admissible calculée dans le cas d'un faisceau d'électrons de 4 Gev (diamètre 100 microns), d'un diamètre de filament de 25  $\mu\text{m}$  et d'une vitesse de balayage de 12.5 mm/s vaut 67  $\mu\text{A}$ .

Le **carbone** est certes mauvais conducteur, mais son émissivité élevée et surtout la relativement faible énergie déposée par le faisceau ( $\approx 3$  Mev/cm) compensent largement cet handicap. L'intensité maximale admissible calculée dans les mêmes conditions que ci-dessus vaut 128  $\mu\text{A}$  ( $\varnothing$  filament 34  $\mu\text{m}$ ) ou 220  $\mu\text{A}$  ( $\varnothing$  filament 7  $\mu\text{m}$ ).

La **fibre de carbone** étudiée cumule les avantages du tungstène et du carbone et autorise des faisceaux (théoriques) d'intensité **supérieure à 300  $\mu\text{A}$**  que le diamètre vaille 7 ou 34  $\mu\text{m}$ .

Compte tenu de la faible valeur du rapport section/surface extérieure du filament (de l'ordre de  $10^{-4}$ ), l'émissivité joue un rôle déterminant sur la durée de refroidissement après balayage : ainsi le filament en carbone, dont la capacité calorifique est comparable à celle du tungstène, se refroidit plus rapidement (1 seconde environ) que le tungstène (2-3 secondes) grâce à une émissivité 2 fois plus élevée et malgré une conductibilité de 1 à 2 ordres de grandeur plus faible. C'est l'usage de la fibre de carbone qui conduit au temps de retour à température ambiante le plus faible (0.5 seconde environ).

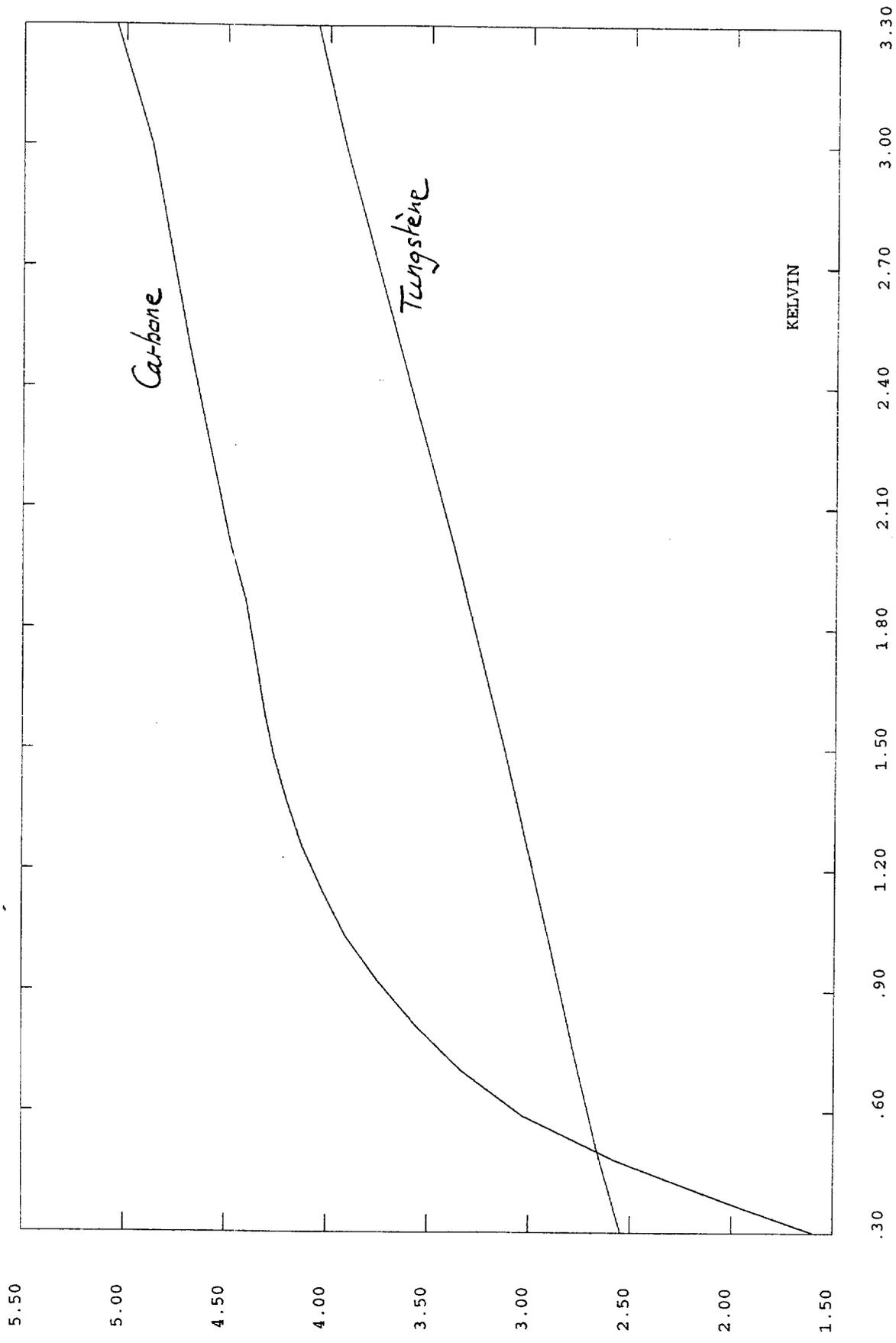
La modification du diamètre du filament a peu d'influence sur le courant maximal admissible lorsque la phase de chauffage est dominée par la conduction (cas du tungstène

et de la fibre de carbone) car les énergies déposée et évacuée sont modifiées dans des rapports similaires, en revanche dans le cas du carbone, une augmentation du diamètre du filament conduit à une diminution du rapport (surface rayonnante)/(volume chauffé) et donc à une diminution significative de l'intensité maximale admissible.

## ANNEXES

- Capacités calorifiques du tungstène et du carbone utilisées pour les calculs.
- Conductibilités thermiques du tungstène et du carbone utilisées pour les calculs.
- Conductibilité thermique de la fibre de carbone utilisée pour les calculs.
- Courbes de conductibilité thermique du tungstène (Touloukian).
- Courbes de conductibilité thermique du carbone (Touloukian).
- Courbes de capacité calorifique du tungstène (Touloukian).
- Courbes de capacité calorifique du carbone (Touloukian).
- Conductibilité thermique du carbone pyrolitique (orthotrope).
- Carte de température filament tungstène.

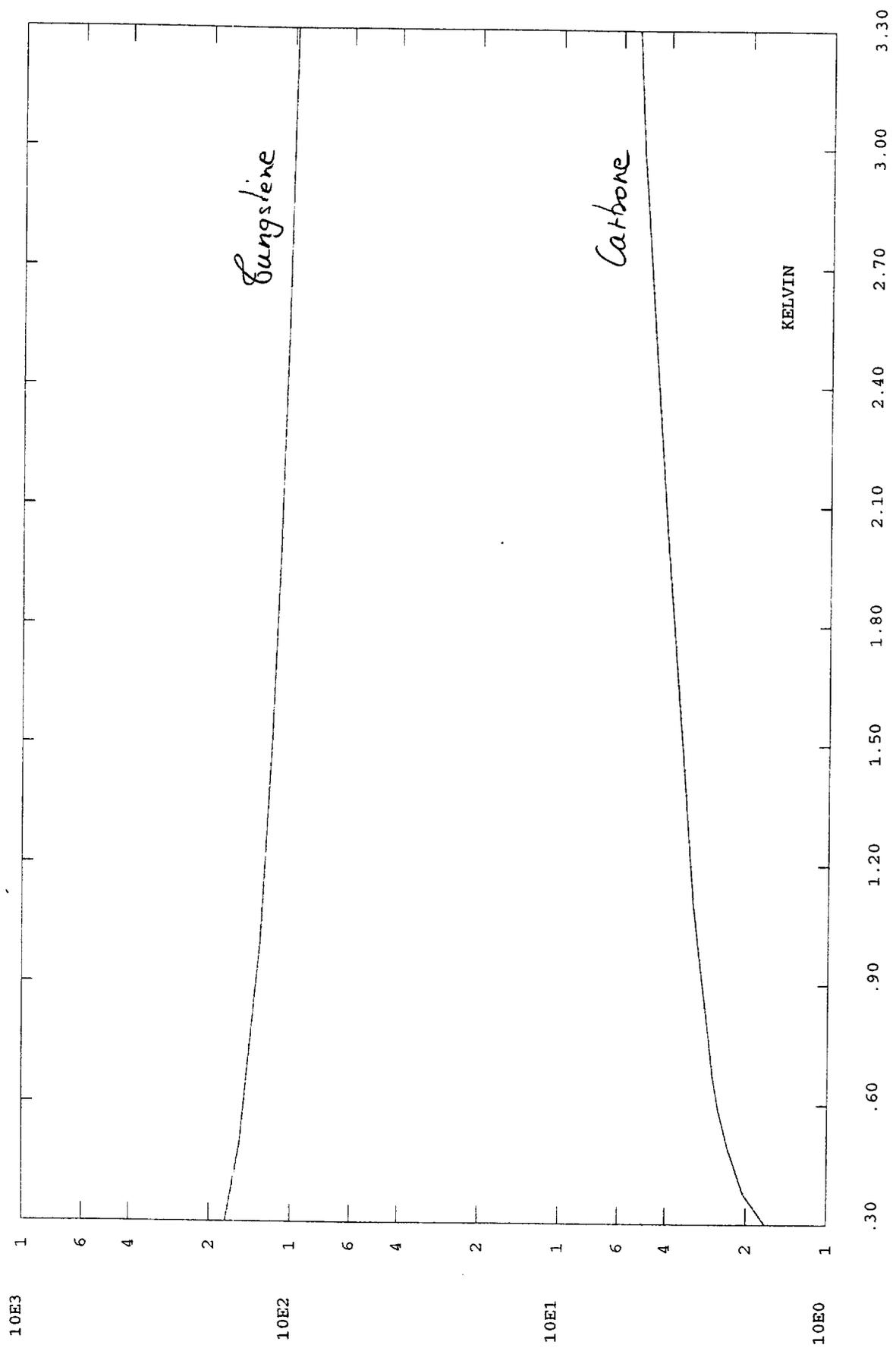
X1.E6  
JOULE/ (M3 \*K)



X1.E3

CAPACITES CALORIFIQUES DU CARBONE ET DU TUNGSTENE

WATT/M.K.



X1.E3

CONDUCTIVITES THERMIQUES DU TUNGSTENE ET DU CARBONE

X1.E2 WATT/M.K

6.00

5.00

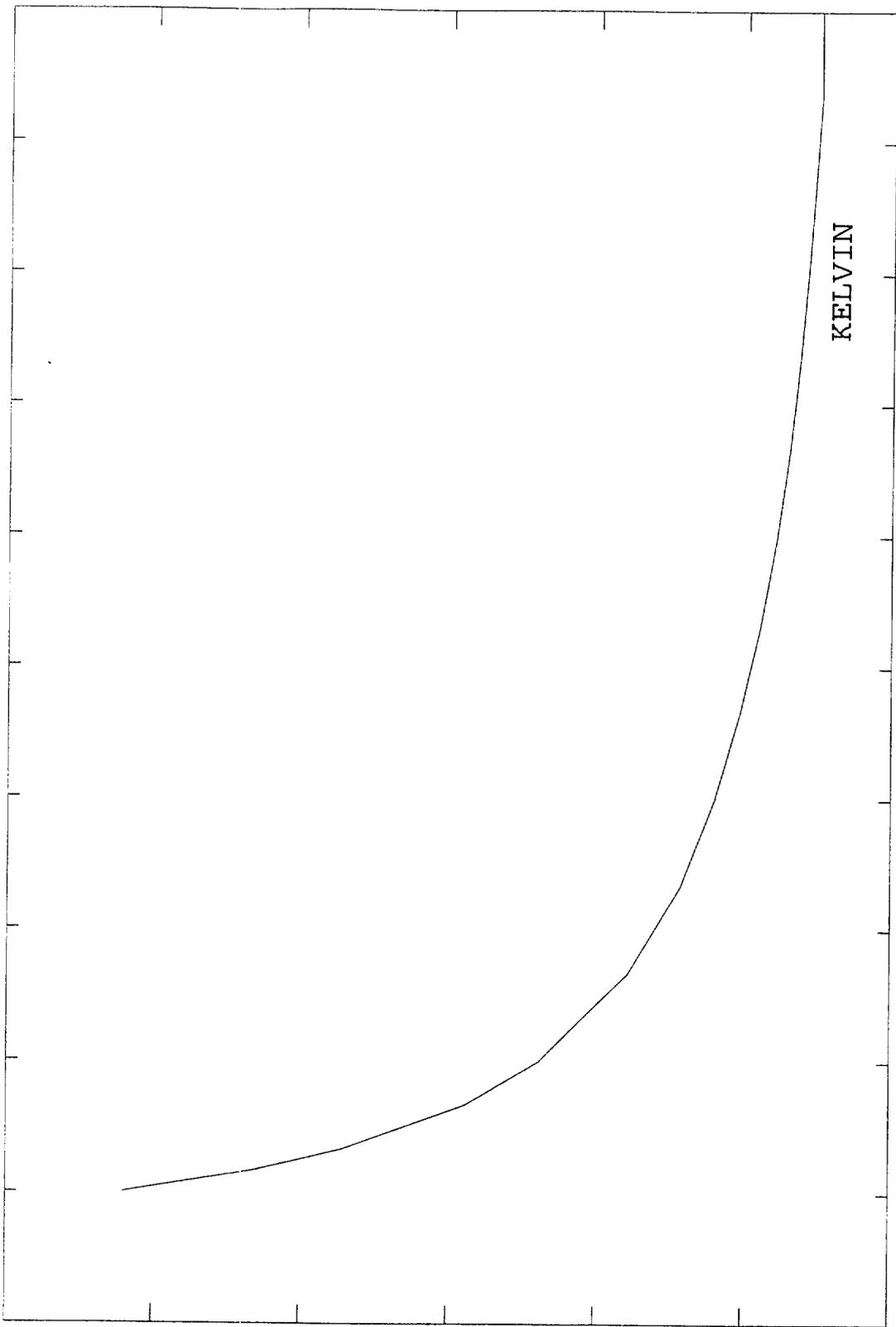
4.00

3.00

2.00

1.00

0.00



0.00 0.30 0.60 0.90 1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00

X1.E3

FIBRE DE CARBONE CONDUCTIBILITE THERMIQUE LONGITUDINALE

# THERMAL CONDUCTIVITY OF TUNGSTEN

FIGURE SHOWS ONLY 80 OF THE CURVES REPORTED IN TABLE

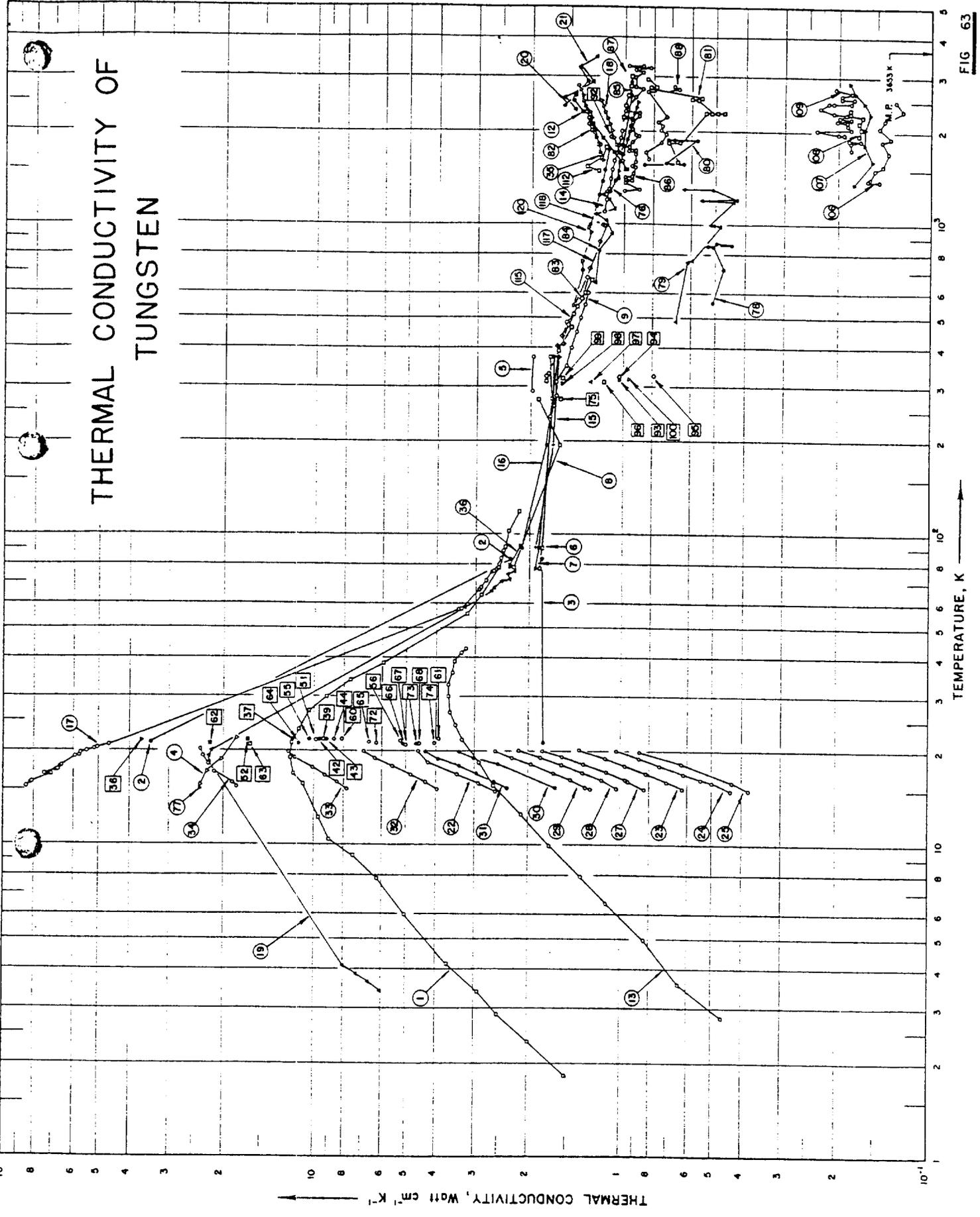
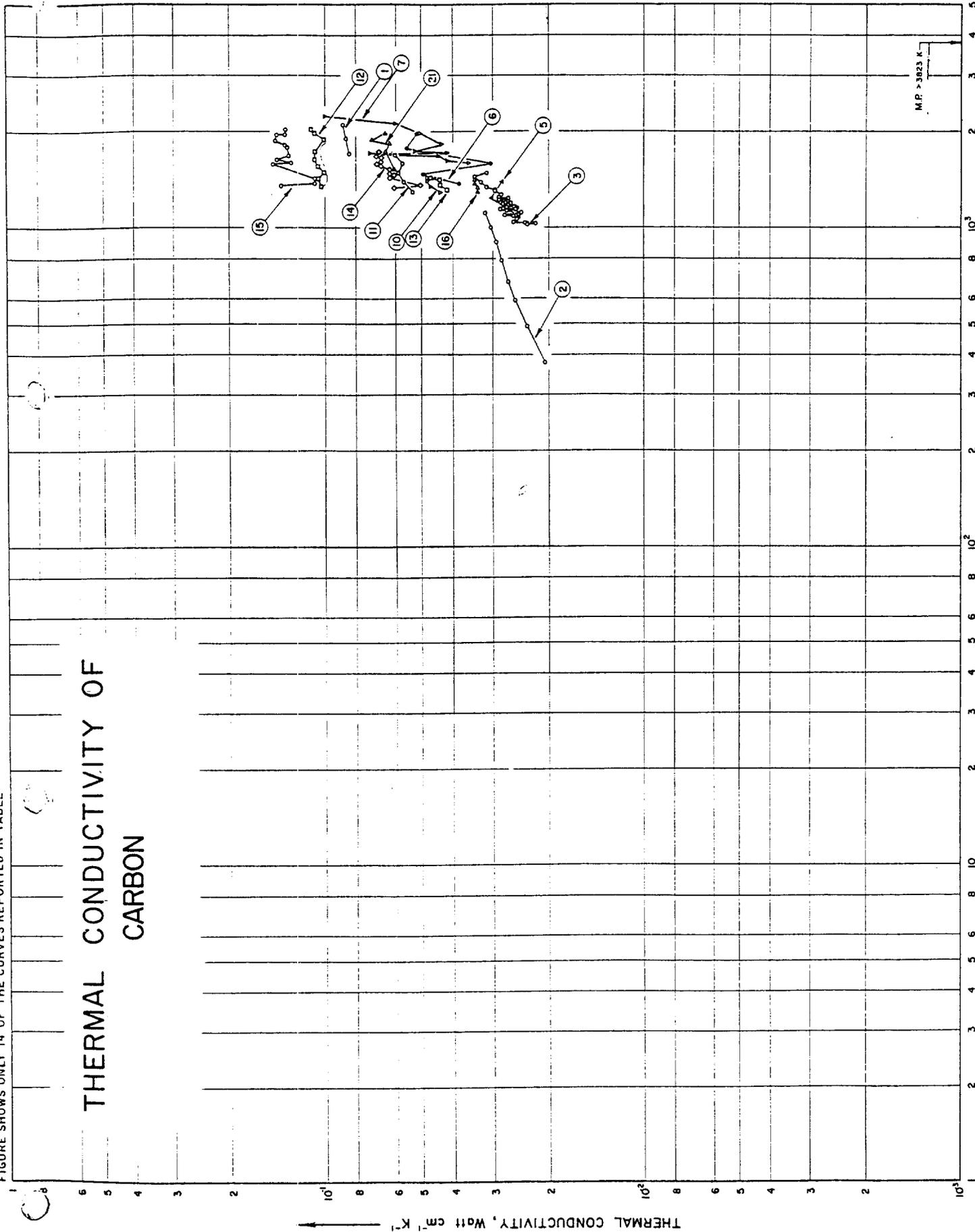


FIG 63

FIGURE SHOWS ONLY 14 OF THE CURVES REFERRED IN TABLE

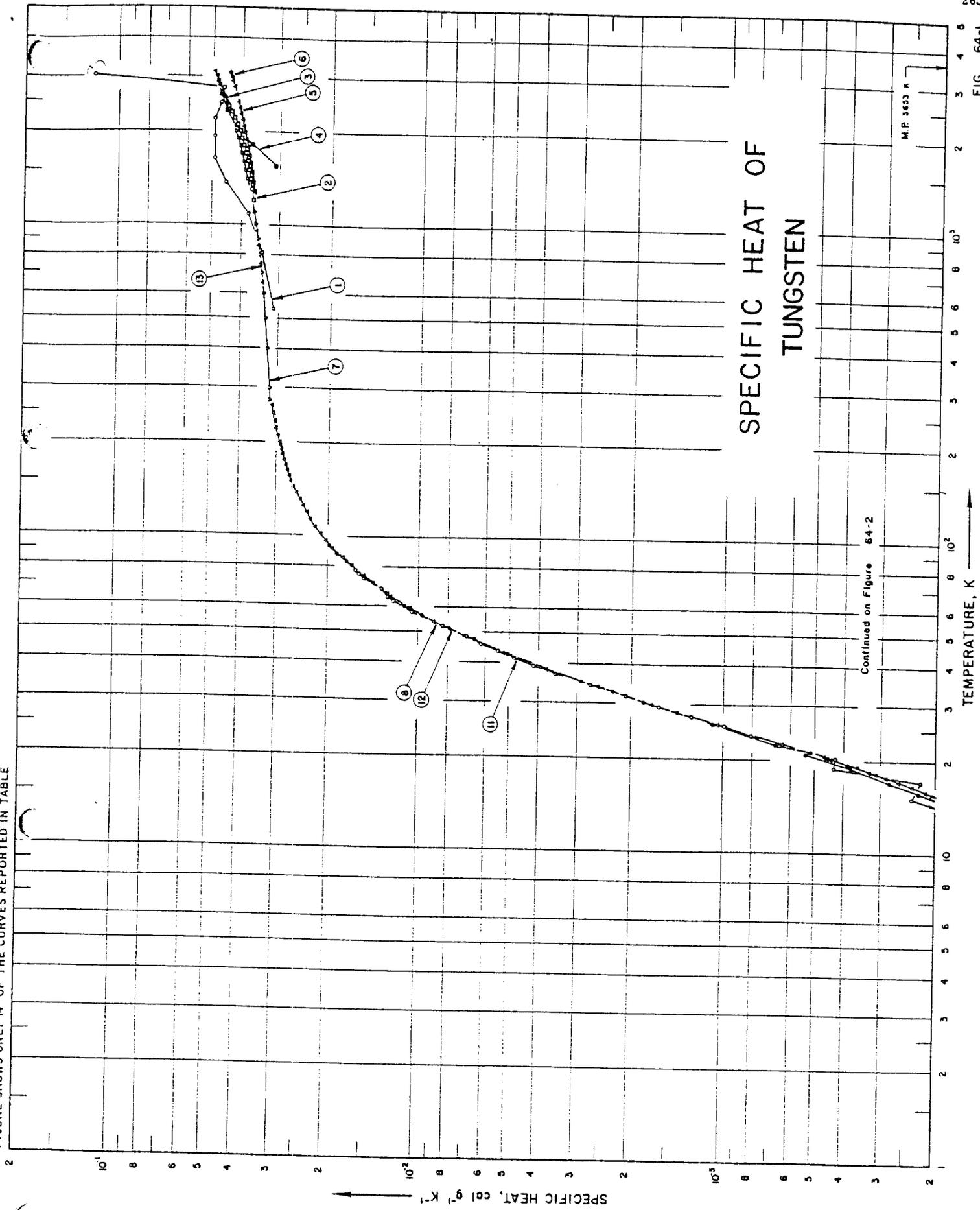
# THERMAL CONDUCTIVITY OF CARBON



TEMPERATURE, K

FIG. 2

FIGURE SHOWS ONLY 14 OF THE CURVES REPORTED IN TABLE



# SPECIFIC HEAT OF TUNGSTEN

Continued on Figure 64-2

M.P. 3653 K

TEMPERATURE, K

FIGURE SHOWS ONLY 20 OF THE CURVES REPORTED IN TABLE

# SPECIFIC HEAT OF CARBON (GRAPHITE)

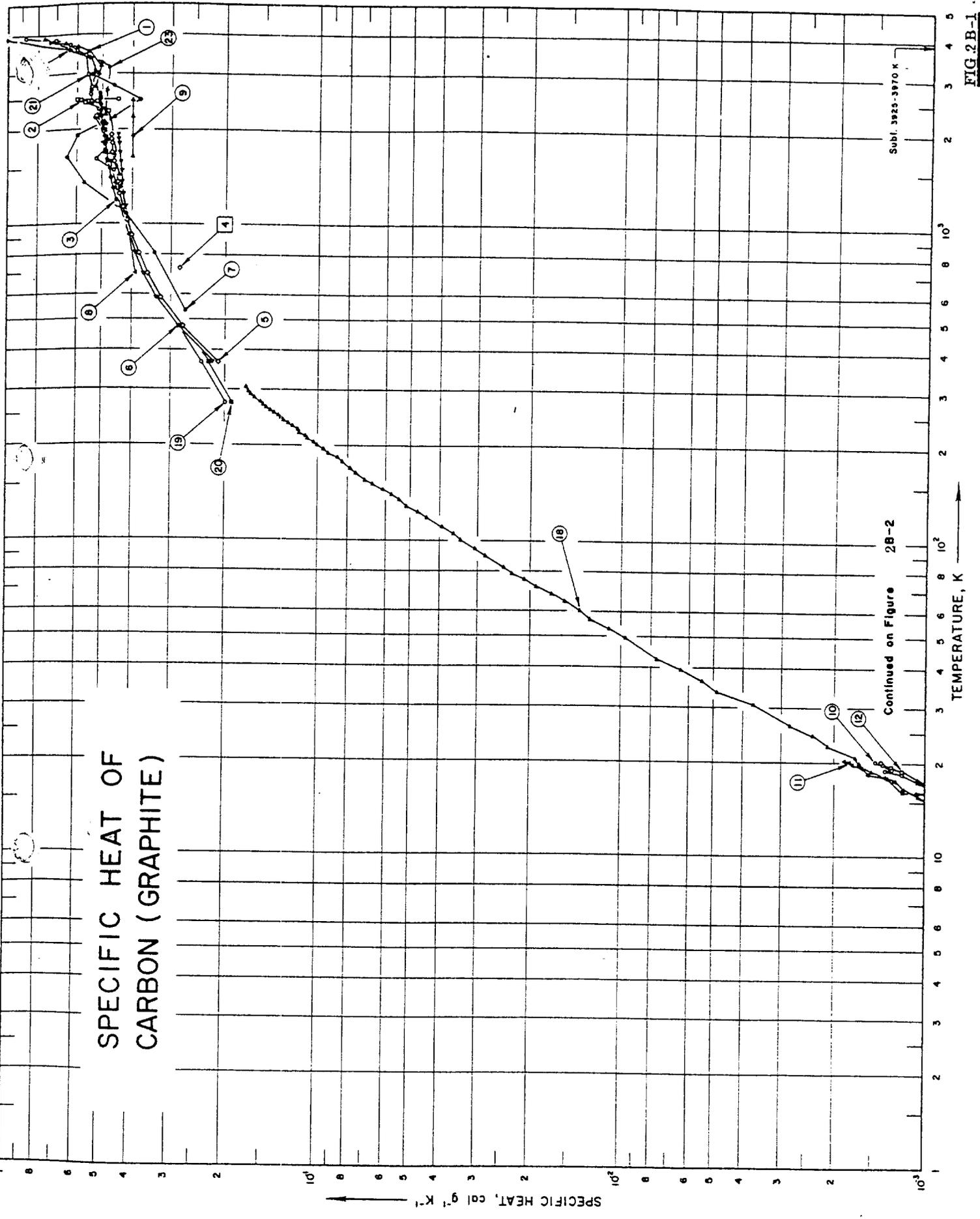


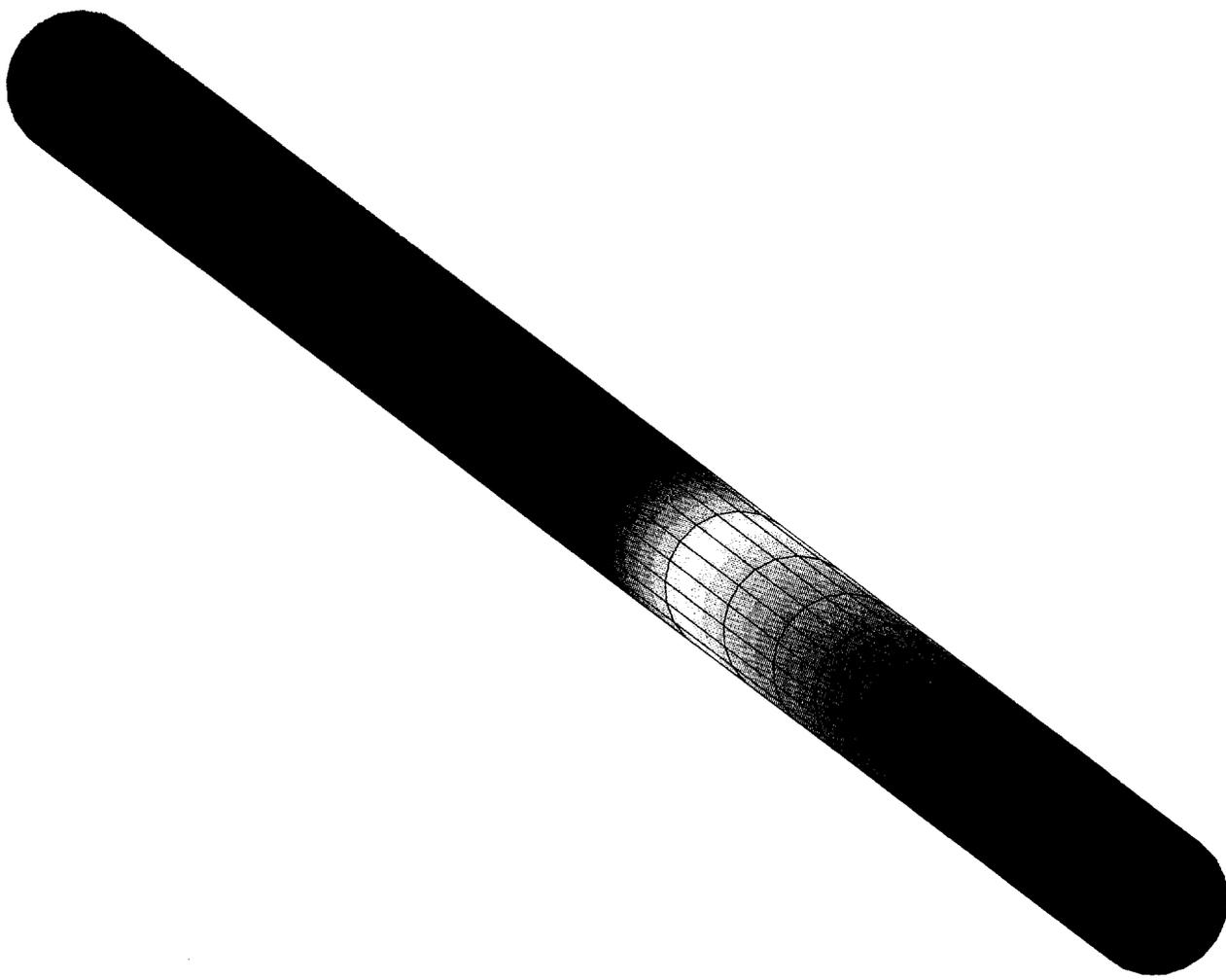
FIG. 2B-1.





VAL - ISO

- > 1.05E+03
- < 2.77E+03
- 1.06E+03
- 1.14E+03
- 1.22E+03
- 1.31E+03
- 1.39E+03
- 1.47E+03
- 1.55E+03
- 1.63E+03
- 1.71E+03
- 1.79E+03
- 1.87E+03
- 1.95E+03
- 2.03E+03
- 2.11E+03
- 2.20E+03
- 2.28E+03
- 2.36E+03
- 2.44E+03
- 2.52E+03
- 2.60E+03
- 2.68E+03
- 2.76E+03



TEMPERATURE TUNGSTENE / CAS NOMINAL / ZOOM L = 1.0 mm / t = 10 ms

