

Matériaux pour la Cryogénie

ANF CNRS 2020 – Ecole de Mécanique IN2P3

Philippe Camus

Aussois, Septembre 2020

AFF-CCS, Fascicule de cryogénie, Ouvrage collectif (2019), Techniques de l'Ingénieur

Version papier disponible : <http://affccs.grenoble.cnrs.fr/spip.php?article13>



téléchargeable à

l'adresse <https://cloud.neel.cnrs.fr/index.php/s/ptqpdCGPRyTxCZ3>

affCCS19FdCeS

Plan

Propriétés des matériaux à basse température:

- Propriétés électriques
- Propriétés thermiques
- Propriétés mécaniques
- Cas particulier des supraconducteurs

Propriétés électriques

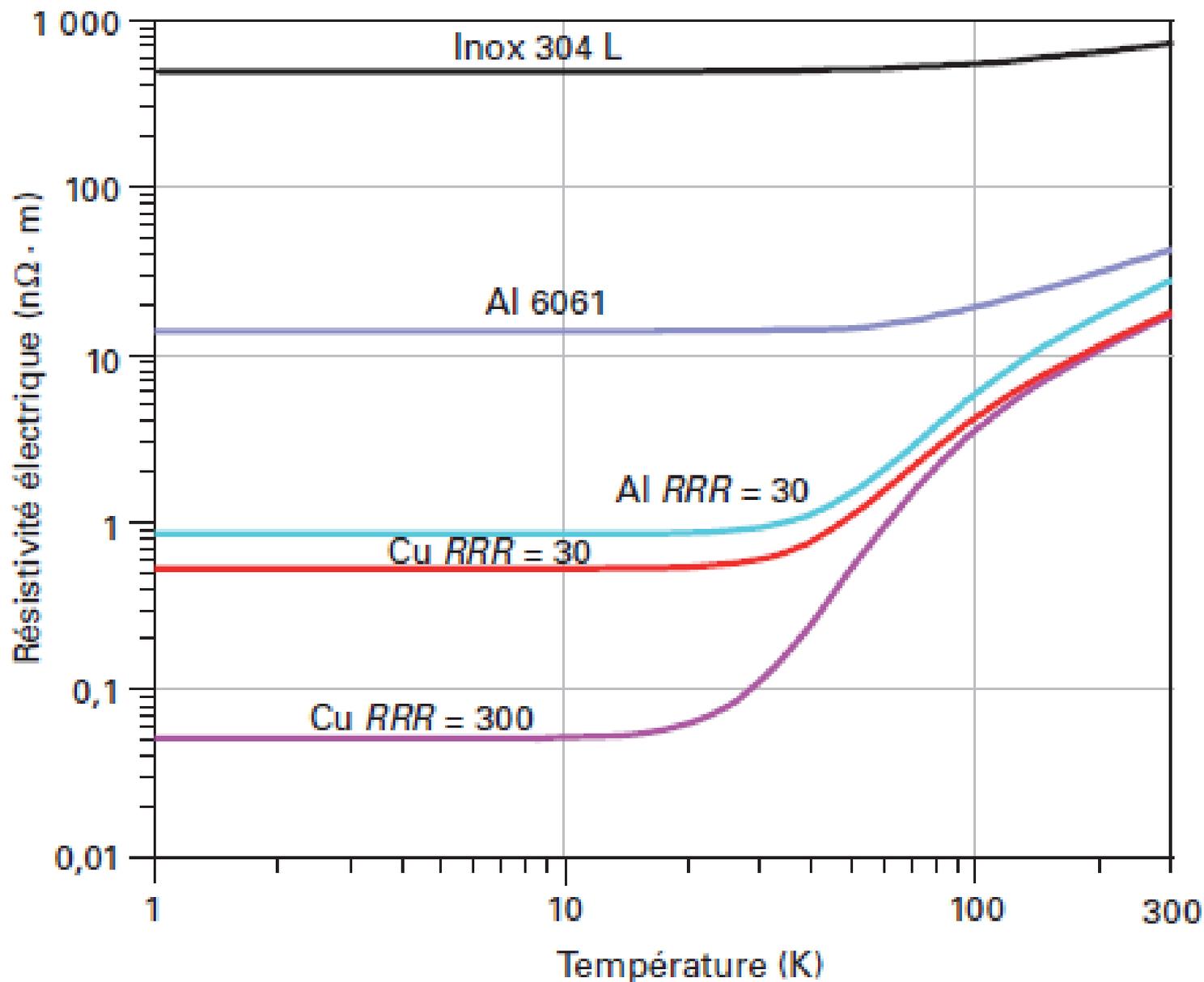
- La résistivité des métaux est liée au libre parcours moyen des électrons
- On distingue deux termes (règle de Matthiessen)

$$\rho_e(T) = \rho_0 + \rho_i(T)$$

- Ratio de Résistivité (4K / 300K)

$$RRR = \frac{\rho_e(273 \text{ K})}{\rho_e(4,2 \text{ K})} = \frac{\rho_e(273 \text{ K})}{\rho_0}$$

- Plusieurs ordres de grandeurs entre les matériaux
- La valeur constante dépend de la pureté du métal



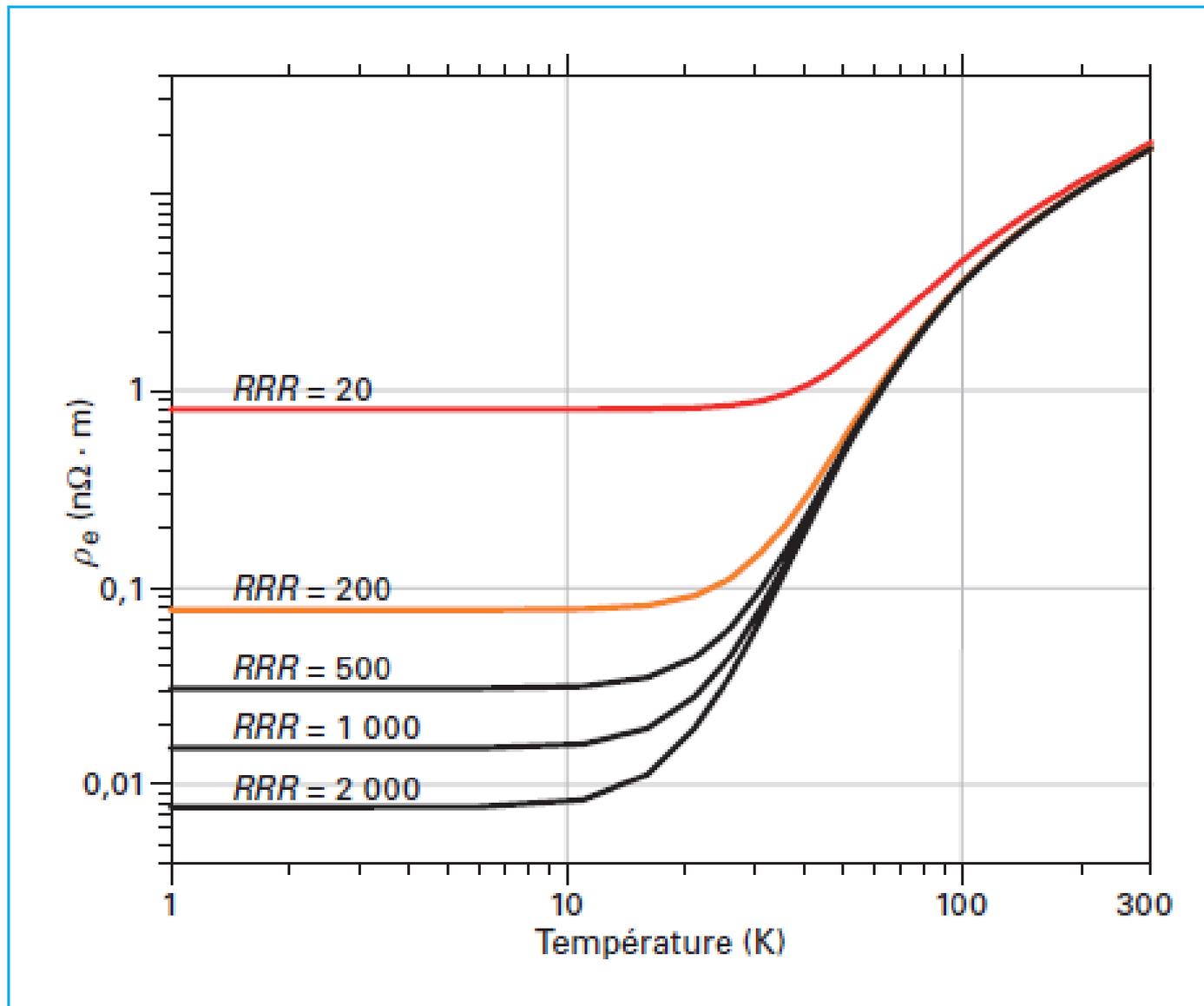


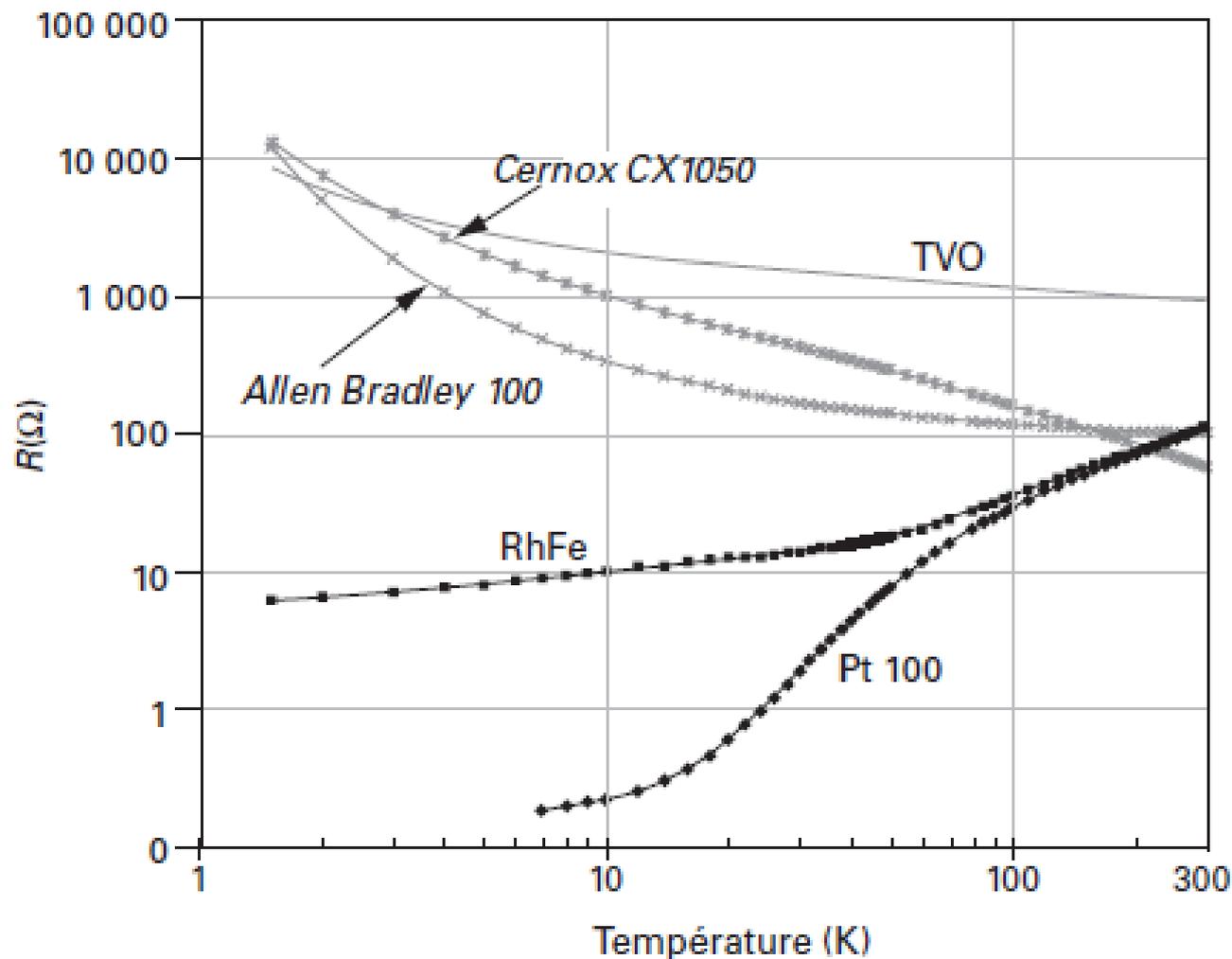
Figure 2 - Résistivité du cuivre pour différents *RRR*

- Pour les isolants et les semi-conducteurs, la résistivité suit une loi d'activation (énergie)

La résistivité électrique des isolants solides est très élevée : elle est comprise entre 10^{10} et $10^{18} \Omega \cdot m$ [1]. Les différents paramètres qui influencent la résistivité électrique sont : la structure chimique, la concentration en impuretés et le degré de polymérisation pour les matières plastiques. La résistivité électrique peut être définie avec l'expression suivante :

$$\rho_e = \rho_\infty \exp\left(\frac{E}{2k_B T}\right) \quad (4)$$

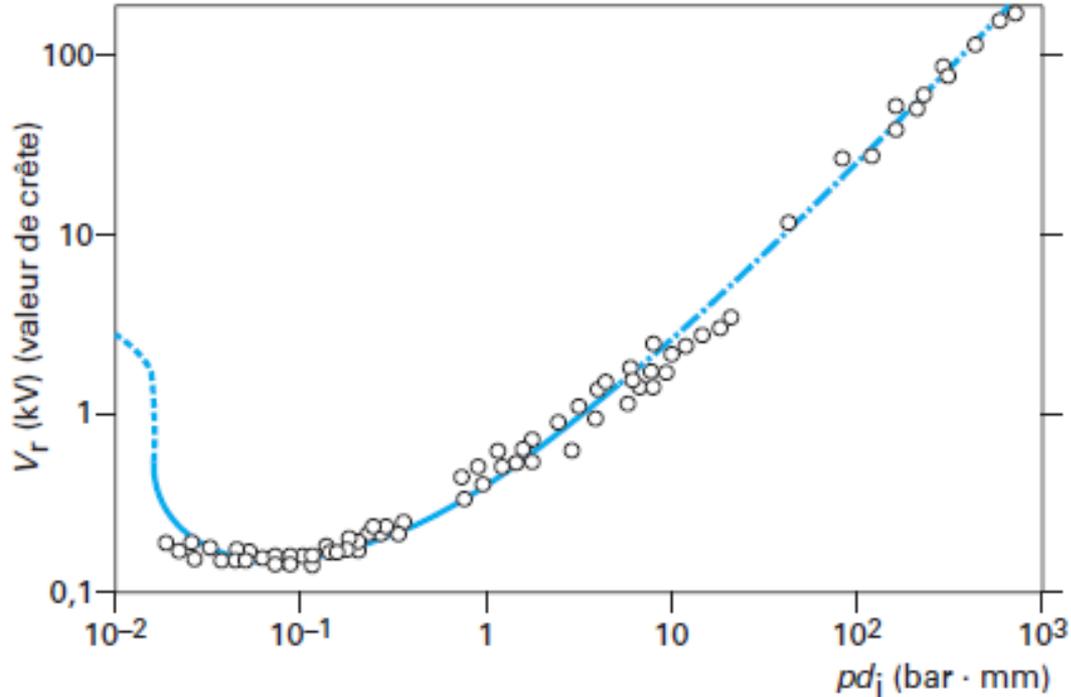
- Cette propriété des semi-conducteurs est utilisée pour en faire de bons thermomètres (carbone Cernox)



Les résistivités de capteurs métalliques (Pt, RhFe) sont tracées avec des marques noires. Les résistivités de capteurs semi-conducteurs (TVO, Allen Bradley, Cernox) sont tracées avec des marques grises

Figure 3 - Résistance de certaines thermistances [R 2 810]

- Dans les gaz, il faut faire attention à la tension de rupture V_r qui dépend de la pression (loi de Paschen – ci-dessous pour l'hélium)



Propriétés thermiques

- La chaleur spécifique d'un matériau est liée aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons
- On utilise le concept de phonons pour décrire les vibrations
- Dans les isolants, les électrons ne contribuent pas
- La nature de ces deux 'particules' conduit à une évolution différente avec la température

La **capacité thermique** d'une substance correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier l'unité massique ou molaire de cette substance de 1 K, soit à pression constante C_p , soit à volume constant C_v . Elle caractérise son aptitude à emmagasiner la chaleur.

Expérimentalement, on observe que la capacité thermique molaire C est pratiquement constante à température élevée ($T > 2\theta_D$) et tend vers la valeur $3R$ (loi Dulong et Petit) avec $R = 8,3144 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, constante universelle des gaz parfaits.

- Les phonons: Modèle de Debye

$$C_v = 3R \mathfrak{D}(\theta_D/T) \quad (5)$$

avec C_v ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$) capacité thermique molaire à volume constant,

R constante universelle des gaz parfaits,

T (K) température absolue,

θ_D (K) température de Debye du solide,

$$\mathfrak{D}\left(\frac{\theta_D}{T}\right) = 3\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$$

x variable d'intégration ($= h\omega/2\pi k_B T$),

ω (s^{-1}) pulsation du réseau.

La **température de Debye** est donnée par l'expression suivante :

$$\theta_D = \frac{hv}{k_B} \left(\frac{3N}{4\pi V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

avec h ($\text{J} \cdot \text{s}$) constante de Planck,

k_B ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), constante de Boltzmann,

v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) vitesse du son dans le solide,

N/V nombre d'atomes par unité de volume du solide.

Tableau 2 - Température de Debye (en K)

Corps	θ_D	Corps	θ_D	Corps	θ_D	Corps	θ_D	Corps	θ_D
Li	340	Mn	410	Rh	480	Os	500	KBr	180
Be	1 440	Fe α	430	Pd	275	Ir	420	KI	175
Ne	75	Fe γ	320	Ag	220	Pt	225	RbBr	130
Na	160	Co	445	Cd	210	Au	180	RbI	115
Mg	400	Ni	450	In	100	Hg	75	CaF ₂	475
Al	430	Cu	340	Sn blanc	165	Tl	80	AgCl	185
Si	625	Zn	330	Sn gris	240	Pb	100	AgBr	145
Ar	85	Ga	320	Sb	210	Bi	110	MgO	800
K	100	Ge	370	I	105	Gd	200	ZnS	270
Ca	230	Sr	150	La	150	diamant	1 850	FeS ₂	645
Sc	360	Zr	280	Hf	250	graphite	1 500	A304	470
Ti	420	Nb	265	Ta	245	LiF	650	A316	500
V	380	Mo	450	W	400	NaCl	275	A286	470
Cr	630	Ru	600	Re	430	KCl	230	<i>Inconel</i> X750	475

- Pour les électrons libres (métaux), c'est la température de Fermi qui compte ($\sim 10^4$ K)

Dans le cas des métaux conducteurs, la contribution des électrons libres doit être considérée. La théorie quantique des gaz d'électrons montre que la capacité thermique massique des électrons peut s'écrire :

$$c = \gamma T$$

Tableau 3 – Coefficient γ de la contribution électronique à la capacité thermique massique pour divers conducteurs			
Corps	γ [mJ/(kg · K²)]	Corps	γ [mJ/(kg · K²)]
Al	50,4	Nb	94,9
Be	24,6	Pt	34,0
Cr	29,8	Ag	5,65
Cu	11,0	Ta	32,3
Au	3,55	Ti	74,2
Fe	89,9	Zr	33,2
Ni	124,0		

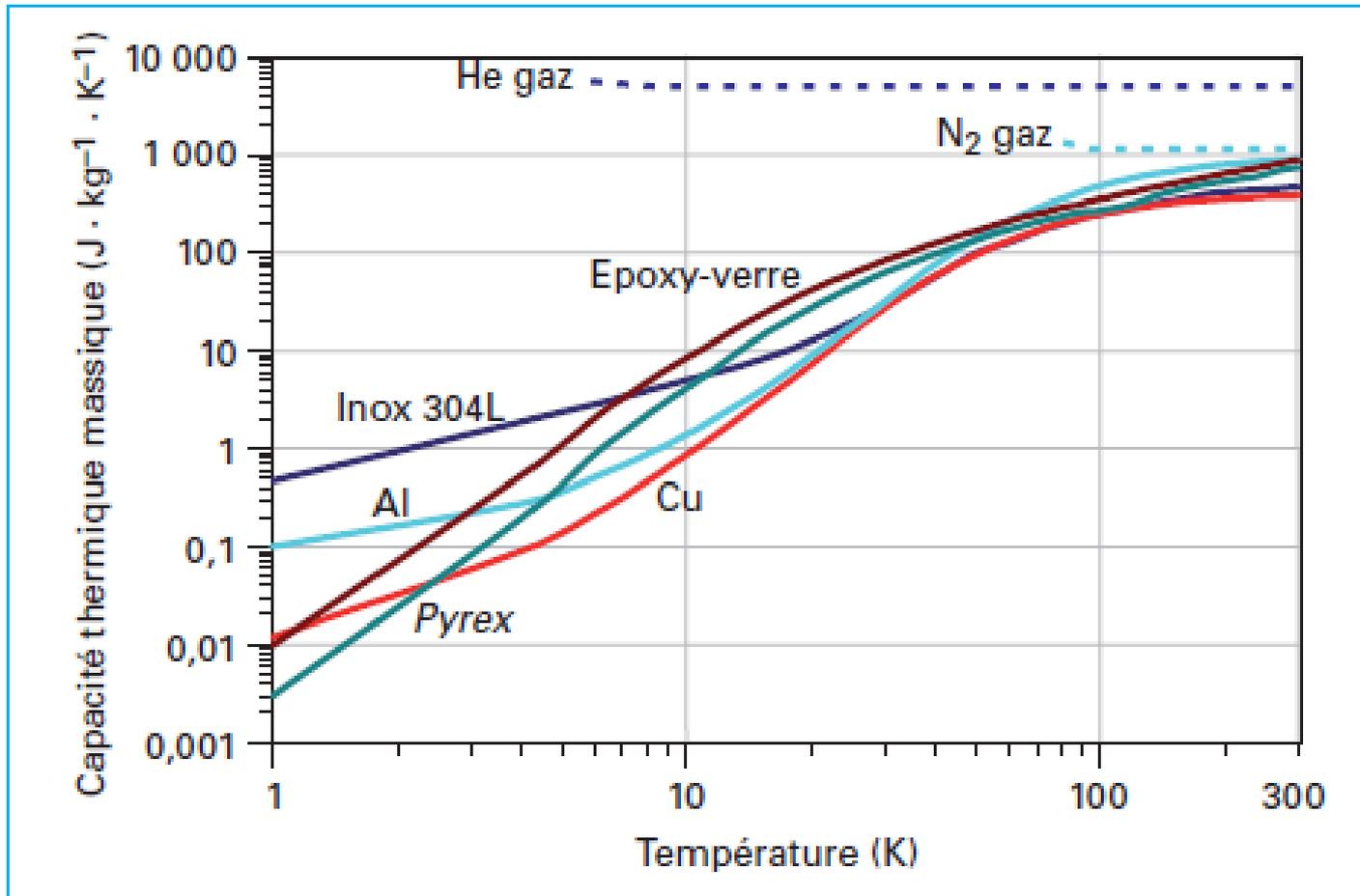


Figure 4 - Capacité thermique de quelques matériaux

- A partir de la capacité thermique, on peut construire l'énergie interne (enthalpie)

$$h = \int_0^T c_p(T) dT$$

avec h ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) enthalpie massique,
 c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) capacité thermique massique,
 T (K) température.

La quantité d'énergie contenue dans un matériau de masse m dont la température varie entre deux valeurs T_1 et T_2 , est alors évaluée par la variation d'enthalpie définie par :

$$\Delta E = \Delta H = m\Delta h = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \quad (9)$$

avec ΔH et ΔE (J) variation d'enthalpie ou d'énergie,
 m (kg) masse du matériau.

Tableau 6 – Consommation de cryofluide

Configuration	Matériau	Hélium liquide				Hydrogène liquide				Azote liquide	
		$T_0 = 300\text{ K}$ $T_f = 4,2\text{ K}$		$T_0 = 77\text{ K}$ $T_f = 4,2\text{ K}$		$T_0 = 300\text{ K}$ $T_f = 20,4\text{ K}$		$T_0 = 77\text{ K}$ $T_f = 20,4\text{ K}$		$T_0 = 300\text{ K}$ $T_f = 77,3\text{ K}$	
		(kg/kgmat)	(L/kgmat)	(kg/kgmat)	(L/kgmat)	(kg/kgmat)	(L/kgmat)	(kg/kgmat)	(L/kgmat)	(kg/kgmat)	(L/kgmat)
Liquide seul	Aluminium	8,1	64,9	0,40	3,2	0,38	5,41	0,019	0,26	0,82	1,01
	Acier inox.	4,2	33,7	0,26	2,0	0,20	2,81	0,012	0,17	0,42	0,52
	Cuivre	3,8	30,2	0,25	2,0	0,18	2,52	0,012	0,17	0,37	0,46
	Titane	4,9	39,3	0,27	2,2	0,23	3,28	0,013	0,18	0,49	0,61
	Invar 36	4,5	35,9	0,33	2,6	0,21	3,00	0,015	0,22	0,44	0,54
	Niobium	2,8	22,5	0,25	2,0	0,13	1,88	0,012	0,16	0,27	0,34
	NbTi	4,4	35,3	0,40	3,2	0,21	2,94	0,018	0,26	0,42	0,53
	Nb3Sn	2,5	19,6	0,21	1,7	0,12	1,64	0,010	0,14	0,24	0,29
	G10 (1)	6,8	54,6	0,45	3,6	0,32	4,55	0,021	0,29	0,67	0,83
	Époxy	10,6	84,5	0,73	5,8	0,50	7,10	0,033	0,47	1,04	1,29
	Pyrex	5,6	45,0	0,36	2,9	0,27	3,75	0,017	0,24	0,56	0,69
Liquide et vapeur froide	Aluminium	0,21	1,66	0,029	0,23	0,070	1,00	0,0085	0,12	0,52	0,64
	Acier inox.	0,11	0,90	0,021	0,17	0,037	0,52	0,0056	0,08	0,27	0,33
	Cuivre	0,10	0,81	0,020	0,16	0,034	0,48	0,0056	0,08	0,24	0,30
	Titane	0,13	1,03	0,020	0,16	0,043	0,61	0,0060	0,08	0,32	0,40
	Invar 36	0,12	0,99	0,026	0,21	0,041	0,58	0,0074	0,10	0,29	0,36
	Niobium	0,08	0,66	0,020	0,16	0,027	0,38	0,0056	0,08	0,18	0,22
	NbTi	0,13	1,03	0,032	0,26	0,042	0,59	0,0090	0,13	0,28	0,35
	Nb3Sn	0,07	0,57	0,017	0,14	0,023	0,32	0,0048	0,07	0,16	0,20
	G10	0,18	1,46	0,039	0,31	0,060	0,85	0,0100	0,14	0,43	0,53
	Époxy	0,29	2,30	0,066	0,53	0,090	1,27	0,0170	0,24	0,66	0,82
Pyrex	0,15	1,18	0,030	0,24	0,049	0,69	0,0083	0,12	0,35	0,43	

T_0 température initiale, T_f température finale.

(1) Il existe un grand nombre de variantes du G10. Les valeurs de ce tableau sont indicatives.

- Conductivité thermique et intégrale de conductivité
- Comme pour la résistivité électrique, elle dépend du libre parcours moyen (électrons, phonons)
- Elle évolue notablement avec la température

Les électrons qui conduisent le courant électrique contribuent également à la diffusion de la chaleur. Pour les métaux purs ou alliés, la loi de Wiedemann-Franz donne une bonne approximation de la relation entre la conductivité thermique k et la résistivité électrique ρ :

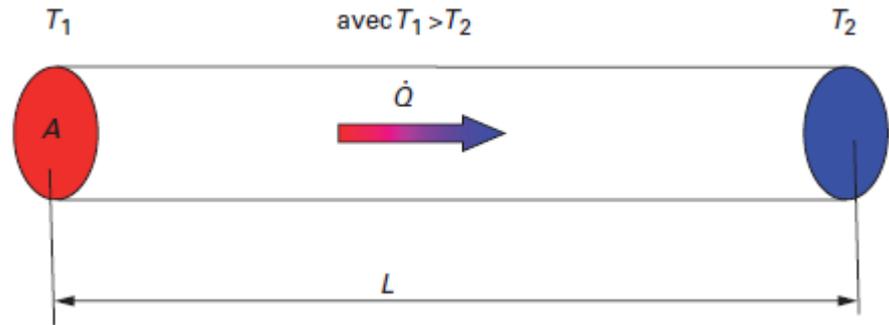
$$k = \frac{Lor T}{\rho_e} \quad (10)$$

avec k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) conductivité thermique,
 $Lor = 2,448 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$, nombre de Lorentz,
 ρ_e ($\Omega \cdot \text{m}$) résistivité électrique,
 T (K) température.

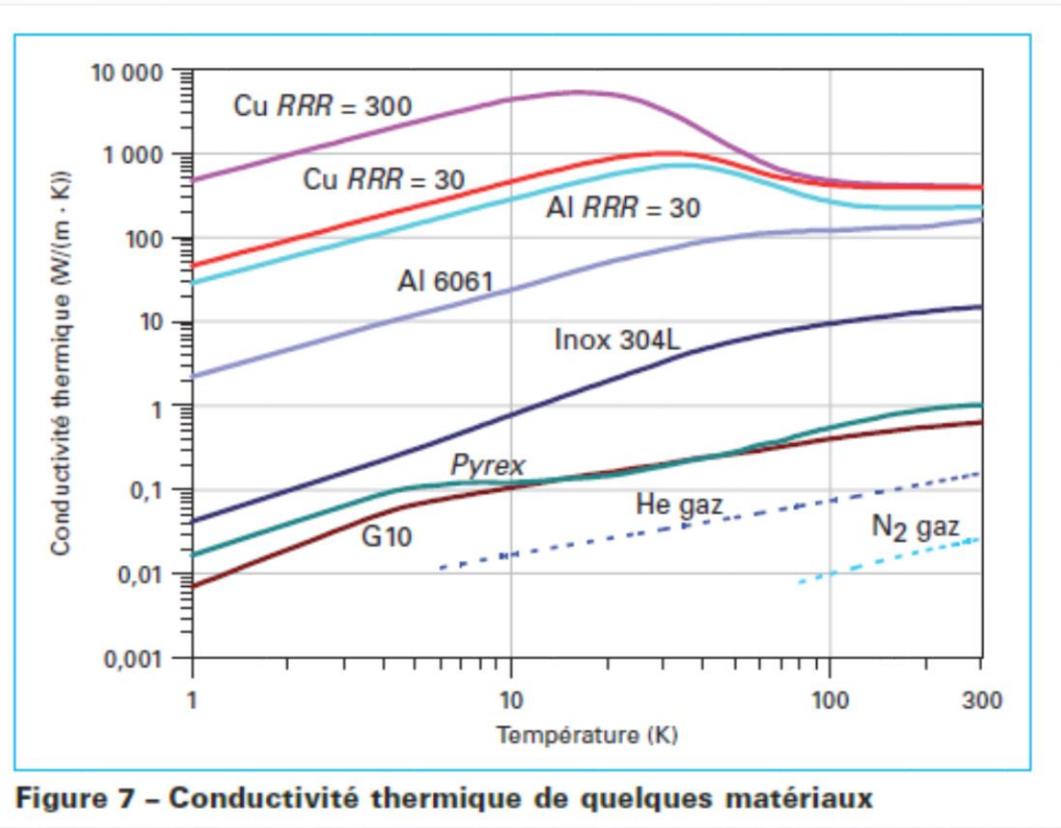
Cette loi peut être affinée en utilisant des nombres de Lorentz expérimentaux différents en fonction des métaux concernés.

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} k (T_1 - T_2)$$

avec \dot{Q} (W) flux de chaleur,
 A (m²) section de conduction,
 L (m) distance entre les températures T_1 et T_2 ,
 T (K) température.



On retrouve l'évolution
de la chaleur spécifique
(électrons, phonons)



- Pour prendre en compte la variation de la conductivité thermique avec la température, on utilise l'intégrale de conduction

À basse température, la conductivité thermique varie fortement avec la température. Pour les applications faisant intervenir les transferts thermiques conductifs, il faut prendre en compte la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. L'intégrale de la loi de Fourier s'écrit alors :

$$\int_0^L \frac{\dot{Q}}{A} dx = - \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT \quad (13)$$

Tableau 8 - Intégrale des conductivités thermiques (1) (en W · m⁻¹)

Température (K)	Acier inox 168 (304)	Cuivre RFR=30	Laiton 70Cu-30Zn	Bronze phosphoreux 94Cu-5Sn-2P	Constantan 57Cu-43Ni	Manganin M Cu-11M n-Ni	Inconel 718, recuit	K-Monel recuit 60 Ni-36 n-14 n-1M n	Invar 36Ni-Fe	Titane, alliage Ti-6Al-4V	Aluminium RFR=30	Alu alliage 6061-T6	Alu alliage 5083-T0 recuit	Pyrex	Polyéthylène téréphthalate (PET (Dacron))	Polycarbonate (plaque extrudée)	Polyimide (Kaplan E)	Composite G10 (fibres de verre-époxy)	Époxy (résine seule)	Composite carbone (fibres de carbone-plastique)	Polyéthylène (PE, M/Ar)
4	0,400	345	6,07	2,58	1,21	0,773	0,901	1,46	0,276	0,804	214	17,7	5,61	0,165	0,0646	0,0790	0,0154	0,0901	0,112	0,0310	0,0115
6	1,02	807	16,0	6,87	3,87	2,12	2,24	3,91	0,819	1,78	501	41,4	13,7	0,258	0,171	0,143	0,0410	0,214	0,212	0,0660	0,0342
8	1,96	1 450	31,0	13,3	8,03	4,22	4,19	7,72	1,70	3,07	900	74,6	25,3	0,592	0,320	0,214	0,0803	0,381	0,322	0,109	0,0704
10	3,28	2 270	51,2	22,0	13,9	7,15	6,77	13	2,95	4,67	1 410	118	40,5	0,857	0,504	0,294	0,134	0,584	0,438	0,165	0,120
15	8,51	5 130	128	53,9	38,2	18,6	16,2	33,6	7,93	9,91	3 190	272	95,2	1,49	1,05	0,540	0,337	1,19	0,740	0,356	0,309
20	16,7	8 910	235	97,7	74,8	35,9	29,2	63,8	15,6	16,7	5 590	487	173	2,20	1,72	0,949	0,637	1,93	1,07	0,622	0,570
25	28,1	13 500	370	150	124	58,7	45,4	103	26,0	24,7	8 560	765	273	2,99	2,47	1,23	1,04	2,78	1,43	0,968	0,885
30	42,8	18 400	525	211	184	89,6	64,3	150	39,1	33,8	11 900	1 100	395	3,87	3,30	1,66	1,54	3,74	1,82	1,29	1,24
35	61,2	23 300	697	280	252	125	85	204	54,7	43,8	15 4000	1 480	538	4,88	4,20	2,11	2,14	4,80	2,24	1,87	1,63
40	82,9	28 000	883	357	328	166	108	262	72,9	54,8	18 900	1 900	701	6,01	5,15	2,80	2,84	5,95	2,67	2,41	2,04
50	136	36 200	1 280	531	497	280	158	391	117	79,4	25 300	2 840	1 080	8,59	7,16	3,86	4,47	8,48	3,62	3,88	2,89
60	199	42 900	1 730	731	679	367	213	530	170	107	30 500	3 900	1 540	11,7	9,29	4,84	6,29	11,2	4,67	5,26	3,80
70	271	48 400	2 210	957	865	483	272	675	232	137	34 8000	5 020	2 050	15,3	11,5	6,10	8,30	14,3	5,79	7,13	4,74
77	326	51 800	2 580	1 130	997	569	315	791	281	160	37 300	5 630	2 440	18,1	13,1	7,03	9,79	16,7	6,63	8,62	5,42
80	350	53 300	2 740	1 210	1 050	607	334	828	302	171	38 300	6 180	2 610	19,4	13,8	7,43	10,4	17,7	7,00	9,22	5,72
90	436	57 800	3 320	1 480	1 250	739	401	985	379	207	41 400	7 370	3 220	24,1	16,2	8,84	12,7	21,3	8,30	12,0	6,74
100	527	62 000	3 950	1 790	1 440	877	470	1 150	462	245	44 200	8 580	3 870	29,3	18,7	10,3	15,1	25,2	9,71	15,1	7,79
120	725	70 270	5 230	2 445	1 847	1 165	617	1 489	640	329	49 240	11 040	5 280	41,1	23,7	13,4	20,0	33,6	12,9	22,2	9,96
140	940	78 200	6 860	3 200	2 289	1 467	775	1 845	834	422	53 830	13 560	6 820	54,7	28,7	16,8	25,2	42,8	16,4	30,6	12,2
160	1 170	86 100	8 500	4 030	2 700	1 781	941	2 210	1 040	522	58 300	16 130	8 490	69,8	33,8	20,3	30,6	52,6	20,1	40,3	14,5
180	1 414	94 000	10 240	4 940	3 140	2 107	1 114	2 600	1 258	630	62 800	18 780	10 270	86,2	39,0	24,0	36,1	63,0	23,9	51,2	16,9
200	1 667	101 800	12 080	5 290	3 600	2 447	1 295	2 990	1 482	744	67 300	21 480	12 170	104	44,2	27,9	41,8	73,9	27,9	62,8	19,3
220	1 937	109 600	13 950	6 970	4 060	2 797	1 480	3 400	1 732	865	71 800	24 180	14 170	122	49,4	32,0	47,5	85,1	32,0	74,5	21,7
240	2 207	117 400	16 050	8 100	4 530	3 167	1 680	3 810	1 982	993	76 400	27 080	16 370	141	54,6	36,3	53,4	96,8	36,1	86,4	24,2
260	2 487	125 100	18 150	9 300	5 000	3 557	1 880	4 230	2 242	1 127	80 900	30 080	18 570	161	59,8	40,7	59,4	109	40,3	98,6	26,6
280	2 777	132 900	20 350	10 550	5 480	3 967	2 080	4 660	2 502	1 265	85 400	33 180	20 970	181	65,0	45,3	65,5	121	44,6	111	29,0
300	3 077	140 600	22 650	11 880	5 970	4 397	2 300	5 100	2 772	1 415	90 000	36 380	23 470	201	70,2	50,0	71,7	133	48,9	124	31,5

(1) $\int_{T_{ref}}^T k \, dT$ avec $T_{ref} = 1K$

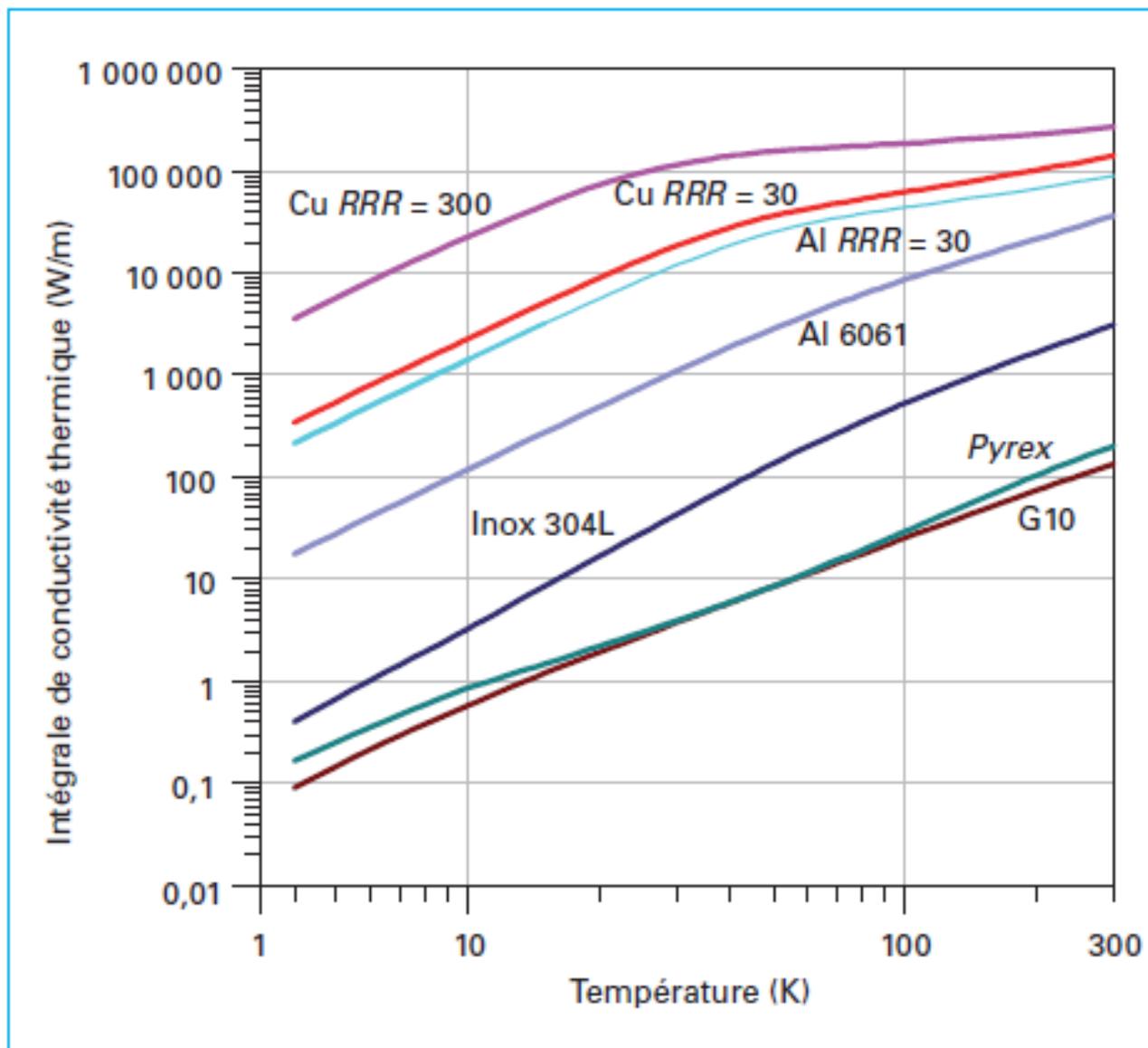


Figure 8 - Intégrale de conductivité thermique de différents matériaux

Propriétés mécaniques

- Dilatation thermique

Le coefficient de dilatation linéique est défini comme :

$$\alpha(T) = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (15)$$

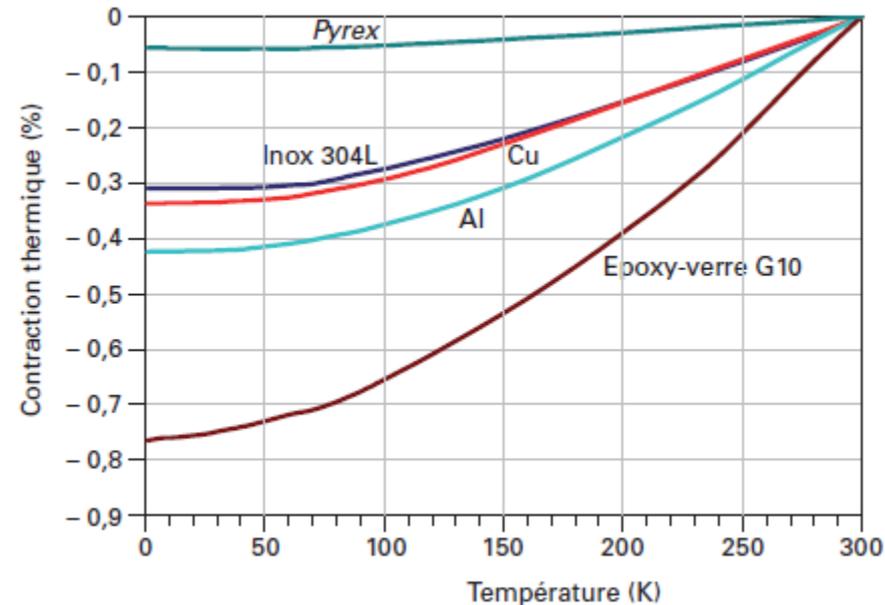
avec α (K^{-1}) coefficient de dilatation linéique,

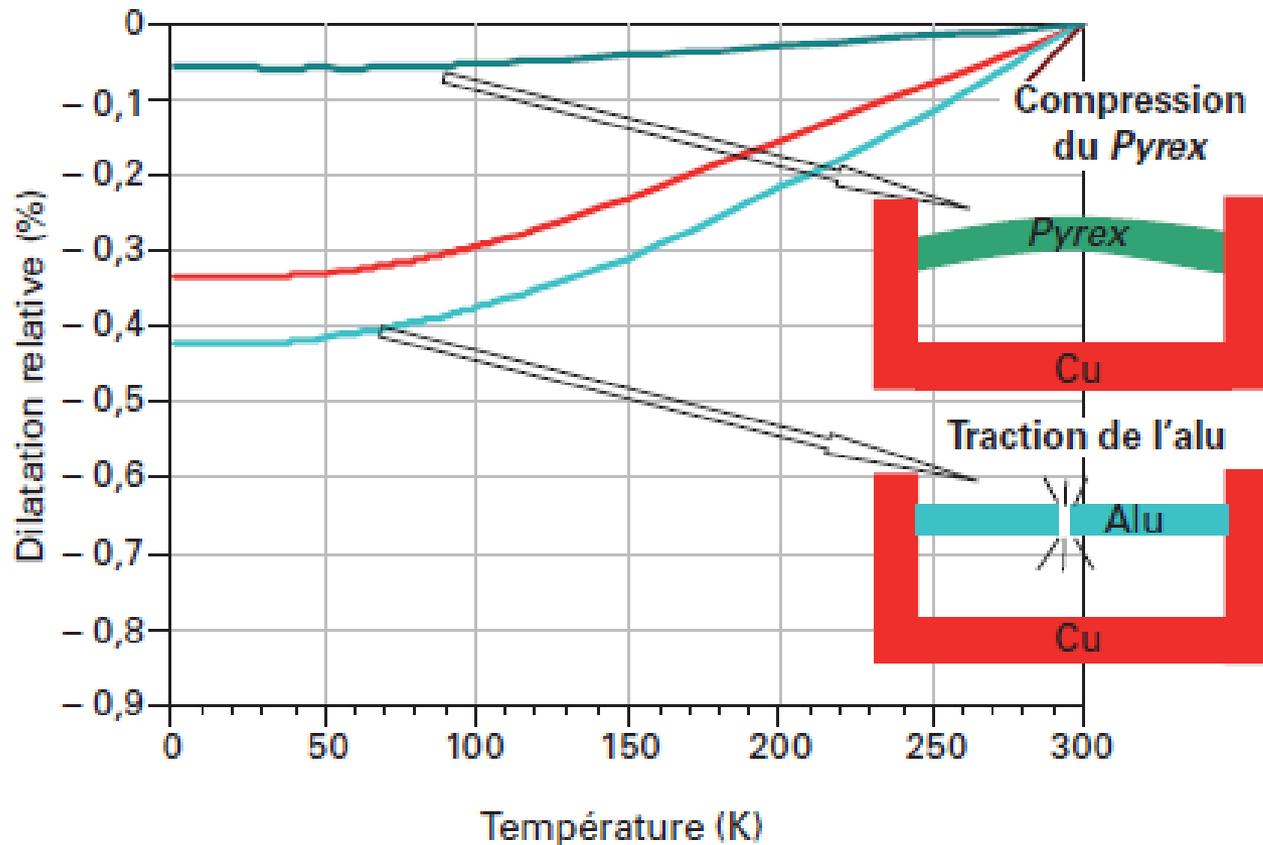
L (m) longueur caractéristique du matériau.

À basse température, pour les solides cristallins, le coefficient de dilatation linéique α est relié à la capacité thermique du réseau cristallin. De ce fait, α évolue proportionnellement à T^3 . Lorsque la température est nettement supérieure à la température de Debye du matériau ($T \gg \theta_D$), le coefficient de dilatation du matériau tend vers une valeur à peu près constante. D'un point de vue pratique, on utilise le coefficient de dilatation moyen relatif donné par :

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha(T) \Delta T = \frac{L - L_0}{L} \quad (16)$$

avec L_0 (m) longueur initiale de référence.



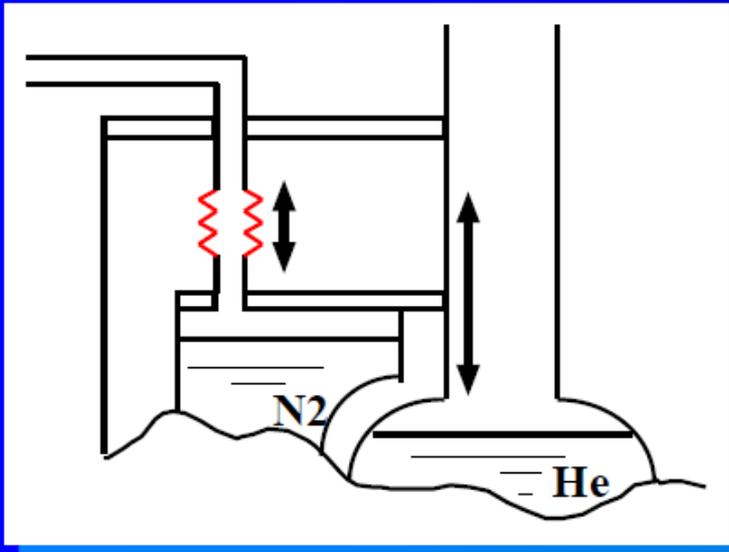


La figure **11** montre un exemple de difficulté rencontrée dans la conception cryogénique engendrée par la dilatation thermique différentielle lorsque les matériaux utilisés n'ont pas les mêmes rétreints thermiques. Le matériau vert (pyrex) présente un rétreint moins important que celui du cuivre. Dans le cas où il est inséré dans du cuivre, il subit un effort de compression lorsque l'ensemble cuivre et pyrex voient leur température diminuer. Le matériau bleu (aluminium) subit par contre des efforts de traction car il possède un rétreint thermique supérieur à celui du cuivre.

Problèmes de contraction

■ Précautions à prendre

- ◆ Pour les brasures de 2 métaux différents
 - ▣ Celui qui se contracte le plus doit être à l'extérieur
- ◆ Grosses précautions pour les plastiques
 - ▣ Orientation = anisotrope
- ◆ Choix des vis de serrage
 - ▣ Doivent se contracter plus que les brides à serrer
- ◆ Joints de dilatation pour les tubes en parallèle



Les propriétés mécaniques évoluent avec la température. Quel que soit le matériau, il est courant de constater qu'au-dessous d'une certaine température ce matériau devient **fragile** en opposition avec une certaine ductilité (propriété d'un matériau à se déformer) à chaud. L'apparition de cette fragilité conduit à sélectionner les matériaux en fonction de leurs propriétés mécaniques et d'exclure de la conception d'équipements cryogéniques, les matériaux fragiles à basses températures.

Le comportement à froid des métaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Les matériaux cristallisant dans le système cubique à faces centrées (Cu, Ni et alliages, aluminium et ses alliages, aciers inoxydables austénitiques, Ag, Pb, laiton, Au, Pt) restent ductiles jusqu'aux très basses températures grâce à leurs nombreux systèmes de glissement possibles.

Les matériaux ayant des structures hexagonales compactes, (Zn, Be, Zr, Mg, Co, alliage de Ti...), connaissent souvent une transition ductile-fragile, mais, il n'y a pas de règle générale et les variations dans les propriétés mécaniques dépendent beaucoup des composés interstitiels.

Les matériaux à réseaux cubiques centrés (aciers ferritiques, acier au carbone, acier au Ni (< 10 %), Mo, Nb, V, Cr, NbTi) présentent une transition ductile-fragile lors de la descente aux basses températures. L'apparition de cette transition signifie que le matériau passe directement d'un comportement de type élastique à la rupture. Il ne connaît donc plus de déformation plastique comme à plus haute température. Les matériaux qui perdent leur ductilité à basse température ne sont donc pas utilisés pour des applications structurelles.

Plus connu dans le domaine des hautes températures, le fluage des matériaux soumis à un effort permanent existe aussi à froid, en particulier pour les aciers inoxydables utilisés dans la boulonnerie de serrage [6] [7] [8] [M 70].

Lorsque la température diminue, la limite élastique R_e (MPa), la limite à la rupture R_r (MPa) et l'allongement associé ϵ (%) ont tendance à augmenter. Le module d'élasticité E (MPa), ou module d'Young, correspond à la pente du segment linéaire du domaine élastique ; il est peu sensible aux variations de température. Dans le cas des matériaux présentant une transition ductile-fragile, la valeur de la limite élastique tend à rejoindre celle de la limite à la rupture et le domaine plastique disparaît ; l'allongement avant rupture se réduit. Les comportements ductiles ou fragiles peuvent être mis en évidence lors des essais de traction (figure 12). L'évolution de la ductilité des matériaux en fonction de la température et l'apparition de la rupture fragile est donnée sur la figure 13.

Le comportement en fonction de la température des structures cubiques à faces centrées et cubiques centrées est donné sur la figure 14 [9].

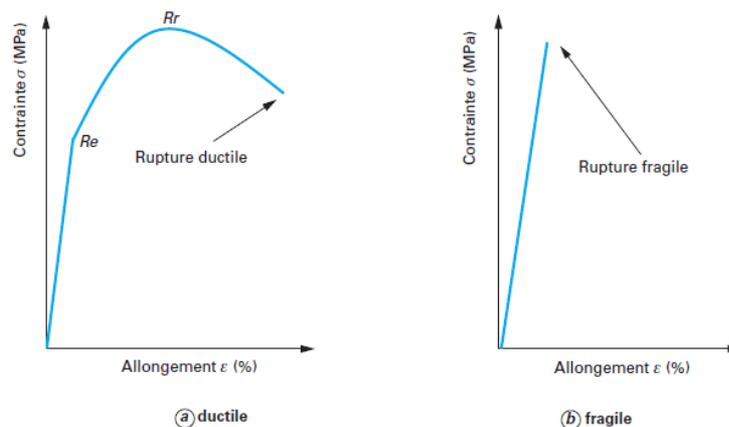


Tableau 10 – Caractéristiques mécaniques

Matériau	ρ (kg/m ³)	E à 300 K (GPa)	E à 80 K (GPa)	E à 4 K (GPa)	R_e à 300 K (MPa)	R_e à 77 K (MPa)	R_e à 4 K (MPa)
Inox 304L	7 800	195	215	210	205	225	240
Alu 6061	2 700	70	77	78	275	340	380
CuC1	9 000	128	139	139	45	60	70
Ti-6A-4V	4 500	114	120	125	950	1 370	1 200
Époxy verre G10	1 800	30	35	35	300	380	470

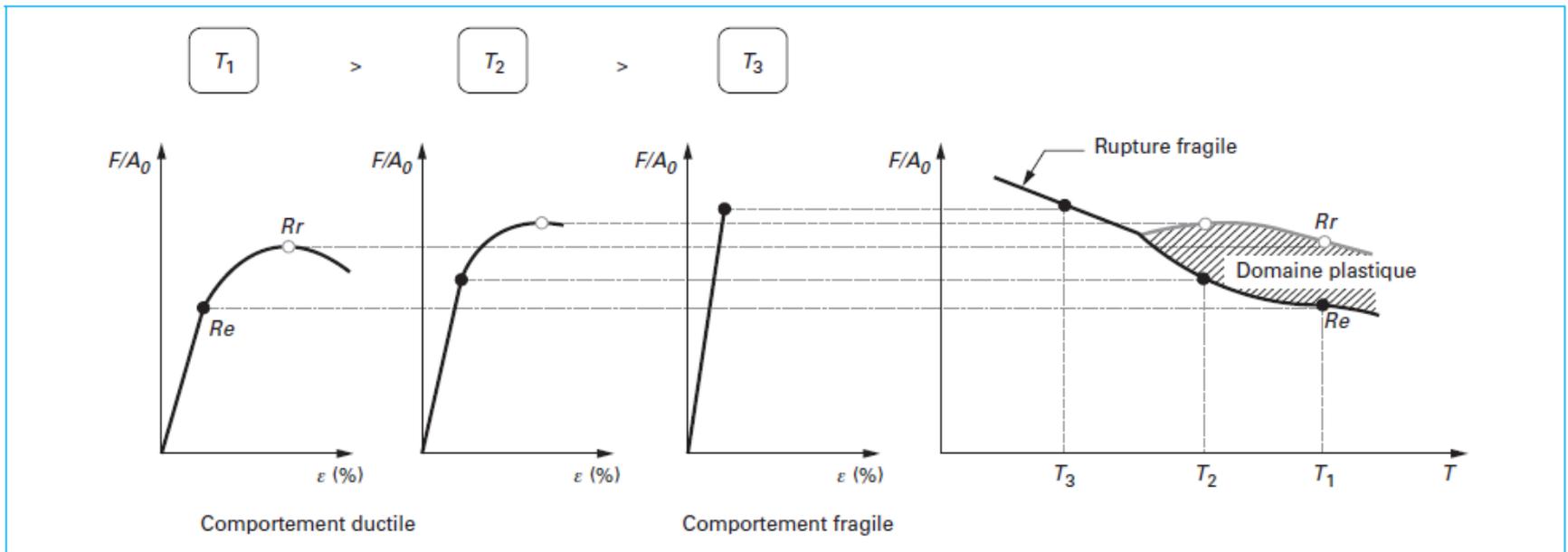
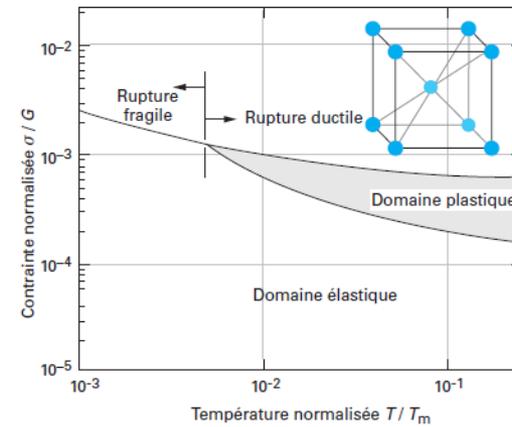
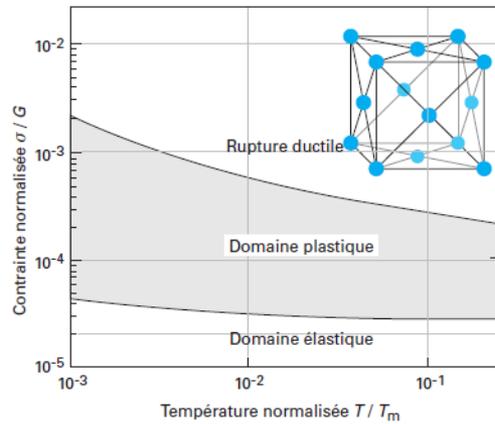


Figure 13 – Mise en évidence de la transition ductile fragile d'un matériau lors de son refroidissement



T_m température de fusion
 G module de cisaillement

Matériaux utilisés

■ Aciers Inox 18.10

- ◆ Z3CN 18.10 ou 304L
- ◆ Austénitique
- ◆ Quelques fois 316L (plus cher)

- ◆ Faible conductivité thermique
- ◆ Un peu magnétique (surtout 304L)

- ◆ Quelques fois porosités ou fissures dans les composants
 - ▣ Rondin; plaque épaisse; fonds bombés; tubes; ...
- ◆ Se soude mal à l'étain

Matériaux utilisés

■ Cuivre (électrolytique)

- ◆ Bon conducteur thermique
- ◆ Pas de soudure TIG étanches (difficile)
- ◆ Non magnétique
- ◆ Plusieurs variétés en France :
 - *CuA1 : profilés (rond, carré, etc...)*
 - Cu à au moins 99,90 % , Contient un peu d 'O₂ (bulles à la soudure)
 - Éviter si possible (risque de fuites)
 - *Cu.b : tubes, plaques minces ou épaisses*
 - Variété « désoxydulée » convient mieux au soudage et à l'emboutissage que CuA1
 - Contient du phosphore → propriétés thermiques et électriques inférieures à CuA1
 - *Cuivre OFHC Oxygen-Free High Conductivity Copper, plus rare, plus cher,*
 - CuC1 comme CuA1 mais sans oxygène (même teneurs en impuretés)
 - CuC2 Cu à 99,99% sans O₂, meilleur conducteur que CuC1

Matériaux utilisés

■ Laitons

- ◆ ATTENTION : Rondins en UZ36 Pb2 (plomb) à proscrire
 - ▣ Fuites + magnétique à basse température
- ◆ Prendre de la plaque épaisse en UZ36
- ◆ Pas de soudure TIG
- ◆ Brasure sans problème

Matériaux utilisés

■ Alliages légers

- ◆ Aluminium pur (A5, 1×××) : très mou, bonne conduction thermique (écrans)
- ◆ Alliages alu magnésium (AG3 ou AG5 5×××) : mou, moins bon conducteur, assez bonne usinabilité, très bonne soudabilité, mise en forme excellente (pliage, emboutissage). 2.70g/cm³, propriétés mécaniques : 190<R<240MPa , Re = 80 MPa
- ◆ Dural (AU4G ou 2017) bonne usinabilité et propriétés mécaniques : R> 400 MPa , Re >250MPa, très mauvaise soudabilité, très mauvaise mise en forme (pliage). densité : 2.80g/cm³
- ◆ Fortal (7075) : moins bon conducteur, Bonne usinabilité, mise en forme très mauvaise (impossible), soudabilité très mauvaise, Propriétés mécaniques : R >540 MPa Re > 480 MPa densité : 2.80g/cm³
- ◆ Liaisons Alu / Inox difficiles

R : Limite à la rupture
Re : Limite élastique

- Alliages Cuivre / Nickel (cupronickel 60/40)
 - ◆ Recommandé pour les capillaires (soudure étain)
 - ◆ Faible conduction thermique (isolant)
 - Identique à l'Inox

- Les alliages de Cuivre-Béryllium
 - ◆ Grande résistance mécanique avec un traitement thermique approprié.

- Alliages de Nickel
 - *L'Invar (36%Ni + Fe) faible coefficient de dilatation (construction sans élément de compensation)*
 - *Le Monel (67%Ni + Cu) excellentes propriétés mécaniques, haute résistance à la corrosion*

Matériaux utilisés

- Précautions générales (fuites)
 - ◆ Mise en cause des matériaux (fissures)
 - ◆ Attention aux épaisseurs minimales
 - ▣ Différentes selon les matériaux
 - ▣ inox (quelques 10^{èmes}), Cuivre (1 à 2 mm), etc...
 - ◆ Risque de fuite parallèlement aux fibres d'étirage

Matériaux utilisés

- Les matériaux plastiques
 - Propriétés d'isolation intéressantes
 - Mise en forme souvent difficile
 - Caractéristiques très disparates
 - Fortes anisotropies dans certains cas

Utilisation des plastiques à basses températures

- Porosité à l'hélium (surtout à l'ambiante)
- Dégazage important (attention pour les tests)
- Émissivité d'un corps noir (recouvrir avec alu,...)
- Éviter les angles vifs (amorces de rupture)

Propriétés des matériaux plastiques

- La résistance mécanique augmente
- Mais la plupart deviennent fragiles
- Problème :
 - *Mauvaise conduction thermiques*
 - *Important coefficient de contraction*
 - ➔ *importantes contraintes à la mise en froid*
 - ➔ *importants risques de ruptures*
- ◆ Très résistant = Kapton (polyimide)
 - ▣ R = 300 MPa à basses températures
- ◆ Fibre de verre Époxy (type G11)
 - ▣ R = 400 à 500 MPa

Cas particulier des supraconducteurs

- Certains métaux ou alliages voient leur résistivité s'annuler en dessous d'une température critique T_c
- Cette température critique dépend du champ magnétique
- La supraconductivité disparaît au-delà d'une valeur du champ (ou bien d'un courant pour les fils)
- C'est un phénomène assez courant finalement...

Tableau 1 – Propriétés critiques intrinsèques des principaux supraconducteurs

Type	Matériau		T_c (K)	$\mu_0 H_{c1}$ (à 0 K) ($\mu_0 H_{c1}$) (mT)	$\mu_0 H_{c2}$ (à 0 K) (T)
I	Al		1,18	10,5	
	Sn		3,72	30,5	
	Pb		7,18	80,3	
	Hg		4,15	41,1	
II	Nb		9,25	240	0,26
	NbTi		9,5	10,0	14
	Nb ₃ Sn	A15	18	17	25,5
	Nb ₃ Al		19	–	42
	Nb ₃ Ge		23	–	37
	PbMo ₆ S ₈		Phases de Chevrel	15	–
	Pb _{0,7} Eu _{0,3} Gd _{0,2} Mo ₆ S ₈	14		–	66
	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	« Hauts T_c »	93	–	140 (1)
	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀		110	–	184 (1)
	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀		125	–	75 (1)
	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈		133,5	–	–
	(BEDT) ₂ Cu(NCS) ₂		Matériau organique	10,5	–
RbCs ₂ C ₆₀	Fullérènes	33	–	–	

(1) Valeur obtenue par le calcul.

- Du point de vue des propriétés thermiques, les électrons supraconducteurs s'organisent par paires et ont une énergie nulle
- ⇒ La chaleur spécifique électronique décroît rapidement en dessous de T_c
- ⇒ La conductivité thermique liée aux électrons aussi (on échappe à la loi de WF!)

Le problème des amenées de courant

- Prendre en compte la conduction thermique et les pertes par effets Joule (RI^2)
- Mais k est lié à ρ : $k = L_0 \cdot T / \rho$ (Wiedemann-Franz)
- Dimension optimale du fil pour minimiser les pertes sur les parties froides (Cu $\sim 1\text{mW/A}$ avec utilisation des vapeurs He; $\sim 46\text{ mW/A}$ sans utilisation)

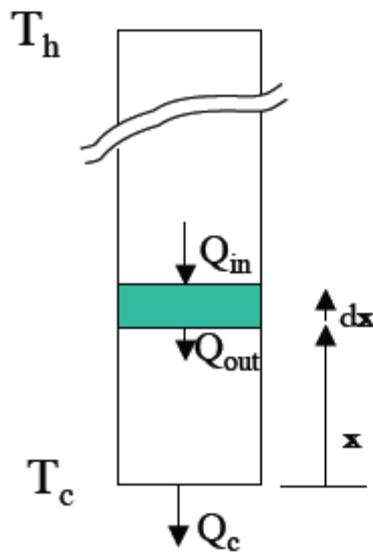
$$\dot{Q} = \frac{L_0}{R} \cdot \frac{T_2^2 - T_1^2}{2} + \frac{R \cdot I^2}{2}$$

$$U_{opt} = R_{opt} \cdot I = \sqrt{L_0 \cdot (T_2^2 - T_1^2)} \approx T_2 \cdot \sqrt{L_0}$$

$$\dot{Q}_{opt} = U_{opt} \cdot I$$

T_h
 T_c

Conduction Cooled Lead: Derivations



- Energy balance on control volume:

$$Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen} = 0$$

$$\left(kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x+dx} - kA \frac{dT}{dx} \Big|_x \right) + \frac{I^2 \rho}{A} dx = 0 \quad \text{note that if } dT/dx > 0, Q_{in} > 0$$

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \rho J^2 = 0$$

- Change variables: let $s = k \frac{dT}{dx}$

$$\frac{ds}{dx} + \rho J^2 = 0; \Rightarrow \frac{ds}{dT} \frac{dT}{dx} + \rho J^2 = 0$$

$$\frac{s}{k} \frac{ds}{dT} + \rho J^2 = 0; \Rightarrow s ds = -k \rho J^2 dT$$

$$s = \frac{Q}{A}; \Rightarrow ds = \frac{dQ}{A}; \int_c^h Q dQ = \frac{1}{2} Q^2 \Big|_c^h = -I^2 \int_{T_c}^{T_h} k \rho dT$$

T_h
 T_c

Conduction Cooled Lead: Derivation (cont.)

$$Q_h^2 - Q_c^2 = -2I^2 \int_{T_c}^{T_h} k\rho dT \Rightarrow Q_c^2 = Q_h^2 + 2I^2 \int_{T_c}^{T_h} k\rho dT$$

- Q_c is minimized when $Q_h = 0$.

$$Q_{c, \min} = I \left(2 \int_{T_c}^{T_h} k\rho dT \right)^{1/2}$$

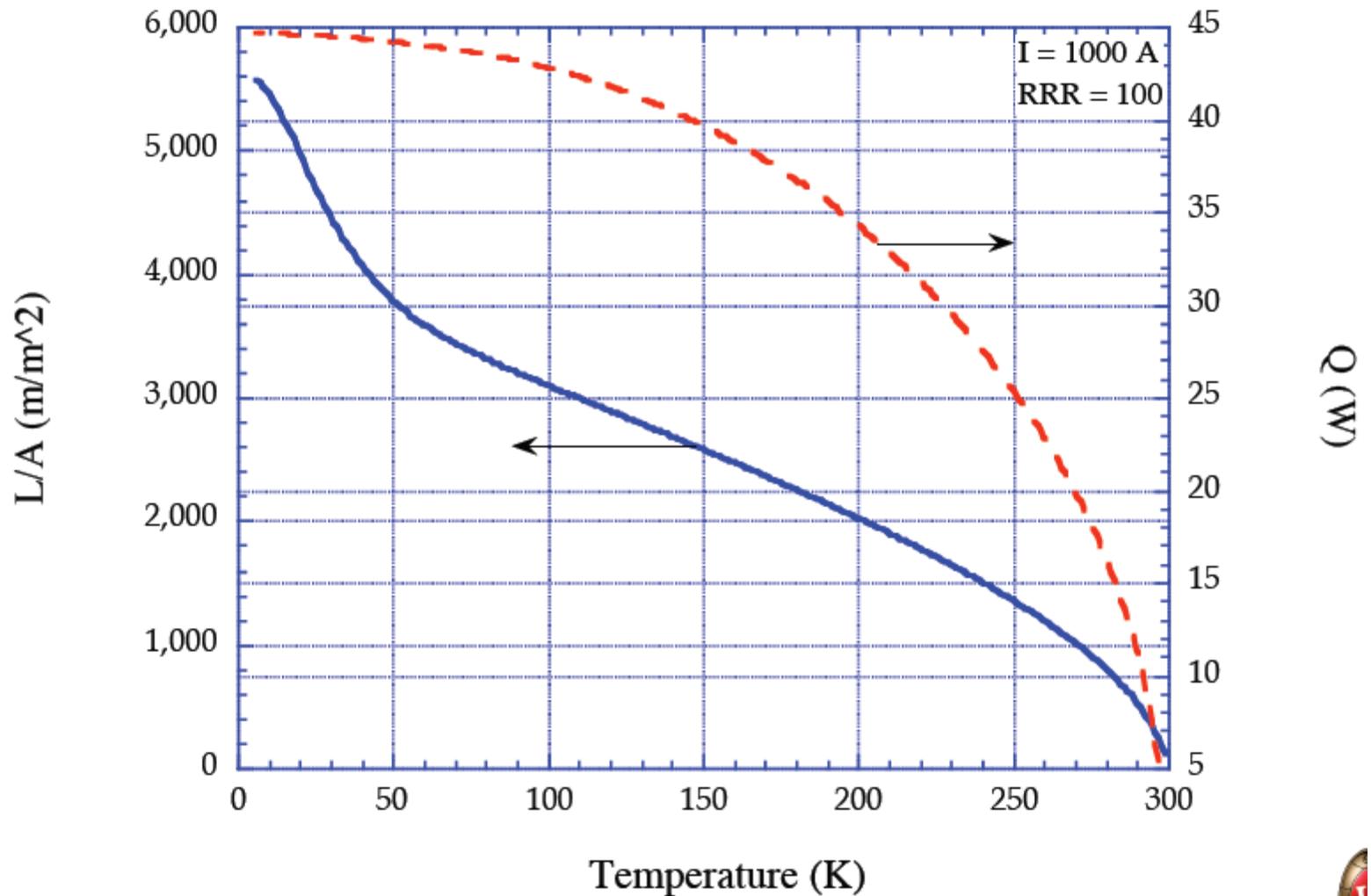
$$\left(kA \frac{dT}{dx} \right)_c^2 = 2I^2 \int_{T_c}^{T_h} k\rho dT \Rightarrow dx = \frac{kA dT}{\sqrt{2I \left(\int_{T_c}^{T_h} k\rho dT \right)^{1/2}}}$$

As T is lowered, this equation defines the additional length required to produce Q_{\min} at T_c

- Finally:

$$\frac{L}{A} = \frac{1}{I\sqrt{2}} \int_{T_c}^{T_h} \frac{k dT^*}{\left(\int_{T^*}^{T_h} k\rho dT \right)^{1/2}} \quad \text{OR} \quad JL = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{T_c}^{T_h} \frac{k dT^*}{\left(\int_{T^*}^{T_h} k\rho dT \right)^{1/2}}$$

Conduction Cooled Lead: Sample Results





Vapor Cooled Lead

- Energy balance at steady state is given by:

$$\frac{l^2 \rho}{A} + \frac{d}{dx} \left(Ak \frac{dT}{dx} \right) - \dot{m} C_p \frac{dT}{dx} = 0$$

- Goal is to minimize \dot{m} with $\dot{m} = \frac{1}{C_L} kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}$
- Variety of solution methods: J.E.C. Williams (1963), Deines (1965), Lock (1969), Dresner (1995) - similarity solution: (special units)

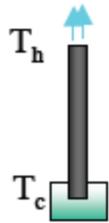
$$\ln \left(\frac{T_h}{T_c} \right) = \ln \left(\frac{s_c^2}{T_c^2} - \frac{s_c^2}{T_c} + 1 \right)^{1/2} + s_c (4 - s_c^2)^{-1/2} \arctan \left[\frac{s_c (4 - s_c^2)^{1/2}}{2T_c - s_c^2} \right]$$

- Q_{\min}/I (ordinary units) = $s_c L_o^{1/2} \left(\frac{C_L}{C_p} \right)$

Helium: $T_h = 300$ K, $T_c = 4$ K, $s_c = 1.79$, $Q/I = 1.12$ W/kA

- Examples: Neon: $T_h = 300$ K, $T_c = 27$ K, $s_c = 1.23$, $Q/I = 16.1$ W/kA

Nitrogen: $T_h = 300$ K, $T_c = 77$ K, $s_c = 0.855$, $Q/I = 25.4$ W/kA



Vapor Cooled Lead (cont.)

- Optimum aspect ratio (similarity solution - special units)

$$\frac{L}{k} = 2(4 - s_c^2)^{-1/2} \arctan \left[\frac{s_c(4 - s_c^2)^{1/2}}{2T_c - s_c^2} \right] ; \quad JL = \left(\frac{L}{k} \right)_{\text{special units}} * \frac{k}{L_o^{1/2}}$$

using an integrated average value of k over the temperature range, and the Lorentz constant $L_o = 2.45 \times 10^{-8} \text{ (W}\Omega/\text{K}^2)$ gives (for a 1 kA lead)

- Helium VCL (300 K - 4.2 K)

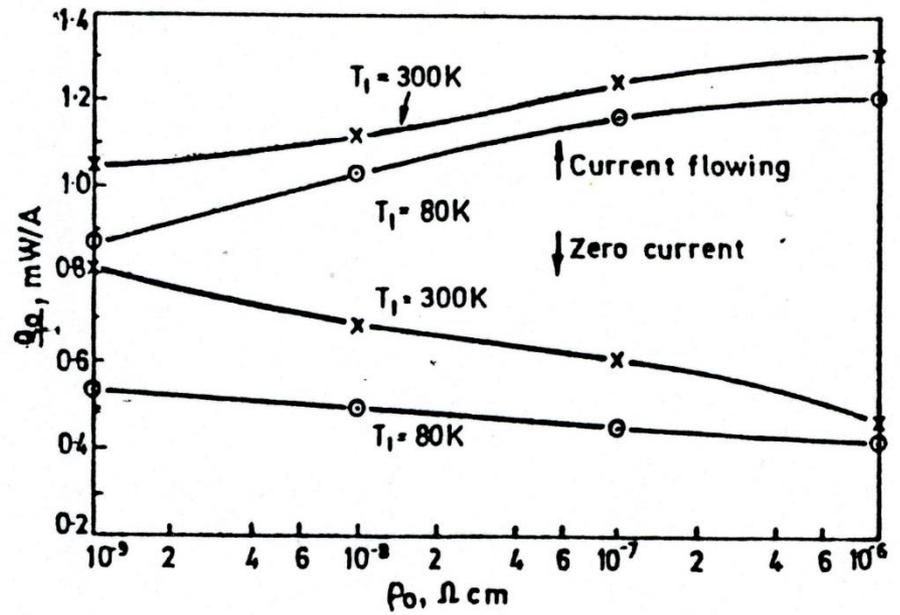
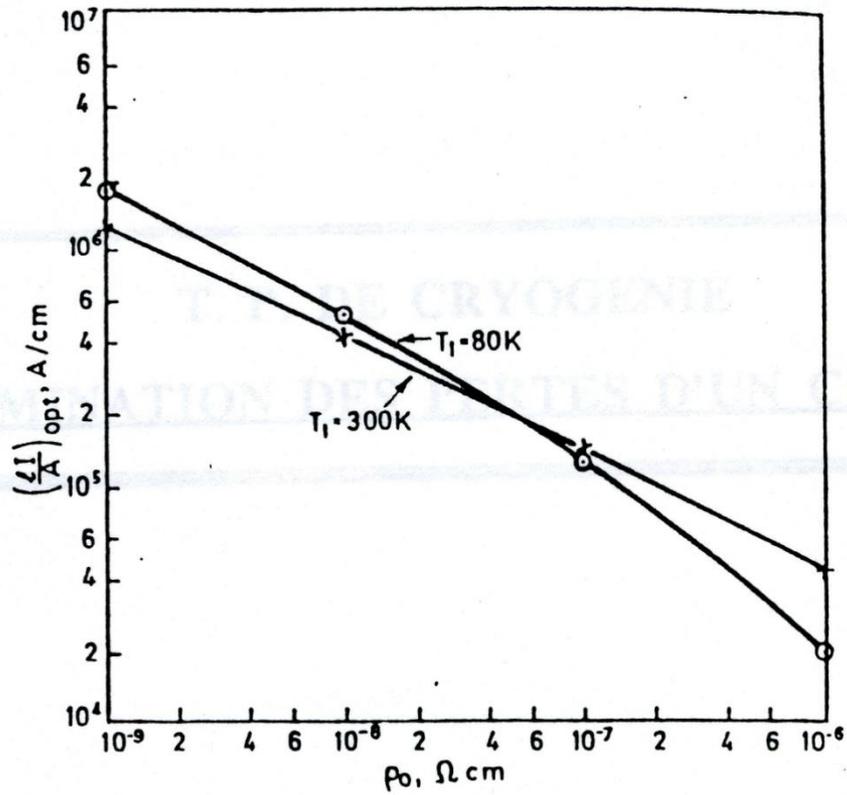
$$\left(\frac{L}{k} \right)_{\text{s.u.}} = 4.87 \Rightarrow LJ = \frac{LI}{A} = 1.62 \times 10^7 \text{ A / m} \Rightarrow \frac{L}{A} = 162 \text{ cm / cm}^2$$

- Neon VCL (300 K - 27 K)

$$\left(\frac{L}{k} \right)_{\text{s.u.}} = 1.985 \Rightarrow LJ = \frac{LI}{A} = 6.28 \times 10^6 \text{ A / m} \Rightarrow \frac{L}{A} = 62.8 \text{ cm / cm}^2$$

- Nitrogen VCL (300 K - 77 K)

$$\left(\frac{L}{k} \right)_{\text{s.u.}} = 1.675 \Rightarrow LJ = \frac{LI}{A} = 4.93 \times 10^6 \text{ A / m} \Rightarrow \frac{L}{A} = 49.3 \text{ cm / cm}^2$$



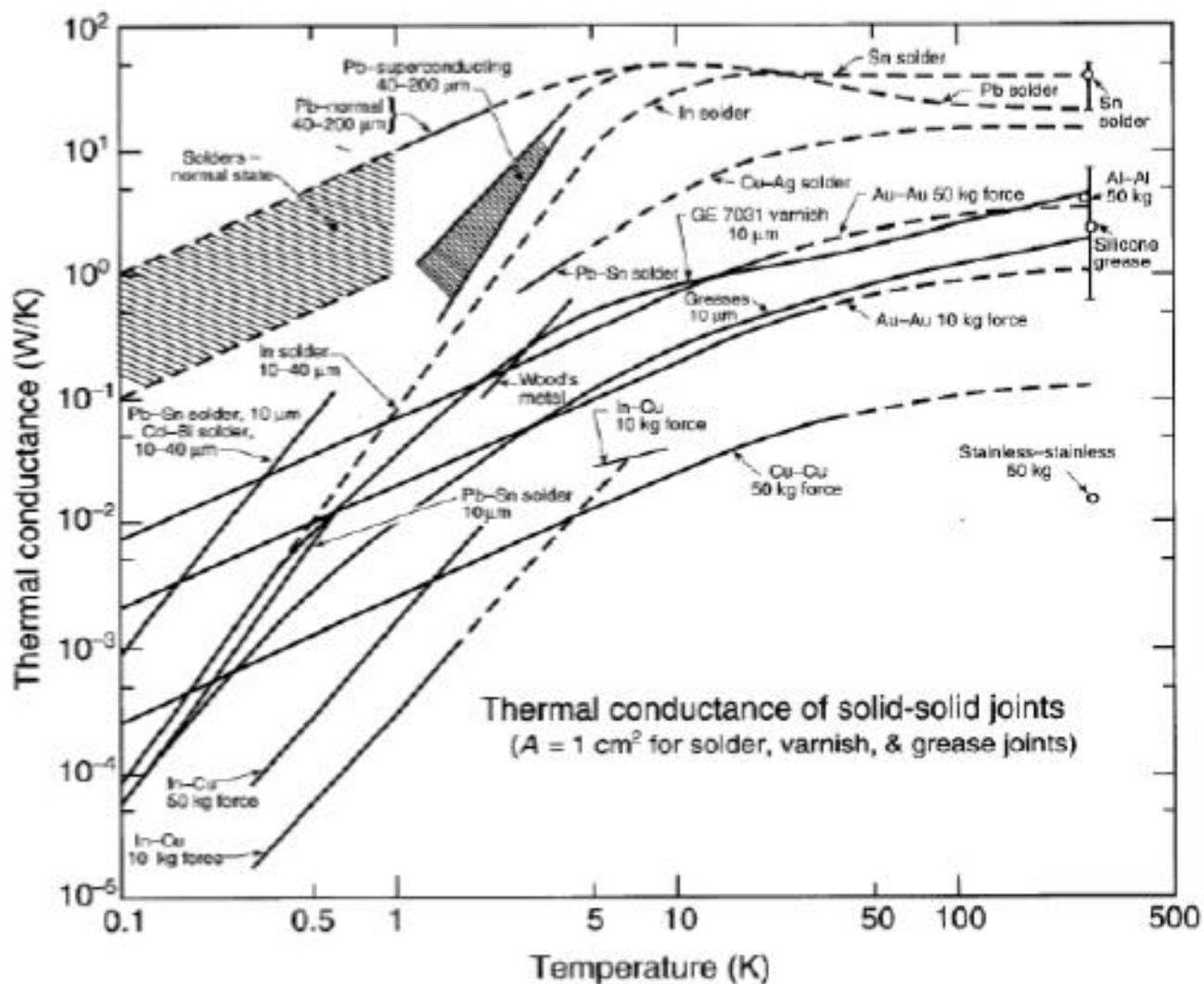


Fig. 2.12 Thermal contact conductance as a function of temperature for a variety of contact preparations and conditions. The contact assumes a 1 cm^2 area. Data compiled by Radebaugh [25] (Reprinted from Ekin [6])