

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Méthodes empiriques: utilisation du graphe 9.2-1 de BSL

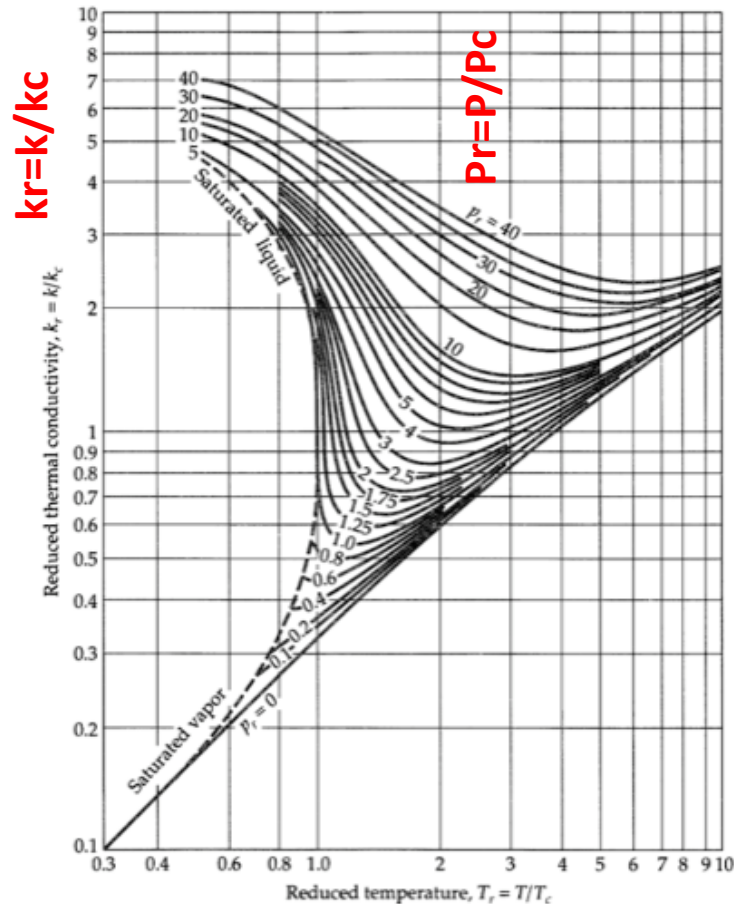


Fig. 9.2-1. Reduced thermal conductivity for monatomic substances as a function of the reduced temperature and pressure [E. J. Owens and G. Thodos, *AIChE Journal*, 3, 454-461 (1957)]. A large-scale version of this chart may be found in O. A. Hougen, K. M. Watson, and R. A. Ragatz, *Chemical Process Principles Charts*, 2nd edition, Wiley, New York (1960).

- Si on connaît la conductivité k d'un gaz en un point expérimental (T,P) ,
- et on connaît les propriétés critiques T_c et P_c .
- Alors, on évalue sur le graphique la valeur de k_R et ensuite la valeur de k_C sera évaluée en faisant simplement $k_C = k / k_R$.
- Par la suite il sera facile de déterminer la conductivité en tout autre point.

$Tr = T/Tc$: température réduite

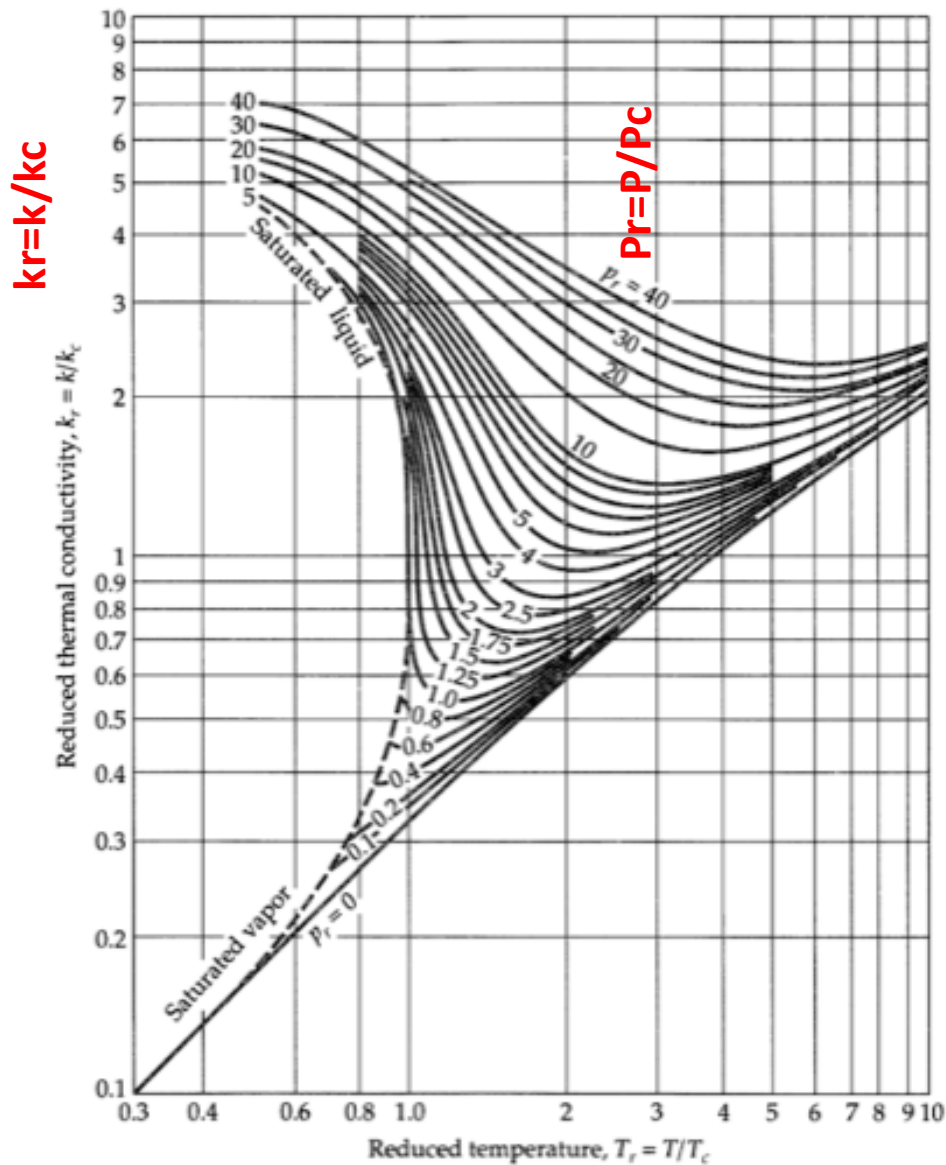
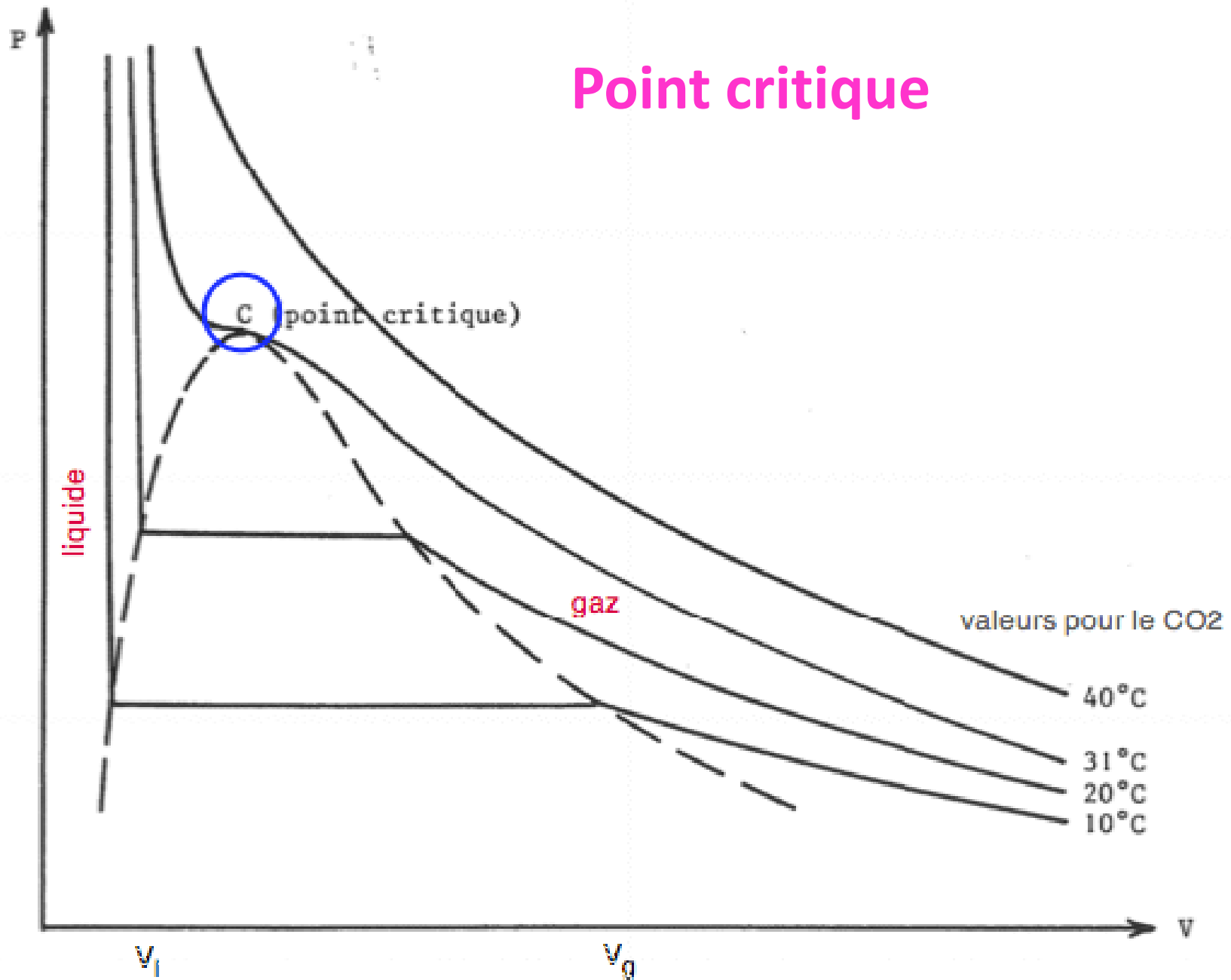


Fig. 9.2-1. Reduced thermal conductivity for monatomic substances as a function of the reduced temperature and pressure [E. J. Owens and G. Thodos, *AIChE Journal*, 3, 454-461 (1957)]. A large-scale version of this chart may be found in O. A. Hougen, K. M. Watson, and R. A. Ragatz, *Chemical Process Principles Charts*, 2nd edition, Wiley, New York (1960).

Pr. M. El Morsli

Lorsque les données de conductivité thermique pour un composé particulier ne peuvent pas être trouvées, on peut effectuer une estimation en utilisant ce graphique qui est basé sur les données de conductivité thermique pour plusieurs substances monoatomiques.

$T_r = T/T_c$: température réduite



Point critique

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Méthodes empiriques: utilisation du graphe 9.2-1 de BSL

Exemple d'application

Estimer la conductivité thermique de l'éthane (C₂H₆) à 100.7°F et 191.1 atm. Avec:

$$T(^{\circ}F) = \frac{9}{5}t(^{\circ}C) + 32$$

à partir de :

- la **valeur expérimentale connue:** $k=0.0159$ Btu/hr.ft.°F à 100.7°F et 1 atm. (1 Btu=1055,06 J; 1 feet (ft)=0,30 m)
- **Point critique:** Données $T_c=32.4^{\circ}C$ et $P_c=48.2\text{atm}$.

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

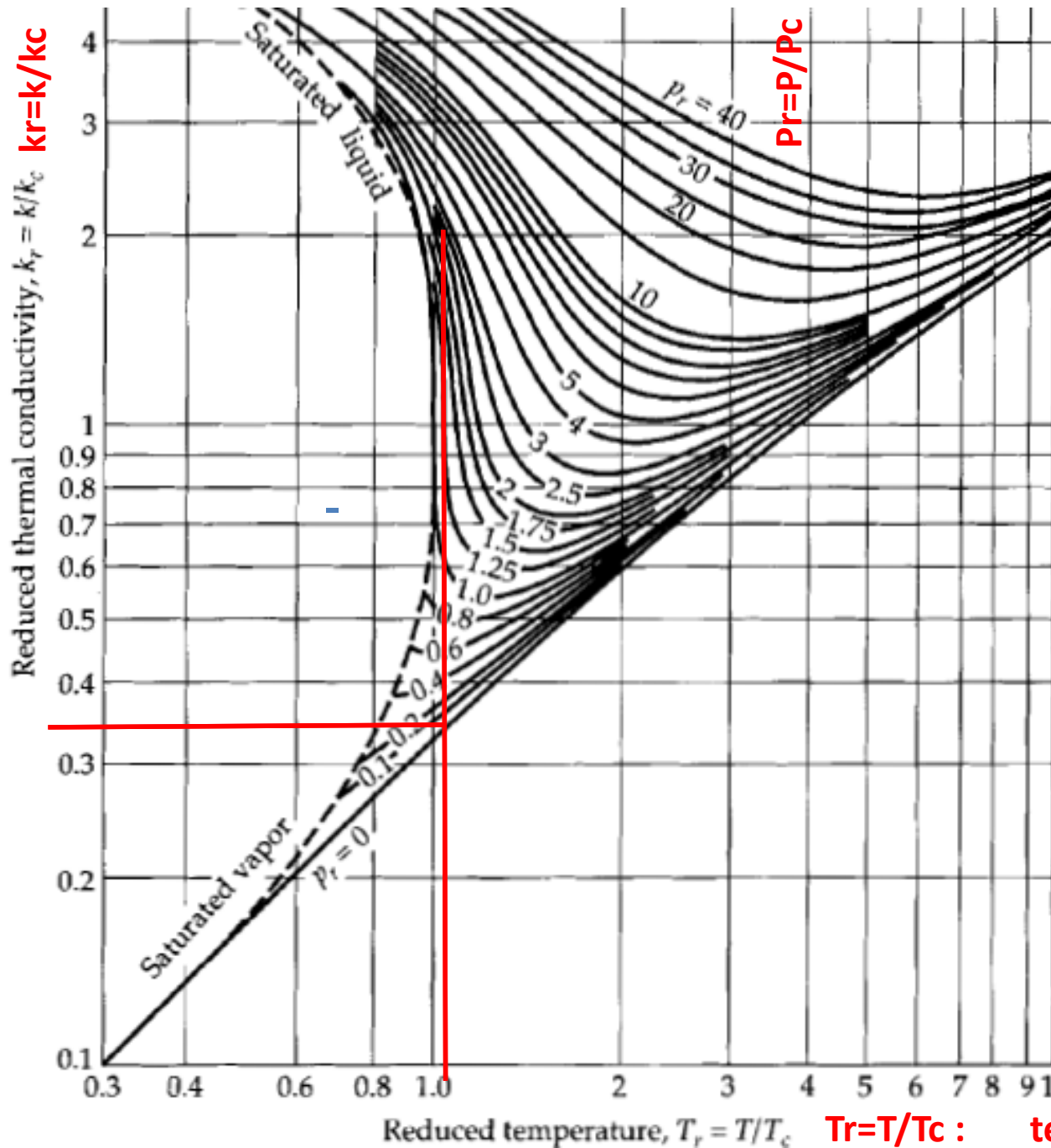
Méthodes empiriques: utilisation du graphe 9.2-1 de BSL

Réponse:

Une valeur mesurée de κ est connue. On calcule T_r et P_r dans les conditions de la valeur mesurée.

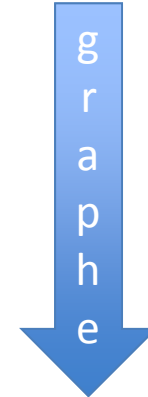
$$T_r = \frac{T_{\text{expérim}}}{T_c} = \frac{100.7^\circ F}{1.8 * T_c + 32} = \frac{100.7}{1.8 * 32.4 + 32} = 1.115$$

$$P_r = \frac{P_{\text{expérim}}}{P_c} = \frac{1}{48.2} = 0.021$$



$$T_r = 1.115$$

$$Pr = 0.021$$



$$k_r = 0.36$$

$$K_c = \frac{K_{\text{expérim}}}{K_r}$$

$$K_c = \frac{0.0159}{0.36}$$

$$K_c = 0.0442 \text{ Btu} / \text{ft} \cdot \text{h} \cdot \text{°F}$$

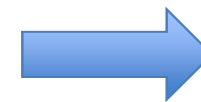
DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Méthodes empiriques: utilisation du graphe 9.2-1 de BSL

Réponse:

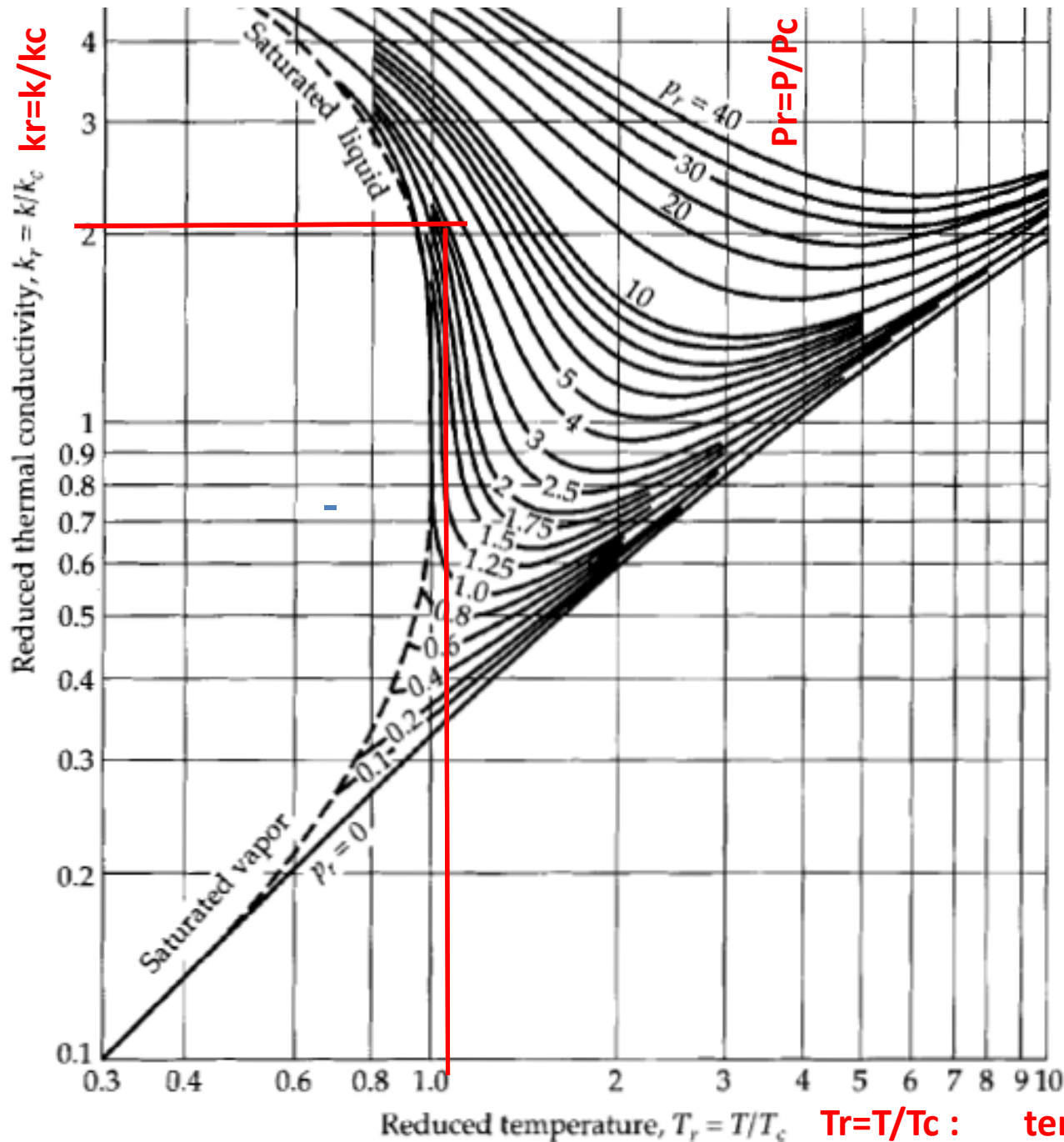
Maintenant, on calcule T_r et P_r dans les conditions où on veut déterminer la conductivité:

$$T_r = \frac{T_{conditions}}{T_c} = \frac{100.7^\circ F}{1.8 * T_c + 32} = \frac{100.7}{1.8 * 32.4 + 32} = 1.115$$



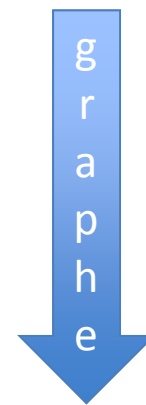
On relit k_r

$$P_r = \frac{P_{conditions}}{P_c} = \frac{191,9}{48.2} = 3,98$$



$$T_r = 1.115$$

$$P_r = 3,98$$



$$k_r = 2,07$$

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Méthodes empiriques: utilisation du graphe 9.2-1 de BSL

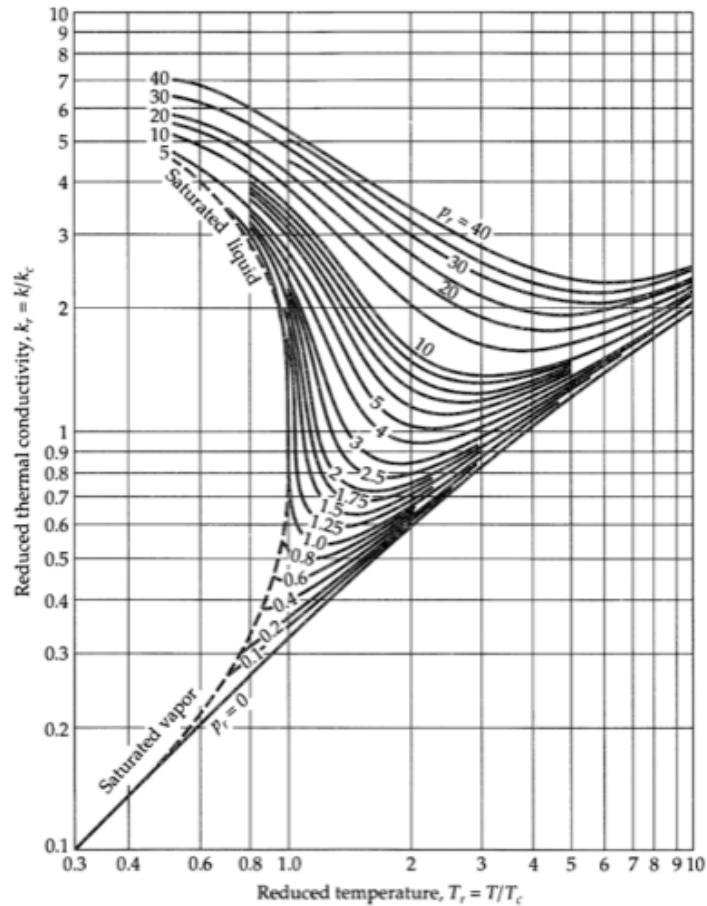


Fig. 9.2-1. Reduced thermal conductivity for monatomic substances as a function of the reduced temperature and pressure [E. J. Owens and G. Thodos, *AIChE Journal*, 3, 454-461 (1957)]. A large-scale version of this chart may be found in O. A. Hougen, K. M. Watson, and R. A. Ragatz, *Chemical Process Principles Charts*, 2nd edition, Wiley, New York (1960).

Donc:

$$K = K_r K_c = 2.07 * 0.0442 = 0.0914 \text{ Btu/hr. ft. F}$$

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Méthodes empiriques: utilisation du graphe 9.2-1 de BSL

Exercice 1: Estimer la conductivité thermique de l'éthane à $T=190$ °F et $P= 100$ atm

à partir des valeurs **expérimentales** $k = 0.0159$ Btu/hr. ft .F à 1 atm et 153°F.

Données $T_c=32.4^0C$ et $P_c=48.2atm$

Exercice 2: Calculez la conductivité thermique du tétrachlorométhane CCl_4 (liquide saturé) à 45 degrés C.

à partir des valeurs **expérimentales** $k=0.09929$ W/m.k à 300K

Données $T_c=556.4K$, $P_c=45$ atm

DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES GAZES

Théorie cinétique des gaz (Lennard-Jones), propose de calculer la conductivité thermique k pour un **gaz monoatomique** par:

$$k = 1.9891 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k} \text{ Cal cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

**Relation
Chapman-Enskog**

$$T[K] \quad \sigma[A^{\circ}] \quad M[g/mol]$$

Table E-1 → paramètres de Lennard-Jones

Détermination de la conductivité thermique des gazes:

Table E.1 Lennard-Jones (6-12) Potential Parameters and Critical Properties

Substance	Molecular Weight M	Lennard-Jones parameters			Critical properties ^{a,b}				
		σ (Å)	ϵ/k (K)	Ref.	T_c (K)	p_c (atm)	\tilde{V}_c (cm ³ /g-mole)	μ_c (g/cm ³ · s × 10 ⁶)	k_c (cal/cm ³ · s · K × 10 ⁶)
Light elements:									
H ₂	2.016	2.915	38.0	<i>a</i>	33.3	12.80	65.0	34.7	—
He	4.003	2.576	10.2	<i>a</i>	5.26	2.26	57.8	25.4	—
Noble gases:									
Ne	20.180	2.789	35.7	<i>a</i>	44.5	26.9	41.7	156.	79.2
Ar	39.948	3.432	122.4	<i>b</i>	150.7	48.0	75.2	264.	71.0
Kr	83.80	3.675	170.0	<i>b</i>	209.4	54.3	92.2	396.	49.4
Xe	131.29	4.009	234.7	<i>b</i>	289.8	58.0	118.8	490.	40.2
Simple polyatomic gases:									
Air	28.964 ⁱ	3.617	97.0	<i>a</i>	132.4 ⁱ	37.0 ⁱ	86.7 ⁱ	193.	90.8
N ₂	28.013	3.667	99.8	<i>b</i>	126.2	33.5	90.1	180.	86.8
O ₂	31.999	3.433	113.	<i>a</i>	154.4	49.7	74.4	250.	105.3
CO	28.010	3.590	110.	<i>a</i>	132.9	34.5	93.1	190.	86.5
CO ₂	44.010	3.996	190.	<i>a</i>	304.2	72.8	94.1	343.	122.
NO	30.006	3.470	119.	<i>a</i>	180.	64.	57.	258.	118.2
N ₂ O	44.012	3.879	220.	<i>a</i>	309.7	71.7	96.3	332.	131.
SO ₂	64.065	4.026	363.	<i>c</i>	430.7	77.8	122.	411.	98.6
F ₂	37.997	3.653	112.	<i>a</i>	—	—	—	—	—
Cl ₂	70.905	4.115	357.	<i>a</i>	417.	76.1	124.	420.	97.0
Br ₂	159.808	4.268	520.	<i>a</i>	584.	102.	144.	—	—
I ₂	253.809	4.982	550.	<i>a</i>	800.	—	—	—	—
Hydrocarbons:									
CH ₄	16.04	3.780	154.	<i>b</i>	191.1	45.8	98.7	159.	158.
CH=CH	26.04	4.114	212.	<i>d</i>	308.7	61.6	112.9	237.	—

Constantes de Lennard-Jones

Paramètres de Lennard-Jones pour quelques gazes

Table E.2 Collision Integrals for Use with the Lennard-Jones (6–12) Potential for the Prediction of Transport Properties of Gases at Low Densities^{a,b,c}

Constantes de
Lennard-Jones

$\kappa T/\varepsilon$ or $\kappa T/\varepsilon_{AB}$	$\Omega_{\mu} = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	$\Omega_{\Sigma,AB}$ (for diffusivity)	$\kappa T/\varepsilon$ or $\kappa T/\varepsilon_{AB}$	$\Omega_{\mu} = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	$\Omega_{\Sigma,AB}$ (for diffusivity)
0.30	2.840	2.649	2.7	1.0691	0.9782
0.35	2.676	2.468	2.8	1.0583	0.9682
0.40	2.531	2.314	2.9	1.0482	0.9588
0.45	2.401	2.182	3.0	1.0388	0.9500
0.50	2.284	2.066	3.1	1.0300	0.9418
0.55	2.178	1.965	3.2	1.0217	0.9340
0.60	2.084	1.877	3.3	1.0139	0.9267
0.65	1.999	1.799	3.4	1.0066	0.9197
0.70	1.922	1.729	3.5	0.9996	0.9131
0.75	1.853	1.667	3.6	0.9931	0.9068
0.80	1.790	1.612	3.7	0.9868	0.9008
0.85	1.734	1.562	3.8	0.9809	0.8952
0.90	1.682	1.517	3.9	0.9753	0.8897
0.95	1.636	1.477	4.0	0.9699	0.8845
1.00	1.593	1.440	4.1	0.9647	0.8796
1.05	1.554	1.406	4.2	0.9598	0.8748
1.10	1.518	1.375	4.3	0.9551	0.8703
1.15	1.485	1.347	4.4	0.9506	0.8659
1.20	1.455	1.320	4.5	0.9462	0.8617
1.25	1.427	1.296	4.6	0.9420	0.8576
1.30	1.401	1.274	4.7	0.9380	0.8537
1.35	1.377	1.253	4.8	0.9341	0.8499
1.40	1.355	1.234	4.9	0.9304	0.8463
1.45	1.334	1.216	5.0	0.9268	0.8428
1.50	1.315	1.199	6.0	0.8962	0.8129

Constantes de Lennard-Jones

1.50	1.315	1.199	6.0	0.8962	0.8129
1.55	1.297	1.183	7.0	0.8727	0.7898
1.60	1.280	1.168	8.0	0.8538	0.7711
1.65	1.264	1.154	9.0	0.8380	0.7555
1.70	1.249	1.141	10.0	0.8244	0.7422
1.75	1.235	1.128	12.0	0.8018	0.7202
1.80	1.222	1.117	14.0	0.7836	0.7025
1.85	1.209	1.105	16.0	0.7683	0.6878
1.90	1.198	1.095	18.0	0.7552	0.6751
1.95	1.186	1.085	20.0	0.7436	0.6640
2.00	1.176	1.075	25.0	0.7198	0.6414
2.10	1.156	1.058	30.0	0.7010	0.6235
2.20	1.138	1.042	35.0	0.6854	0.6088
2.30	1.122	1.027	40.0	0.6723	0.5964
2.40	1.107	1.013	50.0	0.6510	0.5763
2.50	1.0933	1.0006	75.0	0.6140	0.5415
2.60	1.0807	0.9890	100.0	0.5887	0.5180

Détermination de la conductivité thermique des gazes

Exemple: Calculer la conductivité thermique du néon (Ne) à 1atm et 373.2K.

La masse molaire de Ne est 20.183 g/mol.

Table E.1 : on trouve les paramètres de Lennard-Jones: σ ; ϵ/k

$$\sigma = 2.789 \text{ \AA} \quad \text{et} \quad \epsilon/k = 35.7 \text{ K}$$

À T=373.2K , on forme le rapport: $kT/\epsilon = 373.2/35.7 = 10.45$

Détermination de la conductivité thermique des gazes

Exemple (suite):

À partir de $kT/\varepsilon = 373.2/35.7 = 10.45$



Table E.2, on trouve $\Omega_k = 0.821$, d'où

$$\kappa = (1.9891 \times 10^{-4}) \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k}$$

$$\kappa = (1.9891 \times 10^{-4}) \frac{\sqrt{373.2/20.183}}{(2.789)^2 (0.821)}$$

$$\kappa = 1.338 \times 10^{-4} \text{ cal/cm s K}$$

Détermination de la conductivité thermique des gazes

Gaz polyatomique

Étape ①

on détermine d'abord la **viscosité** par la méthode décrite au chapitre 1 (transfert de quantité de mouvement), elle s'exprime en **g/cm.s**

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}}$$

Étape ②: on utilise ensuite la relation approximée suivante (**Eucken**):

$$k = \left(\tilde{C}_p + \frac{5}{4} R \right) \mu / M \quad \text{Avec} \quad R = 1,987 \text{ cal / mol / K}$$

Détermination de la conductivité thermique des gazes

Mélange de gazs

Formule de Wilke

$$k_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i k_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}}$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

X_i: fraction molaire de l'espèce i

K_i: conductivité thermique de l'espèce i

M_i: masse molaire de l'espèce i

μ_i: viscosité cinématique de l'espèce i

Conversion - unités

Gas law constant (R)	8.31451	J/g-mol · K
	8.31451×10^3	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{kg-mol} \cdot \text{K}$
	8.31451×10^7	$\text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2 \cdot \text{g-mol} \cdot \text{K}$
	1.98721	cal/g-mol · K
	82.0578	$\text{cm}^3 \text{ atm}/\text{g-mol} \cdot \text{K}$
	4.9686×10^4	$\text{lb}_m \text{ ft}^2/\text{s}^2 \cdot \text{lb-mol} \cdot \text{R}$
	1.5443×10^3	$\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb-mol} \cdot \text{R}$

Table F.3-5 Conversion Factors for Quantities Having Dimensions of ML/t^3T or F/tT (thermal conductivity)

Given a quantity in these units ↓	Multiply by table value to convert to these units →	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ or $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^3 \cdot \text{K}$	$\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^3 \cdot \text{K}$ or $\text{erg}/\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}$	$\text{lb}_m \text{ ft}/\text{s}^3 \text{ F}$	$\text{lb}_f/\text{s} \cdot \text{F}$	$\text{cal}/\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}$	$\text{Btu}/\text{hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{F}$
$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^3 \cdot \text{K}$ k		1	10^5	4.0183	1.2489×10^{-1}	2.3901×10^{-3}	5.7780×10^{-1}
$\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^3 \cdot \text{K}$		10^{-5}	1	4.0183×10^{-5}	1.2489×10^{-6}	2.3901×10^{-8}	5.7780×10^{-6}
$\text{lb}_m \text{ ft}/\text{s}^3 \text{ F}$		2.4886×10^{-1}	2.4886×10^4	1	3.1081×10^{-2}	5.9479×10^{-4}	1.4379×10^{-1}
$\text{lb}_f/\text{s} \cdot \text{F}$		8.0068	8.0068×10^5	3.2174×10^1	1	1.9137×10^{-2}	4.6263
$\text{cal}/\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}$ ← k		4.1840×10^2	4.1840×10^7	1.6813×10^3	5.2256×10^1	1	2.4175×10^2
$\text{Btu}/\text{hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{F}$		1.7307	1.7307×10^5	6.9546	2.1616×10^{-1}	4.1365×10^{-3}	1