

THESE

présentée

A L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG
Section Sciences

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE EN SCIENCES PHYSIQUES

par

Jean-Paul GENDNER

EVALUATION DE QUELQUES METHODES DE MESURES ET DEVELOPPEMENT
D'UN ENSEMBLE D'ACQUISITION DE DONNEES EN TEMPS REEL
APPLIQUES A L'ETUDE DE LA VENTILATION PULMONAIRE

Soutenu le 1 Mars 1978 devant la Commission d'Examen

MM. R.ARMBRUSTER

P.BOUVEROT

P.DEJOURS

G.MONSONEGO

G.SUTTER

Président

} *Examineurs*

Exemples:

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \cdot \frac{T_{\text{sujet}}}{T_{\text{ambiante}}} \cdot \frac{P_B - P_{H_2O}(T_{\text{ambiante}})}{P_B - P_{H_2O}(T_{\text{sujet}})}$$

$$V_{STPD} = V_{BTPS} \cdot \frac{273,15}{T_{\text{sujet}}} \cdot \frac{P_B - P_{H_2O}(T_{\text{sujet}})}{760} \cdot \frac{R(\text{gaz sec})}{R(\text{gaz}, T_{\text{sujet}})}$$

avec: P_B : pression atmosphérique (Torr)

$P_{H_2O}(T)$: pression saturante de vapeur d'eau à la température T (Torr) (voir annexe A)

$R(\text{gaz sec})$: constante R corrigée pour le gaz sec

$R(\text{gaz}, T)$: constante R corrigée pour le gaz saturé de vapeur d'eau à la température T

Le dernier facteur étant très proche de 1, il est généralement omis.

II.3. ANALOGIE ENTRE LES CIRCUITS ACOUSTIQUES ET ELECTRIQUES

La détermination pour des circuits gazeux de caractéristiques telles que la constante de temps, la fréquence de résonance, la section d'une conduite, etc. est souvent difficile. L'habitude des circuits électriques, leur résolution aisée, et la facilité avec laquelle on peut les représenter schématiquement conduit dans certains cas à utiliser des *analogies électriques*, ou circuits "équivalents" pour les réseaux acoustiques. Ce qui est possible lorsqu'il y a analogie formelle entre les équations différentielles des circuits de base (Beranek, 1954; Stephens, 1966; Rouard, 1960).

Parmi les analogies usuelles, c'est celle dite "classique" ou "d'impédance" qui a été retenue. Une différence de pression correspond à une différence de potentiel, et un débit à un courant

électrique. Les quantités de fluide sont exprimées en moles ce qui les rend indépendantes de la pression et de la température. Pour un gaz parfait il est équivalent de les exprimer en volume *STPD*. Pour les gaz réels cette équivalence doit être utilisée avec précautions puisque *R* dépend dans une faible mesure du gaz considéré, et de l'humidité relative.

Le tableau II.2 donne les correspondances entre les grandeurs acoustiques et électriques.

II.3.1. RESISTANCE ACOUSTIQUE

La *résistance acoustique* (symbole: voir annexe A) est définie comme le rapport entre la différence de pression aux extrémités d'un élément, et le courant gazeux qui le traverse. Pour des conduites cylindriques de faibles sections, dans lesquelles l'écoulement du fluide peut être considéré comme laminaire (*), le débit volumique est donné par la loi de Poiseuille:

$$q_v = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l}$$

avec q_v : le débit volumique en m^3/s

ΔP : la différence de pression en Pa

d : le diamètre de la conduite en m

l : la distance entre les prises de pression en m

η : la viscosité dynamique du fluide en Pa·s ou Pl (Poiseuille)
(voir tableau II.3).

* Pour que l'écoulement dans une conduite circulaire soit laminaire le nombre de Reynolds doit être inférieur à 2000 (voir fig. II.2)

$$R = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{4 \cdot \dot{n} \cdot M_m \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot d \cdot \eta}$$

v : vitesse du fluide en m/s

d : diamètre de la conduite en m

ρ : masse volumique du fluide en kg/m^3

η : viscosité dynamique en Poiseuille (Pl)

M_m : masse molaire (g/mol)

\dot{n} : intensité du courant gazeux ($mol \cdot s^{-1}$)

ELECTRICITE				ACOUSTIQUE					
Grandeur	Symbole	Définition(n)	Unités S.I.	Grandeur	Symbole	Définition(n)	Unités S.I.	Unités pratiques	Valeur en Unités S.I.
Longueur	l	grd. fond.	m	Longueur	l	grd. fond.	m	cm	10^{-2}
Masse	m	grd. fond.	kg	Masse	m	grd. fond.	kg	g	10^{-3}
Temps	t	grd. fond.	s	Temps	t	grd. fond.	s	s	-
Température thermodynamique	T	grd. fond.	K	Température thermodynamique	T	grd. fond.	K	°C	$0^{\circ}\text{C}=273,15\text{K}$
Intensité de courant	I	grd. fond.	A	Intensité de courant	i	dn/dt	$\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	10^{-6}
Quantité d'électricité	Q	$\int Idt$	C	Quantité de matière gazeuse	n	grd. fond.	mol	μmol	10^{-6}
Potentiel électrique	V	Puissance/ I	V	Pression	P	Force/surface	$\text{Pa}^{(3)}$	Torr	133,322
Résistance électrique	R	V/I	Ω	Résistance acoustique	R_a	P/\dot{n}	$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\text{Torr}\cdot\text{s}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$	$133,322\cdot 10^6$
Capacité électrique	C	Q/V	F	Capacité acoustique	C_a	n/P	$\text{mol}\cdot\text{Pa}^{-1}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{Torr}^{-1}$	$7,501\cdot 10^{-9}$
Inductance	L	$V/\frac{dI}{dt}$	H	Masse acoustique	m_a	$P/\frac{dn}{dt}$	$\text{Pa}\cdot\text{s}^2\cdot\text{mol}^{-1}$	$\text{Torr}\cdot\text{s}^2\cdot\mu\text{mol}^{-1}$	$133,322\cdot 10^6$
Permittivité du milieu	$\epsilon\cdot\epsilon_0\epsilon_r$ ⁽²⁾	C/l	$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	Permittivité acoustique ou coefficient de capacité	ϵ_a	$(1/RT)^{(4)}$	$\text{mol}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{Torr}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$	$7,501\cdot 10^{-9}$

Tableau II.2 - Correspondance entre les grandeurs électriques et acoustiques.

(1) grd. fond.: grandeur fondamentale

(2) $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$; $\epsilon_r = 1$ pour le vide; $\epsilon_r \approx 1$ pour l'air

(3) 1 atmosphère = 101325 Pa = 760 Torr = 1,01325 bar

(4) voir II.3.2.

Gaz	0 °C	20 °C
Air	17,08	18,4*
CO	16,6	17,4*
CO ₂	13,90	15,0*
H ₂	8,35	8,8*
He	18,60	19,41
N ₂	16,6*	17,5*
O ₂	18,9	20,2*
H ₂ O (vapeur)	9,04	12,1 (100 °C)

Tableau II.3 - Viscosité dynamique de quelques fluides en micro-Poiseuille (μPl) (Handbook of Chemistry and Physics, 50th edition, 1969-1970; Moelwyn-Hughes, 1957).

* Ces valeurs sont calculées par interpolations polynomiales du second degré.

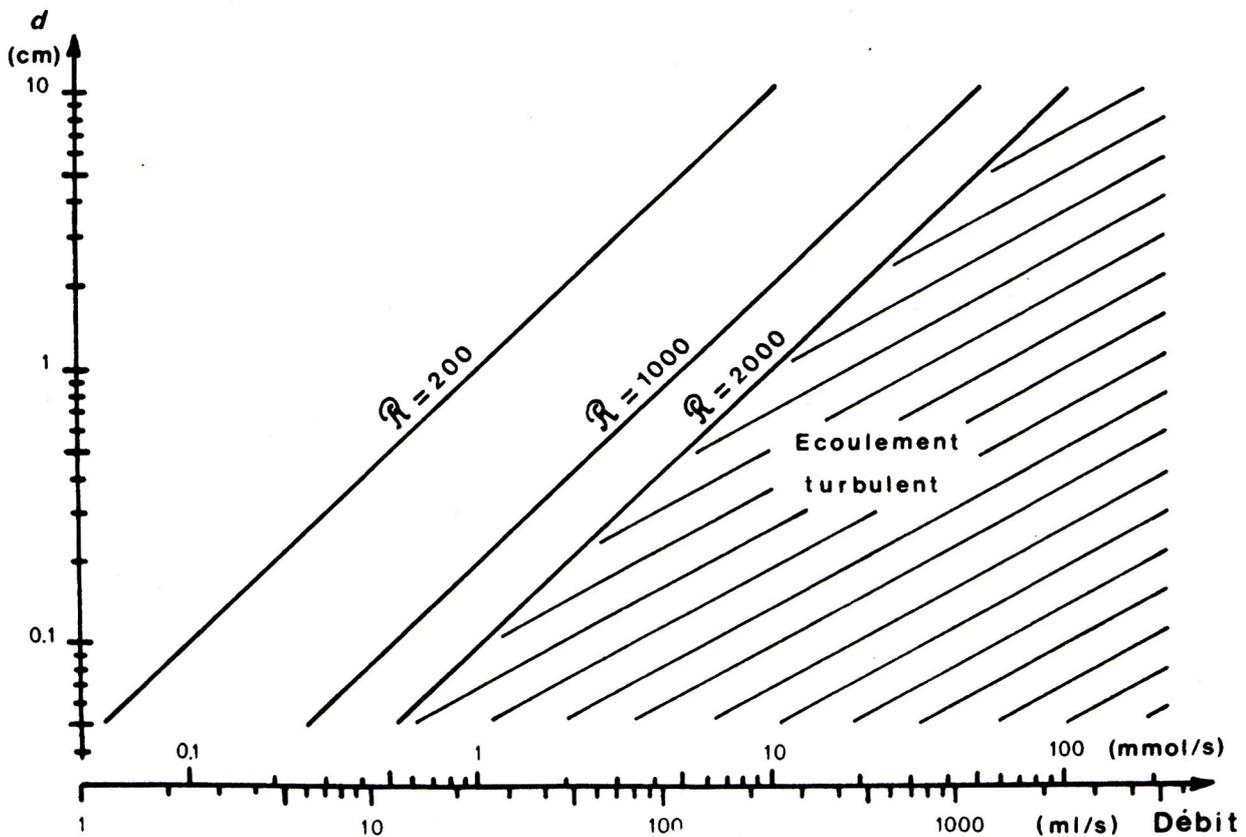


Fig. II.2 - Ecoulement d'air à 20 °C dans des conduites circulaires de diamètre d .

Pour de telles conduites, et en admettant que la longueur d'onde est grande par rapport à l (*), la résistance acoustique exprimée en $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{mol}^{-1}$ sera:

$$Ra = \frac{\Delta P}{\dot{n}} = \frac{\Delta P}{q_v} \cdot \text{Volume molaire} = \frac{128 \cdot \eta(T) \cdot l \cdot V_{\text{molaire}}(T,P)}{\pi \cdot d^4}$$

soit:

$$Ra = \frac{k(\text{gaz}, T, P) \cdot l}{d^4}$$

avec Ra en $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{mol}^{-1}$, l et d en m, $k = 17,99 \cdot 10^{-6}$ pour de l'air sec à 20 °C et 1 atm,

ou Ra en $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$, l et d en cm, $k = 17,99 \cdot 10^{-6}$ pour de l'air sec à 20 °C et 1 atm,

ou Ra en $\text{Torr}\cdot\text{s}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$, l et d en cm, $k = 0,1350 \cdot 10^{-6}$ pour l'air sec à 20 °C et 1 atm.

II.3.2. CAPACITE ACOUSTIQUE

La *capacité acoustique* est définie comme le rapport entre une quantité de matière (gazeuse) et une pression. La loi des gaz (voir II.1) $PV = nRT$ permet donc de déduire:

$$Ca = \frac{n}{P} = \frac{V}{RT}$$

avec Ca en $\text{mol}\cdot\text{Pa}^{-1}$, V en m^3 , T en K, $R = 8,310$ pour l'air

ou Ca en $\mu\text{mol}\cdot\text{Pa}^{-1}$, V en cm^3 , T en K, $R = 8,310$ pour l'air

ou Ca en $\mu\text{mol}\cdot\text{Torr}^{-1}$, V en cm^3 , T en K, $R = 0,06233$ pour l'air.

V est un facteur dimensionnel ou géométrique, $1/RT$ un facteur définissant le milieu, et qui par analogie avec la capacité

* En se limitant à des fréquences de 10 Hz, les plus petites longueurs d'ondes sont de l'ordre de 33 m.

électrique d'une sphère isolée de rayon r (en m): $C = \epsilon 4\pi r$, peut être appelé "permittivité acoustique" du milieu ou *coefficient de capacitance* (Piiper et coll., 1971).

II.3.3. MASSE ACOUSTIQUE

La "masse acoustique", dont le nom a pour origine l'analogie mécanique, est définie comme le rapport entre une différence de pression et la variation de courant gazeux qui l'engendre. Pour des éléments, dont la plus grande dimension est faible par rapport à la longueur d'onde, la seconde loi de Newton:

$$F(t) = m \cdot dv(t)/dt$$

transposée pour un circuit acoustique constitué d'une conduite de longueur l et de section S donne:

$$P(t) = \frac{F(t)}{S} = \frac{m}{S} \cdot \frac{d[v(t) \cdot S]}{dt \cdot S} = \frac{m}{S^2} \cdot \frac{d\dot{n} \cdot V_{\text{molaire}}}{dt}$$

puisque:

$$\frac{d[v(t) \cdot S]}{dt} = \frac{dV}{dt} = \frac{d\dot{n}}{dt} \cdot \text{Volume molaire}$$

dV/dt est le débit volumique et m la masse de gaz. En négligeant les effets "d'extrémités", celle-ci peut être considérée comme égale à:

$$m = l \cdot S \cdot \rho = \frac{l \cdot S \cdot M_m}{V_{\text{mol}}}$$

$$\Rightarrow m_a = \frac{k \cdot l \cdot M_m}{S}$$

M_m : masse molaire du fluide

ρ : masse volumique du fluide $\rho = \rho_0 \cdot T_0 \cdot P / (T \cdot P_0)$

Gaz	Masse molaire (g·mol ⁻¹)	ρ_0 0 °C, 1 atm (g/dm ³)
Air	28,96	1,293
CO	28,0109	1,250
CO ₂	44,0103	1,977
H ₂	2,0159	0,0899
He	4,0026	0,1785
N ₂	28,0134	1,250
O ₂	31,9988	1,429
H ₂ O (vapeur)	18,0153	0,817

Tableau II.4 - Masse molaire et masse volumique de quelques gaz usuels.

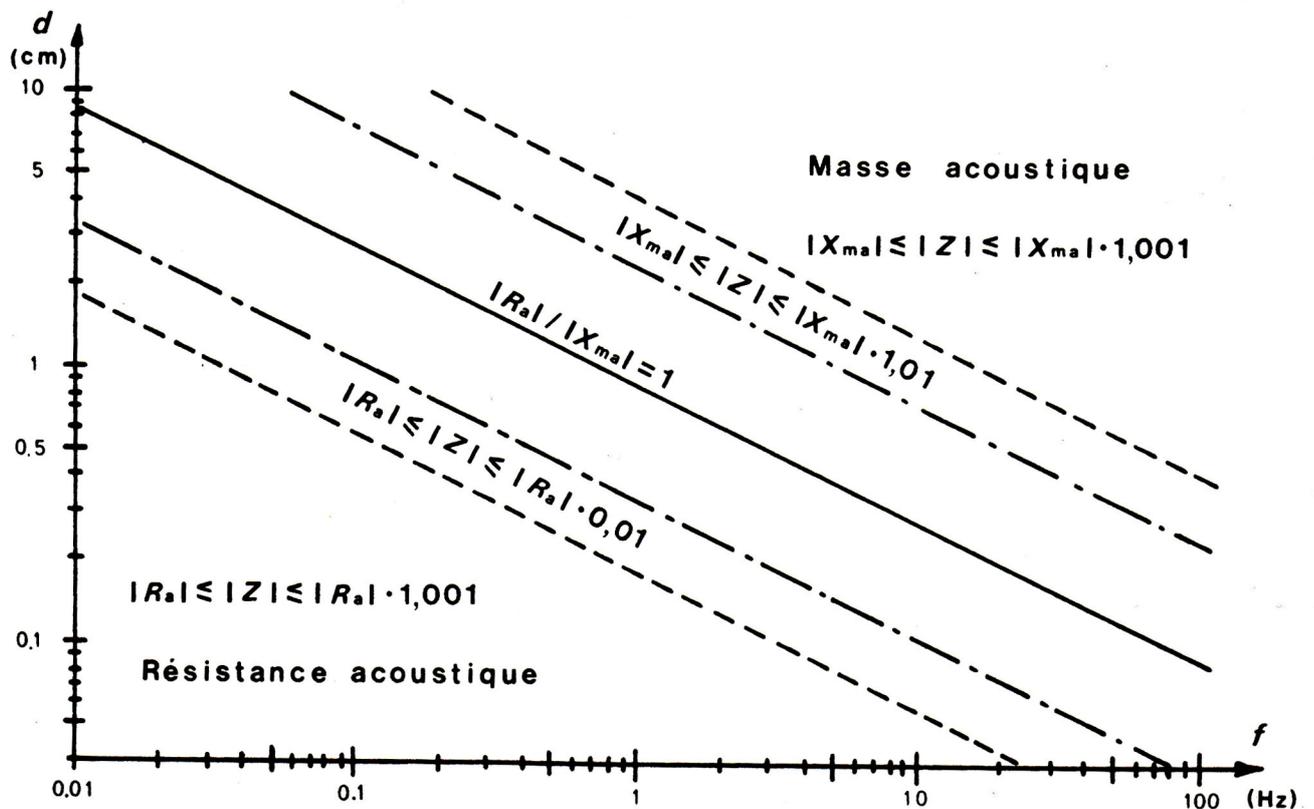


Fig. II.3 - Impédance Z d'une conduite cylindrique en fonction de son diamètre et de la fréquence.

avec l en m, S en m^2 , Mm en $kg \cdot mol^{-1}$, m_a en $Pa \cdot s^2 \cdot mol^{-1}$, $k = 1$
 ou l en cm, S en cm^2 , Mm en $g \cdot mol^{-1}$, m_a en $Pa \cdot s^2 \cdot \mu mol^{-1}$, $k = 10^{-7}$
 ou l en cm, S en cm^2 , Mm en $g \cdot mol^{-1}$, m_a en $Torr \cdot s^2 \cdot \mu mol^{-1}$,
 $k = 7,501 \cdot 10^{-10}$

REMARQUE: La résistance et la masse acoustique d'une conduite cylindrique étant respectivement $k_1 \cdot l/d^4$ et $k_2 \cdot l/d^2$, le rapport Ra/m_a vaut k/d^2 , et le rapport Ra/Xm_a : $k'/(d^2 \cdot f)$ (voir fig. II.3). Xm_a est l'inertance de la masse acoustique. Elle est égale à :

$$Xm_a = m_a \omega = 2\pi m_a f$$

°
° °

ANNEXE A

SYMBOLES ET UNITES

A.1. INDICES

A.1.1. INDICES UTILISES POUR SPECIFIER UNE PHASE GAZEUSE

A	alvéolaire
B	barométrique
D	espace mort
E	expiré
I	inspiré
L	pulmonaire
P	pause
T	du cycle courant

A.1.2. INDICES UTILISES POUR SPECIFIER UNE PHASE LIQUIDE

a*	artériel
b	sanguin
c	capillaire
v	veineux
w	de l'eau

* Cet indice est également utilisé pour distinguer les symboles des grandeurs acoustiques de leurs équivalents électriques.

A.2. SYMBOLES ET UNITES

En physiologie respiratoire

<i>C</i>	concentration ($\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$)
<i>Ca</i>	-
<i>D</i>	coefficient de diffusion ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>d</i>	diamètre (cm)
<i>F</i>	concentration fraction- nelle d'un gaz sec
<i>f</i>	fréquence ($\text{cycle}\cdot\text{min}^{-1}$)
<i>I</i>	-
<i>L</i>	-
<i>l</i>	longueur (cm)
<i>m</i>	masse (g)
<i>n</i>	quantité de matière (μmol)
\dot{n}	débit de "matière" ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>P</i>	pression (Torr)
<i>Q</i>	-
<i>R</i>	quotient respiratoire
<i>Ra</i>	-
<i>T</i>	température ($^{\circ}\text{C}$ ou K) ou période (s)
<i>t</i>	temps (s)
<i>V</i>	volume (l)
\dot{V}	débit volumique ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$)

En physique

	capacité (F)
	capacité acoustique ($\text{mol}\cdot\text{Pa}^{-1}$)
	-
	diamètre (m)
	force (N)
	fréquence (Hz)
	courant électrique (A)
	inductance (H)
	longueur (m)
	masse (kg)
	quantité de matière (mol)
	débit de "matière" ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)
	pression (Pa)
	quantité d'électricité (C) ou quantité de chaleur (cal)
	résistance (Ω)
	résistance acoustique ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{mol}^{-1}$)
	température (K) ou période (s)
	temps (s)
	potentiel électrique (V)
	-

v	vitesse ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	vitesse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Z	-	impédance électrique (Ω)
β	coefficient de capacitance ($\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{Torr}^{-1}$)	-
ϵ	-	permittivité du milieu ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$)
ϵ_a	-	permittivité acoustique ($\text{mol}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$)
ω	-	pulsation = $2\pi f$ (rd/s)

A.3. SYMBOLES MATHÉMATIQUES

\Rightarrow implication

\Leftrightarrow équivalence

\approx peu différent de

A.4. ABREVIATIONS

STPD: Standard temperature, pressure, dry (0 °C, 760 Torr)

BTPS: Body temperature, pressure, saturated with water

ATPD: Ambient temperature, pressure, dry

ATPS: Ambient temperature, pressure, saturated with water.

Notes:

$$0 \text{ } ^\circ\text{C} = +273,15 \text{ K}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2} = 0,98 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg} = 133,322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ cm H}_2\text{O} = 98 \text{ Pa}$$

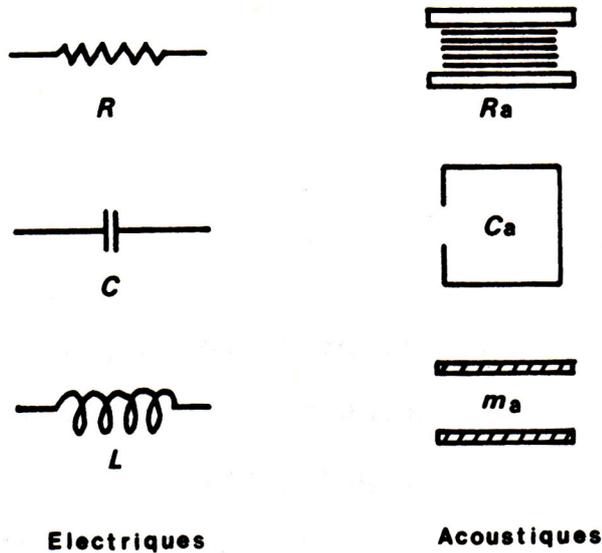


Fig. A.1 - Symboles utilisés pour représenter les résistances, capacités et inductances - masses acoustiques.

T	$P_{\text{H}_2\text{O}}(T)$	T	$P_{\text{H}_2\text{O}}(T)$
$^{\circ}\text{C}$	Torr	$^{\circ}\text{C}$	Torr
0	4,6	25	23,8
5	6,5	30	31,8
10	9,2	35	42,2
15	12,8	37	47,1
20	17,5	40	55,3

Tableau A.1 - Pression de vapeur saturante d'eau à la température T (Handbook of Chemistry and Physics, 1969-1970).