

MP 23 : Capteurs et transducteurs

“Un transducteur est un dispositif de mesure qui fait correspondre à une grandeur d’entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée” selon la définition officielle en métrologie¹. Notons que la réversibilité n’est pas exigée (ex. le pH-mètre). Un transducteur sera souvent considéré comme un convertisseur d’énergie, invitant par là à s’intéresser au rendement (ex. un moteur) ou à la bande passante (ex. un haut parleur) de l’opération de transfert.

“Un capteur est l’élément d’un appareil de mesure ou d’une chaîne de mesure auquel est directement appliqué une grandeur à mesurer”². Cette définition correspond souvent à un transducteur pour lequel la grandeur de sortie est une grandeur électrique. On sera tenté d’associer au capteur la notion de transfert de l’information en provenance d’un système physique, et de considérer qu’il est sensé prélever peu d’énergie au système (ex. un capteur de température). On sera invité à s’intéresser au domaine d’utilisation (étendue de la mesure), et, selon son besoin, aux notions de précision, sensibilité, temps de réponse.

Ce montage illustre donc un domaine de la physique placé entre la physique du composant et l’acquisition et le traitement des signaux.

Notons enfin que, pour le réaliser, nous faisons appel à des capteurs, que nous supposons de qualité métrologique supérieure aux objets de notre étude (à défaut d’employer des étalons).

Nous avons choisi d’illustrer la notion de transducteur par l’étude du haut-parleur et celle de capteur par l’étude comparée de capteurs de température. Nous gardons à l’esprit que les capteurs étudiés sont des transducteurs³.

1 Le Haut-Parleur (HP)

Ici, la conversion est électrique-mécanique (acoustique). On s’intéresse à la fonction de transfert de cette conversion. Le montage est le suivant : branchement en série d’un GBF, d’une résistance (qui sert à mesurer l’intensité du circuit) et du HP; on place un sonomètre à 10 cm du HP. On relève, pour différentes fréquences d’un signal sinusoïdal, la tension efficace U aux bornes du HP, de la résistance (dont on déduit l’intensité I), leur déphasage éventuel ϕ , et l’intensité sonore en dB IdB . On détermine alors le module de l’impédance d’entrée $Z = U/I$ puis la puissance électrique P

On peut tâcher de dégager une notion de rendement $\eta = P_{ac}/P$ où P_{ac} est la puissance acoustique estimée à partir de l’intensité sonore et de la surface du capteur du sonomètre, mais cette donnée, outre qu’elle est difficile à mesurer (il faut faire trop d’hypothèses pour un calcul sommaire : source ponctuelle, rayonnement isotrope, estimation de la surface...), présente un intérêt assez secondaire (un rendement énergétique reste une notion économique et la consommation électrique n’est pas le souci premier d’un HP). Ce n’est jamais que la fonction de transfert en énergie. On s’intéresse plutôt à l’allure du rendement en fonction de la fréquence, soit, à une constante près, $\eta_{dB} = IdB - 10 \log P$, ce qui permet d’appréhender la notion de bande passante.

Notons enfin qu’on mesure en fait le produit des fonctions de transfert du HP et du sonomètre: on s’assure au préalable que celle-ci soit uniforme sur la plage de fréquence considérée. La notice du sonomètre indique une bande passante de 30 à 10000 Hz avec un gain constant.

Cf. annexe 1 pour les relevés expérimentaux.

1.1 Etude qualitative

On montre la production d’un son quand il y a un courant électrique; on montre que le son augmente avec la puissance électrique; on montre que l’intensité ressentie varie avec la fréquence.

1.2 Impédance et bande passante

Les relevés ont été fait en prépa, on reprend une série de mesure à une fréquence donnée. On montre les courbes $Z(f)$ et $\eta_{dB}(f)$. Autant les mesures électriques sont rigoureuses, autant les mesures sonores sont difficiles en raison des réflexions multiples des ondes sonores (il faudrait être en chambre anéchoïque et sans bruit ambiant). On ne fait pas d’estimation d’incertitudes.

On note que la fréquence basse de coupure est liée à l’impédance d’entrée pour le HP électrodynamique (résonance du circuit bouchon).

¹[VIM 1984] VIM : Vocabulaire international des termes généraux et fondamentaux de métrologie, publié par l’ISO (International Standardization Organisation) au nom du BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) et d’autres organismes (dont l’ISO).

²Id.

³Titre : transducteurs et capteurs au pluriel...

1.3 Diagramme de rayonnement (approche en ordre de grandeur)

Biblio QIV : théorie sommaire de la diffraction: $\theta = 0,61 \lambda/a$ (Ex. pour 1000 Hz, $\theta \simeq 120^\circ$) où $2a$ est le diamètre du HP. C'est illusoire de le montrer. On peut quand même faire quelque chose.

On se place à des valeurs faibles de longueur d'onde, soit à des fréquences de 1000 puis 5000 Hz (il faut rester dans la bande passante du HP et du sonomètre) en choisissant un HP large ($2a = 20$ cm). On montre qu'à 5000 Hz, l'intensité sonore diminue d'un cran pour $\theta \sim 30^\circ$, et, de manière moins évidente, pour $\theta \sim 60 - 70^\circ$ à 1000 Hz. On n'observe rien de tel pour un petit HP.

Cf. annexe 2 pour les relevés expérimentaux.

2 Capteurs de température

On fait la mesure $s = f(T)$ où s est le signal électrique du capteur et T la température de points fixes (eau/glace, eau bouillante, azote bouillant), puis pour un bain thermostaté entre 0°C et 100°C . On utilise simultanément la sonde PT100 (thermorésistance de Platine), une CTN et une TK. C'est une reprise du montage "Thermométrie".

2.1 Domaine d'utilisation, linéarité

On exploite la mesure sur les points fixes. (En présentation, sur un seul point fixe). On discute le dispositif de mesure (montage 4 fils pour la Pt100). On discute de l'intensité du courant perturbant la mesure : si on peut évoquer la méthode empirique (on double l'intensité traversant le capteur pour constater aucune élévation du signal), elle ne semble pas possible avec l'appareil utilisé. La notice indique que le courant vaut 1mA dans la gamme de résistance utilisée, soit, pour $R \sim 100\Omega$, une puissance par effet Joule de 10^{-4} W, qu'on peut supposer négligeable sans même connaître la capacité thermique de la sonde. On discute la validité du point fixe (l'eau bouillante semble avoir une température d'environ 98°C : ce n'est pas un système à l'équilibre). On place ici un calcul d'incertitudes.

Le signal du capteur est de la forme $s(T) = s_0(1 + AT + BT^2)$, on détermine A et on estime B; il n'est donc pas exactement linéaire.

On introduit la notion d'échelle pratique de mesure de température: pour le bain thermostaté, on choisira alors la sonde PT100 comme étalon, conformément à l'échelle EIT90. Pour nos besoins, on le considérera linéaire dans notre domaine d'utilisation (0 à 100°C) avec le coefficient déterminé expérimentalement.

Annexe 3.

2.2 Sensibilité

On exploite la mesure du bain thermostaté. (En présentation, on ajoute un point pris à une valeur fixe dans le bain).

2.3 Temps de réponse

Démonstratif (et non métrologique) car dépend surtout du conditionnement (de la gaine). On rappelle à ce sujet qu'on souhaite une capacité thermique basse (on veut prélever peu d'énergie). On ajoute que la variation temporelle de température du bain thermostaté est compatible avec le temps de réponse de la PT 100.

Conclusion

Comment faire l'unité sur les 2 parties ?

Pour les capteurs, on peut faire un tableau récapitulatif dont on déduit que la Pt100 est utile en métrologie pour sa précision, et que la TK sert à boucler un asservissement en raison de sa sensibilité.

Un système bouclé est une bonne ouverture: transducteur en chaîne d'action et capteur en rétroaction, mais l'exemple type (moteur MCC et capteur de position, un simple potard) ne se prête pas à ce montage.

Annexes

Annexe 1 : Impédance et fonction de transfert

Annexe 2 : Diagramme de rayonnement

Annexe 3 : Relevé des températures

Physique

$r=100 \text{ V/A} \rightarrow r=100 \text{ V/A}$

$Z=UHP/U_r \cdot r$

$P=UHP \cdot U_r/r$

$I_0=1e-12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \rightarrow I_0=1 \text{ pN/m} \cdot \text{s}^{-1}$

$I=I_0 \cdot 10^{(IdB/10)}$

$S=4 \cdot \pi \cdot 0.1^2 \text{ m}^2 \rightarrow S=1.25664 \text{ m}^2$

$Pa=I \cdot S$

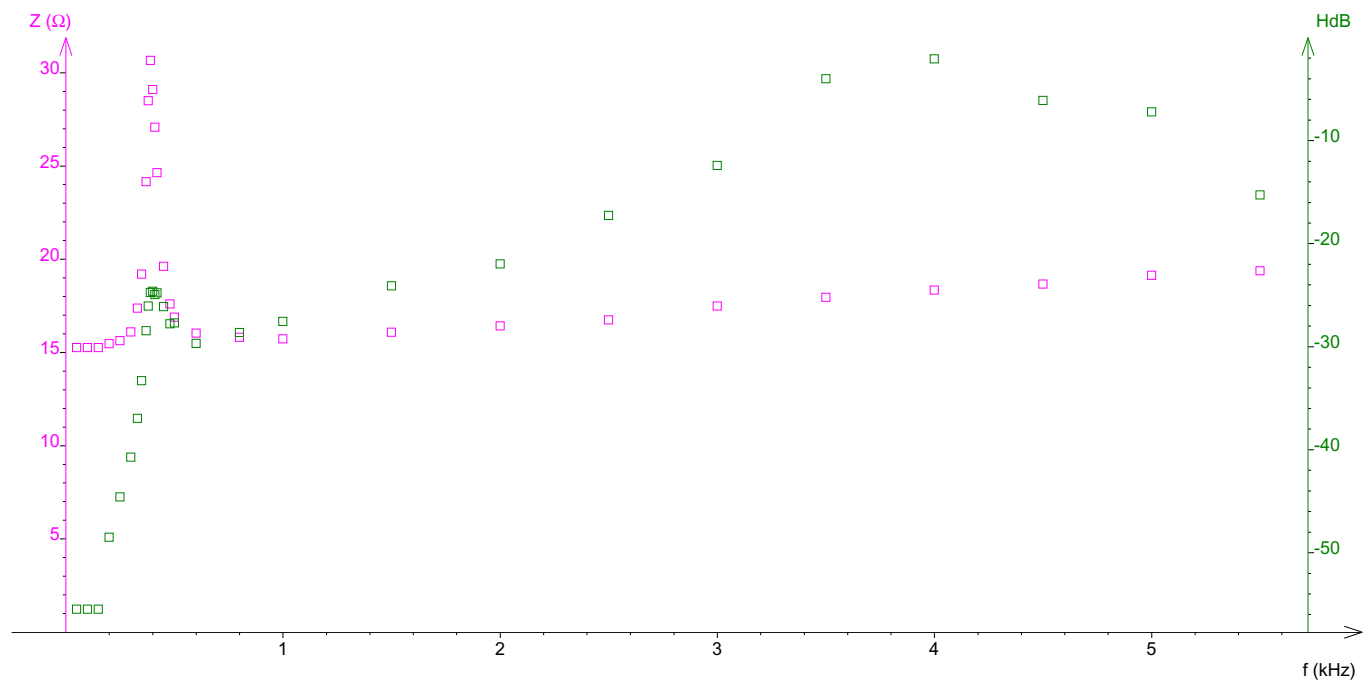
$H=Pa/P$

$HdB=10 \cdot \log(H)$

$HdB2=IdB-10 \cdot \log(P/(S \cdot I_0))$

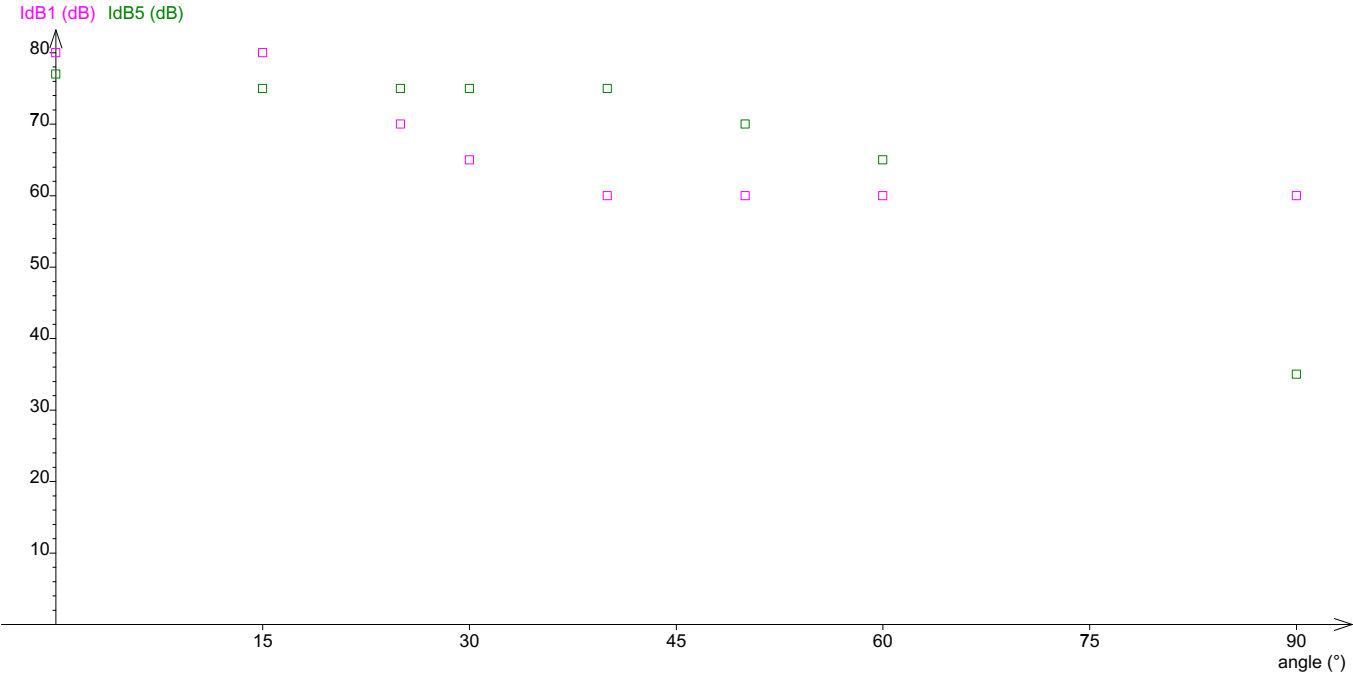
i	f Hz	UHP V	Ur V	IdB dB	Z Ω
0	50.0000	0.328000	2.15000	42.0000	15.2558
1	100.000	0.328000	2.15000	42.0000	15.2558
2	150.000	0.328000	2.15000	42.0000	15.2558
3	200.000	0.331000	2.14000	49.0000	15.4673
4	250.000	0.336000	2.15000	53.0000	15.6279
5	300.000	0.346000	2.15000	57.0000	16.0930
6	330.000	0.370000	2.13000	61.0000	17.3709
7	350.000	0.405000	2.11000	65.0000	19.1943
8	370.000	0.495000	2.05000	70.6000	24.1463
9	380.000	0.570000	2.00000	73.5000	28.5000
10	390.000	0.604000	1.97000	75.0000	30.6599
11	400.000	0.579000	1.99000	75.0000	29.0955
12	410.000	0.547000	2.02000	74.5000	27.0792
13	420.000	0.500000	2.03000	74.3000	24.6305
14	450.000	0.410000	2.09000	72.2000	19.6172
15	480.000	0.373000	2.12000	70.2000	17.5943
16	500.000	0.358000	2.12000	70.1000	16.8868
17	600.000	0.340000	2.12000	67.9000	16.0377
18	800.000	0.335000	2.12000	68.9000	15.8019
19	1000.00	0.335000	2.13000	70.0000	15.7277
20	1500.00	0.341000	2.12000	73.5000	16.0849
21	2000.00	0.348000	2.12000	75.7000	16.4151
22	2500.00	0.355000	2.12000	80.5000	16.7453
23	3000.00	0.369000	2.11000	85.5000	17.4882
24	3500.00	0.377000	2.10000	94.0000	17.9524
25	4000.00	0.385000	2.10000	96.0000	18.3333
26	4500.00	0.390000	2.09000	92.0000	18.6603
27	5000.00	0.400000	2.09000	91.0000	19.1388
28	5500.00	0.405000	2.09000	83.0000	19.3780
29					
P mW	I	Pa	H $10^{-3} \text{ s}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$	HdB	HdB2 dB
7.05200	1.58489E-8	1.99164E-8	0.00282421	-55.4910	-55.4910
7.05200	1.58489E-8	1.99164E-8	0.00282421	-55.4910	-55.4910
7.05200	1.58489E-8	1.99164E-8	0.00282421	-55.4910	-55.4910
7.08340	7.94328E-8	9.98182E-8	0.0140919	-48.5103	-48.5103
7.22400	1.99526E-7	2.50732E-7	0.0347082	-44.5957	-44.5957
7.43900	5.01187E-7	6.29810E-7	0.0846633	-40.7230	-40.7230
7.88100	1.25893E-6	1.58201E-6	0.200738	-36.9737	-36.9737
8.54550	3.16228E-6	3.97384E-6	0.465021	-33.3253	-33.3253
10.1475	1.14815E-5	1.44281E-5	1.42184	-28.4715	-28.4715
11.4000	2.23872E-5	2.81326E-5	2.46777	-26.0769	-26.0769
11.8988	3.16228E-5	3.97384E-5	3.33969	-24.7629	-24.7629
11.5221	3.16228E-5	3.97384E-5	3.44888	-24.6232	-24.6232
11.0494	2.81838E-5	3.54168E-5	3.20532	-24.9413	-24.9413
10.1500	2.69153E-5	3.38228E-5	3.33230	-24.7726	-24.7726
8.56900	1.65959E-5	2.08550E-5	2.43377	-26.1372	-26.1372
7.90760	1.04713E-5	1.31586E-5	1.66405	-27.7883	-27.7883

7.58960	1.02329E-5	1.28591E-5	1.69430	-27.7101	-27.7101
7.20800	6.16595E-6	7.74836E-6	1.07497	-29.6860	-29.6860
7.10200	7.76247E-6	9.75461E-6	1.37350	-28.6217	-28.6217
7.13550	1.00000E-5	1.25664E-5	1.76111	-27.5421	-27.5421
7.22920	2.23872E-5	2.81326E-5	3.89152	-24.0988	-24.0988
7.37760	3.71535E-5	4.66885E-5	6.32841	-21.9871	-21.9871
7.52600	0.000112202	0.000140997	18.7347	-17.2735	-17.2735
7.78590	0.000354813	0.000445872	57.2666	-12.4210	-12.4210
7.91700	0.00251189	0.00315653	398.703	-3.99351	-3.99351
8.08500	0.00398107	0.00500276	618.771	-2.08470	-2.08470
8.15100	0.00158489	0.00199164	244.342	-6.12001	-6.12001
8.36000	0.00125893	0.00158201	189.236	-7.22996	-7.22996
8.46450	0.000199526	0.000250732	29.6216	-15.2839	-15.2839



Physique

i	angle °	IdB1 dB	IdB5 dB
0	0.0000	80.0000	77.0000
1	15.0000	80.0000	75.0000
2	25.0000	70.0000	75.0000
3	30.0000	65.0000	75.0000
4	40.0000	60.0000	75.0000
5	50.0000	60.0000	70.0000
6	60.0000	60.0000	65.0000
7	90.0000	60.0000	35.0000
8			



i	Pt100	CTN	TK	TPt100
0	100.070	290.000	-100.00	0.00000
1	102.200	230.000	26.6000	5.44376
2	103.500	201.000	103.000	8.76624
3	104.500	180.200	180.200	11.3220
4	106.000	155.100	362.000	15.1556
5	107.000	138.400	451.000	17.7114
6	108.000	124.500	556.000	20.2671
7	109.000	114.900	659.000	22.8229
8	110.000	103.200	762.000	25.3787
9	111.000	93.9000	877.000	27.9344
10	112.000	85.7000	980.000	30.4902
11	113.000	78.7000	1092.00	33.0459
12	114.000	71.6000	1201.00	35.6017
13	115.000	65.7000	1309.00	38.1574
14	116.100	59.6000	1430.00	40.9688
15	117.000	55.1000	1530.00	43.2689
16	118.000	50.6000	1644.00	45.8247
17	119.000	46.4000	1757.00	48.3805
18	120.000	42.7000	1871.00	50.9362
19	121.000	39.3000	1991.00	53.4920
20	122.000	36.2000	2108.00	56.0477
21	123.000	33.6000	2220.00	58.6035
22	124.000	31.1000	2344.00	61.1592
23	125.000	28.7800	2466.00	63.7150
24	126.000	26.6400	2582.00	66.2707
25	138.200	11.4000	4110.00	97.4510
26				

