1. Définition de “ l’efficience vocale ”

L’efficience vocale est définie comme le rapport de la puissance acoustique rayonnée et de la puissance de l’air fournie par les poumons.

$$E_v = \frac{P_r}{P_a}$$

1.1 <u>Puissance fournie par les poumons</u>

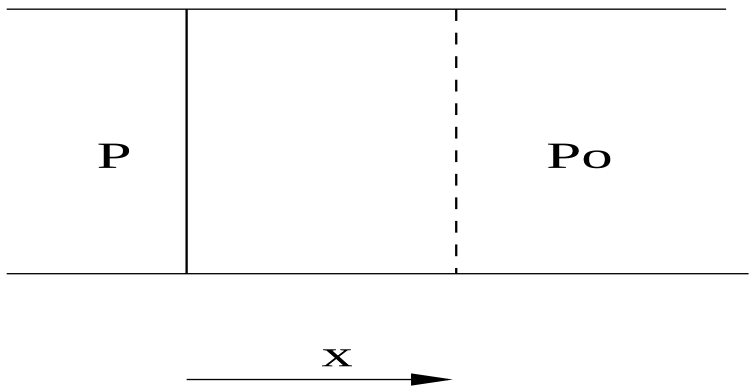
$$Puissance = \frac{Energie}{Temps}$$

Quand l’énergie découle d’une force, l’énergie est égale au travail de la force.

$$Energie = Travail = Force \times Deplacement$$

- Travail d’une force dûe à la pression

Soit un tuyau de section droite S. Considèrons une section quelconque, à gauche de cette section la pression est P, à droite la pression est P_o. La force exercée de gauche vers la droite sur la tranche est :



$$F = (P - P_o).S$$

La tranche d’air se déplace de x pendant le temps t. Le travail de la force est alors :

$$Travail = F.x$$

Soit v la vitesse de déplacement, on a $x = v.t$. L’expression du travail est donc :

$$Travail = F.v.t$$

En prenant $t = 1$ unité de temps (s). il vient :

$$Travail = F.v$$

C’est le travail de la force de pression pendant une unité de temps donc c’est la puissance de cette force.

$$P_a = F.v = (P - P_o).S.v$$

$S.v$ =volume déplacé par unité de temps = débit

$$P_a = (P - P_o).Debit$$

P_o = pression atmosphérique ; $P - P_o$ est une surpression, c'est cette surpression qui mesurée par un tube en U.

Par la suite : $Pa = P.Debit$ sachant que P est une surpression.

1.2 Puissance acoustique rayonnée

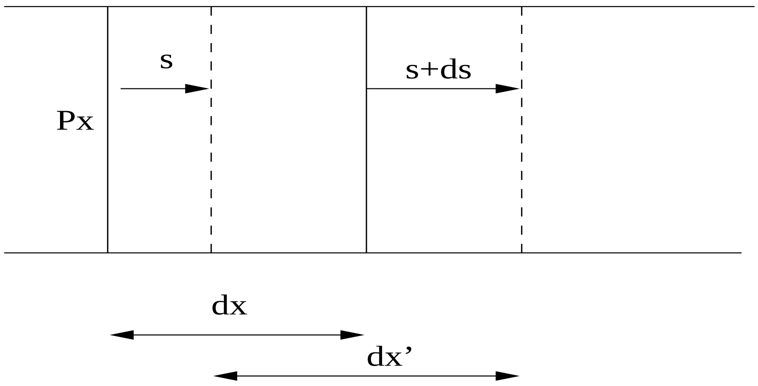
Le son est produit par une variation de pression, qui se propage comme une onde.

On considère une onde qui propage dans un espace libre. Par la pensée on isole un tuyau de section droite S.

- variation de la pression en un point donné.

Dans ce tuyau on considère une tranche d'air dépaisseur dx. Le son est produit par le mouvement de va et vient de cette tranche.

A gauche ce cette tranche la pression est P_x. La partie gauche de la tranche est à l'abscisse x, la partie droite à $x + dx$. Si P_x augmente, la partie gauche de la tranche va se déplacer de s vers la droite, la partie droite se déplace de $s + ds$. La tranche d'air, qui avait l'épaisseur dx a maintenant une épaisseur dx' car l'air peut se dilater ou se comprimer.



s = élongation
v = vitesse du mouvement alternatif de la tranche.
$\theta = \frac{dx'}{dx}$ coefficient de dilatation.
p = pression
Ces variations se propagent comme une onde plane dont les équations sont :

$$s(t) = a. \sin(\omega t - kx)$$

$$v(t) = a.\omega. \cos(\omega t - kx)$$

$$\theta(t) = -a.k. \cos(\omega t - kx)$$

$$p(t) = \rho_o.c.v$$

ω = pulsation = $2\pi f$; f = fréquence
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ = longueur d'onde.
ρ_o = masse volumique de l'air.
c = vitesse du son (340 m/s)

• Ces grandeurs dépendent du temps, elles sont dites instantanées.

• Le terme ωt traduit la périodicité temporelle des variations (fréquence fondamentale, formant ..etc).

• Le terme kx traduit la périodicité spatiale = ce qui s'est produit à $x = 0$ va se reproduire à $x = \lambda$ après un temps de propagation T, tel que $\lambda = c.T$

La puissance acoustique rayonnée P_r est la moyenne dans le temps de la puissance instantanée de la pression $p(t) = \rho_o.c.v$.
Comme la puissance instantanés est donnée par : Pression×Débit

$$p_r(t) = p(t).S.v(t) = S.\rho_o.c.v^2(t) = S.\rho_o.c.a^2.\omega^2 \cos^2(\omega t - kx)$$

- La moyenne dans le temps de cette puissance est non nulle car le terme dépendant du temps $\cos^2(\omega t - kx)$ est toujours positif.
P_r = moyenne temporelle de $p_r(t)$.

$$P_r = \frac{1}{2} S.\rho_o.c.a^2.\omega^2$$

- La puissance rayonnée est proportionnelle au carré de la pulsation donc de la fréquence.

1.3 Décibel

Une autre grandeur souvent utilisée pour chiffrer le niveau sonore est le décibel (ou dB SPL = sound pressure level)

$$L(dB) = 20log_{10}\frac{p}{p_{ref}}$$

$p_{ref} = 2.10^{-5}$ Pa = seuil d'audibilité à 1000 Hz.
$p = 20$ Pa = seuil de la douleur.
La dynamique est très grande = $\frac{20}{2.10^{-5}} = 2.10^{+6}$

2. Commentaires

2.1 unité de l'efficience

“ L'efficience ” vocale ainsi définie est un rapport de puissance, c'est un nombre sans dimension, à condition que les deux puissances soient exprimées avec la même unité (watt par ex.)

Si la puissance rayonnée est mesurée en décibel il faut la convertir en watt. Ceci est bien indiqué dans l'article de Junnong Tang et Elaine T. Stahopoulos (1995) mais moins clairement dans celui d'Eva B. Holmberg, Robert E. Hillman et Joseph S. Perell(1988).

Par conséquent, si on veut faire des comparaisons entre des mesures faites par des équipes différentes, il faut bien vérifier si les mesures sont faites avec les mêmes unités.

2.2 Rendement et pertes

“ L'efficience ” vocale est un rapport de deux nombres. Son interprétation pour qualifier une certaine efficacité du système vocal dépend des conditions de mesure. Il vaut mieux utiliser le mot de rendement qui est plus neutre. Le rendement traduit qu'une partie seulement de la puissance fournie par les pounoms est convertie en puissance acoustique. Entre les poumons et le microphone il y a des pertes. Titze (1992) en cite deux :

1) L'air des poumons doit d'abord mettre les cordes vocales en mouvement. Plus les cordes vocales sont lourdes plus la puissance nécessaire pour mettre les cordes vocales em mouvement doit être grande, plus il y a de perte.

2) Les turbulences de l'air ne sont pas périodiques donc ne participent pas à la production du son. Plus il y a de turbulences moins il y a de son.(sauf pour les sons qui sont produits par le passage de l'air dans un rétrécissemt : fricatives, chuintantes ...etc).

Le rendement est très faible, il varie de 10^{-4} à 10^{-2}.

2.3 Rendement et efficacité

Pour relier ce rendement à une efficacité ou à une défience du système vocal il faut connaître les conditions de la mesure.

Si le rendement diminue cela peut être dû à la diminution de la puissance rayonnée ou à l'augmentation de la puissance fournie. Une diminution du rendement entre deux expériences, traduit une défience si la puissance fournie ou la puissance rayonné est est maintenue constante.

Si la pression venant des poumons est maintenue constante entre les deux expériences et que le rendement diminue cela veut dire que la puissance rayonnée diminue. Pour une même puissance fournie la puissance rayonnée est plus faible, donc le système vocal est moins efficace dans la deuxième expérience.

Si la puissance rayonnée est maintenue constante, et que le rendement diminue cela veut dire qu'il faut plus de puissance fournie par les poumons, donc le système vocal est moins efficace.

Une autre situation où l'interprétation du rendement est difficile, est celle où la fréquence du signal acoustique varie.

Supposons que le système vocal fonctionne comme une machine. Règlons cette machine pour produire un /i/ à 150 Hz (dans les équations définissant la propagation de l'onde plane, l'amplitude a prend une certaine valeur). Cette valeur vient de la façon dont la puissance fournie par les poumons est convertie en puissance sonore. Puis la fréquence est doublée, en gardant le même a c-à-d en restant dans les mêmes conditions de conversion de la puissance fournie en puissance sonore. La puissance rayonnée est mutipliée par quatre car elle proportionnelle au carré de la fréquence. Le rendement est ainsi multiplié par quatre sans que le système vocal soit plus “ efficace ”.

(ceci est une expérience fictive, faite en supposant que la façon dont l'amplitude a est produite en fonction de la puissance fournie est parfaitement connue et contrôlée).

Conclusion

Pour mesurer " l'efficacité " du système vocal il faut d'abord définir cette efficacité. Le rapport de la puissance rayonnée et de la puissance de l'air fournie par les poumons fait certainement partie des grandeurs à mesurer mais il ne suffit pas à caractériser cette efficacité. Il vaut mieux appeler ce rapport **rendement** plutôt que "efficience ". Le lien entre ce rendement et l'efficacité du système vocal reste à étudier.