

# Propriétés acoustiques et articulatoires des voyelles nasales du français

Véronique DELVAUX<sup>\*</sup>, Thierry METENS<sup>#</sup> et Alain SOQUET<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>F.N.R.S., <sup>†</sup>Laboratoire de Phonologie, Université Libre de Bruxelles

<sup>#</sup>Unité de Résonance Magnétique, Hôpital Erasme, Belgique

Mail: vedelvau@ulb.ac.be - <http://www.ulb.ac.be/philolab>

## ABSTRACT

This paper presents data about the articulatory and acoustic properties of French nasal vowels. Data show that many covarying articulations support the phonological contrast between nasal and oral vowels, in addition to the lowering of the velum. The majority of the articulatory adjustments occurring in the oral cavity lead to a lowering of F2. We relate the F2 lowering with the effects of nasal coupling, i.e. the changes in spectral balance due to the loss of energy at higher frequencies.

## 1. INTRODUCTION

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale des propriétés acoustiques et articulatoires des voyelles nasales du français. On vise à décrire de façon détaillée les signaux de parole enregistrés ainsi que les données récoltées en imagerie, en mettant l'accent sur les propriétés communes aux nasales en tant que groupe. L'objectif est de proposer une description unifiée de la production des voyelles nasales du français, qui rend compte de façon explicite des relations entre phénomènes articulatoires et acoustiques.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 2.1. Corpus

Les deux expériences (acoustique et articulatoire) ont été réalisées sur un même corpus et avec les mêmes locuteurs, afin de faciliter la comparaison des données.

Les sujets sont quatre Belges francophones, deux hommes et deux femmes, phonétiquement entraînés. Le corpus est constitué de 28 séquences contenant huit voyelles du français (les quatre nasales et les quatre orales dites correspondantes) dans différents contextes. Ex. /mam mā/ (voir table 1). Chacune des séquences a été répétée trois fois par le locuteur. On a également inclus dans le corpus des voyelles "nasalisées", qui n'appartiennent pas au système phonologique du français. A cette fin, les locuteurs ont prononcé des items du type vŷv en partant des voyelles orales du français. Les instructions étaient de maintenir du début à la fin les articulateurs dans la même position, à l'exception du voile.

### 2.2. Etude articulatoire

Les données articulatoires ont été acquises en IRM à l'Unité de Résonance Magnétique de l'hôpital Erasme de Bruxelles. Nous avons utilisé la technique dite « d'IRM temps réel » mise au point par Thierry Metens, Alain Soquet et Didier Demolin [Met00].

Une coupe médio-sagittale de 6 mm d'épaisseur a été acquise de façon continue pendant 15 secondes à raison de 5 images par seconde. Pour chaque acquisition de 15 secondes, le locuteur était amené par stimulation visuelle à répéter l'une des séquences de sons du corpus.

Le signal de parole était enregistré de façon synchronisée grâce à un microphone optique placé à quelques centimètres de la bouche du locuteur. En raison du bruit émis par la machine, le signal obtenu n'est pas exploitable pour une analyse acoustique fine. On peut cependant associer chaque image avec la portion de signal (200 ms) au cours de laquelle elle a été prise, et donc associer les articulations observées avec le phonème prononcé.

Ainsi, une image en coupe médio-sagittale a été retenue pour chaque répétition d'une voyelle donnée, prononcée dans un contexte donné par un locuteur donné. Ces images ont été analysées à l'aide d'une application développée dans le logiciel éditeur de médias iShell ([www.tribeworks.com](http://www.tribeworks.com)): le profil des articulateurs a été redessiné manuellement sur chaque image IRM.

### 2.3. Etude acoustique

Les quatre locuteurs ont produit les voyelles du corpus dans la chambre sourde du Laboratoire de Phonologie de l'ULB. Le signal de parole a été enregistré sur DAT puis digitalisé, filtré (filtre anti-repliement) et sous-échantillonné à 22050Hz.

Deux types de représentations paramétriques ont été calculées à partir d'une fenêtre de Hamming de 30 ms centrée sur le milieu de chaque voyelle: le spectre donné par l'analyse cepstrale, et les "bandes d'énergie", soit le logarithme de l'énergie calculé à la sortie de 24 filtres triangulaires linéairement répartis dans le domaine fréquentiel sur une échelle Mel.

## 3. ETUDE ARTICULATOIRE

### 3.1. Comparaison entre nasales et orales

Afin de comparer efficacement les positions des articulateurs pendant la prononciation des voyelles nasales et orales, nous avons superposé les profils articulatoires obtenus pour un même sujet, et ce timbre par timbre (a-ã, e-ẽ, o-õ, œ-œ̃) et contexte par contexte. Les trois contextes retenus sont les suivants :

- (1) C\_#, où l'on compare la prononciation des orales et des nasales lorsqu'elles sont placées dans un environnement phonologique strictement identique, ici précédées de l'occlusive /p/.

- (2) **NVN vs. N $\tilde{V}$** , où l'on compare les orales les plus exposées à être nasalisées en raison de la coarticulation, avec les voyelles nasales phonologiques, placées en contexte consonantique nasal également.
- (3) **VVV**, où l'on compare toutes les voyelles orales, nasales et nasalisées, et ce quelle que soit leur position dans ces items.

A quelques exceptions près, les propriétés des voyelles nasales et orales sont tout-à-fait comparables dans les trois contextes étudiés. A des fins d'illustration, on donne dans la figure 1a les profils articulatoires des quatre paires nasales-orales prononcées par des sujets féminins en contexte VVV.

Outre l'abaissement généralisé du voile du palais, on peut observer que les voyelles nasales diffèrent de leur correspondante phonologique orale par de nombreux aspects.

**a- $\tilde{a}$ .** / $\tilde{a}$ / est une voyelle plus arrondie, plus ouverte et plus arrière que /a/. Cette position plus postérieure de la langue pour la nasale est plus fréquente en contexte C\_#. Une différence majeure entre sujets masculins et féminins réside dans la taille de la constriction pharyngale, tant pour les orales que pour les nasales : la place laissée au passage de l'air est nettement plus réduite chez les femmes, si l'on en juge par cette vue médio-sagittale.

**$\epsilon$ - $\tilde{\epsilon}$ .** Ces deux voyelles sont très différentes au point de vue articulatoire. De façon consistante, pour tous les sujets et dans tous les contextes, / $\tilde{\epsilon}$ / est une voyelle plus postérieure et nettement plus ouverte que / $\epsilon$ /. Pour les sujets féminins, la racine de la langue peut être très proche du pharynx.

**$\alpha$ - $\tilde{\alpha}$ .** Les tendances sont celles observées dans le cas de / $\epsilon$ - $\tilde{\epsilon}$ /, mais de façon moins marquée. Pour tous les sujets, / $\tilde{\alpha}$ / est une voyelle plus ouverte que / $\alpha$ /. La langue est également plus rétractée chez les sujets féminins. Ceci est moins régulier en ce qui concerne les sujets masculins.

**$\omega$ - $\tilde{\omega}$ .** L'observation la plus consistante en ce qui concerne ces voyelles est que la nasale est plus arrondie que l'orale correspondante. Chez les hommes, la position de la langue diffère peu entre / $\omega$ / et / $\tilde{\omega}$ / en contexte VVV. Dans les autres contextes, et chez les femmes en général, / $\tilde{\omega}$ / est une voyelle plus arrière que / $\omega$ /, et parfois plus fermée.

### 3.2. Les voyelles nasales du français

**La position du voile.** Elle varie selon la voyelle nasale considérée, mais aussi en fonction du locuteur et du contexte. Très fréquemment pourtant, on constate qu'il existe une relation entre la position du voile du palais et celle de la langue dans la région vélaire.

Ainsi, le voile est généralement le plus bas pour / $\tilde{a}$ /, voyelle très ouverte, et le plus haut pour / $\tilde{\omega}$ /, voyelle postérieure mi-ouverte, voire mi-fermée. La figure 1b compare les profils articulatoires des voyelles nasales deux à deux, soit respectivement les antérieures / $\tilde{\epsilon}$   $\tilde{\alpha}$ / et les postérieures / $\tilde{a}$   $\tilde{\omega}$ /. On montre ici les données concernant le sujet 2 et le contexte VVV. Ces images médio-sagittales illustrent notamment le fait que, dans le

cas de / $\tilde{\omega}$ /, la partie médiane du voile se dépose sur le dos de la langue ; il ne pourrait donc pas descendre plus bas.

Enfin, le voile a une position intermédiaire pour / $\tilde{\epsilon}$ / et / $\tilde{\alpha}$ /, deux voyelles antérieures mi-ouvertes, pendant lesquelles l'uvula n'entre que rarement en contact avec la langue.

**Le système des voyelles nasales en français.** On observe peu de différences au niveau de la configuration de la langue entre les deux nasales antérieures (voir figure 1b). Ces deux voyelles sont relativement centralisées, / $\tilde{\alpha}$ / étant parfois légèrement plus ouvert et plus arrière. Même si les locuteurs belges maintiennent quatre voyelles nasales dans leur système phonologique, / $\tilde{\epsilon}$ / et / $\tilde{\alpha}$ / sont de plus en plus proches au point de vue phonétique. Elles se distinguent essentiellement par la position des lèvres. La figure 1b montre les différences bien plus marquées qui existent entre les nasales postérieures : / $\tilde{\omega}$ / est nettement plus fermée et plus arrondie que / $\tilde{a}$ /.

## 4. ETUDE ACOUSTIQUE

### 4.1. Bandes d'énergie

Les graphiques de la figure 2 affichent les valeurs moyennes des bandes d'énergie en fonction de la fréquence, tous sujets confondus. Chaque graphique représente les données recueillies pour un timbre vocalique en contexte VVV. L'objectif d'une telle analyse est de laisser apparaître uniquement les tendances les plus générales de la répartition d'énergie en fonction de la fréquence, et ce sur l'ensemble du spectre.

On constate en effet que les nasales et les nasalisées diffèrent de leur contrepartie orale dans l'ensemble du domaine fréquentiel. Les tracés des quatre nasalisées suivent les mêmes inflexions que ceux des orales, mais leur niveau général d'énergie est notablement inférieur. Les nasales diffèrent plus fortement des orales, en particulier dans le cas de / $\tilde{\epsilon}$ / et / $\tilde{\alpha}$ /, qui ont plus d'énergie que / $\epsilon$ / et / $\alpha$ / autour de leur F2.

### 4.2. Analyse spectrale

La table 2 donne les valeurs moyennes comparées des formants (F1, F2, F3 en Hz) pour les orales, les nasales, et les nasalisées, en fonction du timbre et du groupe de locuteurs (locuteurs masculins vs. féminins). On a aussi calculé la différence d'intensité (en dB) entre orales et nasales d'une part, et entre orales et nasalisées d'autre part, à la fréquence de leur premier, deuxième et troisième formants respectifs ( $\Delta A1$ ,  $\Delta A2$ ,  $\Delta A3$ ). Toutes ces mesures ont été effectuées manuellement sur les spectres lissés (cepstre). Les différences de contexte, non significatives, ne sont pas détaillées ici.

**Energie.** Les valeurs très majoritairement positives pour  $\Delta A1$ ,  $\Delta A2$  et  $\Delta A3$  indiquent que les formants des nasalisées et des nasales sont toujours moins intenses que ceux des orales. La différence la plus nette se fait au niveau de F3. F3 est généralement très affecté par la nasalisation : il peut également se diviser en deux pics de moindre intensité ou être déplacé fréquemment, en général vers des fréquences plus élevées, sous l'effet des zéros nasals. Seules les valeurs de  $\Delta A2$  pour les voyelles antérieures sont faibles voire négatives.

**a-ã.** La tendance principale est l'abaissement de F2 pour la nasale (et non pour la nasalisée). Pour l'un des sujets féminins, F1 et F2 fusionnent régulièrement en un seul large pôle, centré vers 900 Hz. De façon générale, /ã/ est une voyelle plus compacte et plus grave que /a/.

**ε-ẽ.** Les différences entre orales et nasales sont très nettes : F1 est plus élevé et F2 nettement plus bas pour /ẽ/ chez tous les locuteurs. Pour cette paire également, la nasale est plus compacte et plus grave que l'orale. F2 est également plus bas pour les nasalisées, même si la différence est moins marquée.

**œ-õ.** Pour tous les sujets, F1 est plus élevé pour /õ/. Chez les sujets féminins, F2 est également plus bas. Les différences sont nettes, mais moins marquées que dans le cas de /ε-ẽ/. Ces tendances sont amorcées dans les spectres des nasalisées.

**ɔ-õ.** Chez les hommes, l'allure des spectres est assez similaire pour les nasalisées et les nasales. En revanche, elles divergent assez radicalement des orales, car un zéro est introduit dans la zone de F2. L'effet de ce zéro est différent selon le sujet : pour S4, F2 est complètement annihilé (d'où  $\Delta A_2=22\text{dB}$ ), pour S3, F2 est affaibli et déplacé vers de plus hautes fréquences.

Chez les femmes, l'effet de l'abaissement du voile seul (voyelles nasalisées) est d'annuler F2, comme pour S4. Un seul pôle subsiste, plus large, « à la place » de F1-F2. Dans le spectre des nasales par contre, on peut constater la présence d'un pic à la fréquence du F2 des orales. Ceci peut s'expliquer par la position radicalement différente des articulateurs dans le cas des nasales pour S1 et S2.

Pour l'ensemble des paires orales-nasales, les tendances dégagées par l'analyse acoustique, notamment en ce qui concerne les fréquences des formants, sont remarquablement consistantes avec les observations faites en imagerie.

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'abaissement du voile du palais est une condition nécessaire mais pas suffisante à la réalisation phonétique du trait de nasalité pour les voyelles du français. Le corrélat acoustique de l'abaissement du voile se situe essentiellement au niveau de l'intensité : les nasalisées (et a fortiori les nasales) accusent une perte d'énergie généralisée par rapport aux orales. La perte d'énergie augmente avec la fréquence, et affecte en particulier la région de F3, qui peut être divisé en deux pics, déplacé et très affaibli, voire annulé. Ces phénomènes sont prédits par la théorie, étant donné l'introduction de zéros par le couplage nasal, et l'amortissement de l'énergie acoustique dû à l'augmentation du volume d'air en vibration.

En outre, un ensemble d'articulations complémentaires interviennent dans la production des voyelles nasales du français. Les propriétés acoustiques des voyelles nasales divergent donc fortement de celles de leur correspondante orale. Ainsi, /ẽ/ est une voyelle plus ouverte et plus centralisée que /ε/, avec un F1 plus élevé et un F2 plus bas, soit [æ̃]. /ã/ est plus arrondie et plus arrière que /a/, avec un F2 plus bas, soit [ã], voire [õ]. /õ/

est plus arrondie que /ɔ/, et chez les femmes, plus postérieure et plus fermée, soit [õ]. F2 est très affecté par la nasalisation pour cette voyelle. Enfin, /õ/ est un peu plus ouvert et plus arrière que /œ/ : F1 est plus élevé, F2 plus bas, soit [↓]].

Le recul généralisé de la langue dans la cavité pharyngale pour les nasales est un phénomène qui a été précédemment observé en français, même si son ampleur était moindre (notamment [Zer84]). Ainsi réduite, la cavité pharyngale serait de dimension comparable pour les quatre nasales selon [Del68]. Ce n'est pas le cas sur nos images, sur lesquelles une grande différence subsiste entre nasales antérieures et postérieures (voir figure 1b).

Du point de vue acoustique, Lonchamp avait déjà constaté que le F2 des nasales est régulièrement plus bas que celui des orales correspondantes. Il attribuait cette différence à une position plus reculée de la langue uniquement [Lon79]. L'arrondissement des lèvres que nous observons dans le cas de /ã/ et surtout de /õ/ peut cependant avoir des conséquences similaires.

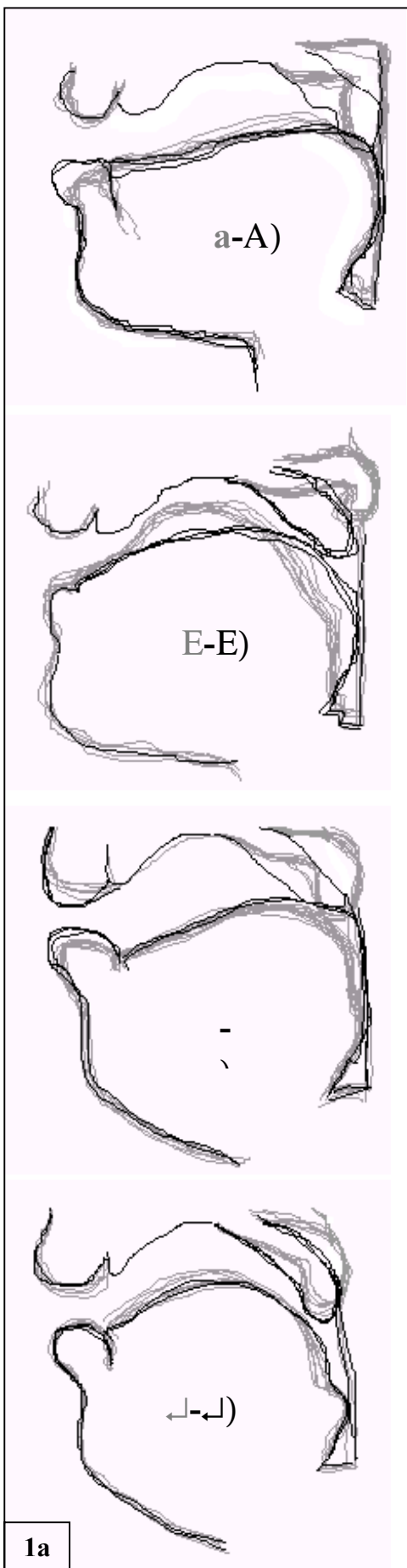
La question se pose de l'explication à donner à l'évolution phonétique des voyelles nasales du français. On pouvait s'attendre à ce que ces voyelles se centralisent, dans la mesure où l'espace perceptuel est écrasé pour les nasales dans la dimension antérieur-postérieur autant que dans la dimension fermé-ouvert [Wri86]. Un tel schéma convient pour la postériorisation des antérieures /ẽ œ̃/, mais prédirait une antériorisation de /õ/ qui n'est pas observée dans nos données.

Dès lors, comment expliquer l'abaissement du F2 pour l'ensemble des nasales du français ? S'agit-il de rendre les nasales *différentes* de simples nasalisées afin de maximiser le contraste phonologique avec les orales ? Cette stratégie permettrait en particulier de distinguer les véritables nasales des voyelles phonologiquement orales qui sont nasalisées par coarticulation. On peut envisager au contraire que la baisse de F2 soit une façon de *rehausser* les effets acoustiques liés à la descente du voile, donc de renforcer le percept de nasalité. Nous travaillons actuellement sur des expériences perceptuelles qui permettent de traiter ces questions.

Cette recherche a été en partie soutenue par la convention Arc 98-02 n°226 : "Dynamique des systèmes phonologiques".

## BIBLIOGRAPHIE

- [Met00] Demolin, Metens, Soquet (2000), « Real time MRI and articulatory coordinations in vowels », Proceedings 5<sup>th</sup> Speech Production Seminar, 93-96.
- [Zer84] Zerling, J.P. (1984), « Phénomènes de nasalité et de nasalisation vocaliques : étude cinéradiographique pour deux locuteurs », Travaux de l'Institut Phonétique de Strasbourg, 16, 241-266.
- [Del68] Delattre, P. "Divergences entre nasalités vocalique et consonantique en français", Word 24, 64-72.
- [Lon79] Lonchamp F. (1979), « Analyse acoustique des voyelles nasales françaises », Verbum : revue de linguistique univ Nancy II, II, 9-54.
- [Wri86] Wright J. (1986), "The Behavior of Nasalized Vowels in the Perceptual Vowel Space", Ohala & Jaeger (eds), Experimental phonology, 45-67.



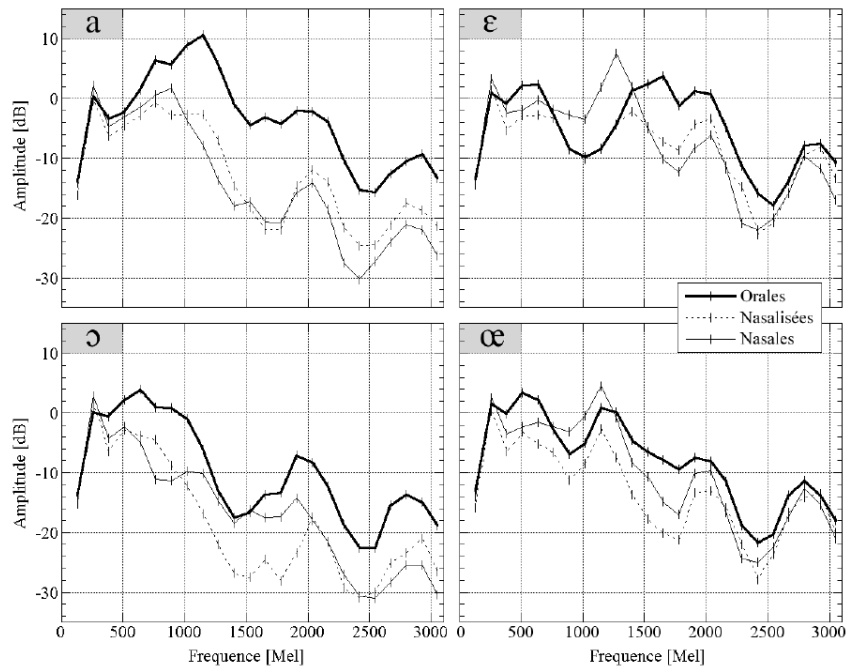
**Figure 1 :** Profils articulatoires superposés. La Fig 1a compare les orales en gris avec les nasales en noir, pour un timbre vocalique donné. La Fig.1b compare les nasales antérieures puis postérieures entre elles. Les arrondies sont en gris. Données pour les sujets féminins S1 (haut de la Fig.1a) et S2.

**Table 1.** Les 28 séquences constituant le corpus.

ma pa	mœ pœ
mɛ pɛ	mɔ pɔ
pa am	pœ œm
pɛ em	pɔ ɔm
/aãa/	/œœœ/
/ɛëɛ/	/ɔõɔ/
[aãa]	[œœœ]
[ɛëɛ]	[ɔõɔ]
pã ãp	pœ œp
pë ëp	põ õp
sã ãs	sœ œs
së ës	sõ õs
mam mã	mœm mœ
mem më	mõm mõ

**Table 2:** Valeurs moyennes pour F1, F2 et F3 (Hz) et différences d'intensité par rapport aux orales (dB).

		F1	F2	F3	ΔA1	ΔA2	ΔA3	
a	/o/	fe	896	1458	2991			
		ma	678	1200	2392			
	[n]	fe	749	1411	3313	5	12	5
		ma	651	1084	2203	7	5	18
	/n/	fe	820	1025	3298	7	11	17
		ma	692	987	2584	8	14	18
oe	/o/	fe	606	1595	2683			
		ma	488	1227	2179			
	[n]	fe	635	1434	2899	6	6	13
		ma	477	1235	2201	4	1	13
	/n/	fe	727	1286	2797	2	0	13
		ma	596	1224	2238	4	1	10
ε	/o/	fe	618	2186	3137			
		ma	483	1728	2397			
	[n]	fe	674	2050	3275	6	2	4
		ma	602	1575	2499	2	3	5
	/n/	fe	809	1625	3258	3	1	11
		ma	583	1477	2451	3	3	12
ɔ	/o/	fe	650	1158	2795			
		ma	483	895	2258			
	[n]	fe	600-950	néant		7	7	28
		ma	576	1050	2450	13	18	8
	/n/	fe	547	1079	2492	9	10	12
		ma	499	1082	2319	9	12	8



**Figure 2.** Valeurs moyennes des bandes d'énergie (dB) en fonction de la fréquence (Mels). Données pour tous les sujets en contexte vvv.

