

**Titre**

Timbre et nasalité vocalique : le cas du français

**Abstract**

In this paper, we provide an integrated, precise and quantified description of the production of nasal vowels in modern French. The effects of nasal coupling itself and complementary adjustments in oral configuration are investigated along time, in articulatory as well as in acoustic terms, in oral and nasal contexts.

In the framework of laboratory phonology, the second aim of the study is to discuss the general issue of the covariation between velopharyngeal opening and tongue height in the phonetic realization of the nasal contrast in the world's languages.

**Résumé**

Dans cette étude, nous proposons une description intégrée, précise et quantifiée, de la production des voyelles nasales du français, dans ses composantes articulatoires et acoustiques, tant au niveau du couplage nasal que des ajustements de timbre, et ce dans la dynamique de la parole et en différents contextes, oral et nasal. Au-delà de la description proprement dite, l'objectif est d'investiguer le phénomène plus global de covariation entre abaissement du voile du palais et timbre vocalique dans la réalisation phonétique du contraste phonologique de nasalité, et de fonder la discussion sur la base de données quantifiées recueillies en laboratoire, dans le cadre théorique de la phonologie expérimentale.

**Mots-clés**

Nasalité, voyelles, français, timbre, articulatoire, acoustique

## Introduction

Le français contemporain a un riche inventaire vocalique comprenant, selon les descriptions, jusqu'à 12 voyelles orales /i, e, ε, a, y, ø, œ, ə, u, o, ɔ, (ɑ)/ et 4 voyelles nasales /ẽ, (œ̃), ā, ɔ̃/ (Fougeron & Smith, 1999, Walter, 1994). Il y a donc trois à quatre fois plus de voyelles orales que de nasales dans le système phonologique du français<sup>1</sup>. Cette tendance est générale dans les langues du monde : tous les systèmes phonologiques contenant des voyelles nasales distinctives comptent soit le même nombre de nasales que d'orales, soit moins de nasales, mais jamais plus de nasales que d'orales (Ruhlen, 1975, Beddor, 1993). Cette asymétrie est la marque d'un phénomène plus global, à savoir l'interaction entre nasalité et timbre vocalique en phonétique et en phonologie, qui fait l'objet de cette étude dans le cas du français.

On propose généralement deux explications à l'asymétrie des inventaires phonologiques nasal et oral dans les langues du monde. La première est d'ordre phonologique. La plupart des voyelles nasales phonologiques proviennent historiquement de séquences homosyllabiques voyelle orale/consonne nasale, où la voyelle est nasalisée sous l'influence de la consonne nasale subséquente. Les timbres vocaliques accessibles aux nasales sont donc initialement limités à ceux présents dans l'inventaire oral. De plus, l'évolution phonologique des nasales d'une langue prend le plus souvent la direction d'une fusion (plutôt que d'une dissociation) des timbres vocaliques nasals. On en vient ici à la deuxième explication au nombre limité de nasales dans une langue donnée, qui est d'ordre phonétique. En effet, les propriétés acoustiques spécifiques de la nasalité ont tendance à *limiter les distinctions de timbre* au sein des nasales. Par rapport à l'orale correspondante, le couplage nasal implique que les pôles sont en nombre plus important dans une plage fréquentielle donnée, et qu'ils sont accompagnés de zéros (Fant, 1960, Maeda, 1993, Stevens, 1998). L'effet général est que le spectre d'une voyelle nasalisée est aplati, et que son timbre est moins prégnant que celui de l'orale correspondante. L'effet spécifique est que le triangle acoustique F1/F2 des voyelles nasalisées s'inscrit à l'intérieur du triangle des orales correspondantes (Wright, 1986). Le phénomène a été particulièrement

étudié en ce qui concerne la hauteur de la voyelle (p.ex. Krakow et al. (1988, Macmillan et al. (1999, Kingston & Macmillan, 1995): sous l'effet de la nasalisation, les voyelles fermées sont perçues comme plus ouvertes, et les ouvertes comme plus fermées (Beddor, 1993). En conséquence, les voyelles nasales « manquantes » (par rapport aux orales correspondantes) dans les inventaires phonologiques des langues du monde sont le plus souvent les voyelles d'aperture moyenne (Ruhlen, 1975, Greenberg, 1978, Beddor, 1993).

Par rapport aux tendances décrites ci-dessus, le français occupe une position particulière, qui justifie une étude approfondie de la production des voyelles nasales dans cette langue, et fournit en retour une occasion unique d'investiguer le phénomène plus global de covariation entre abaissement du voile du palais et timbre vocalique dans la réalisation phonétique du contraste phonologique de nasalité.

En effet, le français est exceptionnel en ce sens que les quatre voyelles nasales sont ouvertes ou semi-ouvertes : /ɛ̃, œ̃, ɑ̃, ɔ̃/. Dans l'inventaire phonologique du français, les nasales "manquantes" sont les voyelles fermées et semi-fermées. Ceci est l'aboutissement de nombreuses évolutions phonétiques et fusions phonologiques survenues depuis le 14<sup>e</sup> siècle (Morin, 1994). Le processus de fusion est d'ailleurs toujours en cours, puisque /ɛ̃/ et /œ̃/ ne sont plus distinguées que par une minorité de locuteurs au nord de la Loire (Walter, 1994). Se pose dès lors la question de la saillance du timbre des voyelles nasales du français, en particulier en français de Belgique (qui compte quatre nasales): comment les voyelles nasales se distinguent-elles au niveau du timbre alors que trois d'entre elles partagent le même degré d'aperture? Comment le contraste est-il maintenu à la fois entre les quatre nasales, et entre chaque nasale et l'orale correspondante, particulièrement en contexte nasal ?

Une contrainte supplémentaire sur la production (et la perception) du contraste de nasalité vocalique en français tient en effet aux phénomènes de coarticulation. Le fait que le français possède la nasalité contrastive tant pour les voyelles que pour les consonnes implique l'existence potentielle de l'éventail complet des influences coarticulantes des phonèmes nasals vers les non nasals dans la chaîne parlée. Le trait nasal est l'un de ceux qui est le plus sujet à la coarticulation (Farnetani & Recasens, 1999). En particulier, une étude

aérodynamique du français a montré que dans les items NV toutes les voyelles sont prononcées avec un débit d'air nasal important, ce qui suggère qu'elles sont prononcées avec un port vélo-pharyngal ouvert (Delvaux, soumis). La figure 1 illustre le phénomène. Elle donne l'évolution au cours du temps du débit d'air nasal pour 22 séquences NV et N $\tilde{V}$  (N = /m, n/, V = /i, e,  $\epsilon$ , a,  $\text{ɔ}$ , o, u, y/  $\tilde{V}$  = / $\tilde{\epsilon}$ ,  $\tilde{\text{ɔ}}$ ,  $\tilde{\text{ɔ}}$ /) prononcées par un locuteur masculin du français de Belgique. On observe que toutes les voyelles présentent un taux élevé de débit d'air nasal dans ce contexte, et qu'en terme de débit d'air nasal, la différence entre les nasales phonologiques et les orales contextuellement nasalisées n'est manifeste qu'en toute fin de voyelle.

*Figure 1 environ ici*

Comment les voyelles nasales du français sont-elles distinguées des orales en contexte nasal, p.ex. « main » /m $\tilde{\epsilon}$ / vs. « mai » /m $\epsilon$ /, « mont » /m $\tilde{\text{ɔ}}$ / vs. « mot » /mo/, « ment » /m $\tilde{\text{ɔ}}$ / vs. « m'a » /ma/, etc. ? Deux hypothèses sont envisageables, seules ou en combinaison. La première est que la différence de débit d'air nasal en fin de voyelle (cf. Figure 1) reflète une différence de niveau d'ouverture vélo-pharyngée, différence que les auditeurs détectent efficacement dans la dynamique de la parole. La seconde est que les orales et les nasales correspondantes diffèrent par d'autres aspects que l'ouverture vélo-pharyngée, c'est-à-dire *au niveau du timbre*. En effet, plusieurs études cinéradiographiques ont montré que les voyelles nasales ont continué d'évoluer au cours du siècle dernier au point de vue de leur configuration orale, à tel point que la notation standard / $\tilde{\epsilon}$ ,  $\tilde{\text{ɔ}}$ ,  $\tilde{\text{ɔ}}$ / ne correspond plus au timbre effectivement réalisé (Brichler-Labaeye, 1970, Zerling, 1984, Bothorel et al., 1986). Les résultats spécifiques de ces études ne sont pas toujours convergents, par exemple Zerling (1984) décrit / $\tilde{\epsilon}$ / comme moins antérieure mais de même aperture que / $\epsilon$ /, alors que Brichler-Labaeye (1970) observe que / $\tilde{\epsilon}$ / est essentiellement plus ouverte que / $\epsilon$ /. Les limites imposées par la technique cinéradiographique rendent en fait ces différents résultats difficilement extrapolables : les données publiées ne concernent à chaque fois qu'un seul sujet, et consistent simplement en des tracés effectués par l'expérimentateur sur les radiographies, sans mesure spécifique. La production des voyelles orales n'est pas

systématiquement comparée en contexte oral et en contexte nasal. Enfin, la description articulatoire n'est pas complétée par des données acoustiques recueillies sur les mêmes locuteurs, même lors d'une session expérimentale différente.

En somme, l'inventaire des voyelles nasales du français est réduit par rapport à l'inventaire oral, vraisemblablement parce que la nasalité atténue la saillance du timbre vocalique. Mais en retour, les voyelles nasales du français n'ont cessé d'évoluer au niveau du timbre, à tel point que timbre vocalique et nasalité proprement dite interagissent de façon complexe dans la réalisation du contraste phonologique de nasalité. D'un point de vue fonctionnel, on peut faire l'hypothèse que les évolutions récentes du timbre des nasales ont été favorisées par le fait que, précisément, les nasales sont en effectif réduit en français moderne, et que ces évolutions ont en outre l'avantage d'assurer la robustesse du contraste orale-nasale en contexte nasal. De ce point de vue, le cas du français peut apporter un éclairage intéressant sur un phénomène largement attesté dans les langues, à savoir la covariation entre diverses dimensions phonétiques dans la réalisation des représentations phonologiques. Néanmoins, force est de constater que la production des voyelles nasales du français n'a pas été à ce jour étudiée d'une façon complète et systématique, à la mesure des questions posées. Les observations relatives aux ajustements de configuration orale ont été réalisées séparément des travaux centrés sur l'abaissement du voile du palais proprement dit, et, plus généralement, les études précédentes se sont moins focalisées sur le lien entretenu par les phases articulatoire et acoustique dans la production de la nasalité, que sur l'une de ces phases en particulier. L'étude que nous présentons ici a précisément pour objectif de proposer une description intégrée, précise et quantifiée, de la production des voyelles nasales du français, dans ses composantes articulatoires et acoustiques, tant au niveau du couplage nasal que des ajustements de timbre, et ce dans la dynamique de la parole et en différents contextes, oral et nasal.

## **Notre étude**

Notre étude s'appuie sur un ensemble de données acoustiques et articulatoires recueillies auprès de quatre sujets belges francophones. Les propriétés articulatoires ici étudiées concernent tant l'abaissement du voile du palais que les autres paramètres articulatoires permettant de décrire la configuration orale de la voyelle. Les propriétés acoustiques incluent des mesures générales d'énergie en fonction de la fréquence ainsi que des mesures spécifiques de valeurs formantiques. Les voyelles nasales /ɛ̃, œ̃, ā, ɔ̃/ sont systématiquement comparées à leur correspondante phonologique dans l'inventaire oral /ɛ, œ, a, ɔ/ tant en contexte oral qu'en contexte nasal. Au-delà de l'examen des différences au sein de chaque paire orale/nasale, nous recherchons les propriétés des nasales du français en tant que groupe: les ajustements articulatoires éventuellement observés dans la configuration orale obéissent-ils à un schéma commun? Quelles sont leurs conséquences acoustiques générales et spécifiques, et comment celles-ci interagissent-elles avec les propriétés acoustiques du couplage nasal proprement dit? Afin de séparer les effets de ces deux sources potentielles de variation (abaissement du voile vs. ajustements articulatoires complémentaires), nous étudions un groupe supplémentaire de quatre voyelles, qui ne font pas partie de l'inventaire phonologique du français et que nous appelons les "nasalisées" [ɛ̃, œ̃, ā, ɔ̃]. Leur production correspond à celle des orales /ɛ, œ, a, ɔ/ avec pour seule modification l'abaissement du voile du palais, à l'exclusion de tout ajustement articulatoire complémentaire.

Au-delà de la description proprement dite, l'objectif de cette étude est de fonder la discussion des questions soulevées ci-dessus sur la base de données quantifiées recueillies en laboratoire, dans le cadre théorique de la phonologie de laboratoire (Ohala & Jaeger, 1986). Nous visons à déterminer les dimensions phonétiques le long desquelles le contraste phonologique est maintenu en français entre orales et nasales, ainsi qu'entre les nasales elles-mêmes, en particulier lorsque ces voyelles sont en contexte phonologique nasal. L'abaissement du voile et/ou les ajustements de configuration orale sont-ils plus marqués dans ce contexte? Si oui, leurs effets acoustiques sont-ils indépendants ou bien se rehaussent-ils mutuellement? Pour une théorie plus générale de l'évolution phonétique, il est en effet important de distinguer entre les deux branches de l'alternative suivante. Soit les nasales du français dérivent simplement vers un timbre différent, ce qui les rend distinctes phonétiquement de toutes les autres voyelles du français, et rend leur

caractère nasal secondaire en ce qui concerne le maintien du contraste phonologique entre les éléments du système vocalique. Soit l'évolution phonétique de timbre a précisément pour effet de renforcer leur caractère nasal (acoustiquement et perceptuellement), ce qui a pu constituer un facteur favorisant leur sélection parmi d'autres évolutions possibles.

### **Matériel et méthode**

Les données articulatoires et acoustiques ont été recueillies sur les mêmes sujets et sur un même corpus, au cours de sessions expérimentales différentes, distantes de quelques semaines. Le signal acoustique a également été enregistré lors de la prise des données articulatoires par imagerie par résonance magnétique. Mais en raison du bruit inhérent au fonctionnement de la machine le signal obtenu ne permet pas une analyse acoustique fine. Il est essentiellement utilisé comme une aide à la segmentation (voir ci-dessous).

### **Sujets et corpus**

Quatre sujets ont participé aux deux expériences, deux femmes (S1, S2) et deux hommes (S3, S4) belges francophones âgés de 22 à 45 ans. Le corpus est constitué de 16 séquences de logatomes contenant les voyelles nasales du français ainsi que les orales correspondantes dans différents contextes (voir Table 1). Les trois contextes étudiés sont: le contexte oral CV/CV̄, le contexte nasal NVN/NV̄, et les voyelles soutenues VV̄V. Dans les deux premiers contextes, une courte pause sépare la prononciation des deux non mots (p.ex. /paʔpã/), alors que pour les voyelles soutenues l'ensemble de la séquence est prononcé dans un seul groupe de souffle /aãa/. C'est uniquement dans ce type de séquence qu'ont été prononcées les voyelles nasalisées (p.ex. [aãa]). Les instructions données aux locuteurs (tous phonéticiens entraînés) étaient de prononcer ces séquences sans pause en maintenant au mieux les articulateurs dans la même position du début à la fin de la séquence, à l'exception du voile du palais. Après quelques minutes d'entraînement, les locuteurs sont parvenus à accomplir la tâche demandée avec succès, comme le montrent les mesures articulatoires (voir ci-dessous). En tout,

le corpus est constitué de 32 voyelles (12 nasales, 4 nasalisées, et 16 orales), répétées trois fois par les quatre locuteurs, soit 384 voyelles<sup>2</sup>.

*Table 1 environ ici*

### **Données articulatoires**

Les données articulatoires ont été obtenues par la technique d'imagerie par résonance magnétique en temps réel (Demolin et al. (2003) sur un matériel de 1.5 Tesla équipé de gradients rapides (CompactPlus, PowerTrack 6000 de Philips). Cette technique permet l'acquisition en temps réel d'images du conduit vocal avec une résolution spatiale suffisante pour déterminer la limite air-tissu. Une coupe médio-sagittale de 6 mm d'épaisseur a été positionnée sur des coupes anatomiques transverses (obtenues par IRM statique) des structures occipitales de chaque locuteur, puis 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 7 à 8 fois l'une des séquences du corpus.

Le signal de parole a été enregistré en synchronisation avec les images au moyen d'un microphone optique placé à quelques centimètres de la bouche du locuteur et relié à l'équipement principal. L'enregistrement sonore a été utilisé afin d'associer chaque image avec la portion de signal (200 ms) au cours de laquelle elle a été prise. Malgré le temps pris pour l'acquisition d'une image (les 100 premières millisecondes de la période de 200 ms qui la sépare de l'image suivante), on peut donc isoler les phénomènes articulatoires caractéristiques de la production d'une voyelle donnée au sein d'une seule image IRM. Trois répétitions ont été retenues pour chaque séquence de sorte que l'image acquise coïncide strictement avec la production de la voyelle, à l'exclusion de la (des) consonne(s) environnante(s).

Les images ont été visualisées et traitées à l'aide d'un logiciel spécialisé mis au point au Laboratoire de Phonologie de l'Université Libre de Bruxelles (Soquet & Delvaux). Pour chaque locuteur, trois points ont été placés sur des structures anatomiques fixes afin de servir de référence. La position spécifique des trois points est illustrée pour S4 dans la Figure 2<sup>3</sup>. Une fois la place des trois points arrêtée pour un locuteur donné, le système d'axes de référence propre à ce locuteur était

définitivement déterminé. Pour les autres images, seul le système d'axes dans son entier était autorisé à bouger (soit par translation, soit par rotation), ce qui pouvait s'avérer nécessaire si par exemple le sujet avait changé de position en cours de session expérimentale.

*Figure 2 environ ici*

Le profil des différents articulateurs a été redessiné manuellement sur chaque image IRM apparaissant à l'écran, puis stocké indépendamment de cette image pour un traitement ultérieur. L'examen de séries de tracés effectués indépendamment sur une même image a permis de constater que la marge d'erreur introduite par un utilisateur entraîné ne dépasse jamais un pixel (soit en l'occurrence 3 mm), ce qui constitue la limite imposée par la technique elle-même. Cinq mesures articulatoires ont été calculées à partir du profil des articulateurs dessiné pour chacune des trois répétitions des voyelles du corpus, à savoir: l'écart inter-Labial (L), la Hauteur de la langue dans la zone buccale Antérieure (HA), la Hauteur de la langue dans la zone buccale Postérieure (HP), l'écart entre la racine de la langue et la paroi Pharyngale (P), et l'ouverture vélo-pharyngale (V) (voir Figure 2). L a été mesuré sur un axe parallèle à l'axe de référence 1-2 et qui coupe les lèvres du locuteur, axe fixé une fois pour toutes pour chaque locuteur à partir de ses productions de la voyelle /a/. Les quatre autres mesures ont été obtenues grâce à un système de droites complémentaires aux axes de référence et disposées comme suit. D'abord, le point 4 a été fixé pour chaque locuteur comme le centre géographique moyen du profil articulatoire inférieur (lèvre inférieure, langue, racine de la langue, mâchoire inférieure) lors des productions de la voyelle /œ/. Trois droites 1-4, 2-4 et 3-4 sont ainsi fixées pour chaque locuteur, comme illustré sur la Figure 2. Une autre droite relie les points 4 et 5 (défini comme le point charnière entre le palais dur et le palais mou). V a été mesuré sur la droite 2-4. P a été mesuré sur la droite A, qui coupe le point 4 à un angle équivalent à la moitié de l'angle 1-4-2. De même, les droites B et C coupent le point 4 à un angle équivalent à la moitié respectivement des angles 1-4-5 et 5-4-3. HA est la distance entre le point 4 et le profil lingual sur l'axe B, HP est la distance entre le point 4 et le profil lingual sur l'axe C.

### **Données acoustiques**

Les enregistrements ont été effectués en chambre sourde au moyen d'un microphone (Neumann, U87A i P48) connecté à un DAT (Panasonic, SV-3700). Une fois digitalisés (44100 Hz, 16 bits), les signaux ont été sous-échantillonnés à 22050 Hz et filtrés avec un filtre anti-repliement d'une fréquence de coupure de 10525 Hz. Les voyelles du corpus ont été segmentées sur la base des informations données par la forme d'onde et par un spectrogramme, à l'aide du logiciel SignalExplorer<sup>4</sup>.

Les mesures acoustiques ont été prises à trois moments différents de chaque voyelle t1, t2 et t3, qui correspondent respectivement au premier, deuxième et troisième quart de la voyelle. Les mesures acoustiques consistent en la fréquence (en Hz) et l'intensité (en dB) des trois premiers formants de chaque voyelle, soit F1, I1, F2, I2, F3, I3. Ces mesures ont été effectuées sur des spectres lissés par l'analyse cepstrale calculés à partir d'une fenêtre de Hamming de 30 ms centrée selon les cas en t1, t2 ou t3. L'avantage de l'analyse cepstrale est qu'elle minimise la contribution de la source dans le spectre obtenu. L'origine et l'étendue de la fenêtre étaient fixées respectivement à 2 et 1.5 ms pour un spectre calculé sur la base de 1024 points.

En ce qui concerne la nasalité proprement dite, nous n'avons pas recherché de pôles ou de zéros spécifiquement liés au couplage nasal. Ce type de mesure implique de la part de l'expérimentateur qu'il sélectionne a priori une plage fréquentielle précise dans laquelle rechercher ce type d'événement acoustique, plage fréquentielle qui varie selon le timbre, le locuteur, voire le degré de couplage lui-même (p.ex. Chen, 1997, Maeda, 1982, 1993). Notre objectif ici est au contraire de déterminer les caractéristiques acoustiques des voyelles nasales sans préjuger a priori de la zone fréquentielle où elles peuvent se manifester. Idéalement, la caractérisation acoustique ainsi visée doit être suffisamment générale pour être applicable à un grand nombre de voyelles, de degrés de couplage et de locuteurs, mais elle devrait également être suffisamment spécifique pour permettre de prédire a priori si une voyelle donnée est nasale ou non. Les effets acoustiques du couplage nasal proprement dit seront donc évalués en termes de modifications introduites au niveau de la fréquence et de l'intensité des trois premiers formants de la voyelle. Un second type de représentation paramétrique du signal de parole a cependant été calculé, qui permet d'investiguer de façon globale les modifications d'énergie

éventuellement induites par la nasalité; il s'agit des "bandes d'énergie". Les "bandes d'énergie" désignent le logarithme de l'énergie calculé à la sortie de 24 filtres triangulaires linéairement répartis dans le domaine fréquentiel sur une échelle Mel (de 0 à 3000 Mels, soit de 0 à 9325 Hz). L'objectif est de représenter l'information relative à la répartition fréquentielle de l'énergie d'une façon globale, et proportionnellement plus détaillée en basses fréquences (qui se rapproche de la relation entre fréquence objective et hauteur perçue: Stevens et Volkman, 1940, Zwicker et Fastl, 1990).

## **Résultats**

### **Données articulatoires**

La Table 2 présente les résultats obtenus pour les cinq mesures articulatoires (en mm), à savoir : l'ouverture vélo-pharyngale (V), l'écart inter-Labial (L), la Hauteur de la langue dans la zone buccale Antérieure (HA), la Hauteur de la langue dans la zone buccale Postérieure (HP), et l'écart entre la racine de la langue et la paroi Pharyngale (P). Les résultats sont donnés pour les orales, les nasales et les nasalisées de chaque timbre vocalique, tous contextes et tous sujets confondus. La Table 3 donne les résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) qui a été conduite sur les mêmes données. Les variables dépendantes étaient les cinq mesures articulatoires V, L, HA, HP et P. Les variables indépendantes étaient la nasalité de la voyelle (orale vs. nasales vs. nasalisées), le timbre de la voyelle (/ɛ/, /ɛ̃/, [ɛ̃] vs. /a/, /ā/, [ā] vs. /ɔ/, /ɔ̃/, [ɔ̃] vs. /œ/, /œ̃/, [œ̃]), et le contexte (contexte oral vs. contexte nasal vs. voyelles soutenues). Enfin, la Figure 3 illustre ces résultats en superposant les tracés articulatoires obtenus pour les voyelles de chaque paire orale/nasale, et ce pour les voyelles soutenues et en contexte nasal. Deux sujets ont été sélectionnés, le sujet féminin S2 (pour /a-ā/ et /œ-œ̃/) et le sujet masculin S3 (pour /ɛ-ɛ̃/ et /ɔ-ɔ̃/), parce qu'ils sont représentatifs des données dans leur ensemble.

*Table 2 environ ici*

*Table 3 environ ici*

*Figure 3 environ ici*

Tout d'abord, les résultats confirment que les orales et les nasales se distinguent en premier lieu par une différence d'ouverture vélo-pharyngale. Les moyennes obtenues pour V sont proches de zéro pour les orales, alors qu'elles sont comprises entre 11 et 15 mm pour les nasales et les nasalisées, tous timbres confondus (voir Table 2)<sup>5</sup>. Par contre, V n'est pas sensible aux différences de timbre, ce qui suggère que les quatre paires orales/nasales présentent un delta d'ouverture vélo-pharyngale relativement similaire. Par ailleurs, on observe un effet du contexte sur l'ouverture vélo-pharyngale. Comme l'indique la Table 3, les variables de Contexte, de Nasalité, ainsi que leur interaction impliquent des différences significatives dans l'ouverture vélo-pharyngale. La Figure 4 illustre cette interaction. En contexte oral (ainsi que pour les voyelles soutenues), le voile du palais est complètement relevé pour les orales et abaissé pour les nasales, tandis qu'en contexte nasal, le port vélo-pharyngal est généralement plus ouvert, et d'autant plus encore pour les voyelles nasales (items N $\bar{V}$ ).

*Figure 4 environ ici*

Ensuite, l'ensemble des autres mesures articulatoires L, HA, HP et P diffèrent significativement en fonction du timbre de la voyelle, ce qui confirme que les mesures sélectionnées ici capturent efficacement les variations de configuration articulatoire qui caractérisent les différentes voyelles du français. Par ailleurs, la Table 3 indique un effet supplémentaire de la Nasalité de la voyelle : la Nasalité et le Timbre de la voyelle déterminent séparément HP et P, tandis que leur interaction induit des variations significatives de L et HA. En d'autres termes, la configuration orale d'une voyelle donnée varie non seulement en fonction de son timbre, mais également en fonction de sa nasalité. Les nasales se distinguent des orales correspondantes non seulement par un abaissement du voile du palais, mais également par des ajustements articulatoires complémentaires, qui peuvent concerner, selon le timbre, les lèvres ou la position de la langue (hauteur et/ou rétraction). Enfin, des tests Post Hoc (LSD) ont montré que les nasalisées ne sont pas différentes des orales en ce qui concerne trois de ces quatre mesures, à savoir L, HA et HP. Ceci suggère que les quatre locuteurs ont été efficaces dans la production des voyelles nasalisées, c'est-à-dire qu'ils sont parvenus à les réaliser avec un voile abaissé tout en maintenant

l'essentiel des autres articulateurs dans la même position que pour l'orale correspondante.

La Figure 3 illustre les modifications de configuration orale qui interviennent en complément à l'abaissement du voile du palais dans la production des voyelles nasales du français. Par rapport à /a/, /ã/ est une voyelle plus arrondie, plus ouverte et plus postérieure, avec L, HA, HP et P plus petits (Table 2). /ɛ̃/ est également une voyelle nettement plus postérieure et plus ouverte que l'orale correspondante. Lorsque l'ouverture se réalise par un abaissement de la mâchoire inférieure, l'écart inter-labial est également plus important (p.ex. S3 ṽv, cf. Figure 3). /œ̃/ est une voyelle plus ouverte et plus postérieure que /œ/ ; quoique notable, la différence est généralement moins marquée que pour la paire /ɛ-ɛ̃/. /œ̃/ peut en outre être plus arrondie que /œ/ (en moyenne, L=11 vs. 14 mm). Enfin, /ɔ̃/ est la voyelle nasale pour laquelle les ajustements articulatoires complémentaires sont les plus limités : /ɔ̃/ est plus postérieure et plus arrondie que /ɔ/, avec L et P plus petits, mais la hauteur de la langue est comparable entre l'orale et la nasale correspondante (HA et HP non significativement différents). Notons que sur la Figure 3, la différence entre orales et nasales d'un même timbre est parfois plus marquée en contexte nasal (p.ex. l'arrondissement de /ã/ et /ɔ̃/, la postériorisation de /ɛ̃/ et /œ̃/). Cette tendance est présente de façon ponctuelle dans nos données, mais n'est manifestement pas suffisamment générale pour entraîner une interaction significative entre les variables de Nasalité, Contexte et Timbre (voir Table 3).

Enfin, nous n'avons pas abordé ici les différences interlocuteurs. Lorsque la variable de Sujet est introduite comme variable indépendante dans l'analyse de variance multivariée, il apparaît qu'elle est uniquement significative seule et en interaction avec la variable de Timbre pour les variables dépendantes L, V, HP, HA et P (à deux exceptions près : N\*T\*Sujet pour L et V). Ceci indique que les paramètres articulatoires mesurés varient en fonction du locuteur, soit à cause de différences anatomiques, soit à cause d'idiosyncrasies dans chaque conduit vocal, mais qu'il s'agit avant tout de différences individuelles d'articulation sans relation avec des facteurs proprement linguistiques (tels que le contexte ou la nasalité).

### **Données acoustiques**

## **Bandes d'énergie**

La Figure 5 compare les valeurs moyennes prises par les 24 bandes d'énergie (de 0 à 3000 Mels) pour les voyelles orales, nasales et nasalisées dans les trois contextes (voyelles soutenues, contexte oral, contexte nasal), tous sujets et tous timbres confondus. L'objectif visé est de caractériser la répartition fréquentielle de l'énergie pour les nasales en tant que groupe, quel que soit leur timbre ; on ne préjuge donc pas a priori de la plage fréquentielle où rechercher des paires pôles-zéros liées au couplage nasal. Il apparaît dans la Figure 5: (i) que les voyelles nasalisées et nasales ont globalement moins d'énergie que les orales, et que cette réduction s'opère dans l'ensemble du domaine fréquentiel ; (ii) que la différence d'énergie entre orales et nasal(isé)es est fonction du contexte : la différence est plus marquée en contexte oral que dans les deux autres contextes.

*Figure 5 environ ici*

Si l'on compare spécifiquement le contexte oral et le contexte nasal, on observe que l'écart réduit entre voyelles orales et voyelles nasales en contexte nasal a une double origine. Tout d'abord, les voyelles orales ont globalement moins d'énergie en contexte nasal qu'en contexte oral (moyenne générale<sup>6</sup> = -6.8 dB pour NVN vs. -2.3 dB pour CV). La nasalisation contextuelle des voyelles orales en contexte nasal pourrait être responsable de cette réduction d'énergie. Ensuite, on peut noter une hausse des valeurs moyennes d'énergie autour de 1000 Mels (soit entre 900 et 1500 Hz environ) pour les nasales en contexte oral (C $\bar{V}$ ) par rapport au contexte nasal (N $\bar{V}$ ) . En d'autres termes, les voyelles nasales connaissent un renforcement d'énergie dans la plage fréquentielle correspondant au deuxième formant en contexte nasal. Les formants des voyelles nasales dans les différents contextes sont examinés en détail ci-dessous.

## **Valeurs formantiques**

La Table 4 compare les résultats obtenus pour les locuteurs masculins et féminins en ce qui concerne les mesures acoustiques. Les moyennes et déviations standard des fréquences des trois premiers

formants sont données en fonction du timbre et de la nasalité de la voyelle, tous contextes confondus.

*Table 4 environ ici*

Tout d'abord, la Table 4 indique que les valeurs formantiques sont systématiquement plus élevées pour les locuteurs féminins que pour les locuteurs masculins, ce qui s'explique par la différence anatomique entre hommes et femmes en ce qui concerne la longueur du conduit vocal (Bladon et al., 1984). Ensuite, les valeurs obtenues pour les trois premiers formants des voyelles orales sont comparables à ce qui a été rapporté dans la littérature concernant les voyelles du français (p.ex. Landercy et Renard, 1977, Gendrot et Adda-Decker, 2004). Enfin, les valeurs moyennes données dans la Table 4 diffèrent sensiblement en fonction de la nasalité de la voyelle. En particulier, les voyelles nasales présentent des moyennes pour F1 et F2 nettement différentes de leur correspondante phonologique dans l'inventaire oral. Ces différences formantiques sont à relier aux ajustements articulatoires dans la configuration orale observés lors de la production des voyelles nasales du français (voir ci-dessus).

La Figure 6 illustre les différences spectrales existant entre orales et nasales correspondantes au sein de chaque timbre vocalique (voyelles soutenues), et ce dans le cas de S2 /a-ã/, /œ-œ̃/, et S3 /ɛ-ẽ/, /ɔ-õ/ (à comparer avec la Figure 3). Sur la Figure 6, l'abaissement de la fréquence de F2 pour /ã, ẽ, œ̃/ par rapport à /a, ɛ, œ/ est particulièrement notable. L'augmentation de F1 pour les nasales antérieures /ẽ, œ̃/ (voir Table 4) est ici plus manifeste pour S2 /œ̃/ que pour S3 /ẽ/. Enfin, en ce qui concerne /õ/, on constate une élévation de la fréquence de F2 par rapport à l'orale, accompagnée par une nette chute de l'intensité de ce formant (de l'ordre de -12dB). Ces modifications formantiques peuvent être reliées avec ce qui a été observé quant à la production de ces voyelles par les mêmes sujets (voir Table 2 et Figure 3). Ainsi, un F2 plus bas est une conséquence attendue de la postériorisation et/ou de l'arrondissement caractérisant /ã, ẽ, œ̃/ par rapport aux orales correspondantes, de même qu'une augmentation de la fréquence en F1 correspond à un degré d'aperture plus important pour /ẽ, œ̃/ par rapport à /ɛ, œ/.

*Figure 6 environ ici*

*Table 5 environ ici*

*Table 6 environ ici*

La Table 5 donne les résultats d'une analyse statistique de variance destinée à vérifier que les modifications constatées ci-dessus sont bel et bien significatives. Une analyse de variance multivariée (MANOVA) à mesures répétées a ainsi été effectuée sur les mesures acoustiques (F1, F2, F3), avec pour facteurs inter-sujets, la Nasalité de la voyelle, son Timbre, et le Contexte, et pour facteur intra-sujets le Temps (t1, t2, t3). Les Table 5 et Table 6 donnent les résultats concernant les facteurs inter-sujets et intra-sujets respectivement. La Table 5 indique que la Nasalité et le Timbre, ainsi que leur interaction, induisent des différences significatives dans les formants, essentiellement en F1 et en F2. Seul ou en interaction avec d'autres variables, le Contexte n'a pas d'influence significative sur les valeurs formantiques. La Figure 7 permet d'illustrer la nature de l'interaction entre Nasalité et Timbre pour F1, et F2, et constitue un résumé de l'ensemble des tendances examinées jusqu'ici. Ainsi, F2 diminue entre orales et nasales, sauf pour la paire /ɔ-ɔ̃/. F1 augmente pour /ɛ, œ/ par rapport à /ε, œ/. La Figure 7 suggère par ailleurs que les différences entre orales et nasalisées sont peu importantes par rapport aux différences entre orales et nasales, ce qui a été confirmé par des tests Post Hoc (LSD)<sup>7</sup>.

*Figure 7 environ ici*

*Figure 8 environ ici*

Enfin, la Figure 8 et la Table 6 permettent d'examiner l'influence du décours temporel sur les mesures acoustiques. On notera particulièrement l'interaction significative entre le Temps, le Contexte et la Nasalité de la voyelle. Les différences entre orales et nasales se manifestent à partir du milieu de la voyelle, soit en t2 et t3, et sont d'autant plus importantes en contexte nasal (Figure 8). Les valeurs de F1 et F2 sont particulièrement stables pour les orales, tant au cours du temps qu'à travers les différents contextes.

## Discussion

### Caractérisation articulatoire et acoustique des nasales du français

Le premier objectif de cette étude était de proposer une description précise et quantifiée des propriétés articulatoires et acoustiques de la nasalité vocalique en français, à partir de données recueillies auprès de quatre sujets belges francophones. Les résultats obtenus permettent de caractériser les nasales en tant que groupe, ainsi que chaque voyelle nasale par rapport à sa correspondante dans l'inventaire phonologique oral.

Tout d'abord, notre étude confirme que les voyelles nasales du français sont systématiquement prononcées avec le voile du palais abaissé, et donc un port vélo-pharyngal ouvert, ce qui crée un couplage entre les cavités nasales et le reste du conduit vocal. Ensuite, les nasales du français présentent divers ajustements articulatoires supplémentaires, dont la nature varie selon le timbre de la voyelle, et l'étendue en fonction du contexte.

Ainsi, / $\tilde{\epsilon}$ / est une voyelle plus ouverte et plus centralisée que / $\epsilon$ /, soit [ $\tilde{\text{æ}}$ ]. C'est aussi ce que suggère l'étude cinéradiographique conduite par Brichler-Labaeye (1970), mais pas celle de Zerling (1984), où l'on trouve que / $\tilde{\epsilon}$ / est une voyelle plus postérieure mais de même aperture que / $\epsilon$ / . D'après nos images, / $\tilde{a}$ / est plus arrondie et plus arrière que / $a$ /, soit [ $\tilde{\text{a}}$ ], et même [ $\tilde{\text{ɔ}}$ ], ce qui confirme les observations faites par Brichler-Labaeye et Zerling dans les études précitées. Le fait qu'il ne subsiste plus aujourd'hui en Belgique francophone qu'une seule voyelle ouverte / $a$ / (antérieure), alors que la nasale / $\tilde{a}$ / a longtemps correspondu avec / $a$ / peut expliquer une partie de la distance observée aujourd'hui entre la nasale et l'orale dite correspondante (mais l'alternance morphologique entre / $\tilde{a}$ / et / $\text{an}$ / reste un fait établi, cf. Dominicy, 2000). En fait, d'après nos données / $\tilde{a}$ / est plutôt réalisée comme [ $\tilde{\text{ɔ}}$ ], c'est-à-dire qu'elle est également plus *postérieure* que [ $\text{a}$ ]. C'est aussi ce qu'a trouvé Zerling (1984). Par contre, / $\tilde{a}$ / est parfois décrite comme une voyelle plus fermée que son homologue orale, plus proche de l'aperture de [ $\text{ɔ}$ ] (p.ex. Bothorel et al., 1986), ce qui n'est pas le cas pour aucun de

nos quatre sujets. Quoi qu'il en soit, /ã/ reste une voyelle nettement distincte de /ɔ̃/ du point de vue articulatoire, puisque toutes les études (y compris la nôtre) s'accordent à décrire /ɔ̃/ comme une voyelle plus arrondie et plus postérieure que /ɔ/, et parfois plus fermée, soit [õ]. Enfin, /œ̃/ est de l'avis général une voyelle un peu plus ouverte et plus arrière que /œ/, soit [œ̃], voire [œ̄].

La Figure 9 schématise les déplacements articulatoires observés dans l'espace vocalique des voyelles nasales de nos quatre locuteurs par rapport aux orales correspondantes. Les déplacements locaux sont indiqués par des flèches en pointillé, le mouvement général par une flèche pleine. On voit que l'ensemble des ajustements articulatoires peut se laisser décrire comme un mouvement général vers l'arrière du triangle vocalique. Le recul de la langue dans la cavité pharyngale, est un phénomène qui a été précédemment relevé pour le français, même si son ampleur était moindre (Cf. Zerling, 1984). Ainsi réduite, la cavité pharyngale serait de dimension comparable pour les quatre nasales selon Delattre (1968a, 1968b). Ce n'est pas le cas sur nos images, pour lesquelles une nette différence subsiste entre nasales antérieures et postérieures de ce point de vue (Cf. Table 2 et Figure 3).

*Figure 9 environ ici*

Les données acoustiques recueillies dans le cadre de cette étude sur le même corpus et sur les mêmes locuteurs permettent d'investiguer les conséquences acoustiques des configurations articulatoires observées.

En ce qui concerne l'ouverture du port vélo-pharyngal proprement dite, nous avons décidé d'en étudier les conséquences acoustiques de façon globale, sans fixer au préalable de plages fréquentielles spécifiques où rechercher d'éventuelles paires pôle-zéro. L'examen des bandes d'énergie confirme que, lorsque les voyelles des quatre timbres vocaliques sont regroupées, l'effet de l'abaissement du voile consiste en une diminution d'énergie des nasales et des nasalisées sur l'ensemble du domaine fréquentiel. L'affaissement du niveau général d'énergie est prédit par la théorie acoustique de la production des sons nasals (Fant, 1960, Stevens, 1998). Il est consécutif à l'introduction de zéros spectraux par le couplage nasal, et à un

amortissement général de l'énergie acoustique dû à l'augmentation du volume d'air en vibration, et de la surface des parois du système résonateur (Johnson, 1997, Stevens, 1998). Plusieurs auteurs ont relevé précédemment que, toutes choses étant égales par ailleurs, le niveau d'énergie général d'une voyelle nasalisée est inférieur à celui d'une voyelle orale (House et Stevens, 1956, Dickson, 1962, Kent, Liss et Philips, 1989). Bernthal et Beuckelman (1977) ont spécifiquement montré qu'une augmentation de l'aire du port vélo-pharyngal avait pour principal effet d'abaisser l'intensité générale d'une voyelle. On peut néanmoins se poser la question de savoir si ce type de généralisation ne mène pas à une caractérisation acoustique trop peu précise de la nasalité, et qui n'aurait dès lors que peu de valeur fonctionnelle.

A l'opposé de cette généralisation se situe la démarche poursuivie par Chen (1997), qui relève le défi de la quantification précise en termes d'énergie du degré de nasalité spécifique d'une voyelle. Ainsi, Chen propose une mesure spectrale de la nasalité qui se fonde sur l'examen d'un corpus de voyelles contextuellement nasalisées de l'anglais, et de voyelles nasales du français. Cette mesure est double, soit « A1-P0 » et « A1-P1 ». Elle s'appuie sur une modélisation acoustique de la nasalité vocalique, qui prédit en l'occurrence que le  $F_1$  pour les voyelles nasales est de faible intensité (A1, en dB) et que des pics nasals (d'amplitudes P0 et P1, en dB) surviennent autour de 250 et 950 Hz. Les amplitudes P0 et P1 sont mesurées à des fréquences qui sont choisies parce qu'elles correspondent à des pics (d'une seule harmonique) sur le spectre FFT d'une nasalisée dans une région donnée. Par contre, la recherche d'un pic éventuel dans le spectre de la voyelle orale correspondante est contrainte par la fréquence spécifique du pic préalablement trouvé pour la voyelle nasalisée. La méthode favorise donc a priori l'apparition de large différences A1-P0 et A1-P1 pour les voyelles nasalisées exclusivement. De plus, à la différence de l'auditeur, qui ne sait pas qu'une voyelle est nasalisée avant de l'entendre, l'expérimentateur est conscient du fait qu'il est en présence de voyelles nasales, et se concentre dès lors sur deux régions extrêmement spécifiques du spectre acoustique.

S'intéressant à l'énergie dans une région fréquentielle beaucoup plus large, Maeda (1982) a proposé que l'indice acoustique de la nasalité, indépendamment de la voyelle considérée, consiste en un aplatissement du spectre et en une répartition plus diffuse de l'énergie en « basses fréquences ». Maeda (1993) précise cependant que la

formule mathématique qu'il propose pour mesurer le caractère diffus d'un spectre nécessite de la part de l'expérimentateur la spécification d'une plage fréquentielle adéquate dans chaque cas, de façon par exemple à exclure du calcul le  $F_2$  des voyelles antérieures. C'est à ce prix que les résultats obtenus reflètent le degré de nasalité effectivement perçu pour chaque voyelle. Dans une seconde tentative visant à caractériser acoustiquement la nasalité, Maeda (1993) propose de considérer la distance entre deux pics N1 et N2 en basses fréquences (en dessous de 10 Barks, soit 1300 Hz) comme la mesure du degré de nasalité au niveau perceptuel. Malheureusement, l'identification de N1 et N2 nécessite elle aussi une intervention de l'expérimentateur parce que le choix doit souvent s'effectuer parmi trois pics dans la région fréquentielle concernée (pour /a/ par exemple). Pour /u/, l'identification de N1 et N2 ne pose pas de problème, mais la mesure qui en résulte ne reflète que pauvrement l'évolution du degré perceptuel de nasalité en fonction du couplage nasal.

Par rapport aux propositions faites par Chen (1997), et Maeda (1993), nous plaçons quant à nous en faveur d'une mesure acoustique de la nasalité qui soit indépendante de toute manipulation par l'expérimentateur, et qui émerge du spectre des voyelles nasalisées envisagé dans son ensemble. Notre étude de la répartition comparée de l'énergie entre voyelles orales et voyelles nasalisées nous amène à deux considérations : (i) si l'on considère l'énergie moyennée pour tous les locuteurs, tous les timbres vocaliques, et tous les contextes, la différence entre voyelles orales et voyelles nasalisées s'opère sur l'ensemble du domaine fréquentiel sans distinction ; (ii) si l'on considère chaque paire orale-nalis(é)e au sein des différents contextes, on note que l'énergie est généralement mieux préservée autour de  $F_2$ . C'est le cas pour deux contextes sur trois (voyelles soutenues, contexte nasal ; voir Figure 5) ainsi que pour trois timbres sur quatre (voir Figure 6). En milieu de voyelle ( $t_2$ ), la différence d'intensité moyenne entre orales et nasales pour les trois formants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$  est respectivement de 3.6 dB, 1 dB et 8.3 dB pour  $\epsilon/\tilde{\epsilon}$ ,  $a/\tilde{a}$ , et  $\text{œ}/\tilde{\text{œ}}$  contre 5.6 dB, 9.6 dB et 11.6 dB pour  $\text{ɔ}/\tilde{\text{ɔ}}$ . La présence d'anti-résonances dans la région spécifique de  $F_3$  a été précédemment observée par Bloomer et Peterson (1955), Jha (1986) et Kent, Liss et Philips (1989). En ce qui concerne  $F_1$ , plusieurs auteurs ont fondé la création de stimuli synthétiques nasals sur des manipulations de la bande passante de  $F_1$ , et plus généralement de la

répartition de l'énergie spectrale autour de 500 Hz (p.ex. Delattre, 1954, 1965, Huffman, 1990, 1991, Hawkins et Stevens, 1985).

En résumé, le niveau général d'énergie pourrait donc être un bon candidat en ce qui concerne l'indice acoustique de la nasalisation, mais ceci nécessite une validation au niveau perceptuel. En particulier, des études perceptuelles sont nécessaires afin de vérifier que les auditeurs sont sensibles au niveau d'énergie global d'une voyelle, ou bien s'ils fondent leur jugement sur le rapport d'énergie entre différentes plages fréquentielles, soit en ce qui concerne la nasalité entre la région comprise entre 900 et 1500 Hz d'une part (autour de F2), et les régions situées en deçà et au-delà de ces fréquences d'autre part (autour de F1 et de F3).

Les données acoustiques recueillies dans la présente étude soulèvent par ailleurs la question du rôle des fréquences formantiques dans la production et la perception des nasales du français. Malgré la diversité des ajustements articulatoires observés entre orales et nasales correspondantes selon le timbre, leurs conséquences acoustiques convergent en deux points, à savoir la diminution de la fréquence de F2 (pour toutes les paires orales/nasales excepté  $\text{ɔ}/\text{ɔ̃}$ ), accompagnée de l'augmentation de la fréquence de F1, pour les antérieures uniquement (cf. Figure 7). La baisse de F2 est une conséquence attendue de la postériorisation généralisée des nasales, aussi bien que de l'arrondissement observé dans certains cas. Le cas de  $\text{ɔ}/\text{ɔ̃}$  est particulier, étant donné que si le F2 de la nasale a une fréquence plus élevée, il a par ailleurs une intensité extrêmement faible<sup>8</sup> (voir ci-dessus). Du point de vue de la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence,  $/\text{ɔ̃}/$  est donc une voyelle plus 'sombre' (Landeracy et Renard, 1977) ou plus 'grave' (Jakobson, Fant & Halle, 1952) que son homologue orale, comme le sont  $/\text{ẽ}, \text{ã}, \text{œ}/$  par rapport à  $/\text{e}, \text{a}, \text{ɔ}/$ . Ainsi, pour les quatre voyelles nasales du français la balance spectrale est déplacée en faveur des basses fréquences (sous 2000 Hz), par rapport aux orales correspondantes. Nous avons mené une étude perceptuelle préliminaire, qui suggère que le taux d'identification des voyelles nasales du français est élevé (au-delà des 90%) si, et seulement si, en plus d'augmenter la bande bassante en F1 et F3, on diminue la fréquence de F2 par rapport à l'orale correspondante, *y compris* pour la paire  $\text{ɔ}/\text{ɔ̃}$  (Delvaux, 2003, Delvaux et al., 2004).

## **Implications pour une théorie générale de l'implémentation phonétique**

La mise au jour de l'existence des ajustements articulatoires complémentaires à l'abaissement du voile du palais dans la production des voyelles nasales du français permet de répondre à certaines des questions posées dans l'introduction, notamment celle de la robustesse du contraste entre voyelles orales et nasales en contexte phonologique nasal, c'est-à-dire lorsque les orales sont susceptibles d'être nasalisées par coarticulation. Les modalités selon lesquelles ces ajustements articulatoires sont déclinés peuvent constituer une source importante d'informations en vue d'une meilleure compréhension des mécanismes généraux présidant à l'implémentation phonétique des contrastes phonologiques dans les langues. Nous envisageons ci-dessous deux types de phénomène en particulier : (i) la modulation en fonction du contexte des différentes propriétés articulatoires et acoustiques des nasales du français ; (ii) l'interaction entre les effets acoustiques des mouvements du voile et ceux des autres articulateurs.

Tout d'abord, nos données montrent dans leur ensemble que la production des orales et des nasales est nettement distincte dans tous les contextes, mais que les propriétés articulatoires et acoustiques servant à cette distinction ont un poids différent selon le contexte. Ainsi, en contexte oral, les différences entre orales et nasales sont maximales en termes d'énergie, alors qu'elles sont moins marquées en termes de modifications des fréquences formantiques. A l'inverse, en contexte nasal les différences d'énergie sont moindres entre orales et nasales correspondantes, alors que les différences en F1 et F2 sont plus importantes.

Puisque la différence d'énergie est principalement liée à la position du voile du palais, il est logique qu'elle soit réduite en contexte nasal. La Figure 4 montre que le port vélo-pharyngal peut être modérément ouvert pour les orales en contexte nasal (NVN). Cette ouverture a apparemment des conséquences importantes, tant au point de vue acoustique (Figure 5) qu'aérodynamique (Figure 1), alors que l'ouverture plus importante encore observée pour les nasales en contexte nasal (Figure 4) ne semble pas avoir d'effet particulier. Les non linéarités entre les événements survenant dans les phases articulatoires, aérodynamiques et acoustiques de la production de la parole sont un défi pour tous les chercheurs étudiant la nasalité (Delvaux et al., 2007). En

ce qui concerne le renforcement des différences formantiques en contexte nasal, on peut raisonnablement poser qu'il est dû à des ajustements articulatoires plus marqués dans ce contexte. Nous l'avons noté de façon ponctuelle dans nos données articulatoires (p.ex. Figure 3), mais l'effet du contexte n'atteignait pas à la significativité au point de vue statistique. Il est probable que ceci est dû à la résolution temporelle limitée des images IRM (200ms, cf. matériel et méthode ci-dessus), alors que les ajustements formantiques différenciés sont essentiellement observés en deuxième partie de voyelle (Figure 7).

Ce qui est particulièrement notable en ce qui concerne les résultats résumés ci-dessus, c'est que les locuteurs de notre étude semblent moduler leurs stratégies de production en fonction du contexte, et ce de manière à renforcer la distinctivité des nasales par rapport aux orales correspondantes dans chaque contexte spécifique. Ces résultats s'inscrivent donc aisément dans les théories qui considèrent l'implémentation phonétique des contrastes phonologiques comme une opération flexible, adaptative (Lindblom, 1990), voire éventuellement contrôlée par les locuteurs, notamment en fonction des besoins de l'auditeur ('listener-oriented phonetic knowledge', Kingston & Diehl, 1994).

Un autre aspect de nos résultats qui mérite un examen plus approfondi concerne l'interaction entre les effets acoustiques des mouvements du voile et ceux des autres articulateurs. Il s'agit d'examiner à la fois l'origine et les effets des ajustements articulatoires spécifiquement retenus par le français<sup>9</sup> pour la production des voyelles nasales. Une théorie influente des changements phonétiques stipule que nombre d'entre eux prennent leur naissance dans les variations inhérentes à la production des sons concernés (p.ex. suite à la coarticulation), et que les changements résultent majoritairement du fait que l'auditeur reproduit délibérément ces variantes parce qu'il est incapable d'en identifier la source (p.ex. la consonne coarticulante) et présume dès lors qu'elles ont été voulues comme telles par le locuteur (Ohala, 1981, 1986).

La question que nous posons est dès lors la suivante : pourquoi les voyelles nasales du français évoluent-elles (presque) toutes vers l'arrière du triangle vocalique ? La postériorisation (et/ou l'arrondissement) n'est qu'une des multiples dimensions phonétiques le long desquelles les nasales peuvent évoluer à partir du timbre des orales correspondantes ; d'un point de vue fonctionnel, des nasales

antériorisées auraient pu tout aussi bien assumer une plus grande distinctivité par rapport aux orales correspondantes. En examinant les valeurs formantiques obtenues pour les voyelles nasalisées de notre corpus, on remarque que pour F2 en tout cas, les valeurs prises par les voyelles nasalisées sont intermédiaires entre celles des orales et des nasales. Si l'on considère que les voyelles nasalisées ont été produites avec les articulateurs placés strictement dans la même position que les orales (ce qui est vrai au sens statistique, cf. ci-dessus), on peut donc suggérer que l'abaissement du voile du palais induit des modifications (limitées) des formants vocaliques, modifications dues à l'introduction de paires pôle-zéro dans le spectre vocalique, et qui ont été amplifiées pour la production des voyelles phonologiques nasales du français.

En fait, la théorie acoustique de la nasalité prédit exactement ce que nous observons pour nos nasalisées, à savoir qu'une paire pôle-zéro survenant vers 1250 Hz peut fusionner perceptuellement avec le pôle relié au F2 de la voyelle, ce qui résulterait en des nasalisées antérieures perçues comme moins antérieures (F2' moins élevé que F2), et des postérieures comme moins postérieures (F2' plus élevé que F2), sous l'effet de la nasalisation (Wright, 1986). Cette réduction de l'espace perceptuel pour les nasales par rapport aux orales dans la dimension antérieure-postérieure, théoriquement démontrée, a pourtant donné lieu à beaucoup moins de travaux que la réduction équivalente dans la dimension d'aperture (liée à F1, p.ex. Krakow et al. (1988, Macmillan et al. (1999, Kingston & Macmillan, 1995). Une des explications tient peut-être au fait que les inventaires phonologiques des langues du monde corroborent massivement la seconde (la plupart des nasales manquantes étant d'aperture moyenne, cf. introduction), alors que les données concernant la première sont plus parcellaires. D'une part, peu de langues au monde possèdent des voyelles orales centrales, susceptibles de disparaître dans l'inventaire nasal (Ruhlen, 1975, Maddieson, 1984), et d'autre part si les antérieures sont souvent postériorisées dans l'inventaire nasal, les postérieures nasales quant à elles présentent des tendances évolutives beaucoup plus diverses (Beddor, 1993). Le poids perceptuel d'un F2 très peu intense (tel qu'observé dans nos données pour /ɔ/) pourrait être un élément à investiguer.

En résumé, il est possible que l'évolution des nasales du français, par rapport aux orales correspondantes, se soit fondée sur des micro-variations phonétiques (acoustiques/perceptuelles) déjà présentes

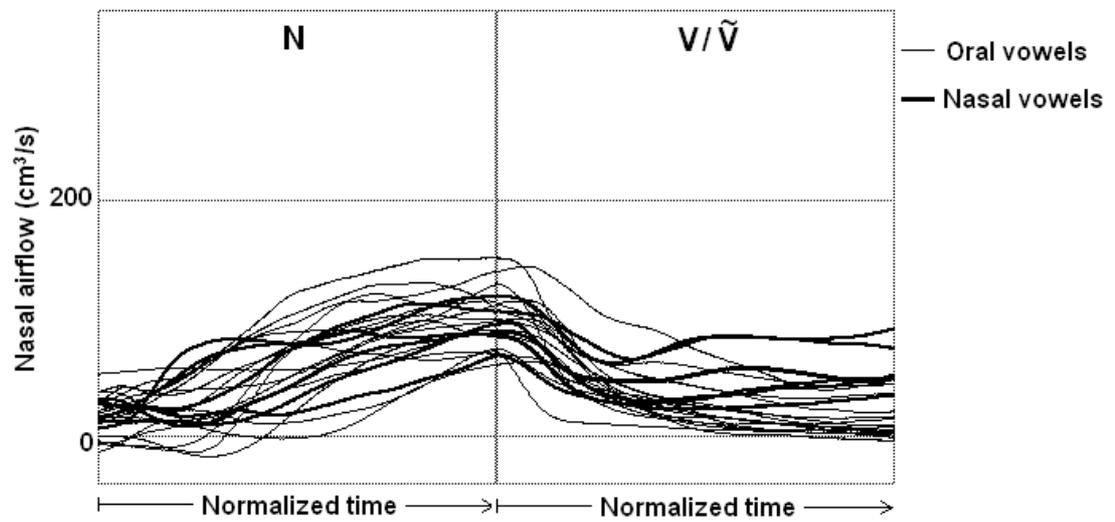
par l'action de la nasalité elle-même. Dans ce cas, l'évolution phonétique de timbre peut être considérée comme renforçant potentiellement le caractère 'nasal' des voyelles concernées en perception, ce qui a pu constituer un facteur favorisant leur sélection parmi d'autres évolutions possibles (Kingston & Diehl, 1994). La question de savoir si ces dimensions (modifications d'énergie d'une part, assombrissement du timbre d'autre part) sont traitées par les auditeurs de façon indépendante ou intégrée demande à être étudiée par des expérimentations perceptuelles spécifiques.



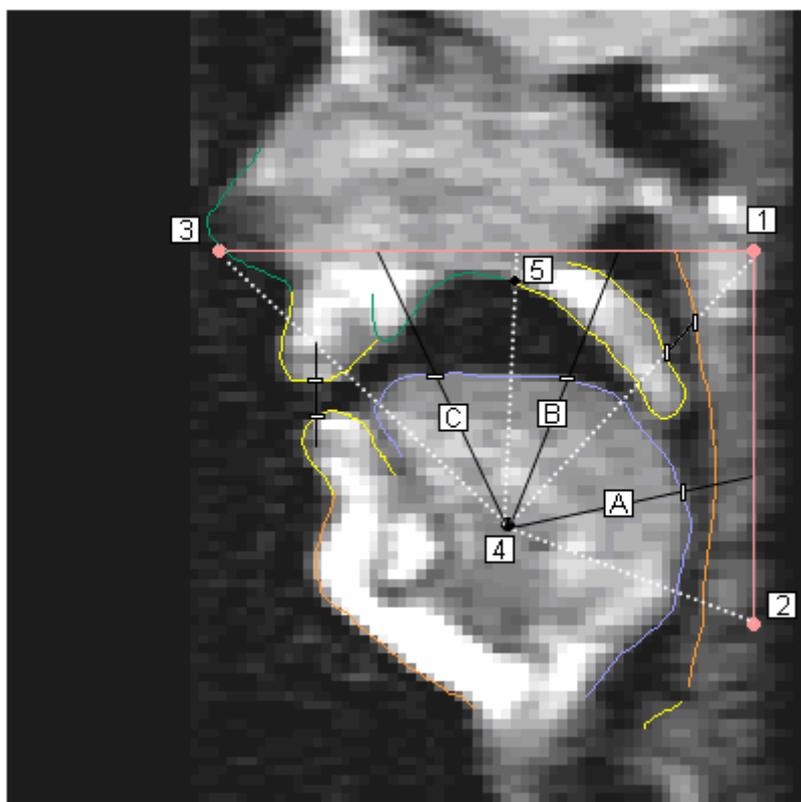


Figures

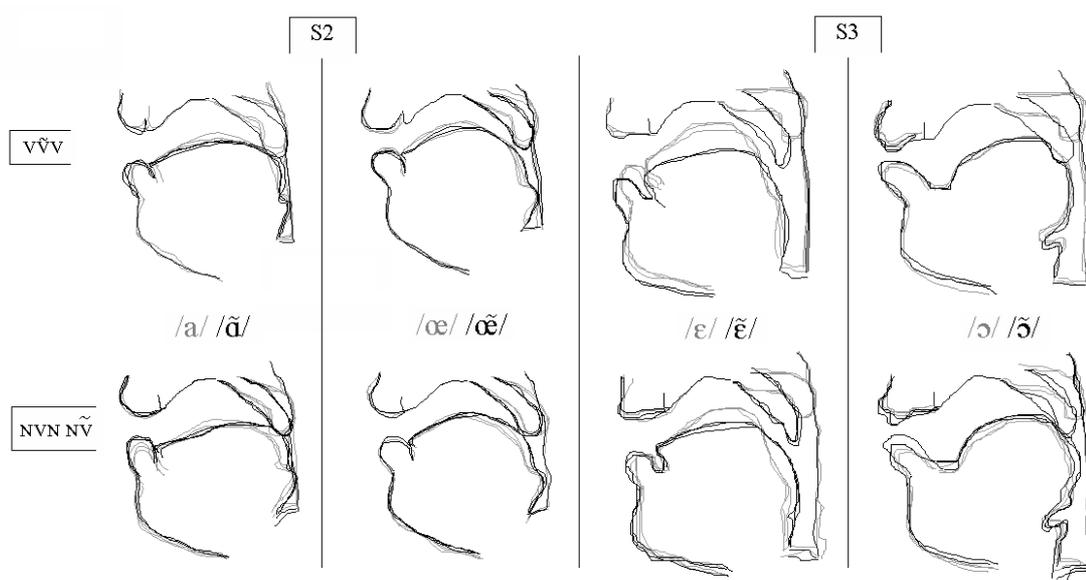
**Figure 1.** Evolution temporelle du débit d'air nasal (en  $\text{cm}^3/\text{s}$ ) pour 22 séquences NV et  $N\tilde{V}$  prononcées par un locuteur masculin du français de Belgique (Delvaux, soumis). Le temps est normalisé séparément pour la consonne et pour la voyelle.



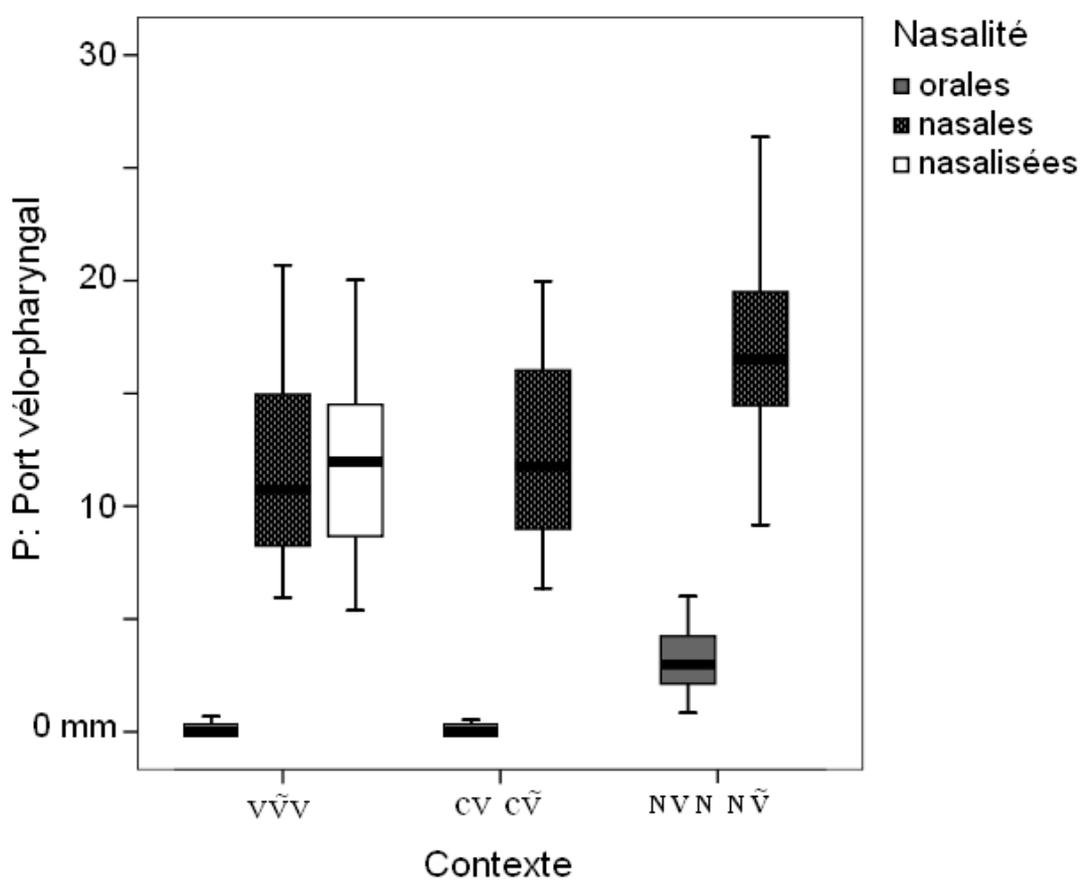
**Figure 2.** Méthode utilisée pour effectuer les mesures articulaires à partir des images IRM : profil des articulateurs dessiné manuellement ; système d'axes de référence obtenu par le positionnement des points 1, 2 et 3 sur des structures anatomiques fixes ; positionnement des points 4 et 5 et des droites complémentaires A, B et C.



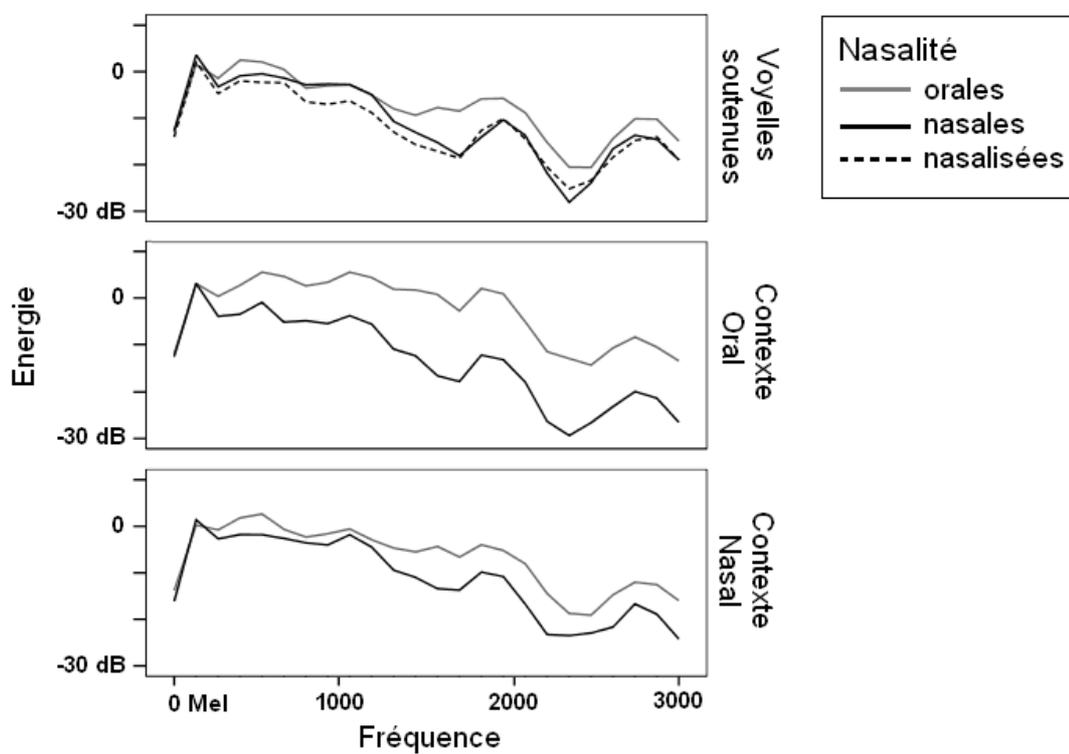
**Figure 3.** Tracés articulatoires obtenus pour les paires orale (en gris)-nasale (en noir): /a-ã/, /œ-œ̃/ (S2), /ɛ-ẽ/, /ɔ-õ/ (S3). En haut : voyelles soutenues ; en bas : contexte nasal.



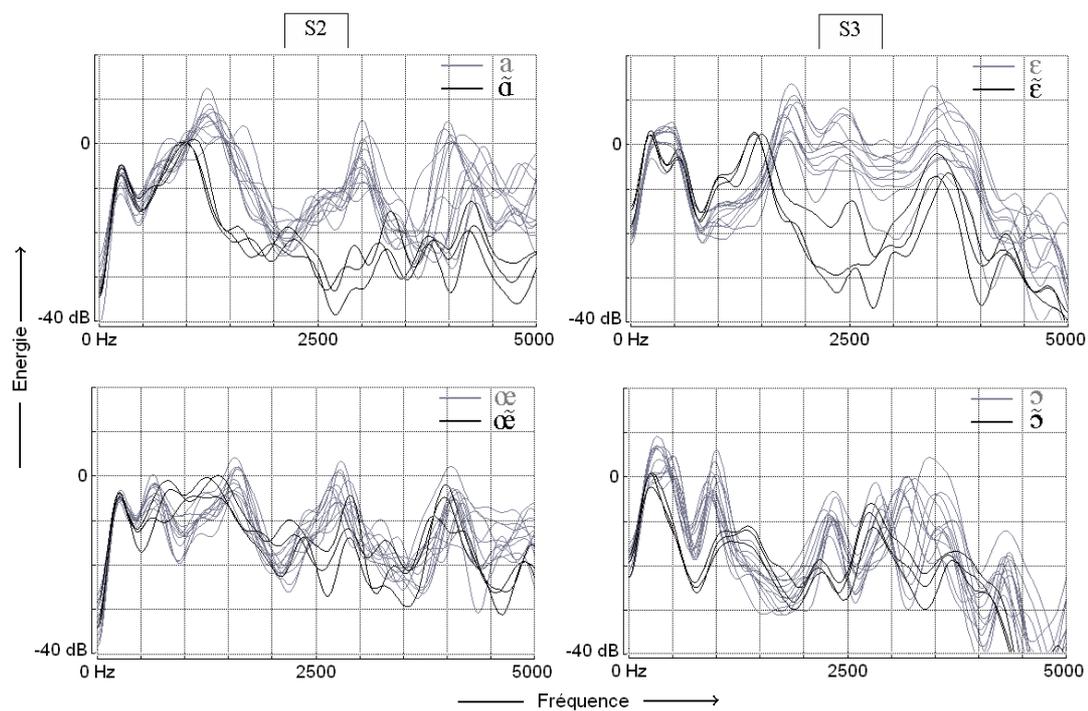
**Figure 4.** Boxplots représentant un résumé statistique (médiane, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> quartiles, minimum et maximum) des valeurs obtenues pour P (ouverture du port vélo-pharyngal) en fonction de la nasalité de la voyelle (orales vs. nasales vs. nasalisées) et du contexte (voyelles soutenues vs. contexte oral vs. contexte nasal).



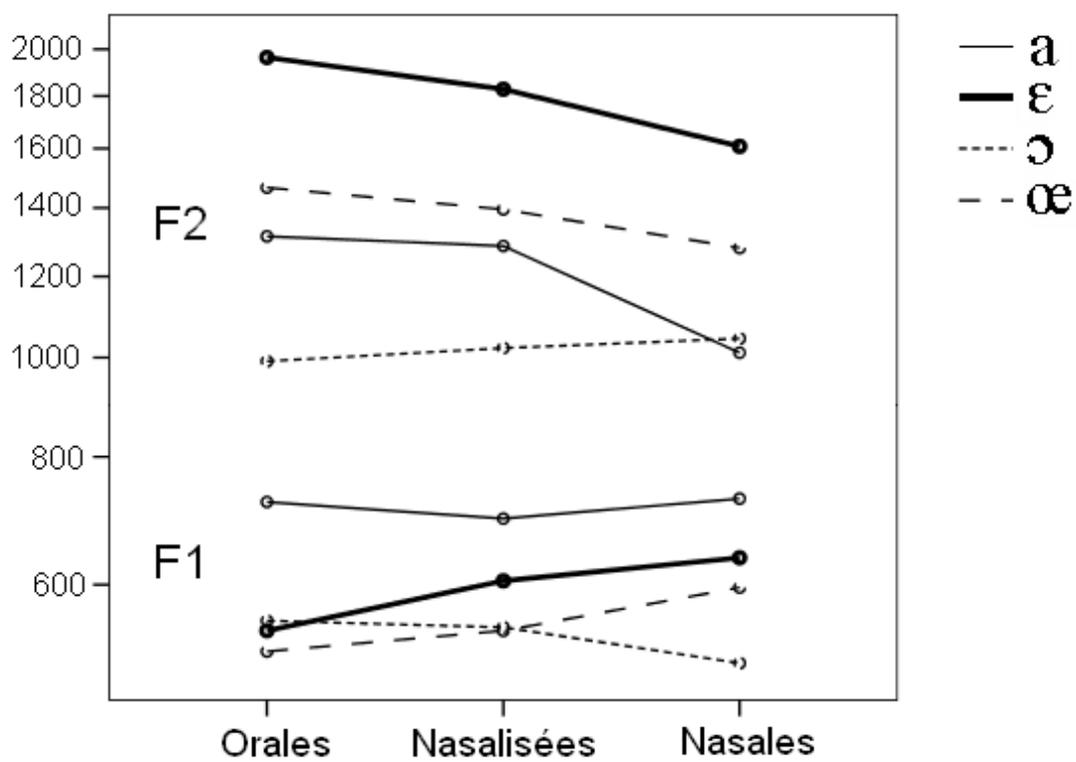
**Figure 5.** Valeurs moyennes (en dB) obtenues pour les 24 bandes d'énergie (entre 0 et 3000 Mels) en fonction de la nasalité de la voyelle (orales vs. nasales vs. nasalisées) et du contexte (voyelles soutenues vs. contexte oral vs. contexte nasal).



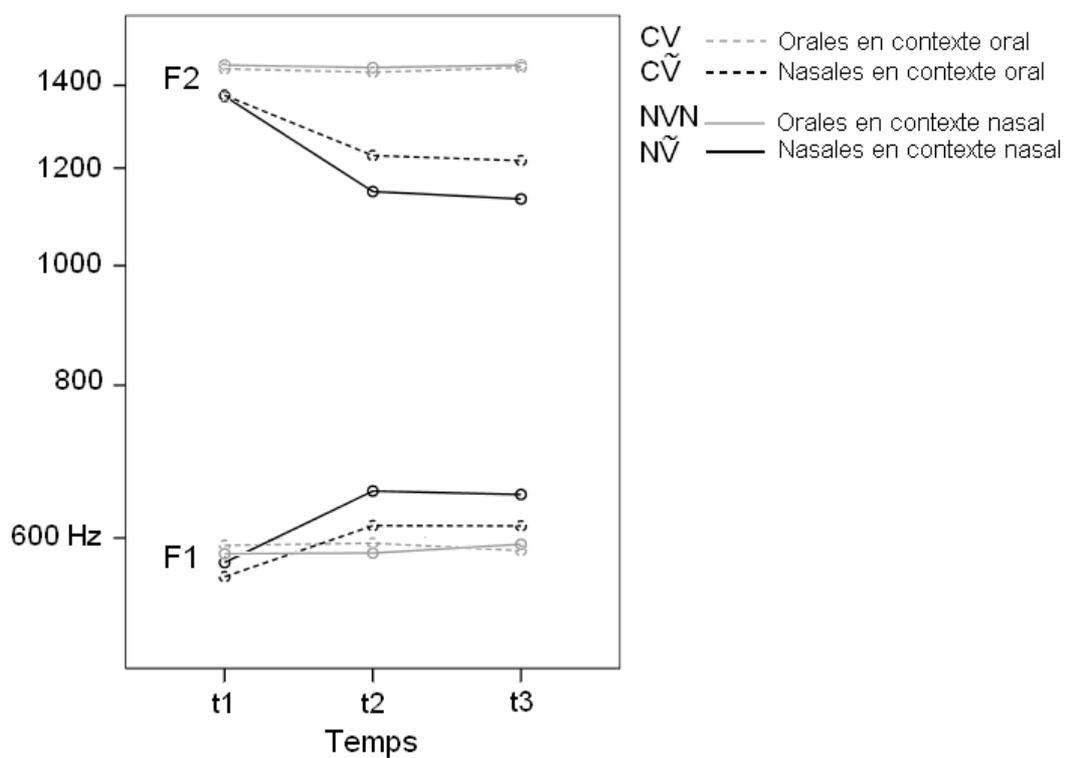
**Figure 6.** Spectres obtenus par analyse cepstrale comparant chaque paire orale (en gris) - nasale (en noir) : /a-ā/, /œ-œ̃/ (S2), /ɛ-ē/, /ɔ-õ/ (S3) (voyelles soutenues uniquement).



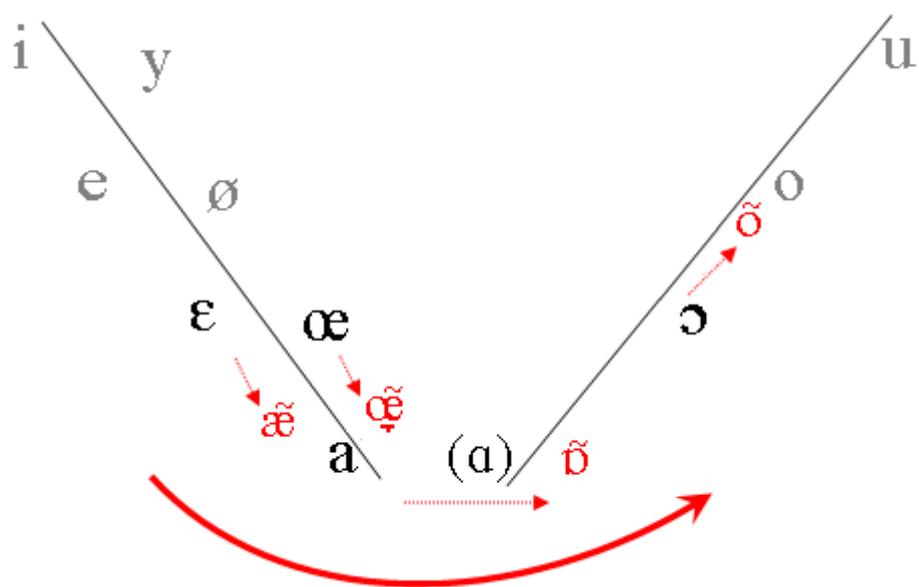
**Figure 7.** Valeurs moyennes (en Hz) obtenues pour F1 et F2 en fonction du timbre de la voyelle et de sa nasalité (tous sujets).



**Figure 8.** Valeurs moyennes (en Hz) obtenues pour F1 et F2 en t1, t2, et t3 en fonction de la nasalité de la voyelle (orales vs. nasales) et du contexte (oral vs. nasal) (tous sujets).



**Figure 9.** Schématisation des déplacements articulatoires observés dans l'espace vocalique pour les voyelles nasales par rapport aux orales correspondantes



## Tables

**Table 1.** Corpus des études articulatoires et acoustiques : 16 séquences de logatomes contenant les voyelles orales et nasales du français, ainsi que des voyelles nasalisées (voir détails dans le texte).

	Voyelles soutenues		Contexte oral	Contexte nasal
	/ṽṽ/	[ṽṽ]	CV C̃Ṽ	NVN ÑṼ
a-ã	/aãa/	[aãa]	pa pã	mam mã
ε-ẽ	/εẽε/	[εẽε]	pε pẽ	mεm mẽ
ɔ-õ	/ɔõɔ/	[ɔõɔ]	pɔ põ	mɔm mõ
œ-œ̃	/œœ̃œ/	[œœ̃œ]	pœ pœ̃	mœm mœ̃

**Table 2.** Résultats des mesures articulatoires : ouverture vélo-pharyngale (V), écart inter-labial (L), Hauteur de la langue dans la zone buccale Antérieure (HA), Hauteur de la langue dans la zone buccale postérieure (HP), écart entre la racine de la langue et la paroi Pharyngale (P). Moyennes et déviations standard (en mm) en fonction du timbre et de la nasalité de la voyelle, tous sujets et tous contextes confondus.

	V		L		HA		HP		P		
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	
a-ã	oral	1	2	20	4	39	9	41	8	8	3
	nasal	13	5	14	4	30	6	33	7	4	3
	nasalisé	12	4	18	6	40	7	40	9	7	3
ε-ẽ	oral	1	2	15	4	43	9	50	11	15	4
	nasal	14	6	21	7	38	8	41	10	8	5
	nasalisé	11	4	15	4	40	9	48	10	12	4
ɔ-õ	oral	1	1	12	4	31	6	42	11	9	2
	nasal	15	4	7	3	29	5	43	11	4	4
	nasalisé	13	4	12	5	31	5	44	10	8	2
œ-õ	oral	1	1	11	4	40	8	44	10	11	3
	nasal	14	6	14	5	35	7	39	9	7	3
	nasalisé	11	4	12	5	41	6	39	10	11	3

**Table 3.** Résultats (F, p) de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) conduite sur les données articulatoires. Les variables dépendantes sont les cinq mesures articulatoires L, V, HA, HP et P (voir détails dans le texte). Les variables indépendantes sont la nasalité de la voyelle (orales vs. nasales vs. nasalisées), le timbre de la voyelle (/ɛ/, /ê/, [ê] vs. /a/, /ā/, [ā] vs. /ɔ/, /õ/, [õ] vs. /œ/, /œ̃/, [œ̃]), et le contexte (contexte oral vs. contexte nasal vs. voyelles soutenues).

VI	VD	F	p	sig.
Nasalité (N)	L	F(2,356)=0.18	p=0.83	
	V	F(2,356)=815.42	p<.001	**
	HA	F(2,356)=9.37	p<.001	**
	HP	F(2,356)=9.38	p<.001	**
	P	F(2,356)=83.01	p<.001	**
Timbre (T)	L	F(3,356)=45	p<.001	**
	V	F(3,356)=1.18	p=0.32	
	HA	F(3,356)=23.95	p<.001	**
	HP	F(3,356)=11.2	p<.001	**
	P	F(3,356)=41.97	p<.001	**
Contexte (C)	L	F(2,356)=0.19	p=0.83	
	V	F(2,356)=74.31	p<.001	**
	HA	F(2,356)=1.14	p=0.32	
	HP	F(2,356)=1.77	p=0.17	
	P	F(2,356)=0.55	p=0.58	
N*T	L	F(6,356)=14.01	p<.001	**
	V	F(6,356)=1.32	p=0.25	
	HA	F(6,356)=4.09	p<.001	**
	HP	F(6,356)=1.96	p=0.07	
	P	F(6,356)=1.4	p=0.21	
N*C	L	F(2,356)=0.24	p=0.79	
	V	F(2,356)=6.43	p<.05	*
	HA	F(2,356)=0.68	p=0.51	
	HP	F(2,356)=0.02	p=0.98	
	P	F(2,356)=0.97	p=0.38	
T*C	L	F(6,356)=0.71	p=0.64	
	V	F(6,356)=1.4	p=0.21	
	HA	F(6,356)=0.63	p=0.71	

	HP	F(6,356)=1.88	p=0.08
	P	F(6,356)=0.8	p=0.57
N*T*C	L	F(6,356)=0.42	p=0.86
	V	F(6,356)=0.53	p=0.79
	HA	F(6,356)=0.57	p=0.75
	HP	F(6,356)=0.01	p=1
	P	F(6,356)=0.21	p=0.97

**Table 4.** Résultats des mesures acoustiques : fréquence des trois premiers formants F1, F2, F3 pour les locuteurs masculins et les locuteurs féminins. Moyennes et déviations standard (en Hz) en fonction du timbre et de la nasalité de la voyelle, tous contextes confondus.

	Locuteurs masculins						Locuteurs féminins						
	F1		F2		F3		F1		F2		F3		
	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	
a- ã	oral	6				1	7			1		1	
		7	5	12	6	24	3	5	6	13	0	29	9
		8	3	26	6	67	9	8	4	69	1	30	1
	nasal	6			1		4	8	1		1		4
		4	9	86	5	24	0	3	5	10	2	32	2
		3	2	5	4	61	7	0	5	28	5	93	1
nasal isé	6					3	7					2	
	5	3	11	8	25	8	1	3	13	6	31	1	
		0	3	40	8	58	6	3	5	78	8	95	4
ε- ẽ	oral	4			1		2	6			1		2
		5	5	17	6	23	4	2	9	21	5	30	9
		1	9	24	4	66	0	1	8	68	6	67	0
	nasal	5			1		2	7			1		3
		7	4	13	0	23	0	7	7	16	5	32	0
		2	4	98	7	71	0	4	4	52	0	25	9
nasal isé	5					1	6	1		1		2	
	4	5	16	4	24	4	7	0	20	6	34	8	
		9	6	63	4	81	2	6	6	47	8	11	2
ɔ- õ	oral	4			1		1	6			1		2
		3	7	86	0	23	8	6	6	11	2	29	8
		9	7	7	5	75	0	5	3	16	8	77	5
	nasal	4	1		1		2	5			1		3
		1	5	10	6	21	6	7	6	10	3	31	4
		0	1	75	3	65	3	2	4	31	2	54	6
nasal isé	4	2				2	6	1		2		2	
	0	0	10	8	24	0	7	5	91	4	33	8	
		7	5	96	9	37	6	4	4	3	1	60	1
œ- oral	4	6	13	1	22	2	5	7	15	1	27	2	

æ̃	4	4	11	2	24	0	7	2	68	5	39	6
	2			0		3	8			5		6
	5			1		2	7	1				2
	2	6	12	6	23	7	1	0	12	7	30	9
	nasal	9	0	60	0	76	8	1	2	42	4	36
	4	1				1	6			1		3
nasal	6	1	12	1	23	2	5	6	16	8	34	8
isé	4	4	68	5	58	3	6	2	05	1	41	0

**Table 5.** Résultats (F, p) de l'analyse de variance multivariée (MANOVA à mesures répétées) conduite sur les données acoustiques : facteurs inter-sujets. Les variables dépendantes sont les formants F1, F2, F3. Les variables indépendantes sont la nasalité de la voyelle (orales vs. nasales vs. nasalisées), le timbre de la voyelle (/ɛ/, /ɛ̃/, [ɛ̃] vs. /a/, /ã/, [ã] vs. /ɔ/, /ɔ̃/, [ɔ̃] vs. /œ/, /œ̃/, [œ̃]), et le contexte (contexte oral vs. contexte nasal vs. voyelles soutenues).

VI	VD	F	p	sig.
Nasalité (N)	F1	F(2,356)=3.13	p=0.04	*
	F2	F(2,356)=50.69	p<.001	**
	F3	F(2,356)=4.67	p=0.01	*
Timbre (T)	F1	F(3,356)=38.85	p<.001	**
	F2	F(3,356)=277.46	p<.001	**
	F3	F(3,356)=2.67	p=0.05	
Contexte (C)	F1	F(2,356)=0.35	p=0.71	
	F2	F(2,356)=1.88	p=0.15	
	F3	F(2,356)=0.17	p=0.84	
N*T	F1	F(6,356)=3.56	p=0.001	*
	F2	F(6,356)=10.75	p<.001	**
	F3	F(6,356)=0.34	p=0.91	
N*C	F1	F(2,356)=2.31	p=0.1	
	F2	F(2,356)=0.85	p=0.43	
	F3	F(2,356)=2.14	p=0.12	
T*C	F1	F(6,356)=0.31	p=0.93	
	F2	F(6,356)=0.37	p=0.89	
	F3	F(6,356)=0.11	p=0.99	
N*T*C	F1	F(6,356)=0.32	p=0.93	
	F2	F(6,356)=0.52	p=0.79	
	F3	F(6,356)=0.1	p=1	

**Table 6.** Résultats (F, p) de l'analyse de variance multivariée (MANOVA à mesures répétées) conduite sur les données acoustiques : facteurs intra-sujets. Les variables dépendantes sont les formants F1, F2, F3. Le facteur intra-sujets est le temps (t1, t2, t3). Les autres variables indépendantes sont la nasalité de la voyelle (orales vs. nasales vs. nasalisées), le timbre de la voyelle (/ɛ/, /ẽ/, [ẽ] vs. /a/, /ã/, [ã] vs. /ɔ/, /õ/, [õ] vs. /œ/, /œ̃/, [œ̃]), et le contexte (contexte oral vs. contexte nasal vs. voyelles soutenues).

VI	VD	F	p	sig.
Temps	F1	F(1,356)=27.89	p<.001	**
	F2	F(1,356)=31.38	p<.001	**
	F3	F(1,356)=10.5	p<.05	*
Temps*Nasalité (N)	F1	F(2,356)=15.1	p<.001	**
	F2	F(2,356)=19.97	p<.001	**
	F3	F(2,356)=6.36	p<.05	*
Temps*Timbre (T)	F1	F(3,356)=11.48	p<.001	**
	F2	F(3,356)=12.52	p<.001	**
	F3	F(3,356)=1.1	p=0.35	
Temps*Contexte (C)	F1	F(2,356)=8.06	p<.001	**
	F2	F(2,356)=16.86	p<.001	**
	F3	F(2,356)=2.7	p=0.07	
Temps*N*T	F1	F(6,356)=5.7	p<.001	**
	F2	F(6,356)=8.97	p<.001	**
	F3	F(6,356)=1.93	p=0.07	
Temps*N*C	F1	F(2,356)=6.53	p<.05	*
	F2	F(2,356)=15.56	p<.001	**
	F3	F(2,356)=2.51	p=0.08	
Temps *T*C	F1	F(6,356)=4.19	p<.001	**
	F2	F(6,356)=4.52	p<.001	**
	F3	F(6,356)=0.62	p=0.71	
Temps*N*T*C	F1	F(6,356)=3.31	p<.05	*
	F2	F(6,356)=4.67	p<.001	**
	F3	F(6,356)=0.67	p=0.68	

## Références

- Beddor, P.S. (1993). The perception of nasal vowels. *Phonetics and Phonology, vol.5, Nasals, Nasalization and the velum*, M.K. Huffman et R.A. Krakow (eds), Academic Press, San Diego, 171-196.
- Berenthal, J.E. et Beuckelman, D.R. (1977). The effect of changes in velopharyngeal orifice area on vowel intensity. *Cleft Palate Journal*, 14, 63-77.
- Bladon, R.A.W., Henton, C.G. et Pickering, J.B. (1984). Towards an auditory theory of speaker normalization, *Language & Communication* 4 (1), pp. 59-69.
- Bloomer, H. et Peterson, G. (1955). A spectrographic study of hypernasality. *Cleft Palate Bulletin*, 5, 5-6.
- Bothorel, A., Simon, P., Wioland, F. et Zerling, J.-P. (1986). Cinéradiographie des voyelles et consonnes du français. *Travaux de l'Institut de Phonétique de Strasbourg*, 18.
- Brichler-Labaeye, C. (1970). *Les voyelles françaises. Mouvements et positions articulatoires à la lumière de la radiocinématographie*, Klincksieck, Paris (coll. Bibliothèque française et romane, série A, n°18).
- Chen, M.Y. (1997). Acoustic correlates of English and French nasalized vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 4, pp. 2360-2370.
- Delattre, P. (1954). Les attributs acoustiques de la nasalité vocalique et consonantique. *Studia Linguistica VII*, 2, pp. 103-109.
- Delattre, P. (1965). La nasalité vocalique en français et en anglais. *The French Review*, 39, pp. 92-109.
- Delattre, P. (1968a). La Radiographie des voyelles françaises et sa corrélation acoustique. *The French Review*, 42, 1, pp. 48-65.
- Delattre, P. (1968b). Divergences entre nasalités vocalique et consonantique en français. *Word*, 24, pp. 64-72.
- Delvaux, V. (2003). *Contrôle et connaissance phonétique: les voyelles nasales du français*. Unpublished doctoral dissertation, Free university of Brussels, Belgium.

- Delvaux, V., Demolin, D., Soquet, A., et Kingston, J. (2004). La perception des voyelles nasales du français. *XXVèmes Journées d'étude sur la parole, Fès*, pp. 157-160.
- Delvaux, V., Amelot, A., & Rossato, S. (2007). Nasalization processes at the interface between phonetics and phonology. *Proceedings of XVIth ICPHS 2007*, pp. 245-248.
- Delvaux, V. *soumis*. Perception de la nasalité vocalique en français.
- Demolin, D., Delvaux, V., Metens, T., & Soquet, A. (2003). Determination of the Velum Opening for French Nasal Vowels by Magnetic Resonance. *Journal of Voice*, 17, 4, pp. 654-667.
- Dickson, D.R. (1962). An acoustic study of nasality. *Journal of Speech and Hearing Research*, 5, pp. 103-111.
- Dominicy, M. (2000). La dynamique du système phonologique en français. *Le Français Moderne*, 68, pp. 17-30.
- Fant, G. (1960). *Acoustic Theory of Speech Production*. The Hague, Mouton.
- Farnetani, E. et Recasens, D. (1999). Coarticulation models in recent speech production theories. *Coarticulation : Theory, Data and Techniques*, W. Hardcastle et K. Hewlett (eds), Cambridge University Press, Cambridge.
- Fougeron, C., et Smith, C. L. (1999). French. In International Phonetic Association (Ed.) *Handbook of the International Phonetic Association* (pp. 78-81). Cambridge University Press, Cambridge.
- Gendrot C., Adda-Decker M., (2004). Analyses formantiques automatiques de voyelles orales: évidence de la réduction vocalique en langues française et allemande, *Workshop MIDL04*, Paris, France.
- Greenberg, J.H., Ferguson, C.A. et Moravcsik, E.A (Eds). (1978). *Universals of Human Language*, Stanford University Press, Stanford, 3 vol.
- Hawkins, S. et Stevens, K.N. (1985). Acoustic and perceptual correlates of the non nasal-nasal distinction for vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77, 4, pp. 1560-1575.
- House, A.S. et Stevens, K.N. (1956). Analog studies of the nasalization of vowels. *Journal of Speech and Hearing Disorders*. 21,2, pp. 218-232.

- Huffman, M. (1990). The role of F1 amplitude in producing nasal percepts. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88, p. S54.
- Huffman, M. (1991). Time varying properties of contextually nasalized vowels : acoustics and perception. *Proceedings 12<sup>th</sup> ICPHSc, Aix-en-Provence*, vol.3, pp. 130-133.
- Jakobson, R., G. Fant, et Halle, M. (1952). *Preliminaries to Speech Analysis: the Distinctive Features and their Correlates*, MIT Press, Cambridge.
- Jha, S.K. (1986). The nasal vowels in Maithili : an acoustic study. *Journal of Phonetics*, 14, pp. 223-230.
- Johnson, K. (1997). *Acoustic and Auditory Phonetics*, Oxford, Blackwell.
- Kent, R.D., Liss, J. et Philips, B.J. (1989). Acoustic analysis of velopharyngeal dysfunction in speech. *Communicative disorders related to cleft lip and palate*, K.R. Bzoch (ed.), College-Hill Press, Boston, 3<sup>e</sup> édition, pp. 258-270.
- Kingston, J. et Diehl, R. L. (1994). Phonetic Knowledge. *Language*, 70, 3, pp. 419-453.
- Kingston J. et Macmillan, N.A. (1995). Integrality of nasalization and F1 in vowels in isolation and before oral and nasal consonants : A detection-theoretic application of the Garner paradigm. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 2, pp. 1261-1285.
- Krakow, R.A., Beddor, P.S., Goldstein, L.M., and Fowler, C. (1988). Coarticulatory influences on the perceived height of nasal vowels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 3, pp. 1146-1158
- Landercy, A. et Renard, R. (1977). *Eléments de phonétique*, Didier, Bruxelles.
- Lindblom, B. (1990). Explaining phonetic variation: A sketch of the H&H theory. In: A. Marchal, (ed.). *Speech Production and Speech Modelling*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Macmillan, N.A., Kingston, J., Thorburn, R., Dickey, A.W. et Bartels, C. (1999). Integrality of nasalization and F1. II Basic sensitivity and phonetic labeling measure distinct sensory and decision-rule

- interactions, *Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 5, pp. 2913-2932.
- Maddieson, I. (1984). *Patterns of sounds*. Cambridge studies in speech science and communication. Cambridge University Press, Cambridge.
- Maeda, S. (1982). A digital simulation method of the vocal-tract system. *Speech Communication*, 1, pp. 199-229.
- Maeda, S. (1993). Acoustics of vowel nasalization and articulatory shifts in French nasal vowels. *Phonetics and Phonology, vol.5, Nasals, Nasalization and the velum*, M.K. Huffman et R.A. Krakow (eds), Academic Press, San Diego, pp. 147-167.
- Morin, Y-C. (1994). Quelques réflexions sur la formation des voyelles nasales en français. In R. Van Deyck (ed.), *Diachronie et variation linguistique*. Communication et cognition, Gent, pp. 27-109.
- Nève, F.-X. (1984). Auquin doute : un parfum brun s'en va... : la disparition du phonème /œ/ en français contemporain. *Le Français Moderne*, 52, 4, pp. 98-219.
- Ohala, J. J. et Jaeger, J. J. (1986). (eds) *Experimental phonology*. Academic Press, New York.
- Ohala, J.J. (1981). The listener as a source of sound change, *Papers from a Parasession on Language and Behavior*, Chicago Linguistics Society, pp. 178-203.
- Ohala, J.J. (1986). Phonological evidence for top-down processing in speech perception. *Invariance and variability in speech processes*, J.S. Perkell et D.H. Klatt (eds), Erlbaum, Hillsdale, pp. 386-397.
- Ruhlen, M. (1975). Patterning of nasal vowels. In C. Ferguson, L. Hyman, et J. J. Ohala (Eds.), *Nasalfest: Papers from a Symposium on Nasals and Nasalization* (pp. 333-351). Stanford University: Department of Linguistics.
- Stevens, K. (1998). *Acoustic phonetics*, MIT Press, Cambridge.
- Stevens, S.S. et Volkman, J. (1940). The Relation of Pitch to Frequency. *American Journal of Psychology* 53, pp. 329-353.
- Walter, H. (1994). Variétés actuelles des voyelles nasales du français. In : R. Van Deyck (ed.): *Diachronie et variation linguistique*.

Communication et cognition, Gent, (coll. Studies in language), pp. 223-236.

Wright, J.T. (1986). The Behavior of Nasalized Vowels in the Perceptual Vowel Space. In: J.J. Ohala et J.J. Jaeger (eds): *Experimental phonology*. Academic Press, New York, pp. 45-67.

Zerling, J.-P. (1984). Phénomènes de nasalité et de nasalisation vocaliques : Etude cinéradiographique pour deux locuteurs. *Travaux de l'Institut de Phonétique de Strasbourg*, 16, pp. 241-266.

Zwicker, E. et Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics – Facts and Models*. Springer-Verlag, Berlin.

### **Remerciements**

Une partie du travail présenté ici a été réalisée dans le cadre de notre thèse de doctorat, sous la direction de Didier Demolin. Nous tenons à remercier Thierry Metens pour l'aide apportée lors de l'acquisition des données IRM à l'hôpital Erasme (Bruxelles). Merci également à Alain Soquet, qui a permis le développement des outils de traitement des données recueillies. Enfin, nous remercions Bernard Harmegnies, **x, y, ainsi que n** reviewers anonymes pour leurs commentaires et suggestions aux différentes étapes de l'élaboration de cet article.

## Notes

---

<sup>1</sup> En français de Belgique, on compte généralement 11 orales /i, e, ε, a, y, ø, œ, ə, u, o, ɔ/ et 4 nasales /ɛ̃, œ̃, ã, õ/. L'opposition /a-ɑ/ ne subsiste plus que dans un petit nombre d'unités lexicales, où elle est exprimée par une distinction de longueur [a]-[a:] (Dominicy, 2000). Quant à la fusion /ɛ̃-œ̃/, elle n'est pas encore généralisée à une majorité de variétés régionales et de locuteurs en Belgique, au contraire de ce qu'on observe en français parisien (Walter, 1994, Nève, 1984).

<sup>2</sup> Dans les séquences  $v_1v_2v_3$ , seules  $v_1$  (voyelle orale) et  $v_2$  (voyelle nasale ou nasalisée) ont été analysées.

<sup>3</sup> Le point 1 est situé entre l'os sphénoïde et la première vertèbre. Le point 2 est situé sur un axe parallèle à la paroi pharyngale passant par le point 1, là où il rencontre le disque placé entre les vertèbres cervicales 3 et 4. Le point 3 est situé à l'intersection de l'extrémité du cartilage nasal et d'un axe parallèle à l'os du palais dur passant par le point 1.

<sup>4</sup> Le logiciel SignalExplorer a été développé par Alain Soquet, ingénieur de recherche au laboratoire de phonologie expérimentale de l'Université Libre de Bruxelles.

<sup>5</sup> Des tests Post Hoc (LSD) ont montré que les trois types de voyelles sont significativement différents au niveau de l'ouverture vélo-pharyngale, même si la différence moyenne n'est que de 1.9 mm pour la paire nasale/nasalisée, contre 13 mm pour la paire orale/nasale et 11 mm pour la paire orale/nasalisée.

<sup>6</sup> Il s'agit de la moyenne des 24 bandes d'énergie. Cette moyenne générale est significativement différente d'après un test t de Student à deux échantillons indépendants ( $t = -5.8$ ,  $df = 766$ ,  $p < .001$ ).

<sup>7</sup> Les tests Post hoc (LSD) ont montré que pour F1 et F2 les nasales sont significativement différentes des orales et des nasalisées, qui ne sont pas significativement différentes entre elles.

<sup>8</sup> D'ailleurs, l'arrondissement et la postériorisation observés pour la nasale /õ/ par rapport à /ɔ/ ne correspondent pas à une augmentation, mais à une diminution de la fréquence de F2. Il est probable que le pôle observé autour de 1100Hz, généralement peu intense, et précédé dans le domaine fréquentiel d'une vallée spectrale, est plutôt un pôle spécifique introduit par le couplage nasal.

<sup>9</sup> Ou, en tout cas, par le français septentrional (Belgique, nord de la France, Suisse), dans la mesure où nos quatre locuteurs en sont représentatifs, ce qui exclut en tout cas a priori les variétés spécifiques que sont le français septentrional (sud de la France) et québécois.