

Imprécision dans la production des voyelles : un potentiel marqueur infraclinique dans la maladie de Parkinson

Virginie Roland¹, Véronique Delvaux^{1,2}, Kathy Huet¹, Myriam Piccaluga¹ et Bernard Harmegnies¹

(1) Institut de Recherches en Sciences et Technologies du Langage ; Service de Métrologie et Sciences du Langage, 18 place du Parc, 7000 Mons, Belgique

(2) FNRS, Belgique

Virginie.roland@umons.ac.be

RÉSUMÉ

La maladie de Parkinson est une maladie neurodégénérative qui affecte le système neuro-moteur. Une grande variété de troubles de la parole, généralement regroupés sous les termes de dysarthrie hypokinétique, peuvent apparaître. Dans cette contribution, nous présentons les résultats d'une étude acoustique comparative de la production de voyelles par 63 locuteurs MP dysarthriques et non dysarthriques, avec 35 locuteurs sains. Notre objectif est d'étudier la production de voyelles isolées afin de répondre à la question : l'imprécision dans la production des voyelles peut-elle être considérée comme un marqueur infraclinique de la dysarthrie ?

ABSTRACT

Imprecision of vowel production: a potential subclinical marker in Parkinson's disease. Parkinson's disease is a neurodegenerative disease affecting neuromotor system. A wide variety of speech disorders usually regrouped under the label of hypokinetic dysarthria may be appear. In this paper, we present the results of an acoustic study of vowel' production by dysarthric PD, non dysarthric PD and control speakers. Our aim is to study the production of vowel in isolation to address the following question: can imprecision of vowel's production be considered as an infraclinic marker of dysarthria?

MOTS-CLÉS : voyelles, maladie de Parkinson, métriques acoustiques, marqueur infraclinique

KEYWORDS: vowels, Parkinson's disease, acoustic metrics, subclinical marker

1 Introduction

Notre recherche s'intègre dans un questionnement plus large qui s'intéresse au potentiel informatif du signal de parole produit par des locuteurs s'exprimant dans des situations de communication adverses, au rang desquelles figurent les états à caractère pathologique. La présente contribution se

centre plus particulièrement sur la parole produite par des locuteurs atteints de la maladie de Parkinson (MP), une affection neurodégénérative présentant une large symptomatologie, au sein de laquelle figurent des troubles dysarthriques. Cette dysarthrie, dite *hypokinétique* dans la MP, a longtemps été considérée comme d'apparition tardive, en particulier en ce qui concerne ses répercussions sur l'intelligibilité de la parole, et plus largement sur la communication. Toutefois, ce caractère tardif n'a pas toujours fait consensus et est, aujourd'hui, en partie réfuté. Ainsi, les réflexions menées sur l'évolution de la maladie (Braak et al., 2003) ainsi que celles menées par l'*International Parkinson and Movement Disorder Society* suggèrent que les troubles de la parole pourraient au contraire faire partie des premières manifestations de la MP (Sapir, 2014). Notre objectif est ainsi d'identifier des mesures acoustiques sensibles aux altérations de parole présentes dans la MP. En effet, puisque la dysarthrie semble pouvoir apparaître tôt dans le décours de la maladie, il nous semble opportun de tenter d'identifier des éléments permettant sa détection aussi précocement que possible, dans une perspective de prise en charge, voire de diagnostic précoces.

2 Méthodologie

2.1 Locuteurs et corpus

La participation de 98 locuteurs francophones, répartis en deux groupes, a été sollicitée. Le premier groupe se compose de 63 participants (36 hommes et 27 femmes) atteints de la MP, âgés entre 38 et 85 ans ($m = 70$ ans). Le diagnostic de la maladie a été posé au minimum un an avant le recrutement jusqu'à une durée de maladie de 25 ans, la durée moyenne de la MP étant de 7 ans. Les participants présentent un éventail complet de l'ensemble des stades de la maladie tel que proposé par Hoehn et Yahr (1967). À la suite de l'évaluation à partir de l'item parole de l'échelle d'évaluation UPDRS, 20 de nos participants ont été identifiés comme ne présentant pas de troubles dysarthriques (11 hommes et 9 femmes – proportions similaires à celles du groupe complet). Le second groupe (groupe témoin) se compose quant à lui de 35 participants, 19 hommes et 16 femmes (proportions similaires à celles du groupe MP), âgés entre 41 et 84 ans ($m = 66$ ans), ne présentant pas de pathologies ni d'antécédents médicaux pouvant altérer la production de la parole.

Les participants ont été amenés à réaliser différentes tâches de production de parole, dont la production isolée et brève des phonèmes /a, i, u/ (5 productions). Ces productions de parole ont toutes été enregistrées en une seule passation pour chaque sujet, à l'aide d'un enregistreur portatif ZOOM H5. Tous les participants atteints de la MP ont été enregistrés dans une pièce calme au sein de l'hôpital où ils étaient suivis, à l'occasion de visites de contrôle. Tous les participants ayant été enregistrés dans la même pièce, la même disposition du matériel de présentation et d'enregistrement a été instaurée. Les participants du groupe témoin ont quant à eux été enregistrés à leur domicile. Les sons de parole recueillis sont le résultat de demandes de production à partir de versions écrites des productions à réaliser présentées sur un écran d'ordinateur portable placé face aux participants, le support informatique nous permettant de proposer des instructions identiques à chacun des participants ainsi que d'ajuster la taille de l'écriture aux besoins des participants.

2.2 Analyses acoustiques

Les échantillons de parole recueillis auprès de chaque participant ont été analysés à l'aide du logiciel PRAAT. Les valeurs formantiques F1 et F2 ont été récoltées manuellement au moyen du tracking formantique et de l'examen spectrographique fournis par le logiciel. Ces valeurs ont été extraites au centre de la production. Afin d'apprécier l'étendue de l'espace vocalique et de suggérer des hypothèses quant à la possible configuration du tractus vocal, nous avons considéré chaque couple de mesures F1, F2 comme un objet dans le plan F1/F2. Ces valeurs nous ont permis de calculer différentes métriques témoignant de l'exploitation du champ vocalique : l'aire du triangle vocalique (tVSA), l'indice d'articulation des voyelles (VAI) (Roy, Nissen, Dromey, & Sapir, 2009) ainsi que l'indice d'organisation du système vocalique (Phi) et les deux métriques le composant, le CMinter et le CMintra (Huet & Harmegnies, 2000). Ces métriques nous semblent complémentaires grâce aux informations qu'elles délivrent (étendue vocalique, centralisation, variabilité intra- et inter-catégories vocaliques). Nous avons ainsi opté pour une diversification des indices afin d'apprécier l'étendue de l'espace vocalique tout en prenant en compte le possible manque de sensibilité évoqué par Neel (2008) ainsi que par Skodda, Visser, et Schlegel (2011) en ce qui concerne l'exploitation de l'aire du triangle vocalique auprès de locuteurs faiblement atteints sur le plan articulatoire. En effet, le VAI a notamment été développé afin de compléter les recherches sur l'altération des voyelles, en particulier dans la MP où le calcul de la métrique VSA peut être insensible aux formes légères à modérées de dysarthrie. Skodda et al. (2011) ont ainsi montré son potentiel informatif, jugé supérieur à celui du VSA, dans la détection de changements subtils lors de la production de voyelles. Enfin, la multiplicité de ces métriques pourrait nous permettre de mieux cerner les variations dans l'exploitation du système vocalique : diminution de l'espace acoustique, instabilité articulatoire suggérée par une variabilité intra-catégorielle importante, diminution des contrastes vocaliques découlant d'une centralisation des cibles et/ou d'une distance inter-catégorielle moindre.

3 Résultats

3.1 Espace vocalique

Nous avons tout d'abord questionné l'exploitation du champ vocalique des sujets en condition de production des trois voyelles brèves /a, i, u/ en calculant la surface des triangles vocaliques, sujet par sujet. Les valeurs de surface apparaissent comme significativement ($^1U = 1400$; $p = 0.027$) plus importantes dans le groupe témoin ($m = 363679 \text{ Hz}^2$) que dans le groupe MP ($m = 306501 \text{ Hz}^2$). Ceci traduit donc une réduction de l'exploitation de l'espace vocalique chez les locuteurs atteints de la MP, suggérant une possible réduction de l'espace articulatoire.

Afin d'apprécier plus finement les variations apparaissant dans l'espace vocalique et de tester les hypothèses énoncées, la métrique de centralisation VAI a été calculée pour chacune des 5 productions. Ces calculs nous ont ensuite permis d'obtenir un indice VAI moyen par sujet. Pour rappel, la métrique VAI permet de mettre en évidence un phénomène de centralisation. Plus la valeur

¹ U de Mann-Whitney

obtenue est petite, plus la centralisation des voyelles est importante. Les valeurs obtenues témoignent d'une centralisation significativement plus marquée chez les locuteurs atteints de la MP ($U = 1519$, $p = 0.001$). Ceci suggère donc une possible réduction des contrastes vocaliques suite à une centralisation plus marquée des productions en ce qui concerne les locuteurs atteints de la MP.

Pour donner suite aux constats et aux hypothèses découlant des valeurs des métriques précédentes, nous avons exploité la métrique Phi ainsi que les deux métriques permettant son calcul, le CMintra et le CMinter. Pour rappel, l'indice Phi permet d'étudier le degré d'organisation du système vocalique à partir du rapport entre la dispersion inter-catégories vocaliques et la dispersion intra-catégorielle. Plus la valeur de l'indice Phi est élevée, plus le système vocalique apparaît comme organisé (Huet & Harmegnies, 2000). L'indice Phi a été calculé pour chaque locuteur de nos deux groupes. Nous avons ensuite effectué la moyenne dans chaque groupe de locuteurs afin de les comparer. Les locuteurs du groupe MP se caractérisent, en moyenne, par un indice Phi significativement plus faible ($m = 150$) que les locuteurs du groupe témoin ($m = 1477$) ($U = 1960$, $p < 0.001$). La figure 1 illustre parfaitement ces différences de moyenne entre les deux groupes.

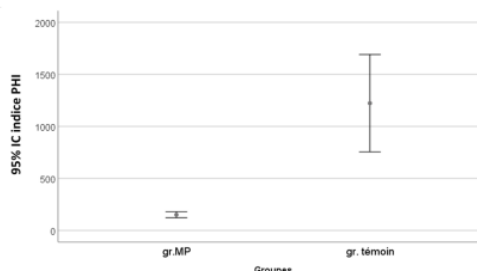


Figure 1 : valeurs moyennes et intervalle de confiance (à 95%) de l'indice Phi en fonction du groupe de sujets (intervalle de confiance à 95%)

De même, la dispersion intra-catégorielle (CMintra) est beaucoup plus importante chez les locuteurs atteints de la MP ($U = 278$, $p < 0.001$) que chez les locuteurs du groupe témoin (respectivement, CMintra $m = 31125$ et CMintra $m = 8751$). Cela laisse apparaître une instabilité acoustique pour une même catégorie vocalique, suggérant une certaine instabilité articulaire.

3.2 Regards cliniques

Cinq productions ont été produites par les participants. Afin d'apprécier plus finement les variations apparaissant dans l'espace vocalique, nous avons observé séparément chacune de ces productions au regard des indices précédemment décrits. En étudiant séparément les valeurs des aires des triangles vocaliques, nous avons ainsi constaté que, contrairement aux autres productions, la première production des phonèmes /a, i, u/ présente des caractéristiques similaires dans les deux groupes. Ainsi, la surface des triangles vocaliques calculée pour les premières productions de chaque sujet ne permet pas de mettre en évidence des différences significatives entre les deux groupes. Nous remarquons également une variabilité plus marquée dans le groupe MP lors de cette première production. Les quatre autres répétitions sont quant à elles significativement différentes entre les

deux groupes (respectivement, $U = 1391$, $p = 0.032$; $U = 1368$, $p = 0.049$; $U = 1458$, $p = 0.008$; $U = 1485$, $p = 0.005$).

Le même constat est mis en évidence à partir de la métrique de centralisation VAI : les valeurs du VAI, obtenues à partir des données extraites des premières productions de chaque sujet, ne permettent pas de mettre en évidence des différences significatives entre nos deux groupes de participants, contrairement aux valeurs obtenues à partir des quatre autres répétitions où des différences significatives apparaissent entre les deux groupes (respectivement, $U = 1459$, $p = 0.008$; $U = 1526$, $p = 0.002$; $U = 1545$, $p = 0.001$; $U = 1564$, $p = 0.001$).

La première production des locuteurs atteints de la MP se différencie donc moins de celle du groupe témoin, ce qui laisse à penser qu'un effort est réalisé en début de tâche afin de maintenir une production satisfaisante, le maintien de cet effort se dégradant au fil des productions. Un effet de fatigue pourrait également apparaître à la suite du maintien des articulateurs dans des positions particulières, entraînant une imprécision plus marquée des productions au cours des répétitions, traduit par une centralisation des cibles vocaliques.

Nous pouvons également identifier qu'un de nos participants, le locuteur MP47, présente des indices de centralisation très marqués ($VAI_{moyen} = 0.60$)². Il s'agit d'une femme, âgée de 69 ans et atteinte de la MP depuis 18 ans (diagnostic à 51 ans). Cette locutrice est au stade 5 selon la classification de Hoehn et Yahr (1967). C'est également la participante la plus sévèrement atteinte sur le plan de la dysarthrie hypokinétique si nous nous basons sur les scores obtenus à l'item « parole » de l'UPDRS III. Ceci pourrait suggérer un accroissement de la centralisation au cours de l'évolution de la MP.

Enfin, l'utilisation de la métrique PHI met en exergue des résultats attestant des différences d'organisation du système vocalique en fonction du groupe de sujets considérés, les locuteurs atteints de la MP présentant un degré d'organisation beaucoup plus faible que les sujets du groupe témoin. A titre illustratif, la figure 2 présente la dispersion dans l'espace acoustique des productions (5 répétitions /i, a, u/) du participant MP se caractérisant par la valeur d'indice Phi la plus basse ($\Phi = 43$) et du participant du groupe témoin se caractérisant par une valeur d'indice Phi la plus haute ($\Phi = 5689$).

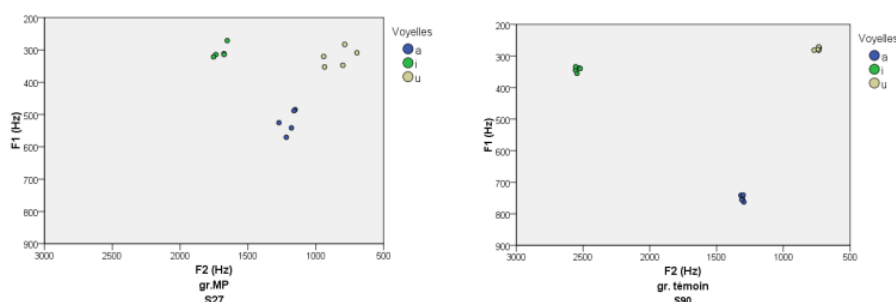


Figure 2 : Exploitation de l'espace acoustique (5 productions /i, a, u/) par un locuteur du gr. MP (à gauche) et par un locuteur du gr. témoin (à droite)

² Nous avons mené les mêmes analyses statistiques en neutralisant les données de ce locuteur afin de vérifier les différences entre nos deux groupes de participants. Les différences observées entre les locuteurs atteints de la MP et les locuteurs témoins demeurent significatives.

La figure 2 met en évidence une forte centralisation formantique chez le locuteur atteint de la MP, entraînant une différenciation inter-catégorielle plus faible que chez le locuteur du groupe témoin (CMinter $m = 3017007$). Les valeurs inter-catégorielles sont en effet plus importantes au sein du groupe témoin (CMinter $m = 3716301$; $U = 1511$, $p = 0.001$), témoignant d'une meilleure exploitation de l'espace vocalique.

3.3 Identification de phénomènes infracliniques

Lors d'une précédente étude (Roland *et al.*, 2016), nous avons mis au jour des phénomènes de nature infraclinique, les constats se faisant à partir de productions de parole recueillies auprès de locuteurs ne présentant que peu ou pas d'atteinte articulaire. Ce faisant, nous avons souhaité interroger le caractère potentiellement informatif des productions recueillies dans cette deuxième étude auprès de nos participants ne présentant pas de troubles dysarthriques (pour rappel, $N = 20$). Pour ce faire, nous avons comparé leurs productions de voyelles en situation isolée et stable avec celles de notre groupe témoin.

Un bref examen descriptif permet à nouveau de constater une centralisation plus marquée chez les locuteurs atteints de la MP (Fig. 3), en particulier lors de la production du phonème /a/, suggérant une moins grande aperture.

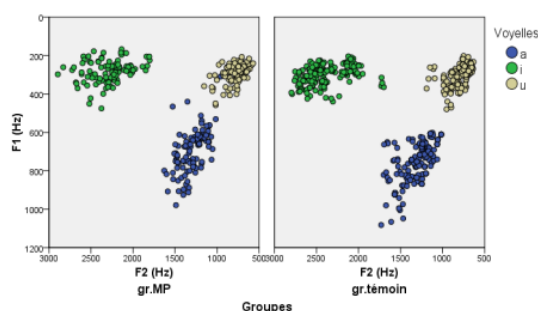


Figure 3 : dispersion des voyelles en isolation dans le plan F1/F2 (Hz) pour le groupe MP non dysarthrique (gauche) et témoin (droite).

Le calcul des différentes métriques à l'étude nous permet d'identifier des différences significatives dans le degré d'organisation du système vocalique - indice Phi ($U = 639$, $p < 0.001$), en particulier en ce qui concerne la dispersion intra-catégorielle (CMintra) ($U = 86$, $p < 0.001$).

Nous pouvons ainsi remarquer que le système vocalique apparaît comme moins bien organisé chez les locuteurs atteints de la MP, la distance intra-catégorielle étant plus importante dans ce groupe. Nous constatons également que cette distance intra-catégorielle est plus variable chez les participants atteints de la MP ne présentant pas de dysarthrie que chez les locuteurs du groupe témoin. Les autres métriques ne mettent pas en évidence de différences significatives entre nos deux groupes de locuteurs, ce qui nous amène à considérer que le calcul de l'indice Phi permet de détecter des changements subtils lors de la production de voyelles par des locuteurs qui ne sont pas considérés comme atteints sur le plan articulaire (Fig. 4).

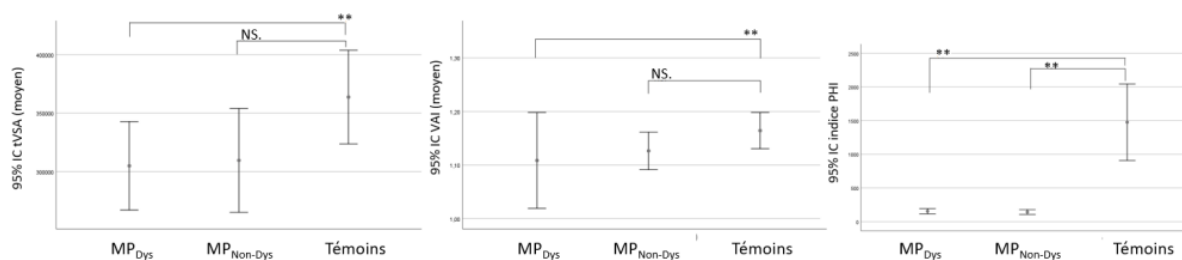


Figure 4 : valeurs moyennes et intervalle de confiance (à 95%) des métriques tVSA, VAI et Phi en fonction des groupes MP (dysarthriques et non-dysarthriques) et témoin.

4 Discussion

Cette étude a été motivée par les constats résultant d'une précédente étude menée auprès de participants atteints de la MP et faiblement atteints sur le plan articulatoire (absence de dysarthrie hypokinétique). En ce qui concerne l'étendue vocalique, nous avons voulu tester l'hypothèse selon laquelle une réduction de l'espace vocalique apparaît chez les locuteurs atteints de la MP comparativement à des locuteurs sains tel qu'évoqué par de nombreux auteurs (par exemple, Mollaei, Shiller, Baum, & Gracco, 2016 ; Skodda et *al.*, 2011). L'étude de l'exploitation de l'espace vocalique suggère une réduction de celui-ci chez les locuteurs atteints de la MP, l'étendue des surfaces exploitées par ces derniers étant statistiquement plus faible que celle des locuteurs témoin. Profitant du nombre de productions par locuteur, nous avons constaté que les différences se font jour à partir des comparaisons de la deuxième à la cinquième répétition des monophthongues. Cela nous a amenés à constater que, même si en moyenne l'étendue vocalique est réduite chez les locuteurs atteints de la MP, elle l'est particulièrement en cours de répétition, ce qui nous amène à nous questionner sur les raisons de ces différences entre la première production et celles qui suivent. Nous évoquions précédemment un possible effort pour maintenir une production satisfaisante, avec une dégradation de ce maintien au cours des répétitions. Cela pourrait être rapproché des stratégies d'hyper-articulation évoquées par Lindblom (1990), stratégies devant permettre la production d'une parole claire et précise. En effet, Lam et Tjaden (2016) évoquent à ce sujet un ajustement acoustique constant en fonction de la situation de communication. Etant donné la situation d'enregistrement réalisée dans le cadre de cette étude, les participants ont pu tenter d'ajuster leurs productions afin de les rendre les plus précises possibles. Dès lors, les différences apparaissant entre les autres répétitions pourraient traduire une difficulté à maintenir sur un terme plus long les articulateurs dans des positions bien précises, entraînant ainsi une imprécision et une réduction de l'espace articulatoire. Cela correspondrait également à une situation de retour à l'état initial de leurs capacités, un phénomène d'hypoarticulation étant présent dans la dysarthrie hypokinétique. Ces hypothèses seraient toutefois à vérifier par le recours à des analyses articulatoires en complément des analyses acoustiques actuellement menées.

Afin d'affiner ces observations, nous avons étudié les caractéristiques de l'espace vocalique des locuteurs à la lumière de plusieurs métriques acoustiques, à l'instar de ce qui a été réalisé par Audibert et Fougeron (2012) à travers une comparaison inter-dysarthrique. Cette démarche, originale en ce sens que nous n'avons pas identifié d'autres études combinant plusieurs métriques acoustiques auprès d'un groupe de participants atteints de la MP présentant différents degrés de

dysarthrie hypokinétique (dont l'absence de dysarthrie hypokinétique), nous a permis d'observer les distorsions de l'espace vocalique en tenant compte de différents aspects (étendue, variabilité intra- et inter-catégorielle, centralisation). Qui plus est, certains auteurs (Neel, 2008; Skodda *et al.*, 2011) ont évoqué le manque de sensibilité de la métrique tVSA chez des locuteurs présentant la MP et faiblement atteints sur le plan articulatoire. Nous nous sommes dès lors également intéressés à l'apport de chaque métrique par rapport aux autres. Nous avons donc manipulé plusieurs métriques acoustiques nous fournissant des informations tant sur le maintien de la précision lors de productions stables (indice Phi, et plus particulièrement le CMintra) que sur un possible phénomène de centralisation des cibles vocaliques (VAI, CMinter). Il nous est apparu pertinent d'associer aux métriques fréquemment utilisées dans les recherches menées auprès de personnes atteintes de la MP, telles que les métriques tVSA ou VAI, une métrique telle que Phi puisqu'il s'agit d'un indice permettant d'étudier des phénomènes statiques – en l'occurrence des monophthongues – en tenant compte, dans son calcul, de plusieurs itérations pour un même sujet, et dès lors, de la variabilité inter- et intra-catégorielle, ce que ne nous permettent pas les autres indices. Or, nous savons que les difficultés dans la MP, et plus spécifiquement dans la production motrice de la parole dans la MP, touchent la dynamique des mouvements. Une métrique comme l'aire du triangle vocalique, très utilisée car porteuse d'informations sur l'étendue vocalique dans le plan F1/F2, nous apparaît comme présentant une limite en ce sens qu'elle permet principalement d'observer des phénomènes périphériques, extrêmes avec un positionnement statique. L'utilisation de ces métriques nous permet d'établir deux constats : les productions des locuteurs atteints de la MP sont plus dispersées d'un point de vue intra-catégoriel et elles présentent également une forte centralisation. La dispersion intra-catégorielle suggère une instabilité des productions d'une même monophthongue, suggérant une difficulté à maintenir les articulateurs dans une position précise. Cette instabilité est renforcée par une centralisation des productions, entraînant une réduction des distances inter-catégorielles. Cette centralisation pourrait suggérer une diminution des contrastes vocaliques, renforcée par l'instabilité des productions. A nouveau, cette hypothèse se doit d'être vérifiée par des analyses articulatoires complémentaires.

Disposant d'informations à caractère individuel pour les locuteurs du groupe MP, nous avons pu nous interroger sur le lien entre ces aspects et les productions recueillies. Pour rappel, dans cette étude, les dossiers des participants atteints de la MP rapportaient différents degrés de dysarthrie. Pour certains, une absence de dysarthrie était constatée par les spécialistes (neurologue et orthophoniste, tous deux spécialisés dans l'évaluation et la prise en charge de personnes atteintes par la MP). Nous nous sommes dès lors interrogés sur les potentielles différences entre les productions orales de ce groupe de locuteurs réputés non-dysarthriques atteints de la MP et celles des locuteurs du groupe témoin. Les analyses effectuées nous permettent d'identifier, à partir de la métrique Phi, des différences déjà présentes entre nos deux groupes de locuteurs, ce qui nous suggère l'identification de phénomènes de nature infraclinique. Au vu de ces distorsions, l'utilisation de l'indice Phi nous confirme que l'organisation du système vocalique est beaucoup plus altérée chez les locuteurs atteints de la MP. Ces résultats nous confortent dès lors dans l'utilisation de la métrique Phi. Nous pensons qu'il est crucial de combiner ces différents regards si nous souhaitons obtenir une vision globale et réelle de l'espace vocalique et des multiples dimensions altérées et/ou préservées suite à la dysarthrie hypokinétique. De fait, à partir de cette expérimentation, il ressort que ces multiples regards sur des phénomènes statiques permettent de mettre en lumière des informations très riches et pertinentes dans la compréhension de phénomènes

résultant de la production motrice de la parole dans la MP. Etant donné le nombre de personnes qui connaîtront au cours de leur maladie des troubles dysarthriques, identifier précocement ce symptôme dysarthrique nous semble revêtir un caractère crucial en vue d'une prise en charge précoce.

Références

- AUDIBERT, N., & FOUGERON, C. (2012). Distorsions de l'espace vocalique : quelles mesures? Application à la dysarthrie. *Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL 2012*, 1, 217-224. Grenoble.
- BRAAK, H., TREDICI, K. D., RÜB, U., DE VOS, R. A. I., JANSEN STEUR, E. N. H., & BRAAK, E. (2003). Staging of brain pathology related to sporadic Parkinson's disease. *Neurobiology of Aging*, 24(2), 197-211. [DOI 10.1016/S0197-4580\(02\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0197-4580(02)00065-9)
- HOEHN, M. M., & YAHR, M. D. (1967). Parkinsonism: onset, progression, and mortality. *Neurology*, 17(5), 427-442. [DOI 10.1212/WNL.17.5.427](https://doi.org/10.1212/WNL.17.5.427)
- HUET, K., & HARMEGNIES, B. (2000). Contribution à la quantification du degré d'organisation des systèmes vocaliques. *XXIIIèmes Journées d'Etude sur la Parole*, 1, 225-228. Aussois.
- LAM, J., & TJADEN, K. (2016). Clear Speech Variants: An Acoustic Study in Parkinson's Disease. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 59(4), 631-646. [DOI 10.1044/2015_JSLHR-S-15-0216](https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-S-15-0216)
- LINDBLOM, B. (1990). Explaining Phonetic Variation: A Sketch of the H&H Theory. In W. J. Hardcastle & A. Marchal (Ed.), *Speech Production and Speech Modeling* (p. 403-439). [DOI 10.1007/978-94-009-2037-8_16](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2037-8_16)
- MOLLAEI, F., SHILLER, D. M., BAUM, S. R., & GRACCO, V. L. (2016). Sensorimotor control of vocal pitch and formant frequencies in Parkinson's disease. *Brain Research*, 1646, 269-277. [DOI 10.1016/j.brainres.2016.06.013](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2016.06.013)
- NEEL, A. T. (2008). Vowel Space Characteristics and Vowel Identification Accuracy. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(3), 574-585. [DOI 10.1044/1092-4388\(2008/041\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/041))
- ROLAND, V., DELVAUX, V., HUET, K., PICCALUGA, M., HAELEWYCK, M. C., & HARMEGNIES, B. (2016). Dynamique phonétique et contrôle moteur dans la maladie de Parkinson : analyse du contrôle de la production des glides. *Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL 2016*, 1, 211-219. Paris.
- ROY, N., NISSEN, S. L., DROMEY, C., & SAPIR, S. (2009). Articulatory changes in muscle tension dysphonia: Evidence of vowel space expansion following manual circumlaryngeal therapy. *Journal of Communication Disorders*, 42(2), 124-135. [DOI 10.1016/j.jcomdis.2008.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2008.10.001)
- SAPIR, S. (2014). Multiple Factors Are Involved in the Dysarthria Associated With Parkinson's Disease: A Review With Implications for Clinical Practice and Research. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 57(4), 1330-1343. [DOI 10.1044/2014_JSLHR-S-13-0039](https://doi.org/10.1044/2014_JSLHR-S-13-0039)
- SKODDA, S., VISSER, W., & SCHLEGEL, U. (2011). Vowel Articulation in Parkinson's Disease. *Journal of Voice*, 25(4), 467-472. [DOI 10.1016/j.jvoice.2010.01.009](https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2010.01.009)