

Dynamique phonétique et contrôle moteur dans la maladie de Parkinson: analyse du contrôle de la production des glides

Virginie Roland^{1,2}, Véronique Delvaux^{1,3}, Kathy Huet¹, Myriam Piccaluga¹, Marie-Claire Haelewyck², Bernard Harmegnies¹

(1) Institut de Recherche en Sciences et Technologies du Langage, Service de Métrologie et Sciences du Langage, Université de Mons, Belgique

(2) Service d'Orthopédagogie Clinique, Université de Mons, Belgique

(3) Fonds National de la Recherche Scientifique, Belgique

Virginie.roland@umons.ac.be

RESUME

Nous nous interrogeons quant à la possibilité d'identifier les difficultés de contrôle du mouvement chez les personnes atteintes de la maladie de Parkinson (MP) à partir de l'étude de leurs comportements dans la production de sons de parole nécessitant des mouvements continus des articulateurs supralaryngés (logatomes VCV, où C est un glide). Notre hypothèse est que les parkinsoniens présentent des modifications dans leur dynamique de mouvement par rapport à des personnes sans pathologie lors de la production. A cette fin, sont étudiés des sons de parole recueillis hors contexte communicationnel auprès de neuf personnes porteuses de la MP et de dix sujets sains. Les analyses révèlent des différences entre les deux groupes, notamment en ce qui concerne l'espace articuloire, l'amplitude des mouvements et leur localisation dans le plan F_1 - F_2 . On note par ailleurs qu'un point-cible est préservé lors de l'émission de logatomes : le centre du glide.

ABSTRACT

Speech dynamics and motion control in people with Parkinson's disease: analysis of glides' production

We wonder about the possibility of identifying motion control disorders in people with Parkinson's disease (PD) from the study of their behavior in the production of speech sounds requiring continuous movements of the supralaryngeal articulators (logatomes VCV, where C is a glide). Our hypothesis is that Parkinsonians differ in their movement dynamic relative to people without pathology during speech production. To this end, speech sounds were collected from nine people carrying the PD and ten healthy subjects. The analyzes reveal differences between the two groups, in particular as regards the articulatory space, range of motion and location in the F_1 - F_2 plane. We also note that a target point is preserved during production of logatomes: the center point of the glide.

MOTS-CLES : dynamique de parole, maladie de Parkinson, glide, analyse acoustique

KEYWORDS: speech dynamics, Parkinson's disease, glide, acoustic study

1 Introduction

La maladie de Parkinson (désormais MP) est une pathologie neurodégénérative se traduisant par une perte progressive de neurones de la voie nigro-striée, entraînant un déficit fonctionnel du striatum et, de ce fait, une perte progressive en dopamine striatale. Cette dégénérescence induit d'importantes difficultés dans le contrôle des mouvements, pouvant prendre diverses formes, d'où la notion de « triade parkinsonienne », englobant tremblements de repos (symptôme initial dans 70% des cas), akinésie et rigidité (avec association de troubles posturaux et de la marche). D'autres symptômes peuvent également être associés à la maladie, notamment des signes axiaux. Bien que d'apparition souvent tardive, ces derniers peuvent s'avérer in fine envahissants. La dysarthrie en est part intégrante. L'étiologie neuro-dégénérative de la maladie conduit à une grande variété de troubles de la parole généralement regroupés sous l'étiquette de « dysarthrie hypokinétique ». Celle-ci, telle que définie par Darley *et al.* (1975) se manifeste dans tous les aspects de la production de la parole, avec des répercussions sur les processus respiratoires, phonatoires et articulatoires, tant au niveau segmental que suprasegmental. Des études classiques à base perceptuelle (Darley *et al.*, 1975 ; Logemann *et al.*, 1978) ainsi que des études acoustiques au cours des vingt dernières années (Gamboa *et al.*, 1997 ; Cheang & Pell, 2007) ont montré à maintes reprises que les locuteurs atteints de la MP présentent des troubles de la qualité de la voix (voix rauque et soufflée, etc.), une variation de l'émission limitée en intensité et en fréquence fondamentale (monotonie de hauteur et d'intensité), une variabilité du débit de parole non contrôlée, comprenant notamment des pauses plus longues, inappropriées, et des répétitions de mots et/ou de syllabes. Sur le plan articulatoire, la production imprécise de consonne est l'un des éléments les plus souvent signalés (Ackermann & Ziegler, 1991 ; Wong *et al.*, 2011). Ce sont notamment les consonnes occlusives, fricatives et affriquées qui présentent le plus de distorsions, probablement en raison de la réduction de l'amplitude et de la force du mouvement articulatoire. Ackermann *et coll.* (Ackermann & Ziegler, 1991 ; Ackermann *et al.*, 1995) ont d'ailleurs émis l'hypothèse que les personnes atteintes de la MP réduisent l'amplitude de leurs mouvements articulatoires afin de préserver le tempo de parole, ce qui conduit à un phénomène d'hypoarticulation. Cependant, des études physiologiques ne corroborent que partiellement ces constats, en ce qui concerne l'amplitude et la vitesse de mouvement de la mâchoire, de la langue et des lèvres (ainsi que de l'activité musculaire associée) dans la production de la parole parkinsonienne (Walsh & Smith, 2012).

Beaucoup des études interrogeant les répercussions vocales de la maladie de Parkinson procèdent par analyse de segments de parole. Il s'agit tantôt de voyelles (Bang, Min, Sohn, & Cho, 2013 ; Hertrich, Lutzenberger, Spieker & Ackermann, 1997), tantôt de consonnes (Cf. supra). Dans diverses recherches, les corpus sont constitués de sons de parole connectés, ce qui permet l'étude de la coarticulation (Tjaden, 2000 ; Tjaden & Sussman, 2006). Plus récemment, une attention soutenue a été réservée aux tendances prosodiques de la parole signifiante (Duez, Jankowski, Purson, & Viallet, 2012 ; Ghio, Robert, Grigoli, Mas, Delooze, Mercier, & Viallet, 2014). Si maintes études se sont ainsi basées, à l'origine, sur des productions assez statiques, force est de reconnaître que la dynamique de production de la parole a plus récemment fait l'objet d'une attention renforcée.

Nonobstant, c'est la plupart du temps avec une focalisation soit sur la variabilité intrinsèque du signal laryngé soit sur des variations inter-segmentales qu'est approchée la dynamique du signal acoustique. Comme le remarquent Goberman et Coelho (2002), peu de recherches se sont concentrées sur la dynamique intra-segmentale du timbre imputable au contrôle des résonateurs supra-glottiques, dont l'étude est pourtant parfaitement adaptée à la MP. Moins de travaux encore se sont centrés sur les caractéristiques des segments susceptibles de porter *en eux-mêmes* la trace d'une attente normative

de variabilité du timbre ; or, ceux-ci requièrent, de la part du locuteur, la réalisation de mouvements articulatoires intra-segmentaux très rapides et étroitement contrôlés.

En français, les phonèmes /w/, /ɥ/ et /j/ sont porteurs d'attentes de ce type¹. Ces sons de parole se caractérisent en effet par l'évolution continue de leur timbre au cours de leur production : de qualité acoustique proche, en son début et à son terme, de celle des sons du contexte immédiat, le glide approche, en sa partie médiane, la qualité d'une voyelle du système (/u/ pour /w/, /y/ pour /ɥ/ et /i/ pour /j/).

Comme l'ont précédemment suggéré Harmegnies *et coll.*, les caractéristiques acoustiques des réalisations de ces phonèmes peuvent donc faire figure de matériau de choix pour l'étude du contrôle du mouvement dans la dysarthrie parkinsonienne (Couvreur *et al.*, 1999). C'est cette idée que nous tenterons de mettre à l'épreuve dans cette communication à caractère exploratoire et méthodologique, en testant l'hypothèse que les personnes atteintes de la MP présentent des modifications dans leur dynamique de production des glides par rapport aux sujets exempts de pathologie.

2 Méthodologie

2.1 Locuteurs

Deux groupes de sujets ont été constitués. Le premier se compose de 9 personnes atteintes de la MP. Ces sujets (6 hommes et 3 femmes), tous locuteurs natifs du français de Belgique (Brabant wallon), sont âgés de 52 à 77 ans (âge moyen de 65 ans). Ils présentent une durée moyenne de maladie de 9 ans ; ils occupent globalement une position médiane dans la classification de Hoehn et Yahr (1967) et vivent de manière autonome. Tous sont sous traitement médicamenteux et tous les enregistrements ont été effectués sous médication. Une personne a eu recours à la chirurgie de stimulation cérébrale profonde 5 ans avant le recueil de données ; seule cette personne suit également un traitement logopédique. Les sujets se sont vu appliquer le Voice handicap Index (1997). Leurs résultats vont d'un handicap global léger (HP – GF – YMS) à sévère (PJ – PR – LC – BD). Deux personnes attestent quant à elles d'un handicap vocal modéré (JC – JG). Trois sujets (HP, GF et YMS) ne présentent pas de handicap vocal en ce qui concerne le domaine physique. Aucun sujet ne fait état de quelque plainte que ce soit au niveau articulatoire. Le deuxième groupe est constitué d'un échantillon occasionnel équilibré en genre de 10 sujets contrôles, exempts de toute pathologie.

2.2 Corpus

Les sons de parole recueillis auprès des sujets sont le résultat de productions sollicitées dans un contexte non-communicationnel, à partir de versions écrites des productions à réaliser, apparaissant en transcription orthographique française sur un écran d'ordinateur portable placé face aux participants ; chaque injonction visuelle était accompagnée d'un exemple sonore préenregistré afin que chacun soit soumis à la même version. Chaque locuteur a été prié de réaliser, d'abord, en voyelle tenue, une production stable en isolation de chacune des 3 voyelles orales périphériques de l'espace vocalique (/a/, /i/, /u/) et ensuite des logatomes de structure V_1CV_2 (où C est l'un des glides: /aja/,

¹ Nous centrant sur les caractéristiques acoustiques de leurs réalisations, nous éviterons, à leur propos, les dénominations telles que « semi-voyelle » ou « semi-consonne », afin de contourner tout risque de controverse et retiendrons l'appellation anglophone « glide », qui est bien en ligne avec leurs spécificités phonétiques.

/aju/, /uju/, /awi/ et /awa/). Le recours aux phrases porteuses a été écarté en vue d'éviter le biais d'hypoarticulation susceptible de survenir dans la MP lorsque le sujet est amené à réaliser des productions longues (Cf. Sauvageau, Roy, Cantin, Prud'Homme, Langlois, & Macoir, 2015). Par ailleurs, le phonème /ɥ/ a été exclu, vu sa propension à être confondu avec /w/ dans le régiolecte investigué.

2.3 Analyses acoustiques

Les valeurs des premier et deuxième formants ont été évaluées pour toutes les productions recueillies dans chacun des deux groupes. Pour les voyelles tenues, les mesures ont été effectuées en milieu de tenue. Pour les logatomes, elles ont été pratiquées à l'entame de la réalisation (début de V_1), au point d'inflexion des trajectoires formantiques (au cours de C) et en fin de production (fin de V_2), soit, respectivement, aux points D, I et A sur la partie droite de la figure 1. Les valeurs recueillies, dans un premier temps, au moyen du logiciel de tracking formantique de PRAAT ont été vérifiées et le cas échéant corrigées par recours à l'examen spectrographique. Dans un deuxième temps, toutes les mesures ainsi obtenues ont été vérifiées par un phonéticien chevronné non impliqué dans la campagne de mesure initiale et chaque désaccord a fait l'objet d'une discussion sur la base d'un retour en commun sur les enregistrements analysés.

2.4 Production de données topologiques pour l'étude du contrôle moteur

En perspective du traitement, qui a pour objectif principal d'étudier le contrôle moteur des locuteurs, nous avons opté pour un regard topologique. Chaque timbre de production recueillie a été considéré comme un objet dans le plan F_1/F_2 (Cf. Fig. 1). S'agissant des voyelles tenues, chacune correspond à un point. Pour les logatomes, chacun correspond à un trajet, caractérisable par trois points remarquables : le lieu correspondant à l'entame de la réalisation (début de V_1 : « départ »), celui correspondant à son terme (fin de V_2 : « arrivée ») et enfin celui correspondant à l'inflexion des traces formantiques sur le tracé spectrographique (C : « inflexion »).

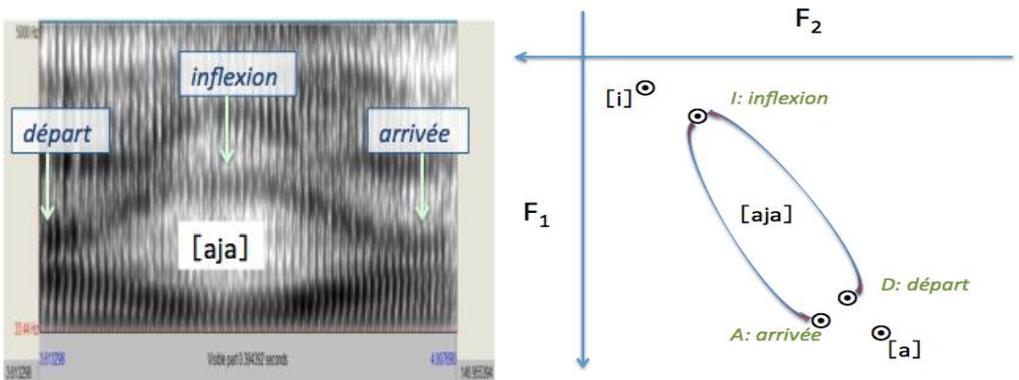


FIGURE 1 : Représentation schématique de la réalisation d'un logatome de type /aja/ : visées spectrographique, à gauche et topologique, à droite (les tracés curvilinéaires représentent la variation constante du timbre durant la production de /aja/, de D à A en passant par I ; les points isolés (« [a] » et « [i] ») représentent les timbres des voyelles tenues produites en isolation

Les données disponibles ont permis le calcul de diverses distances euclidiennes dans le plan F_1/F_2 . Nous nous centrerons ici sur deux de leurs types : 1° des distances informant sur l'ampleur de la modification du timbre au sein du logatome (distance « aller » de D à I et distance « retour » de I à A) et, 2°, des distances informant sur la localisation du logatome dans le plan F_1/F_2 par rapport aux voyelles tenues (p.ex. distances Départ-[a], Arrivée-[a] et Inflexion-[i]). Dans le premier cas, les observations sont susceptibles de fournir des informations sur l'amplitude des mouvements articulatoires développés pour la production du glide. Dans le second, les distances permettent d'apprécier l'éventuel déplacement des points D, I et A par rapport aux voyelles tenues correspondantes, et ainsi, de spéculer sur d'éventuelles stratégies articulatoires de production des glides qui différencieraient de celles caractérisant la production de monophongues similaires.

3 Résultats

Dans cette section, nous procédons systématiquement à la comparaison des observations opérées dans le groupe MP à celles provenant du groupe témoin. L'émergence de différences sera ici interprétée comme indiciaire d'un comportement particulier des sujets MP par rapport à la normale.

3.1 Le champ articulatoire

L'analyse des voyelles tenues permet d'apprécier l'étendue du champ articulatoire des sujets en condition de production de monophongues. Un simple examen descriptif (Cf. fig 2) suggère une variation sensible de la cohésion inter-sujet, l'espace articulatoire utilisé apparaissant beaucoup plus variable chez les parkinsoniens que chez les sujets sains.

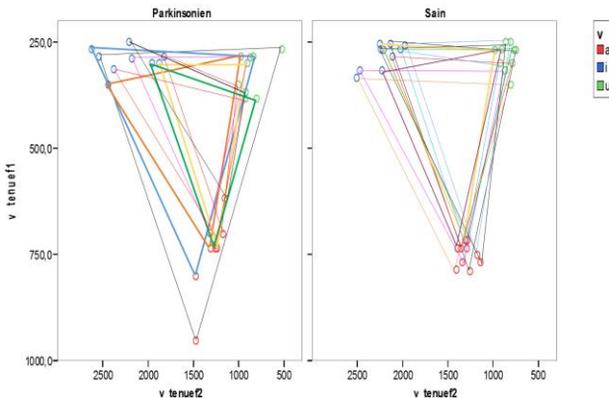


FIGURE 2 : dispersion des voyelles tenues de chaque locuteur sur le plan F_1/F_2

Le calcul de la surface des triangles vocaliques sujet par sujet (obtenu par la formule de Héron) permet de raffiner cette observation. Les valeurs de surface, résumées à la figure 3, sont légèrement plus importantes dans le groupe témoin que dans le groupe MP ; elles sont par ailleurs beaucoup plus dispersées chez les sujets parkinsoniens que chez les sujets normaux. Ceci suggère donc, de manière générale, une réduction de l'espace articulatoire chez les parkinsoniens, mais également des

conséquences de la maladie très diversifiées en termes de capacités d'exploitation de l'espace vocalique.

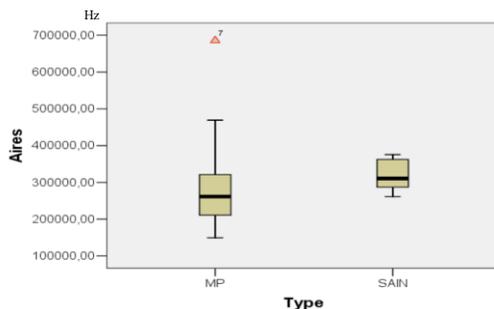


FIGURE 3 : distribution des aires des triangles vocaliques selon le groupe de sujet (moyenne, écart type et écart interquartile).

Dans la majorité des cas, les aires des triangles vocaliques sont inférieures chez les sujets atteints de la MP, mais certains sujets se caractérisent par des valeurs voisines de celles caractérisant les sujets sains (HP et GF), voire supérieure (BD).

3.2 L'amplitude du mouvement

Les comparaisons des distances euclidiennes « aller » et « retour » dans le plan F_1/F_2 mettent en évidence des différences significatives (respectivement, $F= 22.728$, $p<.001$, $dl= 1$ et $F= 14.764$, $p<.001$, $dl= 1$) entre les deux groupes de sujets. La figure 4 illustre ces différences en procédant logatome par logatome.

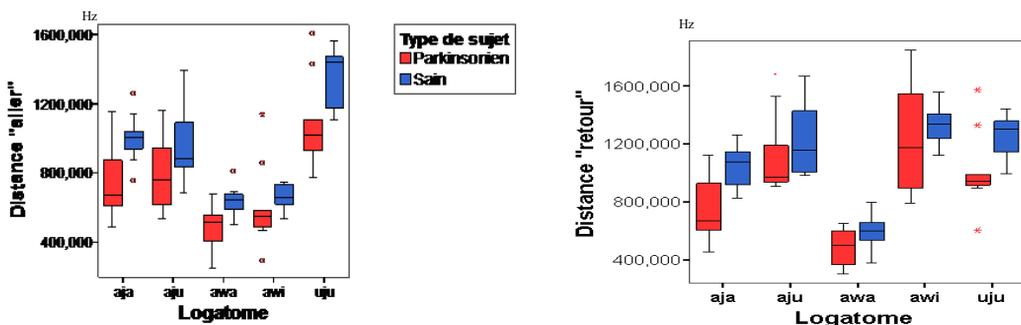


FIGURE 4 : distance « aller » (gauche) et « retour » (droite) des deux groupes de participants selon les logatomes produits

Tant pour la section « aller » que pour la section « retour », la distance est supérieure chez les sujets sains. Ceci s'observe en outre quel que soit le type de glide considéré. En ce qui concerne la distance « aller », les différences sont particulièrement marquées pour les logatomes /aja/ et /uju/. La variabilité au sein du groupe MP est supérieure à celle du groupe contrôle pour /aja/ mais est par contre relativement inférieure pour la production de /uju/. Pour la distance « retour », la variabilité

lors de la production de /awi/ est fortement marquée dans le groupe MP et particulièrement supérieure à celle du groupe contrôle tandis que la variabilité concernant /uju/ est fortement réduite par rapport au groupe contrôle.

3.3 La localisation du glide dans le plan F_1/F_2

Nous avons dans un premier temps questionné la proximité, dans le plan F_1/F_2 , des sections initiales et finales des logatomes par rapport aux monophthongues correspondantes (calcul des distances à la référence entre le Départ et V_1 et entre l'Arrivée et V_2 , cf 2.4. ci-dessus).

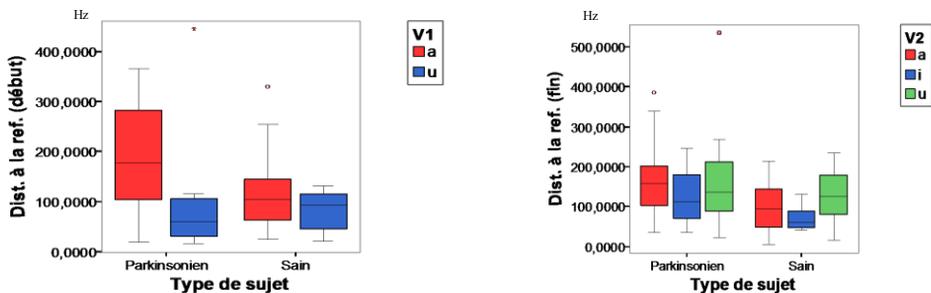


FIGURE 5 : variabilité pour la distance à la référence: D- V_1 (gauche) et A- V_2 (droite)

Cette analyse montre que l'éloignement du point correspondant à la monophthongue est significativement plus grand, tant pour V_1 que pour V_2 , dans les logatomes du groupe parkinsonien (respectivement $F= 13.964$, $p<.001$, $dl= 1$ et $F= 8.919$, $p= .004$, $dl= 1$). Ceci pourrait s'interpréter comme relevant d'une stratégie de facilitation par laquelle le sujet parkinsonien produit, au début comme à la fin du logatome, des timbres plus influencés par la cible articuloire du glide que par la voyelle initiale ou finale du logatome, ce qui permet d'exécuter un mouvement de moindre ampleur que ce n'est le cas chez le locuteur sain.

Cette interprétation appelle cependant une autre question : celle de la résistance du timbre-cible du glide. La réponse est apportée par l'étude de la distance entre la section centrale du glide (au point d'inflexion I) et la cible acoustique de ce dernier, ici matérialisée par la voyelle tenue correspondante (/i/ pour /j/ et /u/ pour /w/). L'analyse montre que dans ce cas précis, il n'y a pas de différence entre le groupe parkinsonien et le groupe de sujets sains. La maladie n'affecte donc pas le comportement du locuteur par rapport à ce qui fait l'identité du glide ; si les parties initiale et finale de ce dernier peuvent se distancier des voyelles correspondantes, il n'en est rien en ce qui concerne le centre-même du glide, qui conserve son identité de la même manière chez le parkinsonien que chez le sujet sain.

4 Conclusions

Notre recherche est partie d'un questionnement : celui de la potentielle informativité des glides pour une meilleure compréhension du contrôle des gestes articuloires chez les parkinsoniens. Notre intérêt pour ces sons de parole partait d'une réflexion à caractère hypothétique : puisque les glides se caractérisent par une évolution continue de leur timbre durant leur production et puisque cette variation acoustique continue est le résultat direct de la variabilité de la géométrie des cavités

résonnantes supra-glottiques, l'analyse de la dynamique acoustique doit très directement renseigner sur les mouvements des articulateurs. Or, comme la MP a pour conséquences des altérations importantes du contrôle des mouvements, il peut paraître sensé d'étudier par ce truchement indirect le contrôle moteur chez les locuteurs porteurs de cette pathologie. Nous avons ainsi observé des parkinsoniens tant en situation de production de monophthongues qu'en situation de production de logatomes de structure VCV. Nous avons comparé leurs comportements phonétiques à ceux de locuteurs sains.

Nous avons observé d'une part une tendance globale à la réduction du champ articulatoire vocalique chez les sujets pathologiques, mais aussi, d'autre part, une variabilité accrue de ce dernier en fonction des individus MP. Nous avons, par ailleurs, constaté, sur base de la comparaison des variations de timbre, que les mouvements articulatoires réalisés lors la production des glides sont de moins grande amplitude pour les sujets atteints de la maladie de Parkinson que pour les sujets sains : les sections initiales et finales des logatomes ressemblent moins, dans le groupe Parkinsonien, aux voyelles du système que ce n'est le cas pour les sujets sains. Nous avons par contre observé que la similarité entre la zone médiane du glide et la voyelle cible correspondante ne varie guère en fonction du groupe. Il apparaît donc que si le parkinsonien déploie une stratégie hypoarticulatoire, il le fait en préservant plus le centre du glide que ses extrémités (ce qui, notons-le au passage, n'est pas dépourvu d'intérêt du point de vue de la recherche fondamentale en phonétique).

Il importe de noter que ces observations statistiquement significatives se sont fait jour au départ de productions émises par des sujets assez faiblement atteints sur le plan de l'articulation et qui ne forment en tout cas guère de plainte à ce sujet; les experts exposés à ces enregistrements n'ont par ailleurs pas détecté de particularité à l'écoute des logatomes produits. Notre analyse se montre donc apte à révéler des phénomènes de nature infra-clinique ; elle permet, par ailleurs d'en offrir une évaluation quantitative, ce qui pourrait être intéressant en perspective du développement d'outils de dépistage précoce, voire de techniques d'accompagnement de la rééducation orthophonique.

Des collectes d'information à plus large échelle doivent maintenant être menées afin de confirmer les éléments mis au jour et surtout de les raffiner en tenant compte plus étroitement des caractéristiques médicales des patients et de l'évaluation des relations entre traitement de la parole et qualité de vie, thématique centrale du projet dans le cadre duquel s'inscrit la présente étude. La prochaine collecte aura également pour but d'accroître le nombre de productions par sujet et de rendre la liste des logatomes exhaustive, et ce par l'ajout des logatomes /iwi/ ; /uja/ ; /iwa/. Par ailleurs, la mise au point d'indices de la dynamique plus précis nécessitera sans aucun doute des développements mathématiques additionnels.

Même si déjà de nombreuses contributions ont été publiées dans le domaine des répercussions vocales de la maladie de Parkinson, la poursuite de travaux du type de ceux présentés ici nous paraît judicieuse pour plusieurs raisons : d'une part l'originalité de l'approche acoustico-articulatoire que nous tentons de développer, d'autre part, le caractère encore passablement obscur de certains des aspects de la maladie, et en particulier de son étiologie ainsi que de ses manifestations précoces, enfin, l'enjeu de santé publique constitué par une maladie neuro-dégénérative qui est la deuxième en importance, du point de vue épidémiologique, après la démence d'Alzheimer. Qui plus est, la plupart des études aujourd'hui publiées concernent, de facto, des locuteurs anglophones : pour environ 350 articles recensés sur Medline/PubMed et sur Scopus, seule une trentaine concerne des locuteurs francophones, soit à peine 10% des recherches référencées. La communauté parole de Francophonie a ici un défi à relever.

Références

- ACKERMANN, H., HERTRICH, I., & HEHR, T. (1995). Oral diadochokinesis in neurological dysarthrias. *Folia Phoniatr Logo*, 47, 15–23.
- ACKERMANN, H., & ZIEGLER, W. (1991). Articulatory deficits in Parkinsonian dysarthria: An acoustic analysis. *J. Neurol Neurosur Ps*, 54, 1093–1098.
- BANG, YI., MIN, K., SOHN, YH., & CHO, SR. (2013). Acoustic characteristics of vowel sounds in patients with Parkinson disease. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 649-54.
- CHEANG, H.S., & PELL, M.D. (2007). An acoustic investigation of Parkinsonian speech in linguistic and emotional contexts. *J Neurolinguist*, 20, 221–241.
- COUVREUR, N., BRUYNINCKX, M., & HARMEGNIES, B. (1999). Effects of parkinsonian symptoms on voiced palatals. *Proceedings of 14th International Congress of Phonetic Sciences, I*, 831-834.
- DARLEY, F.L., ARONSON, A.E., & BROWN, J.R. (1975). *Motor Speech Disorders*, Philadelphia: W.B. Saunders Company.
- DUEZ, D., JANKOWSKI, L., PURSON, A., & VIALLET, F. (2012). Some prosodic characteristics of parkinsonian French speech: Effects of bilateral stimulation of the subthalamic nucleus. *Journal of Neurolinguistics*, 25, 104–120
- GAMBOA, J., JIMENEZ- JIMENEZ, F.J., NIETO, A., MONTOJO, A., ORTI-PAREJA, M., MOLINA, J.A., *et al.* (1997). Acoustic voice analysis in patients with Parkinson's disease treated with dopaminergic drugs. *J Voice*, 11, 314–320.
- GHIO, A., ROBERT, D., GRIGOLI, C., MAS, M., DELOOZE, C., MERCIER, C., & VIALLET, F. (2014). F0 characteristics in Parkinsonian speech: Contrast between the effect of hypodopaminergy due to Parkinson's disease and that of the therapeutic delivery of L-Dopa. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)*, 135(2), 63-70.
- GOBERMANN, A.M., & COELHO, C. (2002). Acoustic analysis of parkinsonian speech I: Speech characteristics and L-Dopa therapy. *NeuroRehabilitation*, 17, 237-246.
- HERTRICH, I., LUTZENBERGER, W., SPIEKER, S., & ACKERMANN, H. (1997). Fractal dimension of sustained vowel productions in neurological dysphonias: an acoustic and electroglottographic analysis. *J Acoust Soc Am*, 102(1), 652-654.
- LOGEMANN, J. A., & FISCHER, H. B., BOSHEB, B. & BLONSKY, E. R. (1978). Frequency and cooccurrence of vocal tract dysfunctions in the speech of a large sample of Parkinson patients. *J Speech Hear Disord*, 43, 47–57.
- SAUVAGEAU, M., ROY, JP., CANTIN, L., PRUD'HOMME, M., LANGLOIS, M., & MACOIR, J. (2015). Articulatory Changes in Vowel Production following STN DBS and Levodopa Intake in Parkinson's Disease. *Parkinson's Disease*, Article ID 382320.
- TJADEN, K. (2000). An acoustic study of coarticulation in dysarthric speakers with Parkinson disease. *J Speech Lang Hear Res*, 43(6), 1466-80.
- TJADEN, K. & SUSSMAN, J. (2006). Perception of coarticulatory information in normal speech and dysarthria. *J Speech Lang Hear Res*, 49(4), 888-902.
- WALSH, B., & SMITH, A. (2012). Basic parameters of articulatory movements and acoustics in individuals with Parkinson's disease. *Mov Disord*. 27, 843-850.
- WONG, M.N., MURDOCH, B.E., & WHELAN, B.-M. (2011). Lingual Kinematics in Dysarthric and Nondysarthric Speakers with Parkinson's Disease. *Parkinson's Disease*, Article ID 352838.