



HAL
open science

Analyse objective de la parole dysarthrique : évaluation d'une sélection d'indices acoustiques

Etienne Sicard

► **To cite this version:**

Etienne Sicard. Analyse objective de la parole dysarthrique : évaluation d'une sélection d'indices acoustiques. 2021. hal-03139503

HAL Id: hal-03139503

<https://hal.science/hal-03139503v1>

Preprint submitted on 12 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse objective de la parole dysarthrique : évaluation d'une sélection d'indices acoustiques

Etienne Sicard^{1,2}

(1) IRIT, équipe Samova, Toulouse

(2) INSA-GEI, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse

Résumé : Cet article porte sur l'illustration d'une sélection d'indices acoustiques afin de mesurer de manière objective les particularités de la parole dysarthrique, en tentant de dégager des tendances concernant la Maladie de Parkinson idiomatique, l'Atrophie Multi-systématisée et la paralysie supra nucléaire progressive. Les analyses statistiques se basent sur l'exploitation de deux corpus importants incluant des témoins et patients, dont l'un est issu du programme ANR Voice4PD. Nous étudions en particulier trois épreuves : une voyelle tenue, une répétition de syllabes et une phrase d'un texte lu. De l'analyse des différentes dégradations observées, nous pouvons extraire quelques caractéristiques permettant de différencier la parole dysarthrique et la parole normale, et tentons de dégager quelques tendances spécifiques aux syndromes étudiés.

Mots-clé : parole, dysarthrie, pathologie, maladie de Parkinson, MSA, PSP, diadococinésie, intonation, triangle vocalique, instabilité, durée de phonation, mesure objective, DIADOLAB, rapport bruit/signal, Voice4PD

Introduction

Ces dernières années, un effort de recherche important a été consenti au développement de méthodes de mesures objectives basées sur l'analyse du discours de patients suspectés de souffrir d'une atteinte neurologique dégénérative. Un des objectifs visés est de détecter de manière précoce des anomalies dans la voix, qui, complétés avec différentes analyses telles que l'imagerie cérébrale, ou encore la détection d'anomalies motrices, permettent de converger vers un diagnostic. Une des maladies les plus étudiée est la maladie de Parkinson (PD), ainsi que certains syndromes tels que l'Atrophie Multi-systématisée (MSA) ou la paralysie supra nucléaire progressive (PSP). L'évolution rapide de certains syndromes entraîne une invalidité plus grave que dans le cas de la maladie de Parkinson idiomatique, avec une espérance de vie nettement réduite. Des indices pouvant être considérées comme des « alertes rouges » dans le cas de MSA [Kollensperger 2008] sont par exemple : une progression rapide de la maladie, l'instabilité de la posture, des contractions involontaires des pieds et des mains, des tremblements saccadés, ou encore des dysphonies, dysarthries et dysphagies sévères.

Nous reportons au tableau 1 quelques caractéristiques comparatives de la Maladie de Parkinson et de deux syndromes étudiés dans ce rapport de recherches : MSA et PSP [Miller 2017]. Il est possible de relier la maladie avec un type de dysarthrie prédominant, notamment pour PD que l'on associe souvent à la dysarthrie de type hypokinétique. Différentes échelles sont utilisées comme UPDRS et NNIPPS [Payan 2011] pour mesurer la sévérité des troubles associés à la maladie.

Disease	Acronym	Prevalence	Mean age of onset (years old)	Rating scale	Mean survival (years)	Type of dysarthria
Parkinson Disease	PD	1% of people over 60 y.old.	65	UPDRS	>10	Hypokinetic (HD)
Multiple system atrophy	MSA	5-8/100,000	58	NNIPPS	5-10	predominantly hypokinetic (HD) and spastic characteristics (SD)
Progressive supranuclear palsy	PSP	4-6/100,000	63-65	NNIPPS	5-10	more prominent ataxic (AD) changes alongside hypokinetic speech

Table 1 : Comparaison entre PD, MSA et PSP, adapté de [Miller 2017]

L'étude des différents types de dysarthrie est une préoccupation ancienne. La revue de littérature de [Critchley 1981] dressait dans les années 80 un historique du domaine en remontant aux observations de [Parkinson 1817] et citait différentes publications sur la période 1960-1980. Parmi les références les plus célèbres, nous pouvons citer Darley [Darley 1969] et l'ouvrage de Duffy - *Motor Speech Disorders* - publié initialement en 1975, qui en est à sa 4ème édition [Duffy 2019].

Dans les années 2000, les travaux de [Kent 2000] sur la dysarthrie, en lien avec le logiciel MDVP™ [Kent 2003], ainsi que ceux de [Tsanas 2012] ont permis de franchir une étape importante. En France, en lien avec la clinique orthophonique, on peut citer les travaux de [Auzou 2009], qui a notamment traduit le formalisme de Darley et exploré les caractéristiques des différents types de dysarthries, ainsi que la méthode BECD de Auzou et Rolland-Monnoury, dont une nouvelle édition est parue en 2019 [Auzou 2019].

L'analyse acoustique à l'aide de programmes informatiques dédiés s'est beaucoup développée ces dernières années, d'une part grâce à la banalisation de matériel performant et de qualité, d'autre part par la large diffusion de logiciel de traitement du signal tels MDVP™, PRAAT [Boersman 2021], ou d'outils plus spécifiquement ciblés sur la clinique orthophonique tels que VOCALAB [VOCALAB] et DIADOLAB [DIADOLAB]. Ces outils ont plusieurs avantages déterminants :

- Ils sont précis, objectifs et non invasifs,
- Ils fournissent des indications essentielles sur les troubles de la phonation, de la fluence et de l'intelligibilité,
- Ils sont plus fiables et moins biaisés que l'évaluation perceptive,
- Ils sont en libre accès (PRAAT) ou accessible à coût réduit (VOCALAB, DIADOLAB)
- Ils permettent de faire une évaluation rigoureuse des progrès observés suite à la prise en charge orthophonique [Sicard 2017],
- Dans le cas de maladies dégénératives, ils fournissent des informations factuelles sur l'évolution de la maladie, la réponse du patient à certains traitements tels que la dopamine dans le cas de la dysarthrie [Viallet 2012].

L'une des équipes qui a été la plus active dans le domaine de l'analyse objective de la parole dysarthrique depuis 2010 est située à Prague, avec des publications qui ont fait date dans l'analyse différentielle PD, MSA et PSP en vue d'un diagnostic précoce [Rusz 2015] [Tykalova 2017]. Une proposition d'outil basé sur Matlab™ a été faite par [Hlavnicka 2017]. On peut citer les travaux de

[Brückl 2018] qui a mis à disposition un script TREMOR.PRAAT [Brückl 2017] à l'aide du logiciel PRAAT [Boersma 2019].

Au niveau français, le laboratoire LPL a été particulièrement mis en avant avec une base importante d'enregistrements de parole dysarthrique et de publications associées [Ghio 2002][Pinto 2010] [Viallet 2012]. D'autres laboratoires sont actifs dans le domaine [Audibert 2012] [Antolik 2013] [Jencolas 2016]. Plus récemment, l'INRIA à Bordeaux s'est associé à l'IRIT Toulouse et aux centres référents MSA de Toulouse [Nemmi 2019] & Bordeaux [Meissner 2019] dans le cadre du projet ANR VOICE4PD [Voice4PD 2021], pour l'étude de la parole dysarthrique dans le cadre du diagnostic différentiel PD/MSA, par le biais du traitement automatique de la parole [Das 2019]. Nous avons été rattachés à ce projet dans la période 2017-2021, ce qui nous a permis de conduire différentes analyses sur un corpus de plus en plus riche au fil des années.

Dans ce rapport de recherches, nous avons souhaité faire un tour d'horizon des analyses conduites dans le cadre du projet Voice4PD et le cadre plus général de l'analyse de la parole dysarthrique. Dans un premier temps, nous tenterons de dresser une liste d'indices d'anormalité sur la base de mesures paramétriques sur la voix et la parole, en nous basant sur quelques publications qui font référence dans le domaine. Nous décrivons ensuite les caractéristiques générales des deux corpus de parole auxquels nous avons accès, et décrivons l'outil qui a servi de base au prototypage des algorithmes d'analyse de la parole et de calculs statistiques. Nous conduisons ensuite des études sur les indices en lien la voyelle /a:/ tenue, nous poursuivons avec les analyses de l'épreuve de répétition rapide de syllabes /PaTaKa/, avant d'analyser quelques caractéristiques du discours sur la base d'un texte lu. Pour chaque indice, dans un souci de pédagogie, nous tentons d'illustrer les concepts mis en œuvre en comparant la parole normale et pathologique, puis nous donnons quelques tendances en comparant les performances de chaque groupe. Ce panorama est loin d'être exhaustif, mais tente de donner une vue relativement élargie des possibilités d'analyse de la parole pathologique.

	<i>Epreuve</i>	<i>Mesure</i>	<i>Outil</i>	<i>Patients</i>	<i>Dysarthrie vs témoins</i>	<i>Références</i>
<i>Voyelle tenue</i>	/a:/	Durée de phonation	PRAAT	30	Réduite	[Holmes 2000]
			40			[Rusz 2015]
		Instabilité en hauteur	MDVP	14	Augmentée	[Kent 2000]
			PRAAT	239		[Bruckl 2018]
		Instabilité en amplitude	MDVP	14	Augmenté	[Kent 2000] [Kent 1999]
				32		
		Rapport Signal/Bruit	MATLAB	40	Diminué	[Tsanas 2012]
	Déstructuration harmonique	MATLAB	40	[Rusz 2015]		
	/i:/	Hypernasalité	PRAAT	74	Augmentée	[Novotny 2016]
<i>Diadocociné sie</i>	/Pataka/	Débit	MDVP	14	Réduit	[Kent 2000]
			MATLAB	40		[Rusz 2015]
		Irrégularité	MDVP	14	Augmentée	[Kent 2000]
			MATLAB	40		[Rusz 2015]
<i>Parole</i>	Monologue	Intonation	MDVP	30	Réduite	[Holmes 2000]
			MATLAB	40		[Rusz 2015]
		Espace vocalique	CSpeech	60	Réduit	[Sapir 2007]
			PRAAT	104		[Audibert 2012]
			30		[Whitfield 2019]	

Table 2 : Sélection d'indices d'anormalité révélées dans des publications scientifiques en lien avec la parole dysarthrique

Indices d'anormalité

Nous donnons dans le tableau 2 ci-dessous quelques caractéristiques issues de l'analyse de la parole dysarthrique. Sur la base d'une voyelle tenue (en général le /a:/) différentes mesures sont envisageable pour mettre en évidence des différences significatives entre production du témoin et production du patient. On retrouve dans cette catégorie la durée de phonation et les paramètres les plus courants de l'analyse des altérations tels que le *jitter*, *shimmer*, *Harmonic-noise-ratio* (HNR), tous plus ou moins liés à la sévérité de la dysarthrie. Une deuxième épreuve concerne la répétition de syllabes comme /Pataka/ : l'altération de l'articulation impacte à la fois le débit, la régularité, et dégrade de manière plus générale le discours en le rendant atone et saccadé, paramètres que l'on peut calculer sur un texte lu ou la parole spontanée. Au niveau des outils, on retrouve principalement MDVP™, PRAAT, ou encore le logiciel de calcul généraliste MATLAB®.

Corpus et outils d'analyse

Nous utilisons deux corpus distincts, l'un provenant de l'université de Prague [Rusz 2015], l'autre mis à disposition par l'INRIA dans le cadre du projet Voice4PD [Das 2019].

Le corpus de l'Université de Prague comprend au total 12 patients avec un diagnostic de PSP probable (10 hommes, 2 femmes), 13 patients avec un diagnostic de MSA probable (6 hommes, 7 femmes). Le diagnostic de PSP a été établi selon les critères de diagnostic clinique NINDS-PSP [Litvan 1996], tandis que le diagnostic MSA a suivi les critères de consensus MSA [Gilman 2008]. Les enregistrements vocaux ont été effectués dans une pièce calme avec un faible niveau de bruit ambiant avec un microphone de type Bayerdynamic Opus 55, situé à environ 5 cm de la bouche de chaque sujet. Les signaux vocaux ont été enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz, mono et une résolution de 16 bits. Chaque participant a été invité à faire 4 enregistrements :

- Produire une voyelle /a :/ tenue en prenant une bonne respiration, en faisant une production longue et régulière (épreuve répétée 2 fois) ;
- Produire un enchaînement rapide de syllabes /pa/ta/ka/,
- Lire un texte,
- S'exprimer pendant 90 s environ sur un sujet donné.

Dans le cadre du corpus Voice4PD, à la date de rédaction du rapport, un total de 43 témoins et patients avait été recruté, répartis de la manière suivante : 20 patients (5 femmes et 15 hommes) avec un diagnostic de MP idiopathique, avec un âge moyen de 60 ans et une durée moyenne des symptômes de 4 ans, 12 sujets (8 femmes et 4 hommes) avec un diagnostic de MSA-P, avec un âge moyen de 67 ans et une durée moyenne des symptômes de 3,5 ans, ainsi que 11 témoins sains (HC) avec un âge moyen de 56 ans (6 femmes et 5 hommes) sans antécédent de troubles neurologiques ou de communication.

Chaque participant a effectué plusieurs tâches vocales, incluant :

- La production des voyelles /a:/ et /i:/ soutenues,
- La répétition de syllabes (dont /Pataka/, /Badaga/) selon différentes consignes,
- Une tâche de lecture sur la base de quelques phrases de la Chèvre de Monsieur Seguin d'A. Daudet.
- Une tâche de description de scène,
- Un ensemble de 25 pseudo-mots issus de l'approche exhaustive de [Ghio 2020].

L'enregistrement de la parole a été effectué à une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 16 bits, grâce à un microphone à condensateur monté sur le casque (T.bone HC 444 TWS) placé à une distance d'environ 5 cm du bouche de l'orateur. Tous les participants ont donné leur consentement écrit dans le respect des lois en vigueur.

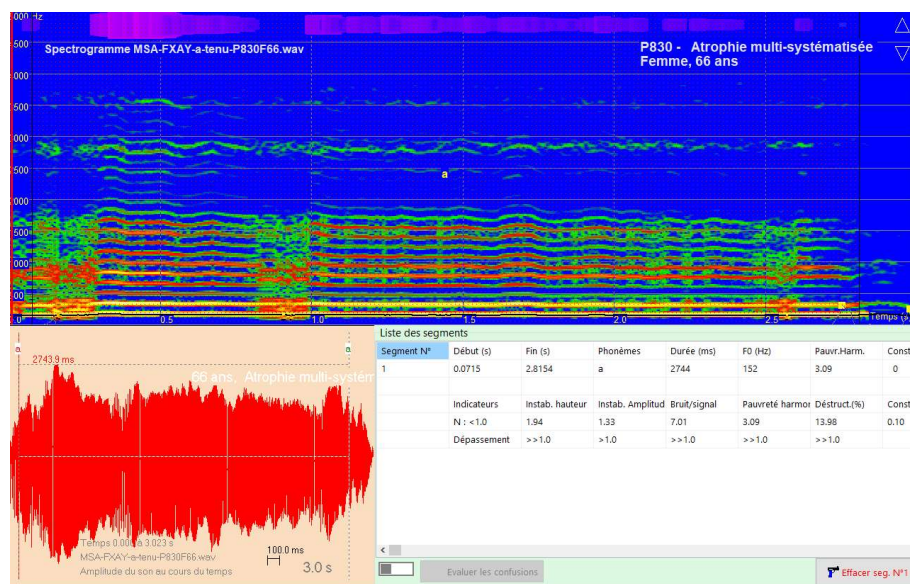


Figure 1 : Outil « Phonologie » de DIADOLAB permettant d'extraire les indicateurs d'altération sur le /a/. Illustration sur le cas MSA-FXAY du corpus Voice4PD

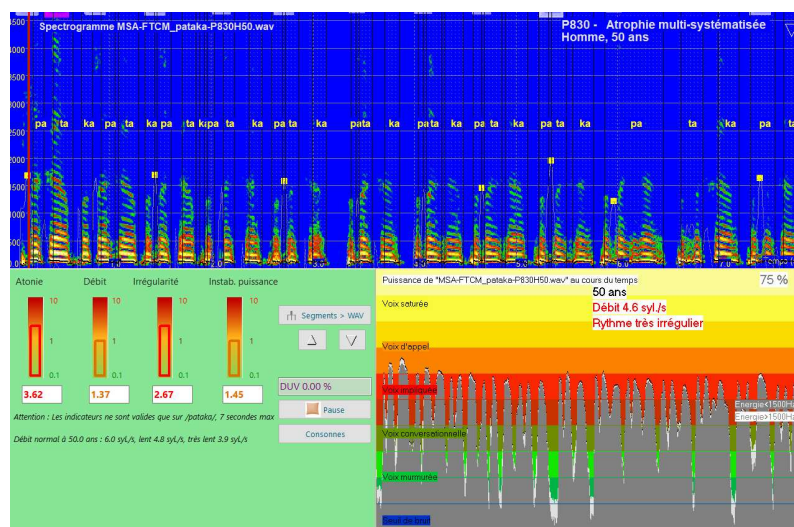


Figure 2 : Outil « Diadococinésie » de DIADOLAB permettant d'extraire les indicateurs d'altération des répétitions de /Pataka/. Illustration sur le cas MSA-FTCM du corpus Voice4PD

Concernant le calcul des données primaires et les statistiques, nous utilisons le logiciel DIADOLAB, en particulier le module *Phonologie* pour l'étude des voyelles tenues (Figure 1), et *Diadococinésie* pour l'étude des répétitions de /Pataka/ (Figure 2). Parmi les données de base se trouvent la durée de phonation, l'évolution de F0, les indicateurs d'altération du /a:/ tenu, les indicateurs d'altération de la diadococinésie et les erreurs entre phonèmes perçus et phonèmes attendus.

Le logiciel DIADOLAB permet d'extraire la plupart des indices relevées dans l'étude bibliographique et présentés auparavant (table 2). La table 3 précise les modules utilisés et le type de calcul conduit. Une description de l'utilisation de DIADOLAB pour le bilan objectif de la dysarthrie dans le cadre de la prise en charge orthophonique est donnée dans [Sicard 2020d].

	Epreuve	Mesure	Module	Commentaire
Voyelle tenue	/a:/	Durée de phonation	Phonologie	Segmentation du /a:/ ou portion d'énergie significative
		Instabilité en hauteur	Phonologie	Jitter court, moyen et long terme
		Instabilité en amplitude	Phonologie	Shimmer court, moyen et long terme
		Rapport Bruit/Signal	Phonologie	NHR avec détection d'éraillure
	Déstructuration harmonique	Phonologie	Pauvreté harmonique très supérieure à la limite de pathologie	
Diadococinésie	/Pataka/	Vitesse	Diadococinésie	Indicateur de débit lent
		Régularité	Diadococinésie	Indicateur d'irrégularité
Parole	Monologue	Variation de F0	Prosodie	Intonation en ½ ton
		Fondamental Usuel Moyen	Prosodie	F0 moyen sur les voyelles et consonnes voisées sur texte segmenté
		Hypernasalité	Profil type	Analyse des formants
	Plosives	Pauses inappropriées	Prosodie	Indicateur de pauses inappropriées
		Voice Onset Time	Phonologie	Extraction des caractéristiques CV
	Parole	Spirantisation	Phonologie	Segmentation des phonèmes perçus et analyse comparative avec les phonèmes cibles

Table 3 : Indices d'anormalité de la parole dysarthrique évaluées par le logiciel DIADOLAB, avec outils associés

Les indicateurs d'altération du /a:/ et de la diadococinésie ont été normalisés, de manière à ce que la production normale donne des valeurs significativement en dessous de 1.0, tandis que la parole pathologique se traduise par une valeur significativement au-dessus de 1.0 (Figure 3). Le processus de normalisation, décrit dans [Sicard 2013] pour l'altération du /a:/ et dans [Sicard 2020] pour l'altération de séries de /PaTaKa/, repose d'une part sur une méta-analyse des données publiées, d'autre part sur l'analyse statistiques de centaines de cas fournis dans le cadre de la clinique orthophonique [Sicard 2013b] ou des projets de recherche ANR Voice4PD et C2SI.

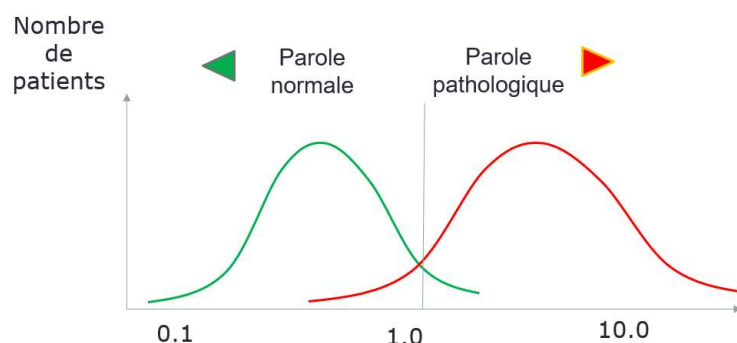


Figure 3 : Normalisation des indicateurs d'altération de la diadococinésie

Analyse des indices sur le /a:/ tenu

Nous donnons ci-après quelques illustrations des indices décrits dans la table 1, sur la base d'enregistrements extraits du corpus Voice4PD [Voice4PD]. Une analyse statistique combinant les

corpus Voice4PD et le corpus de [Rusz 2015] est aussi proposée pour chaque indice, à l'aide de l'outil statistique du logiciel DIADOLAB.

Durée de phonation

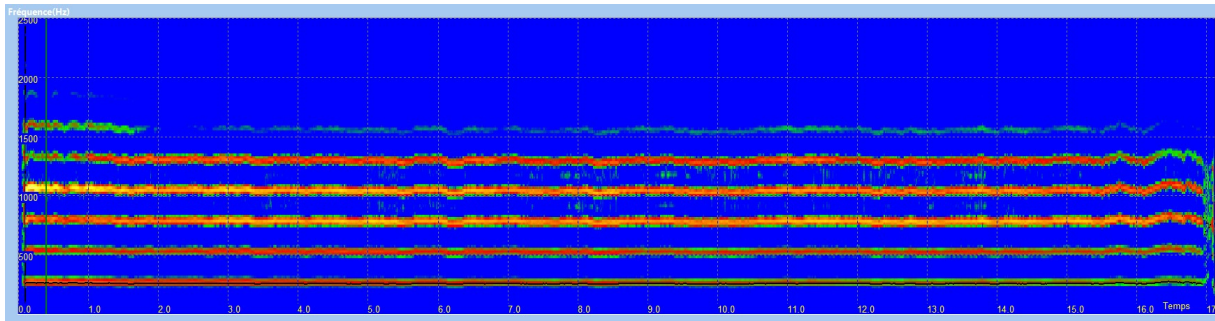
L'épreuve visant à évaluer le Temps de Phonation Maximum (TPM) fait partie de nombreux protocoles d'étude de la dysarthrie [Sachin 2008] [Rusz 2015] [Kowalska-Taczanowska 2020], mais aussi à mesurer de possibles progrès grâce à la prise en charge orthophonique comme la méthode LSVT™ [De Angelis 1997][Rolland-Monnaury 2009]. La voyelle la plus souvent utilisée est le /a:/. Bien que l'on observe des variations dans les valeurs publiées et les tendances observées, en partie liées aux différences de protocoles et aux choix des critères d'inclusion, on peut noter un TPM autour 15 secondes en moyenne pour les témoins, et de moins de 10 secondes pour les syndromes tels que MSA et PSP. Concernant la Maladie de Parkinson, [Sachin 2008] observe aussi des performances dégradées (13.6 > 9.6 s), tandis que [Rusz 2015] n'observe qu'une réduction relativement faible de la durée de phonation par rapport aux témoins (17 > 15 s).

En clinique orthophonique, la mesure du TPM sur le /a:/ est complétée par le /s:/ et le /z:/ pour extraire les rapports a/z et s/z, qui permettent d'évaluer l'impact de la mise en vibration sur la pression expiratoire ainsi que l'impact de l'articulation sur la sonorisation [Menin-Sicard 2016]. Les rapports s/z sont souvent plus élevés pour les sujets dysphoniques, du fait d'une vibration des cordes vocales peu efficace, une augmentation du débit d'air et une durée phonatoire raccourcie sur /z/ par rapport à la durée de constriction pure du /s/ [Eckel 1981]. En revanche, [Fang 2014] ne note pas de différence significative entre le rapport s/z de patients atteints de Maladie de Parkinson (environ 0.71) et celui du groupe contrôle (0.76). Il est intéressant de noter que la prise en charge orthophonique intensive peut réduire le rapport s/z et augmenter la durée de phonation (8.6 > 11.2 s [De Angelis 1997]) chez les patients Parkinsoniens.

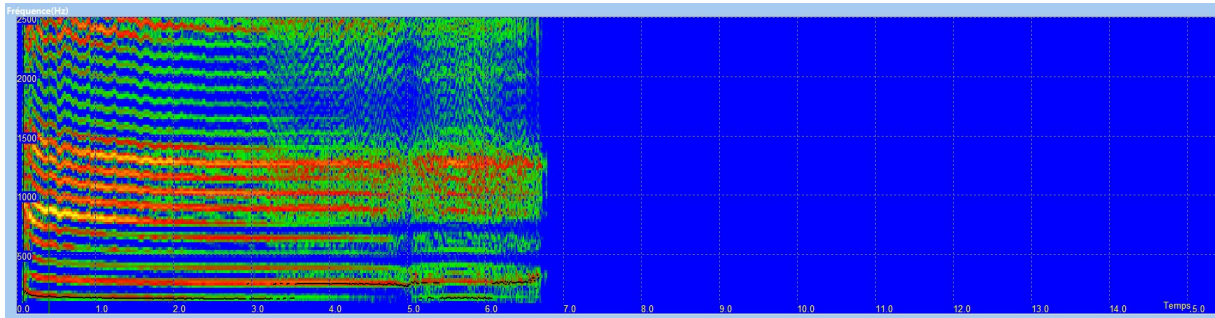
Phonème	Description
/a/	Phonème le plus ouvert. N'offre aucun point d'appui articulaire. Spontané et universel.
/s/	Phonème constrictif sourd, à faible débit d'air avec des composantes à très hautes fréquences sans vibration laryngée. Position des lèvres en étirement.
/z/	Phonème constrictif sonore avec composantes à hautes fréquences. Une partie de l'air est absorbé par la vibration laryngée.
Rapport [s/z]	Impact de la mise en vibration sur la pression expiratoire et sur l'articulation
Rapport [a/z]	Impact de l'articulation sur la sonorisation

Table 5: Choix des phonèmes pour l'évaluation du Temps Phonatoire Maximum [Menin-Sicard 2016]

Nous reportons en figure 4 deux exemples d'épreuve de durée de phonation sur un /a:/. Dans le premier cas (Figure 4 en haut), il s'agit d'une femme témoin de 64 ans. La voix est stable en hauteur et en intensité, faiblement bruitée et riche en harmoniques. La durée de phonation est de 17 secondes, proche de la norme pour les témoins. En utilisant approximativement la même échelle de temps, nous présentons le spectrogramme du /a:/ d'une femme atteinte de PSP de 70 ans. La durée de phonation est considérablement plus courte (ici, 6 s environ) et les instabilités en hauteur et amplitude très marquées.



Femme témoin, 64 ans



Femme atteinte de PSP, 70 ans

Figure 4 : Spectrogramme du /a:/, femme de 64 ans témoin (en haut), durée de phonation 17 s, voix stable avec un très bon rendement phonatoire, et femme atteinte de PSP, instable en hauteur avec déstructuration harmonique et tendance à la diminution de la puissance.

Statistiques sur la durée de phonation

On observe en parole normale une durée de phonation moyenne de 15 s, ce qui est proche des résultats de [Sachin 2008]. On peut noter deux cas HC-FXRA et HC-MMLK (Figure 5) de phonation très courte (moins de 7 s), pouvant être lié à une mauvaise application de la consigne de passation du protocole. En moyenne, les patients MSA ont la durée de phonation moyenne la plus basse (10 s), suivi de PD à 11 s et PSP proche de la norme à 14 s.

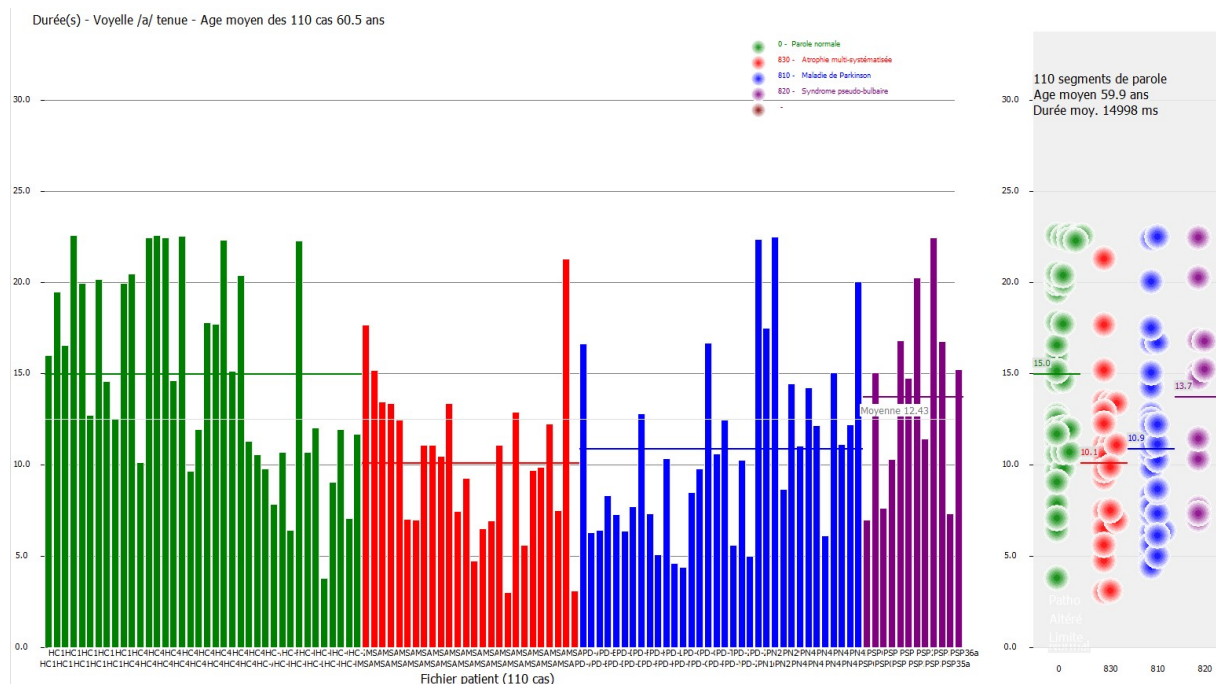


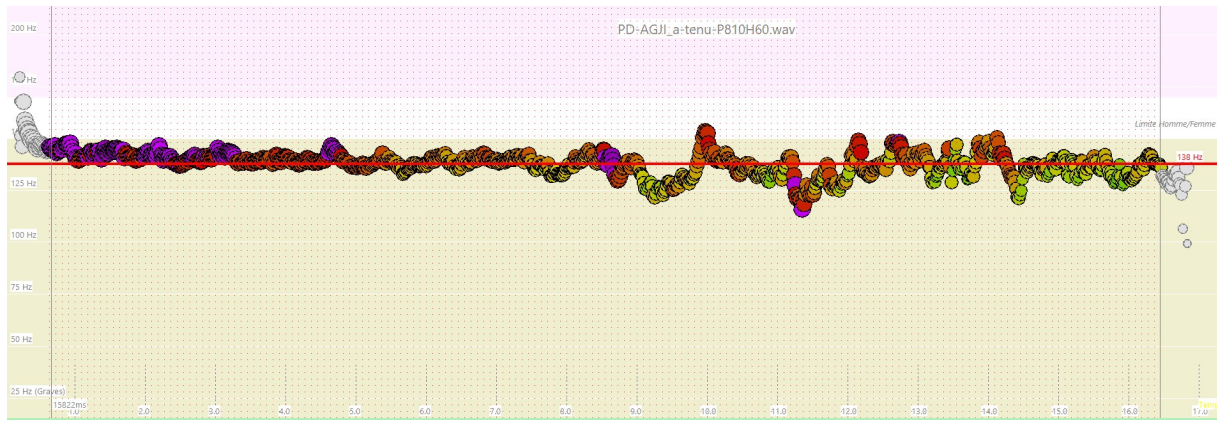
Figure 5 : Durée de phonation des groupes HC (vert), MSA (rouge), PD (bleu) et PSP (violet)

Instabilité en hauteur

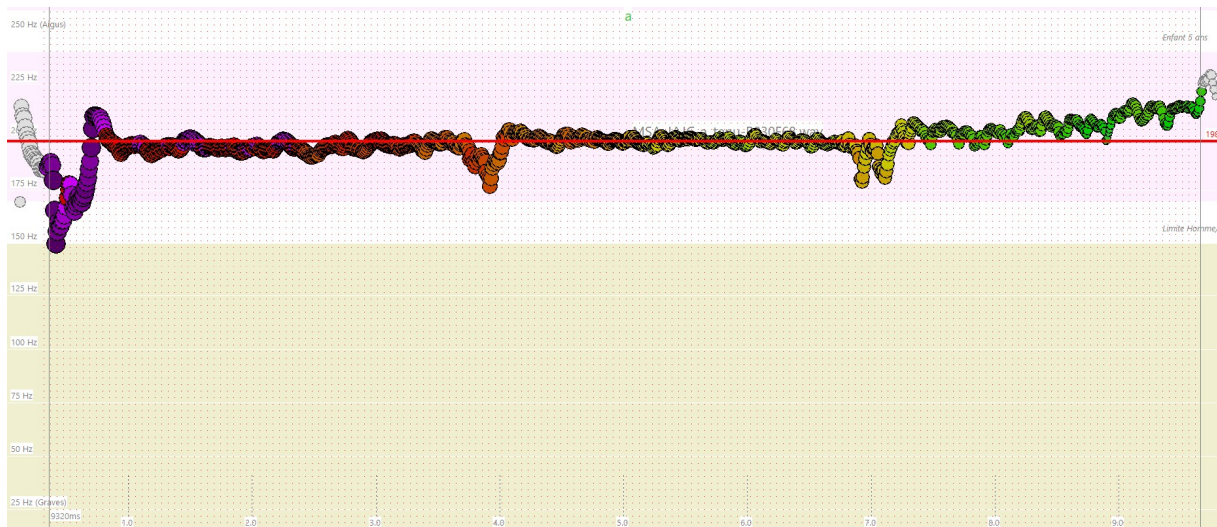
Bien que l'on puisse distinguer plusieurs phénomènes distincts sous la dénomination « instabilité en hauteur » du fondamental de la voix, un phénomène caractéristique de la Maladie de Parkinson est le tremblement, qui peut se traduire au niveau de la voix par une oscillation à fréquence lente du fondamental F0. Ce phénomène est cependant relativement peu fréquent [Bruckl 2015]. Dans le corpus Voice4PD, le cas PD-AGJI (Figure 1 en haut) correspondant à un homme de 60 ans atteint de Maladie de Parkinson présente des caractéristiques de type tremblement (*tremor*) de F0, qui se traduit par des variations chaotiques de la hauteur du fondamental sur l'épreuve du /a:/ tenu. On peut aussi noter des variations de puissance (couleur des points). La phonation est longue, de 15 secondes environ.

Concernant le cas MSA d'une femme de 68 ans (figure 6 en bas), on note une tendance à l'élévation de F0, à la diminution de puissance (symbolisée par des ronds qui diminuent de taille), mais surtout des instabilités brusques ainsi que du tremblement, particulièrement visible en deuxième partie de production du /a:/. La durée de phonation est moyenne, de l'ordre de 10 secondes.

Le logiciel MDVP [MDVP] inclut le calcul de l'index FTRI (*frequency tremor intensity index*). Bruckl propose un indice d'intensité des tremblements de fréquence (FTRI) et un script PRAAT associé [Bruckl 2021]. Les logiciels VOCALAB et DIADOLAB incluent dans l'indicateur « Instabilité en hauteur » une composante long terme qui sanctionne la présence de *tremor* dans l'enregistrement d'une voyelle /a:/ tenue.



Maladie de Parkinson, homme de 60 ans



MSA, femme de 68 ans

Figure 6 : variation de F0 sur le long terme du cas PD-AGJI (en haut) et MSA-JAJC (en bas) calculée avec DIADOLAB

Jitter

Le *jitter* est une variation courte terme de F0. Il s'agit cette fois d'observer non pas une variation à l'échelle de la seconde, comme dans la section précédente, mais à l'échelle de chaque cycle d'oscillation, donc à l'échelle de quelques millisecondes. Le *jitter* est considéré par de nombreux auteurs comme l'un des indices les plus significatifs de la qualité de la voix, car corrélé à l'instabilité vibratoire des organes phonateurs. Il existe de nombreuses variantes du calcul du *jitter*, permettant une évaluation de l'instabilité fréquentielle instantanée, court terme et moyen terme. Différentes formulations du *jitter* ont été listées, entre autres, dans le monumental répertoire des algorithmes d'analyse acoustique de la qualité de la voix [Buder 2000].

L'évaluation du *jitter* se fait en général sur la production d'une voyelle (souvent un /a :/). L'évaluation précise des périodes n'est pas une tâche aisée dans le cas de voix pathologiques, où l'évaluation peut échouer, ce qui affecte en conséquence le calcul du *jitter* et donne des résultats disparates selon les logiciels et configurations utilisés. Des outils tels que PRAAT et MDVP calculent plusieurs variantes du *Jitter*, souvent fortement corrélées entre elles [Sicard 2013]. Le *Jitter* court terme est aussi parfois critiqué pour son manque de corrélation avec l'évaluation perceptive et l'auto-évaluation du patient [Parsa 2001], ou sa variabilité selon les implémentations logicielles [Maryn 2009].

Les valeurs du *jitter* augmentent significativement avec l'âge mais sont peu dépendantes du sexe. Dans l'étude de [Xue 2001], le *jitter* moyen des voix normales de jeunes hommes est autour de 0,6 %, et monte à 2,2% pour des hommes de 70 ans et plus. Le mémoire de Barbéra et Frenay [Barbera 2016] donne des tendances similaires, élargies à différents indicateurs, qui ont permis de proposer dans VOCALAB une adaptation des valeurs seuil entre voix normale et altérée en fonction de l'âge du patient.

Dans le cas de la figure 7, le *Jitter local* PRAAT de 5% du cas PD-FDOD est significativement au-dessus de la limite normal/altéré communément admise de 1 %. Une analyse plus approfondie du spectrogramme révèle ici une voix fortement éraillée, avec la présence très marquée de sous-harmoniques. VOCALAB et DIADOLAB incluent un détecteur d'éraillure et sanctionnent non pas l'instabilité en hauteur, mais le rapport bruit/signal.

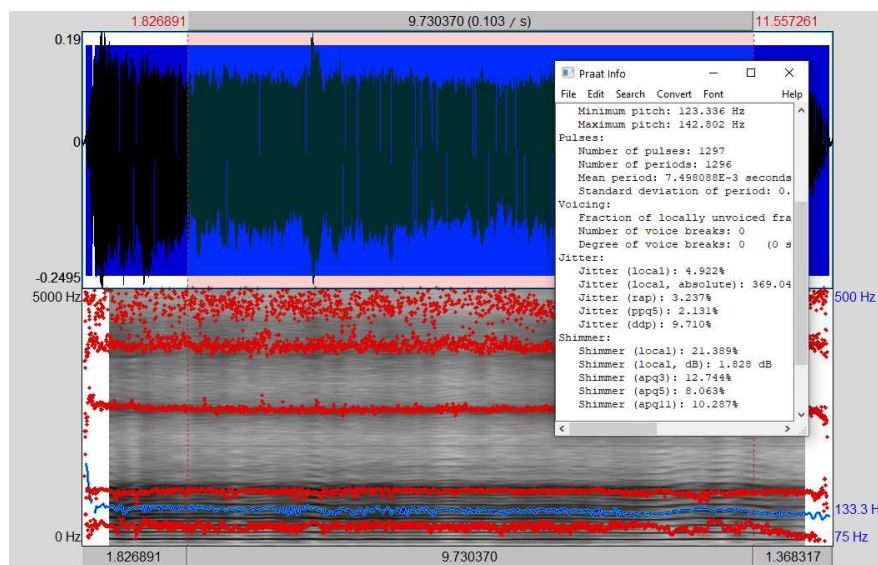


Figure 7 : Exemple de Jitter pathologique (5%) pour le cas PD-FDOD avec PRAAT

Statistiques sur l'instabilité en hauteur

On observe sur le /a:/ tenu une instabilité en hauteur moyenne autour de 0.6, donc bien en dessous de 1.0, seuil voix normale/voix altérée dans DIADOLAB, que l'on peut rapprocher du seuil de 1% du *Jitter* de PRAAT. Seul un cas HC-AQAC dépasse le seuil, ce qui est très peu (Figure 8). La situation est tout autre pour MSA (2.2 en moyenne) et PSP (1.9 en moyenne), significativement au-dessus de 1.5 qui est considéré comme la limite voix altérée/pathologique. Concernant PD, la situation est plus contrastée avec seulement 9 cas au-dessus de 1.0, et une moyenne autour de 0.75.

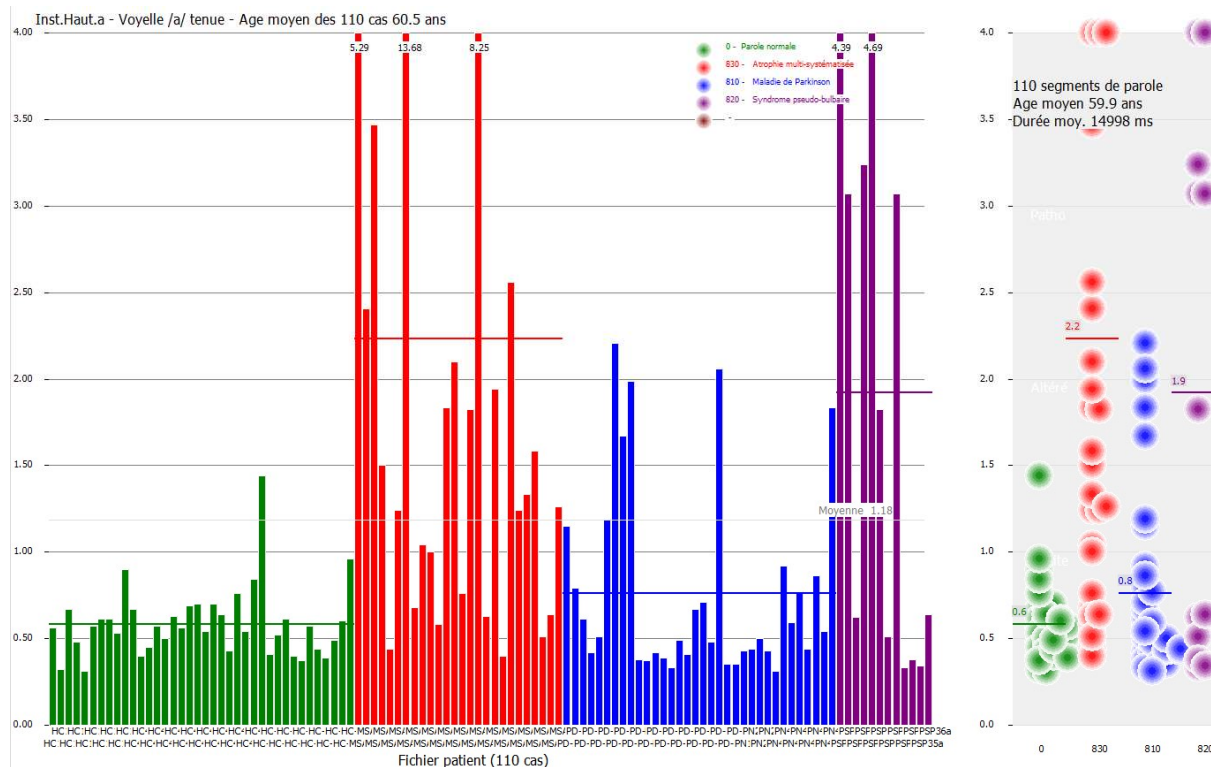


Figure 8: Instabilité en hauteur des groupes HC (vert), MSA (rouge), PD (bleu) et PSP (violet)

Instabilité en amplitude

La valeur communément admise pour le seuil normal/altéré de l'instabilité en amplitude à courte terme, dénommée *Shimmer* dans MDVP et PRAAT est de l'ordre 4 %. Dans [Xue 2001], le Shimmer est estimé à 2.2 % chez les témoins jeunes, et s'élève à 5.4 % pour les personnes âgées (75 ans en moyenne). Dans le cas de la figure 9 correspondant au même /a:/ tenu que celui de la figure 7, un *Shimmer* local estimé à 21 % par PRAAT est clairement pathologique. DIADOLAB et VOCALAB calculent l'instabilité en amplitude, en combinant les phénomènes court, moyen et long terme. Autrement dit, le tremblement en amplitude fréquent dans les dysarthries sévères sera sanctionné par un indicateur d'instabilité en amplitude élevé.

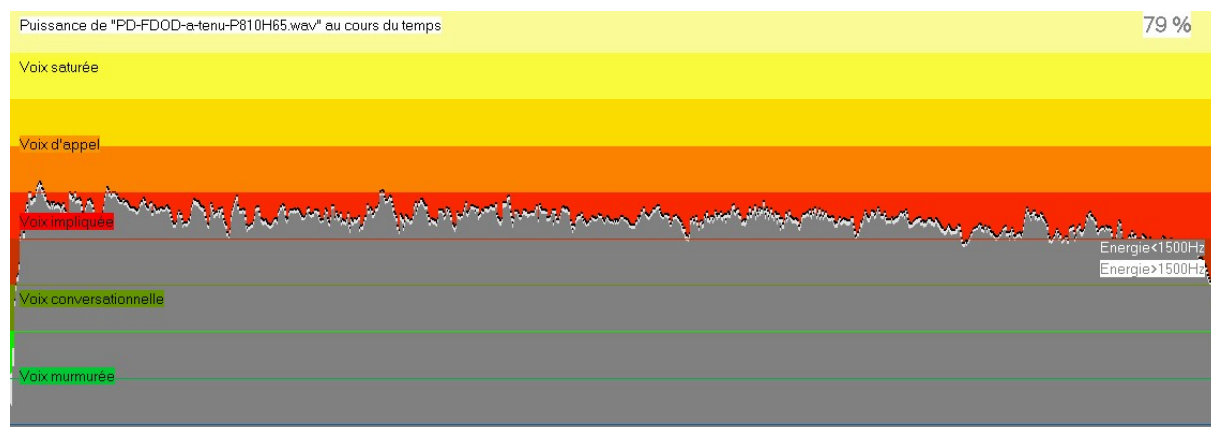


Figure 9 : Profil de puissance perturbé à court terme, justifiant un Shimmer pathologique (21% selon PRAAT), cas PD-FDOD, Maladie de Parkinson, homme de 65 ans

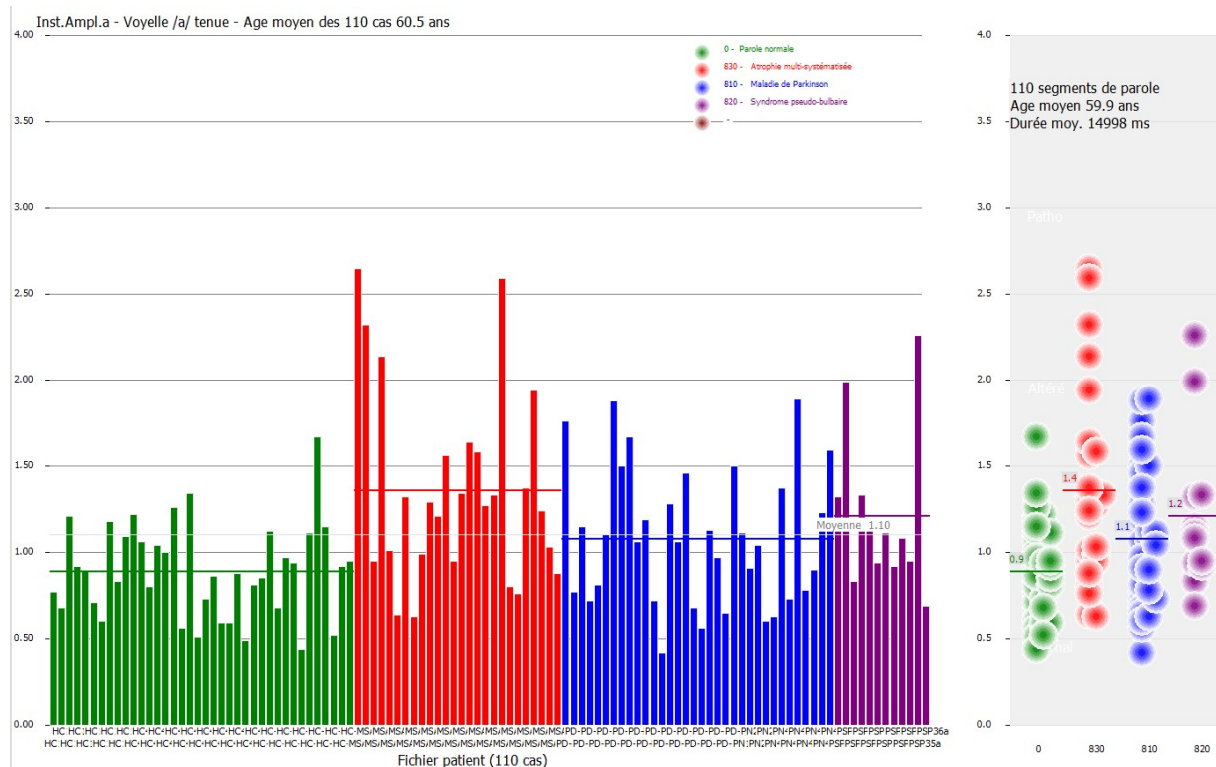


Figure 10: Instabilité en amplitude des groupes HC (vert), MSA (rouge), PD (bleu) et PSP (violet)

Du point de vue statistique, l'instabilité en amplitude s'élève pour MSA, PD et PSP, de manière moins nette que pour la hauteur (Figure 10).

Rapport Signal/Bruit

Une métrique commune pour l'analyse du bruit dans la voix est le rapport signal/bruit (*harmonic/noise ratio HNR*), ou son *alter-ego* rapport bruit/signal (*noise/harmonic ratio NHR*). L'indicateur bruit/signal sanctionne une élévation de la puissance du bruit par rapport à celle des harmoniques. Une valeur commune pour le HNR d'une voix normale, calculée sur un /a:/ tenu est autour de 25 dB selon [Teixeira 2014]. Cette valeur bouge relativement peu pour le /i:/ et /ou:/ d'après cette même étude. Dans [Rusz 2011], une réduction du rapport HNR de 22 dB (groupe contrôle) à 14 dB (patients atteints de maladie de Parkinson) est observée. Si la plupart des études relèvent une augmentation du bruit dans la parole dysarthrique [Pinto 2010], celle-ci n'est pas toujours considérée comme significative pour la Maladie de Parkinson idiomatique [Katcha 2017] [Yang 2020].

Dans VOCALAB & DIADOLAB [Sicard 2013], l'indicateur bruit/signal s'élève aussi en cas de détection d'éraillures. Celles-ci se présentent sous forme de traces entre les harmoniques, d'une durée souvent courte, et d'amplitude instable. Dans l'exemple de la figure 11 (cas MSA-ESKI du corpus [Voice4PD]), l'indicateur bruit/signal est fortement dégradé par la présence d'éraillures quasi continues à partir du temps 3.2 s, alors que le niveau du souffle n'est pas à proprement parler pathologique. Le détecteur s'allume ici de 3.2 à 6.2 s.

L'éraillure discutée ici est à mettre en parallèle avec l'indicateur S2H cité par [Kowalska 2020], le rapport entre les sous-harmoniques et les harmoniques de la voyelle tenue, qui indique une vibration parasite de fréquence $F_0/2$, perçue comme voix « tendue, dure, serrée ou étranglée » (*Strained-stangled voice*).

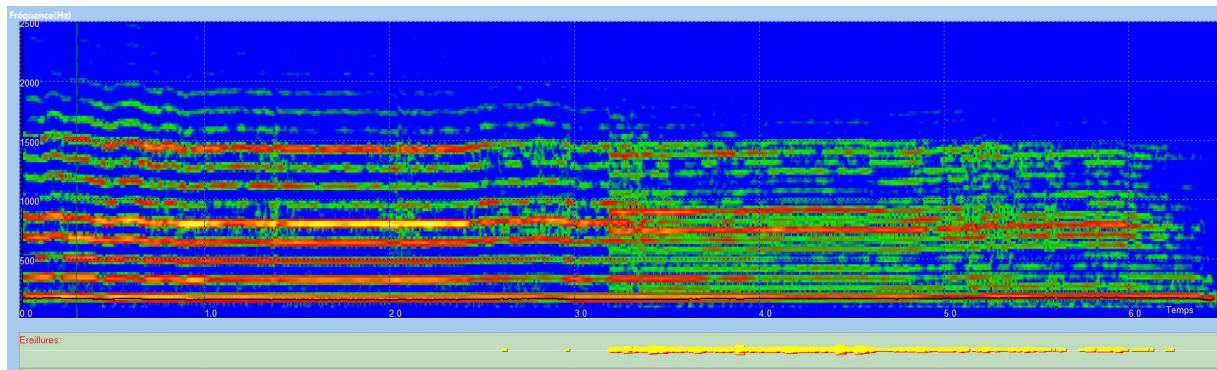


Figure 11 : Spectrogramme du /a:/, femme de 69 ans atteinte de MSA, avec éraillures très prononcées en 2ème partie de phonation

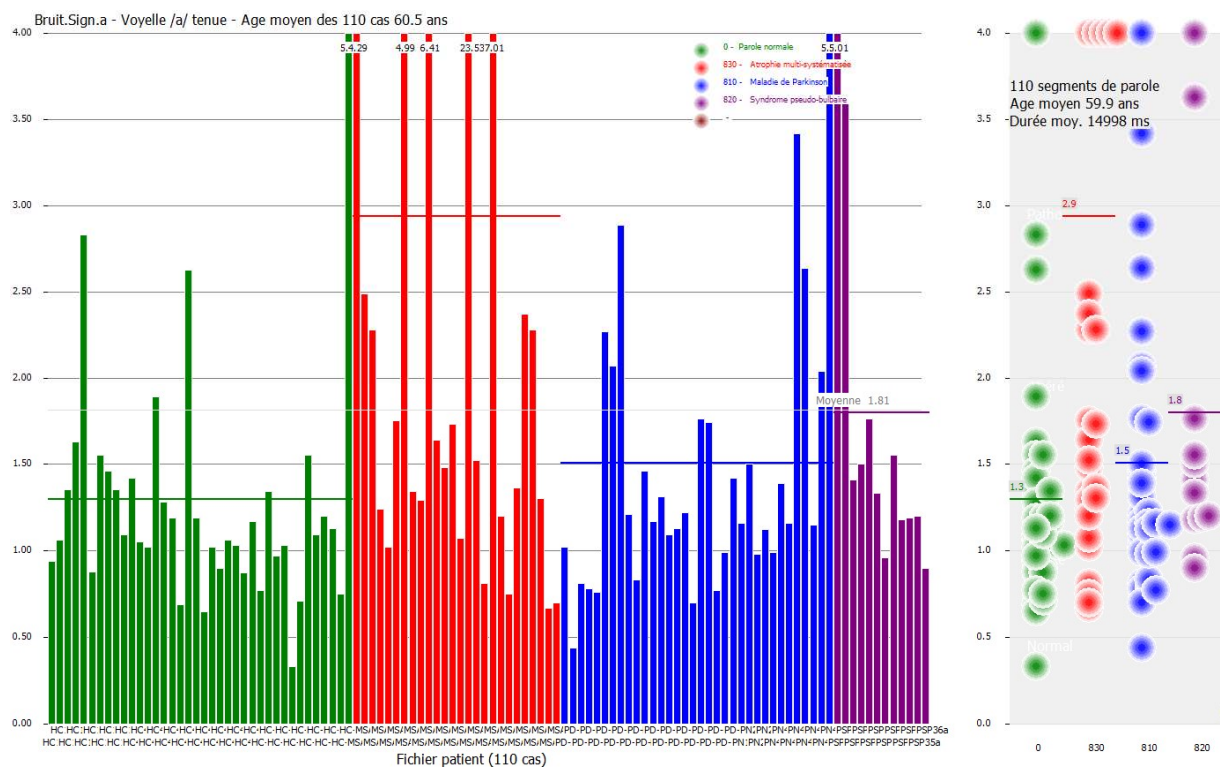


Figure 12: Indicateur de bruit/Signal des groupes HC (vert), MSA (rouge), PD (bleu) et PSP (violet)

On peut dans l'analyse statistique de la figure 12 noter un indicateur bruit/signal un peu au-dessus de la norme pour le groupe contrôle (1.3), pathologique pour MSA (3.0), élevé pour PD (1.5) et assez élevé pour PSP (1.8). Une raison possible pour la valeur 1.3 du groupe HC au lieu d'une valeur en dessous de 1.0 tient en partie à la nature du protocole : l'indicateur dans DIADOLAB est basé sur un /a:/ résonant, sans contrainte de durée de phonation maximale. Les corpus étudiés ici privilégient la phonation la plus longue possible : plusieurs réalisations du /a:/ sont pauvres, peu sonores, donc sanctionnées par un indicateur bruit/signal élevé. Les moyennes de groupe peuvent être rapprochées du rapport sous-harmoniques/harmoniques de [Kowalska 2020] : PSP 2.0, MSA 2.5, PD 0.8 et HC 0.3. La hiérarchie est ici assez similaire.

Déstructuration harmonique

Nous incluons dans la déstructuration harmonique deux phénomènes, l'un lié à l'interruption brusque de la vibration laryngée, souvent noté DUV (*Degree of Unvoiced*) dans PRAAT ou MDVP, soit la dégradation brusque du contenu harmonique, tout en gardant la vibration laryngée, phénomène

fréquent dans les dysarthries sévères et pourtant peu étudié. La voyelle /a:/ tenue des patients dysarthriques peut contenir une fraction significative de dévoisement qui se traduit par un indicateur *DUV* non nul [Rusz 2015].

Sur un /a:/ tenu, une légère déstructuration peut être observée dans la voix normale, soit lors de l'attaque quand elle est bruitée (coup de glotte), soit en fin de production avec un possible serrage ou arrêt brusque de phonation. Si l'on ignore ces deux zones particulières, la déstructuration harmonique de la voix normale est très rare. Nous utilisons ici l'indicateur de déstructuration harmonique basé sur le pourcentage de valeurs instantanées extrêmes de l'indicateur de pauvreté harmonique. Cette information est disponible dans l'onglet « F0/Harm » de VOCALAB [Sicard 2013]. On peut noter pour la voyelle /a:/ du cas MSA-FTCM (Figure 13) une pauvreté très marquée (indicateur au-dessus de 10.0) au temps 4.0, 5.5, 7.0 secondes, etc.

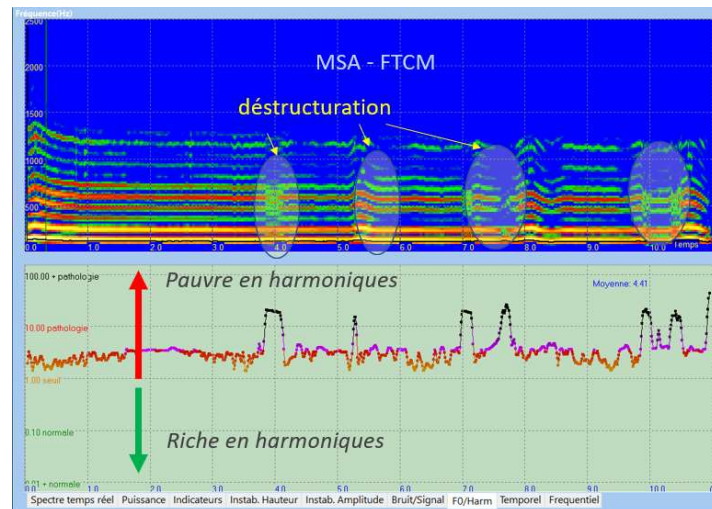


Figure 13: Indicateur de pauvreté harmonique au cours du temps de VOCALAB : la déstructuration est comptabilisé pour des valeurs instantanées pathologiques, au-delà de 10,0

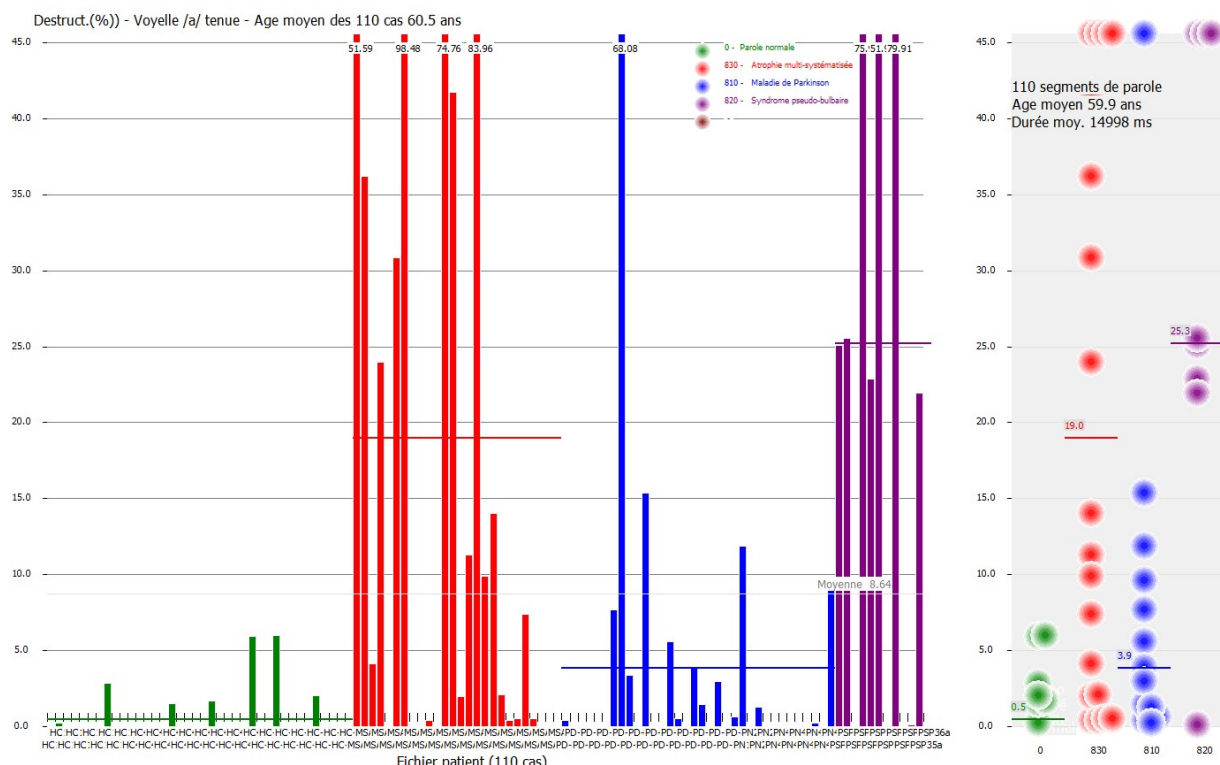


Figure 14: Indicateur de déstructuration harmonique des groupes HC (vert), MSA (rouge), PD (bleu) et PSP (violet)

La figure 14 indique une quasi-absence de déstructuration harmonique pour le groupe contrôle, 20% pour MSA, 5% pour PD et 25% pour PSP. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles publiées sur l'indicateur *NoPhonCoef* de [Kowalska 2020], le rapport entre les segments sans et avec phonation, mais se rapprochent de *Degree of Unvoiced DUV* de [Rusz 2015] : MSA 11 %, PD 0.2 % et PSP 3.5 %. La déstructuration harmonique est ainsi plus présente que le dévoisement, notamment pour PSP.

Hypernasalité

La communauté scientifique a éprouvé une certaine difficulté pour identifier des indices de nasalisation génériques dans la parole. Dans son tableau « *Spectral Features of Nasalisation* » [Baken 2000] compile plus d'une vingtaine de publications scientifiques et liste un panel très varié d'effets, comme l'augmentation de largeur de certains formants, le décalage de fréquence de certains formants, une diminution du 1er formant au profit du second, du bruit entre les formants, etc.

Le jugement perceptif est longtemps resté la norme pour évaluer la nasalité atypique (principalement l'hypernasalité), notamment chez les enfants atteints de fentes palatines ou de patients dysarthriques. Ainsi, une hypernasalité légère à modérée a été constatée dans 65% des cas de Maladie de Parkinson, 89% de la maladie de Huntington, contre seulement 22% des témoins [Novotny 2016], sur la base d'une analyse perceptive.

Ces dernières années ont vu le développement de logiciels ainsi que de matériels dédiés comme l'aérophonoscope [Rousteau 2017] capables de donner une mesure objective de l'hypernasalité. La détection informatisée de l'hypernasalité a été d'abord proposée par [Cairns 1996] à base d'analyses non linéaires de l'énergie (*Teager Energy Operator - TEO*). Dans une étude récente, [Saxon 2020] cite une dizaine d'auteurs dont les approches logicielles ciblent notamment l'amplitude et la position des formants F1 et F2, dont notamment [Kataoka 2001] et [Novotny 2017], qui étudient plus spécifiquement la voyelle /i:/.

Nous comparons le profil moyen du /a/ et du /i/ prononcés par deux femmes (figure 15). Le profil comparant /a/ et /i/ reporté à gauche correspond à un témoin HC-ECKC, on constate un antiformal profond sur le /i/ dans la zone de transition F1/F2, tandis que pour le patient PD-ZNPV (à droite) la localisation de l'antiformant est beaucoup moins nette. Les zones de résonance du /a/ en F2 et F3 sont beaucoup moins proéminentes que pour le témoin. L'analyse de la nasalité et de l'hypernasalité fait l'objet d'une étude séparée [Sicard 2021].

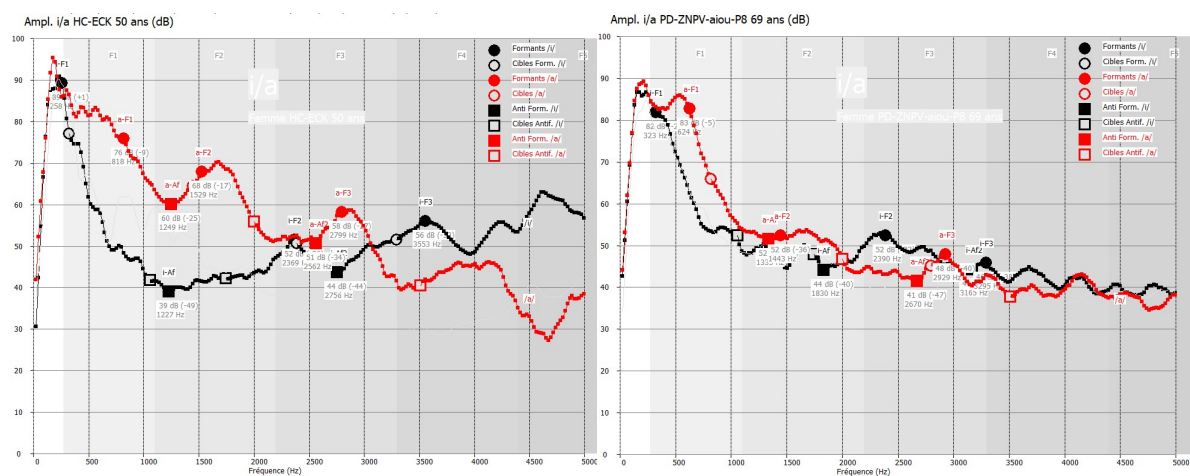


Figure 15 : Comparaison entre les profils moyens du /a/ et du /i/, parole normale à gauche, dysarthrique à droite

Analyse des indices sur la répétition de /PaTaKa/

L'épreuve de répétition de syllabes, appelée diadococinésie, donne accès à différents paramètres jugés pertinents dans le cadre de l'analyse des troubles d'articulation [Sicard 2020]. De nombreux travaux ont été publiés en lien avec ce type d'épreuve, dont la revue de littérature de [Baken 2000] ainsi que des outils dédiés [Utianski 2013].

Le logiciel DIADOLAB dispose d'un outil spécifique *Diadococinésie* permettant l'analyse objective de séries de /PaTaKa/, utilisé dans le cadre du bilan orthophonique de la parole pour différentes pathologies [Sicard 2020] dont la dysarthrie [Sicard 2020d]. Pour cette dernière, deux indicateurs sont plus particulièrement mis en avant comme indices de la sévérité: le débit de syllabes ralenti et l'irrégularité de la production des consonnes voyelles (CV).

Nous nous focalisons sur la répétition de /PaTaKa/, épreuve relativement difficile car mettant en œuvre des plosives selon trois points d'articulation différents. La segmentation des syllabes est automatisée, évitant le travail fastidieux d'isolement des groupes CV. Le calcul des indicateurs d'altération est lui aussi automatisé, permettant un accès immédiat et reproductible à l'évaluation des performances du patient. La seule part laissée à l'appréciation de l'opérateur est la sélection d'une portion de 7 secondes maximum de production sonore, où l'on cherchera à minimiser les irrégularités, reprises inspiratoires et autres hésitations.

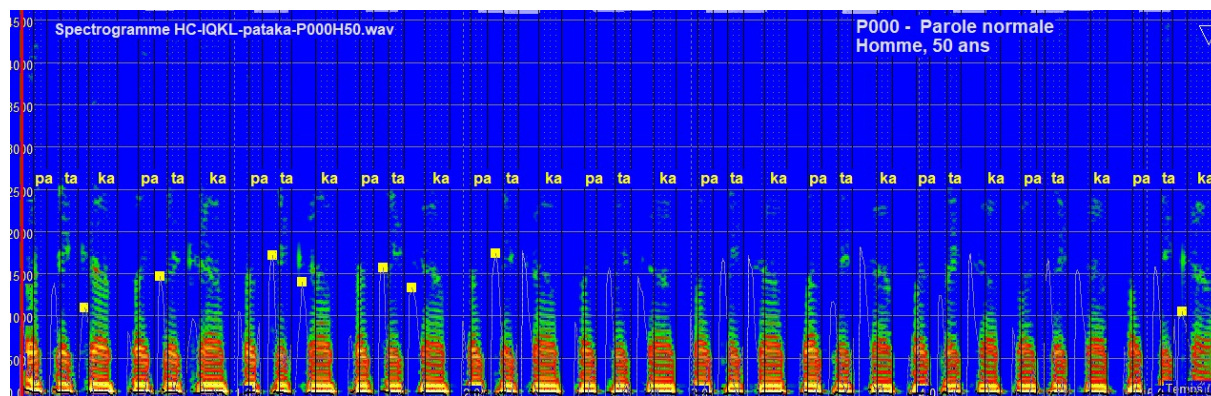
Certains corpus intègrent d'autres épreuves telles que des répétitions d'une même syllabe, encore appelée *Sequential Motion Rate* (SMR) (/papapa../ /tatata../) que nous n'étudierons pas ici.

Débit de diadococinésie

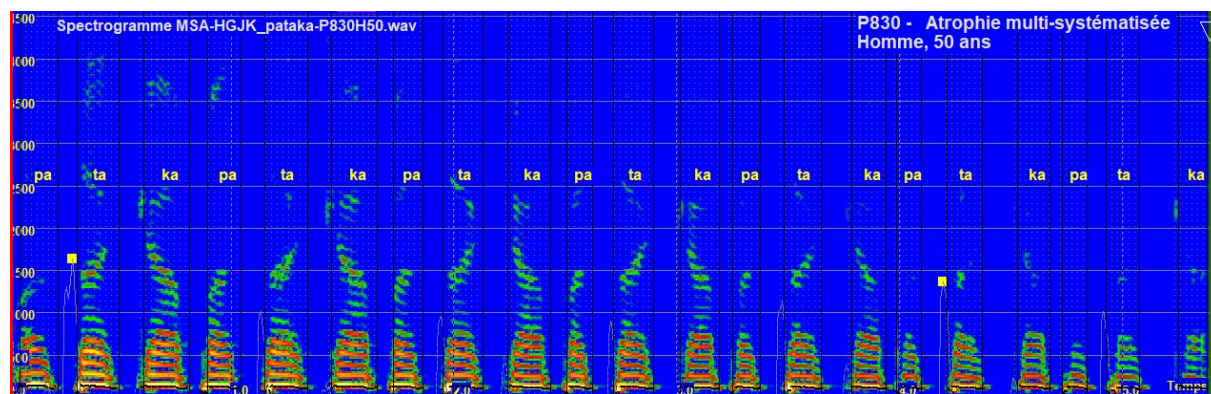
L'indicateur de débit sanctionne un rythme des syllabes plus faible que la norme selon l'âge. Pour la voix adulte de 15 à 65 ans, le débit cible est de 6 syllabes/seconde. Dans [Rusz 2015], ce paramètre est appelé *Alternating Motion Rate* - AMR. Même si le cas de débit trop rapide est parfois étudié dans la littérature, nous ne le considérons pas comme un indice significatif, du fait d'un nombre conséquent de fausses alertes correspondant à des témoins sur-efficients en termes d'articulation (enseignants, orthophonistes, professionnels de la voix).

Nous présentons à la figure 16 deux cas de diadococinésie issus du corpus Voice4PD, à une échelle de temps et de fréquence comparable, l'un de parole normale (HC-IQKL) où tous les indicateurs sont « au vert » (inférieurs à 1.0), l'autre avec un débit lent de 3.8 syllabes/secondes, (norme 6 syl./s.) avec une tendance à la décroissance de l'énergie au cours du temps.

L'étude statistique sur la valeur du débit, reportée figure 17, donne 6.2 syl./s pour HC, 5.0 pour MSA, 6.0 pour PD et 4.8 pour PSP. L'indicateur normalisé indique une valeur en dessous de la limite normal/altéré (0.8) pour HC ainsi que pour PD, tandis que MSA et PSP sont en difficulté, avec des débits parfois très lents. On retrouve des valeurs similaires à celles de [Rusz 2015] : MSA 5.45, PD 6.8, et PSP 5.7. A noter une différence importante d'approche : DIADOLAB effectue une segmentation automatique, et peut parfois fusionner des groupes CV du fait de plosives non détectées, tandis que le corpus initial a été segmenté et vérifié à la main pour [Rusz 2015].



Diadococinésie normale



Diadococinésie altérée

Figure 16 : Diadococinésie normale (HC-IQKL, en haut) et altérée (MSA-HGJK, en bas) : débit lent, tendance à la décroissance des syllabe au cours du temps pour ce 2^{ème} cas

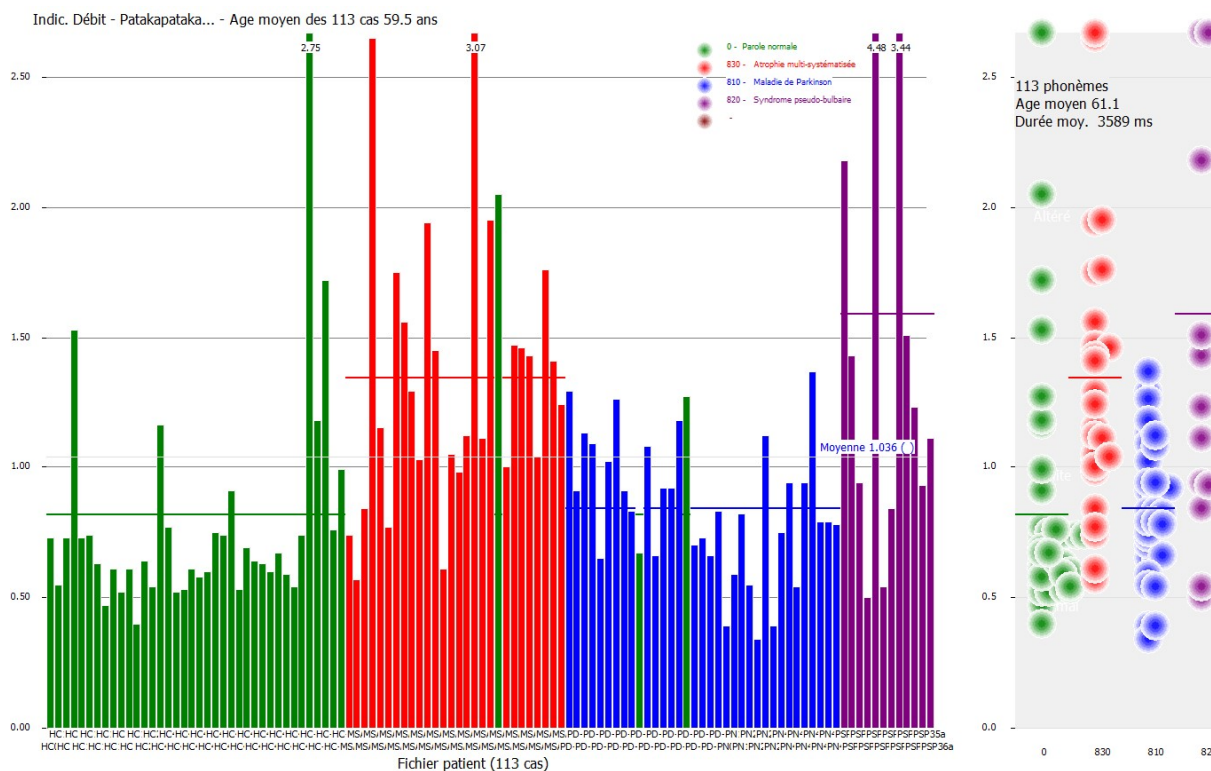


Figure 17 : Indicateur d'altération de débit sur /Pataka/, HC en vert, MSA en rouge, PD en bleu et PSP en violet

Irrégularité de la diadococinésie

L'indicateur d'irrégularité sanctionne des durées de phonation et de silence entre les syllabes qui varient au cours des 7 secondes de production de /Pataka/. On parle alors de *Irregular AMR* [Rusz 2015] avec des phases d'accélération et de décélérations, voire d'hésitation, d'interruption ou de reprise inspiratoire. L'aspect irrégularité de l'énergie sonore n'est pas étudié ici. Il fait l'objet dans DIADOLAB d'un indicateur distinct nommé « instabilité en puissance ». On retrouve dans la figure 18 des tendances déjà observées avec l'indicateur de débit : HC en dessous de 1.0, MSA significativement élevé, PD proche du groupe HC, et PSP très élevé. Ces observations concordent avec celles de [Rusz 2015] qui mesure la variabilité des clusters CV en termes de ms : PSP 51 ms, MSA 44 ms et PD 19 ms.

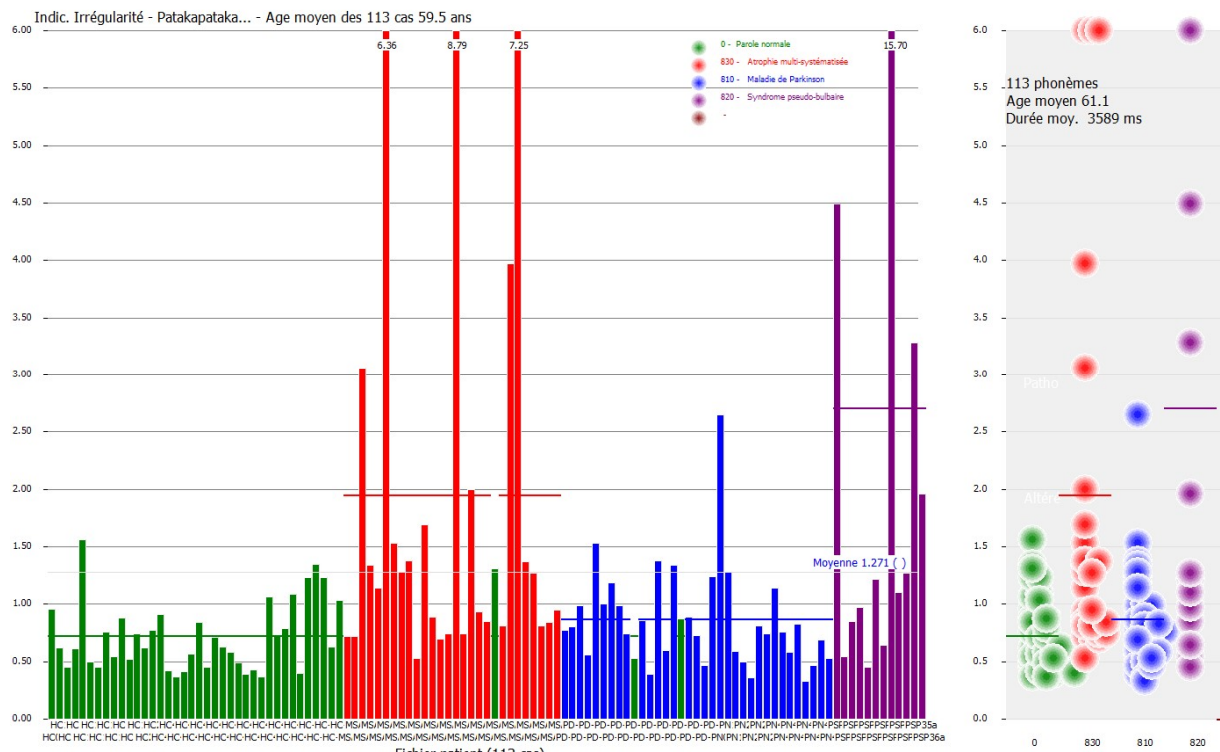


Figure 18 : Indicateur d'altération de débit sur /Pataka/, HC en vert, MSA en rouge, PD en bleu et PSP en violet

Analyse des indices sur une phrase

Nous avons sélectionné dans le corpus Voice4PD la 2^{ème} phrase de la fable de Mr Seguin, « il les perdait toutes de la même façon », qui a l'intérêt d'inclure le triangle vocalique /a,i,u/, les plosives /p/ et /t/, les fricatives /f,s/ et les extrêmes consonantiques /m,s/. Elle est courte mais un peu délicate à segmenter du fait de la sonorisation continue des portions initiales et centrales. On peut aussi lui reprocher une certaine redondance, une phonotactique un peu éloignée de la norme du français, certains processus non couverts, et une certaine pauvreté intonative (sauf l'accent sur « toutes ») doublée d'un sens relativement déprimant [Sicard 2019] (Figure 19).



Figure 19 : Qualité de la phrase étudiée dans le cadre du corpus Voice4PD sur la base de critères décrits dans [Sicard 2019]

Intonation

Différentes études suggèrent que les voix des patients atteints de maladie de Parkinson ont une intonation réduite, ce qui se caractérise par une variabilité de la fréquence fondamentale instantanée peu étendue (*monopitch*) [Holmes 2000] [Kent 2000], notamment pour PSP et PD [Rusz 2015]. Nous utilisons les ressources de l'outil *Prosodie* de DIADOLAB pour calculer F0 et sa distribution statistique, dont nous pouvons extraire l'intonation, exprimée en ½ tons. Les segments de parole utilisés correspondent au texte lu « *Monsieur Seguin n'avait jamais eu de bonheur avec ses chèvres, il les perdait toutes de la même façon* ». Il n'y a pas de segmentation associée, mais F0 n'est pas considéré dans la zone des fricatives ni pour des valeurs à très forte variabilité d'un cycle à l'autre, pour limiter la prise en compte de valeurs irréalistes.

La figure 20 donne deux exemples de lecture de texte par deux hommes, l'un HC-MLLK avec une variabilité importante de F0, ainsi que des variations d'amplitude symbolisées par des ronds de diamètres variables (contour intonatif riche), l'autre MSA-HGJK avec peu de variation de F0 et peu de variations d'amplitude (contour intonatif monotone).

Nous considérons la limite homme/femme pour le FUM à 160 Hz [Baken 2000], et 150 Hz la limite inférieure pour le FUM d'une femme. Nous observons sur la figure 21 un FUM MSA aggravé de 15 Hz environ par rapport à HC, tandis que le FUM du groupe PD s'élève au contraire de 10 Hz. Pour le groupe MSA, quatre textes lus sont en dessous de la limite.

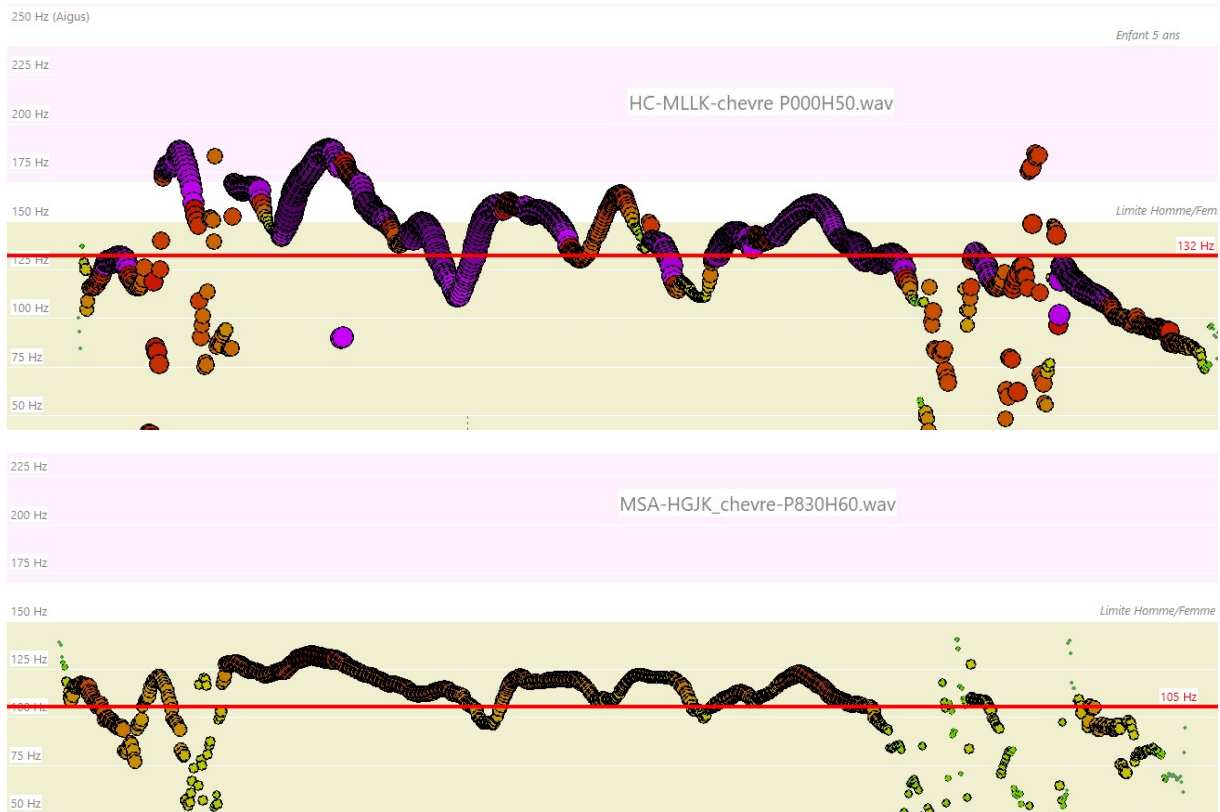


Figure 20 : Comparaison du discours intonatif sur « Monsieur Seguin n'avait jamais eu de bonheur avec ses chèvres », parole normale en haut, MSA en bas

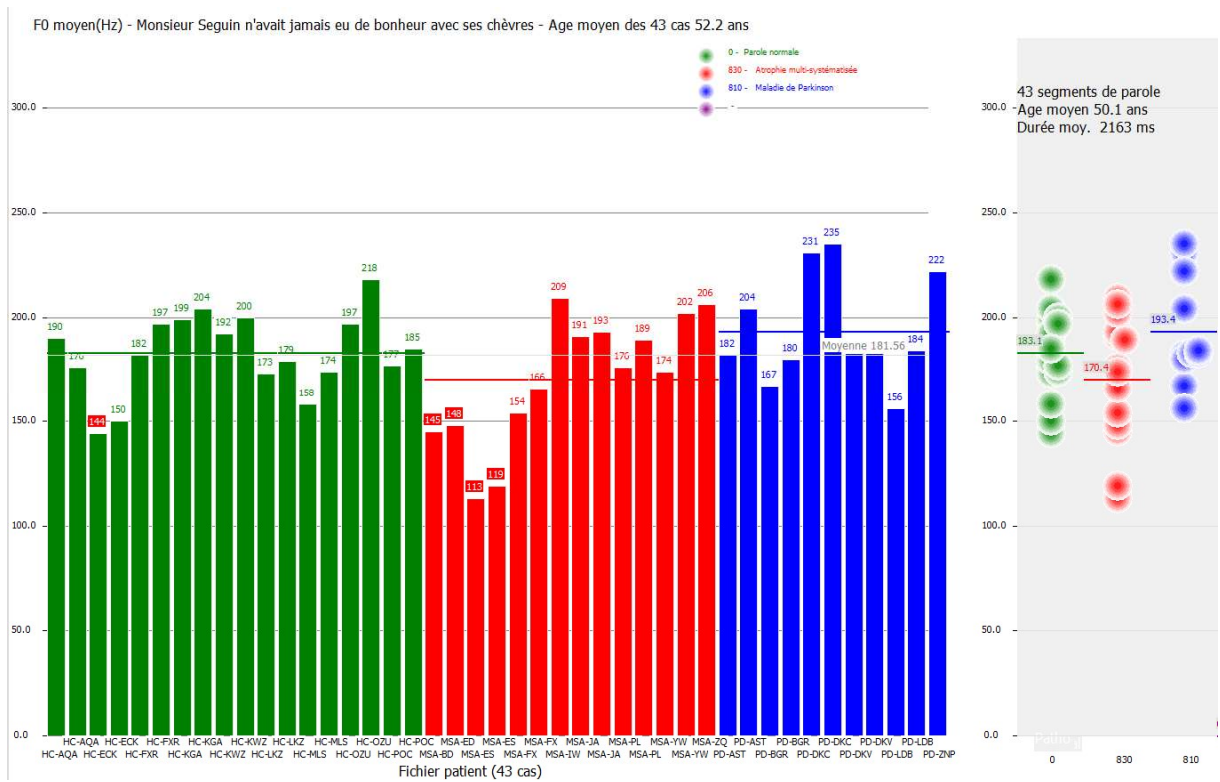


Figure 21 : Extraction du FUM pour les femmes, corpus Voice4PD sur le texte lu : légère aggravation du FUM pour MSA, légère augmentation pour PD

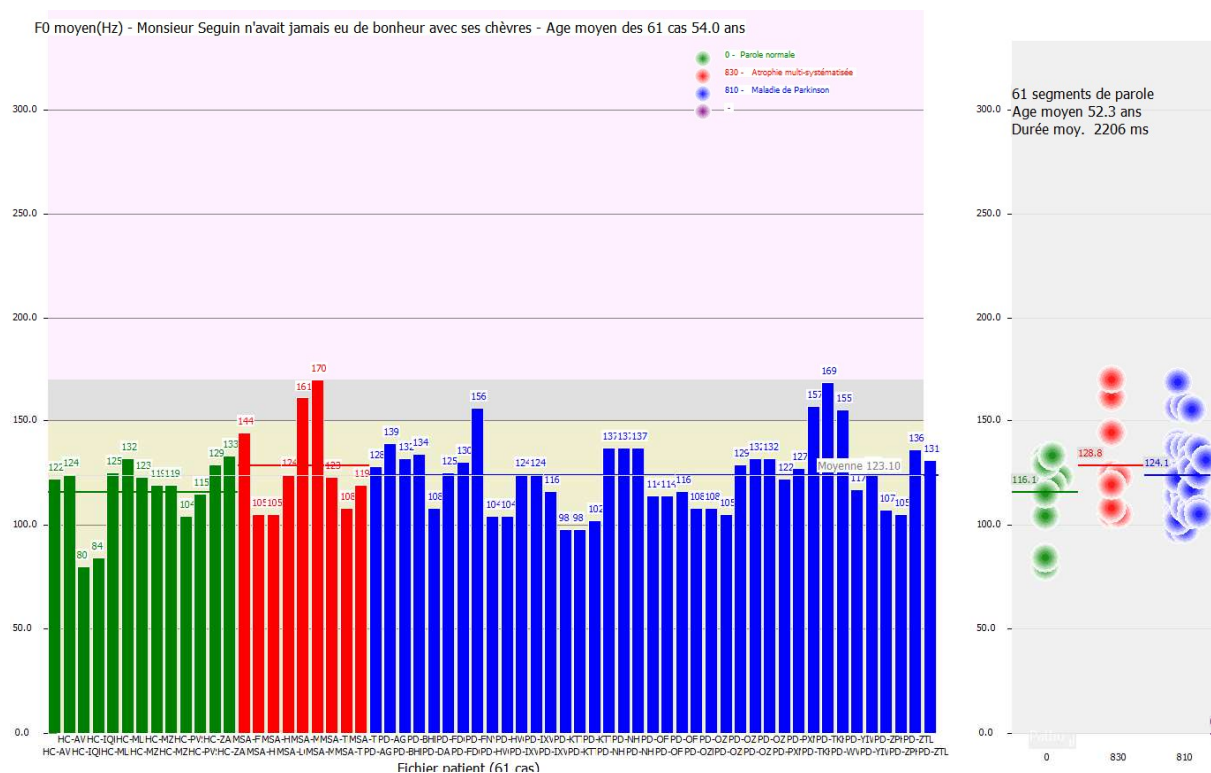


Figure 22 : Extraction du FUM pour les hommes, corpus Voice4PD sur le texte lu : légère augmentation du FUM pour MSA, très légère augmentation pour PD

Pour le groupe homme (Figure 22), nous observons un FUM MSA augmenté de 12 Hz environ par rapport à HC, soit la tendance miroir des femmes. Concernant PD, l'élévation est de 8 Hz. Ces variations sont globalement faibles.

Si l'on analyse maintenant l'intonation, c'est-à-dire la variabilité de F0 au cours de la production sonore, le contraste entre MSA et les autres groupes est assez net, comme l'illustre les figures 23 (femmes) et 24 (hommes). Il y a bien une caractéristique de discours monotone avec MSA.

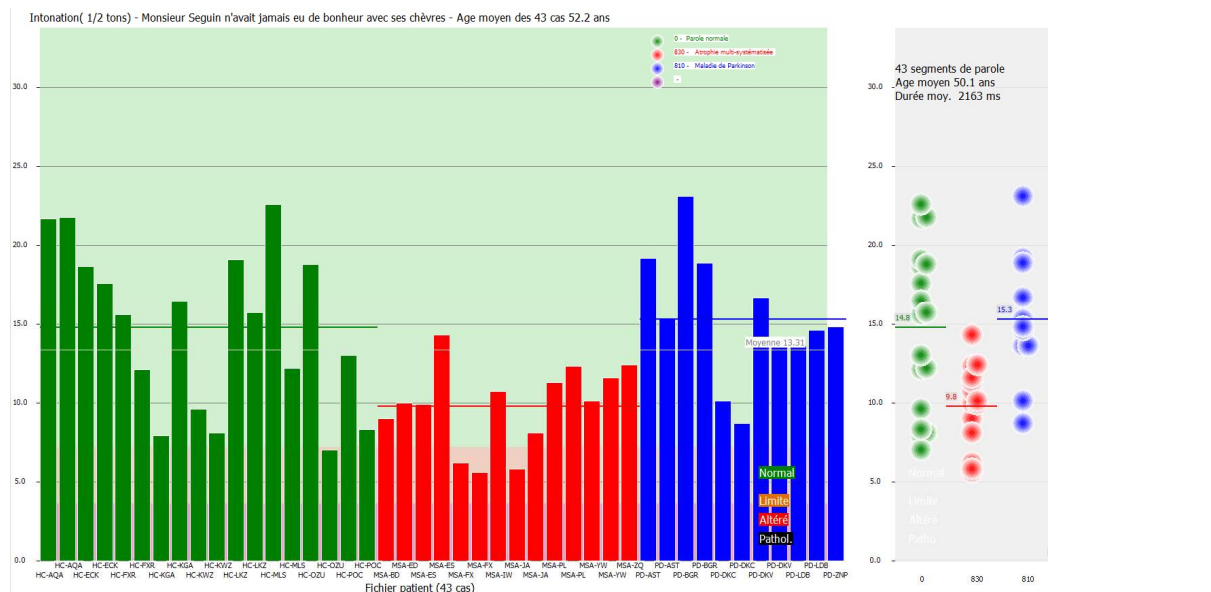


Figure 23 : Extraction de l'intonation pour les femmes, corpus Voice4PD sur le texte lu : réduction significative pour le groupe MSA

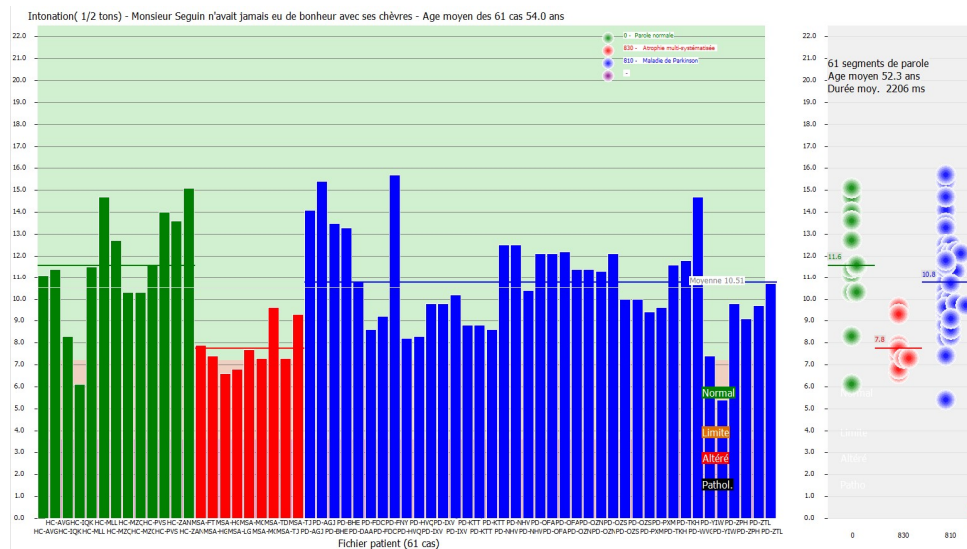


Figure 24 : Extraction de l'intonation pour les hommes, corpus Voice4PD sur le texte lu : réduction significative pour le groupe MSA

Triangle vocalique

La phrase « *Il les perdait toutes de la même façon* » de la tâche de lecture de texte du corpus Voice4PD a été segmentée afin d'isoler les trois voyelles extrêmes /i/, /ou/ et /a/, dans l'ordre d'apparition. L'analyse des voyelles dans l'espace des formants F1/F2 permet d'extraire des informations précieuses sur les capacités articulatoires du patient. La situation étudiée n'est pas comparable à l'analyse de voyelles isolées, du fait de phénomène de co-articulation avec les consonnes voisines. La représentation sous forme d'espace vocalique est corrélée à la position des articulateurs, notamment l'ouverture de la bouche (F1, axe vertical) et la position de la langue avant/arrière (F2, axe horizontal) [Sicard 2020c].

De nombreux auteurs ont analysé les caractéristiques de la parole dysarthrique dans l'espace F1/F2. On peut citer les travaux de [Sapir 2007] qui a noté une diminution de l'espace vocalique, notamment F2 du /i/ et /ou/, [Audibert 2012] qui a comparé différentes métriques de distorsion de l'espace vocalique, [Utianski 2013] qui a proposé un outil d'extraction automatique du *Vowel Space Area* (VSA) ou encore [Whitfield 2019] qui a noté une utilisation plus grande des régions centrales de l'espace des formants des patients Parkinsoniens par rapport aux locuteurs sains. Très récemment [Roland 2020] a noté une réduction de l'aire du triangle vocalique chez les patients dysarthriques, mais seulement lors du deuxième enregistrement, comme si le premier essai avait été surarticulé, mais l'effort n'a pu être maintenu au second.

L'espace vocalique permet aussi dans une certaine mesure d'objectiver des progrès dans l'articulation grâce à la prise en charge orthophonique intensive telle que la LSVT™ [Sapir 2007] [Martel Sauvageau 2015] où l'on peut constater un agrandissement de l'espace vocalique, un meilleur contraste entre les voyelles, associé aussi à un gain de puissance de la parole et une durée de phonation plus longue.

Dans DIADOLAB, nous avons implémenté une version du *Vocalic Space Area* exprimée en $\frac{1}{2}$ tons carrés. Nous séparons dans nos analyses hommes, femmes et enfants dans la mesure où les fréquences des formants sont significativement différentes dans ces 3 groupes [Sicard 2020c].



Figure 25 : Espace vocalique conforme à la norme (à gauche témoin), et significativement réduit (à droite, patient MSA)

Deux triangles vocaliques sont comparés à la figure 25. Le témoin de gauche (femme de 50 ans HC-FXRA) donne des valeurs de formants F1 & F2 pour /a,i,ou/ très proches de la moyenne des femmes (statistiques sur 100 témoins). En revanche, le patient MSA-EDKI (femme de 69 ans) a un triangle vocalique significativement moins étendu, principalement du fait d'un F1 plus bas que la norme, pouvant correspondre à une ouverture de la bouche insuffisante.

Concernant les femmes (figure 26), on peut noter une réduction de la surface du triangle vocalique principalement pour les patients atteints de MSA. En revanche, les performances des patients PD sont proches du groupe contrôle. Concernant les hommes (figure 27), on ne note pas de tendance claire, mais il faut noter le faible nombre de témoins à la date de l'étude. Ces résultats sont à mettre en parallèle avec les observations de [Whitfield 2019] sur l'intérêt d'une métrique centrée sur la densité plutôt que sur l'espace vocalique, et de [Roland 2020] qui note une réduction de l'espace vocalique sur le 2^{ème} enregistrement, qui n'est pas inclus dans le protocole Voice4PD concernant la tâche de lecture.

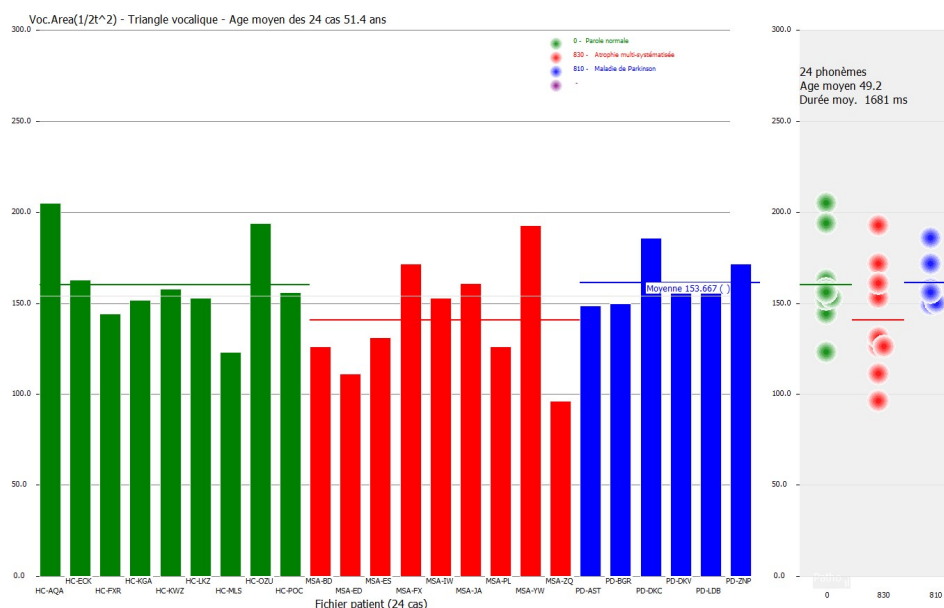


Figure 26 : Espace vocalique comparé entre femmes du groupe HC, MSA et PD du corpus Voice4PD d'après segmentation de /a,i,ou/ dans « Il les perdait toutes de la même façon »

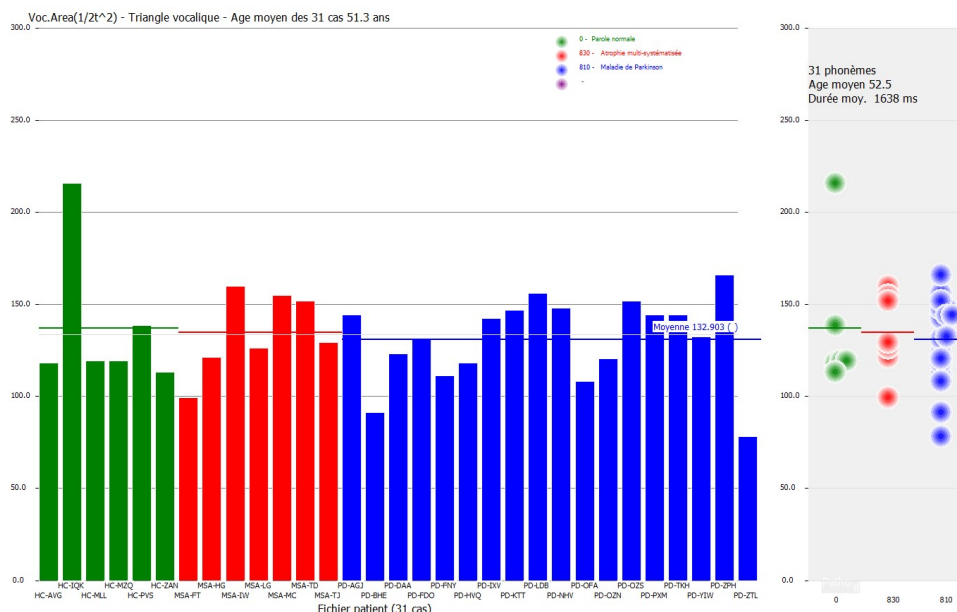


Figure 27 : Espace vocalique comparé entre hommes du groupe HC, MSA et PD du corpus Voice4PD d'après segmentation de /a,i,ou/ dans « Il les perdait toutes de la même façon »

Synthèse

Nous donnons dans le tableau ci-dessous les résultats des moyennes des 4 classes étudiées, en soulignant en gras les altérations les plus graves. Le corpus Voice4PD n'intégrant pas de cas PSP, l'analyse du monologue n'a porté que sur HC, MSA et PD pour les 2 derniers items. Les mesures normalisées (<1.0 : normal) sont notées (N). La tendance à l'altération est aussi mentionnée. La classe MSA donne les altérations les plus graves, suivie par PSP. Les différences entre HC et PD sont globalement peu importantes.

	Epreuve	Mesure	HC	MSA	PD	PSP	Altération
Voyelle tenue	/a:/	Durée de phonation (s)	15.0	10.1	10.9	13.7	↓
		Instabilité en hauteur (N)	0.6	2.2	0.8	1.9	↑
		Instabilité en amplitude (N)	0.9	1.4	1.1	1.2	↑
		Rapport Bruit/Signal (N)	1.3	2.9	1.5	1.8	↑
		Déstructuration harmonique (%)	0.5	19.0	3.9	25.3	↑
Diado-cocinésie	/Pataka/	Débit (N)	0.7	1.4	0.7	1.6	↓
Parole	Monologue	Irrégularité (N)	0.7	1.9	0.8	2.7	↑
		Intonation (1/2 ton)	14.8	9.8	15.3	(N.D)	↓
		Espace vocalique (1/2 t**2)	160	140	160	(N.D)	↓

Table 4 : Synthèse des tendances observées suite aux études statistiques

Analyses multi-dimensionnelle

L'analyse bi-dimensionnelle consiste à projeter dans un espace à deux indices les résultats de mesure, afin de tenter de séparer les performances des différentes classes de patients étudiées. Il s'agit de la première étape, simple et explicite, de classification des syndromes. Elle se révèle toutefois limitée car les zones occupées par les données patient se recouvrent. Une approche à plusieurs dimensions est

alors nécessaire, qui fait appel aux techniques de classification telles que LDA [Tharwat 2017], SVM, Random Forest, etc.

Analyses bi-dimensionnelles sur la voyelle tenue

Dans la mesure où les items tels que l'instabilité en hauteur, l'instabilité en amplitude, le rapport Bruit/Signal et la déstructuration harmonique sont relativement homogènes en termes de valeurs et ont un même sens de variations (valeur faible : normal, valeur élevée : pathologique), nous pouvons positionner les valeurs issues de l'analyse du /a:/ de chaque témoin et patient dans un espace où nous sélectionnons 2 paramètres primaires au choix. Cette possibilité est offerte dans l'outil statistiques de DIADOLAB, onglet *Corrélations*.

la zone de parole normale se trouve en bas à gauche. Plus on s'en éloigne, plus la production sonore est considérée comme altérée. Dans l'exemple de la figure 28, nous projetons les données dans un espace instabilité en hauteur en Y et instabilité en amplitude en X, où chaque point représente la réalisation d'un patient, avec les codes de couleurs identiques à ceux des études statistiques. Sans surprise, les cas normaux sont regroupés en bas à gauche, tandis que de nombreux points MSA sont dans la zone à fortes valeurs d'indicateurs. Les patients PD occupent une zone allant de la zone normale à la zone altérée, avec quelques points pathologiques.

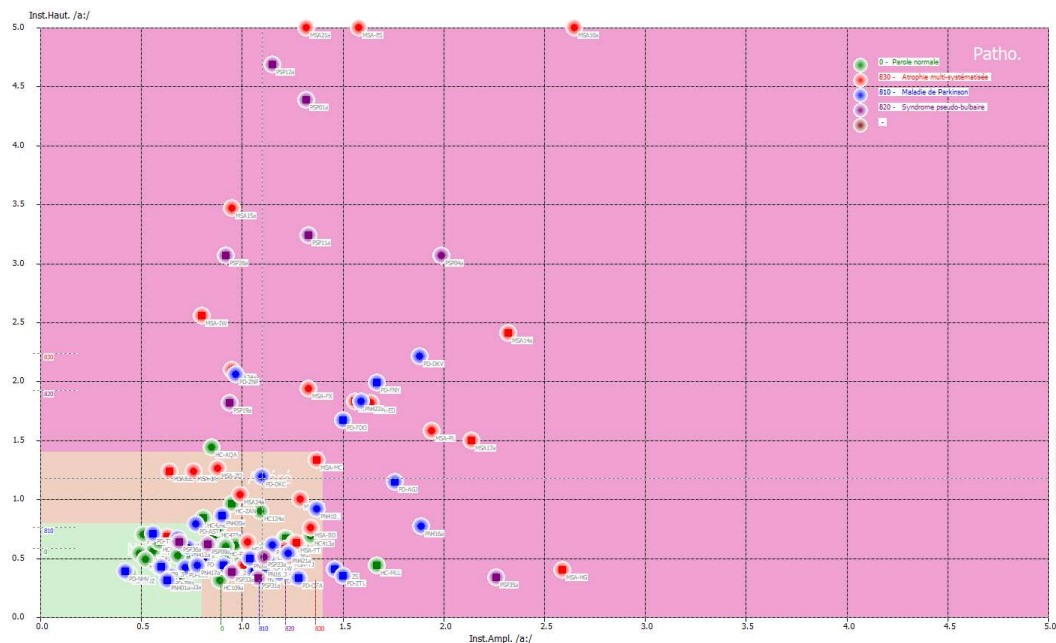


Figure 28 : Analyse bi-dimensionnelle avec l'indicateur d'instabilité en hauteur en Y et instabilité en amplitude en X basé sur la production d'une voyelle /a:/ tenue

Analyses bi-dimensionnelles sur la diadococinésie

Concernant l'épreuve de diadococinésie, une analyse similaire peut être faite, en sélectionnant cette fois deux des quatre indicateurs disponibles concernant la diadococinésie [Sicard 2020], comme par exemple dans le cas de la figure 29 l'indicateur de débit en Y, et l'indicateur d'irrégularité du débit en X, basé cette fois sur la production d'une série de /PaTaKa/ pour patients et témoins. On observe un regroupement attendu des témoins dans la zone en bas à gauche, et l'on retrouve sans surprise les cas MSA et PSP dans les zones de forte altération.

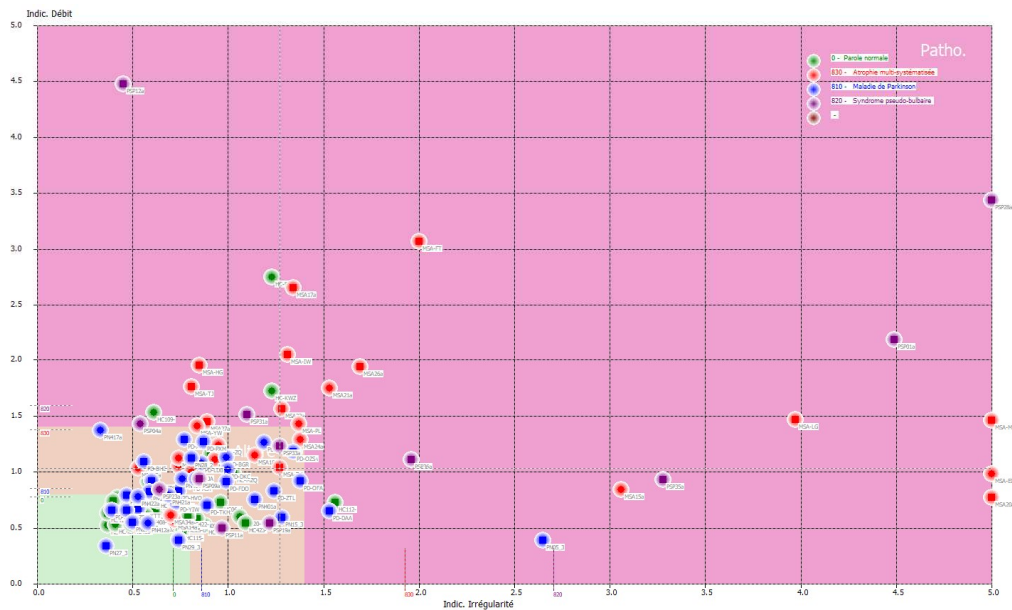


Figure 29 : Analyse bi-dimensionnelle avec l'indicateur de débit en Y et irrégularité de débit en X basé sur la production d'une série de /PaTaKa/

Analyses multi-dimensionnelle

De très nombreux chercheurs se sont penchés sur la classification des syndromes parkinsoniens dans le but d'identifier le type de pathologie d'après les caractéristiques de la voix et de la parole, parmi lesquels [Novtony 2014] [Wodzinski 2019] [Zahid 2020]. On pourra aussi se référer à l'état de l'art des indices acoustiques utilisées pour la classification par [Jeancolas 2016] en langue Française. En partant de données objectives de patients dont le diagnostic a été posé, complété par un large corpus de parole normale, les outils de classification permettent d'obtenir des scores d'identification élevés, tels que 90% entre HC et PD pour [Wodzinski 2019] ou s'approchant de 100 % entre parole normale et pathologique de manière plus générale pour [Trinh 2019] [Zahid 2020].

Un des objectifs du projet Voice4PD est, avec l'aide de statisticiens, de séparer les différentes classes HC, PD et MSA, non pas par l'approche d'analyse d'images issues des spectrogrammes suivie par [Trinh 2019] ou [Zahid 2020], mais plutôt sur la base des indices acoustiques primaires présentés plus haut. Nous disposons dans DIADOLAB d'un module permettant de combiner de manière linéaire ou non linéaire les indices entre eux, afin de projeter les données patient dans un espace plus élaboré que l'analyse bi-dimensionnelle, en espérant qu'il soit plus performant en terme de séparation des classes.

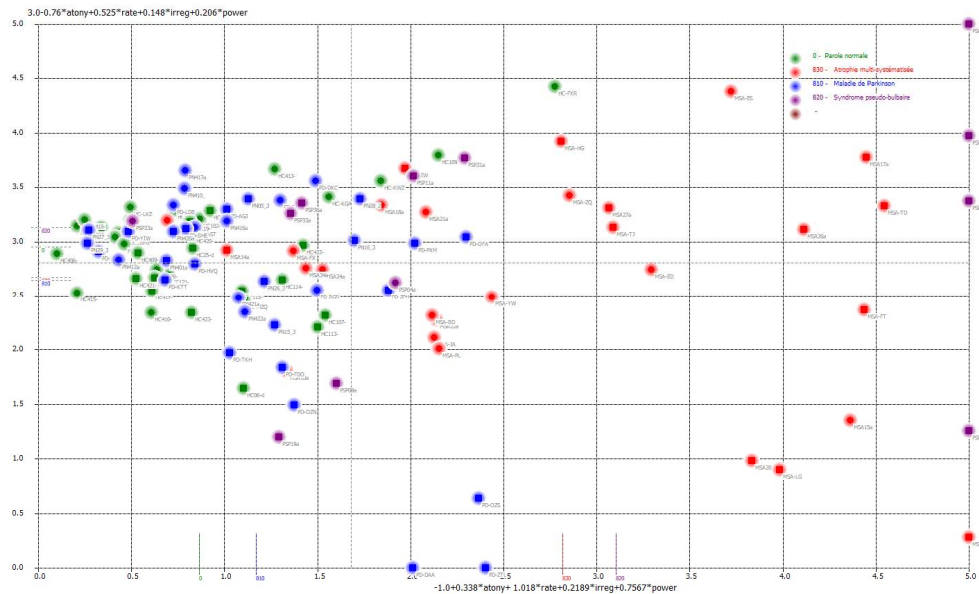


Figure 30 : Projection linéaire à base de combinaisons d'indicateurs de diadococinésie issus de l'analyse LDA

Les formules utilisées dans la figure 30 sont extraites de l'approche LDA [Tharwat 2017] sur la base de l'épreuve de diadococinésie, avec comme données primaires les 4 indicateurs d'altération : atonie, débit, irrégularité et puissance [Sicard 2020]. Le groupe normal apparaît à gauche, relativement peu différencié du groupe PD. Les groupes MSA et PSP sont situés plutôt sur la partie droite, dont un espace est quasiment exclusivement MSA.

Nous espérons dans un futur proche combiner les indices issus de la voyelle, de la diadococinésie et du discours pour mieux séparer les différentes pathologies. Il deviendra alors possible de placer les performances d'un patient dont le diagnostic est inconnu dans un espace où les différentes classes de pathologies sont nettement séparées, en vue d'une aide au diagnostic précoce.

Conclusion

Dans cet article, nous avons donné un aperçu des analyses conduites sur deux corpus importants de parole dysarthrique, dans le but de comparer les conséquences des altérations neurologiques sur les caractéristiques de la parole, en se focalisant sur trois maladies : la Maladie de Parkinson, l'Atrophie Multi-systématisée (MSA) ou la paralysie supra nucléaire progressive (PSP). Nous avons sélectionné un certain nombre d'indicateurs pouvant servir d'indice sur le degré de sévérité de la dysarthrie, en lien avec des épreuves simples telles qu'une voyelle tenue, une répétition de syllabes ou encore un texte lu. Des différences notables ont été confirmées sur l'ensemble des indices considérés, soit entre parole normale et parole dysarthrique, soit au sein des différents groupes de patients. Nous avons tenté d'illustrer les indicateurs et donner des valeurs indicatives, en tentant de faire un lien avec les résultats d'études scientifiques similaires. Nous avons aussi justifié l'intérêt d'analyses bi-dimensionnelles ou multiparamétriques pour la classification des performances selon les pathologies, dans le but d'une aide au diagnostic précoce.

Remerciements

Ce travail fait partie du projet VOICE4PD-MSA (ANR-16-CE19-0010) financé par l'ANR, dans le cadre de mon statut de chercheur associé au laboratoire IRIT du CNRS, équipe SAMOVA, partenaire du projet. Je remercie les collègues qui ont mis en place ce projet et collecté les données : Dr. Khalid Daoudi, Pr. Wassilios Meissner, Dr. Solange Milhé de Saint Victor, Dr. Anne Pavy Le Traon, Dr. Alexandra Samier-Foubert, Pr. Olivier Rascol, Pr. Virginie Woisard et les équipes des CHU de Bordeaux et de Toulouse

pour le recueil des données du corpus d'une grande richesse et qualité. Nous remercions également Dr. Julie Mauclair et Biswajit Das pour le pré-traitement et la mise à disposition des données.

Nous remercions chaleureusement Jan Ruzs pour la qualité, l'originalité et l'ampleur de ses travaux dans le domaine du diagnostic différentiel de la dysarthrie. L'accès au corpus de parole nous a permis de tester de nombreux prototypes et progresser dans les analyses statistiques de parole pathologique.

Nous saluons aussi les efforts de mise en archive ouvertes d'un très grand nombre de résultats scientifiques, en particulier dans le domaine de la dysarthrie, ce qui permet une diffusion très large, simple et sans droit d'accès, autorisant de ce fait des analyses comparatives et méta-analyses qui accélèrent ainsi leur mise en application clinique. Enfin, nous remercions l'ensemble des orthophonistes, étudiants et chercheurs qui nous ont accordé leur confiance en utilisant nos méthodologies, approches et outils dans le cadre de leur pratique clinique ou de leurs travaux scientifiques.

A propos de l'auteur



Etienne SICARD est professeur à l'INSA Toulouse en électronique, informatique et traitement du signal. Il est directeur de recherches de l'équipe ERU 46 sur la parole pathologique au Laboratoire LURCO et chercheur associé à l'IRIT dans le cadre du projet ANR Voice4PD sur le diagnostic différentiel des Syndromes Parkinsoniens. Etienne SICARD est co-auteur des logiciels VOCALAB et DIADOLAB pour le bilan et la rééducation orthophonique de la voix et la parole, ainsi que MICROWIND et IC-EMC en lien avec les circuits intégrés. Il a co-écrit une vingtaine d'ouvrages et plus de 200 publications scientifiques dans le domaine de l'analyse de la voix et parole, des circuits intégrés, et de la compatibilité électromagnétique. Il a été nommé en 2006 *Distinguished Lecturer* de la

société savante IEEE.

Site : www.etienne-sicard.fr

Email : etienne.sicard@insa-toulouse.fr

Glossaire

- AD Ataxic Dysarthria
- AMR : Alternating motion rate
- AMS : Atrophie Multi-Systématisée
- ALS: Amyotrophic Lateral Sclerosis
- AOS: Apraxia of Speech
- APS: Atypical Parkinsonian Syndromes
- CA: Cerebellar Ataxia
- CD : Choreatic Dysarthria
- CV : Consonne Voyelle
- CCV : Consonne consonne voyelle
- DYS: Dysarthria
- DD : dystonic Dysarthria
- DDK : Diadochokinetic
- FD : Flaccid Dysarthria
- HC : Healthy control
- HOD : hypokinetic Dysarthria
- HYD : Hyperkinetic Dysarthria
- HD : Huntington's disease
- HNR : Harmonic Noise Ratio
- IPD: Idiopathic Parkinson's disease

- LDA : Linear Discriminant Analysis
- LURCO : Laboratoire Unadreo de Recherches Clinique Orthophonique
- MD : Mixed Dysarthria
- MDVP : Multi-Dimensional Voice Program
- MSA : Multiple system atrophy
- MSA-P : Multiple system atrophy dominant parkinsonism
- MSA-C : Multiple system atrophy dominant cerebellar ataxia
- NHR : Noise-Harmonics Ratio
- NINDS : National Institute of Neurological Disorders and Stroke
- PD : Parkinson's Disease
- PRAAT : logiciel d'analyse de la parole « doing phonetics by computer »
- PSP: progressive supranuclear palsy
- S2H : Sub-harmonics to Harmonics ratio
- SP : Syndromes Parkinsoniens
- SD : spastic Dysarthria
- SDCS : speech disorders classification system
- SMR : Sequential motion rate
- SP : syndromes Parkinsoniens
- SHI : Speech Handicap Index
- SVM : Support Vector Machine
- UPDRS : Unified Parkinson's Disease Rating Scale
- VOT : Voice Onset Time
- VHI : Voice Handicap Index

Références

[Antolik 2013] Antolík, T., & Fougeron, C. (2013, August). Consonant distortions in dysarthria due to Parkinson's disease, Amyotrophic Lateral Sclerosis and Cerebellar Ataxia. In Interspeech 2013.

[Audibert 2012] Audibert, N., & Fougeron, C. (2012, June). Distorsions de l'espace vocalique: quelles mesures? Application à la dysarthrie. In Proceedings of the Joint Conference JEP-TALN-RECITAL 2012, volume 1: JEP (pp. 217-224).

[Auzou 2009] Auzou, P. (2009). Définition et classifications des dysarthries. Rééducation orthophonique, 47(239), 31-42.

[Auzou 2019] Auzou, P., & Rolland-Monnoury, V. (2019). BECD: batterie d'évaluation clinique de la dysarthrie. Ortho édition.

[Baken 2000] Baken, R. J., & Orlikoff, R. F. (2000). Clinical measurement of speech and voice. Cengage Learning.

[Barbera 2016] Barbéra O., Frenay C. (2016)., "Acquisition d'une population adulte tout venant pour la caractérisation de l'évolution de la voix au cours du vieillissement par le logiciel VOCALAB : questionnement des limites entre pathologie et normalité.", Ecole d'orthophonie de Lyon.

[Boersma 2019] Boersma, Paul & Weenink, David (2019). Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Version 6.1.06, retrieved 8 November 2019 from <http://www.praat.org/>

[Bruckl 2018] Brückl, M., Ghio, A., & Viallet, F. (2018). Measurement of Tremor in the Voices of Speakers with Parkinson's Disease. Procedia Computer Science, 128, 47-54.

- [Bruckl 2021] Bruckl ; M. (2021) tremor3.01. A Praat-script to measure vocal tremor [Computer program], Version 3.01 , <http://www.brykl.de>
- [Buder 2000] Buder, E. H. (2000). Acoustic analysis of voice quality: A tabulation of algorithms 1902–1990. *Voice quality measurement*, 119-244.
- [Cairns 1996] Cairns, D. A., Hansen, J. H., & Riski, J. E. (1996). A noninvasive technique for detecting hypernasal speech using a nonlinear operator. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 43(1), 35.
- [Critchley 1981] Critchley, E. M. (1981). Speech disorders of Parkinsonism: a review. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 44(9), 751-758.
- [Darlet 1969] Darley, F. L., Aronson, A. E., & Brown, J. R. (1969). Differential diagnostic patterns of dysarthria. *Journal of speech and hearing research*, 12(2), 246-269.
- [Das 2019] Das, B., Daoudi, K., Klempir, J., & Ruzs, J. (2019, May). Towards disease-specific speech markers for differential diagnosis in Parkinsonism. In *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 5846-5850). IEEE.
- [De Angelis 1997] De Angelis, E. C., et al. (1997). Effect of voice rehabilitation on oral communication of Parkinson's disease patients. *Acta Neurologica Scandinavica*, 96(4), 199-205.
- [DIADOLAB] Sicard, E. & Menin-Sicard, A. (2020). DIADOLAB, bilan et rééducation orthophonique de la parole [Computer program]. Version 3.1 <http://www.diadolab.org>
- [Duffy 2019] Duffy, J. R. (2019). *Motor Speech Disorders 4th edition: Substrates, Differential Diagnosis, and Management*. Elsevier Health Sciences.
- [Eckel 1981] Eckel, F. C., & Boone, D. R. (1981). The s/z ratio as an indicator of laryngeal pathology. *Journal of speech and hearing disorders*, 46(2), 147-149.
- [Gilman 2008] Gilman, S., et al. (2008). Second consensus statement on the diagnosis of multiple system atrophy. *Neurology*, 71(9), 670-676.
- [Ghio 2012] Ghio, A., et al. (2012). How to manage sound, physiological and clinical data of 2500 dysphonic and dysarthric speakers?. *Speech Communication*, 54(5), 664-679.
- [Ghio 2020] Ghio, A., Lalain, M., Rebourg, M., Fredouille, C., & Woisard, V. (2020). Evaluation de l'intelligibilité de patients avec traitement du cancer des cavités orales et pharyngales. Volume 1: Journées d'Études sur la Parole (pp. 271-279). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02798549/>
- [Holmes 2000] J. Holmes, R., M. Oates, J., J. Phyland, D., & J. Hughes, A. (2000). Voice characteristics in the progression of Parkinson's disease. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 35(3), 407-418.
- [Hlavnicka 2017] Hlavnicka, J., et al. (2017). Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- [Jeancolas 2016] Jeancolas, L., Petrovska-Delacrétaz, D., Lehericy, S., Benali, H., & Benkelfat, B. E. (2016). L'analyse de la voix comme outil de diagnostic précoce de la maladie de Parkinson: état de l'art. *CORESA 2016: 18e Edition COMpressions et REprésentation des Signaux Audiovisuels*, 113-121.

[Kacha 2017] Kacha, A., Mertens, C., Grenez, F., Skodda, S., & Schoentgen, J. (2017). On the harmonic-to-noise ratio as an acoustic cue of vocal timbre of Parkinson speakers. *Biomedical Signal Processing and Control*, 37, 32-38.

[Kataoka 2001] Kataoka, R., Warren, D. W., Zajac, D. J., Mayo, R., & Lutz, R. W. (2001). The relationship between spectral characteristics and perceived hypernasality in children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 2181-2189.

[Kent 1982] Kent, R. D., & Rosenbek, J. C. (1982). Prosodic disturbance and neurologic lesion. *Brain and language*, 15(2), 259-291.

[Kent 1999] Kent, R. D., Vorperian, H. K., & Duffy, J. R. (1999). Reliability of the Multi-Dimensional Voice Program for the analysis of voice samples of subjects with dysarthria. *American journal of speech-language pathology*, 8(2), 129-136.

[Kent 2000] Kent, R. D., Kent, J. F., Duffy, J. R., Thomas, J. E., Weismer, G., & Stuntebeck, S. (2000). Ataxic dysarthria. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 43(5), 1275-1289.

[Kent 2003] Kent, R. D., Vorperian, H. K., Kent, J. F., & Duffy, J. R. (2003). Voice dysfunction in dysarthria: application of the Multi-Dimensional Voice Program™. *Journal of communication Disorders*, 36(4), 281-306.

[Kollensperger 2008] Köllensperger, M., et al. (2008). Red flags for multiple system atrophy. *Movement disorders: official journal of the Movement Disorder Society*, 23(8), 1093-1099.

[Kowalska-Taczanowska 2020] Kowalska-Taczanowska, R., Friedman, A., & Kozirowski, D. (2020). Parkinson's disease or atypical parkinsonism? The importance of acoustic voice analysis in differential diagnosis of speech disorders. *Brain and Behavior*, 10(8), e01700.

[Litvan 1996] Litvan, I., et al. (1996). Clinical research criteria for the diagnosis of progressive supranuclear palsy (Steele-Richardson-Olszewski syndrome): report of the NINDS-SPSP international workshop. *Neurology*, 47(1), 1-9.

[Maryn 2009] Maryn, Y., Corthals, P., De Bodt, M., Van Cauwenberge, P., Deliyski, D. (2009). Perturbation measures of voice: a comparative study between multi-dimensional voice program and Praat. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 61(4), 217-226

[MDVP] Kay Pentax, "Multi-Dimensional Voice Program (MDVP), Model 5105" (Version 2.6.2), [Computer program].

[Meissner 2019] Meissner, W. G., et al. (2019). Multiple system atrophy: recent developments and future perspectives. *Movement Disorders*, 34(11), 1629-1642.

[Menin-Sicard 2016] Menin-Sicard, A., & Sicard, E. (2016). Evaluation et réhabilitation de la voix : Approche clinique et objective. Chapitre 2 « Méthodologie de l'évaluation de la voix ». De Boeck Supérieur.

[Menin-Sicard 2021] Menin-Sicard, A., Sicard, E., Michel, S. Grenier, C., Barelang, T. (2021) Méthodologie de la segmentation pour l'évaluation objective des compétences phonologiques avec DIADOLAB3. <https://hal.archives-ouvertes.fr>

[Miller 2017] Miller N., (2017). Utility and accuracy of perceptual voice and speech distinctions in the diagnosis of Parkinson's disease, PSP and MSA-P. *Neurodegener Dis Manag.* 2017 Jun;7(3):191-203.

[Nemmi 2019] Nemmi, F., et al. (2019). A totally data-driven whole-brain multimodal pipeline for the discrimination of Parkinson's disease, multiple system atrophy and healthy control. *NeuroImage: Clinical*, 23, 101858.

[Novotny 2014] Novotný, M., Rusz, J., Čmejla, R., & Růžička, E. (2014). Automatic evaluation of articulatory disorders in Parkinson's disease. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 22(9), 1366-1378.

[Novotny 2016] Novotny, M., et al. (2016). Hypernasality associated with basal ganglia dysfunction: evidence from Parkinson's disease and Huntington's disease. *PeerJ*, 4, e2530.

[Novotny 2017] Novotný, M., et al. (2017). Acoustic Evaluation of Nasality in Cerebellar Syndromes. In *INTERSPEECH* (pp. 3132-3136).

[Parkinson 1817] Parkinson, J. (1817). *An Essay on the Shaking Palsy* (London: Sherwood, Neely and Jones).

[Parsa 2001] Parsa, V., Jamieson, D.G. (2001). Acoustic discrimination of pathological voice: sustained vowels versus continuous speech. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 44(2), 327–339.

[Payan 2011] Payan, C. A., et al. (2011). Disease severity and progression in progressive supranuclear palsy and multiple system atrophy: validation of the NNIPPS–Parkinson Plus Scale. *PLoS One*, 6(8), e22293.

[Pinto 2010] Pinto, S., Ghio, A., Teston, B., & Viallet, F. (2010). La dysarthrie au cours de la maladie de Parkinson. Histoire naturelle de ses composantes: dysphonie, dysprosodie et dysarthrie. *revue neurologique*, 166(10), 800-810.

[Roland 2020] Roland, V., Delvaux, V., Huet, K., Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2020) Imprecision of vowel production as a potential subclinical marker in Parkinson's disease. 12th International Seminar on Speech Production. <https://issp2020.yale.edu>

[Rolland-Monnoury 2009] Rolland-Monnoury, V. (2009). Prise en charge de la dysarthrie parkinsonienne Lee Silverman Voice Treatment. *Rééducation orthophonique*, 47(239), 93-104.

[Rousteau 2017] Rousteau, G., & Talmant, J. C. (2017). L'évaluation des insuffisances vélo-pharyngées par l'aérophonoscope: essai de classification et incidences thérapeutiques. *Rev Laryngol Otol Rhinol*, 138(4), 143-15

[Rusz 2011] Rusz, J., et al. (2011). Acoustic analysis of voice and speech characteristics in early untreated Parkinson's disease. *Acoustic Analysis of Voice and Speech Characteristics in Early Untreated Parkinson's Disease*, 181-184.

[Rusz 2015] Rusz, J., et al. (2015). Speech disorders reflect differing pathophysiology in Parkinson's disease, progressive supranuclear palsy and multiple system atrophy. *Journal of neurology*, 262(4), 992-1001.

[Sachin 2008] Sachin, S., et al. (2008). Clinical speech impairment in Parkinson's disease, progressive supranuclear palsy, and multiple system atrophy. *Neurology India*, 56(2), 122.

[Sapir 2007] Sapir, S., Spielman, J. L., Ramig, L. O., Story, B. H., & Fox, C. (2007). Effects of intensive voice treatment (the Lee Silverman Voice Treatment [LSVT]) on vowel articulation in dysarthric

individuals with idiopathic Parkinson disease: acoustic and perceptual findings. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, open access ASHA

[Saxon 2020] Saxon, M., Tripathi, A., Jiao, Y., Liss, J. M., & Berisha, V. (2020). Robust estimation of hypernasality in dysarthria with acoustic model likelihood features. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 28, 2511-2522.

[Sicard 2013] Sicard, E., & Menin-Sicard, A. (2013). Implémentation dans VOCALAB d'indicateurs objectifs de la qualité de la voix dans le cadre de l'évaluation de la voix. *Rééducation orthophonique*, (254), 23-27. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00836912/>

[Sicard 2013b] Sicard, E., Perriere, S., & Menin-Sicard, A. (2013). Développement et validation d'outils de mesures de la qualité de la voix dans le logiciel VOCALAB. *Glossa*, (113), pp-63. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00977731/>

[Sicard 2017] Sicard, E., Menin-Sicard, A., Daumet, M., Perriere, S., & Barbera, O. (2017). Evaluation de la voix avant/après suivi orthophonique-à propos de la méthodologie d'évaluation et de la fiabilité des mesures chiffrées. XVII^e Rencontres internationales d'orthophonie, Paris 2017, Actes publiés chez Ortho-Editions. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02424850/>

[Sicard 2019] Sicard, E., & Menin-Sicard, A. (2019). Analyse de la qualité des phrases pour un bilan objectif de la parole. INSA Toulouse, LURCO/UNADREO. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02389764/>

[Sicard 2020] Sicard, E., & Menin-Sicard, A. (2020). La diadococinésie et son application en orthophonie clinique. INSA Toulouse, LURCO/UNADREO. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02512856/>

[Sicard 2020b] Sicard, E., & Menin-Sicard, A. (2020). Analyse d'une phrase type dans le cadre du bilan orthophonique de la parole. INSA Toulouse, LURCO/UNADREO. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02568392/>

[Sicard 2020c] Sicard, E., & Menin-Sicard, A. (2020). Le triangle vocalique et son application en contexte orthophonique. INSA Toulouse, LURCO/UNADREO. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02504513/>

[Sicard 2020d] Sicard, E., & Menin-Sicard, A. (2020). DIADOLAB: bilan court et objectif de la dysarthrie dans le cadre de la prise en charge orthophonique. In *Journées Nationales de Neurologie en langue Française*, Lyon Avril 2020. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02396136/>

[Sicard 2021] Sicard, E., Menin-Sicard, A., Michel, S., Rousteau, G. (2021). Profils types des oppositions orales-nasales dans le contexte de la rééducation orthophonique. HAL archives ouvertes.

[Tharwat 2017] Tharwat, A., (2017). Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *Ai Communications*. 30. 169-190,. 10.3233/AIC-170729.

[Teixeira 2014] Teixeira, J. P., & Fernandes, P. O. (2014). Jitter, Shimmer and HNR classification within gender, tones and vowels in healthy voices. *Procedia technology*, 16, 1228-1237.

[Tykalova 2017] Tykalova, T., et al. (2017). Distinct patterns of imprecise consonant articulation among Parkinson's disease, progressive supranuclear palsy and multiple system atrophy. *Brain and language*, 165, 1-9.

[Tsanas 2012] Tsanas, A., Little, M. A., McSharry, P. E., Spielman, J., & Ramig, L. O. (2012). Novel speech signal processing algorithms for high-accuracy classification of Parkinson's disease. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 59(5), 1264-1271.

[Utianski 2013] Utianski, R., Sandoval, S., Lehrer, N., Berisha, V., & Liss, J. (2013). Speech assist: An augmentative tool for practice in speech-language pathology. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5).

[Viallet 2012] Viallet, F., et al. (2002, April). Effects of pharmacological versus electrophysiological treatments on parkinsonian dysprosody. In *Speech Prosody* (pp. 679-682). Laboratoire Parole et Langage.

[Voice4PD] <https://voice4pd-msa.inria.fr/>

[VOCALAB] Sicard, E. & Menin-Sicard, A. (2020). VOCALAB, bilan et rééducation orthophonique de la voix [Computer program]. Version 4.1 <http://www.vocalab.org>

[Wodzinski 2019] Wodzinski, M., Skalski, A., Hemmerling, D., Orozco-Arroyave, J. R., & Nöth, E. (2019, July). Deep learning approach to Parkinson's disease detection using voice recordings and convolutional neural network dedicated to image classification. In *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 717-720). IEEE.

[Xue 2001] Xue S. A., Deliyiski D. (2001). « Effects of aging on selected acoustic voice Parameters: preliminary normative data and Educational implications ». *Educational Gerontology*, 27:159–168.

[Yang 2020] Yang, S., et al. (2020). The physical significance of acoustic parameters and its clinical significance of dysarthria in parkinson's disease. *Nature Research. Scientific Reports*, 10(1), 1-9.

[Zahid 2020] Zahid, L., et al. (2020). A Spectrogram-Based Deep Feature Assisted Computer-Aided Diagnostic System for Parkinson's Disease. *IEEE Access*, 8, 35482-35495.