



HAL
open science

La diadococinésie et son application en orthophonique clinique

Etienne Sicard, Anne Menin-Sicard

► **To cite this version:**

Etienne Sicard, Anne Menin-Sicard. La diadococinésie et son application en orthophonique clinique. [Rapport de recherche] INSA 2020, INSA : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 2020. hal-02512856

HAL Id: hal-02512856

<https://hal.science/hal-02512856v1>

Submitted on 20 Mar 2020

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.

La diadococinésie et son application en orthophonie clinique

Etienne Sicard (1,2,3), Anne Menin-Sicard (2)

INSA-GEI, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse (1)

Laboratoire LURCO www.lurco.unadreo.org (2)

Laboratoire IRIT www.irit.fr (3)

etienne.sicard@insa-toulouse.fr

anne.sicard2@orange.fr

Résumé :

Dans cet article, nous abordons l'analyse de la répétition rapide de syllabes dans le contexte du bilan et de la prise en charge orthophonique de la parole altérée ou pathologique. Après avoir donné quelques définitions et listé les épreuves proposées dans divers protocoles, nous analysons différentes sources bibliographiques afin d'extraire des données de référence concernant le débit, la régularité, et les marqueurs permettant de différencier la parole normale de la parole pathologique. Nous citons aussi différentes approches logicielles sur l'analyse de la diadococinésie, et donnons quelques recommandations sur les aspects matériels, conditions d'enregistrement, protocole et pré-traitement des données dans le cadre de la pratique clinique orthophonique. Nous détaillons ensuite les principes de calcul de quatre indicateurs d'altération de la diadococinésie que nous illustrons au travers d'exemples, puis étudions les indicateurs sur un groupe d'une centaine de témoins. Par le biais d'analyses avant/après prise en charge orthophoniques, nous donnons des évaluations objectives des progrès accomplis par le patient. Nous proposons enfin des analyses statistiques par indicateur, ou en combinant deux ou plusieurs indicateurs en vue d'une aide à la classification des troubles de la parole.

Mots clé : orthophonie, évaluation de la parole, diadococinésie, répétition de syllabes, évaluation objective, altération de la diadococinésie, classification des troubles

Introduction

Parmi les épreuves possibles pour l'évaluation des troubles de la parole, et notamment des troubles de l'articulation, la répétition rapide de syllabes (Diadococinésie) s'avère particulièrement pertinente car elle permet, à l'aide d'outils informatiques, une analyse rapide du débit, de la précision articulaire, de l'endurance et de la régularité de l'enchaînement des phonèmes. Parmi les formes les plus étudiées dans la littérature [Baken 2000], on peut citer les répétitions de /pa/, ou les enchaînements de /PaTaKa/. De nombreux auteurs se sont intéressés à la diadococinésie dans la mesure où les performances observées sont significativement moins bonnes pour la parole altérée que pour la parole normale. Parmi les pathologies les plus étudiées, on trouve les troubles de la parole, la dyspraxie verbale, les dysarthries, la surdité ou la Maladie de Parkinson.

Dans cet article, nous avons souhaité rappeler le type d'analyses possibles à l'aide de la diadococinésie (Partie 1), donner au travers d'une sélection d'articles des informations de référence sur le débit, les erreurs communes, les outils et protocoles (partie 2), avant de proposer une approche en lien avec la pratique orthophonique clinique (partie 3), en détaillant notamment quatre indicateurs d'altération

de la diadococinésie. Enfin (partie 4), nous proposons diverses analyses comparatives, soit sous forme d'études de performances avant/après prise en charge orthophonique, soit d'études statistiques sur des groupes de cas, en particulier divers syndromes parkinsoniens.

Définitions

La diadococinésie, appelée en Anglais *Diadochokinetic* (avec l'acronyme DDK), consiste en une répétition de syllabes, souvent à débit rapide, d'une durée de quelques secondes. On peut distinguer :

- La répétition alternative de syllabes différentes, encore appelé *Alternating Motion Rate* (AMR) : /patakapataka.. /, /badégobadégo../
- La répétition de la même syllabe, encore appelée *Sequential Motion Rate* (SMR) : /papapa../ /tatata../

Cette épreuve a pour but de mesurer la capacité d'un patient à répéter une combinaison consonne-voyelle (C-V) ou d'autres groupes (CCV comme dans /Clacla.. / ou /TraTra.. /) avec des lieux d'articulation différents: bilabial, alvéolaire et vélaire, etc (Figure 1). Elle évalue le contrôle phono-articulatoire, la tonicité occlusive (force d'occlusion) ainsi que le rendement phonatoire global (durée, reprises inspiratoires). Elle rend compte des capacités de coordination et de programmation motrice de la parole à un rythme propre au débit moyen.

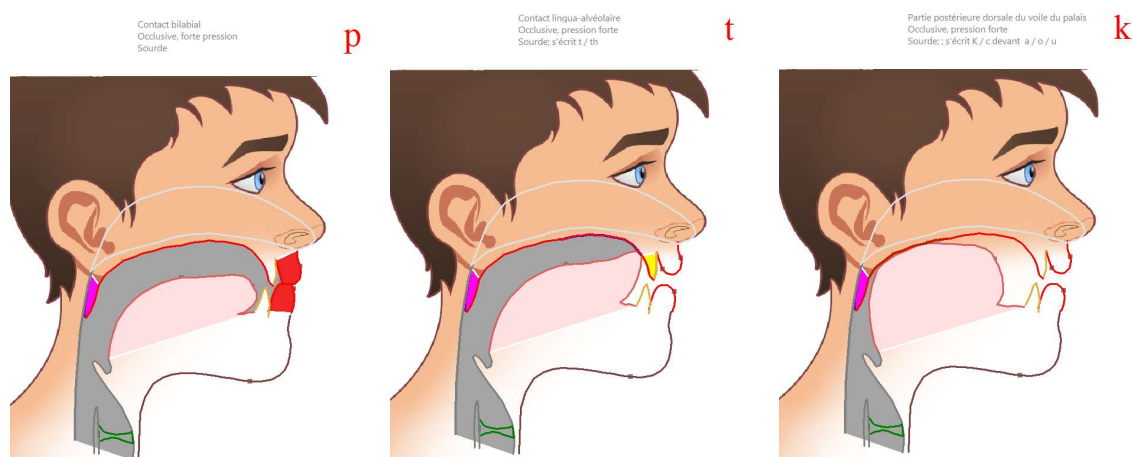


Figure 1 : différents lieux d'articulation des consonnes /p,t,k/

Allure fréquentielle et temporelle

Le spectrogramme d'un enregistrement d'une série de syllabes /PaTaKa/, d'une durée de 6 secondes (cas AS297 correspondant à une femme de 48 ans) est reporté Figure 2. Le code des couleurs est le suivant :

- Bleu : très peu d'énergie
- Vert : un peu d'énergie
- Rouge : énergie moyenne
- Jaune : énergie forte
- Blanc : énergie très forte

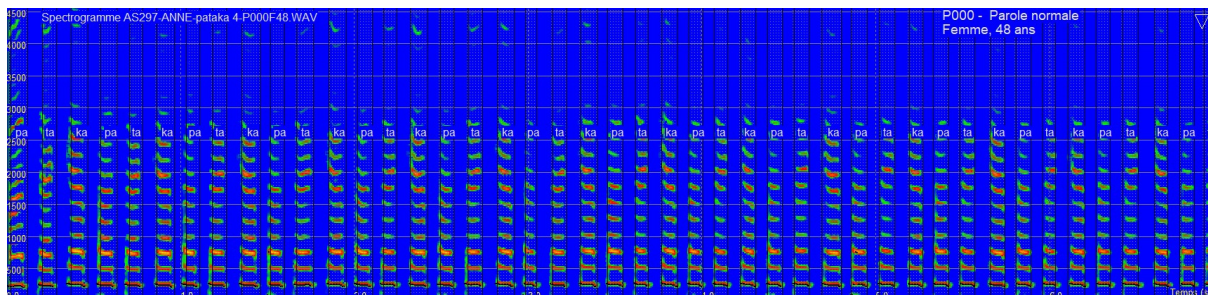


Figure 2 : Spectrogramme d'une série de /PaTaKa/ et segmentation automatique des syllabes

On note un ensemble d'harmoniques du /a/ sous forme de barreaux à intervalles réguliers, multiples du fondamental de la voix, représenté par un trait noir en bas de l'échelle (donc le 1^{er} harmonique en partant des basses fréquences). Le fondamental moyen est à 247 Hz, un peu plus haut que pour le fondamental usuel moyen du témoin, ce qui s'explique par la volonté de bien articuler pour réaliser la série de syllabes « du mieux que l'on peut ».

Sur le profil de puissance de la figure 3 (en décibel), on peut noter une séparation bien nette entre les productions de syllabes, et une puissance régulière (Axe vertical, en Db) au cours du temps (Axe horizontal, en secondes). En zoomant sur un cluster /pa,ta,ka/ (Figure 4), on peut identifier de légères différences d'allure temporelle des phénomènes transitoires en lien avec les plosives. La voyelle a une structure périodique, liée à la fréquence fondamentale.

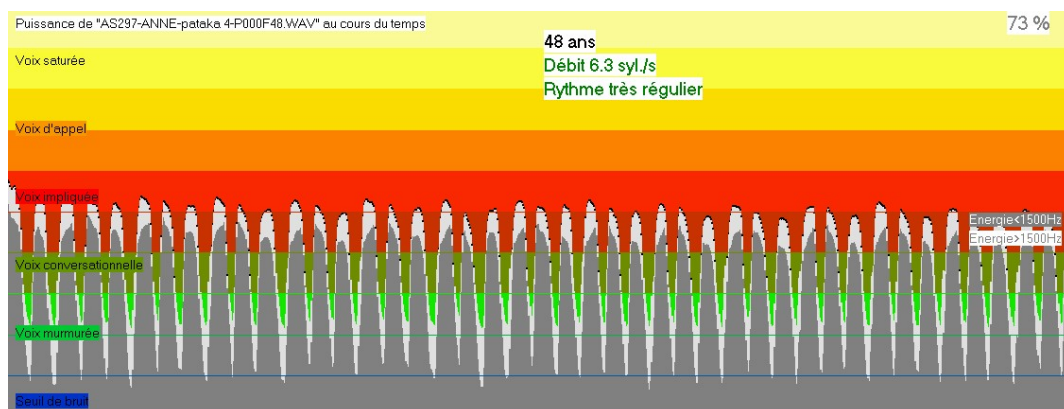


Figure 3 : Profil de puissance d'une série de /PaTaKa/ de 6 secondes, femme de 48 ans, parole normale

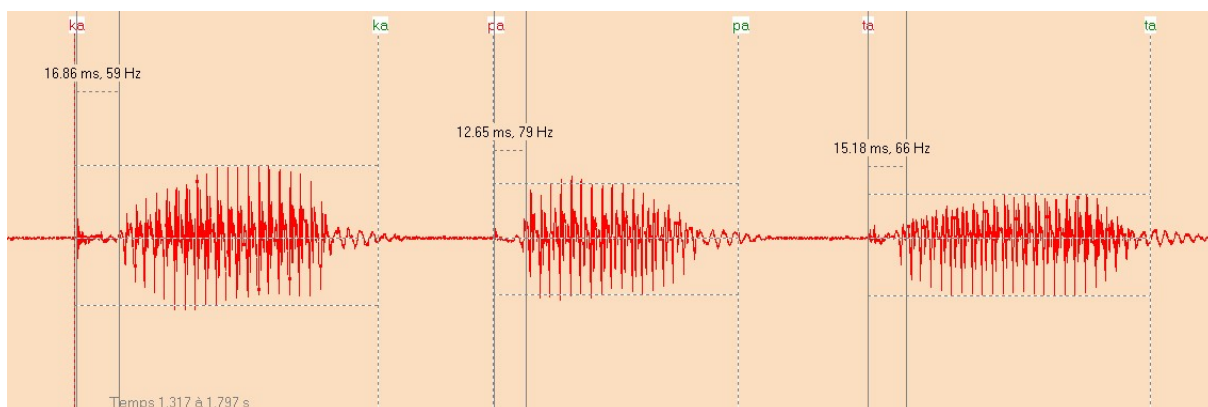


Figure 4 : Allure temporelle d'une série /pa,ta,ka/. Le Voice-Onset-Time est la distance entre l'explosion et l'initialisation de la voyelle

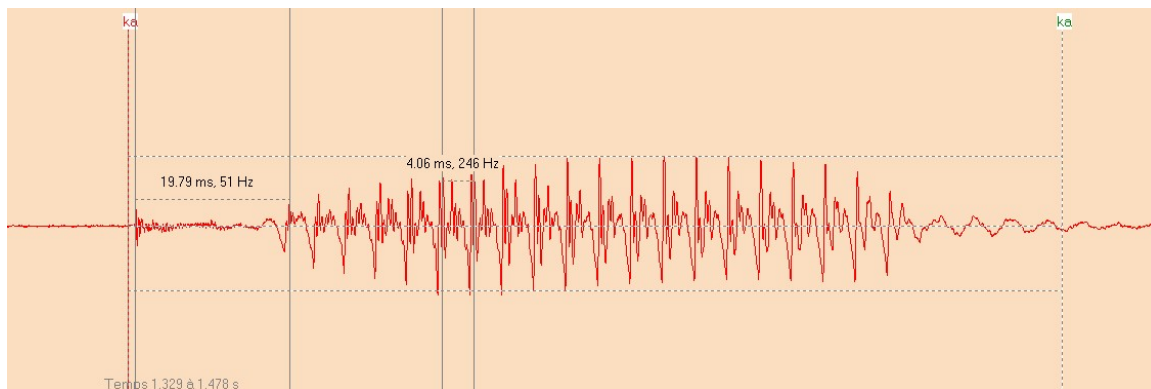


Figure 5 : Zoom sur la syllabe /ka/ de la figure 4 : le voice-onset-time peut être extrait plus précisément

La notion de temps d'établissement du voisement, ou « Voice-Onset-Time (VOT)» est aussi illustrée figures 4 et 5 : il s'agit de la distance temporelle entre l'explosion de la consonne, qui apparaît sous forme de discontinuités plus ou moins complexes, et l'apparition du voisement de la voyelle, qui est périodique, comme illustré dans le zoom sur /ka/ de la figure 5. La période approximative de la voyelle est de 4 ms, soit environ 250 Hz, ce qui correspond au fondamental instantané de la voix sur le /a/.

Cette donnée théorique est intéressante à prendre en considération cliniquement. Ce VOT peut être réduit ou inexistant dans le cas d'une dysphonie.

Analyses usuelles

De l'enregistrement de la série de syllabes, on peut extraire de nombreuses informations telles que :

- La durée de phonation : courte, moyenne, longue
- Le débit des syllabes (syllabe / seconde): lent, normal, rapide
- La variation de fréquence : régulières / irrégulières, accélérant, ralentissant
- La variation de puissance : décroissance trop rapide, irrégularité de puissance au cours du temps
- La qualité de la consonne : explosion atone, confusion voisé/non voisé, mise en vibration de la voyelle lente, etc.
- Le pourcentage de voisement de la série de syllabes
- Les pauses inappropriées telles que des reprises inspiratoires
- Les erreurs de séquence de consonnes (ou voyelles)
- Le Voice-Onset-Time (VOT) entre consonne et voyelle

Protocoles

Comme soulevé par [Jan 2007], il existe en France une grande variabilité des protocoles selon les hôpitaux et les recherches sur la parole :

- Vitesse articulatoire maximale sur « pataka » ;
- Débit des /pa/ ;
- Débits et intensités sur 8 « papapa ».
- Débit des /pa/, /ta/ & /ka/ ;
- Débit des /Ba/, /Cla/, /Tra/

- Répétition de « Papa ne m’a pas parlé de beau-papa »
- Débit sur /badego/ [Fougeron 2017]

TYPE DE DIADOCOCINESIE	DESCRIPTION	CONTENU	DETAILS
AMR	Bababa	Consonne Voyelle (CV)	[b] consonne bilabiale antérieure, voyelle facilitatrice [a]
	Dédédé	CV	[d] consonne dentale antérieure voyelle facilitatrice [é]
	GoGoGo	CV	[g] consonne vélaire postérieure voyelle facilitatrice [o]
	ClaClaCla	CCV	[k] occlusive vélaire postérieure non voisée, [l] consonne liquide dentale antérieure.
	TraTraTra	CCV	[t] consonne occlusive dentale antérieure non voisée [r] consonne liquide vélaire postérieure.
SMR	Badégo	CV, CV, CV	[b] occlusive voisée labiale antérieure [d] occlusive voisée palatale antérieure. [g] occlusive voisée vélaire postérieure Avec voyelles facilitatrices
	ClaTra	CCV, CCV	[cl] cluster postérieur, combinaison facilitatrice [tr]. cluster antérieur/postérieur non facilitateur

Tableau 1 : Diadococinésie étudié dans le protocole MonPaGe [Fougeron 2017]

Le protocole MonPaGe [Fougeron 2017] a permis de donner un cadre plus précis à l’analyse de la diadococinésie, avec les épreuves suivantes. On peut constater que la structure la plus étudiée dans la littérature scientifique (/PaTaKa/) ne figure pas dans cette liste.

Etudes bibliographiques

Méta-analyse sur le débit

De nombreuses données sont publiées sur /pataka/, notamment en lien avec la parole normale, mais aussi altérée et pathologique, pour différentes populations : hommes, femmes, enfants, parole âgée, parole selon différents contextes. Dans [Baken 2000] se trouve une méta-analyse de 16 publications sur la parole normale, ainsi que 11 publications sur la parole pathologique. En reportant les valeurs de ces méta-analyses complétées par des publications plus récentes telles que [Yaruss 2002][Rusz 2011][Pierce 2013][Ben-David 2017][Rusz 2015], nous voyons se dégager une courbe de tendance à la figure 6, permettant de donner des repères de débit de syllabes avec la consigne de les produire « *le plus vite possible* », et positionner les repères sur une consigne légèrement différente « *le plus distinct possible* », dont le débit est légèrement plus lent.

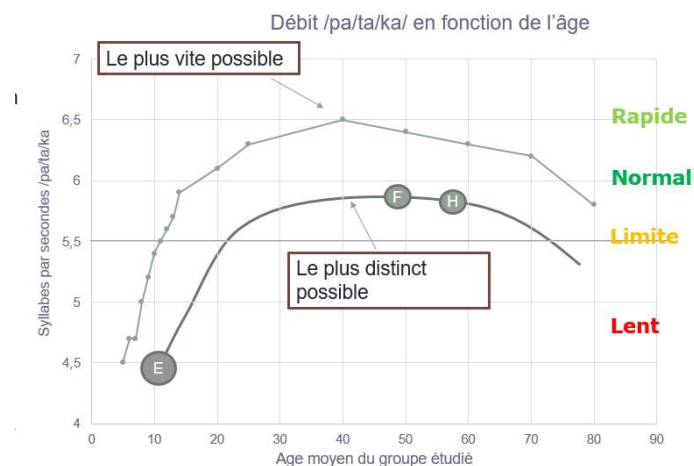


Figure 6 : Méta-analyses des publications scientifiques précisant des valeurs de diadococinésie sur /PaTaKa/ incluant 16 références de [Baken 2000]

La notion même de calcul du débit, si elle peut paraître simple de prime abord, se décline selon une grande variété d’approches : calcul sur 10 syllabes avec comptage en double tâche par le patient, analyse des 5, 7 ou 10 premières secondes, calcul sur une « portion stable » de 2 secondes au milieu de la production, etc. De ce fait, le rapprochement des différentes études doit être fait avec prudence, les données n’étant pas toujours comparables. Sur l’aspect protocole, certaines études donnent un modèle, d’autres non, certaines demandent une production « *le plus vite possible* », d’autres « *le plus distinct possible* », ce qui donne une variabilité importante aux résultats et une certaine difficulté à dégager des tendances claires. Enfin, la force statistique des données doit être prise en compte : les études portent sur des corpus de taille très variable : moins de 10 à plusieurs centaines d’individus pour une tranche d’âge ou un genre donné.

Comparaison AMR/SMR

On note dans [Pierce 2013] des résultats très proches entre AMR et SMR (Figure 7), avec une légère différence homme/femme principalement sur les syllabes répétées. Concernant /PaTaKa/ la différence est faible, et le débit se situe autour de 6 syllabes/seconde.

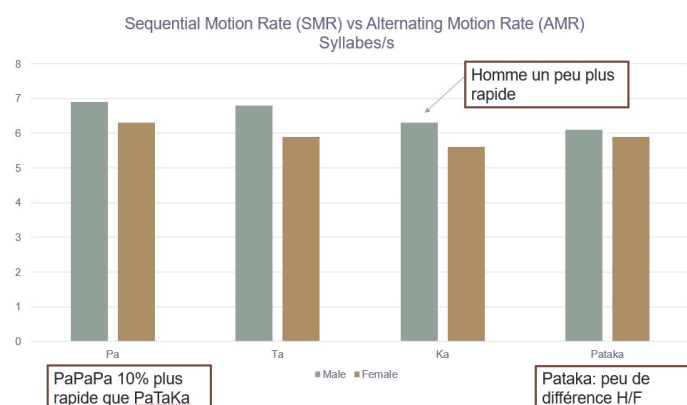


Figure 7 : Comparatif entre Alternating Motion Rate (AMR) /PaTaKa/ et Sequential Motion Rate (SMR) /PaPaPa, etc./ [Pierce 2013]

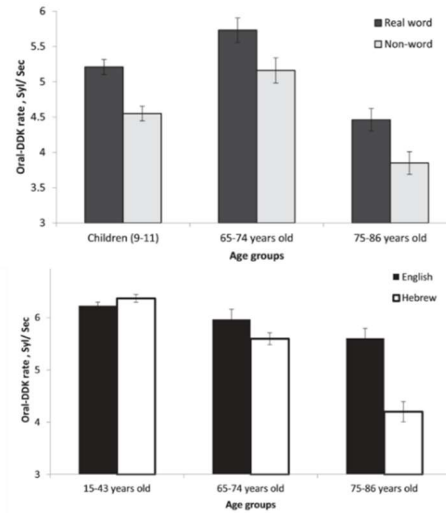


Figure 8 : Comparatif enfant, adultes 65-74 et 75-86 ans [Ben-David 2017]

La tendance au ralentissement du débit pour les patients âgés est illustrée à la figure 8 [Ben-David 2017]. L'étude se base sur des répétitions de /pataka/, de 'bodeket' (Hébreu) et met en avant un débit sur le mot réel 10% plus rapide que le non-mot /PaTaKa/, avec une réduction de 20% du débit vers 80 ans.

voyelles soutenues	DDK		repet lecture		monol	rythme	
/a/	42%	/pa/ 34%	lect-phrase1	29%	monol 27%	/pa pa/	31%
/a/ bis	41%	/pou/ 38%	lect-phrase2	29%		/kou kou/	37%
glissando	41%	/kou/ 36%	lect-texte	29%		/pa kou/	38%
glissando bis	37%	/poupa/ 35%	lect-dialogue	26%		/pa kou/bis	36%
		/pakou/ 29%	repet1	38%			
		/pataka/ 25%	repet2	29%			
		/pataka/bis 22%	repet3	35%			
		/badaga/ 38%	repet4	29%			
		/patikou/ 29%					
		/pabikou/ 33%					
		/padikou/ 39%					
moy : 39%	moy : 27%		moy : 26%		moy : 27%		moy : 32%
			moy tout : 24%				

Figure 9 : l'épreuve /Pataka/ se révèle la plus discriminante dans le cas de diagnostic différentiel [Jeancolas 2019]

Dans son mémoire de thèse, [Jeancolas 2019] estime que les meilleures performances en terme de classification des témoins et Parkinsoniens ont été obtenues à partir des tâches de lecture et répétitions de phrases ainsi qu'à partir des tâches DDK, la tâche /pataka/ étant la plus performante, comme l'indique le taux d'erreur de classification reporté figure 9.

Erreurs de DDK

Différentes erreurs sont répertoriées par [Yaruss 2002] concernant la diadococinésie produite par les enfants, avec des fréquences d'occurrences illustrées figure 10 :

- Suppression d'un segment ou d'une syllabe /paka/
- Placement : le segment est produit avec une erreur de point d'articulation /palaga/ ou /pakapaka/
- Voisement: un segment voisé est produit au lieu d'un son non voisé /padaka/
- Echange: deux syllabes sont permutées /pakata/

- Insertion: ajout d'un segment ou d'une syllabe supplémentaire /patakata/
- Doublement : une même syllabe est produite deux fois /papataka/

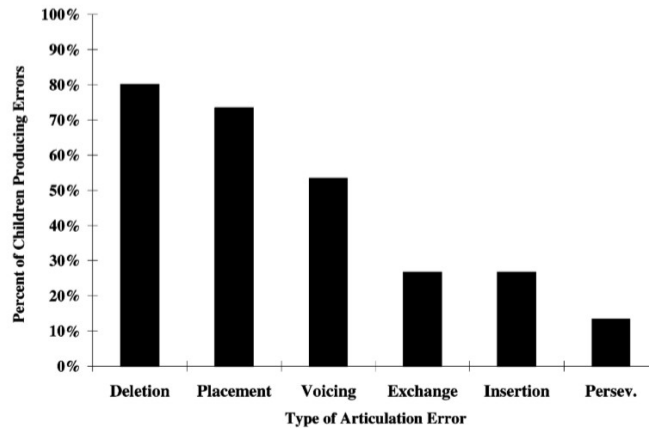


Figure 10 : Erreurs de production de diadococinésie chez les enfants [Yaruss 2002]

DKK et parole pathologique

Concernant la parole pathologique, la méta-analyse de [Baken 2000] donne quelques repères de débit de syllabes sur /Pa/,/Ta/,/Ka/,/Da/,/PaTaKa/ pour différentes pathologies telles que les dysarthries ataxiques, cérébelleuses, la sclérose latérale amyotrophique (SLA), ou encore les syndromes parkinsoniens et la surdité. Dans [Rusz 2011] et [Rusz 2015], différentes analyses de diadococinésie sont conduites sur /PaTaKa/ en comparant les témoins, les patients atteints de la Maladie de Parkinson (PD), de paralysie supra nucléaire progressive (PSP) et différents types d'atrophies multi systématisées (MSA). Si l'on se concentre sur les notions de débit (Fig. 11), on peut noter un débit variable pour PD mais proche en moyenne du groupe témoin, une réduction significative du débit pour PSP et MSA en moyenne. Des valeurs de débit moyenne aussi bas que 2.5 à 3.5 syllabes par secondes sont reportées par [Baken 2000] pour la surdité ou pour SLA.

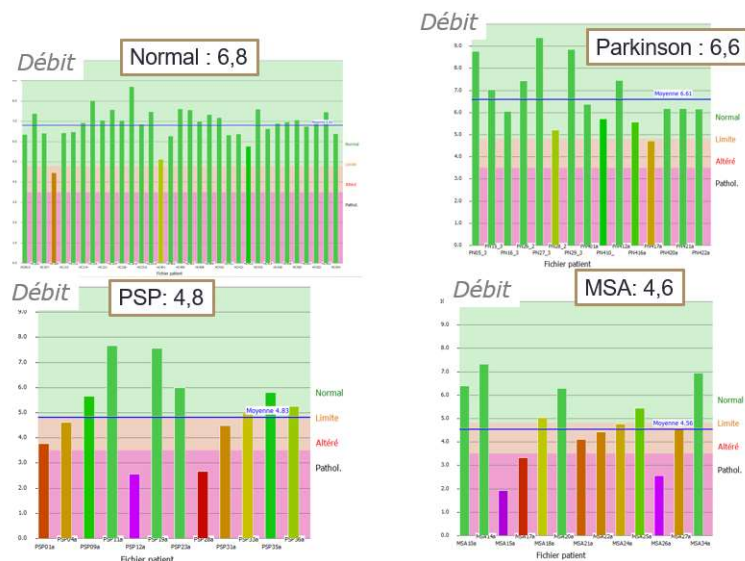


Figure 11 : Analyse du débit de diadococinésie /PaTaKa/ groupe témoin, MP, PSP et MSA, données calculées par DIADOLAB sur le corpus [Rusz 2015].

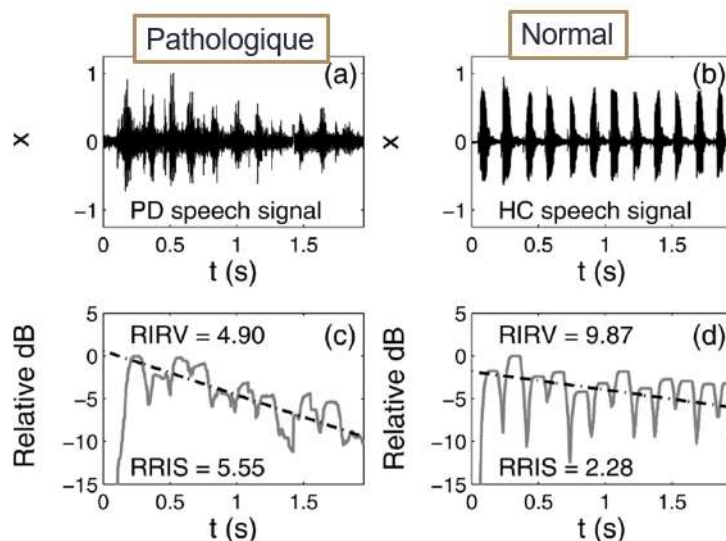


Figure 12 : Réduction de la puissance plus rapide pour la DDK dysarthrie (à gauche) que pour la DDK Normale (à droite) [Rusz 2015]

Parmi les paramètres étudiés par [Rusz 2015] se trouve la décroissance rapide de la puissance des syllabes au cours de la production sonore (Figure 12) pour la parole dysarthrique, comparée à une relative stabilité pour le groupe normal.

Dans [Borel 2019], tous les patients atteints de la Maladie de Friedreich ont des performances en diadococinésie (selon le protocole MonPaGe) en dessous de la norme (2.4 à 4.6 syllabes/seconde au lieu de 5-6 syll/sec). Le nombre de syllabes répétées par seconde, sur 4 secondes est mesuré à un an d'intervalle (V1 puis V2). On peut noter en un an une aggravation notable (Figure 13).

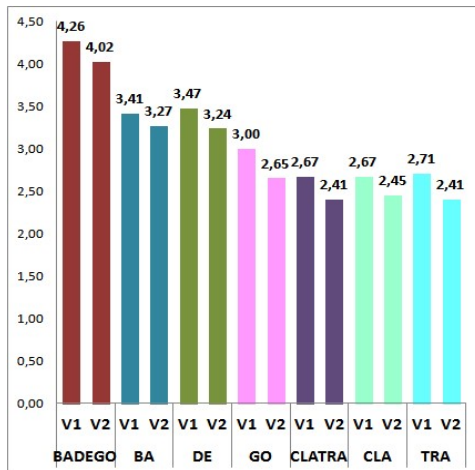


Figure 13 : Mesure à un an d'intervalle du débit de syllabes pour 20 hommes et 20 femmes [Borel 2019]

Concernant le bégaiement, des études telles que [Wolk 2013] ne montrent pas de différences statistiquement significatives de débit de diadococinésie entre enfants témoins et enfants avec bégaiement, mais constatent une réduction significative du débit pour le groupe d'enfants avec troubles phonologiques, résultats cohérents avec ceux d'études antérieures sur les enfants souffrant de troubles articulatoires légers.

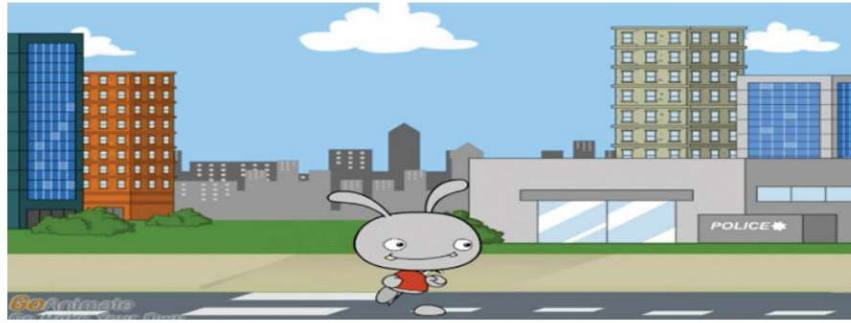


Figure 14 : Image de la séquence animée proposée à l'enfant lors de la production répétée de la séquence « pataka » [Martinez-Perez 2015]

Le cas des enfants dyspraxiques verbaux est abordé dans [Martinez-Perez 2015]. Plus la séquence est complexe et demande des transitions, plus les enfants atteints de ce trouble sont en difficulté. Ils sont particulièrement lents aux tâches de diadococinésie et réalisent plus d'erreurs de transposition sur /pataka/ que sur des séries plus simples telles que /pa/ ou /paka/. Les auteurs présentent un logiciel dédié à la diadococinésie permet d'animer un personnage qui parcourt une route durant 5 secondes tout en prononçant la série de /PaTaKa/ (Figure 14). L'enfant répète à son tour la série, puis l'orthophoniste comptabilise le nombre de séries correctement répétées et calcule le taux de syllabes par seconde.

Outils d'analyse de DDK

Au niveau outils, on peut citer le module *Diadochokinetic Rate Analysis* (DRA) dans l'outil Motor Speech Profile de KayPENTAX [Wang 2009], un programme informatique qui évalue 11 paramètres listés table 2. On y trouve des notions de débit moyen (DDKavr), de variabilité (DDKsdp, DDKcvp) et d'intensité (DDKavi, DDKsdi,..DDKsla).

Parameter	Symbol	Unit
Average DDK period	DDKavp	ms
Average DDK rate	DDKavr	/s
Standard deviation of DDK period	DDKsdp	ms
Coefficient variation of DDK period	DDKcvp	%
Perturbation of DDK period	DDKjit	%
Average DDK peak intensity	DDKavi	dB
Standard deviation of DDK peak intensity	DDKsdi	dB
Coefficient variation of DDK peak intensity	DDKcvi	%
Maximum intensity of DDK sample	DDKmx	dB
Average intensity of DDK sample	DDKava	dB
Average syllable intensity	DDKsla	dB

Table 2 : Paramètres extraits de l'analyse DDK par l'outil DRA de KeyPentax [Wang 2009]

Un autre outil est décrit dans le mémoire de thèse de [Hlavnicka 2018], appelé « The Dysarthria Analyzer », basé sur Matlab™, dont la partie « Articulation » regroupe 7 indicateurs en lien avec la diadococinésie. On retrouve (Figure 15) les notions de débit moyen (DDKR), d'irrégularité (DDKI), de pauses (DPI, DUS), d'analyse du voisement (DUF) et de densité (StdPSD).

- DDKI = diadochokinetic irregularity,
- DPI = duration of pause intervals,
- DDKR = Diadochokinetic rate
- RFA = resonant frequency attenuation,

- StdPSD = Standard deviation of power spectral density (dB)
- DUF = decay of unvoiced fricative
- DUS = duration of unvoiced stops

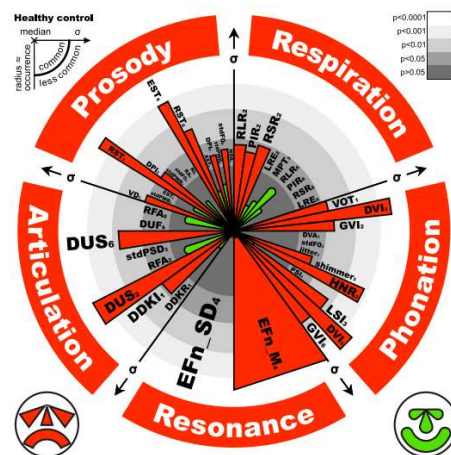
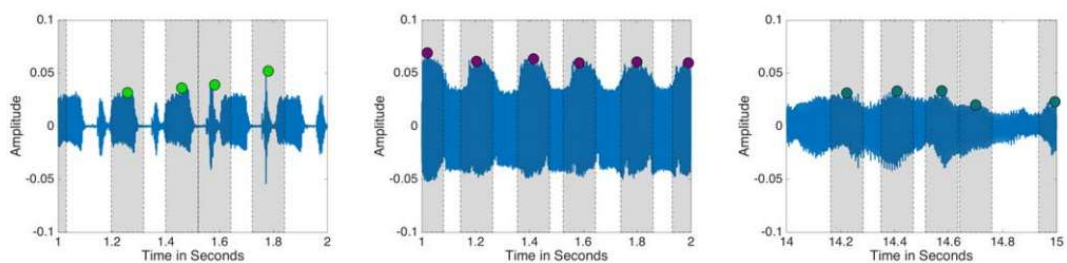


Figure 15 : Outil Dysarthria Analyzer décrit dans [Hlavnicka 2018]



(a) “Ta” labeled sample (b) “La” labeled sample (c) “Ha” labeled sample

Figure 16 : L’outil DeepDDK est entraîné grâce à un corpus de DDK labélisé [Wang 2019] pour permettre une segmentation fiable de différents types de DDK, même en contexte de parole pathologique

Sur l’aspect segmentation des syllabes, on peut considérer que la tâche est assez simple dans le cas de la parole normale, les pics de puissance étant bien nets et faciles à identifier, surtout avec des plosives telles que /p,t,k/ qui nécessitent une occlusion se traduisant par un court intervalle de silence (Figure 16). Dans le cas de la parole pathologique, la segmentation se révèle délicate, et des approches telles que les réseaux de neurones sont proposés par [Wang 2019] pour parvenir à une segmentation fiable, y compris pour des DDK très perturbées.

Enregistrement & pré-traitement

Les enregistrements sont effectués généralement à l’aide de microphones directionnels de qualité, tels que le SM58 de Shure (microphone voix) ou le AKG-C420 (microphone serre-tête). On trouve aussi divers autres types de microphone dynamiques ou électrostatiques, voire des microphones omnidirectionnels quand ce n’est pas directement le téléphone. Concernant les conditions d’enregistrement, plusieurs études bénéficient de milieux isolés, calmes, voire de chambres sourdes qui limitent considérablement la pollution sonore. Cependant, dans le cas de la pratique orthophonique clinique, seuls les micros directionnels (SM58, MB85 BETA, SAMSON CO1U) permettent de s’affranchir de la pollution sonore inévitable.

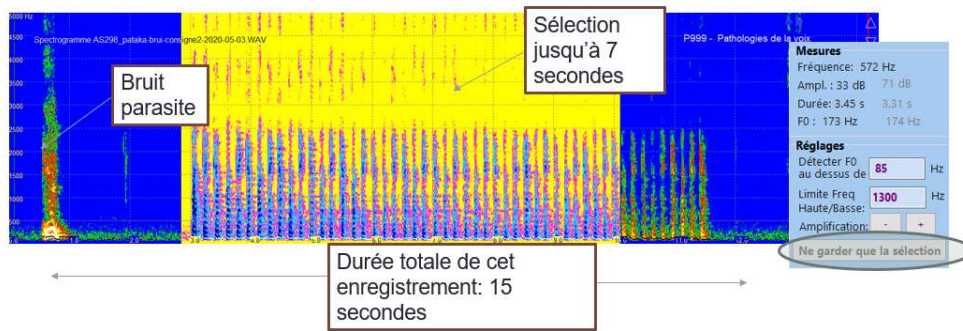


Figure 17 : Pré-traitement des enregistrements de diadococinésie (7 secondes dans le cas d'un adulte)

La bande passante usuelle des microphones est 80-15KHz, avec une fréquence d'échantillonnage de 10KHz à 44KHz. Les publications détaillent en général les étapes de pré-traitement, telles que :

- L'homogénéisation des fréquences d'échantillonnage pour l'ensemble du corpus étudié, en cas d'enregistrements hétérogènes
- La suppression d'un canal dans le cas d'enregistrement stéréo
- L'élimination des zones de silence ou restes de consignes avant/après l'échantillon utile
- L'élimination de la tension continue ou du *burst* initial de branchement du micro
- La normalisation de l'amplitude du signal, par exemple à une échelle [-1..+1] très utilisée en filtrage numérique ou dans des outils de traitement du son tel que Audacity ou PRAAT

Un exemple de pré-traitement de diadococinésie est illustré à la figure 17. La portion utile de diadococinésie est sélectionnée (ici 7 secondes pour un enfant de 6 ans), puis légèrement amplifiée (+6dB). On ne garde donc que 5 secondes initiales du /pataka../. Les indicateurs risquent d'être peu représentatifs si la production sonore est trop courte (en particulier dans les études qui ne considèrent que 2 secondes stables), et les indicateurs s'élèvent souvent si la production est longue (> 10s).

Analyse de séries de /PaTaKa/

Protocole proposé pour la clinique orthophonique

Nous recommandons un protocole focalisé sur la précision d'articulation et la puissance, plutôt que sur le débit maximum. Dans [Sicard 2019], nous basons l'analyse de la diadococinésie en contexte de clinique orthophonique sur l'épreuve /PaTaKa/ que nous appliquons aux enfants et aux adultes. La voyelle /a/ est universelle, la plus ouverte et la plus énergétique, fait partie des extrêmes du triangle vocalique [Sicard 2020b]. Les plosives /p,t,k/ nécessitent un déplacement important de la langue et un mouvement des lèvres, et font intervenir deux lieux d'articulation différents. La série de /pataka/ peut être considérée comme une épreuve d'effort. Les calculs sont facilités par la dynamique du signal, et l'on observe en général peu de différences homme/femme sur cette épreuve. En revanche, pour des enfants très jeunes (3 ans et moins), cette épreuve se révèle à la fois difficile à faire passer au niveau protocole et peut mettre les enfants en échec [Grenier 2020].



Figure 18 : Protocole d'enregistrement du /PaTaka/ avec DIADOLAB [Sicard 2019]

Le protocole d'enregistrement de la diadococinésie est décrit dans l'écran de la figure 18. La consigne est explicitée, de même que la démarche d'enregistrement et de sauvegarde. De manière identique à la phrase, on peut noter en haut à droite les modèles sonores Femme, Homme, Enfant, correspondant à un débit conforme, la production de tous les phonèmes, un enchaînement des syllabes à un rythme et intensité stable, sans pause inappropriée, le tout en une seule inspiration.

Recommandations concernant le microphone

Dans le cadre de la pratique clinique, où il est difficile d'imposer un silence absolu, nous recommandons fortement l'utilisation de cardioïdes (SM58, MB85 BETA, etc.) moins sensibles aux bruits extérieurs. Nous recommandons aussi de contrôler la distance bouche/microphone et la maintenir constante, de l'ordre de 5 à 10 cm, pour des questions d'hygiène, de bruit possible des plosives sur la cellule et pour limiter les biais de comparaisons de puissance avant/après prise en charge orthophonique.

Les indicateurs d'altération de la diadococinésie

L'analyse des outils, approches et publications récentes en lien avec la diadococinésie dans le contexte de la parole pathologique nous conduit à nous concentrer sur les indicateurs en lien avec le débit, l'irrégularité, la puissance, et la tonicité des plosives. Nous avons donc développé et mis au point 4 indicateurs de diadococinésie dans la plateforme DIADOLAB [Sicard 2019][Sicard 2020] à destination des orthophonistes (Figure 19) :

- **Atonie** des consonnes plosives /p/, /t/, /k/ : voisement, faible explosion
- **Débit** des syllabes trop lent
- **Irrégularité** du débit des syllabes
- **Instabilité en puissance** au cours de la réalisation

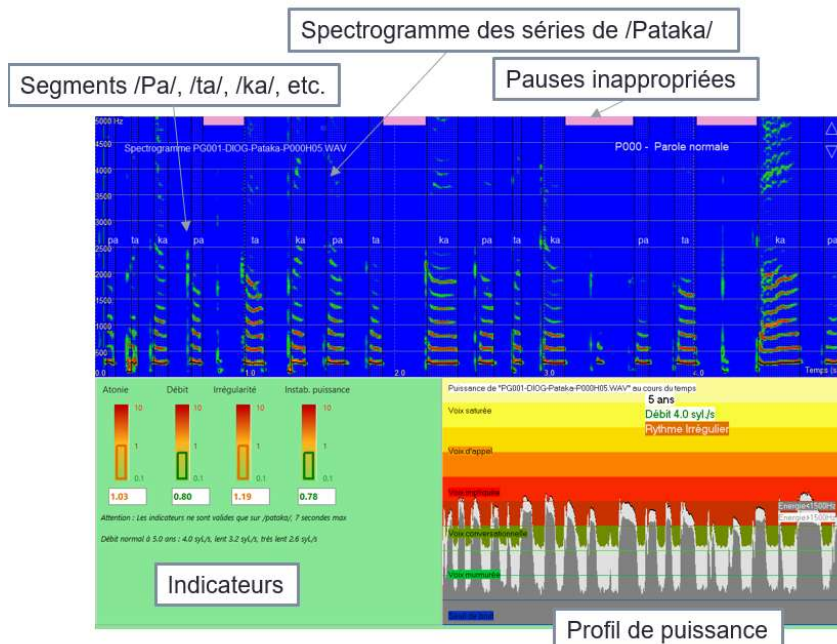


Figure 19 : Exemples d'analyse de 5 secondes de /PaTaKa/, enfant de 5 ans, parole normale [PG001]

Normalisation

Les quatre indicateurs (atonie, débit, irrégularité, instabilité) ont été normalisés, de manière à ce que la parole normale donne des valeurs significativement en dessous de 1.0, tandis que la parole pathologique significativement au-dessus de 1.0 (Figure 20). Cette approche a déjà été utilisée avec succès pour l'analyse de l'altération de la phonation [Sicard 2013] sur un /a:/ tenu.

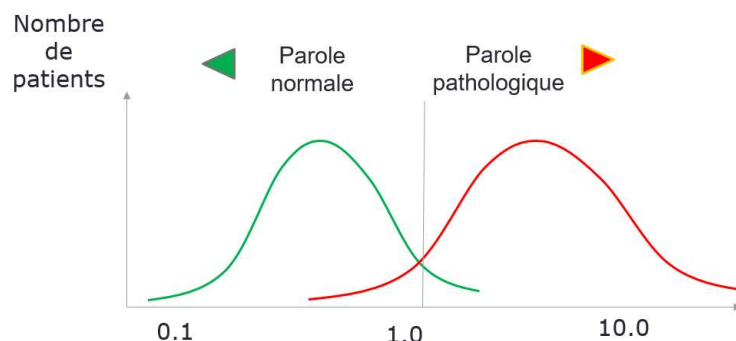


Figure 20 : Normalisation des indicateurs d'altération de la diadochokinésie

Calculs effectués

L'analyse porte sur une portion de 5 à 7 secondes de répétition de la série /PaTaKa/. Nous nous assurons que les bruits, résidus de consignes, ou tout autre parasite sonore ont été éliminés au préalable.

1. La 1^{ère} étape consiste à calculer le fondamental instantané au cours de la production sonore, qui est matérialisé par un trait noir superposé à l'harmonique la plus basse du spectrogramme. Ceci permet de calculer le ratio entre les portions voisées et non voisées et donne aussi une indice sur le genre, si celui-ci n'est pas ressourcé : femme 220 Hz, homme 120 Hz.

2. Une segmentation automatisée des voyelles est alors effectuée d'après le profil de puissance et le voisement. Il s'agit à ce stade d'un fractionnement grossier sans identification de la consonne à proprement parlé.
3. La 3^{ème} étape, plus délicate, consiste à isoler pour chaque segment la consonne et la voyelle. Le calcul est facilité par la réduction significative de la puissance sonore pendant l'occlusion, et la présence d'un transitoire rapide au moment de l'exposition, particulièrement énergétique sur /p,t,k/, par opposition à /b,d,g/ par exemple. Le Voice-Onset-Time est alors évalué, de même que la puissance moyenne de la voyelle et de la consonne. Le rapport Voyelle/consonne donne l'information d'atonie.
4. La transformée de Fourier du profil de puissance et la recherche du pic maximum donne l'information de débit. L'indicateur associé est calculé d'après les repères d'âge.
5. La prééminence du pic par rapport au bruit donne l'information de régularité. Plus la DDK est régulière, plus le pic est étroit et proéminent. Plus la DDK irrégulière, plus le pic est étalé et peu significatif.
6. La décroissance de la puissance au cours du temps et son irrégularité entre différents clusters /PaTaKa/ donne l'information d'irrégularité de puissance

Atonie

Un exemple d'atonie est illustré Fig. 21 en bas, par comparaison avec une séquence /PaTaKa/ correcte Fig. 21 en haut. L'exécution normale de la séquence /PaTaKa/ se traduit par une explosion puis une voyelle. Dans la séquence du bas, on note un voisement de la 3^{ème} syllabe, qui à l'audition apparaît comme /ga/ au lieu de /ka/.

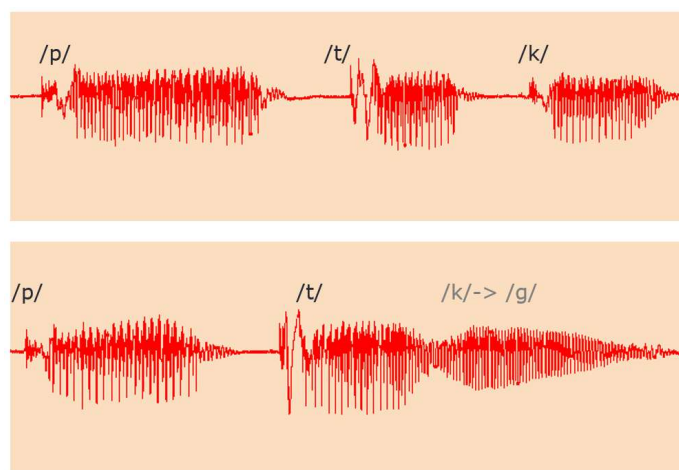


Figure 21 : Comparaison de diadochocinésie conforme (a) et atone (b) du fait d'un voisement

Débit

L'indicateur de débit sanctionne un rythme des syllabes plus faible que la norme selon l'âge. A 4 ans, le débit devrait être autour de 3.7 syl./s. Dans la figure 22, nous illustrons le cas d'un débit particulièrement lent par rapport à l'âge (2.1 syl./s).

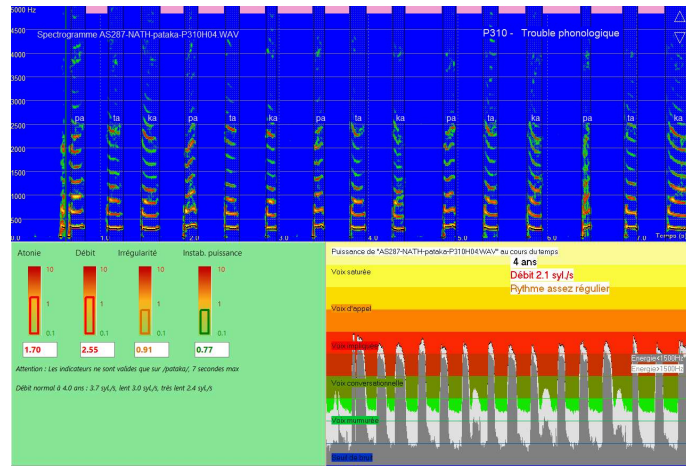


Figure 22 : Exemple de cas de débit de diadococinésie très lent (2.1 syl./s à 4 ans, norme à 3.7 syl./s) [AS287]

Irrégularité

L'indicateur d'irrégularité sanctionne des durées de syllabes qui varient fortement au cours de la production. L'indicateur s'élève aussi dans le cas de pauses inappropriées détectées, ou à cause d'hésitations telles que le bégaiement (Figure 23), ou encore par des reprises inspiratoires. On note sur le spectrogramme sur les premières réalisations des /PaTaKa/ des difficultés à maintenir un rythme régulier, avec des clusters raccourcis et d'autres allongés.

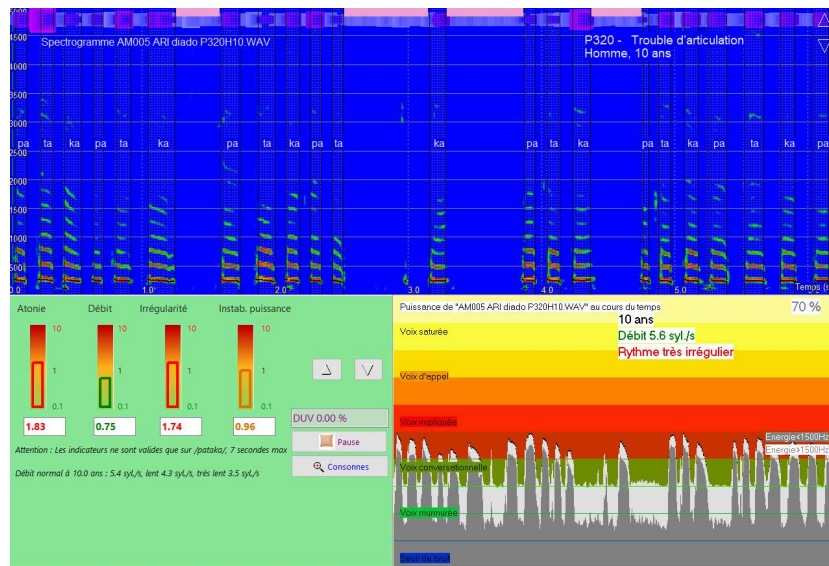


Figure 23 : Exemple de cas avec une irrégularité de durée des syllabes marquée, associé à des pauses inappropriées [AM005]

Instabilité en Puissance

L'indicateur d'instabilité en puissance sanctionne des variations de puissance au cours du temps, particulièrement visibles dans le profil de puissance situé en bas à droite de l'écran. L'instabilité en puissance se traduit dans le spectrogramme par des variations de couleurs. On constate (Figure 24) une décroissance rapide de la puissance dans le cas de dysarthries sévères.

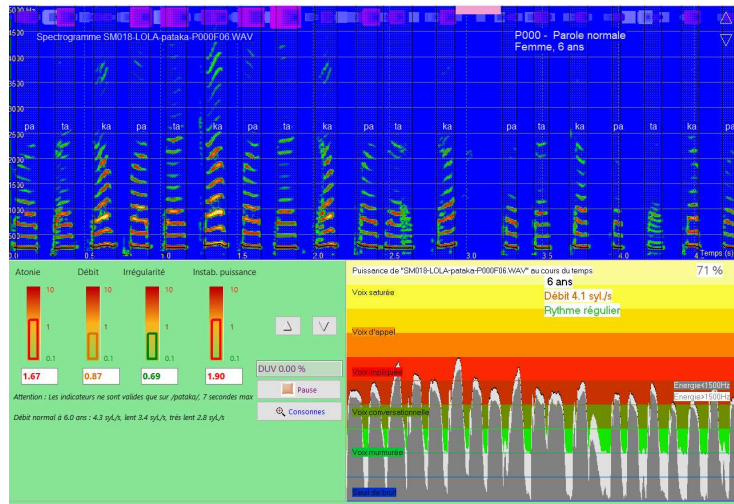


Figure 24 : Instabilité en puissance marquée [SM018]

Corrélation entre indicateurs

L'analyse de corrélation consiste à rapprocher les valeurs des différents indicateurs et évaluer leur degré de similitude. Deux séries de valeurs identiques donne une corrélation maximale (1.0 soit 100%). Sur la base de 120 analyses de DDK en parole normale, altérée et pathologique, on peut noter de faibles valeurs de corrélation (<0.3) dans les valeurs du tableau 3, ce qui signifie que les indicateurs mesurent des phénomènes assez distincts.

Corrélation	Indic. Atonie	Indic. Débit	Indic. Irrégularité	Indic. Instab. puissance
Indic. Atonie	1.00	0.18	0.07	0.30
Indic. Débit		1.00	0.19	0.25
Indic. Irrégularité			1.00	0.17
Indic. Instab. puissance				1.00

Table 3 : corrélation faible entre indicateurs sur la base de 120 analyses de DDK

Analyse du groupe témoin

Un exemple de diadococinésie normale est reporté ci-dessous. Les trois premiers indicateurs sont dans le vert, très en dessous de 1.0, seule l'instabilité en puissance est un peu élevée, proche de 1.0. On note un débit plus élevé que la norme à l'âge du témoin (6 ans), un rythme très régulier, et une explosion particulièrement tonique des consonnes /pataka/ qui apparaissent comme des traits verticaux dans le spectrogramme, juste avant les traits horizontaux des harmoniques des voyelles (Fig. 25).

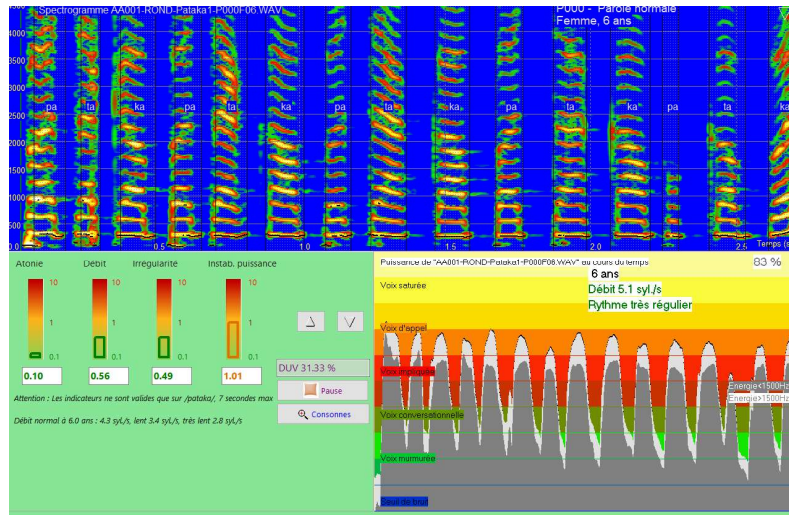


Figure 25 : Instabilité en puissance marquée [AA001]

Nous avons regroupé 120 cas de DDK normale de tous âges, sur lesquels nous avons fait porter les calculs statistiques. On peut vérifier a posteriori des valeurs moyennes positionnées significativement en dessous de 1.0 (Figure 26). On note toutefois une variabilité particulière de l'atonie, qui peut trouver différentes explications : l'inclusion de DDK d'enfants très jeunes (3 ans) pour lesquels l'épreuve /PaTaKa/ est particulièrement difficile et délicate à faire passer [Grenier 2020], une possible exclusion de certains cas du groupe normal malgré les étiquetages initiaux, suite à une suspicion de trouble de la parole, enfin, des erreurs de segmentation automatique, ou de calcul de rapport C/V, notamment pour des VOT entre plosive et établissement de la voyelle /a/ excédant les limites fixées (75 ms). L'utilisation de microphone de mauvaise qualité non directionnel perturbe les calculs à cause de phénomène d'écho ou de réverbération de la pièce.



Figure 26 : Analyse statistique des 4 indicateurs de diadococinésis sur 120 cas de /PaTaKa/ normaux de tous âges

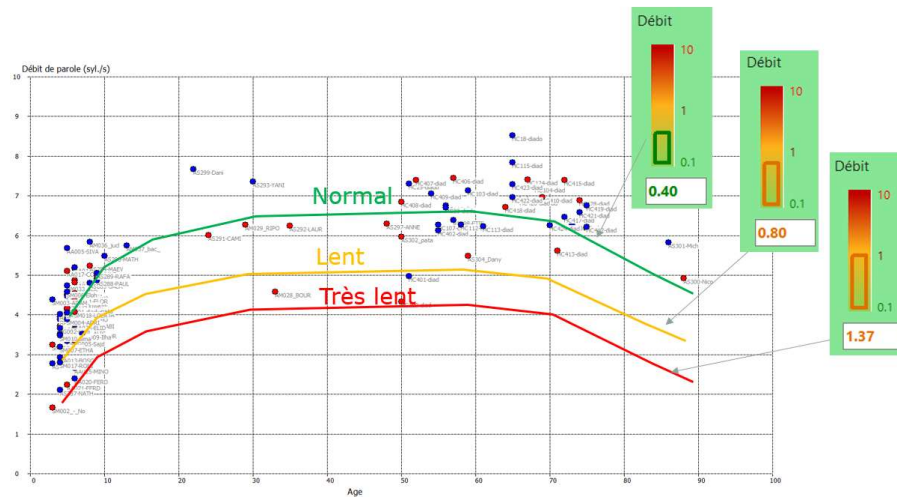


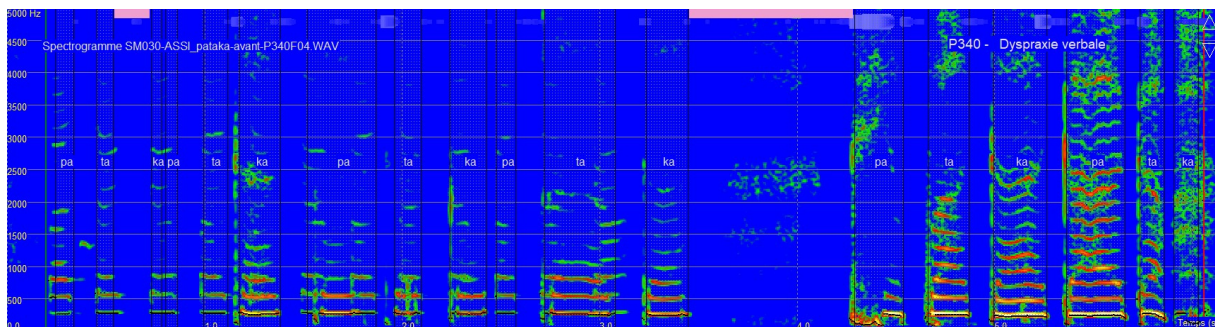
Figure 27 : Débit de /PaTaKa/ de 120 témoins en fonction de l'âge.

Dans la figure 27, le débit de DDK sur /PaTaKa/ est dessiné en fonction de l'âge pour fille (point rouge) et garçon (point bleu). Les normes issues des méta-analyses sont superposées au nuage de point et ne montrent que quelques points singuliers. Nous ne disposons pas d'un nombre suffisant de points pour certaines tranches d'âge, notamment pour les voix au-delà de 75 ans, pour émettre des hypothèses sur la confirmation ou non de la tendance à la réduction du débit à partir de 70 ans relevée dans la littérature.

Analyses comparatives

Analyse avant/après prise en charge orthophonique

Nous pouvons comparer les performances de diadococinésie en suivant exactement le même protocole d'enregistrement, avec les mêmes consignes et les mêmes conditions en terme de matériel, logiciel et de réglage de l'ensemble de la chaîne d'acquisition. Dans le cas SM030 (Fille de 4 ans avec dyspraxie verbale, dé-synchronisation de la déglutition), le bilan initial montre de grandes difficultés à produire une répétition de /PaTaKa/ (Figure 28 en haut). Après rééducation, les 4 indicateurs sont dans le vert par rapport aux repères de l'âge du patient (Figure 28 en bas).



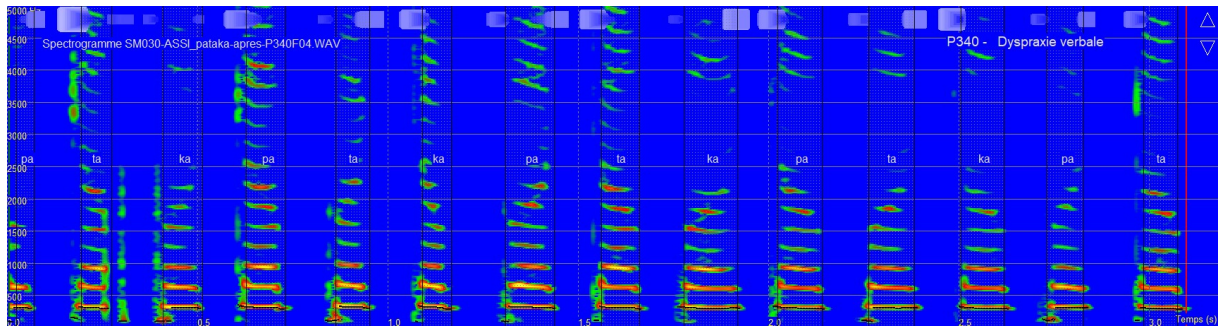


Figure 28 : Evolution de la diadococinésie avant/après prise en charge orthophonique

L'évolution des indicateurs est assez spectaculaire ici : on passe d'un débit lent, irrégulier et instable en puissance à une diadococinésie tout à fait normale (4 indicateurs dans le vert), comme l'illustre la figure 29.

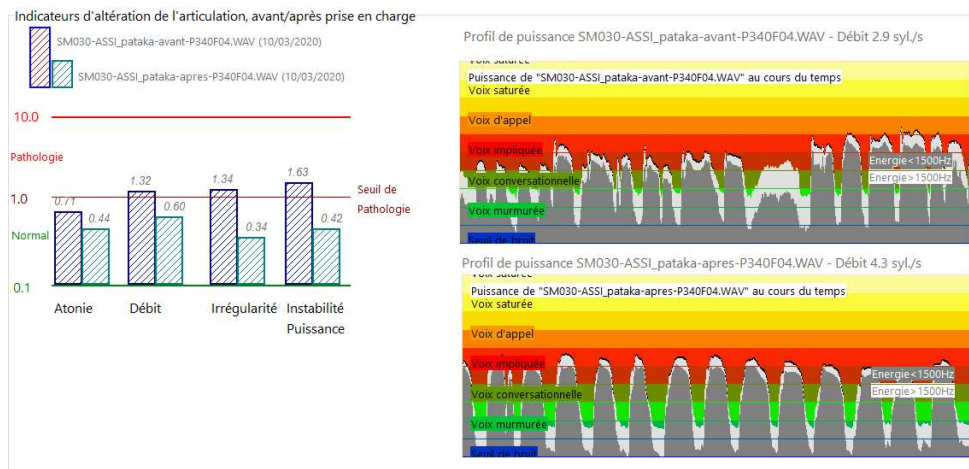


Figure 29 : Indicateurs d'altération de la diadococinésie avant/après prise en charge orthophonique

On peut constater sur le cas AVAP (garçon de 5 ans avec troubles de développement du langage) des progrès significatifs en termes de tonicité, de débit, et de stabilité en puissance (Figure 30).

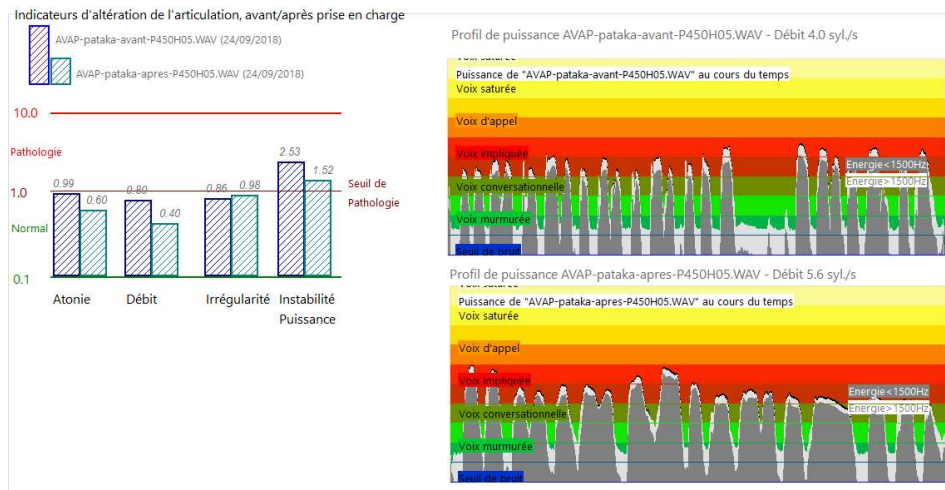


Figure 30 : Indicateurs d'altération de la diadococinésie avant/après prise en charge orthophonique

Statistiques sur les indicateurs

Dans le cadre du projet Voice4PD, nous avons pu compléter les échantillons du corpus de [Rusz2015] avec 50 cas de parole normale et pathologique (Maladie de Parkinson et MSA). Nous constatons une moyenne des indicateurs de parole normale en dessous de 1.0, pour le groupe PD une variabilité de l'atonie, une irrégularité un peu élevée, et pour les syndromes MSA et PSP des indicateurs particulièrement élevés (Figure 31).

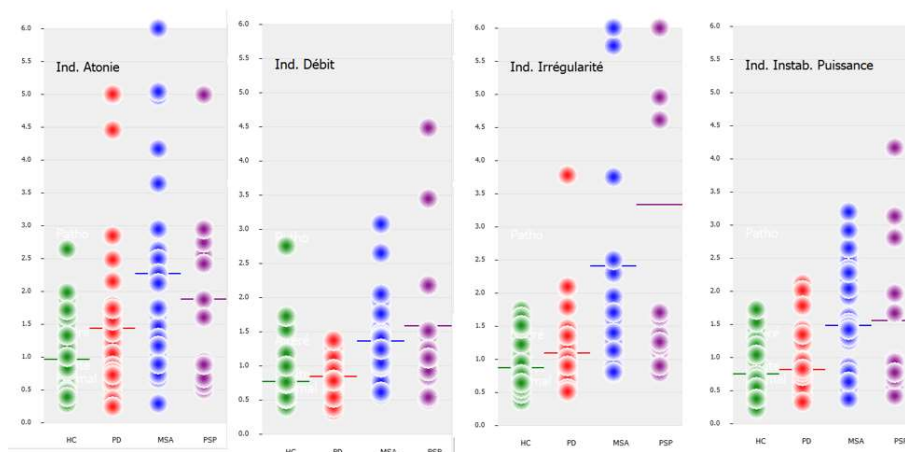


Figure 31 : Analyse comparative des 4 indicateurs d'altération de la diadococinésie sur /PaTaKa/, HC=contrôle, PD=Maladie de Parkinson, MSA=Atrophie Multi systématisée, PSP= Progressive Supranuclear Palsy

Combinaison d'indicateurs

En combinant 2 indicateurs, comme l'indicateur de débit (Y) et l'instabilité en puissance (X), on peut définir une zone de parole normale en bas à gauche, de (0,0) à (0.8,0.8), puis une zone de parole altérée (0.9,0.9) à (1.4,1.4), puis au-delà de (1.5,1.5) une zone de parole pathologique.

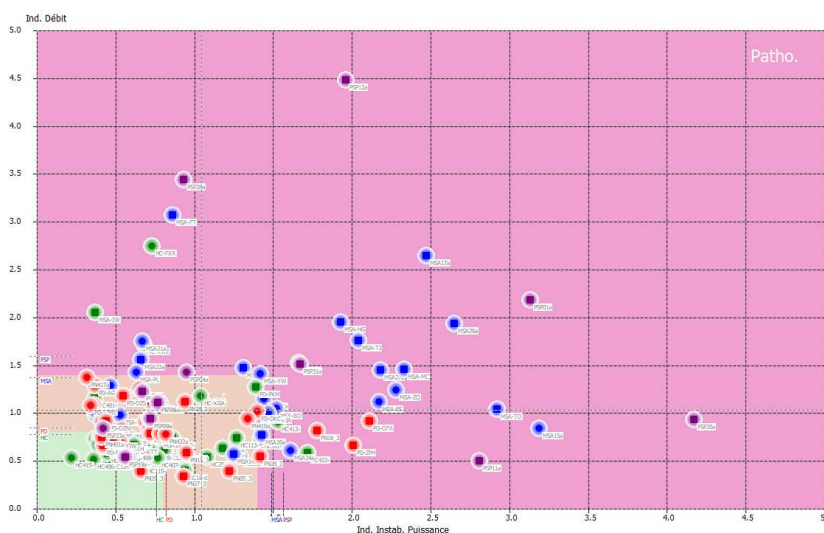


Figure 32 : Approche statistique à 2 dimensions (Indicateur de débit en Y vs. Instabilité en puissance en X) pour 120 cas de diadococinésie normale et pathologique

Dans le nuage de points de la figure 32, on peut constater que la DDK du groupe PD (rouge) en termes de débit et d'instabilité en puissance est assez proche des voix normales (vert), tandis que les groupes MSA (bleu) et PSP (violet) s'éloignent significativement de la zone de parole normale. Différents points singuliers (DDK normale dans la zone pathologique, PSP dans la zone normale) laissent penser qu'il faut un outil de classification plus performant que de simples combinaisons 2D.

Etudes de cas

Le cas illustré à la figure 32 concerne une patiente ayant été suivie en orthophonie pour une dysphonie, mais dont les axes thérapeutiques se sont révélés inefficaces, avec une aggravation des données objectives de bilan, notamment sur les aspects endurance tel que le temps maximum de phonation, ou encore un débit ralenti. L'enregistrement du /PaTaKa/ révèle une difficulté notable dans cette épreuve en termes de débit de syllabes et d'atonie des plosives. La distance entre le point (nommé CVM00 sur la figure 33) et le barycentre des différents groupes montre une probabilité plus élevée de diadococinésie pathologique que normale. La suggestion a donc été ici de prendre rendez-vous avec un neurologue pour des examens ciblés.

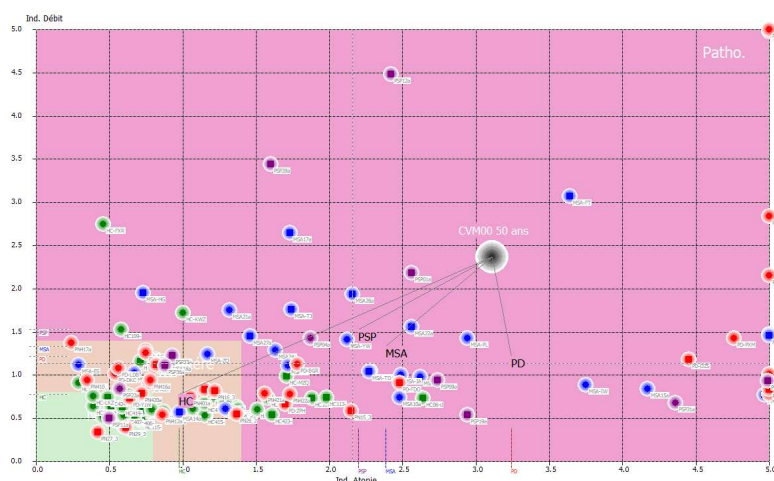


Figure 33 : Positionnement d'un nouveau cas « CVM00 » de DDK dans l'espace en 2D (débit vs. Atonie) indiquant une DDK pathologique, très éloignée de la moyenne du groupe contrôle

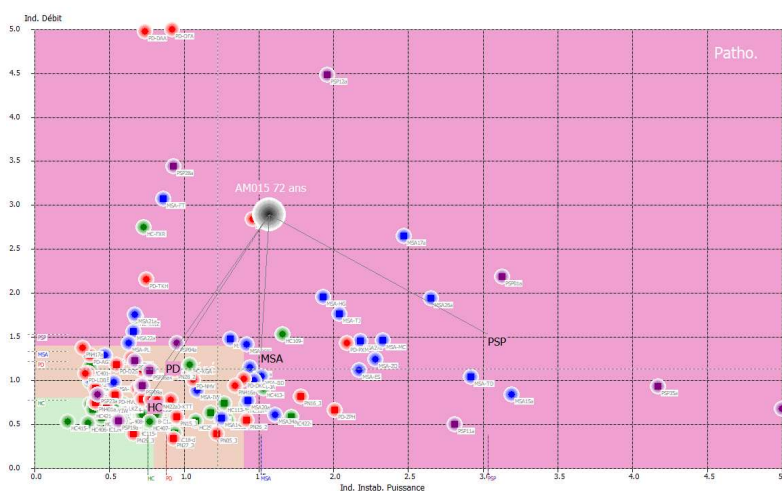


Figure 34 : Positionnement d'un nouveau cas « AM015 » de DDK dans l'espace en 2D (débit vs. Puissance) indiquant une DDK assez éloignée de la moyenne du groupe contrôle

Les performances d'un autre patient (AM015) sont reportées dans l'espace Débit fonction de la Puissance (Figure 33). Les performances sont assez éloignées du groupe témoin, même si deux patients témoins (HC-FXR, HC109) sont relativement proches.

Les techniques de classification telles que *Linear Discriminant Analysis* [Tharwat 2017] permettent de projeter les 4 indicateurs (Atonie, Débit, Irrégularité, Instab. Puissance), dans un graphe à 2 dimensions (Figure 35), après avoir calculé la combinaison linéaire de paramètres, optimale qui permettrait de regrouper les différentes classes (HC, PD, MSA, PSP) dans des zones les plus distinctes possibles.

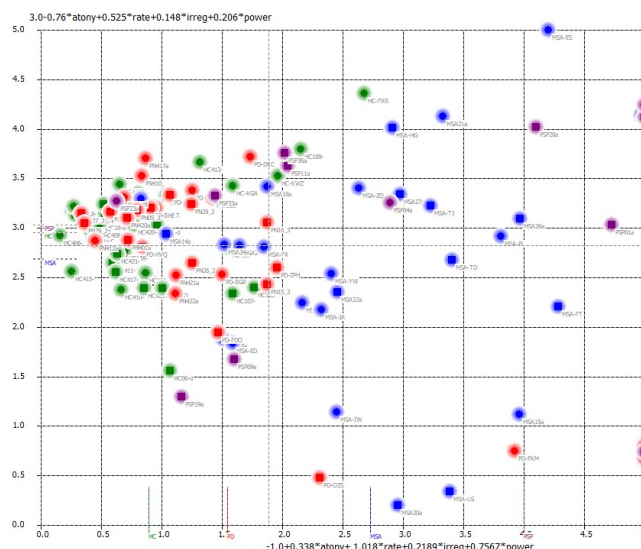


Figure 35 : Positionnement de 120 cas de diadococinésie dans un espace à 2 dimensions regroupant les 4 indicateurs d'altération de la diadococinésie

Les formules extraites du calcul statistique LDA, à l'aide de calcul matriciel et la recherche de vecteurs propres, qui sont une des méthodes utilisées par l'intelligence artificielle, permettent de projeter l'ensemble des patients dans l'espace de la figure 35 selon les expressions suivantes :

$$X = -1.0 + 0.338 \times atony + 1.018 \times rate + 0.2189 \times irreg + 0.7567 \times power$$

$$Y = 3.0 - 0.76 \times atony + 0.525 \times rate + 0.148 \times irreg + 0.206 \times power$$

Où

- *Atony* = indicateur d'atonie
- *Rate* = indicateur d'altération du débit
- *Irreg* = indicateur d'irrégularité du débit
- *Power* = indicateur d'irrégularité en puissance

On peut noter une projection bien différenciée des 4 groupes sur l'axe X, où HC est à gauche, suivi de PD, MSA et PSP. Les poids de l'indicateur de débit (1.018 pour *rate*) et d'irrégularité en puissance (0.7567 pour *Power*) sont particulièrement élevés. Concernant l'axe Y, c'est l'indicateur d'atonie ainsi que celui de débit qui se distinguent. Le groupe normal apparaît à gauche, mais le groupe PD reste assez difficile à différencier. En revanche les groupes MSA et PSP sont assez bien séparés.

D'autres techniques plus sophistiquées permettent d'améliorer les performances de classifications, mais ce sont des méthodes non linéaires, c'est-à-dire qui ne peuvent s'exprimer simplement comme des sommes pondérées d'indicateurs. Ces méthodes telles que *Random Forest*, *Radial Support Vector Machines*, voire les réseaux de neurones ne permettant plus d'accéder au véritable sens physique des

classifications. Sur la base de grands corpus, elles devraient offrir des capacités de classification permettant d'envisager des nouveaux outils et services à destination des orthophonistes dans le cadre de la détection précoce de syndromes ou d'aide au diagnostic des troubles de la parole.

Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à l'épreuve de répétition de syllabes appelée diadococinésie, en posant quelques définitions, listant les analyses usuelles et les protocoles proposés. Une étude bibliographique a permis de préciser les notions de débit en fonction de l'âge, de comparer les répétitions et les enchaînements de syllabes, ainsi que de lister les erreurs courantes, ainsi que les dérives constatées selon diverses pathologies. Nous avons aussi brièvement abordé l'aspect outils d'analyse et donné quelques recommandations concernant le protocole d'enregistrement.

Nous avons présenté quatre indicateurs d'altération de la diadococinésie, en décrivant le processus de normalisation, les différents calculs effectués, puis nous avons successivement détaillé l'indicateur d'atonie, d'altération du débit, d'irrégularité et d'instabilité en puissance. Différentes analyses statistiques ont ensuite été conduites, afin d'extraire des tendances, notamment dans le cas de la dysarthrie. Enfin, des méthodes de classification ont été appliquées sur les indicateurs pour montrer comment séparer des groupes selon différentes pathologies. Ces mesures objectives utilisées dans le cadre des évaluations de l'intelligibilité et de la fluence sont déjà une aide au diagnostic différentiel Trouble/immaturation, au jugement du degré de sévérité ainsi qu'à la de caractérisation précise et rigoureuse des pathologie auxquelles les orthophonistes sont confrontées.

A propos des auteurs



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 du traitement du signal, des circuits intégrés et de la compatibilité électromagnétique. Il a été nommé en 2006 *Distinguished Lecturer* de la société savante IEEE. Il co-anime avec Anne Menin-Sicard des formations aux orthophonistes dans le domaine de la voix et parole pathologique.

Site : www.etienne-sicard.fr
Email : etienne.sicard@insa-toulouse.fr



Anne MENIN-SICARD est orthophoniste et titulaire d'un master recherche en Sciences du langage de l'université de Grenoble. Elle a exercé en libéral à Toulouse de 1994 à 2015. Anne MENIN-SICARD est co-auteur des logiciels VOCALAB et DIADOLAB.

Dans le cadre de AMS Formation, elle organise et anime des formations aux orthophonistes sur le bilan et la prise en charge de la voix et parole pathologique. Elle a fondé en 2019 Opop, pour la formation en ligne personnalisée à destination des orthophonistes. Chercheuse associée à l'ERU 46 du LURCO, elle développe des outils de mesures objectives et de rééducation de la parole en lien avec le logiciel DIADOLAB. Elle est auteur d'un ouvrage sur l'évaluation objective de la voix (DeBoeck, 2017) ainsi que de nombreuses publications dans le domaine de la voix et de la parole pathologique.

Site : <https://www.formationsvoixparole.fr>
Email : anne.sicard2@orange.fr

Références

- [Baken 2000] Baken, R. J., & Orlikoff, R. F. (2000). Clinical measurement of speech and voice. Cengage Learning.
- [Ben-David 2017] Ben-David, B. M., & Icht, M. (2017). Oral-diadochokinetic rates for Hebrew-speaking healthy ageing population: non-word versus real-word repetition. *International journal of language & communication disorders*, 52(3), 301-310
- [Borel 2019] Borel S. (2019). Apport de l'orthophonie pour la mise en évidence de marqueurs d'évolution de l'Ataxie de Friedreich, CCFUO, Nice, Avril 2019.
- [Diadolab 2019] Menin-Sicard, A., Sicard, E. (2019) DIADOLAB 3 - Logiciel d'évaluation et de rééducation de la parole - Manuel d'utilisation. 2019. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02073314>
- [Fougeron 2017] Fougeron, C., et al. (2017). MonPaGe, un protocole informatisé d'évaluation de la parole à destination des cliniciens et des chercheurs francophones. In 7èmes Journées de Phonétique Clinique. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02437340>
- [Grenier 2020] Grenier C. (2020), Etude comparative de tests phonologiques existants et du protocole d'analyse objective de la parole avec Diadolab : intérêt et limites d'un test court et des mesures objectives d'intelligibilité et de fluence. Mémoire de Master d'orthophonie. Université de Toulouse.
- [Hlavnicka 2018] Hlavnicka, J. (2018). Automated analysis of speech disorders in neurodegenerative diseases (Doctoral dissertation, Doctoral thesis, Department of Circuit Theory, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic).
- [Jan 2007] Jan, M. « Evaluation instrumentale de la dysarthrie en France », in « Les dysarthries », Solal, 2007
- [Jeancolas 2019] Jeancolas L. (2019). Détection précoce de la maladie de Parkinson par l'analyse de la voix et corrélations avec la neuroimagerie. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Paris-Saclay, 2019. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02470759>
- [Martinez-Perez 2015] Martinez-Perez, T., James, E., & Masson, P. (2015). Construction et normalisation d'épreuves aidant au diagnostic de la dyspraxie verbale en Belgique Francophone. *Rééducation orthophonique*, 263., pp. 149-164.
- [Pierce 2013] Pierce, J.E. (2013) Alternating and sequential motion rates in older adults, *International Journal of Language & Communication Disorders* · May 2013
- [Praat] 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/>
- [Rusz 2011] Rusz, J., (2011). Quantitative acoustic measurements for characterization of speech and voice disorders in early untreated Parkinson's disease. *The journal of the Acoustical Society of America*, 129(1), 350-367

[Rusz 2015] Rusz, Jan, Speech disorders reflect differing pathophysiology in Parkinson's disease, progressive supranuclear palsy and multiple system atrophy, *Journal of Neurology*. 2015; 262(4): 992

[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*, Ortho édition, 2013, pp.23-27. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00836912>

[Sicard 2019] Menin-Sicard A., Sicard E. (2019). Méthodologie d'évaluation objective de la phonologie, de la fluence et de la prosodie - Vers un bilan rapide à destination des orthophonistes. *Journées de Phonétique Clinique JPC*, Mai 2019, Mons, Belgique. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02127039>

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

[Sicard 2020b] Sicard E., Menin-Sicard A. (2020) Le triangle vocalique et son application en contexte orthophonique. [Rapport de recherche] INSA Toulouse. 2020, Archives Ouvertes <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02504513>

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

[Wang 2009] Wang, Y. T., Kent, R. D., Duffy, J. R., & Thomas, J. E. (2009). Analysis of diadochokinesis in ataxic dysarthria using the motor speech profile program™. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 61(1), 1-11.

[Wang 2019] Wang, Y. Y., Gao, K., Kloepper, A. M., Zhao, Y., Kuruvilla-Dugdale, M., Lever, T. E., & Bunyak, F. (2019, May). DeepDDK: A Deep Learning based Oral-Diadochokinesis Analysis Software. In *2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)* (pp. 1-4). IEEE.

[Wolk 2013] Wolk, L., Edwards, M. L., & Conture, E. G. (1993). Coexistence of stuttering and disordered phonology in young children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 36(5), 906-917.

[Yaruss 2002] Yaruss, J. S., & Logan, K. J. (2002). Evaluating rate, accuracy, and fluency of young children's diadochokinetic productions: a preliminary investigation. *Journal of Fluency Disorders*, 27(1), 65-86.