

Étude comparée de la précision de mesure des systèmes d'articulographie électromagnétique 3D Wave et AG500

Christophe Savariaux¹, Pierre Badin¹, Slim Ouni² et Brigitte Wrobel-Dautcourt²

(1) GIPSA-Lab (DPC / ICP), UMR 5216, CNRS – Université de Grenoble, France

(2) LORIA, UMR 7503, BP 239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

{christophe.savariaux, pierre.badin}@gipsa-lab.fr, {slim,wrobel}@loria.fr

RESUME

Nous présentons dans ce papier une étude sur la précision de mesure des 2 appareils d'articulographie électromagnétique 3D les plus utilisés par la communauté parole, à savoir les systèmes WAVE de NDI et AG500 de Carstens. Pour cela, nous avons utilisé un protocole de mesure basé sur l'utilisation du dispositif *mka* permettant de mettre en rotation un plateau portant les capteurs. Nous avons évalué la variation des distances entre 6 capteurs pour différentes positions et orientations et ceci pour différentes vitesses de déplacement. Les résultats montrent que les 2 systèmes sont très proches et que le WAVE obtient de meilleures précisions quelques soient la distance (0.0289 vs. 0.0347 cm) et la vitesse de déplacement des capteurs (0.0289 vs. 0.0401). Il apparaît aussi que la précision dépend très peu de la vitesse des capteurs, mais diminue en fonction de la distance par rapport au centre magnétique des dispositifs.

ABSTRACT

Comparative study of the measurement accuracy of the 3D electromagnetic articulographs WAVE and AG500

We present a comparative study of the accuracy of the two most used 3D electromagnetic articulographs: NDI's WAVE system and the Carstens AG500 system. To accurately judge their precision, we designed an experimental paradigm using the *mka* setup, to allow the coils to rotate on a housing inside the magnetic field. We then evaluated the pairwise variation of the distances between the 6 coils in two ways: relative to the distance of the pairs from the magnetic center of the system and relative to rotational velocity. Results are similar for the 2 systems with somewhat better accuracy for the WAVE system, regardless of distance (0.0289 vs. 0.0347 cm) and regardless of coil velocity (0.0289 vs. 0.0401 cm). It also seems that the accuracy is relatively independent of the coil velocity, but decreases with the distance from magnetic center of the system.

MOTS-CLES : Articulographe électromagnétique 3D, précision, production de la parole.

KEYWORDS: 3D electromagnetic articulograph, accuracy, speech production.

1 Introduction

L'étude des mécanismes de production de la parole aux niveaux périphériques, c'est-à-dire aux niveaux articuloire et acoustique, passe par la connaissance de la forme du conduit vocal. Pour cela, nous sommes donc amenés à enregistrer et étudier les mouvements des articulateurs tels que la mâchoire, la langue, les lèvres ou encore le velum. La majorité de ces articulateurs n'étant pas directement visible, nous devons donc avoir recours à différentes techniques d'acquisition allant de l'IRM anatomique à l'articulographie électromagnétique en passant par l'imagerie ultrasonique.

Depuis de nombreuses années, le laboratoire Gipsa-lab dispose d'un articulographe électromagnétique 2D développé par la société Carstens. Ce système permet la mesure de 12 capteurs en simultané à une fréquence de 200 Hz. Mais ce système comporte plusieurs inconvénients : d'une part, il est nécessaire de coller impérativement ces capteurs dans le plan médiosagittal du sujet ce qui n'est pas toujours facile à réaliser ; d'autre part il est composé d'un casque que l'on fixe, à l'aide d'une sangle, sur la tête du sujet, le tout devenant assez inconfortable lors de l'enregistrement de longs corpus.

Le laboratoire a donc choisi d'acquérir un articulographe électromagnétique 3D à la fois pour permettre au sujet d'avoir la tête libre durant les enregistrements mais aussi et surtout pour (1) pouvoir acquérir des données avec 5 degrés de liberté pour chaque capteur (3 coordonnées spatiales en x, y et z et 2 coordonnées angulaires autour des axes transversal et antérieur-postérieur donnant respectivement l'azimut et l'élévation du capteur) ; et (2) éviter l'augmentation des erreurs lorsque les capteurs sont collés hors du plan médiosagittal ou encore les mouvements de la langue ne sont pas symétriques par rapport au plan médiosagittal et induisent des orientations des capteurs dans différentes directions. Les deux modèles d'articulographes électromagnétiques les plus courants sont actuellement le système WAVE (NDI, Canada) et le système AG500 (Carstens Medizinelektronik GmbH, Allemagne). Le principe de fonctionnement de ces deux appareils reste sensiblement le même : un champ électromagnétique alternatif est généré par plusieurs bobines émettrices provoquant ainsi un courant induit d'intensité variable dans un capteur (une petite bobine) placé à l'intérieur de ce champ. L'intensité du courant varie en fonction de la distance et de l'orientation relative de ce capteur par rapport à chacune des bobines émettrices. Si la localisation du capteur dans le champ peut être obtenue directement en fonction de l'intensité du courant induit, l'orientation et l'inclinaison de celui-ci sont plus complexes à obtenir et nécessitent la résolution d'équations à multiples inconnues (cf. pour plus de précisions Perrell *et al.*, 1992 ; Kaburagi *et al.*, 2005 ; Hoole et Zierdt, 2010 ; Kröger *et al.*, 2008).

La différence majeure entre les deux systèmes réside dans leur taille et leur conception. Le système AG500 est composé de six bobines émettrices, réparties de manière sphérique, fixées sur une structure en plexiglas d'environ 1m³. Chacune de ces bobines émettant à des fréquences comprises entre 7,5 et 13,75 kHz induisent des courants dans un total de 12 capteurs. Le système AG500 fournit ainsi les coordonnées de 12 capteurs maximum à une fréquence de 200Hz.

Le système WAVE utilise un nombre inconnu de bobines émettrices encapsulées dans un boîtier d'émission (plaque d'émission) de dimension 20×20×7 cm, générant un champ électromagnétique dans un volume réglable par logiciel et de taille maximum 50×50×50 cm (celui retenu pour cette étude). Le système de base est composé de 8 canaux échantillonnés à 100Hz, mais il peut être augmenté jusqu'à 16 canaux à une fréquence maximum de 400Hz. A noter également que le système WAVE propose en option un capteur à 6 degrés de liberté qui permet d'obtenir, en plus des 5 degrés habituels, les coordonnées angulaires par rapport à l'axe inférieur-supérieur. Le système WAVE utilisé pour cette étude est celui de l'équipe MAGRIT du Loria. Il est intégré dans un système global d'acquisition de données multimodales incluant des images ultrasonores, vidéos, IRM et des données audio dans l'objectif de construire un modèle articulaire dynamique (Aron *et al.*, 2009).

Pour pouvoir comparer la précision de ces deux systèmes, nous avons choisi de réaliser nos propres mesures, malgré les nombreuses publications disponibles dans la littérature (Zierdt, 2007 ; Kröger *et al.*, 2008 ; Kroos, 2008 ; Yunusova *et al.*, 2009 ; Berry, 2011). En effet, ces travaux ne sont pas toujours comparables entre eux à cause de l'utilisation de méthodologies différentes pour

l'évaluation de la précision. De plus, aucun de ces travaux ne réalise une étude comparée des 2 systèmes. Berry (2011) a mesuré la précision de mesure du système WAVE dans un champ de 50 cm³. Il trouve une médiane de l'erreur de mesure (pour des distances variant de 5 à 50 cm du boîtier d'émission) de 0.071 cm pour des mesures statiques et de 0.116 cm pour des mesures dynamiques. Kröger *et al.* (2008) trouvent pour la version Aurora de NDI précédant la version actuelle WAVE un écart type, pour un capteur collé sur la mandibule, allant de 0.054 à 0.103 cm en fonction du corpus prononcé (allant de la syllabe /ba/ à un texte lu). Par ailleurs, Yunusova *et al.* (2009) montrent que les mesures de médiane effectuées avec l'AG500 pour deux capteurs collés sur la mandibule varient de 0.009 à 0.022 cm en fonction du corpus prononcé (respectivement la production de la voyelle /a/ et la lecture d'un paragraphe). Les auteurs présentent également une erreur de mesure calculée en fonction des axes X, Y et Z respectivement de 0.024, 0.022 et 0.038 cm.

Nous présentons dans ce papier la méthodologie utilisée pour mesurer la précision de ces deux systèmes en fonction de la position et de l'orientation du dispositif à l'intérieur des champs magnétiques ainsi que les résultats obtenus pour différentes vitesses de déplacements des capteurs.

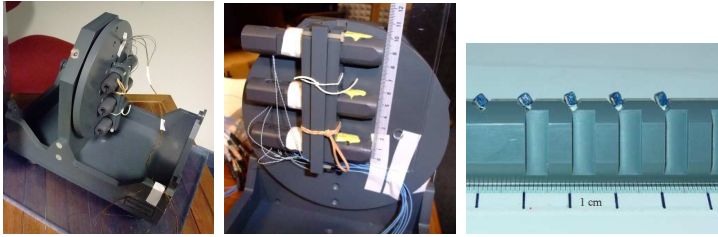
2 Méthode et protocole de mesure

Le but de notre protocole de mesure est double : tout d'abord nous voulons comparer la précision de mesure des deux systèmes pour différents types de mouvement, mais nous voulons également avoir une idée aussi précise que possible de la fiabilité des mesures en fonction de la distance et de l'orientation des capteurs par rapport au système d'émission des ondes électromagnétiques.

2.1 Le dispositif *mka*

Le dispositif *mka* a été conçu par la société Carstens dans le but original de calibrer l'ancien système d'articulographie AG100. Il a été conçu pour se fixer sur le casque de l'AG100 ou de l'AG200 de manière à ce que le centre du dispositif *mka* soit au centre du casque. Il est composé d'une partie fixe, sur laquelle se fixe le casque, et d'un plateau circulaire pouvant tourner à 360 degrés autour de son axe. La partie fixe comporte 24 marques servant de repère pour chacun des pas espacés de 15 degrés. Ce plateau est conçu pour intégrer jusqu'à 3 supports (racks) positionnés à des distances respectivement de 0, 4 et 8 cm par rapport au centre (figures 1A et 1B). Chacun des racks contient 5 fentes (encoches) pouvant recevoir les capteurs (figure 1C). On peut ainsi couvrir, en deux dimensions et en fonction de la position des capteurs installés sur les différents racks, un espace circulaire de 8 cm de rayon par rapport au centre par pas de 15 degrés (*cf.* pour plus de détails Hoole, 1996).

Pour notre étude nous n'avons utilisé que 2 capteurs par rack soit 6 capteurs au total, que nous avons disposés dans les fentes se trouvant aux extrémités de celui-ci, ce qui représente une distance de 4 cm entre chaque capteur. Pour nous assurer que les capteurs soient parfaitement solidaires du plateau pendant les mouvements de rotation manuelle du plateau, nous avons maintenu ceux-ci dans les fentes à l'aide de pâte à modeler puis nous avons recouvert le tout d'une bande adhésive. Les fentes ont été conçues de manière à ce que l'axe magnétique des bobines des capteurs soit toujours perpendiculaire au plan du plateau. Les 3 racks ont été positionnés respectivement à 0, 4 et 8 cm du centre. Nous avons positionné chaque rack de manière excentrée par rapport au centre du dispositif *mka*, afin que les trajectoires des deux capteurs correspondant ne se trouvent pas sur le même cercle.



FIGURES 1A, 1B ET 1C – A gauche et au centre, photos du dispositif *mka* avec les 3 racks positionnés. A droite, exemple d'un rack contenant 5 capteurs.

2.2 Protocole de mesure

Le protocole de mesure est identique pour chacun des deux systèmes. Après avoir positionné les 3 racks sur le plateau circulaire, on fait tourner celui-ci de manière à avoir les racks en position basse, ce qui définit la position de départ. Nous avons ensuite enregistré 4 sessions :

- **condition statique** : une session en tournant le plateau de manière lente avec arrêt à chaque marque de repère en faisant un tour complet, soit 24 positions,
- **condition dynamique lent** : une session en tournant le plateau de manière lente mais continue en faisant un tour complet puis le retour et ceci 3 fois,
- **condition dynamique rapide** : une session en tournant le plateau par quart de tour (90°) de manière plus rapide en faisant ainsi un tour complet en 4 étapes puis le retour et ceci 3 fois,
- **condition dynamique très rapide** : une session en tournant le plateau par quart de tour (90°) de manière très rapide et ceci 3 fois.

2.3 Positionnement du dispositif *mka* par rapport aux systèmes

Le dispositif *mka* n'ayant aucune référence commune avec les deux systèmes testés, nous avons décidé arbitrairement de l'orientation de celui-ci. Pour l'AG500, nous avons considéré – comme suggéré par Carstens – le plan médiosagittal de la structure cubique qui porte les bobines émettrices (plan $X_{AG}-Z_{AG}$) comme plan de référence. Ainsi, nous avons enregistré l'ensemble du protocole pour 2 positions du plateau circulaire : une première session avec le plateau placé approximativement dans le plan $X_{AG}-Z_{AG}$, puis une seconde avec le plateau formant un angle d'environ 45° par rapport au plan $X_{AG}-Z_{AG}$.

En ce qui concerne le système WAVE, nous avons également étudié l'effet de l'orientation des capteurs (et donc du plateau) par rapport à la plaque d'émission. Nous avons enregistré l'ensemble du protocole décrit ci-dessus pour 4 positions :

- le plateau placé parallèlement à la plaque d'émission (plan $X_{WAV}-Y_{WAV}$) avec le centre à une distance de 13,5 cm de celle-ci,
- le plateau formant approximativement un angle de 45° par rapport à la plaque d'émission avec son centre à une distance de 17 cm de celle-ci,
- le plateau formant approximativement un angle de 90° par rapport à la plaque d'émission (plan $X_{WAV}-Z_{WAV}$) avec son centre à une distance de 17 cm de celle-ci,
- le plateau formant approximativement un angle de 90° par rapport à la plaque d'émission (plan $X_{WAV}-Z_{WAV}$) avec son centre le plus proche possible de celle-ci, soit à une distance de 11 cm.

Notons que le capteur de référence du système WAVE (6 degrés de liberté) n'a pas été utilisé, et que les coordonnées obtenues pour les capteurs sont référencées par rapport à la plaque.

3 Résultats

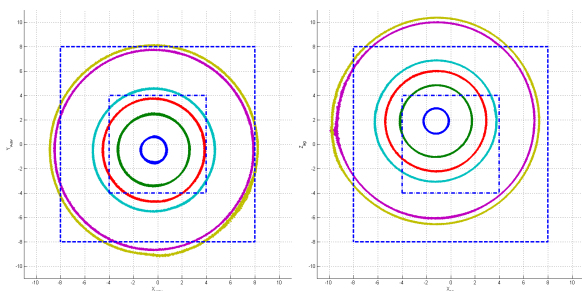
Les évaluations sont basées sur l'analyse des coordonnées des 6 capteurs issues directement du logiciel d'acquisition fourni par la société NDI sans filtrage passe-bas pour le système WAVE. Pour le système AG500, nous avons appliqué les deux étapes de calcul de l'algorithme *Calcpas* (fourni par la société Carstens) : la première étape avec l'option forward/backward pour le calcul des trajectoires puis un deuxième passage à partir de la position initiale obtenue à la première étape. L'estimation des vitesses a été obtenue par différenciation des signaux filtrés passe-bas à 20 Hz pour chacun des systèmes. La précision des mesures sera évaluée par l'analyse des distances entre les 6 capteurs utilisés soit sur un total de 15 distances. Chaque distance a été mesurée en centimètres selon la formule suivante :

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_y)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

où $(x, y, z)_{(1,2)}$ représentent respectivement les coordonnées des couples de capteurs. L'écart-type a été calculé, pour chacune des 15 distances, sur l'ensemble des points de mesure retenus pour chaque analyse. La moyenne de ces écarts-types a été retenue comme estimation globale de l'erreur.

3.1 Comparaison des vitesses et du positionnement du *mkal*

L'espace total couvert par les capteurs pour ces deux systèmes est illustré par les figures 2A et 2B. On peut remarquer que l'espace couvert par l'ensemble des capteurs se trouve à l'intérieur d'un carré approximativement de 9×9 cm et quasiment au centre du système WAVE (figure 2A). Pour l'AG500, l'espace couvert par l'ensemble des capteurs se trouve toujours à l'intérieur d'un carré approximativement de 9×9 cm mais celui-ci se trouve décalé par rapport à l'origine du système Carstens approximativement de $X_{AG} = -2\text{cm}$ $Z_{AG} = +2\text{cm}$ (figure 2B). Pour affiner nos résultats, nous avons choisi de diviser l'espace d'étude en 3 zones spécifiques. Ces zones ont été obtenues en limitant le volume d'analyse suivant les 3 axes X, Y et Z à des valeurs maximum de 4 et 8 cm (cf. les carrés sur les figures 2A et 2B) puis sans restriction volumétrique pour la dernière zone.



FIGURES 2A ET 2B – Trajectoire des 6 capteurs, dans les plans médiosagittaux X_{AG} - Z_{AG} et X_{WAV} - Y_{WAV} des systèmes AG500 et WAVE respectivement, pour la condition dynamique lent. Les carrés tracés en traits tiretés et pointillés représentent les espaces de mesures utilisés dans la section 3.3.

Les profils de vitesse estimés avec les deux systèmes montrent que :

- pour la condition dynamique lente, les valeurs obtenues pour le capteur le plus rapide (situé à l'extérieur du dispositif, couleur verte kaki sur les graphes) sont comprises entre 10 et 30 cm/s pour le WAVE et pour l'AG500,
- pour la condition dynamique rapide, les valeurs obtenues avec ce même capteur sont comprises entre 30 et 50 cm/s pour le WAVE et entre 40 et 70 cm/s pour l'AG500,
- pour la condition dynamique très rapide, les valeurs obtenues avec ce capteur sont supérieures à 50 cm/s et toujours inférieures à 100 cm/s, et supérieures à 60 cm/s et presque toujours inférieures à 100 cm/s pour l'AG500.

Ces profils montrent que les vitesses sont relativement homogènes pour une même condition. De plus, nous avons constaté que pour les conditions dynamiques rapide et très rapide, les vitesses étaient légèrement plus hautes lors de l'acquisition avec l'AG500 que lors de l'acquisition avec le WAVE. Le dispositif *mkaI* étant manipulé manuellement, il était en effet difficile de reproduire exactement les mêmes mouvements à plusieurs minutes d'intervalle.

3.2 Résultats en fonction de l'orientation du dispositif *mkaI*

La Table 1 représente les valeurs moyennes des écarts-types obtenues à partir des 15 distances entre les 6 capteurs pour le WAVE. Comme indiqué dans la section 2.3 nous avons observé la précision de la mesure en fonction de l'orientation du dispositif (et donc des capteurs) par rapport à la plaque d'émission. Nous constatons que la précision du système WAVE diminue lorsque l'orientation du plateau s'éloigne de la parallèle au plan principal de la plaque d'émission : 0.0683 vs. 0.0281 cm pour une orientation de 45° et 0.0366 vs. 0.0281 cm pour une orientation de 90° (Table 1). A noter également que si l'on se rapproche de la plaque avec le dispositif tourné à 90°, la précision s'en trouve améliorée : 0.0231 pour une mesure à 11 cm vs. 0.0366 pour une mesure à 17 cm de la plaque.

Orientation du dispositif <i>mkaI</i>	Plan X_{WAV} - Z_{WAV} (13,5 cm)	Plan à 45° (17 cm)	Plan à 90° (17 cm)	Plan à 90° (11 cm)	Global
Ecarts types	0.0281	0.0683	0.0366	0.0231	0.0390

TABLE 1 – Ecarts-types (cm) obtenus avec le système WAVE sur les moyennes des 15 distances en fonction de l'orientation du *mkaI*, toutes vitesses confondues (cf. § 2.3 pour détails).

Pour l'AG500, nous pouvons constater le même phénomène qu'avec le système WAVE, c'est à dire que la précision de mesure diminue si l'on oriente différemment les capteurs à l'intérieur du champ : 0.0592 cm pour un angle de 45° vs. 0.0444 cm dans le plan médiosagittal (Table 2).

Si l'on compare ensuite les mesures obtenues dans le plan médiosagittal pour les 2 systèmes (en gras dans les Tables 1 et 2) toutes vitesses confondues – cette condition devant correspondre à la précision optimale – nous observons que le système WAVE obtient une meilleure précision de mesure, mais avec un écart faible entre les 2 systèmes : 0.0281 vs. 0.0444 cm.

Orientation	Plan X_{AG} - Z_{AG}	Plan à 45°	Global
Ecarts types	0.0444	0.0592	0.0518

TABLE 2 – Ecarts-types (cm) obtenus avec le système AG500 sur les moyennes des 15 distances pour 2 orientations du *mkaI*, toutes vitesses confondues.

3.3 Résultats en fonction de la taille de la zone d'analyse

L'analyse des résultats obtenus dans le plan médiosagittal, toutes vitesses confondues, montre que plus on s'éloigne du centre du système et plus on perd en précision de mesure (Table 3) et ce quelque soit le système utilisé : 0.0289 vs. 0.0120 cm pour le WAVE et 0.0347 vs. 0.0225 cm pour l'AG500 pour un agrandissement de la zone d'analyse de ± 4 cm à ± 8 cm. Cette tendance est renforcée si l'on compare les résultats obtenus toutes orientations du *mka* confondues (cf. § 3.2) : 0.0474 vs. 0.0156 cm pour le WAVE et 0.0385 vs. 0.0179 cm pour l'AG500.

La comparaison des mesures obtenues par les 2 systèmes dans le plan médiosagittal pour une zone d'analyse de ± 8 cm (en gras dans la Table 3) – qui correspond à la taille minimale pour l'étude des mouvements à l'intérieur du conduit vocal – montre que le système WAVE obtient une meilleure précision de mesure mais avec une différence très faible : 0.0289 vs. 0.0347 cm.

Taille de la zone d'analyse	± 4 cm	± 8 cm	non limité	± 4 cm	± 8 cm	non limité
	Plan médio	Plan médio	Plan médio	Tous plans	Tous plans	Tous plans
WAVE	0.0120	0.0289	0.0281	0.0156	0.0474	0.0435
AG500	0.0225	0.0347	0.0444	0.0179	0.0385	0.0532

TABLE 3 – Ecart-types (cm) obtenus pour les 2 systèmes sur les moyennes des 15 distances pour 3 zones d'analyse et pour différentes orientations du *mka*, toutes vitesses confondues.

3.4 Résultats en fonction de la vitesse des capteurs

L'analyse des résultats obtenus dans le plan médiosagittal sans limite de la zone d'analyse montre que l'augmentation de la vitesse de déplacement des capteurs a peu d'impact sur la précision de mesure (Table 4). Si l'on reste dans la plage de vitesse correspondant à celle des articulateurs mis en jeu lors de la production de parole (de l'ordre de 20cm/s d'après Payan & Perrier (1997)) (cf. les 3 premières colonnes de la Table 4), la variation de la précision de mesure reste inférieure au dixième de millimètre pour les deux systèmes : autour de 0.03 cm pour le WAVE et autour de 0.04 cm pour l'AG500. On observe là encore de meilleurs résultats pour le système WAVE dans cette plage de vitesse référence (en gras dans la Table 4) même si cette différence reste très faible.

Vitesse des capteurs (cm/s)	< 2	< 3	entre 10 et 30	entre 30 et 50	> 50
WAVE	0.0253	0.0252	0.0289	0.0338	0.0297
AG500	0.0411	0.0423	0.0401	0.0434	0.0241

TABLE 4 – Ecart-types (cm) obtenus pour les 2 systèmes sur les moyennes des 15 distances pour différentes vitesses de rotation du *mka*, dans le plan médiosagittal et toutes zones confondues.

4 Conclusion

L'objectif de ce travail était d'évaluer la précision de mesure des deux systèmes d'articulographie électromagnétique 3D, WAVE et AG500. A l'aide du dispositif *mka* nous avons pu mesurer cette précision dans différentes situations en faisant varier indépendamment la taille de la zone d'analyse, l'orientation des capteurs dans le champ magnétique ou bien encore la vitesse de déplacement de ces derniers. Les résultats obtenus montrent que (1) les performances des deux systèmes sont très proches, avec quelques dixièmes de millimètres de différence, même si d'une

manière générale le système WAVE obtient tous les meilleurs résultats ; (2) les deux systèmes sont plus sensibles à la distance et à l'orientation des capteurs par rapport au centre qu'à la vitesse de déplacement de ceux-ci. Notons enfin que ces résultats sont confirmés par des mesures effectuées par chacun des constructeurs en utilisant un robot mobile sur un espace de mesure de ± 8 cm et qu'ils nous ont gracieusement fournis pour vérification.

Remerciements

Nous tenons à remercier Yves Laprie et Marie-Odile Berger pour l'accueil dans leurs équipes PAROLE et MAGRIT du LORIA à Nancy ce qui nous a permis de réaliser ces travaux. Nous tenons également à remercier Alice Turk et Christian Geng pour leur accueil au CSTR à Edinburg.

Références

- ARON, M., TOUTIOS, A., BERGER, M.-A., KERRIEN, E., WROBEL-DAUTCOURT, B. ET LAPRIE, Y. (2009). Registration of Multimodal Data for Estimating the Parameters of an Articulatory Model. In *Actes de ICASSP 2009*, Taipei, Taiwan, pages 4489–4492.
- BERRY, J. (2011). Accuracy of the NDI Wave Speech Research System. *JSLHR*, 54, pages 1295–1301
- Hoole, P. (1996). Issues in the acquisition, processing, reduction and parameterization of articulographic data. *FIPKM*, 34, pages 158–173.
- HOOLE, P. ET ZIERDT, A. (2010). Five-dimensional articulography. In *Speech Motor Control: New developments in basic and applied research*. Ben Maassen et Pascal Van Lieshout éditeurs, OUP, pages 331–349.
- KABURAGI, T., WAKAMIYA, K. ET HONDA, M. (2005). Three dimensional electromagnetic articulography: A measurement principle. *JASA*, 118, pages 428–443.
- KRÖGER, B. J., POUPLIER, M. ET TIEDE, M. K. (2008). An evaluation of the Aurora system as a flesh-point tracking tool for speech production research. *JSLHR*, 51, pages 914–921.
- KROOS C. (2008). Measurement Accuracy in 3D Electromagnetic Articulography (Carstens AG500). In *Actes du 8e Séminaire International on Speech Production*, pages 61–64.
- PERKELL, J. S., COHEN, M. H., SVIRSKY, M. A., MATTHIES, M. L., GARABIETA, I. ET JACKSON, M. T. (1992). Electromagnetic midsagittal articulometer systems for transducing speech articulatory movements. *JASA*, 92, pages 3078–3096.
- YUNUSOVA, Y., GREEN, J. ET MEFFERD, A. (2009). Accuracy assessment for AG500, electromagnetic articulograph. *JSLHR*, 52, pages 547–555.
- ZIERDT, A. (2007). EMA and the crux of calibration. In *Actes du XVth International Congress of Phonetic Science*, 1, pages 593–596.
- Payan, Y. ET Perrier, P. (1997). Synthesis of V-V sequences with a 2D biomechanical tongue model controlled by the Equilibrium Point Hypothesis. *Speech Communication*, 22, 185-205.