



Approche Acoustique de la Baisse de Vigilance par Analyse de la Voix

R. Ruiz^a, S. Boyer^b, P. Plantin De Hugues^c, A. Daurat^b et C. Legros^a

^aLARA, Université Toulouse 2 le Mirail, 5 allées Antonio Machado, 31058 Toulouse Cedex 1, France

^bUMR 5263 CNRS - EPHE - CLLE LTC, Université Toulouse 2 le Mirail, 5 allées Antonio Machado,
31058 Toulouse Cedex 1, France

^cBureau d'Enquêtes et d'Analyses, sécurité de l'aviation civile, Aéroport du Bourget, 93352 Le Bourget
Cedex, France

robert.ruiz@univ-tlse2.fr

Cinq équipages d'élèves-pilotes en fin de formation ont tour à tour été enregistrés pendant deux séances matinales de simulation de vol de quatre heures chacune (ENAC - Airbus Training Center). Les conditions étaient proches de celles de pilotes en activité lors de rotations quotidiennes court-courrier. Une privation partielle de sommeil due à un réveil précoce existait et la charge de travail était importante et ininterrompue. Les niveaux de vigilance et de charge mentale ont été auto-évalués au moyen de questionnaires complétés en situation de repos, en début et en fin de séance de simulation. Pour cette première approche, nous avons retenu le pilote qui présentait la plus longue privation de sommeil et la baisse de vigilance la plus forte entre les débuts et les fins de séance (UMR 5263 CNRS -Laboratoire CLLE-LTC). L'analyse acoustique consiste à identifier les paramètres des voyelles qui sont modifiés. Parmi un grand nombre de mesures, le shimmer et plusieurs caractéristiques en lien avec la longueur euclidienne du signal varient significativement entre le début et la fin des vols. Ces résultats constituent l'étape de faisabilité de la recherche en cours sur les effets acoustiques de la privation de sommeil et leur corrélation avec des données objectives d'imagerie cérébrale.

1 Introduction

L'expérimentation qui est l'objet de cette publication est le préalable à une étude de plus grande envergure sur les effets acoustiques vocaux de la privation de sommeil. L'application des résultats concerne plus particulièrement les pilotes d'avion. En effet, leurs conditions de travail sont propices à provoquer des perturbations de la quantité et de la qualité du sommeil (réveils matinaux, décalages horaires, durée des vols longs courriers, enchaînement des vols). Dès lors, la vigilance et la prise de décision peuvent être perturbées avec les conséquences dramatiques qui peuvent en résulter. L'analyse vocale est un moyen pour en établir le constat car le recueil des données est non invasif et les pilotes travaillent en condition d'enregistrement permanent de leurs conversations.

L'imagerie cérébrale fournit des indicateurs fiables et robustes sur l'état de vigilance. Si leur corrélation avec des paramètres acoustiques est avérée, ceux-ci pourront à leur tour en devenir une estimation objective. Tel est l'objet de la prochaine étape de la recherche. Pour l'étude présente ce sont des mesures subjectives de la vigilance et de la charge de travail qui sont utilisées. Ces mesures subjectives ont permis de sélectionner l'individu qui est le plus fortement affecté par le manque de sommeil pour rechercher s'il présente des modifications du signal vocal. La littérature nous apprend que la privation de sommeil affecte la voix [1,2,3,4,5]. Mais dans le cas présent de pilotes d'avion en situation d'activité avec une privation partielle de sommeil et une lourde charge de travail, les connaissances font défaut. L'objectif poursuivi est de vérifier si tel est le cas pour cette situation expérimentale. La généralisation des résultats n'est pas envisageable en ne retenant que le pilote le plus affecté. Cependant, la faisabilité d'une étude avec des moyens d'investigation plus lourds, comme ceux de l'imagerie cérébrale, peut être prononcée.

2 Conditions expérimentales

Les élèves-pilotes en fin de cursus à l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), donc déjà formés au pilotage, doivent obtenir une certification pour le vol en équipage. Ils effectuent des séances d'entraînement de quatre heures de vols courts courrier consécutifs sur un simulateur fixe d'Airbus A320 avant l'épreuve finale (« Airbus Training Center », Toulouse). Après deux heures de simulation, pilote et copilote permutent pour les deux heures restantes. Cinq équipages (pilote et copilote) ont été enregistrés au cours de deux séances différentes. Les conditions de simulation sont réalistes (plan de vol, charge de travail,

cockpit réel avec système de vision). Les dix séances ont été choisies en matinée pour se rapprocher des conditions réelles de travail lors de rotations court courrier sur le territoire français. La préparation du vol, au moins une heure avant le début de la séance, et le temps de trajet pour se rendre sur les lieux conduisent à des heures de réveil précoce et donc à une privation partielle de sommeil. Par ailleurs la charge de travail est importante durant les vols et les pilotes se déclarent fatigués à l'issue des séances.

3 Mesures

3.1 Mesures subjectives de la vigilance et de la charge de travail

Il s'agit de mesures subjectives issues de questionnaires. Elles permettent d'évaluer la qualité du sommeil, le niveau de vigilance, et la charge de travail. Ce sont les suivantes :

- questionnaire abrégé de qualité du sommeil de Pittsburgh (PSQI) [11];
- questionnaire matin/soir de Horne et Östberg [12];
- échelle de Thayer (auto-estimation de l'état de vigilance) [13];
- NASA Task Load Index (évaluation de la charge de travail). [14].

Chaque test fournit un score numérique. Tous ces questionnaires ont été complétés en début et en fin de séance ainsi que lors d'enregistrements réalisés « au repos ».

3.2 Mesures acoustiques

Les séances sont intégralement enregistrées pour chaque membre d'équipage. Chaque pilote est équipé d'un microphone monté sur un serre-tête qui permet de suivre les mouvements de la tête à distance constante des lèvres (AKG C555L) et connecté à un enregistreur numérique (Fostex FR-2, 44.1kHz, 16 bits).

Quelques jours avant leur première séance de vol en équipage, ils sont enregistrés au repos en conversation naturelle et prononcent une liste de phrases issues du vocabulaire aéronautique. Ce recueil a lieu en matinée à la même heure que celle des débuts des séances pour conserver une cohérence circadienne.

Les paramètres acoustiques sont estimés à partir des signaux de voyelles segmentées. Ce sont :

- des caractéristiques prosodiques (fréquence fondamentale moyenne par voyelle, écart-type, coefficient de variation, jitters,

shimmers, fréquence de modulation d'amplitude des maxima d'amplitude glottique [8] ;

- des caractéristiques de la longueur euclidienne du signal ("Digital Amplitude Length" (DAL) et ses mesures associées [6]) ;
- des caractéristiques spectrales (fréquence des formants, centre de gravité spectral, fréquences d'équilibre énergétique et spectrale, pente spectrale, coefficients MFCC et distances spectrales).

Cette gamme couvre les principales dimensions du signal.

Les voyelles sont segmentées à l'aide d'un logiciel d'édition audio (Audacity®) par découpage visuel sur le chronogramme, par contrôle auditif et avec l'appui, si nécessaire, d'un spectrogramme bande fine (Audiosculpt, IRCAM). Seule la partie quasi stationnaire est conservée; l'attaque, la co-articulation et l'extinction sont éliminées. Les paramètres acoustiques sont mesurés par des programmes spécifiques développés dans l'environnement Matlab®.

4 Résultats

4.1 Niveau de vigilance et charge de travail

La privation partielle de sommeil existe avant les séances de pilotage. La comparaison entre le nombre de minutes de sommeil déclaré avant les vols simulés par les pilotes est significativement plus faible qu'avant les enregistrements au repos : 415' ($\sigma=66'$) et 397' ($\sigma=92'$) pour les deux séances contre 454' ($\sigma=61'$) pour le repos.

La charge de travail a entraîné une forte demande mentale, un effort important et une faible demande physique (Tableau 1).

Tableau 1 : Résultats du NASA Task Load Index pour l'ensemble des pilotes (valeur moyennes, et écart-types entre parenthèses) et pour le pilote GP.

	Séance 1	Séance 2
Demande Mentale moyenne	15,2 (3,8)	16,1 (2,1)
Demande Mentale de GP	19	18
Demande Physique moyenne	9,3 (4,6)	9,6 (5,1)
Demande Physique de GP	6	6
Effort moyen	13,2 (4,0)	15,6 (2,4)
Effort de GP	17	17
Performance moyenne	9,9 (5,0)	12,1 (4,9)
Performance de GP	6	13

Parmi tous les pilotes, un seul (dont les initiales sont GP) présente une baisse importante de la vigilance entre le début et la fin des séances (Tableau 2). Plus le score est élevé et plus la vigilance est importante.

Il présente toujours une vigilance élevée au début des simulations de vol mais elle diminue fortement à la fin des séances. De plus, il est en privation de sommeil: il a eu respectivement 300' et 330' de sommeil avant chacune des deux matinées de vol et 390' avant les enregistrements au repos.

Tableau 2 : Niveau de vigilance (échelle de Thayer) pour l'ensemble des pilotes (valeurs moyennes, et écart-types entre parenthèses) et pour le pilote GP.

	Moyenne pilotes	Pilote GP
Repos	2,09 (0,76)	3,55
S1 Début	1,76 (0,94)	4
S1 Fin	1,72 (0,53)	2
S2 Début	1,87 (0,99)	3,4
S2 Fin	1,63 (0,76)	1

La conjugaison de tous ces éléments le dispose donc à cette étude préparatoire des effets acoustiques de la baisse de vigilance et de la charge de travail en situation de privation de sommeil tout comme pourraient l'être des pilotes en activité sur des journées de vols court-courriers.

Parmi les dix élèves-pilotes de l'expérience, il est celui qui présente les plus grandes baisses de vigilance. C'est pourquoi il est retenu dans cette phase préparatoire. L'hypothèse étant que les variations acoustiques seront elles aussi maximales.

4.2 Paramètres acoustiques

Le principe de l'analyse des mesures consiste à comparer les échantillons de parole de la voix du pilote GP entre chaque début et chaque fin de séance ainsi qu'avec sa voix au repos. 527 voyelles ont été segmentées dont 54 au repos, respectivement 87 et 117 pour le début et la fin de la première séance et 157 et 112 pour la seconde séance de vol.

Parmi tous les paramètres acoustiques mesurés, ne sont retenus que ceux:

- dont les valeurs moyennes présentent le même sens de variation entre le début et la fin de chaque séance,
- dont les variations entre le début et la fin de séance sont significatives.

En définitive, les paramètres retenus (Tableau 3) sont le shimmer, le shimmer factor et tous les paramètres de la longueur euclidienne du signal (DAL) à une exception près. Aucun paramètre spectral n'a vérifié les deux conditions précédentes.

Le tableau 4 récapitule les résultats de la mesure des paramètres prosodiques. Ils sont insuffisamment significatifs et de sens de variation différent entre le début et la fin des deux séances. Néanmoins, bien que non significative, la fréquence fondamentale moyenne montre une décroissance entre le début et la fin de chaque séance.

Pour la comparaison avec les valeurs au repos on peut supposer qu'avant les séances, le pilote a pu se trouver dans un état de tension, de stress, en tout cas dans un état non neutre, conduisant à des paramètres acoustiques différents de ceux au repos.

Lors d'autres expérimentations en simulateur de vol, un accroissement de la fréquence fondamentale moyenne entre

le repos et les voix enregistrées en conditions normales de vol a été constaté. Tel est également le cas ici (Tableau 4). L'accomplissement d'une tâche, ici le pilotage, éventuellement accompagné de la tension liée à la mise en situation de l'élève-pilote peuvent en être les causes. L'environnement acoustique du poste de pilotage, plus bruyant que la salle où ont eu lieu les enregistrements au repos, peut conduire le locuteur à s'exprimer avec un niveau sonore plus élevé. Simultanément, la fréquence fondamentale peut alors augmenter.

Une autre hypothèse possible cause de différences acoustiques entre l'état de repos et le début des simulations est la privation plus importante de sommeil lors des séances qu'en situation de repos aux mêmes heures.

C'est le cas du pilote retenu: il a peu dormi avant les séances (5h et 5heures et demie) et il a dormi 6 heures et demie avant les enregistrements au repos. L'hypothèse des effets de la privation de sommeil semble la plus probable.

Quelles qu'en soient les causes, les valeurs au repos de presque tous les paramètres acoustiques sont différentes de celles en début de séance. C'est un enseignement qui nourrit la réflexion sur le choix d'une référence acoustique pour des analyses comparatives.

Pour la définition du paramètre DAL et de ses mesures associées le lecteur peut se référer à la publication [6]. Il est un estimateur de la longueur d'un signal par sommation des différences d'amplitude entre échantillons successifs. Cette grandeur calculée par cycle vibratoire est ensuite ramenée à la durée T_0 entre deux pics d'amplitude maximale (période fondamentale).

Les jitters et jitters factors correspondants à ces deux caractéristiques pour en estimer les fluctuations à court terme d'une période à l'autre sont alors calculés.

Les jitters factors et le shimmer factor expriment le pourcentage du jitter ou du shimmer par rapport à la valeur moyenne du paramètre associé.

Shimmers et DALs s'appuyant tous deux sur les valeurs d'amplitude du signal, leur sensibilité conjointe semble donc cohérente. De telles observations sont exclues dans le domaine spectral. C'est dans l'espace amplitude-temps que se concentrent les modifications du signal.

5 Conclusion

Les enseignements de l'analyse des résultats sont surprenants à double titre.

D'une part, les caractéristiques liées directement à la fréquence fondamentale et celles issues du spectre ont été insuffisamment sensibles aux conditions expérimentales malgré le large champ couvert par les paramètres. Seul le shimmer varie.

D'autre part, la longueur euclidienne du signal semble, quant à elle, largement modifiée puisqu'évaluée par plusieurs des paramètres qui y sont associés. La tendance déjà observée en situation matinale, se confirme donc pour cette caractéristique [7].

La conclusion de l'expérience est positive: la voix est modifiée par les effets conjoints de la privation partielle de sommeil et de la charge de travail en situation de pilotage aéronautique. Cette contribution aux connaissances en la matière se doit désormais d'être généralisée par des mesures statistiques sur une population plus large.

Les résultats des études réalisées jusqu'à présent montrent que les paramètres acoustiques de la voix sont sensibles à diverses perturbations psychophysiologiques [9]. Mais ce sont les situations expérimentales et les contextes qui ont permis d'associer les variations acoustiques au phénomène perturbateur. C'est donc l'appréciation des causes aux effets qui permet d'évaluer le potentiel des caractéristiques acoustiques sans autre forme d'estimation corollaire.

L'approche mise en place vise à se doter de mesures comportementales et électro physiologiques parallèles.

Pour ce premier temps, elles sont subjectives mais elles permettent tout de même d'associer les modifications acoustiques à la caractérisation d'un état. Elles ont ainsi permis de sélectionner l'individu affecté par les conditions expérimentales afin d'estimer la faisabilité de la corrélation entre les données acoustiques et la fatigue avec privation partielle de sommeil.

Dans un avenir proche, elles vont être objectives grâce notamment à des mesures d'imagerie cérébrale qui, par ailleurs, permettront de se prononcer de manière fiable sur l'état de vigilance. Les variations acoustiques corrélées seraient alors en mesure de devenir des indicateurs non invasifs de la privation de sommeil.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement le Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA) support de l'étude et facilitateur de la mise en place logistique de l'expérience.

De vifs remerciements sont également adressés à l'ENAC-SEFA du Lherm (31) pour avoir aimablement collaboré et conseillé le projet et nous avoir permis de glisser nos microphones dans les séances de formation des élèves-pilotes. Des remerciements appuyés à ces derniers pour leur participation volontaire et motivée ainsi qu'aux instructeurs de l'ENAC-SEFA.

Références

- [1] A.D. Bagnall, J. Dorrian, A.Fletcher, "Some vocal consequences of sleep deprivation and the possibility of "fatigue proofing" the voice with Voicecraft® voice training", *J. Voice*, 25(4), 447–61 (2011).
- [2] H.P. Greeley, E. Friets, J.P. Wilson, S. Raghavan, J. Picone, J. Berg, "Detecting Fatigue From Voice Using Speech Recognition". 2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 567–571 (2006).
- [3] Y. Harrison, J.A. Horne, "Sleep deprivation affects speech", *Sleep*, 20(10), pp. 871-877 (1997).
- [4] J. Krajewski, A. Batliner, M. Golz, 'Acoustic sleepiness detection: framework and validation of a speech-adapted pattern recognition approach'. *Behavior research methods*, 41(3), 795–804 (2009).
- [5] T. Nwe, H. Li, M. Dong, "Analysis and detection of speech under sleep deprivation". Interspeech 2006, Pittsburgh, USA (2006)
- [6] R.Ruiz, P.Plantin de Hugues, C.Legros, "Advanced voice analysis of pilots to detect fatigue and sleep

- inertia", *Acustica united with Acta Acustica*, 96, 567-579 (2010).
- [7] R.Ruiz, P.Plantin de Hugues, C.Legros, "Analyse de la voix d'un conducteur automobile : effets acoustiques de la fatigue", Actes du 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, CFA 2010, Lyon (2010).
- [8] R.Ruiz, P.Plantin de Hugues, C.Legros, "Amplitude modulation of vowel glottal pulses - application to sleep inertia", Actes du 12^{ème} Congrès Français d'Acoustique, CFA 2012, Nantes (2012).
- [9] R.Ruiz, "Analyse acoustique de la voix pour la détection de perturbations psychophysiologiques - application au contexte aéronautique", Habilitation à diriger des recherches, Université de Toulouse (13 Mars 2012).
- [10] W.S. Winholtz, L.O. Ramig "Vocal tremor analysis with the vocal demodulator", *J. of Speech and Hearing Research*, 35, 562-577 (1992).
- [11] D.K. Buysse, C.F Reynolds, T.H. Monk, S.R. Bearman, D.J.Kupfer, "The pittsburgh sleep quality index: a new instrument for psychiatric practice and research", *Psychiatric Research*, 28, 193-213 (1989).
- [12] J.A. Horne, O. Ostberg, "A self assessment questionnaire to determine morningness - eveningness in human circadian rythms", *Int. J. Chronobiol.*, 4, 97-110 (1976).
- [13] R.E. Thayer, "Activation - deactivation adjective check-list: current overview and structural analysis", *Psychol. Rep.*, 58, 607-614, (1986).
- [14] NASA Task Load Index-TLX, Human performance research group, NASA Ames research center, Moffet Field, California, (415) 694-6072.

Tableau 3: Valeurs moyennes (et écarts-types) des paramètres acoustiques sensibles à la baisse de vigilance et à l'augmentation de charge de travail (pilote GP).

	REPOS	S1 DÉBUT	S1 FIN	S2 DÉBUT	S2 FIN
Shimmer (dB)	3,13 (5,28)	0,96 (0,75)	1,26 (1,49)	1,08 (0,83)	1,20 (1,02)
Shimmer Factor (%)	24,79 (32,06)	12,99 (9,25)	16,61 (15,29)	14,03 (8,94)	17,21 (11,03)
DAL (unités d'amp)	3,93 (1,39)	5,04 (1,24)	5,30 (1,52)	5,33 (1,50)	5,39 (1,21)
Jitter de DAL (unités d'amp)	0,43 (0,28)	0,32 (0,36)	0,46 (0,35)	0,44 (0,34)	0,55 (0,33)
Factor Jitter de DAL (%)	13,48 (14,16)	6,25 (5,55)	8,62 (5,64)	7,99 (5,46)	10,17 (5,80)
DAL_i / To_i (unités d'amp/s)	420,63 (159,64)	648,94 (161,39)	680,41 (171,02)	708,81 (170,44)	634,01 (160,17)
Jitter de DAL_i/To_i (unités d'amp/s)	44,43 (28,20)	41,37 (39,02)	60,17 (44,19)	56,72 (40,78)	62,19 (36,11)
Factor Jitter de DAL_i / To_i (%)	12,04 (10,91)	6,32 (5,46)	8,94 (5,73)	8,02 (5,59)	10,02 (5,78)

Tableau 4 : Valeurs moyennes (et écarts-types) des paramètres prosodiques (pilote GP).

	REPOS	S1 DÉBUT	S1 FIN	S1 DÉBUT	S1 FIN
Nombre de cycles	11 (9,3)	10,6 (10)	8,3 (7,9)	11,1 (12,2)	6,7 (5,5)
Fo moyenne (Hz)	109,93 (23,21)	130,44 (20,39)	129,75 (14,12)	136,41 (26,45)	117,27 (11,19)
σ (Hz)	5,34 (7,18)	3,16 (2,27)	3,68 (2,29)	4,03 (2,78)	2,92 (2,08)
Coeff de Variation (%)	4,19 (4,02)	2,44 (1,75)	2,82 (1,67)	2,94 (1,74)	2,47 (1,65)
Jitter (Hz)	5,89 (9,99)	2,66 (2,46)	3,20 (2,69)	3,32 (3,31)	2,72 (2,47)
Factor Jitter (%)	4,44 (5,88)	2,07 (2,02)	2,45 (1,94)	2,41 (1,96)	2,31 (2,04)
Fréquence de Modulation (Hz)	15,45 (13,73)	16,50 (13,70)	16,33 (10,97)	16,05 (11,95)	19,50 (13,13)
R² de la mesure de la fréq modulation	0,75 (0,19)	0,77 (0,19)	0,80 (0,18)	0,78 (0,19)	0,84 (0,15)