



**HAL**  
open science

## Effort d'écoute et Pupillométrie en Audioprothèse

Annie Moulin, Mathieu Ferschneider

► **To cite this version:**

Annie Moulin, Mathieu Ferschneider. Effort d'écoute et Pupillométrie en Audioprothèse. Cahiers de l'audition, 2019, 32 (4), pp.29-35. hal-02367386

**HAL Id: hal-02367386**

**<https://hal.science/hal-02367386>**

Submitted on 17 Nov 2019

**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.

**Effort d'écoute et Pupillométrie en Audioprothèse**

**Annie Moulin<sup>1</sup>, Mathieu Ferschneider<sup>1,2</sup>**

**Affiliations** 1. Lyon Neuroscience Research Center, Brain Dynamics and Cognition Team (DYCOG), Perception, Attention and Memory group (PAM), Inserm U1028, CNRS UMR 5292, University of Lyon, F-69000 Lyon, France, 2. Audition Conseil, Lyon, France.

Auteur correspondant : [annie.moulin@cnrs.fr](mailto:annie.moulin@cnrs.fr)

**Cette version est la version soumise à l'éditeur, mise en page par les auteurs.**

Cet article a été publié dans **les cahiers de l'Audition** (ISSN: 0980-3482)

**Référence :**

Moulin A, Ferschneider M. *Effort d'écoute et Pupillométrie en Audioprothèse*. Les cahiers de l'audition, vol. 32, 2, Mars/Avril 2019, pp 10-13.

La version de l'éditeur est disponible ici :

<http://www.college-nat-audio.fr/retrouvez-les-cahiers-de-l-audition.html>

## Effort d'écoute et Pupillométrie en Audioprothèse

Annie Moulin<sup>1</sup>, Mathieu Ferschneider<sup>1,2</sup>

**Affiliations** 1. Lyon Neuroscience Research Center, Brain Dynamics and Cognition Team (DYCOG), Perception, Attention and Memory group (PAM), Inserm U1028, CNRS UMR 5292, University of Lyon, F-69000 Lyon, France, 2. Audition Conseil, Lyon, France.

Auteur correspondant : [annie.moulin@cnrs.fr](mailto:annie.moulin@cnrs.fr)

### **Référence :**

Moulin A, Ferschneider M. *Effort d'écoute et Pupillométrie en Audioprothèse*. Les cahiers de l'audition, vol. 32, 2, Mars/Avril 2019, pp 14-17.

Le bénéfice d'un appareillage auditif réside autant, voire plus, dans le ressenti du patient, que dans nos scores de perception de la parole ou d'audiométrie. En effet, la communication verbale est un élément clé des interactions sociales au quotidien, et est basée, en majeure partie sur la perception auditive et plus spécifiquement, sur la perception de la parole. Les scores de perception de la parole, en particulier dans des conditions mimant les situations de la vie quotidienne, (par exemple, dans un environnement bruyant), sont donc tout à fait pertinents afin d'évaluer le bénéfice d'un appareillage auditif, mais ne sont pas suffisants.

En effet, tout déficit de la perception de la parole n'est pas forcément visible car pouvant être compensé, au moins partiellement, grâce aux mécanismes cognitifs (*Stenfelt & Rönnberg, 2009*). Cette compensation se fait souvent au prix d'un effort d'écoute intense, nécessitant une attention soutenue, pouvant entraîner une fatigue importante et le plus souvent sous-estimée. Or, cet effort cognitif d'écoute est rarement évalué en clinique courante et un même score de 100% de perception de la parole peut impliquer un effort d'écoute très intense, ou au contraire, relativement faible. L'effort d'écoute a été défini par (McGarrigle et al. 2014) comme étant « *l'effort mental requis pour comprendre un message auditif* ». Cet effort d'écoute peut être mesuré pour des tâches de perception auditive spécifiques, avec différentes techniques, qui vont des plus simples à implémenter, comme une échelle visuo-analogique, aux plus complexes, comme l'imagerie cérébrale.

Les méthodes subjectives comprennent l'autoévaluation par le patient de son effort d'écoute sur une échelle visuo-analogique présentée après chaque tâche de perception auditive et les méthodes de double tâche (Gagné et al. 2017)(ou de tâche additionnelle)<sup>1</sup>. Les méthodes objectives d'évaluation de l'effort d'écoute comprennent la pupillométrie, la conductance électro-dermique, l'électroencéphalographie, l'imagerie par spectroscopie fonctionnelle en proche infrarouge (fNIRS ou functional near infra-red spectroscopy).

### **I. Qu'est-ce que la pupillométrie ?**

La pupillométrie (Cabestrero et al. 2009; Eckstein et al. 2016) consiste à mesurer le diamètre de la pupille, avec une caméra, à une fréquence d'échantillonnage allant de 40 Hz à plus de 1000 Hz.

---

<sup>1</sup> Cette technique consiste à saturer les capacités du sujet, en ajoutant une tâche supplémentaire facilement mesurable, à la tâche principale qui est souvent une tâche de perception auditive dans du bruit. La détérioration des scores de la tâche supplémentaire (ou de ses temps de réaction) reflète l'augmentation de la charge cognitive liée à la tâche principale.

En effet, la mesure du diamètre pupillaire est rapide, facile, non-invasive, ne nécessitant aucun contact physique avec le patient et est obtenue à l'aide d'équipements portables (Chen et al. 2013). Cette méthode est connue depuis longtemps dans le cadre de l'évaluation de l'effort cognitif lié à des tâches cognitives complexes, comme des tâches de calcul arithmétique, ou d'attention, avec une dilatation pupillaire d'autant plus grande que la charge cognitive est élevée (Kahneman & Beatty 1966). Dans le domaine auditif, cette méthode a été appliquée récemment (Koelewijn et al. 2014b; Koelewijn et al. 2014a; Winn et al. 2015; Zekveld et al. 2014) avec succès dans le cadre de la compréhension auditive de phrases chez le patient malentendant, avec une augmentation du diamètre pupillaire lorsque la difficulté de la tâche d'écoute augmente.

## **II. Quelques bases neurophysiologiques**

Le diamètre pupillaire est sous la dépendance d'un muscle dilatateur et d'un muscle constricteur (système parasympathique). Tout effort cognitif entraîne l'activation du système noradrénergique du Locus Coeruleus (Aston-Jones et al. 1999), ce qui entraîne l'inhibition du sphincter de l'iris. Ainsi, la dilatation de la pupille est déclenchée par l'activation noradrénergique (Murphy et al. 2011) résultant non seulement de l'effort cognitif, mais pouvant résulter également de réactions de stress. De plus, ces variations de la dilatation de la pupille, engendrées par l'axe noradrénergique, sont petites (de l'ordre de 0.5 mm) comparativement au réflexe photomoteur, qui permet des changements de diamètre pupillaire de l'ordre de 3-4 mm (Zekveld et al. 2018). Le diamètre pupillaire peut varier selon de nombreuses conditions, qu'il convient de contrôler précisément, afin d'avoir une mesure reflétant vraiment l'effort d'écoute. Ainsi, le degré de luminosité devra être relativement faible et constant, les prises médicamenteuses ou de substances altérant l'axe noradrénergique seront à documenter (par exemple, le café). Enfin, la libération de noradrénaline étant lente, les variations du diamètre pupillaire vont être lentes, de l'ordre de 200 à 500 ms, aussi il faudra prévoir un temps suffisant, après un effort cognitif, pour un retour à une situation de base (plusieurs secondes).

## **III. Matériel et méthodes**

### **III.1. Installation de l'équipement et du patient : quelques considérations pratiques.**

La majorité des oculomètres (équipements de « eye-tracking ») permettent l'enregistrement du diamètre pupillaire par une caméra infra-rouge, en tête libre : la caméra est fixée sur une table, à environ 40-70 cm des yeux du patient. Même si le diamètre pupillaire peut souvent être capté en cas de port de lunettes, nous demandons aux patients de quitter leurs lunettes. En revanche, le port de lentilles de contact n'empêche que rarement l'enregistrement. La luminosité doit être intermédiaire, et il faut éviter toute lampe en face ou à côté du patient : idéalement, la lumière doit arriver dans le dos du patient et le niveau de luminosité est ajusté afin d'être à distance du niveau de luminosité maximale (pupille qui ne pourra pas se dilater du fait de la puissance du réflexe photomoteur) et minimal (pupille déjà dilatée au maximum). Afin de s'assurer que la caméra puisse bien capter en continu le diamètre pupillaire, les équipements ont chacun une procédure de calibration, qui consiste à demander au patient de regarder successivement plusieurs repères, comme les coins d'un carré par exemple : ceci permet d'obtenir les coordonnées des mouvements oculaires. Même si ceci ne semble pas d'une importance primordiale, il est important de contrôler la position des yeux du patient, la mesure du diamètre pupillaire étant influencée par la position des yeux relative à la caméra. Ainsi, il faut préciser au patient d'éviter de tourner la tête et de bouger les yeux en dehors du carré de calibration, et lui donner un repère visuel (non lumineux mais suffisamment contrasté et visible très facilement) à regarder en face de lui.

### **III.2. Construction d'une tâche d'effort d'écoute en pupillométrie (figure 1)**

Les protocoles et traitement des données de pupillométrie sont très proches de ceux des potentiels évoqués en électroencéphalographie : les réponses sont acquises en continu, avant et après un stimulus d'intérêt, qui est répété plusieurs fois afin de permettre un moyennage des réponses synchronisées sur le stimulus d'intérêt. Afin d'isoler la dilatation pupillaire liée spécifiquement au stimulus, une période d'enregistrement avant le stimulus est nécessaire pour obtenir une ligne de base. S'il s'agit d'une tâche de perception auditive dans du bruit, une période de bruit seul doit précéder le stimulus et faire partie de la ligne de base. Classiquement, la durée des lignes de base est de l'ordre de 1 à 2 secondes (Mathôt et al. 2018). Dans la plupart des études, un indice, visuel ou auditif, permet d'avertir le patient de l'arrivée du stimulus d'intérêt. Cet indice est souvent placé dans la ou les 2 secondes précédant le stimulus d'intérêt (et est souvent mis en début de la période prise comme ligne de base) (Zekveld et al. 2018). Dans la mesure où ce signal va être également traité par le patient, il doit être le plus neutre possible, très facile à percevoir pour ne pas engendrer d'effort cognitif susceptible d'interférer sur l'effort cognitif lié au stimulus. De plus, si cet indice est visuel, il faut s'assurer que sa luminosité reste neutre et n'engendre pas de réflexe photomoteur.

La tâche de base couramment utilisée en audioprothèse est la répétition de mots (ou phrases) présentés dans des conditions diverses (silence ou différents types de bruits, diverses intensités) et les patients ont l'habitude de répéter le mot entendu immédiatement après sa perception. En pupillométrie, pour évaluer l'effort d'écoute, il faut séparer, dans le temps, la perception/compréhension du mot de sa répétition. Sinon, le pic de dilatation enregistré sera une mesure globale de la somme de l'effort d'écoute et de l'effort de répétition du mot. La dilatation pupillaire étant un phénomène lent, il faut compter plus d'une seconde après la présentation du stimulus pour obtenir le pic de dilatation. Il faut donc prévoir un temps de plusieurs secondes entre la présentation du stimulus, et le moment où le patient devra répéter le mot (ou phrase) entendu. Cette durée est également à ajuster : trop courte, elle risque de ne pas permettre d'englober tout le pic de dilatation pupillaire, trop longue, elle engendre chez le patient, un effort supplémentaire de mémoire à court-terme qui peut dépasser ses capacités (avec oubli du mot à répéter, pourtant bien perçu initialement). Un deuxième indice est utilisé pour prévenir le patient qu'il peut répéter le mot. Dans la mesure où le pic de dilatation lié à l'effort de répétition de mot n'est pas le signal d'intérêt, la neutralité de ce deuxième indice est moins cruciale que le premier indice. Enfin, il faut s'assurer que la dilatation pupillaire ait le temps de revenir à la ligne de base, avant de commencer un deuxième essai. Ainsi, chaque essai va prendre une dizaine de secondes.

### **III.3. Du signal brut au signal d'intérêt.**

Le signal brut de pupillométrie se compose des coordonnées du regard, des données de mesure de la pupille à chaque instant, recueilli avec des fréquences d'échantillonnage allant de 50 Hz à 2000 Hz pour les équipements les plus performants. Bien évidemment, il peut arriver que la caméra n'arrive plus à capter le regard, ce qui est recueilli sous forme de données manquantes. Les données manquantes sont dues également aux clignements des yeux. La première étape du traitement est donc l'élimination des données correspondant aux pertes liées à une mauvaise capture de l'image de la pupille et aux clignements des yeux, grâce à une interpolation à partir des données existantes. Il convient également d'éliminer les données correspondant aux périodes où le sujet a regardé autre

chose que la cible dédiée. Si ces périodes sont trop importantes, elles peuvent conduire au rejet total de l'essai considéré. Le signal peut être ensuite lissé et filtré et plusieurs essais sont moyennés ensemble par condition, en faisant la soustraction de la ligne de base, de manière à obtenir spécifiquement l'augmentation de la dilatation pupillaire liée au stimulus d'intérêt.

#### **IV. Quelques résultats**

Le moyennage peut se faire à partir de quelques essais (une dizaine d'essais peut suffire : il n'y a pas besoin d'un moyennage de plusieurs centaines d'essais comme en électroencéphalographie. La figure 2 montre, chez un même sujet, les courbes obtenues pour chaque mot : il existe bien un pic reproductible, intervenant dans les 2 premières secondes après la présentation du mot, relatif à la perception du mot, ainsi qu'un pic de dilatation correspondant à la répétition du mot. La figure 3 montre la courbe moyennée correspondante.

L'intérêt de la mesure est d'apporter des éléments supplémentaires par rapport aux scores perceptifs. Ainsi, pour des situations où l'intelligibilité est à 100% (seules les courbes de dilatation pupillaire correspondant à des mots correctement répétés ont été moyennées), la dilatation pupillaire, pour une tâche de perception de mots dans un bruit de cocktail party, est nettement plus augmentée que pour une tâche de perception de mots dans un bruit de speech noise de même spectre que le bruit de cocktail party, et cela chez le même sujet (figure 4). Dans ce cas, la différence d'effort d'écoute est objectivée par la dilatation pupillaire, pour des scores identiques. La dilatation pupillaire générée par des mots seulement partiellement répétés est significativement augmentée par rapport à celle générée par des mots correctement répétés (pour un même sujet). La différence de dilatation pupillaire persiste également après le pic de réponse, montrant également l'intérêt de considérer la période après le pic de réponse.

Nous avons pu recueillir le signal de dilatation pupillaire, suite à des stimulations par mots bisyllabiques, chez la majorité de patients porteurs d'aides auditives, d'une population typique vue en cabinet d'audioprothèse. Nous avons ainsi pu mettre en évidence, dans le cas d'une intelligibilité à 100% (seules les courbes correspondantes à des mots répétés correctement ont été moyennées), une diminution de l'effort d'écoute dans la situation avec appareillage.

La pupillométrie permet également de mettre en évidence des différences de stratégies d'écoute des patients : en effet, certains patients anticipent fortement l'effort cognitif qu'ils feront lors de la tâche, ce qui est reflété par une dilatation pupillaire qui augmente avant même la présentation du stimulus (par exemple, fig 3 et 4). Pour d'autres patients, la dilatation pupillaire reste au-dessus du niveau de base entre 2 essais, suggérant le maintien d'un état de concentration renforcé même entre deux essais.

#### **V. Perspectives**

La pupillométrie est une méthode assez facile à implémenter et donne une mesure objective de l'effort d'écoute (Winn et al. 2018; Zekveld et al. 2018), même pour des stimuli simples tels que des mots. Des méthodes plus élaborées de traitement du signal, avec prise en compte de l'influence des clignements d'yeux (Knapen et al. 2016), de l'anticipation du patient (Tromp et al. 2016), commencent à être appliquées et offriront des données plus complètes sur les mécanismes de l'effort d'écoute chez le patient malentendant.

**Références :**

- Aston-Jones, G., Rajkowski, J., Cohen, J. (1999). Role of locus coeruleus in attention and behavioral flexibility. *Biological Psychiatry*, 46, 1309–1320.
- Cabestrero, R., Crespo, A., Quirós, P. (2009). Pupillary dilation as an index of task demands. *Percept Mot Skills*, 109, 664–678.
- Chen, S., Epps, J., Chen, F. (2013). An investigation of pupil-based cognitive load measurement with low cost infrared webcam under light reflex interference. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2013, 3202–3205.
- Eckstein, M.K., Guerra-Carrillo, B., Miller Singley, A.T., et al. (2016). Beyond eye gaze: What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development? *Dev Cogn Neurosci*.
- Gagné, J.-P., Besser, J., Lemke, U. (2017). Behavioral Assessment of Listening Effort Using a Dual-Task Paradigm: A Review. *Trends in Hearing*, 21, 233121651668728.
- Kahneman, D., Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154, 1583–1585.
- Knapen, T., de Gee, J.W., Brascamp, J., et al. (2016). Cognitive and Ocular Factors Jointly Determine Pupil Responses under Equiluminance T. Verguts, ed. *PLOS ONE*, 11, e0155574.
- Koelewijn, T., Shinn-Cunningham, B.G., Zekveld, A.A., et al. (2014a). The pupil response is sensitive to divided attention during speech processing. *Hearing Research*, 312, 114–120.
- Koelewijn, T., Zekveld, A.A., Festen, J.M., et al. (2014b). The influence of informational masking on speech perception and pupil response in adults with hearing impairment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 135, 1596–1606.
- Kramer, S.E., Zekveld, A.A., Koelewijn, T., et al. Pupillometry data showing the effects of age, stimulus characteristics and hearing loss on processing load during listening to speech in noise. , 4.
- Mathôt, S., Fabius, J., Van Heusden, E., et al. (2018). Safe and sensible preprocessing and baseline correction of pupil-size data. *Behavior Research Methods*, 50, 94–106.
- McGarrigle, R., Munro, K.J., Dawes, P., et al. (2014). Listening effort and fatigue: What exactly are we measuring? A British Society of Audiology Cognition in Hearing Special Interest Group 'white paper.' *International Journal of Audiology*, 53, 433–445.
- Murphy, P.R., Robertson, I.H., Balsters, J.H., et al. (2011). Pupillometry and P3 index the locus coeruleus–noradrenergic arousal function in humans. *Psychophysiology*, 48, 1532–1543.
- Tromp, J., Hagoort, P., Meyer, A.S. (2016). Pupillometry reveals increased pupil size during indirect request comprehension. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69, 1093–1108.
- Winn, M.B., Edwards, J.R., Litovsky, R.Y. (2015). The Impact of Auditory Spectral Resolution on Listening Effort Revealed by Pupil Dilation. *Ear Hear*, 36, e153-165.
- Winn, M.B., Wendt, D., Koelewijn, T., et al. (2018). Best Practices and Advice for Using Pupillometry to Measure Listening Effort: An Introduction for Those Who Want to Get Started. *Trends in Hearing*, 22, 233121651880086.
- Zekveld, A.A., Heslenfeld, D.J., Johnsrude, I.S., et al. (2014). The eye as a window to the listening brain: Neural correlates of pupil size as a measure of cognitive listening load. *NeuroImage*, 101, 76–86.
- Zekveld, A.A., Koelewijn, T., Kramer, S.E. (2018). The Pupil Dilation Response to Auditory Stimuli: Current State of Knowledge. *Trends in Hearing*, 22, 233121651877717.

### Figures

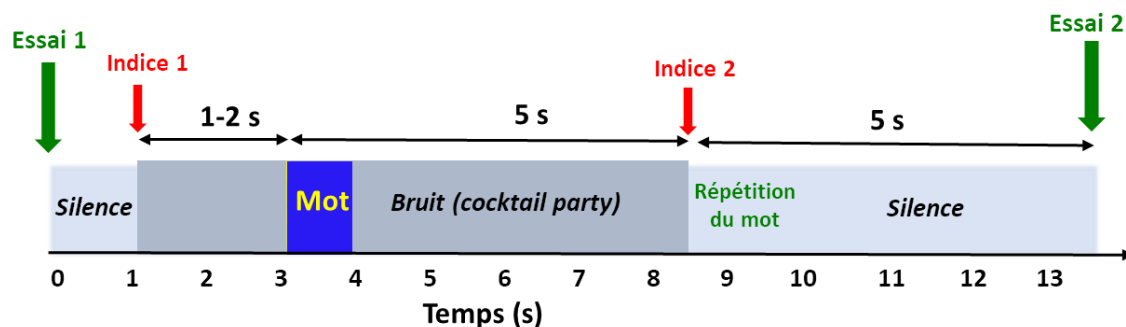


Figure 1 : Exemple de construction d'un essai de pupillométrie

L'essai commence par une période de silence, puis de bruit, qui serviront de ligne de base. Le stimulus d'intérêt (ici, un mot) est présenté 1 à 2 secondes après un indice (indice 1), qui est ici le début de la présentation d'un bruit continu de cocktail party. Un deuxième indice (ici, la cessation du bruit continu) signale au patient qu'il peut répéter le mot entendu. La période après le deuxième indice doit être suffisamment longue pour que la dilatation pupillaire, due à la répétition du mot, revienne à la ligne de base.

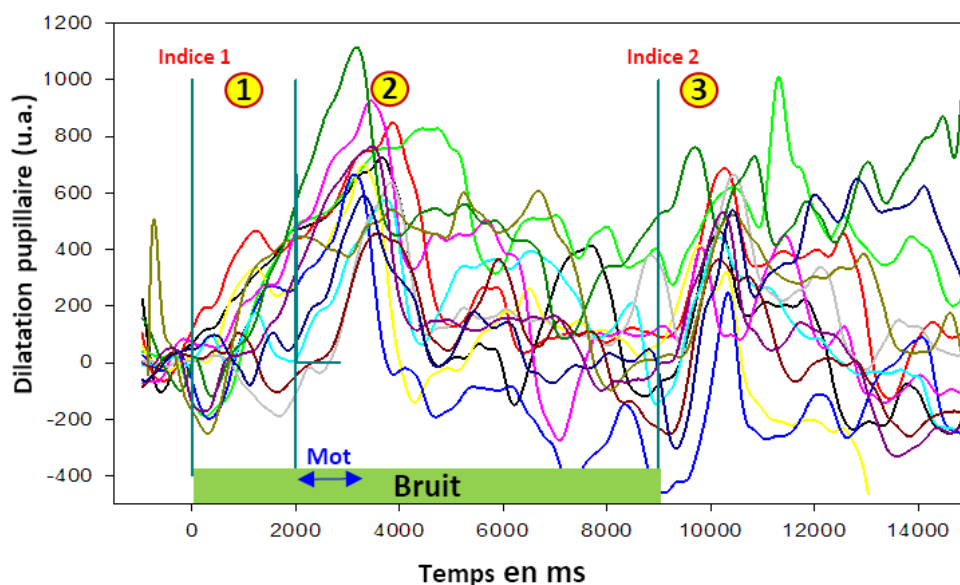
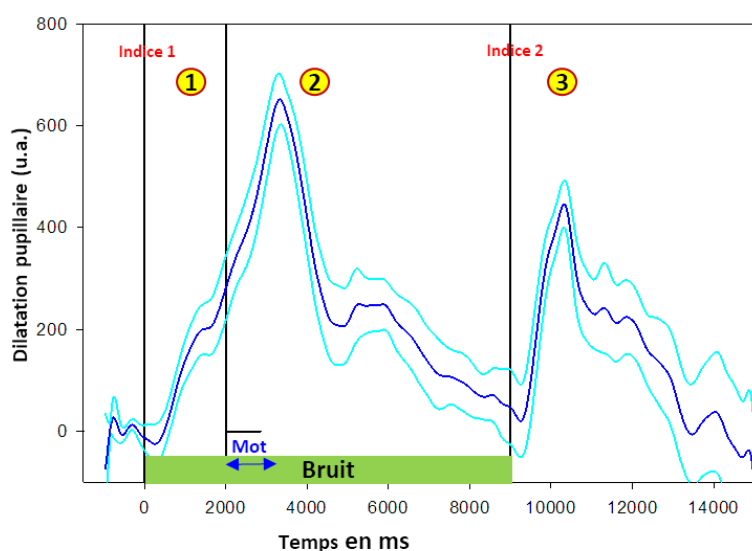


Figure 2 : Tracés non moyennés de courbes de pupillométrie

Exemple de tracés de pupillométrie chez un seul patient : Dilatation pupillaire (en unités arbitraires u.a.) en fonction du temps : chaque courbe représente un mot différent (courbes présentées après traitement des clignements d'yeux et lissage), présenté 2 secondes après l'indice 1. L'indice 1 correspond au début d'un bruit de cocktail party et l'indice 2, à la fin du bruit de cocktail party. Il est facile de repérer (1) la dilatation pupillaire due à l'anticipation par le sujet de l'effort (intervenant avant la présentation du mot), (2) la dilatation pupillaire liée à la perception du mot, (3), la dilatation pupillaire liée à la répétition du mot (données non pertinentes).

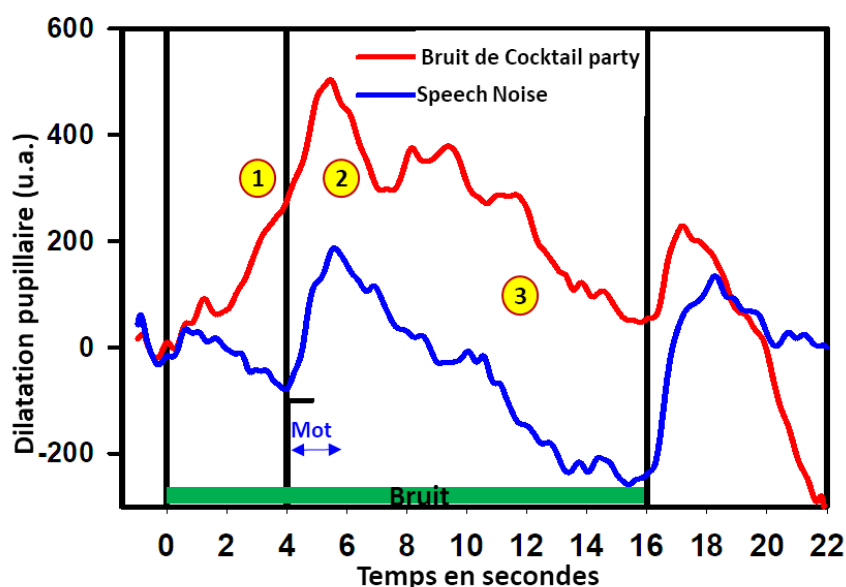




**Figure 3 : Trace moyennée de pupillométrie**

Exemple de tracés de pupillométrie chez un seul patient, (dilatation pupillaire en fonction du temps) correspondant aux courbes de la figure 2 moyennées entre elles (courbe bleue foncée). La déviation standard est mentionnée en bleu clair. Les 3 parties sont retrouvées: (1) la dilatation pupillaire due à l'anticipation par le sujet de

l'effort (intervenant avant la présentation du mot, lors du début du bruit), (2) la dilatation pupillaire liée à la perception du mot, (3), la dilatation pupillaire liée à la répétition du mot (données non pertinentes).



**Figure 4 : Comparaison de l'effort d'écoute dans 2 situations, à 100% d'intelligibilité.**

Dilatation pupillaire (en unités arbitraires u.a.) en fonction du temps, au cours d'un essai : Comparaison de l'effort d'écoute entre un bruit de cocktail party (courbe rouge) et un bruit de speech noise de même spectre que le cocktail party (courbe bleue), pour un même patient, à 100% d'intelligibilité (seules les courbes correspondant à des mots correctement répétés ont été moyennées). L'anticipation avec augmentation de l'effort d'écoute dès la présentation du bruit de cocktail party est très présente (1). La dilatation pupillaire dans la tâche de perception dans un bruit de cocktail party est beaucoup plus importante que dans un bruit de speech noise (2). De même, le maintien en mémoire de travail, pendant quelques secondes, du mot qui sera répété, demande plus d'effort dans le bruit de cocktail party que dans le bruit de type speech noise (3).