Étude de l'impact des conditions acoustiques sur la voix des enseignants

Les enseignants font partie du groupe des locuteurs professionnels qui sont dépendants de leur voix pour l'exercice de leur profession. Une réduction de la capacité de la voix peut rendre difficile ou empêcher l'exercice de la profession. Des données existent sur l'apparition fréquente des troubles de la voix chez les enseignants et les durées d'absentéisme causées par ces troubles (Sliwinska-Kowalska et coll., 2006).

Les troubles de la voix ne limitent pas seulement l'exercice professionnel des enseignants. Ils entravent le procédé d'apprentissage des élèves. Pour ces derniers, la capacité de compréhension de la parole est dépendante de la qualité de la voix des enseignants. La capacité de compréhension d'une voix saine est meilleure que celle d'une voix perturbée, même si la voix n'est détériorée que légèrement (Rogerson et Dodd, 2005).

Les facteurs individuels constitutifs d'un trouble de la voix sont nombreux : problème d'élocution, état général, maladies comme l'asthme, les allergies et les reflux gastro-œsophagiens. Trente pour cent des employés dans les nations industrielles occidentales travaillent comme locuteurs professionnels, plus de 60 % des professions demandent des capacités de communication vocale. Plus de la moitié des enseignants expriment des troubles de la voix. Selon une étude dans la Sarre, un nombre de 9 000 heures de cours par an sont supprimées à cause des troubles de la voix des enseignants (Gutenberg, 2003).

Une multitude de facteurs liés au poste de travail peuvent être responsables de troubles de la voix : bruit de fond, acoustique de la salle (amplification du bruit dans la salle, manque d'isolation acoustique, temps de réverbération augmenté), climat de la classe, posture pendant le travail, organisation du poste de travail (meubles, matériels), charge liée au travail, non observation des pauses et absence d'une possibilité de réduire la charge vocale dès l'apparition des signes des troubles de la voix. La présence de bruit dans les salles au-dessus de 45-50 dB(A) peut provoquer la production d'une parole forcée (effet Lombard).

Méthodologie du projet

Les outils utilisés pour mesurer l'acoustique des salles et pour évaluer les troubles de la voix des enseignants sont décrits.

Mesure d'acoustique des salles

Dans le projet qui est présenté ci-dessous, quatre salles de l'école primaire *Aretzstrasse* à Aix-la-Chapelle sont étudiées d'une part vides mais avec des chaises, d'autre part occupées par des élèves. Les paramètres mesurés sont le temps de réverbération des salles et l'indice d'intelligibilité (*Speech Transmission Index* ou STI) entre le pupitre et quatre positions sélectionnées dans la salle.

Temps de réverbération

Le temps de réverbération est le temps nécessaire à un son pour être réduit au millionième de son intensité initiale. Une salle de spectacle (auditorium pour l'écoute de musique) doit présenter un temps de réverbération très important. Un son de forte intensité doit pouvoir y être audible une à deux secondes après la fin de son émission. Cette mesure est importante pour le jugement de la qualité d'une salle comme un auditorium.

Dans une expérience préliminaire, l'influence directe du temps de réverbération sur la qualité de la voix d'un orateur en condition de laboratoire a été observée (Kob et coll., 2003 ; Heck et coll., 2004). Neuf volontaires sains ont été placés dans un environnement acoustique virtuel où ils exécutent les tâches suivantes : lecture d'un texte et phonation de voyelles soutenues. Les volontaires portent un casque qui réémet leur voix convoluée avec la réponse impulsionnelle d'une de deux salles acoustiquement très différentes ($Tm \approx 0{,}5$ et $Tm \approx 1{,}5$) (Tm = temps de réverbération aux fréquences moyennes, 400 à 2 500 Hz).

Cette méthode produit une impression de la perception de la voix propre dans des salles différentes. Les paramètres vocaux analysés sont : variation de la vélocité de la parole, niveau sonore de la parole, variation et hauteur de la fréquence fondamentale, irrégularité et composants du bruit dans les signaux des voyelles. Les analyses subjectives et objectives sont réalisées par un phoniatre et par des méthodes d'analyse sur l'ordinateur. Les résultats n'indiquent pas une dépendance globale de la qualité de la voix ou des autres paramètres au temps de réverbération. Des différences dans les paramètres individuels ont été observées.

Indice d'intelligibilité de la parole

La valeur du STI est comprise entre 0 et 1. Elle décrit l'intelligibilité de la parole pour un auditeur placé en un lieu donné par rapport à la source. Le STI est déterminé par une mesure objective de la modification, par la salle, de la profondeur de modulation d'un signal sonore émis qui partage certaines caractéristiques avec la parole.

Méthodes d'évaluation des troubles de la voix

Les troubles de la voix sont caractérisés par une multitude de facteurs variables selon les observateurs et les méthodes diagnostiques. Il est donc utile

pour bien les diagnostiquer de combiner des méthodes phoniatriques et orthophoniques avec des méthodes acoustiques (ces dernières pour la description et la documentation objective des propriétés de la voix). Des méthodes acoustiques standardisées n'existent pas encore pour le diagnostic des troubles de la voix, mais il existe des recommandations de l'Union des phoniatres européens (Schutte et Seidner, 1983).

Analyse avec des méthodes acoustiques

Un texte *« Nordwind und Sonne »* d'une durée d'une minute et des voyelles tenues au moins deux secondes font l'objet d'un enregistrement numérique en utilisant des microphones, amplificateurs et convertisseurs A/D de haute qualité dans une chambre absorbante.

Une représentation de plusieurs paramètres pour la description de la qualité de la voix est réalisée dans le *« Göttinger Heiserkeits-diagramm »* (en anglais, le *Goettingen Hoarseness Diagram* ou GHD) (Michaelis, 2000). La valeur sur l'ordonnée représente les composants du bruit (dérivés de la valeur GNE, *Glottal to Noise Excitation ratio*), la valeur de l'abscisse représente l'irrégularité dans le signal de la voix. Cette dernière valeur est le résultat d'une combinaison de trois paramètres : EPQ *(Energy Perturbation Quotient)*, PPQ *(Period Perturbation Quotient)* et COR *(corrélation des périodes)*. La région grisée représente la zone de voix normale. La région supérieure droite correspond à la voix pathologique ou à l'aphonie (Michaelis, 2000). Les analyses de plusieurs voyelles sont montrées sur la figure 1.

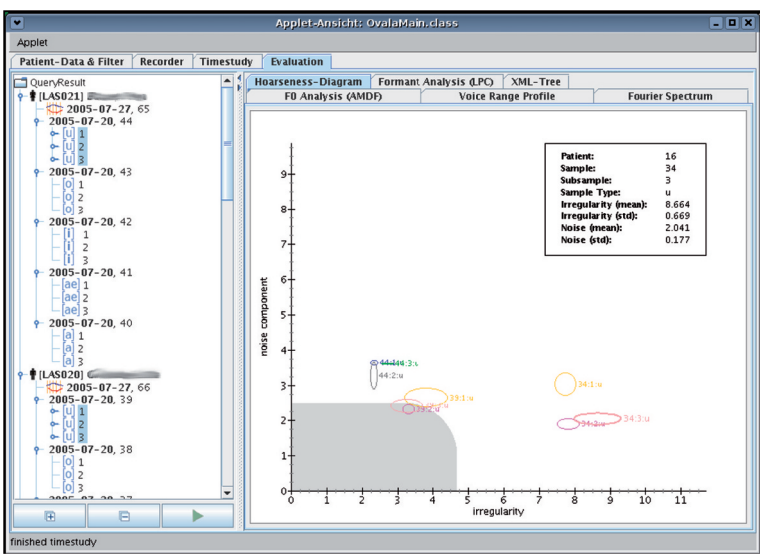

Figure 1 : Analyse de l'enrouement avec la méthode du *Göttinger Heiserkeitsdiagramm*

Le calcul de la valeur du GNE dans le *Heiserkeitsdiagramm* nécessite une valeur minimum du rapport signal-bruit (SNR) de 25 à 30 dB (Michaelis, 2000).

Phonétogramme

Le phonétogramme est une évaluation globale de deux paramètres de la voix : fréquence et intensité. Il est utile pour caractériser les faiblesses de la fonction vocale et les performances phonatoires puisque l'enregistrement de la voix demande des performances extrêmes (Klingholz, 1990). Le phonétogramme est également applicable pour l'évaluation des voix saines et pour la différenciation des voix saines et pathologiques. Le phonétogramme est de plus un instrument diagnostique des troubles de la voix (Klingholz et Martin, 1983 ; Schutte et Seidner, 1983). L'application du phonétogramme est décrite dans les recommandations de l'Union des phoniatres européens (UEP) (Schutte et Seidner, 1983).

Dans la figure 2, l'implémentation du phonétogramme dans le système « Phoneto » est montrée : la fréquence est indiquée en abscisse et l'intensité (en dB) en ordonnée. En portant sur un graphe les notes émises aux intensités les plus faibles et fortes possibles et en reliant les points mesurés, on obtient une sorte de losange aux extrémités rétrécies, dont le bord inférieur représente les valeurs d'intensité les plus faibles et le bord supérieur les valeurs les plus fortes. La distance horizontale entre les deux extrémités représente l'étendue tonale (en notation musicale ou en Hz) et l'épaisseur du losange la dynamique de l'intensité (en dB). L'étendue en fréquence est normalement de 2 octaves et l'étendue de la dynamique doit être 30 dB au moins, à la fréquence fondamentale. Sur la lecture d'un texte, un phonétogramme en voix parlée peut être réalisé.

Réalisation du projet

Vingt-cinq enseignants de l'école *Aretzstrasse* ont participé librement au projet. Il n'y avait pas de sélection des enseignants. Étaient acceptés tous ceux qui voulaient participer.

Interview des enseignants

Les questions suivantes étaient posées aux enseignants :

- depuis combien d'années donnez-vous des cours ?
- combien d'heures de cours par jour donnez-vous en moyenne ?
- combien avez-vous d'élèves par classe ?
- avez-vous ou avez-vous eu des troubles de la voix ?

• comment jugez-vous la puissance de votre voix et le bruit de fond dans la classe ?
• quelles sont les salles de classe à acoustique favorable ou défavorable ?

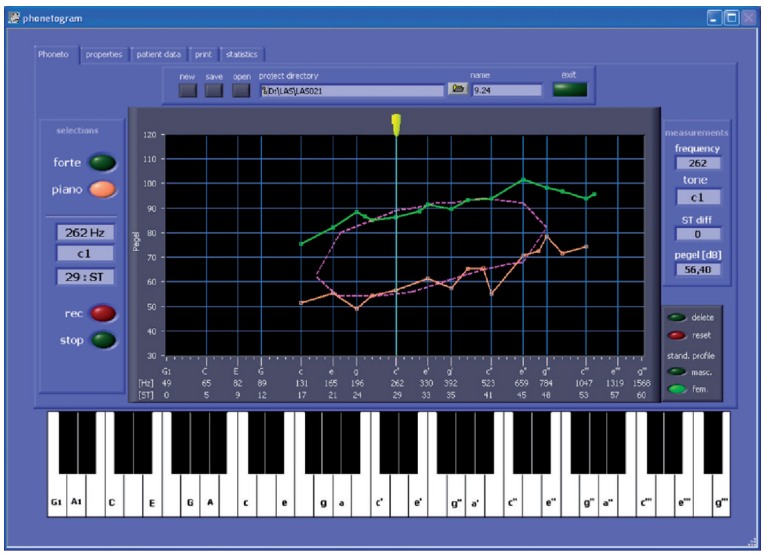

Figure 2 : Système « Phoneto »

Examens médicaux et orthophoniques préliminaires

Les pré-examens médicaux, orthophoniques et acoustiques ont eu lieu dans la clinique de phoniatrie, audiologie pédiatrique et des dysfonctionnements de la communication. Ils ont duré environ une heure.

Le pré-examen médical est constitué d'un entretien d'anamnèse et de l'inspection de l'oreille, du nez, du pharynx et de la région orofaciale. De plus, une laryngo-stroboscopie est faite. Les enseignants sont alors divisés en deux groupes : groupe « sans risque » et groupe « à risque ». Les enseignants du groupe « à risque » ayant une consultation supplémentaire avec un phoniatre.

Lors du pré-examen audiométrique, un tympanogramme et un audiogramme sont réalisés. Les enseignants qui, à plusieurs fréquences, montrent une augmentation du seuil d'audition de plus 30 dB sont rangés dans le groupe « à risque ».

Le pré-examen orthophonique perceptif consiste en une analyse de la respiration (expiration, durée), de la voix parlée (timbre, attaque et déclin, puis-

sance et débit de la parole). Un diagnostic « à risque » entraîne le conseil d'une thérapie orthophonique. Un diagnostic « faiblement à risque » ne nécessite pas une thérapie, mais signale des perturbations de la voix.

Pendant les pré-examens acoustiques, un orthophoniste a enregistré des phonétogrammes en utilisant le système Phoneto (Houben et coll., 2005). Avec le système OVALA (*Online Voice Analysis Laboratory Aachen* ; Kob et coll., 2005), l'orthophoniste a enregistré et analysé les voyelles /a, e, i, o, u/ et le texte *« Nordwind und Sonne »*.

Inventaire de l'acoustique des salles

Suite à l'interview des enseignants, certaines salles ont été classées « problématiques ». Une inspection de ces salles a confirmé que la communication acoustique était perturbée par réverbération et bruit de fond à partir d'une distance de quelques mètres entre locuteur et auditeur.

Les mesures des temps de réverbération dans quatre salles de l'école sont montrées dans la figure 3. Dans trois des salles, on observe des valeurs supérieures à une seconde pour les fréquences basses et moyennes (< 3 000 Hz).

Figure 3 : Temps de réverbération des salles mesurés avant l'aménagement

Aménagement des salles

Le but premier de l'aménagement acoustique est la réduction significative du temps de réverbération par l'addition de surfaces absorbantes. Cette addition a les conséquences avantageuses suivantes :

• l'intelligibilité de la parole augmente par réduction du masquage des syllabes ;
• le bruit de fond baisse par réduction de l'énergie diffuse du champ acoustique dans la salle.
• un élève bruyant n'arrive plus à se cacher dans le bruit diffus général. En conséquence, le nombre de cas d'élèves bruyants diminue et le niveau sonore du bruit de fond baisse.

Cependant, des inconvénients peuvent apparaître : l'amplification utile du son et les réverbérations avantageuses diminuent et la voix de l'orateur apparaît moins forte. Une installation de surfaces d'absorption, selon les critères décrits ci-après, peut réduire cet effet néfaste. Pour les temps de réverbération dans la région des fréquences moyennes, une valeur de 0,5 à 0,6 s est souhaitable. Cet objectif est atteint par l'installation d'absorbeurs poreux au bord du plafond. Pour l'absorption des fréquences basses, des absorbeurs fermés sont installés au centre du plafond. Cette installation n'absorbe pas trop les réflexions utiles dans l'intervalle des fréquences moyennes et hautes de la parole, mais réduit efficacement les composantes basses.

Comparaison de l'acoustique des salles

Dans le cadre de ce projet, deux salles pouvaient être optimisées. Pour la prédiction de l'effet des aménagements, une simulation de l'acoustique des salles était conduite. Le temps de réverbération des salles vides, des salles aménagées et de deux salles occupées est présenté dans la figure 4.

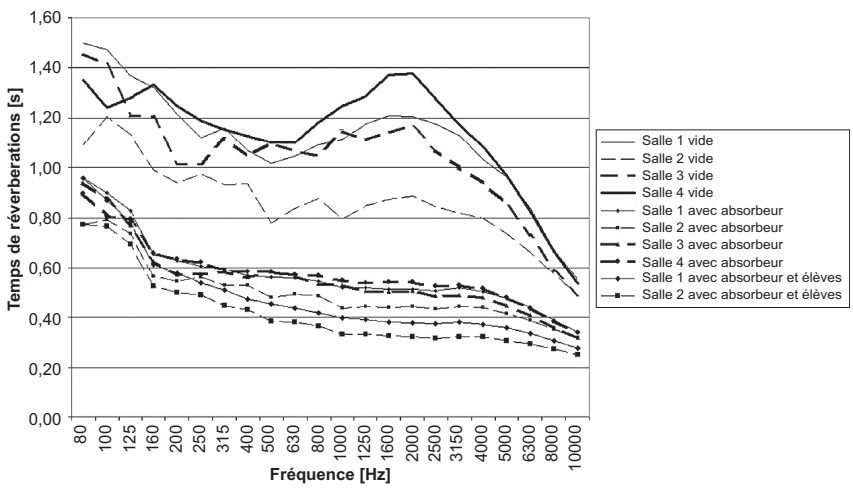

Figure 4 : Temps de réverbération des salles selon l'état des plafonds et la présence ou non des élèves

La modification simulée des plafonds par absorbeurs annonce une réduction effective et une homogénéisation des temps de réverbération dans toutes les fréquences.

Examen avant et après l'enseignement

Cette partie du projet n'est pas encore réalisée. C'est pourquoi seul le protocole préliminaire est décrit.

Il est prévu de répartir les enseignants en 4 catégories :
- groupe 1 : diagnostic médical et orthophonique « sans risque » ;
- groupe 2 : diagnostic médical « sans risque », diagnostic orthophonique faiblement « à risque » ;
- groupe 3 : diagnostic médical « sans risque », diagnostic orthophonique « à risque » ;
- groupe 4 : diagnostic médical et orthophonique « à risque ».

Dans les investigations expérimentales, la participation des membres des groupes 1, 2 et 3 est prévue.

La voix de chaque enseignant qui participe à l'étude est analysée par un orthophoniste avant et après une journée de cours de 6 heures minimum. Les investigations suivantes sont prévues :
- enregistrement de l'entretien de l'enseignant (dialogue) ;
- évaluation subjective de la qualité de la voix par l'orthophoniste ;
- enregistrement d'un texte ;
- enregistrement des voyelles tenues.

Résultats

Les résultats concernent l'acoustique des salles et les pré-examens de la voix des enseignants.

Acoustique des salles

Les résultats de l'acoustique des salles sont présentés sur la figure 5.

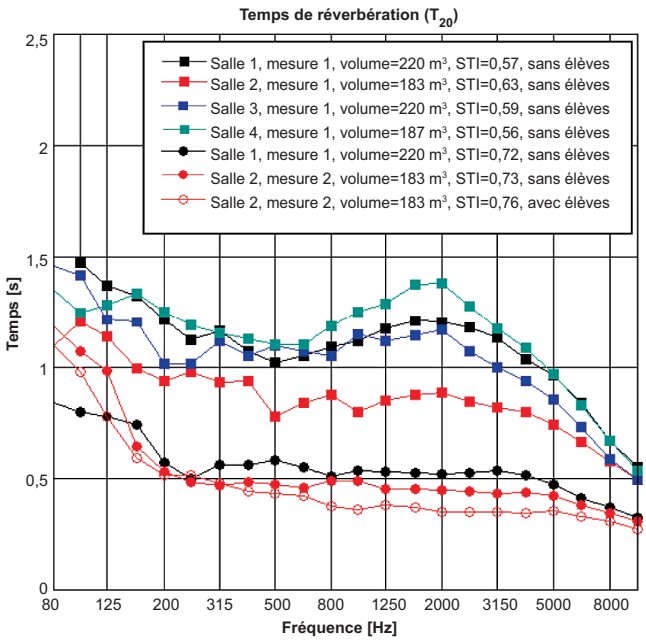

Figure 5 : Analyse spectrale du temps de réverbération et de l'indice d'intelligibilité de la parole (STI) des quatre salles avant et après l'aménagement ; mesure 1 : avant aménagement, mesure 2 : après aménagement

Temps de réverbération

Les résultats des mesures avant aménagement indiquent que le temps de réverbération est supérieur à une seconde dans trois des quatre salles. Les valeurs excèdent les valeurs limites T_m, pour les salles de classe selon les normes DIN 18 041 (T_m = 0,6-0,7 s) pour des fréquences moyennes. Considérant les valeurs souhaitées (T_m = 0,4-0,6 s), ces valeurs sont beaucoup trop hautes (facteur 2-3). Une réduction du temps de réverbération est donc indispensable.

Les mesures dans les salles aménagées (salles 1 et 2) documentent l'effet de l'optimisation acoustique des salles. Le temps de réverbération est réduit et les valeurs se trouvent dans la région voulue autour de 0,5 secondes.

Index d'intelligibilité de la parole

La figure 5 montre les valeurs moyennes de l'indice d'intelligibilité de la parole (STI) des quatre salles, mesurées aux quatre positions dans les salles.

Une interprétation des valeurs est facilitée par l'échelle de l'intelligibilité présentée dans le tableau I.

Tableau I : Échelle STI (indice d'intelligibilité de la parole)

< 0,3	très mauvaise
0,3 à 0,45	insuffisante
0,45 à 0,6	satisfaisante
0,6 à 0,75	bonne
> 0,75	excellente

La valeur STI de 0,45 est souvent notée « valeur minimale ou limite » ; cela signifie qu'il faut l'atteindre ou la dépasser. Par expérience, on trouve qu'une augmentation de la valeur STI entre 0,4 et 0,5 correspond aux améliorations les plus perceptibles. À cet égard, les valeurs STI sont jugées satisfaisantes en tous cas. Il faut quand même tenir compte du fait que les mesures sont effectuées sans bruit de fond, même si la salle est occupée. La présence d'un bruit composé de multiples signaux de parole produit une valeur STI plus basse, qui va en diminuant avec le niveau sonore.

Réduction du bruit

Il est possible de réduire le bruit dérangeant en abaissant le niveau du champ sonore diffus par application d'absorbeurs. Une autre possibilité est la réduction des sources de bruits primaires. En dehors des conversations inévitables entre les élèves, le déplacement des chaises et le frottement des chaussures sont des sources de bruit. Une réduction significative de ce bruit peut être obtenue par un revêtement au sol adapté. Pour des raisons hygiéniques, le choix s'est porté sur une couche de feutre dont l'effet absorbant est plutôt faible et limité aux fréquences aiguës.

Résultats des pré-examens de la voix

Distribution en pourcentage des résultats du pré-examen médical des enseignants :
- 20 % « à risque » ;
- 80 % « non à risque ».

Distribution en pourcentage des résultats du pré-examen orthophonique des enseignants :
- 36 % « à risque » ;
- 36 % « faiblement à risque » ;
- 28 % « non à risque ».

Distribution en pourcentage des résultats du pré-examen audiométrique des enseignants :
- 8 % « à risque » ;
- 4 % « faiblement à risque » ;
- 88 % « non à risque ».

Distribution en pourcentage des résultats de l'analyse de l'enrouement des enseignants avec le « *Göttinger Heiserkeitsdiagramm* » :
• 44 % des participants sont hors de la zone des locuteurs normaux pour deux signaux au moins ;
• 22 % sont hors de la zone des locuteurs normaux pour un signal ;
• 33 % sont dans la zone des locuteurs normaux pour tous les signaux.

Distribution en pourcentage des résultats de l'analyse du phonétogramme :
• 36 % des participants à l'intérieur du domaine des locuteurs normaux ; c'est-à-dire une étendue tonale et dynamique réduite par rapport aux locuteurs normaux ;
• 28 % des participants avec une étendue en fréquence de moins de 2,5 octaves et une étendue en dynamique de moins que 30 dB, à la fréquence fondamentale (donc un intervalle réduit en fréquence et en dynamique) mais en dehors du domaine des locuteurs normaux ;
• 36 % des participants avec une étendue vocale d'au moins 2,5 octaves et une dynamique d'au moins 30 dB à la fréquence fondamentale, et au moins 90 dB de niveau sonore maximal ; ce qui signifie une bonne étendue vocale et une bonne dynamique.

Dans la figure 6, les résultats des pré-examens sont visualisés. On voit qu'un cinquième des enseignants présente des problèmes en phoniatrie (groupe « à risque » après examen médical). Très peu d'enseignants présentent des problèmes mis en évidence par audiométrie. Les effectifs des examens orthophoniques et acoustiques sont plus ou moins également distribués et suggèrent que deux tiers des enseignants examinés (sans risque, faiblement à risque et à risque) présentent des problèmes orthophoniques sévères ou légers.

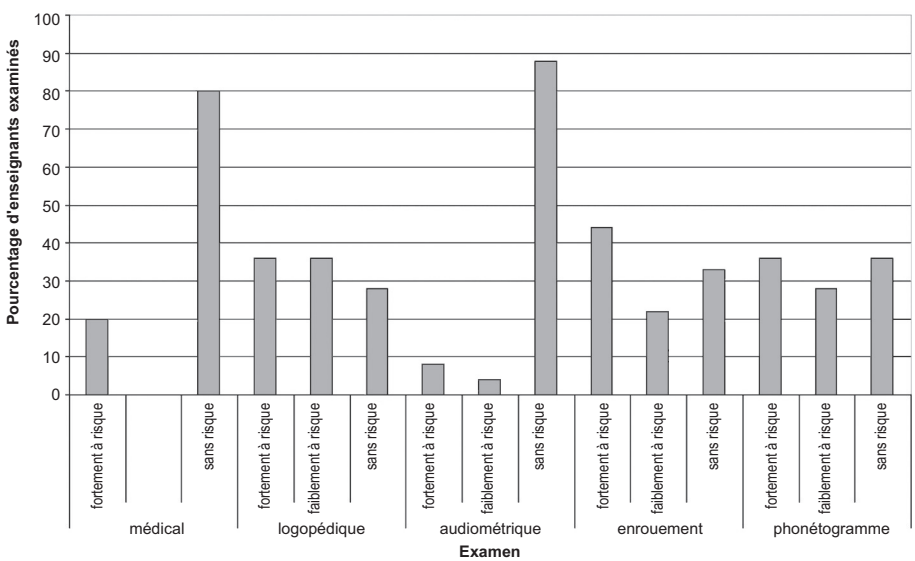

Figure 6 : Résultats des pré-examens (n = 25)

Les résultats des expérimentations sur le surmenage vocal ne sont pas encore disponibles, cette expérimentation n'ayant pas encore eu lieu.

En conclusion, les résultats de l'analyse des salles indiquent que les conditions acoustiques de certaines salles de classe sont mauvaises et qu'il est nécessaire de les corriger. Une amélioration significative de l'acoustique des salles est réalisée par la modification des plafonds par absorbeurs acoustiques et des sols par tapis.

Les pré-examens médicaux, orthophoniques, audiométriques et acoustiques de la moitié du personnel enseignant de l'école montrent une augmentation des troubles de la voix significative qui est typique pour des locuteurs professionnels. Une analyse statistique de la différence entre les enseignants hommes et femmes n'est pas possible à cause du nombre insuffisant des enseignants hommes (n = 6), mais on observe une tendance moindre d'indications médicales et orthophoniques chez les enseignants masculins.

Il est prévu la mesure de l'effet de l'acoustique de la salle sur la qualité de la voix des enseignants en comparant deux conditions différentes. Une incertitude dans l'analyse de la qualité de la voix résulte des multiples facteurs qui l'influencent. L'importance des aspects psychiques, sociaux, de la dynamique de groupe dans la classe est difficile à estimer.

La partie finale du projet est donc nécessaire pour confirmer ou infirmer l'hypothèse que l'amélioration de l'acoustique des salles permet une réduction de la charge vocale des enseignants.

La comparaison directe de la qualité de la voix des enseignants sélectionnés avant et après les cours dans les salles optimisées et non optimisées est effectuée pour savoir si l'acoustique des salles peut modifier significativement la qualité de la voix pendant une période courte. Si cette partie du projet ne donne pas une preuve fiable, cela ne signifie pas que les conditions acoustiques sont négligeables. En effet, la plupart des troubles de la voix résultent d'un surmenage persistant. De nouvelles méthodes devront être appliquées pour prouver la relation entre l'acoustique des salles et la qualité de la voix des enseignants.

Malte Kob[18]
Gottfried Behler
Oliver Goldschmidt
Christiane Neuschaefer-Rube
Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen RWTH Aachen, Allemagne
Anja Kamprolf
Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, Allemagne

18. Nous remercions les enseignants de l'école Aretzschule pour leur coopération pendant l'étude. Nous sommes reconnaissants aux collaborateurs de la clinique de phoniatrie, audiologie pédiatrique et dysfonctionnement de la communication pour l'exécution de la partie clinique du projet.

BIBLIOGRAPHIE

GUTENBERG N. Keine Stimme, kein Unterricht. Campus aktuell, 2003

HECK P, KOB M, LENTZ T, NEUSCHAEFER-RUBE C. A virtual real-time room simulation to determine the influence of the room acoustics on voice quality. Proceedings of CFA/DAGA in Strasbourg, 2004

HOUBEN D, HECK P, KOB M, NEUSCHAEFER-RUBE CH, KRÖGER B. Vergleich des Stimmumfangs gesangstrainierter und untrainierter Kinder mit Hilfe eines Stimmfeldmessprogramms. Fortschritte der Akustik, DAGA, 2005 : 73-74

KLINGHOLZ F. Das Stimmfeld. Eine praktische Anleitung zur Messung und Auswertung. Verlag J. Peperny, München, 1990

KLINGHOLZ F, MARTIN F. Die quantitative Auswertung der Stimmfeldmessung. *Sprache-Stimme-Gehör* 1983, **7** : 106-110

KOB M, HECK P, NEUSCHAEFER-RUBE C. Influence of room acoustics on voice quality. Proceedings of the 5th European Conference on Noise Control, EURONOISE, 2003 : 1-4

KOB M, KRÄMER S, NEUSCHAEFER-RUBE CH. Ein System zur netzwerkbasierten Aufnahme, Analyse und Auswertung von Stimmsignalen. German Medical Science 22 Jahrestagung der Deutscher Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie, 24. Congress of the Union of the European Phoniatricians, 2005

MICHAELIS D. Das Göttinger Heiserkeits-Diagramm – Entwicklung und Prüfung eines Verfahrens zur objektiven Stimmgütebeurteilung pathologischer Stimmen, University of Göttingen, Dissertation, 2000

ROGERSON J, DODD B. Is there an effect of dysphonie teachers' voices on children's processing of spoken language? *J Voice* 2005, **1** : 47-60

SCHUTTE HK, SEIDNER W. Recommendation by the Union of European Phoniatricians (UEP): standardizing voice area measurement/phonetography. *Folia Phoniatr (Basci)* 1983, **35** : 286-288

SLIWINSKA-KOWALSKA M, NIEBUDEK-BOGUSZ E, FISZER M, LOS-SPYCHALSKA T, KOTYLO P, et coll. The prevalence and risk factors for occupational voice disorders in teachers. *Folia Phoniatr Logop* 2006, **58** : 85-101