



THESE

Présentée



À L'UNIVERSITE DE TLEMCCEN FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Spécialité : " Génie Biomédical "

Par

ABDELOUAHED Sara (ep) SLIMANI

***ETUDE ET REALISATION D'UNE PLATEFORME TELE MEDICALE
DEDIEE A L'EVALUATION OBJECTIVE ET AU SUIVI DES
DYSPHONIES CHRONIQUES D'ORIGINE LARYNGEE PAR ANALYSE
SPECTRO-TEMPORELLE DU SIGNAL VOCAL***

:Soutenue en 2015 devant le Jury

N. GHOUALI	Professeur à l'Université de Tlemcen	Président
A. BESSAID	Professeur à l'Université de Tlemcen	Examineur
A. KADDOUR	Professeur à l'U.S.T.Oran	Examineur
A.RAHMOUN	Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbes	Examineur
G. NASSAR	Professeur à l'Université de Valenciennes	Examineur
S.AOUNALLAH	Maitre assistant -A- CHU de Tlemcen	Invité
M. BENABDELLAH	Professeur à l'Université de Tlemcen	Directeur de Thèse



Remerciement

Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui nous a dotées de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre Créateur qui nous a incitées à acquérir le savoir.

Au terme de ce modeste travail, je profite de cette occasion pour adresser mes vifs remerciements à tous mes professeurs de l'université ABOUBEKR BELKAID Tlemcen qui ont contribué à notre formation.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse le professeur M. BENABDELLAH, ce fut une grande fierté et un honneur pour moi de travailler sous la houlette d'un homme pour lequel j'ai une grande admiration. Il n'a jamais hésité à me donner de son temps. Je le remercie pour sa disponibilité, son indulgence et ces précieux conseils avec lesquels il a su me communiquer son savoir-faire et ses connaissances.

Je tiens à remercier le Dr S.A. AOUNALLAH, pour sa disponibilité et son aide, qui m'a été d'un grand apport.

Un remerciement particulier s'adresse au professeur N. GHOUALI pour m'avoir fait l'honneur de présider les membres de jury. Je tiens à remercier également les professeurs G. NASSAR, A. KADDOUR, A. BESSAID, A. RAHMOUN, pour l'honneur qu'ils me font d'assister à ma soutenance, de corriger et d'évaluer mon travail de thèse.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Je dédie ce travail à mon très chère mariée et à toute ma famille.

Table des matières

Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
INTRODUCTIONN GENERALE :	10
1. ETAT DE L'ART SUR L'APPAREIL PHONATOIRE : METHODE D'INVESTIGATION	14
1.1. INTRODUCTION :	14
1.2. PRODUCTION DE LA PAROLE :	14
1.2.1. <i>Aperçu anatomique :</i>	14
1.2.2. <i>Caractéristiques de la production de la parole:</i>	17
1.2.3. <i>Le modèle physique de la production de la parole:</i>	17
1.2.4. <i>Description acoustique des sons de la parole :</i>	20
A. Les voyelles :	21
A.1. Définition :	21
A.2. Le mode d'articulation :	21
A.3. Lieu d'articulation :	21
B. Les consonnes:	22
B.1. Définition :	22
B.2. Le mode d'articulation :	22
B.3. Lieu d'articulation :	23
C. Les semi voyelles:	24
1.3. LES PATHOLOGIES DE LARYNX :	24
1.3.1. <i>Inflammation aiguë du larynx ou laryngite aiguë :</i>	24
1.3.2. <i>Laryngite chronique :</i>	25
1.3.3. <i>Les tumeurs du larynx :</i>	25
1.3.4. <i>Les tumeurs bénignes du larynx :</i>	26
1.3.5. <i>Les tumeurs malignes du larynx :</i>	27
1.4. MOYENS D'EXPLORATION LARYNGEE	28
1.4.1. <i>La laryngoscopie</i>	28
1.4.2. <i>La nasofibroscopie</i>	30
1.4.3. <i>la stroboscopie</i>	32
1.4.4. <i>L'électromyographie laryngée</i>	32
1.4.5. <i>La glottographie :</i>	32
1.4.6. <i>Technique d'imagerie</i>	33
A. Imagerie	33
B. Ultrasonographie	34
B.1. Ultrasonographie en mode B ou doppler couleur	34
B.2. Ultrasonographie endoscopique à haute fréquence	34
1.5. ANALYSE OBJECTIVE DE LA VOIX :	34
1.5.1. <i>Analyse acoustique :</i>	34
1.5.2. <i>Mesures aérodynamiques</i>	35
1.5.3. <i>Capacités vocales</i>	36
1.6. CONCLUSION :	37
2. ALGORITHMES D'EXPLORATION DU SIGNAL VOCAL ACOUSTIQUE	39
2.1. INTRODUCTION	39

2.2.	ANALYSE TEMPORELLE :	39
2.2.1.	<i>Représentation numérique du signal vocal</i> :	39
2.2.2.	<i>Analyse temporelle à court terme</i> :	40
2.2.3.	<i>Energie et puissance à court terme</i> :	40
2.3.	ANALYSE CORRELATOIRE :	40
2.3.1.	<i>Définition de l'auto-corrélation</i> :	40
2.3.2.	<i>Fonction d'auto-corrélation</i> :	41
A.	Propriétés mathématiques de la fonction d'autocorrélation [30] :	41
B.	Fonction d'autocorrélation temporelle :	41
2.4.	ANALYSE SPECTRALE :	41
2.5.	ANALYSE ACOUSTIQUE:	44
2.5.1.	<i>Intensité du son</i> :	45
2.5.2.	<i>Le timbre</i> :	45
2.5.3.	<i>La fréquence et la hauteur d'un son</i> :	46
2.5.4.	<i>les Formants</i> :	47
2.6.	LES MESURES DE STABILITE FREQUENTIELLE :	48
2.6.1.	<i>La perturbation à court terme : le jitter</i>	48
2.6.2.	<i>Les perturbations à moyen terme</i> :	49
A.	L'écart-type de F0 (STD) ;	49
B.	La mesure de stabilité de l'intensité : le shimmer :	50
2.7.	CONCLUSION :	50
3.	IMPLEMENTATION DE LA PLATE FORME TELEMEDICALE DEDIEE A L'EVALUATION OBJECTIVE DES DYSPHONIES CHRONIQUES	52
3.1.	INTRODUCTION	52
3.2.	DEFINITIONS DE LA TELEMEDICINE	52
3.3.	HISTORIQUE DE LA TELEMEDICINE.....	53
3.4.	LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE LA TELEMEDICINE.....	56
3.4.1.	<i>La téléconsultation</i> :	56
3.4.2.	<i>La téléchirurgie</i> :	57
3.4.3.	<i>Le téléenseignement</i>	57
3.4.4.	<i>Télésurveillance</i> :	58
3.4.5.	<i>Téléassistance</i> :	58
3.4.6.	<i>Téléformation</i> :	58
3.5.	STATION PORTABLE DE TELEMEDICINE	58
3.6.	AVANTAGES DE LA TELEMEDICINE.....	59
3.7.	ÉVOLUTION DE LA TELEMEDICINE A TRAVERS LE MONDE.....	60
3.8.	LES RESEAUX DE TELEMEDICINE	60
3.9.	ÉTUDE DE LA CHAINE TELEMEDICALE	61
3.9.1.	<i>Patient</i> :	62
3.9.2.	<i>D.T.E (Data Terminal Equipment)</i> :.....	62
3.9.3.	<i>Codeur/Décodeur</i> :	63
3.9.4.	<i>PC local</i> :	63
3.9.5.	<i>D.C.E (Data Communication Equipment)</i> :.....	63
3.10.	CONTRIBUTIONS PERSONNELLES :	64
3.11.	CONCLUSION :	67
4.	PRESENTATION DES RESULTATS : INTERPRETATION ET DISCUSSION.....	69



4.1.	INTRODUCTION :	69
4.2.	PRESENTATION DE L'INTERFACE GRAPHIQUE :	69
4.3.	VALIDATION CLINIQUE DES RESULTATS :	72
4.4.	RECAPITULATION DES RESULTATS :	74
4.4.1.	<i>Pour des Sujets sains :</i>	74
4.4.2.	<i>Pour des sujets malades :</i>	74
4.5.	ANALYSE CLINIQUE DE QUELQUES EXEMPLES DE SUJETS SAINS ET MALADES :	75
4.5.1.	<i>sujet sain :</i>	75
4.5.2.	<i>Sujets malades (masculin) atteint d'un cancer du larynx :</i>	77
4.5.3.	<i>Sujet malade (masculin) atteint d'un polype inflammatoire :</i>	79
4.5.4.	<i>Sujet malade (masculin) atteint d'une laryngite chronique :</i>	81
4.6.	PRESENTATION DE L'ORGANIGRAMME GLOBALE DE NOTRE APPLICATION :	83
4.7.	CONCLUSION :	83
CONCLUSION GENERALE :		85
Liste des publications		88
Acronymes		93
Bibliographies		95

Table des figures

FIGURE 1.1 : ANATOMIE DE L'APPAREIL PHONATOIRE.....	15
FIGURE 1.2: ANATOMIE DES CORDES VOCALES.....	16
FIGURE 1.3 : ANATOMIE DE LA PARTIE SUPERIEUR DE L'APPAREILLE PHONATOIRE	16
FIGURE 1.4 : (A) GLOTTE PENDANT LA RESPIRATION, (B) ET (C) RAPPROCHEMENT DES CORDES VOCALES PENDANT LA PHONATION ..	18
FIGURE 1.5 : MODELE PHYSIQUE DE LA PRODUCTION DE PAROLE	19
FIGURE 1.6 : EXEMPLE DE SONS VOISE	19
FIGURE 1.7 : EXEMPLE DE SONS NON VOISE.....	20
FIGURE 1.8 : LIEU D'ARTICULATION DES PHONEMES.....	20
FIGURE 1.9 : LARYNGITE AIGU.....	25
FIGURE 1.10 : LARYNGITE CHRONIQUE	25
FIGURE 1.11 : POLYPE DES CORDES VOCALES.....	26
FIGURE 1.12 : NODULES DES CORDES VOCALES.....	27
FIGURE 1.13 : GRANULOME DES CORDES VOCALES.....	27
FIGURE 1.14 : CANCER DU LARYNX	28
FIGURE 1.15 : FIBROSCOPIE DU LARYNX	30
FIGURE 1.16 : TELE EXAMEN NASOFIBROSCOPIQUE MICROCONTROLE	30
FIGURE 1.17 : IMAGE DE LARYNX PRISE D'UNE VIDEO DE STROBOSCOPIE.....	31
FIGURE 1.18 : L'ELECTROMYOGRAPHIE LARYNGE.....	32
FIGURE 2.1 : COMPOSITION D'UN SIGNAL VOCAL ACOUSTIQUE.	46
FIGURE 3.1 : SYSTEME D'INFORMATION DE LA TELESURVEILLANCE MEDICALE A DOMICILE.....	53
FIGURE 3.2 : PREMIERE TELE-ELECTROCARDIOGRAPHIE REALISE PAR EINTHOVEN.....	55
FIGURE 3.3 : EXEMPLE D'UNE APPLICATION DE TELECONSULTATION	56
FIGURE 3.4 : EXEMPLE D'UNE APPLICATION DE TELECHIRURGIE	57
FIGURE 3.5 : EXEMPLE DE STATION PORTABLE DE TELEMEDECINE	58
FIGURE 3.6 : EXEMPLE DE RESEAUX DE TELEMEDECINE	60
FIGURE 3.7 : LA CHAINE TELE-MEDICALE	62
FIGURE 3.8 : CAPTURE D'ECRAN DE LA PAGE D'ACCUEIL DE WAMPSEVER.	65
FIGURE 3.9 : CAPTURE D'ECRAN N°1DE LA PAGE D'ACCUEIL DE NOTRE SITE INTERNET.....	66
FIGURE 3.10 : CAPTURE D'ECRAN N°2 DE LA PAGE D'ACCUEIL DE NOTRE SITE INTERNET.	66
FIGURE 4.1 : CAPTURE D'ECRAN DE L'INTERFACE GRAPHIQUE.	70
FIGURE 4.2 : CAPTURE D'ECRAN DU LOGICIEL D'ENREGISTREMENT DU SIGNAL VOCAL.	70
FIGURE 4.3 : CAPTURE D'ECRAN DU LOGICIEL DE CONVERSION.	71
FIGURE 4.4 : CAPTURE D'ECRAN DE L'APPEL DE LA BASE DE DONNEES.	71
FIGURE 4.5 : CAPTURE D'ECRAN DU TRACE TEMPOREL DU SIGNAL VOCAL D'UN SUJET SAIN.	75
FIGURE 4.6 : CAPTURE D'ECRAN DE LA FONCTION D'AUTOCORRELATION DU SIGNAL VOCAL D'UN SUJET SAIN.	75
FIGURE 4.7 : CAPTURE D'ECRAN DE LA TFD CT DU SIGNAL VOCAL D'UN SUJET SAIN.....	76
FIGURE 4.8 : CAPTURE D'ECRAN DU TRACE TEMPOREL DU SIGNAL VOCAL D'UN SUJET ATTEINT D'UN CANCER DU LARYNX.....	77
FIGURE 4.9 : CAPTURE D'ECRAN DE LA FONCTION D'AUTO-CORRELATION DU SIGNAL VOCAL D'UN SUJET ATTEINT D'UN CANCER DU LARYNX.	77
FIGURE 4.10 : CAPTURE D'ECRAN DE LA TFD CT DU SIGNAL VOCAL D'UN SUJET ATTEINT D'UN CANCER DU LARYNX.	78
FIGURE 4.11 : CAPTURE D'ECRAN DU TRACE TEMPOREL DU SIGNAL VOCAL ATTEINT D'UN POLYPE INFLAMMATOIRE.....	79
FIGURE 4.12 : CAPTURE D'ECRAN DE LA FONCTION D'AUTO-CORRELATION DU SIGNAL VOCAL ATTEINT D'UN POLYPE INFLAMMATOIRE.	79
FIGURE 4.13 : CAPTURE D'ECRAN DE LA TFD CT DU SIGNAL VOCAL ATTEINT D'UN POLYPE INFLAMMATOIRE.	80

FIGURE 4.14 : CAPTURE D'ECRAN DU TRACE TEMPOREL DU SIGNAL VOCAL ATTEINT D'UNE LARYNGITE CHRONIQUE. 81
FIGURE 4.15 : CAPTURE D'ECRAN DE LA FONCTION D'AUTO-CORRELATION DU SIGNAL VOCAL ATTEINT D'UNE LARYNGITE CHRONIQUE.
..... 81
FIGURE 4.16 : CAPTURE D'ECRAN DE LA TFD CT DU SIGNAL VOCAL ATTEINT D'UNE LARYNGITE CHRONIQUE..... 82

Liste des tableaux

TABLEAU 1.1: LES CONSONNES ET LEUR MODE D'ARTICULATION. 23
TABLEAU 1.2 : LES SEMI VOYELLE DU FRANÇAIS. 24
TABLEAU 2.1: FREQUENCES TYPQUES DES FORMANTS 48
TABLEAU 4.1 : LE JITTER, LE STD ET LA FREQUENCE FONDAMENTALE MOYENNE DES SUJETS SAINS DU CORPUS72
TABLEAU 4.2 : LE JITTER, LE STD ET LA FREQUENCE FONDAMENTALE MOYENNE DES SUJETS MALADES DU CORPUS..... 73

Introduction générale

Introduction générale

La communication parlée est l'interface majeure des interactions humaines, support pour le transport de l'information, vecteur de notre identité et témoin de nos émotions. Plus qu'un simple moyen de porter un message, la voix est un outil privilégié pour l'expression et l'affirmation de soi, pour convaincre, séduire ou entraîner l'adhésion des auditeurs. Ainsi, les pathologies de l'appareil vocal sont multiples et sont à l'origine d'importants handicaps, sur le plan physique, comme sur le plan social. Parmi les maladies les plus répandues, sont celles relatives à l'appareil vibrateur (ou excitateur), constitué principalement du larynx et des cordes vocales (plis vocaux) [1].

Une des pathologies les plus connues est la laryngite aiguë (inflammation des cordes vocales), qui peut notamment engendrer ce que l'on nomme communément « l'extinction de voix », tant redoutée par l'enseignant ou le chanteur professionnel car pouvant parfois aller jusqu'à l'aphonie totale. Si dans ce cas le trouble ne persiste généralement que quelques jours puis disparaît totalement, d'autres pathologies, plus graves, sont à l'origine de dommages plus importants, c'est le cas de certaines formes du cancer du larynx. Ces cancers sont fréquents, directement liés au tabagisme chronique et souvent associés à une consommation excessive d'alcool, touchent l'homme dans l'immense majorité des cas. La forme histopathologique de loin la plus fréquente est le carcinome épidermoïde. Malgré des signes d'appel précoces, un grand nombre de tumeurs laryngées, en particulier sus-glottiques, sont diagnostiquées à un stade relativement avancé. Chaque année, de nombreuses personnes dans le monde sont frappées par un cancer du larynx. Pour sauver leur vie, il est généralement nécessaire de procéder à l'ablation partielle ou totale du larynx. Cette intervention a des conséquences de taille, car le larynx joue un rôle essentiel dans la parole, la respiration et la déglutition. Quand on n'a plus de larynx, on ne respire plus par la bouche et par le nez, mais par une ouverture pratiquée dans la trachée: le trachéostome. Les patients doivent également réapprendre à déglutir après l'opération. Mais le changement le plus radical concerne la voix, et sans le larynx, il est impossible de parler normalement [13] [14].

L'évaluation de la qualité de la voix et la perception des causes de sa dégradation à travers différents indices vocaux a toujours été la préoccupation clinique principale des phoniâtres. Comme dans les autres disciplines médicales, ils ont été attentifs à

toutes les techniques qui seraient susceptibles de leur donner des informations complémentaires, pour aider au diagnostic et évaluer les effets des traitements chirurgicaux et médicamenteux ou les progrès des rééducations. Cependant, la voix et la parole étant par essence faites pour être entendue, l'évaluation subjective « à l'écoute » par « l'oreille clinicienne » de l'expert, reste la référence face à des méthodes d'évaluation objective.

Dans le cadre de ce travail de recherche de thèse de Doctorat en Génie Biomédical notre objectif est l'étude et la mise en œuvre d'une plateforme télé médicale destiné à l'évaluation objective et au suivi des dysphonies chroniques d'origine laryngée par analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique. Ce plateau technique mettra à la disposition du clinicien ORL des indices complémentaires comme la fréquence fondamentale et le Jitter du signal vocal, ceci en appliquant la Transformée de Fourier Discrète à Court Terme (TFD-CT) et la fonction d'Auto-Corrélation à ce dernier. Ces deux paramètres permettent une évaluation objective des dysphonies chroniques laryngées d'origine inflammatoire ou tumorale (cancer du larynx, polype de type inflammatoire des cordes vocales, laryngite chronique). La plateforme télé médicale englobe plusieurs applications de la télé médecine à savoir la télésurveillance, la téléconsultation et la téléassistance. Elle est constituée de deux parties différentes : une première partie constituée d'un site web permettant d'enregistrer les signaux vocaux des différents patients ainsi que leurs dossiers médicaux respectifs. Les médecins peuvent ainsi consulter les dossiers et faire des suivis des patients à distance. La seconde partie de cette plateforme est constituée d'une interface graphique implémentant plusieurs algorithmes de traitement du signal vocal. Pour ce faire, nous procédons dans un premier temps à l'enregistrement distant et à l'archivage d'un signal vocal acoustique voisé en l'occurrence un « a » soutenu pendant trois secondes. Nous appliquons ensuite au niveau du service ORL du CHU de Tlemcen différents algorithmes d'évaluation objective des différents paramètres caractérisant les signaux voisés enregistrés.

Notre contribution en réalisant cette plateforme est de :

- Recueillir des signaux vocaux sur une population significative de sujets sains et de sujets malades.
 - D'implémenter un logiciel dédié à la caractérisation temporelle et spectrale de ces différents signaux vocaux afin de détecter des dysphonies chroniques du larynx.
-

- D'élaborer des indices acoustiques des pathologies du Larynx.
- De mettre en œuvre une base de données interactive de signaux vocaux acoustiques sujets sains et de sujets malades en vue d'une étude clinique épidémiologique et pour une meilleure prise en charge thérapeutique.

Le présent manuscrit est organisé comme suit :

Chapitre 1 : est consacré à l'aspect anatomique de l'appareil vocal et des différents organes responsables de la phonation avec une description des pathologies du larynx et des différents moyens d'exploration de cette maladie.

Chapitre 2 : ce chapitre décrit de manière détaillée les caractéristiques stochastiques du signal vocal avec l'estimation objective multiparamétrique de ses paramètres acoustiques.

Chapitre 3 : est consacré à l'introduction de notre application dans les réseaux Télé médicaux.

Chapitre 4 : ce chapitre est réservé à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus.

Nous achevons cette thèse par une conclusion générale ouvrant des perspectives à la poursuite de futurs travaux de recherche dans ce domaine.

Chapitre 1 :Etat de l'art sur l'appareil phonatoire : méthodes d'investigation

1. Etat de l'art sur l'appareil phonatoire : méthodes d'investigation

1.1. Introduction :

Dans toute forme de vie, il existe un besoin de communication. La forme la plus évoluée et la plus complexe est la fonction d'expression de la pensée et de la communication entre les humains, mise en œuvre au moyen d'un système de signes vocaux et éventuellement de signes graphiques qui constituent une langue.

Le premier et le plus facile des supports de langages est la parole. La parole est la faculté de communiquer la pensée par un système de sons articulés, elle se distingue des autres sons par des caractéristiques acoustiques ayant leurs origines dans les mécanismes de sa production. Les sons de parole sont produits soit par la vibration des cordes vocales (source de voisement), soit par l'écoulement turbulent de l'air dans le conduit vocal, soit lors du relâchement d'une occlusion de ce conduit (source de bruit).

Dans le processus de communication parlée, pour une longue donnée, les sons permettent de distinguer les différentes unités de signification du langage. L'unité sonore élémentaire permettant la distinction des différents mots est le phonème [2].

1.2. Production de la parole :

IL n'existe pas à proprement parler un organe spécifique destinée à la production de la parole. L'homme à cette fin fait un usage particulier de son système respiratoire [1].

1.2.1. Aperçu anatomique :

Les sons de la parole sont produits par la modification du courant d'air de l'expiration en provenance des deux poumons (partie subglottique)[1]. Ce souffle d'air se transforme, selon la configuration du conduit vocal, lors de son passage dans le larynx

(partie glottique), le pharynx et les cavités buccale et nasale (partie supraglottique) (Figure 1.1) [2][3].

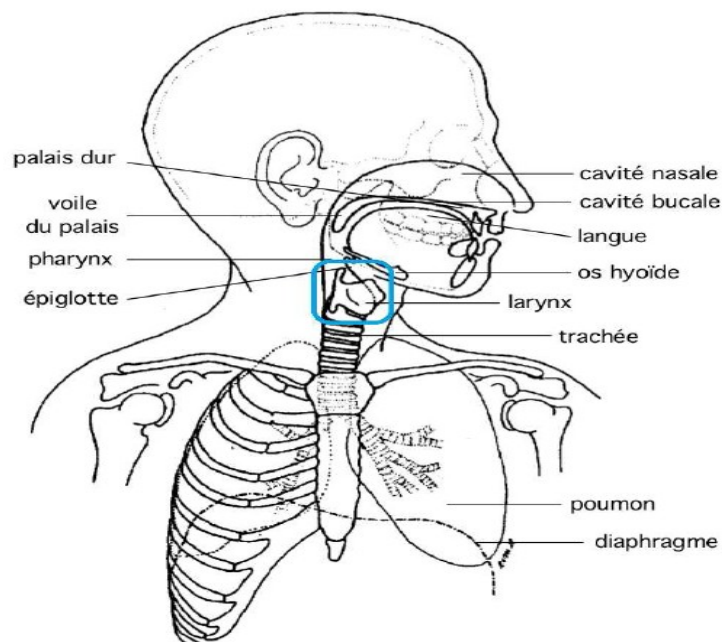


Figure 1.1 : Anatomie de l'appareil phonatoire

- **Partie subglottique :**

La partie subglottique constituée des poumons et de l'artère a pour rôle principal de fournir l'énergie nécessaire à la phonation en insufflant de l'air vers la partie glottique. Lors de l'expiration, les poumons provoquent une suppression d'air et chassent ainsi l'air préalablement inspiré [3].

- **Partie glottique (larynx):**

Le larynx est l'organe qui joue le rôle le plus important dans tout le mécanisme de la parole. Il est constitué d'un ensemble très complexe de cartilages, de ligaments et de muscles, à la base duquel sont attachées les cordes vocales (Figure 1.2) [3] [6].

Deux cordes, formées par des replis horizontaux, tendus symétriquement de part et d'autre de la ligne médiane du larynx. Elles forment une ouverture en forme de fente (glotte) qui se comporte comme une vanne commandant le débit d'air lors de la phonation ou permettant la respiration.

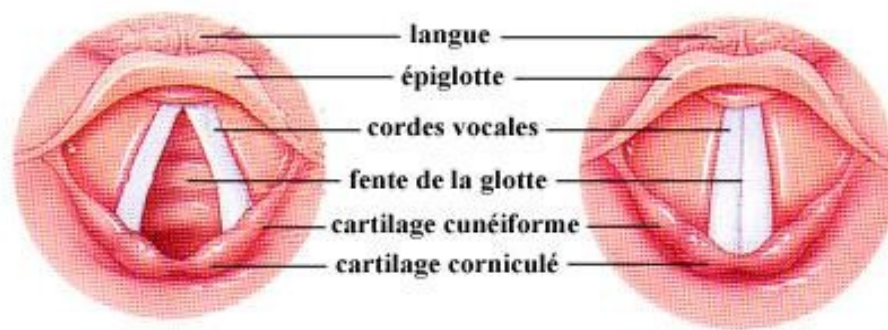


Figure 1.2: Anatomie des cordes vocales

- **La partie supra glottique:**

La partie supraglottique ou conduit vocal est constituée par les cavités situées au dessus du larynx (Figure 1.3). elle est constituée par la cavité bucco-pharyngale (ou les cavités buccale et pharyngale), dont la géométrie selon la position des différents articulateurs (essentiellement la langue, la mâchoire inférieure et les lèvres) et de la cavité nasale, dont la géométrie est fixe, et qui est couplée avec la cavité bucco-pharyngale par abaissement du voile du palais. Les deux paramètres : forme de la cavité buccal et position de langue, sont utilisés par la phonétique articulatoire pour décrire les phonèmes [3] (figure 1.3).

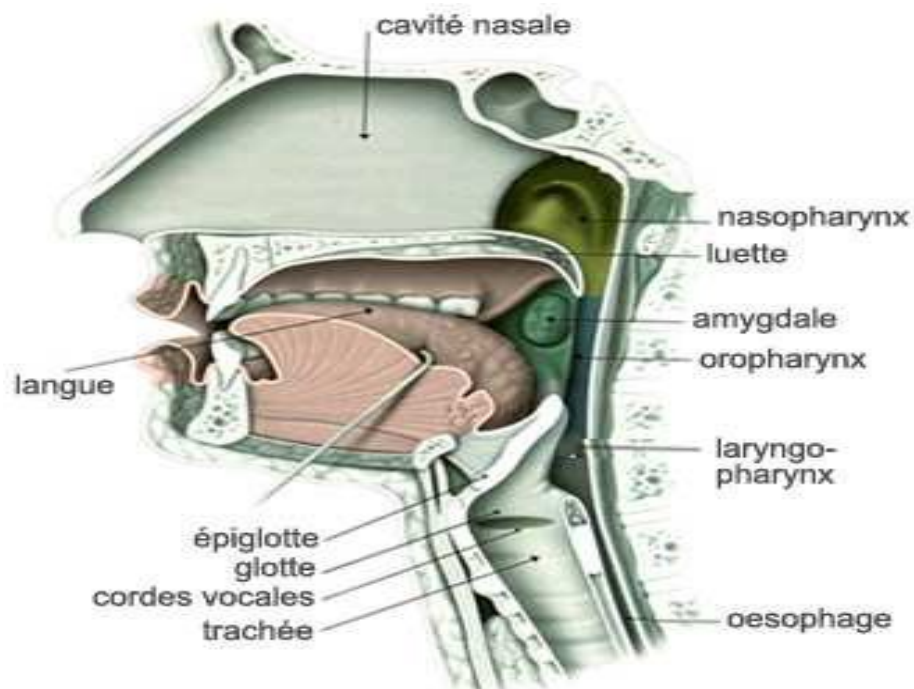


Figure 1.3 : Anatomie de la partie supérieure de l'appareil phonatoire

1.2.2. Caractéristiques de la production de la parole:

Le processus de production de la parole présente certaines caractéristiques :

- Continuité : lorsqu'on écoute parler une personne, on perçoit une suite de mots que l'analyse de signal vocal sépare difficilement. Le même problème de segmentation se retrouve à l'intérieur du mot, perçu comme une suite de sons élémentaire ; les phonèmes.
- Variabilité : à contenu phonétique égal, le signal vocal est très variable, tant pour différents individus que pour un même locuteur, en raison des différences anatomiques.

Le conduit vocal est un tuyau tridimensionnel qui est excité par une ou deux sources acoustiques. La source laryngienne peut être considérée comme quasi périodique, avec une fréquence pouvant évoluer très rapidement. La source génère du bruit de friction ou d'explosion (glotte, lèvre).

- Encodage : depuis l'idée jusqu'au signal sonore, interviennent plusieurs niveaux successifs de traitement : sémantique (concept), syntaxique (structure du langage), lexical (mots), morphologique, phonétique (phonèmes et leurs interactions).
- Le larynx est un lieu important pour les mécanismes phonatoires. La langue joue un rôle dans la phonation, car sa mobilité lui permet d'agir avec précision et rapidité sur la taille du conduit vocal.
- Les lèvres sont situées à l'extrémité du conduit vocal et c'est leur écartement (et la variation de cet écartement) qui est important du point de vue acoustique [4] [5].

1.2.3. Le modèle physique de la production de la parole:

Le processus de production de la parole est un mécanisme très complexe qui repose sur une interaction entre les systèmes neurologique et physiologique. La parole commence par une activité neurologique. Après que soient survenues l'idée et la volonté de parler, le

cerveau dirige les opérations relatives à la mise en action des organes phonatoires. Le fonctionnement de ces organes est bien, quant à lui, de nature physiologique [7].

Une grande quantité d'organes et de muscles entrent en jeu dans la production des sons des langues naturelles. Le fonctionnement de l'appareil phonatoire humain repose sur l'interaction entre trois entités : les poumons, le larynx, et le conduit vocal.

Le larynx est une structure cartilagineuse qui a notamment comme fonction de réguler le débit d'air via le mouvement des cordes vocales. Le conduit vocal s'étend des cordes vocales jusqu'aux lèvres dans sa partie buccale et jusqu'aux narines dans sa partie nasale. La parole apparaît physiquement comme une variation de la pression de l'air causée et émise par le système articulatoire. L'air des poumons est comprimé par l'action du diaphragme. Cet air sous pression arrive ensuite au niveau des cordes vocales (Figure 1.5). Si les cordes sont écartées, l'air passe librement et permet la production de bruit. Si elles sont fermées, la pression peut les mettre en vibration et l'on obtient un son quasi périodique dont la fréquence fondamentale correspond généralement à la hauteur de la voix perçue (Figure 1.4) [7]. L'air mis ou non en vibration poursuit son chemin à travers le conduit vocal et se propage ensuite dans l'atmosphère. La forme de ce conduit, déterminée par la position des articulateurs tels que la langue, la mâchoire, les lèvres ou le voile du palais, détermine le timbre des différents sons de la parole. Le conduit vocal est ainsi considéré comme un filtre pour les différentes sources de production de parole telles que les vibrations des cordes vocales ou les turbulences engendrées par le passage de l'air à travers les constriction du conduit vocal. Le son résultant peut être classé comme voisé ou non voisé selon que l'air émis a fait vibrer les cordes vocales ou non [8].

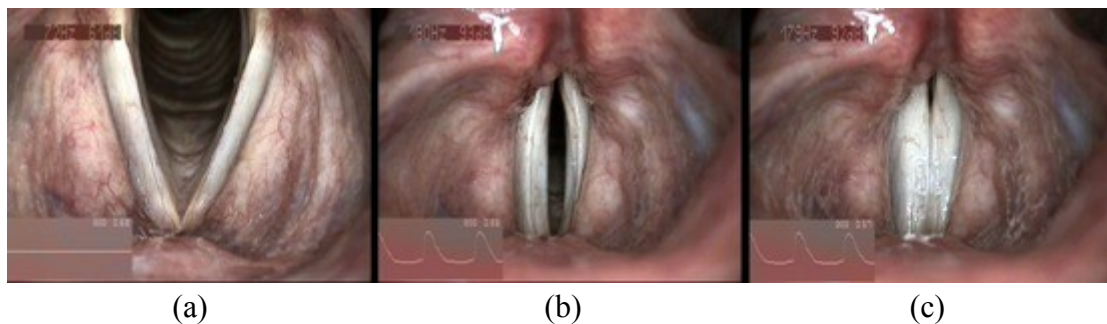


Figure 1.4 : (a) Glotte pendant la respiration, (b) et (c) rapprochement des cordes vocales pendant la phonation

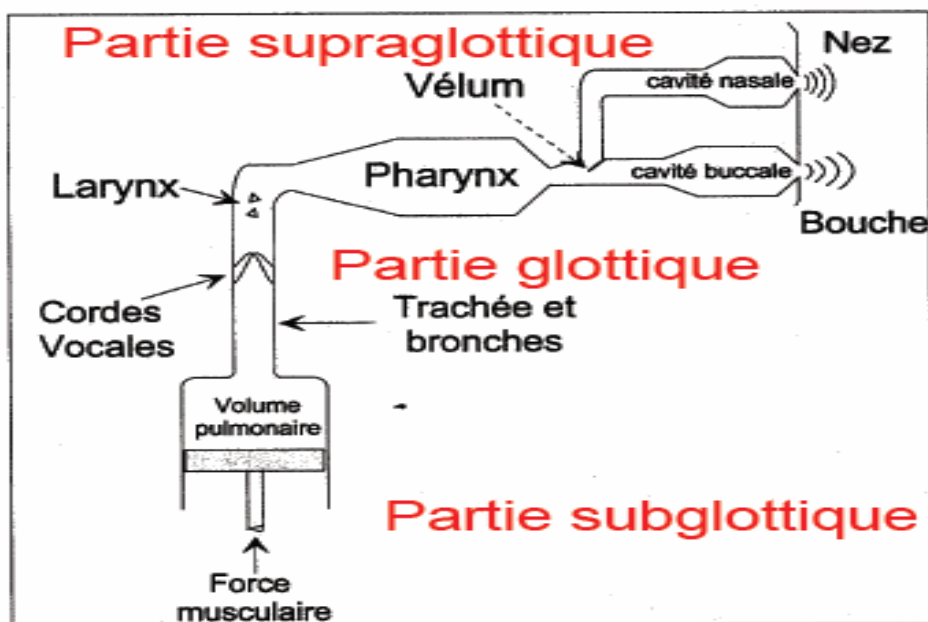


Figure 1.5 : Modèle physique de la production de parole

Donc la structure du signal de la parole est complexe tantôt périodique tantôt aléatoire, ceci nous ramène à répartir les sons de la parole en deux catégories : les sons voisés et les sons non voisés.

- Les sons voisés : ils résultent d'une vibration périodique des cordes vocales (excitation voisée) et d'une configuration quasi-stable du conduit vocale, ce sont des signaux quasi-périodiques, exemple : les voyelles (a, i,...) et certaines consonnes (v,b,...) (figure 1.6) [9].

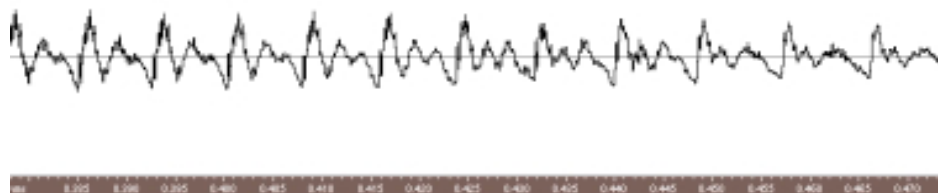


Figure 1.6 : Exemple de sons voisé

- Les sons non voisés : ces signaux ne présentent pas une structure périodique en raison de la position écartée des cordes qui ne vibrent pas, exemple (f, p,...) (figure 1.7)[9].

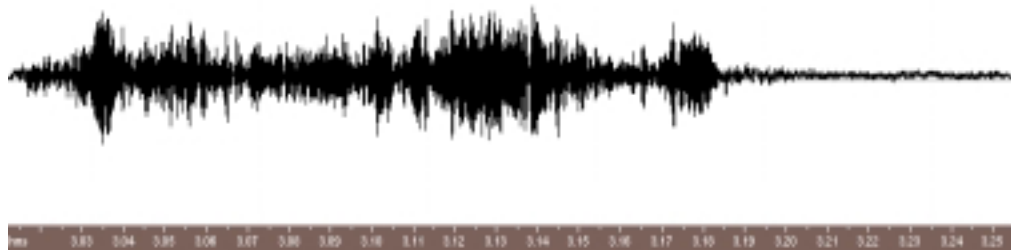


Figure 1.7 : Exemple de sons non voisé

1.2.4. Description acoustique des sons de la parole :

La parole se distingue des autres sons par des caractéristiques, qui ont leurs origines dans les mécanismes de production. Les sons de la parole sont produits soit par des vibrations des cordes vocales (sources de voisement), soit par une turbulence créée par l'air s'écoulant rapidement dans une constriction du conduit vocal ou lors de relâchement d'une occlusion de ce conduit (sources de bruit). Donc il est intéressant de grouper les sons de parole en classes phonétiques, en fonction de leur mode articulaire. On distingue généralement trois classes principales : les voyelles, les semi voyelles et les consonnes (Figure 1.8).

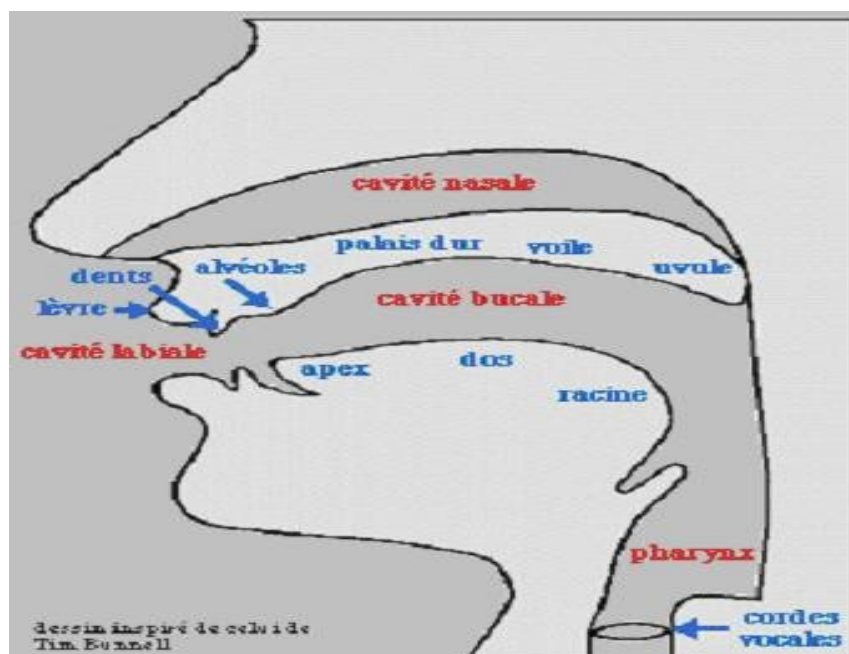


Figure 1.8 : Lieu d'articulation des phonèmes

A. Les voyelles :

A.1. Définition :

Les voyelles diffèrent de tous les autres sons par le degré d'ouverture du conduit vocal et par le degré d'activité des cordes vocales (excitation voisée), qui donnent au conduit vocal une configuration quasi-stable.

Dans la description des voyelles de la langue française, on peut distinguer deux dimensions [10].

D'un côté, le mode d'articulation qui décrit la configuration générale des organes articulatoires dans la production d'une voyelle donnée. D'un autre côté, le lieu d'articulation est le lieu où se produit une modification du diamètre du conduit vocal pendant la production du son.

A.2. Le mode d'articulation :

En français, le mode d'articulation permet de distinguer quatre grandes classes de voyelles [11]:

- Les voyelles orales : elles se prononcent avec le voile du palais, ce qui ferme le passage nasal, donc il y a absence de nasalité (exemple : i (lit), e(les)).
- Les voyelles nasales : Elles se prononcent avec le voile du palais abaissé, ce qui laisse passer de l'air par la bouche, et par le nez. En français on distingue quatre voyelles nasales (exemple (matin, plante, long, lundi))
- Les voyelles arrondies : On dit que la voyelle est arrondies si les lèvres sont arrondies exemple (lu, peu, loup).
- Les voyelles non-arrondies : Les voyelles non arrondies si les lèvres sont ou bien écartées ou bien dans une position neutre (exemple : papa).

A.3. Lieu d'articulation :

Pour bien comprendre le lieu d'articulation, il faut imaginer la bouche comme un espace à deux dimensions, allant du haut vers le bas et de l'avant vers l'arrière de la bouche.

C'est dans l'espace ainsi défini que se situe le point de rétrécissement maximal qui détermine le lieu d'articulation [12].

- Voyelles antérieures : dans ce cas le bout de la langue se déplace vers l'avant de la bouche (**lait, lu**).

Voyelles postérieures : Dans ce cas le dos de la langue descend dans la bouche et se trouve près du palais (exemple : **leur, peu**).

Voyelle ouverte : lors de la prononciation d'une voyelle ouverte la langue se trouve au fond de la bouche et le passage de l'air est ouvert (exemple : **bâton**).

B. Les consonnes:

B.1. Définition :

On a une consonne lorsque le passage de l'air venant des poumons est partiellement ou totalement obstrué. Elles peuvent être voisées ou non voisées suivant que les cordes vocales vibrent au passage de l'air ou non [10].

Comme c'était le cas pour les voyelles, on distingue un mode d'articulation et un lieu d'articulation.

B.2. Le mode d'articulation :

- Le voisement : Pour les consonnes on peut noter les consonnes voisées et les consonnes non voisées. Ce sont les cordes vocales qui font cette distinction, lorsqu'elles vibrent le son est voisé et la consonne correspondante est une consonne voisée ou sonore. Les consonnes sans vibration sont des consonnes non voisées ou sourdes.
- L'oralité et la nasalité : Dans les consonnes nasales, il y a la composante nasale qui s'ajoute à la composante buccale (l'air sort par le nez et la bouche), tandis que pour les consonnes orales ; l'air sort par la bouche seulement

- Les consonnes occlusives et fricatives : On appelle consonnes fricatives les consonnes qui n'ont pas de fermeture totale du passage de l'air. Par contre, les consonnes occlusives ferment totalement le passage de l'air.

Les consonnes latérales et vibrantes : On dit consonne latérale, lorsque la langue se met contre les dents supérieures et laisse passer de l'air des deux côtés.

Pour les consonnes vibrantes la langue prend la même position précédente, mais produit un battement qui laisse passer de l'air [l] (Tableau 1.1).

Occlusives	Non-voisées	[p]pais	[t]taie	[k]quai
	Voisées	[b]baie	[d]dais	[g]gai
Nasales		[m]mais	[n]nez	[ŋ]gagner
Fricatives	Non-voisées	[f]fait	[s]sait	[ʃ]chez
	Voisées	[v]vais	[z]zéro	[ʒ]geai
Liquides			[l]lait	[R]raie

Tableau 1.1: Les consonnes et leur mode d'articulation.

B.3. Lieu d'articulation :

Consonnes labiales : on appelle une consonne labiale lorsque les deux lèvres ferment le passage de l'air [p], [b] et [m].

- Consonnes apico-dentales : Dans le cas où le bout de la langue (apex) s'appuie contre les dents Supérieures [t], [d] et [n].
- Consonnes dorso-vélaire : C'est lorsque le dos de la langue s'appuie contre le voile de palais [k], [g].
- Consonnes labio-dentales : Lorsque les dents supérieures, entrent en contact avec la lèvre inférieure, pour fermer le passage partiellement on dit que c'est une consonne labio-dentale [f] et [v].
- Consonnes pré-dorso-alvéolaires : Lorsque la partie antérieure du dos de la langue s'approche du palais dur on peut dire que la consonne est pré-dorso-alvéolaire [z].

C. Les semi voyelles:

Ce sont des sons qui ont la sonorité des voyelles mais l'absence de syllabicité des consonnes on peut les appeler aussi semi-consonnes. Pour résumer, les semi-voyelles ont le même lieu d'articulation que les voyelles, mais ne donnent pas de syllabe. Dans la langue française il y'a quatre semi-voyelles [j] [w] [ɥ] [ɲ] (Tableau 1.2):

Symbole	Exemple
[j]	Yeux
[w]	Oui
[ɥ]	Huit
[ɲ]	Camping

Tableau 1.2 : les semi voyelle du français.

1.3. Les pathologies de Larynx :

1.3.1. Inflammation aiguë du larynx ou laryngite aiguë :

Par le fait de bactéries, un simple refroidissement peut se transformer en laryngite aiguë. Cette irruption de bactéries s'attaque directement au larynx, ou s'introduit par le nez dans la gorge et ensuite dans le larynx. D'autre part, les laryngites peuvent aussi être la suite d'autres infections comme la rougeole, la scarlatine, la syphilis, la tuberculose ou la fièvre typhoïde. Elle peut encore avoir d'autres causes : par exemple, forcer la voix, tonitruée, crié à tue-tête, vociférer [13].

Ces excès sont souvent accompagnés de raucité brulante, d'accès de toux violente et parfois d'une légère hausse de température. Un laryngoscope révélera que la muqueuse est rouge et que les cordes vocales, normalement d'un blanc clair, sont également rouges et gonflées. Chez les enfants, le gonflement des cordes vocales peut rendre la respiration difficile, allant jusqu'à l'oppression (Figure 1.9)

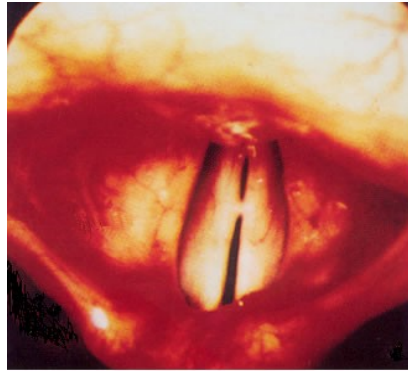


Figure 1.9 : Laryngite aigu

1.3.2. Laryngite chronique :

La **laryngite chronique** a les mêmes symptômes que la forme aiguë dont elle est souvent un prolongement faute de soins et parce que l'on a tardé à s'attaquer à la cause. Elle peut aussi être due à un forçage continu de la voix, par exemple chez des orateurs, des maraîchers, des marchands de quatre saisons. Ou encore à l'inhalation des poussières, par exemple dans les manufactures de tabac, les matelassiers, chez les meuniers, les mineurs, les tailleurs de pierre, etc. Ou tout simplement par l'abus du tabac et de l'alcool. La muqueuse du larynx est alors d'un gris rouge, gonflée par endroits et couverte d'excrétions purulentes et glaireuses [14] [13] (Figure 1.10).



Figure 1.10 : Laryngite chronique

1.3.3. Les tumeurs du larynx :

Les tumeurs du larynx peuvent être bénignes ou malignes. La première catégorie comprend les polypes, les enflures granuleuses et nodulaires (par exemple, les chanteurs

sont souvent affectés par ces enflures nodulaires, saillies sur les bords des cordes vocales).

1.3.4. Les tumeurs bénignes du larynx :

- **Polype de cordes vocales :** Souvent secondaire à un malmenage vocal, le polype peut être favorisé par une intoxication alcoolo-tabagique ou une exposition aux poussières. Le rôle de l'inflammation joue peu, il s'agit d'une tuméfaction bénigne de la corde vocale du plan glottique. Il est de forme lisse ou mamelonnée. Son implantation sessile ou pédiculée. Il est localisé au 1/3 moyen ou à la commissure antérieure. Il se présente sous une forme inflammatoire, oedémateuse ou hémorragique. Il est responsable d'une dysphonie : La voix est grave, voire bi-tonale, le diagnostic repose sur la laryngoscopie indirecte et la fibroscopie [18] (Figure1.11).



Figure 1.11 : Polype des cordes vocales.

Les nodules des cordes vocales : Ils correspondent à un épaississement localisé, généralement bilatéral (des deux côtés) du rebord libre de la corde vocale. Cet épaississement se situe à la jonction du premier et du deuxième tiers des cordes vocales et empêche l'approximation de celles-ci durant la phonation.

Les nodules sont la conséquence du choc répété des cordes vocales entre elles à cause d'une sur utilisation ou d'une mauvaise utilisation de la voix (p. ex. cris excessifs, vocalisations forcées, toux forte, éclaircissements répétés de la voix pour dégager des sécrétions, etc.)

Certains facteurs peuvent aussi favoriser leur apparition: infections fréquentes des voies respiratoires supérieures (rhinite, sinusite), bronchites, asthme, allergies, exposition à la

fumée de cigarette, reflux laryngopharyngé, présence de produits irritants dans l'atmosphère (poussières, allergènes) [15] [19] (Figure 1.12).

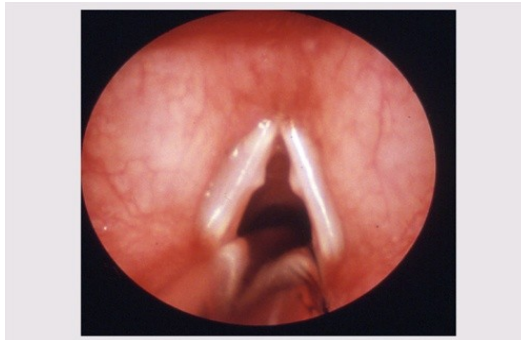


Figure 1.12 : Nodules des cordes vocales.

Les granulomes : sont des formations inflammatoires qui ne donnent vraiment de troubles dysphoniques que lorsqu'ils sont volumineux et gênent l'occlusion cordale. Le plus souvent ils se manifestent par une simple sensation de gêne pharyngée et sont découverts par l'examen laryngé systématique. Les granulomes sont unis ou bilatéraux, en général développés dans la partie postérieure de l'orifice glottique. Parfois, il n'y a pas de cause évidente, si ce n'est le surmenage vocal ou un reflux gastro-oesophagien qu'il faudra toujours soigneusement rechercher [20] (Figure 1.13).



Figure 1.13 : Granulome des cordes vocales.

1.3.5. Les tumeurs malignes du larynx :

Quant aux tumeurs malignes, le cas le plus grave est celui du cancer du larynx. Cette affection commence généralement par une insignifiante tumeur sur une corde vocale,

tumeur qui se développe petit à petit, altérant la voix jusqu'à la raucité, rendant la déglutition de plus en plus pénible et provoquant de l'oppression allant jusqu'à l'étouffement. Il en résulte un amaigrissement et un affaiblissement généralisés et finalement une paralysie des cordes vocales [16].

Les tumeurs bénignes aussi bien que les malignes ne peuvent être traitées avec succès que chirurgicalement. Toutefois, l'opération variera suivant la nature de la laryngite. L'examen des tumeurs bénignes se fait au moyen du laryngoscope de Clar, composé d'un petit miroir et d'un foyer lumineux. Le médecin introduit le miroir pourvu d'un manche assez long au fond de la bouche, entre le palais et la luette, au-dessus du larynx dont l'image est ainsi nettement réfléchi dans le miroir grâce au foyer lumineux braqué sur la bouche. Cette méthode permet de voir les tumeurs et de les éloigner au moyen de longues pinces [17] (Figure 1.14).



Figure 1.14 : Cancer du larynx

1.4. Moyens d'exploration laryngée

1.4.1. La laryngoscopie

La laryngoscopie directe utilise un laryngoscope pour examiner l'intérieur de la gorge (le larynx, le pharynx, les cordes vocales, l'épiglotte et la partie supérieure de la trachée). Cet examen nécessite une très courte hospitalisation, surtout si elle est associée

à une endoscopie opératoire (ablation de corps étranger, ablation d'une tumeur, biopsie...). Il s'effectue sous anesthésie générale.

Par contre, la laryngoscopie indirecte n'utilise aucun matériel endoscopique. Le médecin examine la gorge de l'extérieur, à l'aide d'une lumière frontale, et en introduisant un petit miroir dans la gorge (qui s'arrête au fond de la bouche). Cet examen ne nécessite pas d'anesthésie et s'effectue au cours d'une simple consultation en ORL. La laryngoscopie directe est indiquée en cas de présence de corps étranger dans la gorge (arête de poisson le plus souvent) douleur, troubles de la voix (enrouement de la voix, voix cassée...), problème respiratoire, problème au niveau de la déglutition, nécessité de prélèvement d'un échantillon pour une analyse microscopique (en cas de tumeur par exemple).

Après l'injection du produit anesthésique pour endormir le patient, le laryngoscope est ensuite introduit doucement dans la bouche pour atteindre le larynx. Il peut visualiser une tumeur, ou une lésion au niveau de cette région. Le médecin peut également effectuer des prélèvements ou des biopsies au cours de l'examen.

Une laryngoscopie n'est pas dangereuse. Les complications sont souvent liées à l'introduction du laryngoscope dans la gorge, entraînant une altération de la voix, une douleur de la gorge ou une lésion au niveau de la langue ou des lèvres (par irritation). Ces complications disparaissent spontanément et ne sont pas très graves [22].

1.4.2. La nasofibroscopie

Le nom de nasofibroscope est communément donné en oto-rhino-laryngologie aux appareils à fibres optiques souples, introduits par voie nasale et permettant l'examen du larynx et du pharynx. Ils sont d'utilisation courante en oto-rhino-laryngologie depuis les années 1970. Les nasofibrosopes les plus employés ont un diamètre de 4,2 mm à 3,2 mm. Il en existe de diamètre inférieur (jusqu'à 2 mm) qui sont à réserver au tout petit enfant.

L'insensibilisation préalable d'une ou des deux fosses nasales par un spray anesthésique peut être nécessaire. Le passage se fait habituellement par la fosse nasale la plus large. Le

fibroscope peut être glissé le long du plancher de la fosse nasale ou bien entre le cornet inférieur et moyen.

Tout d'abord, le fibroscope est positionné en haut du pharynx derrière le voile de façon à pouvoir observer le larynx dans les conditions les plus physiologiques possibles lors de la respiration, de la voix parlée ou de la voix chantée. Il peut être abaissé ensuite jusqu'à 2 ou 3 mm du plan glottique pour l'examen détaillé des cordes vocales en lumière continue et en stroboscopie [23] (Figure 1.15) (Figure 1.16).

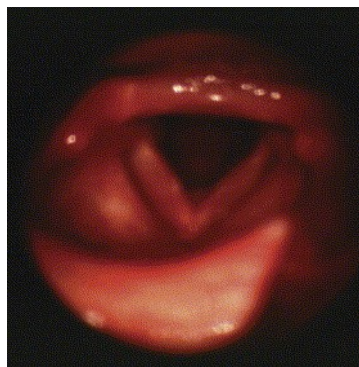


Figure 1.15 : Fibroscopie du larynx



Figure 1.16 : Télé examen nasofibroscopique microcontrôlé

1.4.3. la stroboscopie

Le but de l'examen laryngé en stroboscopie est d'explorer les mouvements vibratoires des plis vocaux.

- principe de la stroboscopie

La fréquence de vibration des plis vocaux est tellement élevée qu'elle ne peut être enregistrée visuellement en laryngoscopie indirecte sans recours à un autre artifice de visualisation. Le mot stroboscope vient du grec strobos, tourniquet et skopein. La stroboscopie a été utilisée pour la première fois en laryngologie en 1878 par Max Joseph Oertel, laryngologiste de Munich. Au début du 20^e siècle, la stroboscopie est devenue un outil irremplaçable en laryngologie et phoniatry pour l'observation de la vibration des plis vocaux au moyen d'une source lumineuse périodique. Il s'agit de créer une illusion d'optique d'un mouvement continu à partir d'une série d'images instantanées [24] (Figure 1.17).



Figure 1.17 : Image de larynx prise d'une vidéo de stroboscopie

- Les limites de l'examen stroboscopique

Les informations apportées par la stroboscopie en termes de qualité de l'image dynamique et du processus vibratoire de tout le plan glottique, sont limitées par le principe même de la lumière stroboscopique, c'est à dire qu'il s'agit d'une reconstruction visuelle et non un cycle vibratoire complet. Il s'agit en outre d'une évaluation subjective, examinateur dépendant selon son degré de formation et d'expérience.

1.4.4. L'électromyographie laryngée

L'électromyographie (EMG) laryngée est un moyen d'exploration des troubles de la mobilité du larynx à visée diagnostique, topographique, pronostique et thérapeutique.

- Intérêt diagnostique, essentiellement dans :
 - Le diagnostic différentiel des immobilités laryngées (paralysie, ankylose, dystonie).
 - Le diagnostic topographique de l'atteinte nerveuse ;
 - Le diagnostic étiologique (sclérose latérale amyotrophique, myasthénie, dystonie, myopathie)
 - Intérêt pronostique de la récupération nerveuse.
 - Intérêt thérapeutique dans le repérage pour les injections intramusculaires.

Son utilisation en pratique clinique reste limitée à quelques équipes, car elle impose la collaboration d'un otorhinolaryngologiste et d'un neurologue électrophysiologiste. L'examen est réalisé sans anesthésie locale ou générale, en ambulatoire, chez un patient conscient capable de phonation ou d'inspiration profonde à la demande [21]. (Figures 19 et 20) (Figure 1.18).



Figure 1.18 : L'électromyographie laryngée

1.4.5. La glottographie :

La glottographie permet l'étude indirecte du mouvement des cordes vocales. On distingue l'électroglottographie, la photoglottographie, la glottographie de flux (ou par filtrage inverse), l'ultrasonoglottographie, la glottographie digitale à haute vitesse, la

stroboglottographie et la glottographie électromagnétique. L'électroglottographie permet d'apprécier les variations de contact entre les cordes vocales pendant la phonation à l'aide de deux électrodes placées sur la peau de part et d'autre du larynx. En analysant le signal, on peut obtenir indirectement une représentation de l'oscillation glottique. Les autres techniques sont peu utilisées en pratique et sont utilisés en laboratoire pour l'étude de la physiologie et de la physiopathologie des cordes vocales [24].

1.4.6. Technique d'imagerie

A. Imagerie

Les progrès réalisés dans l'imagerie du larynx ont été considérables ces dernières années. Les scanners hélicoïdaux sont en voie de remplacer les scanners conventionnels. Ces scanners sont beaucoup plus rapides et permettent une reconstruction en trois dimensions du larynx. Le traitement des images autorise pratiquement une endoscopie virtuelle en temps réel.

Ceci est très utile pour l'observation des sténoses laryngotrachéales et des cancers étendus ou des modifications anatomiques du boîtier ostéocartilagineux ou encore le résultat d'une reconstruction.

Les appareils d'imagerie par résonance magnétique les plus récents permettent d'observer le pharyngolarynx en mouvement sans risque d'irradiation pour le patient. On parle de ciné-imagerie par résonance magnétique.

Les petites lésions des cordes vocales ne sont cependant pas observées. L'endoscopie reste irremplaçable pour l'observation des petites lésions. Le diagnostic de certitude reste basé sur l'histologie [21] [23].

B. Ultrasonographie

B.1. Ultrasonographie en mode B ou doppler couleur

Pour autant que le larynx ne soit pas ossifié, on peut explorer la lumière de l'endolarynx, les cordes vocales et leur mouvement par ultrasons. Cette technique est donc surtout utile chez l'enfant où on peut détecter des malformations congénitales avant la naissance.

Les expériences citées se rapportent le plus souvent à l'échographie en mode B, en temps réel et avec échelle de gris. L'ultrasonographie-doppler couleur améliorerait la sensibilité de la méthode en étant aussi exacte que la laryngoscopie pour le diagnostic des paralysies ou parésies de la corde vocale, ce qui n'est pas le cas de l'ultrasonographie en mode B.

B.2. Ultrasonographie endoscopique à haute fréquence

Une sonde pour ultrasonographie à haute fréquence (10-20 MHz ; 30 MHz) est introduite dans le larynx après irrigation de celui-ci avec du sérum physiologique lors d'une endoscopie directe.

1.5. Analyse objective de la voix :

1.5.1. Analyse acoustique :

L'analyse acoustique est une méthode d'exploration non invasive de la voix fournissant des mesures quantitatives objectives sur un échantillon vocal. Les principaux paramètres altérés dans le cadre d'une dysphonie sont la hauteur (ou fréquence fondamentale), la sonie (ou intensité), et le timbre qui donne toute la couleur à la voix. D'autres paramètres reflètent les perturbations de la parole comme le débit phonatoire et l'articulation [18].

- Fréquence

Au moyen d'histogrammes, les différentes fréquences et leur pourcentage (Mais aussi moyenne, écart-type, coefficient de variation) peuvent être mesurés lors de la lecture d'un texte ou d'un autre échantillon vocal à partir du signal acoustique ou du signal

électroglottographique. Elle rend compte de l'étendue des variations de la fréquence qui sont une des caractéristiques de la mélodie de la parole.

- Intensité

L'utilisation d'un sonomètre permet des mesures précises et reproductibles, à condition de toujours respecté la même distance lèvres-microphone. Pour les autres appareils d'analyse, le problème de l'étalonnage d'une part, et de la vérification du niveau d'enregistrement rendent souvent illusoire l'obtention de mesures absolues de l'intensité.

- Timbre

Méthodes objectives qualitatives : Les représentations visuelles, comme le sonagramme et le spectrogramme, permettent de visualiser des phénomènes intermittents ou périodiques (subharmoniques, tremblements), d'apprécier l'importance des bruits de souffle par rapport aux harmoniques.

- Indices quantitatifs objectifs acoustiques :
- Le Jitter (Les indices de perturbation à court terme).
- Le shimmer L'indice de perturbation à court et moyen terme de l'amplitude.
- Les indices explorant la présence de « bruits » au cours de la phonation [14].

1.5.2. Mesures aérodynamiques

Elles apprécient la qualité du souffle phonatoire, qui conditionne la qualité et l'efficacité de l'émission vocale. Le but est la recherche d'un accord pneumophonatoire et d'une respiration adaptée au geste vocal (4). Le temps maximum de la phonation (TMP) est la mesure la plus fréquemment utilisée. C'est une mesure simple, non invasive et nécessite seulement un chronomètre ; elle consiste à mesurer la durée de la tenue d'une voyelle (en général la voyelle /a/) à une intensité et une fréquence confortables. On considère qu'il est significatif du rendement de la source vocale. Il est diminué en cas de fatigue vocale. D'autres mesures nécessitent un appareillage plus sophistiqué avec des capteurs de débit et de pression et sont encore du domaine de la recherche clinique [17].

- **Exploration fonctionnelle respiratoire et pneumotachographe :** L'air utilisable pour la phonation peut être évalué par les explorations fonctionnelles respiratoires classiques avec mesure de la capacité vitale, du volume expiratoire maximum seconde (VEMS) et du débit de pointe. Le volume d'air en phonation est statistiquement corrélé de manière linéaire à la capacité vitale. Il peut être mesuré à l'aide d'un spiromètre ou d'un pneumotachographe sur une voyelle tenue le plus longtemps possible, précédée d'une inspiration profonde.
- **Débit d'air en phonation :** Le débit d'air transglottique correspond, en l'absence de fuite nasale en phonation, au débit d'air buccal. Les mesures directes sont réalisées à l'aide d'un pneumotachographe,
- **Quotient phonatoire :** Le quotient phonatoire correspond à la capacité vitale divisée par le temps maximal phonatoire ($QP = CV/TMP$). Il équivaut, indirectement, au débit phonatoire moyen.
- **Pression sous-glottique :** Son amplitude et sa stabilité seraient des informations pertinentes pour la connaissance de la biomécanique pneumophonique. Cependant, sa mesure en clinique reste délicate [21].
- **Résistance glottique :** Elle peut être calculée en divisant la pression sous-glottique par le débit d'air buccal. Sa valeur normale est de 40 hPa/dm³.

1.5.3. Capacités vocales

- **Phonétogramme :** C'est la représentation graphique du champ dynamique vocal obtenu en quantifiant les intensités sonores minimales et maximales, en fonction de la hauteur tonale du son fondamental sur toute l'étendue de la voix. Il donne l'ensemble des possibilités et limites physiologiques de la voix du sujet, permet la classification vocale, la détermination des « passages », la quantification de la dynamique d'expression vocale, met en évidence les effets de l'éducation vocale et d'un entraînement spécifique. C'est un document de référence et de comparaison intra-individuelle et interindividuelle [15].
- **Test d'endurance :** Sur les recommandations de l'Union européenne des phoniâtres (UEP), ce test a été standardisé sous la forme d'une lecture à haute voix de 20 minutes pour évaluer l'endurance vocale. Combiné avec le contrôle de perturbations au niveau

de l'analyse perceptuelle, du temps maximal phonatoire et de l'examen laryngé, avant et après le test, il peut avoir une valeur prédictive sur la survenue de certaines pathologies. Pour certains, cette capacité peut être appréciée en demandant au sujet de compter rigoureusement jusqu'à 100[23].

1.6. Conclusion :

Ce chapitre a été pour nous l'occasion de passer en revue et de faire un état de l'art exhaustif sur les différentes méthodes et les différents protocoles utilisés en matière d'exploration des dysphonies vocales d'origine laryngée. Ce qui nous a permis de constater que la plupart des techniques exploratrices sont invasives et intrusives (laryngoscopie, nasofibroscopie, stroboscopie...) avec des résultats diagnostiques insuffisamment objectives. Toutes ces raisons nous ont amené à opter pour l'analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique qui présente l'avantage d'être non invasif, non intrusif tout en posant un diagnostic objectif par l'évaluation quantitative de paramètres représentatifs des différentes affections des territoires laryngés ayant pour conséquence des dysphonies vocales chroniques tels que la fréquence fondamentale, le Jitter, le STD et le contenu spectral d'un son voisé soutenu pendant 3 secondes.

Chapitre 2 : Algorithmes d'exploration du signal vocal acoustique

2. Algorithmes d'exploration du signal vocal acoustique

2.1. Introduction

Pour mieux comprendre l'analyse du signal vocal acoustique nous détaillons dans le cadre de ce chapitre les différentes méthodes d'évaluation objective des dysphonies chroniques a des fins de diagnostic de la maladie cordale, de la gravité de celle-ci, en d'autres termes pour évaluer le genre et le degré de sévérité des dysphonies. Ce qui permettra aux médecins d'évaluer le pronostic et de suivre l'évolution de la maladie avant et après traitement.

Pour cela nous avons implémentés un plateau technique hardware et software capable de faire l'analyse objective du signal vocal acoustique sur un corpus de sujets sains et de sujets pathologiques, l'objectif étant d'établir un diagnostic le plus précoce possible des dysphonies vocales chroniques et surtout avec possibilité de distinction entre un syndrome inflammatoire et un syndrome tumoral malin.

2.2. Analyse temporelle :

2.2.1. Représentation numérique du signal vocal :

La représentation numérique du signal vocal implique :

Un échantillonnage effectué à une fréquence F_e compatible avec les exigences du théorème de Shannon : la perte d'information entre le signal original et le signal discret correspondant est nul si et seulement si la fréquence d'échantillonnage est supérieure ou égale au double de la fréquence la plus haute contenue dans ce signal. Une quantification de chaque échantillon avec un pas de quantification en rapport avec la précision souhaitée est alors réalisée [25].

Le signal quantifié bénéficie alors d'un codage approprié, en général le code binaire naturel. Nous obtenons ainsi la représentation numérique du signal vocal acoustique.

2.2.2. Analyse temporelle à court terme :

Des mesures simples (énergie, taux de passage par zéro et fonction d'autocorrélation) à court terme sur le signal vocal donnent beaucoup d'informations. L'évolution de l'énergie à court terme indique la succession des voyelles (très énergétiques) et des consonnes (d'énergie moindre) [26]. Le comptage et le tracé d'histogrammes des passages par zéro du signal traduisent, bien que grossièrement, le contenu spectral. Certains spécialistes de l'analyse du signal vocal passent par l'estimation de la période du fondamental au moyen de la fonction d'autocorrélation [27].

2.2.3. Energie et puissance à court terme :

L'énergie à court terme d'un signal $x(t)$ est donnée par la relation suivante [28] :

$$E_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^2(m) \cdot w^2(n-m) \quad (2.1)$$

Où $w(n)$ représente la fonction fenêtre (rectangulaire, hamming,...).

La puissance à court terme est définie par :

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^2(m) \cdot w^2(n-m) \quad (2.2)$$

Où N la longueur de la fenêtre.

2.3. Analyse corrélatrice :

2.3.1. Définition de l'auto-corrélation :

L'auto-corrélation d'un signal mesure les dépendances internes de ce signal. Cette auto-corrélation s'applique aussi dans le cas d'un signal à variable entière.

2.3.2. Fonction d'auto-corrélation :

La fonction d'auto-corrélation d'un signal aléatoire $x(t)$ est définie par [29]:

$$k_x(\tau) = E(x(t) \cdot x^*(t - \tau)) \quad (2.3)$$

En pratique le signal est fini : $\{x(i)\}$ pour $0 \leq i \leq N$ et réel : $x^* = x$

Nous sommes donc amenés à estimer la fonction d'autocorrélation à partir des échantillons qui sont à notre disposition.

A. Propriétés mathématiques de la fonction d'autocorrélation [30] :

- elle admet un maximum global à l'origine.
- si elle admet un maximum local en un autre point différent de l'origine elle est périodique et admet une infinité de maximums.

B. Fonction d'autocorrélation temporelle :

Cette fonction est définie par :

$$k_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \cdot \int_T x(t) \cdot x(t - \tau) \cdot dt \quad (2.4)$$

Pour une séquence temporelle discrète :

$$k_x(\tau) = \frac{1}{2^q} \sum_{i=\tau}^{2^q} x(i) \cdot x(i - \tau) \quad (2.5)$$

Pour τ variant de 1 à $N = 2^q$ où q est l'ordre de la fonction d'auto-corrélation.

2.4. Analyse spectrale :

L'analyse spectrale constitue un élément clef du traitement du signal. Elle a pour objet d'améliorer la connaissance d'un signal en s'intéressant à sa variation dans le domaine fréquentiel [31].

Pour la détermination du contenu spectrale, nous avons implémenté un algorithme basé sur la Transformée de Fourier Discrète d'ordre N :

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot e^{-j2\pi\frac{n}{N}k} \quad (2.6)$$

$$\text{Où } 0 \leq n \leq N - 1 \text{ et } 0 \leq k \leq N - 1$$

Trois étapes qui sont l'échantillonnage, la limitation de durée et la périodisation doivent être mis en œuvre pour la matérialisation de la transformée de Fourier discrète à court terme, TFD-CT, d'ordre N :

- **L'échantillonnage :**

L'échantillonnage dans le domaine temporel consiste à multiplier le signal par un peigne de Dirac :

Soit $\hat{f}(t)$ le signal échantillonné :

$$\hat{f}(t) = f(t) \cdot \omega_{t, T_e} \quad (2.7)$$

$$\hat{f}(t) = f(t) \cdot \sum_{k \in \mathbb{Z}} \delta(t - kT_e) \quad (2.8)$$

$$\hat{f}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} f(k \cdot T_e) \cdot \delta(t - kT_e) \quad (2.9)$$

La multiplication temporelle étant une convolution fréquentielle, la transformée de Fourier du signal échantillonné est donnée par la relation (2.10) :

$$\hat{F}(f) = F(f) * \Omega_{f, F_e} \quad (2.10)$$

Où Ω_{f, F_e} est la transformée de Fourier du peigne de Dirac. Celle-ci est elle-même un autre peigne de Dirac dans le domaine fréquentiel.

- **Limitation de la durée du signal :**

La limitation de la durée d'une suite infinie d'échantillons, s'obtient en multipliant celle-ci par une porte rectangulaire $\pi_{T_0}(t)$, de hauteur unité et de durée T_0 , suffisamment grande pour

que son spectre puisse être approximativement assimilé à une impulsion de Dirac. Cette seconde opération nous fournit une suite tronquée contenant N échantillons :

$$\hat{f}_{T_0}(t) = \hat{f}(t) \cdot \pi_{T_0}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k \cdot T_e) \cdot \delta(t - kT_e) \quad (2.11)$$

Sur le plan spectral on approxime la TF de $\pi_{T_0}(t)$ par une Dirac δ_f ce qui donne :

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{\hat{f}_{T_0}(t)\} &= \delta_{f_a} * \mathcal{F}\{\hat{f}(t)\} = \delta_{f_a} * \hat{F}(f) \\ &= \hat{F}_a(f) \end{aligned}$$

$$\hat{F}_a(f) = F_e \sum_{n \in \mathbb{Z}} F_a(f - n \cdot F_e) \quad (2.12)$$

- **Périodisation du signal :**

La périodisation de la suite $\hat{f}_{T_0}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k \cdot T_e) \delta(t - kT_e)$ s'obtient en la convoluant avec un peigne de Dirac de période T_0 , ce qui donne :

$$\hat{f}_{T_{0p}}(t) = [\sum_{k=0}^{N-1} f(k \cdot T_e) \cdot \delta(t - kT_e)] * [\sum_{l=-\infty}^{+\infty} T_0 \cdot \delta(t - lT_0)] \quad (2.13)$$

Ce qui se traduit dans le domaine spectrale par :

$$\hat{F}_{ap}(f) = F_e \sum_{n \in \mathbb{Z}} F_a(f - n \cdot F_e) \cdot \sum_{l=-\infty}^{+\infty} F_0 \cdot \delta(f - lF_0) \quad (2.14)$$

$$F_0 = 1/T_0$$

Le nombre d'échantillons contenu dans la suite temporelle est :

$$N = T_0/T_e \quad (2.15)$$

Le nombre d'échantillon contenu dans la suite spectrale est :

$$N = \frac{1}{T_e} / \frac{1}{T_0} = \frac{1}{T_e} T_0 = T_0/T_e$$

$$N = T_0/T_e \quad (2.16)$$

Le nombre d'échantillons contenu dans chacune des périodes temporelle est égal au nombre d'échantillon contenu dans chacune des périodes spectrales.

- **Relation de définition de TFD discrète :**

La Transformer de Fourier Discrète de la suite d'échantillons infinie est :

$$\begin{aligned}\mathcal{F}\{\hat{f}_{T_0}(t)\} &= \mathcal{F}\{\sum_{k=\mathbb{Z}} f(k.T_e). \delta(t - kT_e)\} \\ &= \sum_{k=\mathbb{Z}} f(k.T_e). e^{-j2\pi f k T_e}\end{aligned}\quad (2.17)$$

La transformée d'une durée T_0 de la même suite est définie par la même relation mais la somme ne s'étend plus qu'à N échantillons :

$$\mathcal{F}\{\hat{f}_{T_0}(t)\} = \sum_{k=0}^{N-1} f(k). e^{-j2\pi f k T_e} \quad (2.18)$$

où le spectre obtenu après périodisation est discret, ses échantillons étant séparés par l'intervalle $f_0 = \frac{1}{T_0}$, la fréquence ne prend que les valeurs $f = f_0.n = \frac{n}{T_0}$ avec $n=0,1,2,\dots (N-1)$ il en résulte :

$$\mathcal{F}\{\hat{f}_{T_0}(t)\} = F\left(\frac{n}{T_0}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k). e^{-j2\pi f k T_e} \quad n=0, 1, 2, \dots (N-1).$$

$$F\left(\frac{n}{T_0}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k). e^{-j2\pi n k / N} \quad (2.19)$$

On pose généralement pour simplifier les calculs $T_e=1$, d'où la forme usuelle de la Transformé de Fourier Discrète :

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k). e^{-j2\pi \frac{n}{N} k} \quad (2.20)$$

$$N=T_0/T_e=T_0.$$

2.5. Analyse acoustique:

L'analyse du signal vocal acoustique est indispensable à l'évaluation des variations de ses caractéristiques révélateurs d'éventuels changements de sa morphologie spectro-temporelle permettant la distinction entre un signal physiologique et un signal pathologique. Nous avons implémentés une interface graphique sous environnement de développement intégré Visual Basic capable de faire le calcul d'indices pertinent ainsi que le tracé de courbes permettant l'exploration de l'appareil phonatoire au niveau des territoires laryngés [32].

Ces indices sont :

2.5.1. Intensité du son :

L'intensité d'un son, appelée aussi volume, permet de distinguer un son fort d'un son faible. Elle correspond à l'amplitude de l'onde. L'amplitude est donnée par l'écart maximal de la grandeur qui caractérise l'onde. Pour le son cette grandeur est la pression, l'amplitude sera donc donnée par l'écart entre la pression la plus forte et la plus faible exercée par l'onde acoustique.

Lorsque l'amplitude de l'onde est grande, l'intensité est grande et donc le son est plus fort. L'intensité du son se mesure en décibels (dB). Donc elle correspond à l'amplitude, ou hauteur, des crêtes de l'onde sinusoïdale. C'est-à-dire aux différences de pression entre les zones de compression et ses zones de raréfaction.

2.5.2. Le timbre :

Chaque son est formé d'une fréquence fondamentale et de fréquences « harmoniques ». On dit qu'un son est riche, agréable à entendre, lorsqu'il contient de nombreuses harmoniques. Un son pauvre en harmoniques paraîtra terne à notre oreille. Un son ne comprenant qu'une seule fréquence est appelé "son pur" (extrêmement rare dans notre environnement quotidien). Les sons produits par l'appareil phonatoire sont des "sons complexes", mélanges de sons graves et aigus. Ainsi un signal acoustique est la superposition d'un son fondamental et d'harmoniques dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale. Ce sont celles-ci qui constituent le timbre du signal vocal acoustique et qui caractérisent chaque individu [33].

La figure 2.1 illustre un signal sonore acoustique vocal avec sa fréquence fondamentale et ses différentes harmoniques.

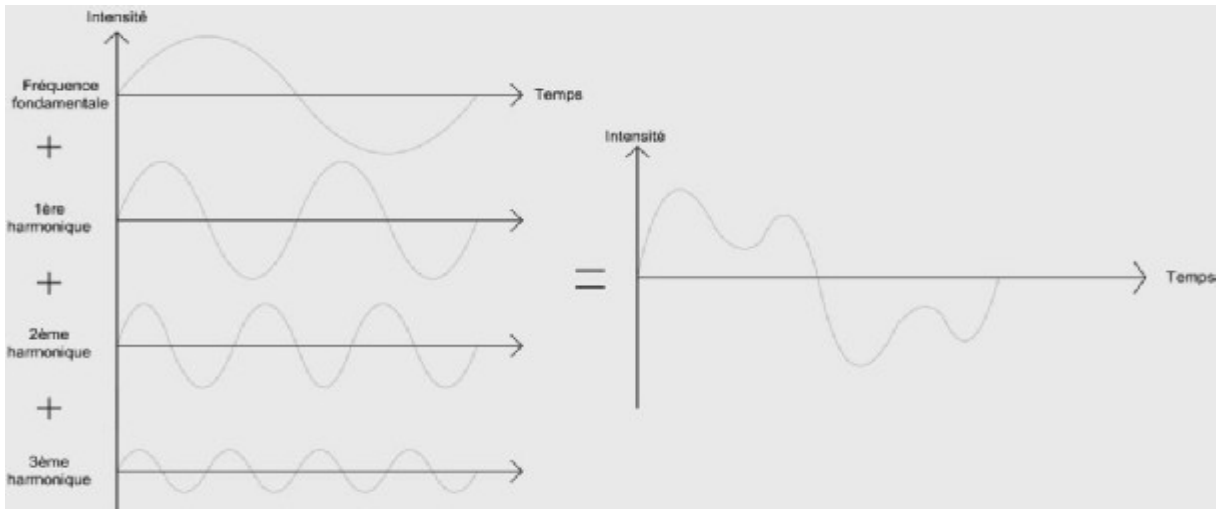


Figure 2.1 : Composition d'un signal vocal acoustique.

2.5.3. La fréquence et la hauteur d'un son :

La fréquence de la composante fondamentale du son est la mesure physique qui détermine la hauteur entendue.

La bande passante du signal vocal acoustique chez le sujet sain s'étend de 0 à 4KHz

Il existe deux types de fréquences dans un son :

Les harmoniques : Les fréquences des harmoniques d'un son produit par l'appareil phonatoire sont des fréquences multiples de la fréquence fondamentale. On a alors: $\mathbf{f_k = k \cdot f_0}$ où k est un entier naturel non nul.

Si les harmoniques ne sont pas des multiples entiers de la fondamentale, on parle alors de partiels, et le son est dit inharmonique.

La fréquence fondamentale moyenne est calculée à partir de la valeur de la période moyenne du cycle vibratoire.

$$F_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_0^{(i)} \quad (2.21)$$

$$F_0^{(i)} = \frac{1}{T_0^{(i)}} \quad (2.22)$$

La période fondamentale moyenne est donnée par la relation (2.23) :

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_0^{(i)}, \quad i=1, 2 \dots N \quad (2.23)$$

La fréquence la plus basse ainsi que la fréquence la plus aiguë enregistrées lors de l'émission du « a » soutenu, sont également mesurées.

2.5.4. les Formants:

On désigne par formant (acoustique) l'un des maxima d'énergie du spectre du signal sonore. Le spectre sonore représente la distribution en fréquences de l'énergie du signal vocal. L'analyse fréquentielle se fait par le biais d'un segment très court (appelé aussi fenêtre d'analyse ou trame), du signal vocal [34].

Comme le spectre sonore, dont ils représentent l'un des aspects, les formants sont mesurés sur des segments du signal vocal très courts, et ils sont donc variables au cours du temps, dépendant du phonème prononcé et de la manière dont il est prononcé. On numérote les formants (qui sont donc les maxima du spectre sonore) en allant des basses fréquences vers les hautes fréquences. On les désigne par la notation physique F_i (mesurée en hertz) en partant du premier formant F_1 dans les fréquences basses. La notation F_0 est réservée à la fréquence fondamentale, dont les variations au cours du temps constituent l'intonation du signal vocal.

Les deux premiers formants F_1 et F_2 sont des caractéristiques particulièrement adaptées à la description des voyelles, car les voyelles sont des sons relativement stationnaires. Chaque voyelle se caractérise ainsi par son timbre spécifique, déterminé en première approximation par F_1 et F_2 . La discipline phonétique a permis d'établir une corrélation entre les valeurs mesurées en hertz de F_1 et F_2 et Les articulations de l'appareil phonatoire nécessaires à la réalisation des voyelles. Ainsi F_1 est corrélé avec l'aperture (ouverture de la bouche) et le F_2 avec la position antérieure (valeur élevée de F_2) et la position postérieure (valeur basse de F_2) de la langue. Le troisième formant F_3 est également une caractéristique intéressante, corrélée avec la configuration des lèvres pour les voyelles antérieures.

On présente dans le tableau (2.1) les valeurs typiques des formants F_1 et F_2 pour les voyelles du français. Si on reporte ces valeurs dans un graphique représentant F_1 et F_2 en

abscisse et en ordonnée respectivement, on obtient le fameux triangle vocalique de la discipline phonétique (Tableau 2.1).

Voyelle (API)	F_1 (Hz)	F_2 (Hz)
[u]	320	800
[o]	500	1000
[ɑ]	700	1150
[a]	1000	1400
[ø]	500	1500
[y]	320	1650
[ɛ]	700	1800
[e]	500	2300
[i]	320	3200

Tableau 2.1: Fréquences typiques des formants

2.6. Les mesures de stabilité fréquentielle :

2.6.1. La perturbation à court terme : le Jitter

Le Jitter est la variation de la période du cycle vibratoire, mesurée d'un cycle à l'autre (autrement dit, cycle-à-cycle).

Chez le sujet sain, cette variation cyclique est physiologique et inévitable en raison de petites irrégularités mécaniques, tissulaires et fonctionnelles (force et pression légèrement différentes d'un cycle à l'autre, par exemple) [32].

Le Jitter est qualifié de « mesure de perturbation à court terme », de la période du cycle. Le terme « perturbation » fait référence à une irrégularité minime du phénomène étudié. « A court terme » fait référence à la comparaison réalisée d'un cycle à l'autre.

Le Jitter est plus grand si la période est plus longue (et donc si la fréquence de la voix est plus basse). Il est donc plus intéressant d'utiliser un Jitter « relatif » en divisant la valeur moyenne de la perturbation par la période moyenne.

Le Jitter est donnée par l'expression (2.24) :

$$Jitter = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |T_0^{(i)} - T_0^{(i+1)}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_0^{(i)}} \quad (2.24)$$

Cette relation nous servira à implémenter par la suite l'algorithme de calcul du Jitter qui est l'un des paramètres que nous utilisons dans le cadre de l'analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique.

Le Jitter varie chez un même sujet, d'une émission vocale à l'autre, au cours d'une même séance d'acquisition et d'enregistrement. Chez le sujet atteint de pathologie cordale, le Jitter augmente en raison d'une instabilité vibratoire cordale plus grande, et est corrélé avec la raucité subjectivement audible. La Microchirurgie cordale peut améliorer les caractéristiques tissulaires cordales et par la même occasion la stabilité vibratoire et par conséquent elle permet de réduire le Jitter enregistré. Cette diminution peut être statistiquement significative ou non.

2.6.2. Les perturbations à moyen terme :

La fluctuation de F0 est susceptible de se manifester non pas de cycle à cycle, mais à plus long terme, soit sur la durée d'un phonème. Nous avons pris en considération l'étendue de fluctuation de la fréquence c'est-à-dire l'écart-type de F0 [32].

A. L'écart-type de F0 (STD) ;

La détermination de l'écart-type de F0 est également liée à la raucité subjectivement audible.

Le STD est donné par la relation VI.5 :

$$STD = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((F_0 - F_0^{(i)})^2)} \quad (2.25)$$

$$F_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_0^{(i)} \quad , \quad F_0^{(i)} = \frac{1}{T_0^{(i)}}$$

B. La mesure de stabilité de l'intensité : le shimmer :

Le shimmer est une mesure de la stabilité de l'intensité à l'instar du Jitter qui est utilisé pour l'évaluation de la stabilité fréquentielle.

Le shimmer est une mesure de perturbation à court terme de l'amplitude du cycle vibratoire : c'est la différence d'amplitude de cycle à cycle [32].

Le Shimmer est donné par l'expression (2.27) :

$$shim = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |A^{(i)} - A^{(i+1)}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A^{(i)}} \quad (2.27)$$

$A^{(i)}$ Amplitudes crête à crête

Comme pour le Jitter, nous avons choisi une mesure relative :

Le shimmer est défini comme la fluctuation moyenne de l'amplitude du cycle rapportée à l'amplitude moyenne du cycle vibratoire.

Chez le sujet sain, le shimmer est plus élevé chez les hommes sur les voyelles « i » et « u », mais pas sur la voyelle « a ».

Chez le sujet atteint d'une lésion bénigne cordale, le shimmer augmente pour la même raison que celle évoquée pour l'augmentation du Jitter. L'instabilité vibratoire est augmentée par la pathologie cordale.

2.7. conclusion :

Ce chapitre a été pour nous l'occasion de présenter les indices pertinents que nous utilisons pour l'analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique en vue de l'évaluation objective des dysphonies chroniques.

Pour chacun de ces indices nous avons implémentés un algorithme de calcul au niveau du chapitre consacré aux résultats.

Chapitre 3 : Implémentation de la
plate forme télé médicale dédiée à
l'évaluation objective des
dysphonies chroniques

3. Implémentation de la plate forme télé médicale dédiée à l'évaluation objective des dysphonies chroniques :

3.1. Introduction

L'évolution technologique dans le secteur des communications est en voie de révolutionner les relations entre les individus et les collectivités. De façon plus spécifique, l'avènement des nouvelles technologies de l'information et des télécommunications (NTIC) permet d'envisager de nouvelles façons d'exercer la médecine. En effet, cela permet d'offrir des services médicaux spécialisés ou ultra-spécialisés dans des environnements (à domicile, en ambulatoire, etc....), qui jusqu'à présent n'ont pu en bénéficier. Il s'agit de la télémédecine ou médecine dite à distance.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par définir la télémédecine puis nous donnerons un aperçu sur son histoire, son évolution, ses apports et ses enjeux, avant de nous intéresser à la chaîne télé médicale. A la fin de ce chapitre nous allons introduire une partie de notre contribution par rapport à la plateforme télé médicale qui concrétise plusieurs applications de la télémédecine.

3.2. Définitions de la télémédecine

Le terme de télémédecine apparaît pour la première fois dans les dictionnaires de la langue française au début des années 1980, témoignant ainsi de la validation par la langue officielle d'une pratique déjà usitée. La préfixe télé provient de la grecque télé qui signifie « loin, au loin ». Ainsi, la télémédecine signifie littéralement médecine à distance. Selon Dermatine [35] « La télémédecine est le transfert électronique des données médicales comprenant le son, les images statiques ou dynamiques et le texte, en temps réel ou en différé permettant de pratiquer la médecine à distance (consultation, diagnostic, conseil et traitement...), d'augmenter les échanges scientifiques et cliniques et de faciliter l'accès à l'expertise »

Selon J. FIELD [36], la télémédecine est l'exercice de la médecine par le biais des télécommunications et des technologies qui permettent la prestation de soins de santé à distance et l'échange de l'information médicale s'y rapportant. Dans le Petit Larousse elle est décrite comme « la partie de la médecine qui utilise la transmission par télécommunication d'informations médicales (images, comptes rendus, enregistrements, etc.), en vue d'obtenir à distance un diagnostic, un avis spécialisé, une surveillance continue d'un malade, une décision thérapeutique » [37]. La télémédecine permet à plusieurs professionnels de santé de communiquer tout en s'affranchissant de la contrainte du temps et de l'espace. L'exercice de la pratique médicale prend ainsi une nouvelle direction par la conception et la diffusion des TIC (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Système d'information de la télésurveillance médicale à domicile.

3.3. Historique de la télémédecine

Un échange épistolaire daté de 1726 décrivant un traitement pour un patient éloigné était déjà un document de télémédecine de l'époque pré-électronique [38]. En 1906 Einthoven publie ses travaux sur le télécardiogramme : premiers électrocardiogrammes

envoyés par téléphone [39]. Une cinquantaine d'années sera nécessaire pour associer le son et l'image: conçue vers 1928, la télévision ne prendra son essor aux Etats-Unis que dans les années 50, et la première utilisation médicale de télévision interactive aura lieu en 1959. De manière intéressante, c'est une consultation de «télépsychiatrie» qui a lieu entre Omaha dans le Nebraska et l'Hôpital psychiatrique de l'état du Nebraska distant de 112 miles [40]. La même année a lieu au Canada la première expérience de téléradiologie avec des images d'examen fluoroscopiques [41]. Les premiers moyens techniques permettant de faire de la « médecine à distance » en effaçant le temps furent le téléphone, le fax, la radiophonie. Ensuite, de nouveaux moyens techniques ont permis la transmission simultanée de l'image, de la voix et de l'écrit grâce aux postes de travail multimédia et aux technologies informatiques et aux télécommunications.

Deux autres dates symboliques peuvent aussi servir de points de repère à l'émergence de la télémédecine [42]:

- en 1965 a eu lieu la première visioconférence en chirurgie cardiaque entre les Etats-Unis et la Suisse.
- le premier congrès international sur la télémédecine, en 1973 (Michigan, USA), a été l'occasion de lancer de multiples projets.

De nombreux projets de télémédecine sont dès lors conçus et mis en œuvre. Globalement, la littérature spécialisée constate un échec de la majorité ou du moins des résultats incertains et pour la plupart non évalués en raison des faibles performances technologiques des calculateurs associées à des coûts élevés. Il faut signaler aussi et surtout une « mal - organisation » des réseaux mis en place [43]. Il n'y a pas eu beaucoup d'études médico - économiques sur cette première génération de projets. Néanmoins, de nombreuses études sur la faisabilité technique ont été conduites [44, 45].

La renaissance de la télémédecine date de la fin des années 1980 en Scandinavie, en particulier en Norvège, avec le déclenchement d'un programme intitulé « access to health care services ». Une technologie plus évoluée et des coûts qui avaient fortement diminué ont permis de plus grands succès dans les différents projets de télémédecine mis en place. Ces projets se concentrent sur un certain nombre d'applications et notamment la « vidéo - consultation en temps réel » en radiologie, dermatologie, cardiologie, psychiatrie et otorhinolaryngologie [46].

Les raisons du succès de cette troisième vague de télémédecine sont, selon Darkins et Cary, au nombre de cinq [47] :

- Un besoin clinique clair.
- Un partenaire de télécommunication dynamique.
- Une technologie appropriée.
- Un montage financier solide.
- Un projet moins coûteux.

La caractéristique géographique de la télémédecine est essentielle. En effet, la distance est la dimension qui a motivé l'utilisation des technologies des télécommunications en vue de maîtriser l'espace et le temps. La distance peut varier de quelques dizaines de mètres à des dizaines de milliers de kilomètres, comme dans le domaine des applications spatiales [48].

Ainsi, Ce n'est plus le patient qui se déplace mais c'est la science médicale qui se regroupe pour aller vers le patient.

Devant le succès de ces projets et la vulgarisation d'Internet, d'autres pays vont eux aussi développer des programmes de télémédecine et notamment les Etats-Unis, l'Australie, le Royaume-Uni, la Nouvelle Zélande, Hongkong, la France et plus récemment en Afrique.

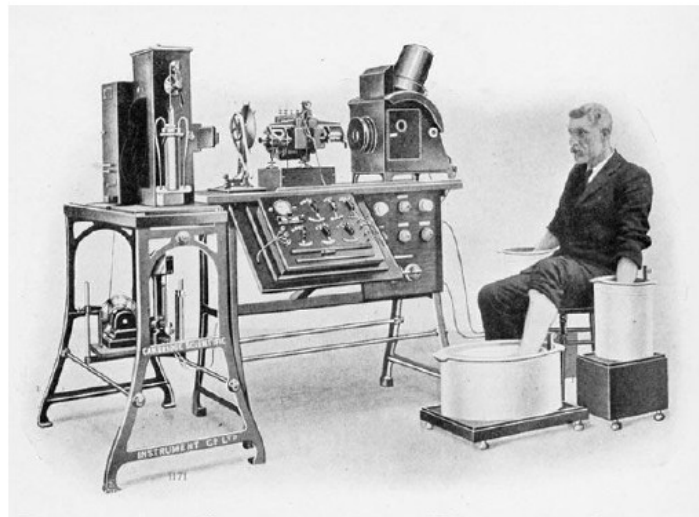


Figure 3.2 : Première Télé-électrocardiographie réalisé par Einthoven

3.4. Les principales applications de la télémédecine

Il existe plusieurs utilisations des (Technologies de l'Information et des Télécommunications) TIC dans le domaine médical [49]. Ces utilisations regroupent celles qui sont directement liées à la production de soins et celles qui concourent à l'amélioration de la qualité et de la continuité des prises en charge. Les principales applications sont : la téléconsultation, la télésurveillance, la télé chirurgie, la téléformation, la téléassistance.

3.4.1. La téléconsultation :



Figure 3.3 : Exemple d'une application de téléconsultation

La téléconsultation est une aide à la décision médicale apportée à un médecin par un autre médecin situé à distance, à partir des éléments d'information de caractère multimédia qui lui sont transmis par un dispositif télématique. Lorsque les téléconsultations concernent spécifiquement une pathologie, on parlera par exemple de télécardiologie, télédermatologie ou de télépsychiatrie. La téléconsultation peut emprunter plusieurs formes, en particulier une consultation médicale à distance synchrone c'est-à-dire que les experts utilisent des techniques de communication de façon simultanée (visioconférence) ou asynchrone à savoir que les échanges entre les professionnels sont organisés sous la forme de messagerie ; ce qui permet de passer outre les contraintes de disponibilité des médecins. Il soulève des problèmes éthiques et médico-légaux au même titre que la consultation par téléphone [50] (Figure 3.3).

3.4.2. La téléchirurgie :



Figure 3.4 : Exemple d'une application de téléchirurgie

La téléchirurgie inclut deux aspects, l'opération réalisée par un robot piloté à distance et le télécompagnonnage (assistance chirurgicale à distance). Les deux types de chirurgie nécessitent la transmission en temps réel des images du patient. [51]. La première de cette technique a été l'opération Lindbergh [52]. Dans l'assistance chirurgicale réalisée à distance, l'expert voit les mêmes images que l'opérateur et assiste celui-ci pas à pas dans la réalisation du geste, apportant ainsi expérience, confort et sécurité pour le malade et l'opérateur. Les contours éthiques et juridiques sont encore des points à explorer (Figure 3.4).

3.4.3. Le téléenseignement

Cette application permet de diffuser un contenu pédagogique par le biais des télécommunications. Ce téléenseignement consiste à :

- se former en utilisant la télémédecine dans le cadre de programmes collectifs de formation médicale initiale ou continue (tests, cas cliniques, cours magistraux, télécompagnonnage chirurgical, etc.).
- s'informer sur un autre type d'utilisation de la télémédecine reposant principalement sur l'usage individuel d'Internet. En effet, il s'agit ici, pour les professionnels de santé, de recourir à des bases de données spécialisées dans lesquelles les informations auraient été préalablement structurées et finalisées. Ce type d'application peut s'inscrire dans des programmes de recherche et/ou d'études cliniques et/ou épidémiologiques (évaluations, tests, recherche, etc....) [53].

3.4.4. Télésurveillance :

Le suivi à distance et l'enregistrement *téléométrique*, généralement au domicile, de paramètres physiologiques tel que taux de diabète, la tension, rythme cardiaque..., ou ciblant l'environnement ou le comportement d'un patient, transmis ensuite aux praticiens concernés.

3.4.5. Téléassistance :

La fonction de *téléassistance* a pour objectif l'aide thérapeutique directement apportée au patient à distance, c'est une conséquence possible de la *téléconsultation*.

3.4.6. Téléformation :

C'est un service bénéfique destiné aux professionnelles de la santé. Il s'agit en particulier de l'exploitation d'un outil informatique pour l'aide à la formation continue des médecins: contacts professionnels via le réseau, consultation des informations médicales (banque de données, imagerie, suivi d'études épidémiologiques et d'essais cliniques), consultation de cours de formation et visioconférences dans les universités (*téléenseignement*) et réunions.

3.5. Station portable de télémédecine



Figure 3.5 : Exemple de station portable de télémédecine

Le modèle générique de la station portable de télémédecine est une valise semblable à celle utilisée par les médecins lors des visites à domicile. Cette valise intègre, dans un volume très réduit et pour un poids limité (moins de 10 kilos), des dispositifs très complets

(enregistreur électrocardiogramme numérique, appareil photo numérique, brassard de tension automatique, oxymètre de pouls, thermomètre à capteur infrarouge, détecteur de glycémie et ordinateur portable, téléphone et système GPS) [54] (Figure 3.5).

3.6. Avantages de la télémédecine

La télémédecine, quel que soit son domaine d'application et son lieu d'exercice, permet, à tous les niveaux de référence, l'accès en temps réel à un niveau de référence plus élevé et de rendre la prise en charge plus efficace [55].

- Les apports essentiels de la télémédecine sont:
- Le désenclavement médical des régions isolées ;
- L'accès aux soins pour tous et l'équité de l'accès aux soins pour tous ;
- La mise en commun du savoir de tous les intervenants : la télémédecine permet des échanges entre professionnels de santé dans un esprit de partenariat, la pluridisciplinarité et la complémentarité des compétences ;
- La mise en place d'un dossier commun évitant les examens complémentaires redondants ;
- Le dossier médical informatisé sera un outil de surveillance et une source d'économie de la santé ; La maturité des TIC, le développement d'Internet, les décisions gouvernementales en matière d'informatisation du système de la santé sont autant de facteurs favorisant la télémédecine dont le développement ne peut que s'accroître dans les années à venir. La télémédecine autorisera cet appel du Directeur général de l'OMS, LEE Jongwook « Nous devons collaborer pour que chacun, dans tous les villages, partout dans le monde, puisse compter sur un agent de santé motivé, qualifié et bien soutenu » [56] « La télémédecine est un outil indispensable de l'aménagement du territoire car sa mise en place est la condition de survie des hôpitaux ruraux et le gage de la qualité de la médecine libérale. Les hôpitaux ruraux ne peuvent pas assurer la présence permanente de médecins et de spécialistes de la même façon qu'un hôpital général plus important. Cela n'est pas possible pour des raisons de démographie mais également parce que l'activité d'un hôpital de proximité ne justifie pas la présence à plein temps d'un spécialiste qui ne procéderait même pas à une consultation quotidienne ». [57]

3.7. Evolution de la télémédecine à travers le monde

Les analystes de la société d'étude américaine Gartner ont proposé leurs visions en 2006, et à moyen terme, concernant l'évolution des secteurs utilisant le plus les Technologies de l'Information et de la Communication. Parmi les grandes tendances figure la progression des investissements TIC dans la santé et plus particulièrement dans la télémédecine. La société Gartner prévoit, à l'horizon 2009, une augmentation de 50 % des investissements informatiques dans le secteur de la santé. Quant aux conséquences de cet investissement, ses analystes avancent une baisse du niveau de mortalité de 50 % à 2013 [58].

3.8. Les réseaux de télémédecine

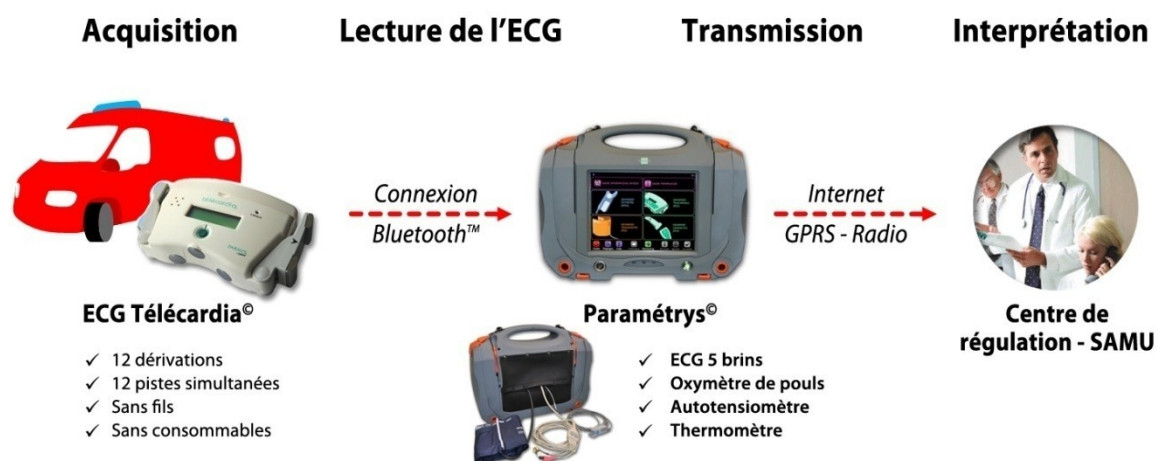


Figure 3.6 : Exemple de réseaux de télémédecine

Ces réseaux s'inscrivent fondamentalement dans un même objectif, celui d'améliorer la coordination des pratiques médicales pour améliorer la prise en charge globale du patient. Ainsi, le développement des réseaux de télémédecine est-il à inscrire plus largement dans le développement des réseaux de santé qui constituent un mode de coordination alternatif au système traditionnel. Toute expérimentation des réseaux de télémédecine devrait, de ce fait, bénéficier, d'une part, des effets d'expérience de la diffusion des réseaux en santé, et, d'autre part, des apports théoriques du concept de réseau[59]. Ces réseaux de télémédecine concernent la communication, le partage et la gestion de l'information médicale entre acteurs

de soins distants mais participant aux mêmes prises en charge. Ils se nomment télé encadrement ou télé coopération et se caractérise par l'établissement d'une relation entre un spécialiste (jouant le rôle de mentor) et un médecin de soins primaires, un résident, une infirmière. Dans le cadre des réseaux, les exercices multi - disciplinaires sont en effet appelés à se développer de plus en plus [60]. Les TIC peuvent constituer un support idéal à la mise en relation des différents métiers autour du patient et à leur meilleure coordination. En l'occurrence, le dossier médical partagé appartient à ce type d'application. Un grand nombre d'expérimentation ayant cours aujourd'hui ont pour objet central le partage et la gestion d'informations médicales, qu'il s'agisse du dossier patient entier ou de certains éléments de ce dernier (projets de certaines sociétés informatiques notamment) [62] (Figure 3.6).

Les réseaux de télémédecine représentent une opportunité permettant [63]:

- D'améliorer l'organisation des soins.
- De faciliter l'accès à des soins de proximité.
- De participer à la formation des professionnels de santé.
- De contribuer à la maîtrise des dépenses de santé.
- De s'intégrer à la mondialisation des pratiques médicales.

Au terme de ce parcours de définitions et de concepts, la télémédecine parait s'inscrire dans une perspective de recherche de l'amélioration de la qualité de l'organisation par la réduction des délais mais aussi par la réduction des coûts [64].

3.9. Etude de la Chaîne Télémédicale

Le système de la transmission numérique des données en médecine comprend toute une chaîne schématisée dans la Figure 3.7 :

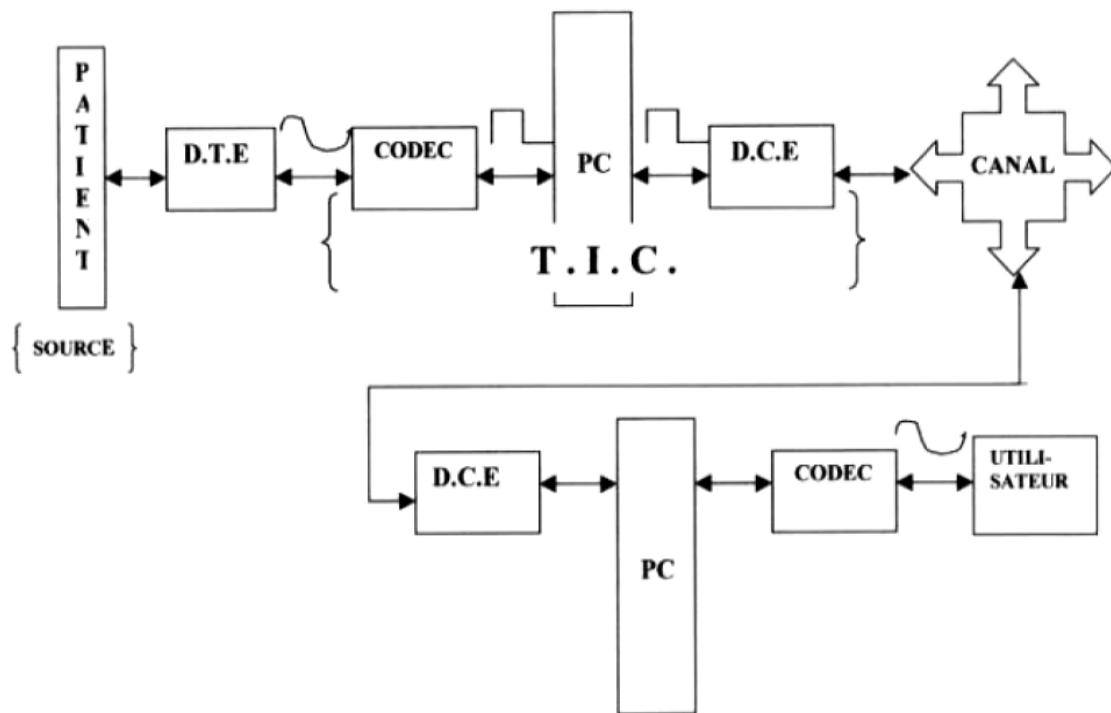


Figure 3.7 : La chaine télé-médicale

Cette chaine Télé-médicale comprend :

3.9.1. Patient :

Le patient est la source d'information médicale.

3.9.2. D.T.E (Data Terminal Equipment):

Chargés de prélever sur le corps humain l'information médicale. Selon la nature de cette information, les D.T.E peuvent êtres:

- Unidimensionnelles : mettant en jeux des capteurs qui transforment les grandeurs physiologique en une grandeur électrique respecte d'une activité physiologique (ECG, activité hémodynamique cardiaque, etc..).
- Bidimensionnelles : mettant en jeux les différentes rayonnements du spectre électromagnétique (radiofréquence, ultrasonore, infrarouge, rayon X...) et

l'interaction avec le liquide et les tissus biologique pour la reconstruction des images médicales.

Tridimensionnelle : mettant en jeu une camera à l'intérieur ou à l'extérieur du corps humains. On cite comme exemple de la fibroscopie où on introduit un tube souple équipé d'une fibre optique et d'une caméra à l'intérieur du corps par voie orale. En revanche, pour la fluoroscopie utilisée dans le cathétérisme cardiaque, cet appareil est équipé d'une caméra externe aidant le spécialiste à introduire, au fur et à mesure le cathéter dans le corps du patient, en surveillance l'image vidéo captée par la caméra qui est positionnée sur le moniteur.

3.9.3. Codeur/Décodeur :

Il est chargé de l'acheminement de l'information médicale vers le PC local.

3.9.4. PC local :

Il est chargé de présenter l'information médicale au praticien de la médecine et de stocker ces informations dans un système d'archivage et d'envisager une plateforme de traitement numérique et le transfert de l'information via protocole de communication.

3.9.5. D.C.E (Data Communication Equipment) :

Sont chargés d'adapter le signal informationnel au canal de transmission et de transférer les données médicales vers les terminaux distants (PC), via le canal de transmission, au moyen des techniques de hauts débits (à titre d'exemple réseau RTC dopé ADSL).

L'objectif de telles plateformes de services de télémédecine est de permettre aux patients de vivre dans des conditions plus performantes, dans un environnement de confort et de sécurité. Ainsi, cette plateforme envisagée permet à tout moment et en tout lieu à un patient d'être en contact permanent avec son praticien traitant. En effet, ils pourraient

bénéficiaire de la sécurité d'un suivi médical 24h/24h, sans l'inconvénient de la prise en charge hospitalière et sans dépenses excessives.

Il s'agit de détecter et de prévenir l'occurrence de situations critiques ou la dégradation de l'état de santé d'une personne. Le patient n'est alors plus contraint de renoncer à distance (domicile...) et à la vie en société. Il conserve une large autonomie dans son environnement social et privatif, tout en bénéficiant de services préventifs de santé.

3.10. Contributions personnelles :

Les applications de télémédecine visent à mettre en place des systèmes de surveillance permanente pour des personnes à distance. Ces systèmes permettent la capture d'informations sur l'évolution de son état de santé, afin que le praticien traitant puisse effectuer une consultation ou un diagnostic, voire aider les patients à distance et par conséquent assurer une prise en charge à temps. Nos travaux dans le cadre de cette thèse portent sur le développement d'une plateforme Télé médicale permettant la concrétisation de 3 applications télé médicale:

- **Télesurveillance**, pour l'acquisition, l'enregistrement et le suivi à distance d'un ensemble de paramètres médicaux liés au patient pour le diagnostic.
- **Téléconsultation**, pour l'analyse et la synthèse des données (enregistrement du signal vocal) recueillies.
- **Téléassistance**, pour fournir quand c'est possible à distance une aide directe aux patients malades.

Une partie de ces trois applications est assurée par notre interface graphique qui implémente nos algorithmes de traitement du signal vocal. Cette partie sera discutée dans le chapitre quatre, tandis que, l'autre partie est assurée par notre site web avec sa base de données.

La figure 3.8 montre la page d'accueil de notre serveur web **WampServer** qui est une plateforme de développement Web, permettant de faire fonctionner localement (sans se connecter à un serveur externe) des scripts PHP. WampServer est un environnement comprenant deux serveurs (Apache et MySQL), un interpréteur de script (PHP), ainsi que

phpMyAdmin pour l'administration Web des bases MySQL. Il dispose d'une interface d'administration permettant de gérer et d'administrer ses serveurs aux travers d'un tray icon (icône près de l'horloge de Windows).

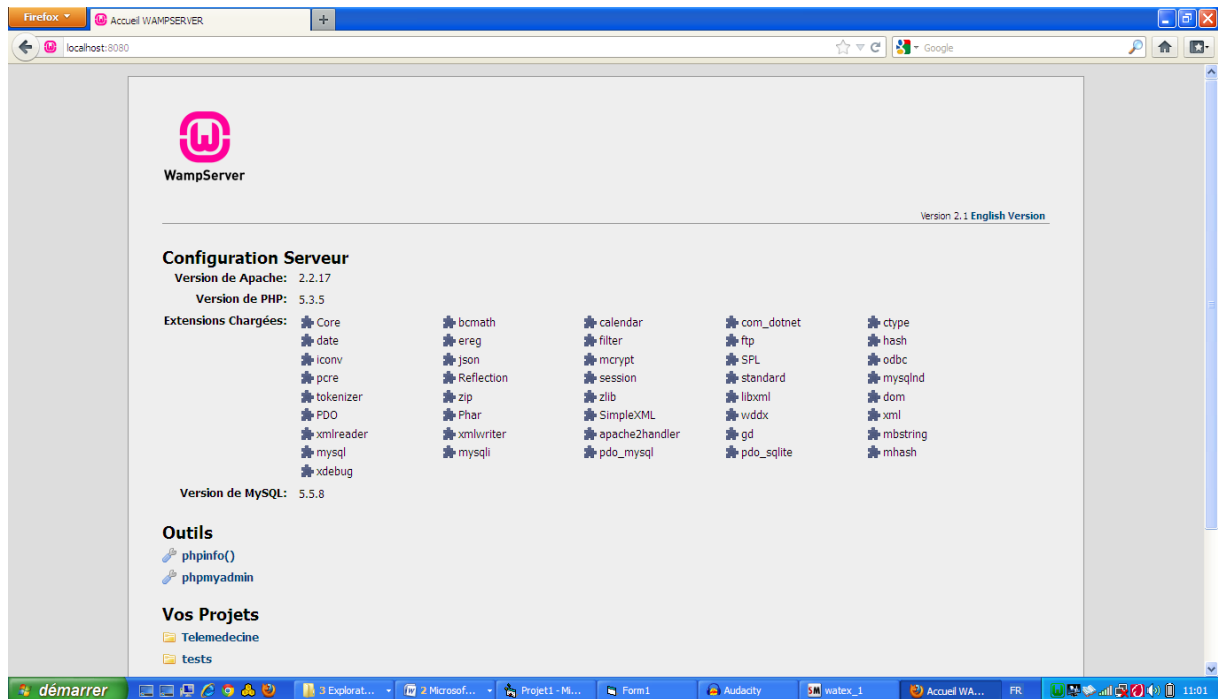


Figure 3.8 : Capture d'écran de la page d'accueil de WampServer.

Dans les deux figures 3.9 et 3.10 nous présentons les pages d'accueil de notre site web qui donne accès à la base des données. Cette base contient les dossiers médicaux des patients. Le site web ainsi que la base de données sont hébergés dans un serveur sur le réseau mondial internet. Outre que l'accès à la base de données, l'enregistrement de nouveaux patients ou de nouveaux médecins traitants, le site web donne aussi accès à d'autres fonctionnalités tels que le suivi distant des patients :

Les patients traités par radiothérapie (malades cancéreux) ou par des traitements médicaux (malades présentant un syndrome inflammatoire chronique) et résidant dans des régions isolées surtout la région sud peuvent être suivis à distance grâce à l'implantation de la plateforme au niveau des centres sanitaires de proximité. Et cela grâce à l'enregistrement périodique du signal vocal acoustique selon le protocole décrit précédemment et son transfert au service O.R.L. du CHU et cela conformément à l'architecture client-serveur soutenue par le composant Winsock compatible avec le protocole TCP/IP qui permet la transmission des

données à travers les réseaux intranet ou Internet évitant ainsi aux malades des déplacements inutiles dans la mesure où celui-ci répond favorablement aux traitements institués.

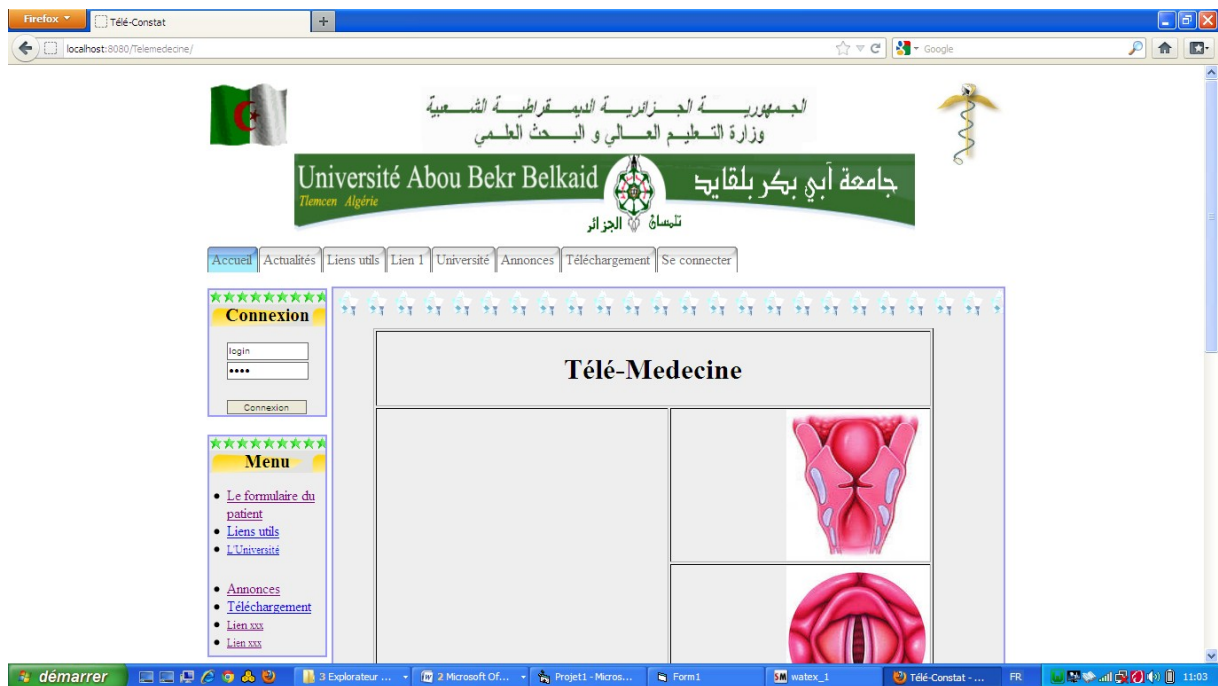


Figure 3.9 : Capture d'écran n°1 de la page d'accueil de notre site internet.



Figure 3.10 : Capture d'écran n°2 de la page d'accueil de notre site internet.

3.11. Conclusion :

Les travaux de recherche effectués au cours de cette thèse se situent dans le cadre des services de santé représentant les dimensions de la télémédecine. Ces applications prennent en compte, en particulier, des éléments de surveillance, la prise en charge, de diagnostic et de détection des situations critiques (ex. cancer de larynx). Ainsi, nous pouvons être en mesure de surveiller à distance l'évolution de l'état de santé des patients sans le besoin de se déplacer dans le cas où ces patients résidant dans des régions lointaines.

Dans le chapitre qui suit, nous allons introduire la deuxième partie de notre plateforme télé médicale constituée de l'interface graphique avec les algorithmes de traitement du signal vocal acoustique.

Chapitre 4 : Présentation des résultats : interprétation et discussion

4. Présentation des résultats : interprétation et discussion

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'évaluation clinique de nos résultats et aux calculs des différents paramètres tels que la TFD CT, la fréquence fondamentale, le Jitter, le STD et la fonction d'auto-corrélation pour des sujets sains et des sujets malades avec discussion et interprétation des résultats. Cette évaluation est effectuée avec notre interface graphique qui implémente plusieurs algorithmes dédiés au traitement du signal vocal. Cette interface, concrétisant plusieurs applications de télémédecine, représente la principale partie de notre contribution dans cette thèse de doctorat. Ensemble avec le site web, elle constitue une plateforme télémédicale complète dédiée à l'évaluation objective et au suivi des dysphonies chroniques d'origine laryngée.

4.2. Présentation de l'interface graphique :

La figure 4.1 représente l'interface graphique, implémentée sous environnement Visual Basic, composée d'une barre de menus (option, Analyse temporelle, TFD) et d'une commande faisant appelle à la base de données.

Le menu option offre la possibilité de l'acquisition du signal sous format WAVE et la conversion WAVE-DECIMALE.

Le menu analyse temporelle offre la possibilité du tracé de la fonction d'auto-corrélation et du tracé du signal temporelle.

Le menu TFD offre la possibilité de tracé la TFD CT et le calcule de la fréquence fondamentale moyenne, le Jitter et le STD.

nous utilisons l'outil Watex. La figure 4.3 montre une capture d'écran du logiciel Watex qui fait la conversion du signal vocal du format WAVE au format DECIMAL. Il est important de noter que les deux outils Audacity et Watex sont des logiciels gratuits et libre d'utilisation.

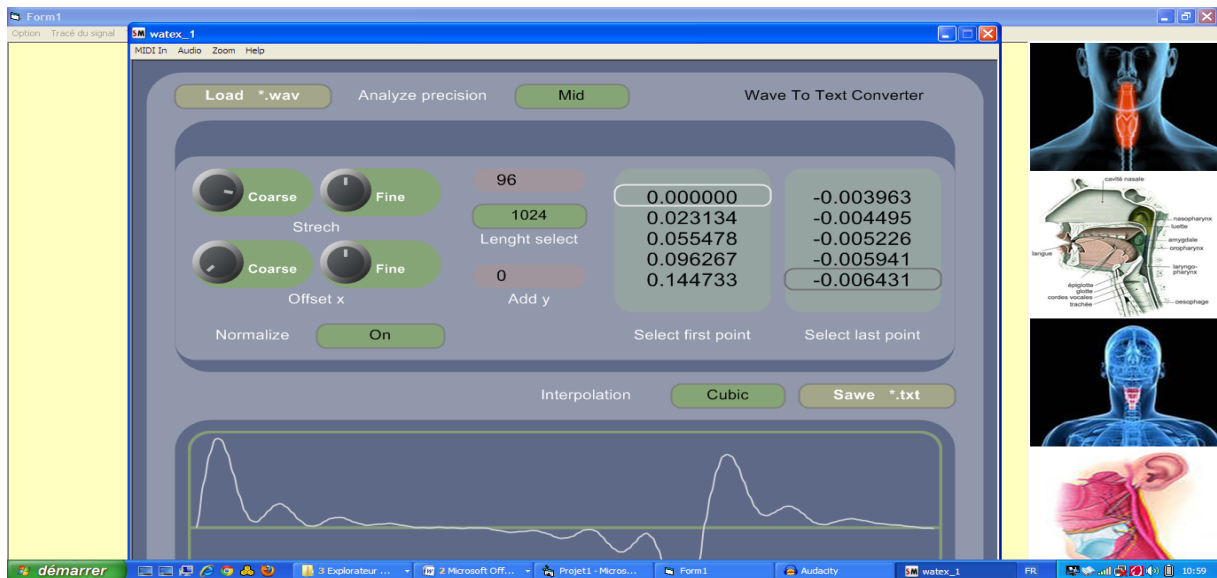


Figure 4.3 : Capture d'écran du logiciel de conversion.

La figure 4.4 illustre l'appel de notre site internet à partir de l'adresse local localhost.

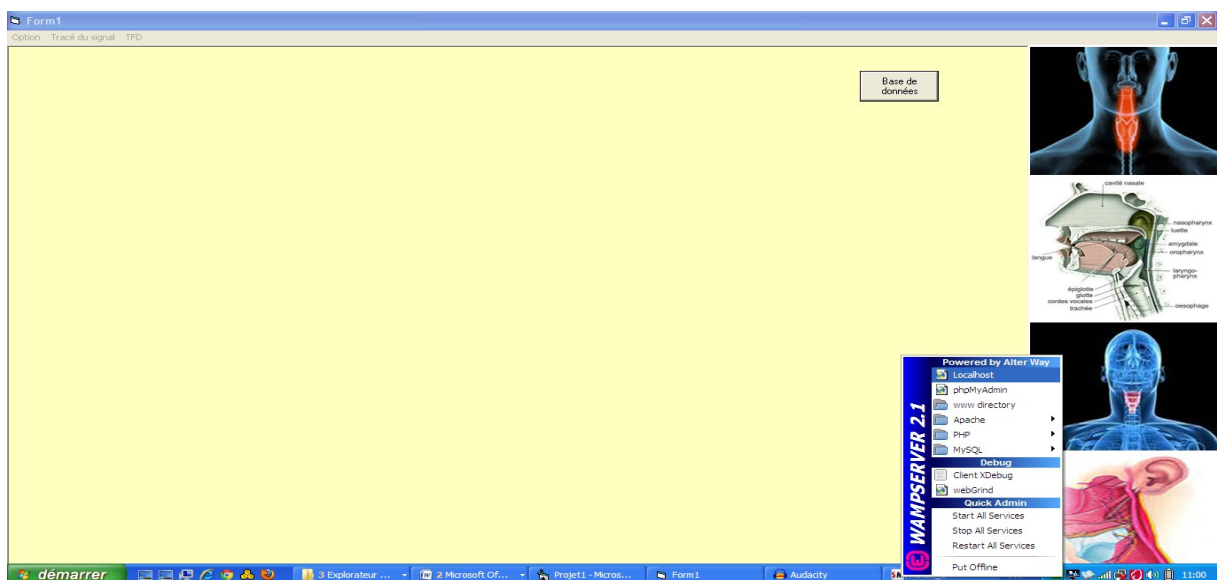


Figure 4.4 : Capture d'écran de l'appel de la base de données.

4.3. Validation clinique des résultats :

Nous avons effectué 30 enregistrements (10 sujets sains et vingt sujets malades) in vivo et in situ au niveau du service ORL CHU Tlemcen. Ces enregistrements nous a permis d'entamer l'élaboration d'une base de données relative à la classification des pathologies laryngées selon le type inflammatoire ou tumoral en vue d'un dépistage précoce du cancer du larynx et sa prévention par l'étude épidémiologique des facteurs favorisants. Dans les deux tableaux qui suivent nous récapitulons les résultats obtenus.

Sujets sains	<i>fréquences fondamentales F_0 (Hz)</i>	<i>1^{er} sélection (Hz)</i>	<i>2^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>3^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>4^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>5^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>6^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>Moyenne des fréquences fondamentales (Hz)</i>	<i>Jitter</i>	<i>STD (Hz)</i>
	<i>1^{er} sujet</i>	227.05	184.81	184.81	227.05	195.12	184.8	200.6	0.69	13.94
	<i>2^{eme} sujet</i>	200.65	211.2	184.8	184.8	211.4	195.37	198.03	0.67	13.58
	<i>3^{eme} sujet</i>	190.09	184.8	184.8	216.49	184.81	211.21	196.68	0.68	13.29
	<i>4^{eme} sujet</i>	184.81	211.21	179.53	184.81	211.21	184.8	192.72	0.67	13.2
	<i>5^{eme} sujet</i>	200.65	211.2	184.8	184.8	184.81	195.37	193.59	0.7	12.44
	<i>6^{eme} sujet</i>	190.09	184.8	184.8	216.49	184.81	211.21	195.36	0.68	13.28
	<i>7^{eme} sujet</i>	216.49	184.81	200.65	221.77	200.65	184.81	201.53	0.77	14.01
	<i>8^{eme} sujet</i>	205.93	179.53	221.77	205.93	184.81	205.93	200.65	0.68	13.95
	<i>9^{eme} sujet</i>	184.81	205.93	227.05	211.21	195.37	195.37	203.29	0.61	14.1
	<i>10^{eme}</i>	211.21	190.09	195.37	216.49	179.53	195.37	198.01	0.79	13.58

Tableau 4.1 : Le Jitter, le STD et La fréquence fondamentale moyenne des sujets sains du corpus

		Sujets malades								
		<i>fréquences fondamentales F₀ (Hz)</i>	<i>1^{er} sélection (Hz)</i>	<i>2^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>3^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>4^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>5^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>6^{eme} sélection (Hz)</i>	<i>Moyenne des fréquences fondamentales (Hz)</i>	<i>Jitter</i>
Cancer du larynx	<i>1^{er} sujet</i>	73.92	73.92	52.8	73.92	63.36	73.92	68.64	2.64	4.97
	<i>2^{eme} sujet</i>	58.08	47.52	47.5	42.24	42.24	47.52	47.51	2.22	4.11
	<i>3^{eme} sujet</i>	68.64	47.52	47.52	68.64	68.64	73.92	62.48	2.62	4.72
	<i>4^{eme} sujet</i>	47.52	52.8	52.8	47.58	58.08	58.08	52.81	2.4	4.29
	<i>5^{eme} sujet</i>	47.52	63.36	47.52	58.08	63.36	68.64	58.08	2.69	4.41
	<i>6^{eme} sujet</i>	47.52	52.8	58.08	84.48	68.64	73.92	64.24	2.63	4.84
	<i>7^{eme} sujet</i>	58.08	79.2	68.64	47.52	58.08	52.8	60.72	2.61	4.65
	<i>8^{eme} sujet</i>	31.12	84.48	79.20	41.12	15.84	10.56	43.72	2.21	3.91
	<i>9^{eme} sujet</i>	42.2	101.17	84.5	79.2	68.64	95.88	78.59	2.97	5.23
	<i>10^{eme} sujet</i>	63.6	47.52	63.36	84.5	73.92	42.25	56.52	2.67	4.32
	<i>11^{eme} sujet</i>	73.92	67.52	76.49	68.64	84.81	61.68	73.84	2.69	5.28
Pathologie inflammatoire	<i>12^{eme} sujet</i>	50.52	67.36	50.52	58.08	68.64	47.52	57.10	2.65	4.78
	<i>13^{eme} sujet</i>	143.69	121.44	121.41	138.41	105.6	100.32	122.47	1.53	8.88
	<i>14^{eme} sujet</i>	105.6	137.29	126.73	110.88	121.44	105.6	117.92	1.55	8.1
	<i>15^{eme} sujet</i>	105.6	147.85	126.73	142.57	105.6	110.88	123.20	1.5	8.01
	<i>16^{eme} sujet</i>	121.44	105.6	110.88	100.32	137.29	137.29	118.8	1.59	8.21
	<i>17^{eme} sujet</i>	100.6	125.23	110.38	103.4	118.64	137.29	115.42	1.51	7.97
	<i>18^{eme} sujet</i>	168.71	180.79	151.5	165.7	150.6	174.35	165.67	1.01	10.85
	<i>19^{eme} sujet</i>	162.25	172.69	165.53	147.85	140.67	161.59	162.4	1.018	10.61
	<i>20^{eme} sujet</i>	174.25	163.69	142.57	174.81	163.69	142.57	160.17	1.03	10.31

Tableau 4.2 : Le Jitter, le STD et la fréquence fondamentale moyenne des sujets malades du corpus

4.4. Récapitulation des résultats :

4.4.1. Pour des Sujets sains :

L'étude de la fréquence fondamentale du son émis par les sujets a travers le tracé du signal vocal relève une fréquence fondamentale autour de 200 HZ.

Le Jitter qui représente l'indice temporel caractéristique du son est localisé aux alentours de 0.7, chez les sujets sains. Le STD se situe aux alentours de 13 Hz.

4.4.2. Pour des sujets malades :

L'étude de la fréquence fondamentale du son émis par les sujets malades a travers le tracé du spectre du signal vocal relève:

- patient présentant un cancer du larynx : la fréquence fondamentale varie entre 40 Hz et 70Hz, le Jitter varie entre 2 et 3 et le STD entre 4 et 5 Hz.
- patient présentant des lésions bénignes du larynx type polypes des cordes vocales la fréquence fondamentale est autour de 120Hz, le Jitter autour de 1.5 et le STD autour 8 Hz. Pour les laryngites chroniques la fréquence fondamentale varie autour de 160Hz, le Jitter varie autour de 1 et le STD varie autour de 10.5 Hz.

Pour une meilleure interprétation des résultats nous allons prendre, dans ce qui suit, un exemple d'un sujet sain, un sujet malade atteint d'un cancer du larynx, un sujet malade atteint d'un polype inflammatoire et un sujet malade atteint d'une laryngite chronique. Nous allons présenter leurs tracés temporels, la fonction d'autocorrélation et la TFD CT de leur signal vocal.

4.5. Analyse clinique de quelques exemples de sujets sains et malades

4.5.1. sujet sain :

➤ Tracé temporel du signal vocal :

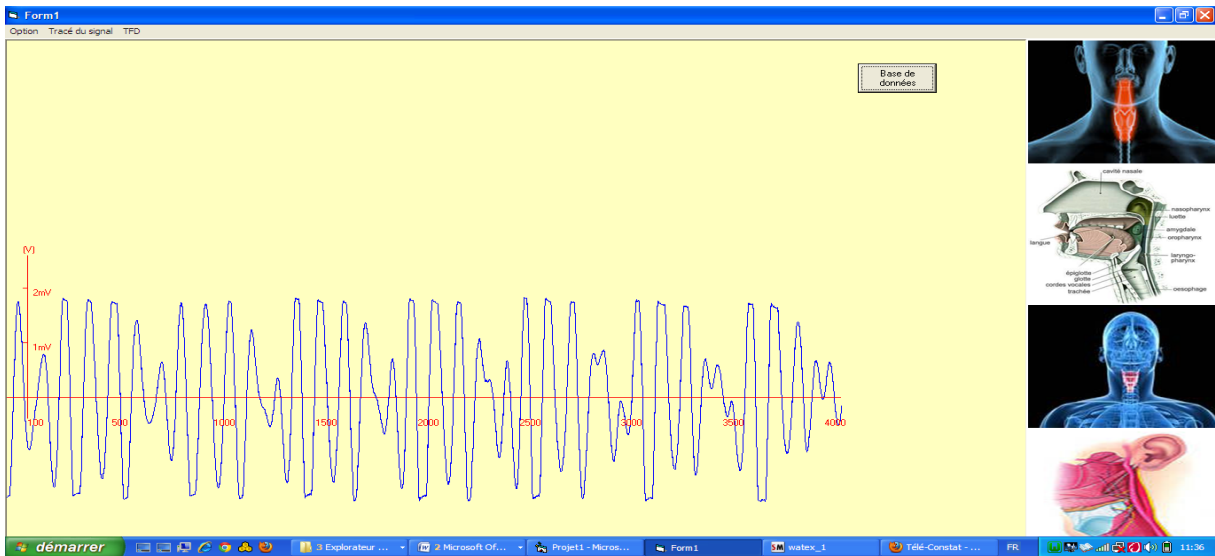


Figure 4.5 : Capture d'écran du tracé temporel du signal vocal d'un sujet sain.

➤ Tracé de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal :

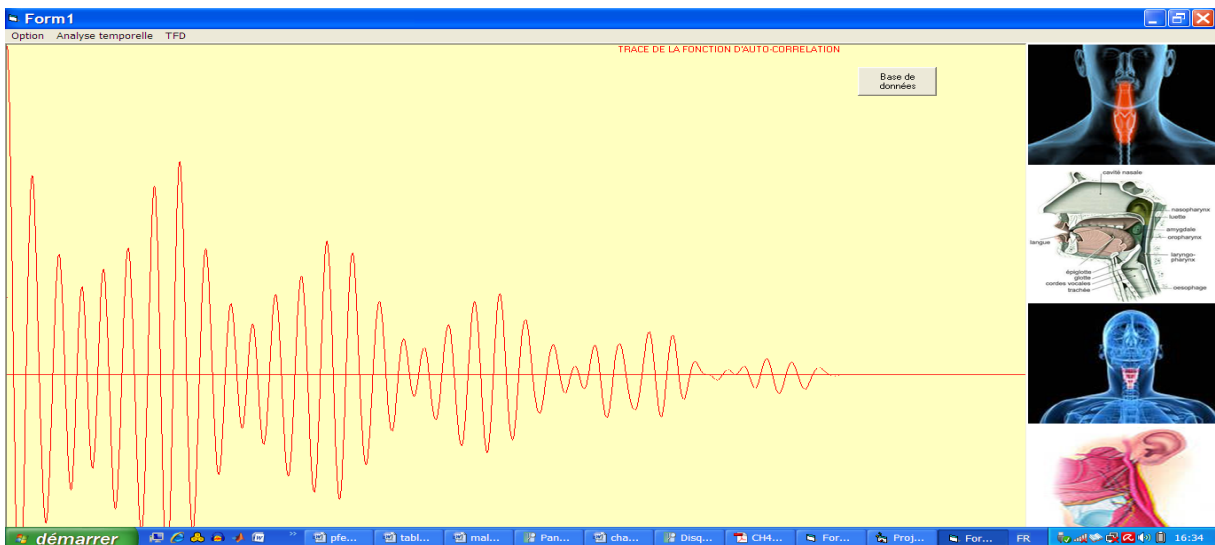


Figure 4.6 : Capture d'écran de la fonction d'autocorrélation du signal vocal d'un sujet sain.

➤ **Tracé de la TFD CT :**

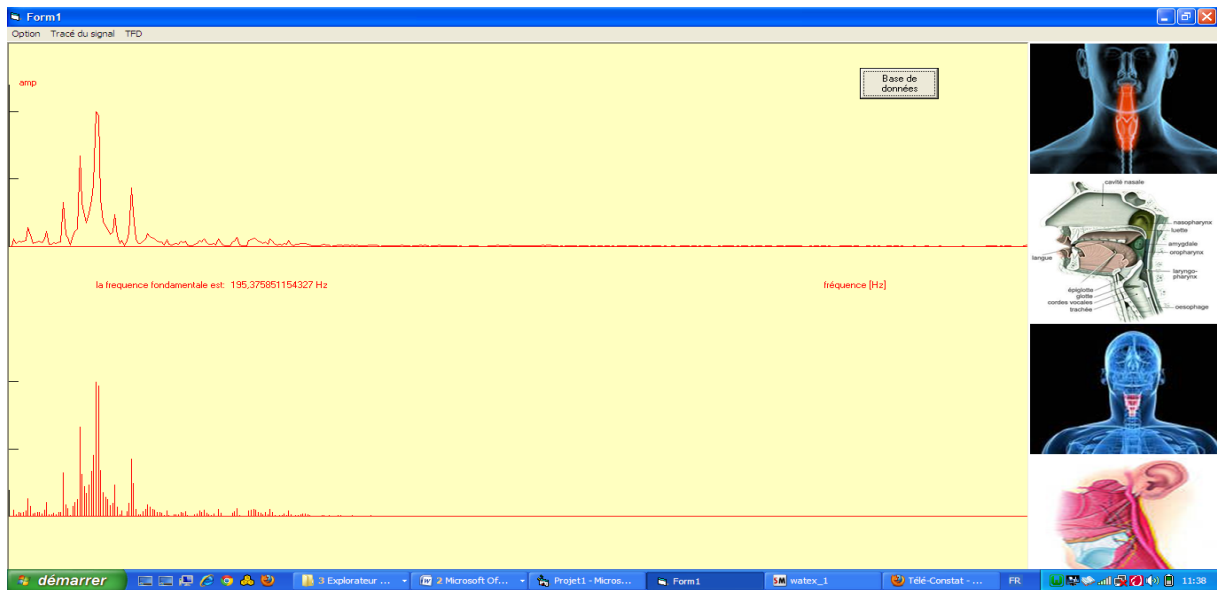


Figure 4.7 : Capture d'écran de la TFD CT du signal vocal d'un sujet sain.

❖ **Analyse des résultats :**

L'examen ORL du patient montre que la filière laryngée est strictement normale avec une bonne mobilité des cordes vocales.

La fréquence fondamentale du son émis calculée à travers le tracé du spectre du signal vocal est de 193.605 Hz. Le Jitter se situe aux alentours de : 0.7 et le STD vaut : 12.4 Hz.

Le tracé temporel est quasi-périodique avec un spectre s'étalant vers les fréquences aiguës. L'enveloppe de sa fonction d'auto-corrélation a la forme d'un sinus cardinal, elle est maximale à l'origine et contient plusieurs maximums locaux avec une morphologie périodique résultant de la périodicité du signal vocal acoustique.

4.5.2. Sujets malades (masculin) atteint d'un cancer du larynx :

➤ Tracé temporel du signal vocal :

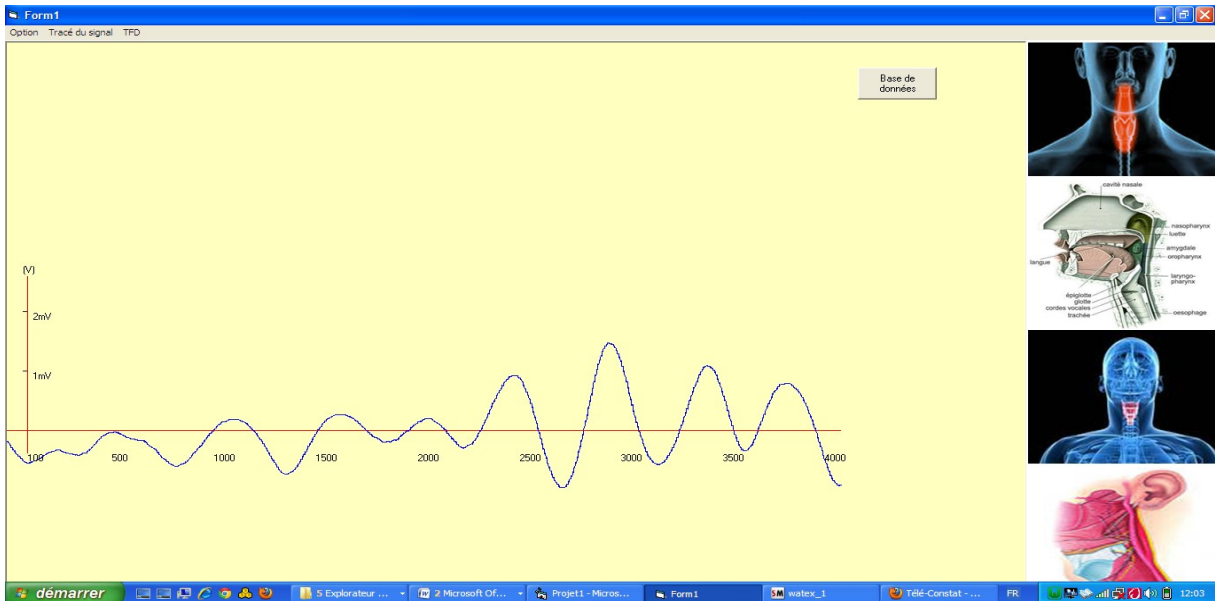


Figure 4.8 : Capture d'écran du tracé temporel du signal vocal d'un sujet atteint d'un cancer du larynx.

➤ Tracé de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal :

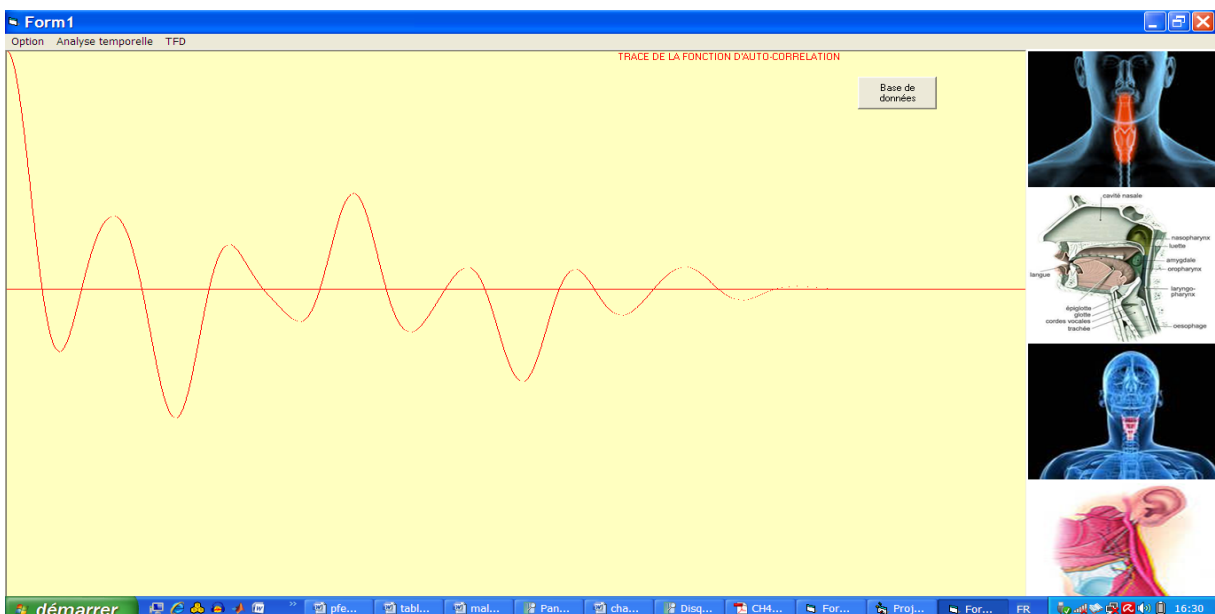


Figure 4.9 : Capture d'écran de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal d'un sujet atteint d'un cancer du larynx.

➤ **Tracé de la TFD CT :**

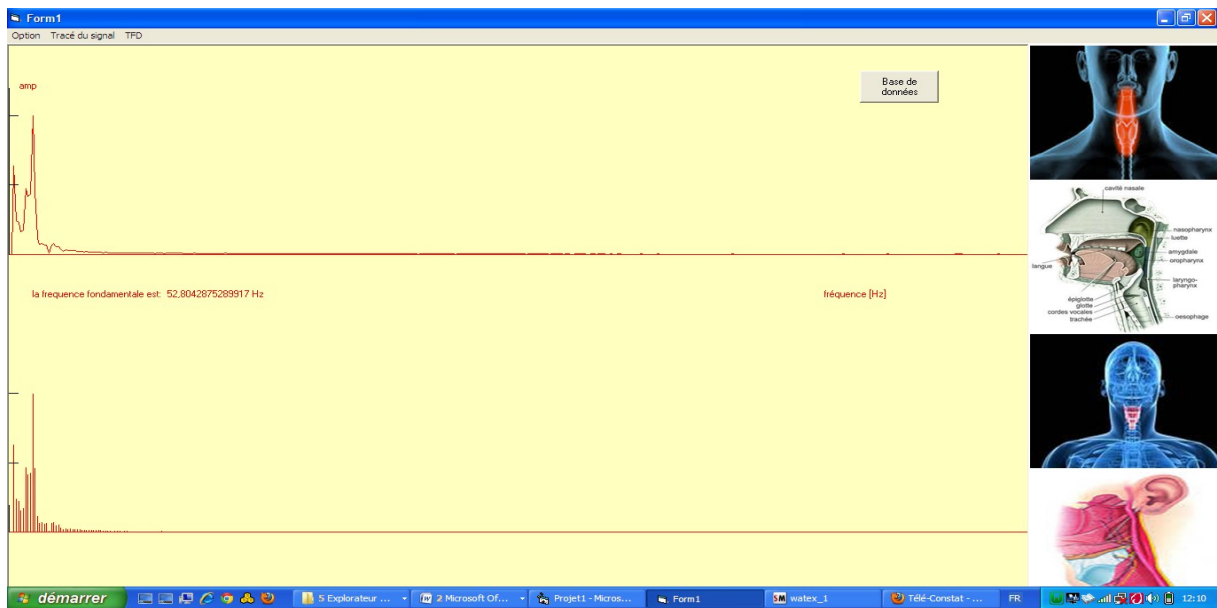


Figure 4.10 : Capture d'écran de la TFD CT du signal vocal d'un sujet atteint d'un cancer du larynx.

❖ **Analyse des résultats :**

Patient âgé de 65 ans pêcheur de profession, tabagique chronique (25 paquets par mois) venant consulter pour une dysphonie chronique avec dyspnée et dont le bilan ORL révèle un cancer du larynx à un stade avancé nécessitant un traitement chirurgical radical.

Son tracé temporel est irrégulier (aléatoire) et le spectre est limité dans les basses fréquences à cause de la réduction importante voir l'absence totale des vibrations des cordes vocales, avec une fréquence fondamentale de 52.81 Hz. Le Jitter se situe aux alentours de : 2.4 et le STD est : 4.29 Hz. La fonction d'auto-corrélation est maximale à l'origine mais ne présente plus de maximum locaux et perte toute ses caractéristiques de périodicité ainsi que son enveloppe en sinus cardinal.

4.5.3. Sujet malade (masculin) atteint d'un polype inflammatoire :

➤ **Tracé temporel du signal vocal :**

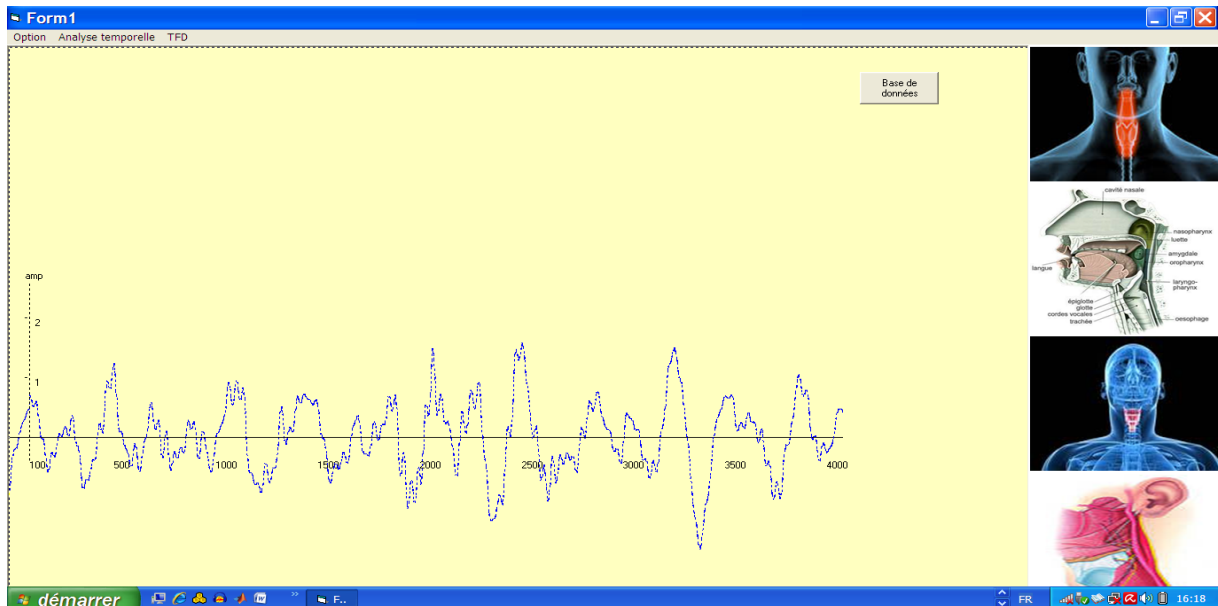


Figure 4.11 : Capture d'écran du tracé temporel du signal vocal atteint d'un polype inflammatoire.

➤ **Tracé de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal :**

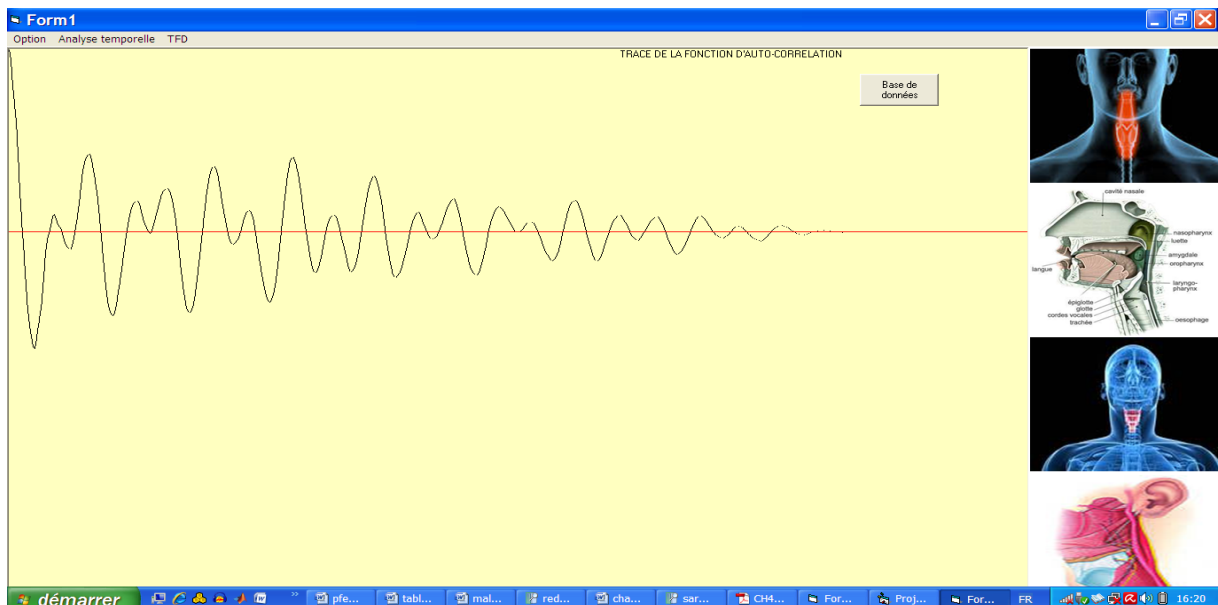


Figure 4.12 : Capture d'écran de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal atteint d'un polype inflammatoire.

➤ **Tracé de la TFD CT :**



Figure 4.13 : Capture d'écran de la TFD CT du signal vocal atteint d'un polype inflammatoire.

❖ **Analyse des résultats :**

Patient âgé de 45 ans tabagique chronique (30 paquets par mois) et alcoolique venant consulter pour une dysphonie chronique (trouble de la voix) évoluant depuis plus de 6 mois et dont le bilan ORL révèle un polype de la corde vocale avec un aspect inflammatoire bénin.

Son tracé temporel contient une certaine irrégularité mais présente aussi une similarité par rapport au tracé temporel des patients sains et son spectre contient des fréquences aiguës mais avec des valeurs moindres que les sujets sains. Sa fréquence fondamentale est de 118.8 Hz. Le Jitter est de : 1.59 et le STD est de : 9.97 Hz. La fonction d'auto-corrélation contient de la même manière que le signal temporel une certaine irrégularité avec aussi une similarité par rapport aux sujets sains.

4.5.4. Sujet malade (masculin) atteint d'une laryngite chronique :

➤ Tracé temporel du signal vocal :

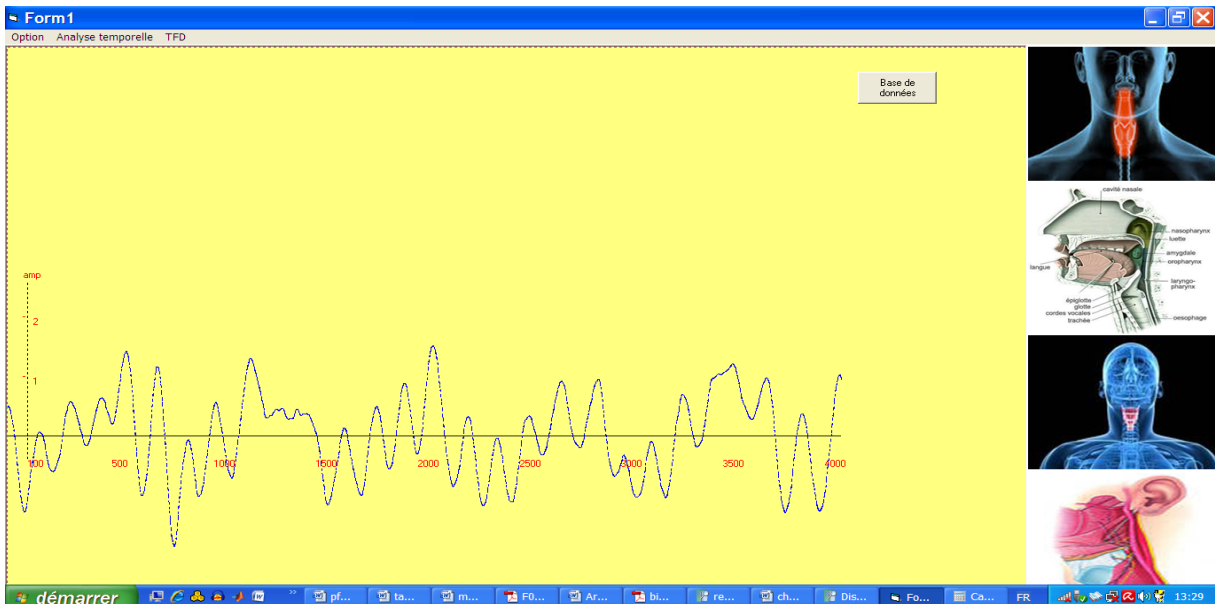


Figure 4.14 : Capture d'écran du tracé temporel du signal vocal atteint d'une laryngite chronique.

➤ Tracé de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal :

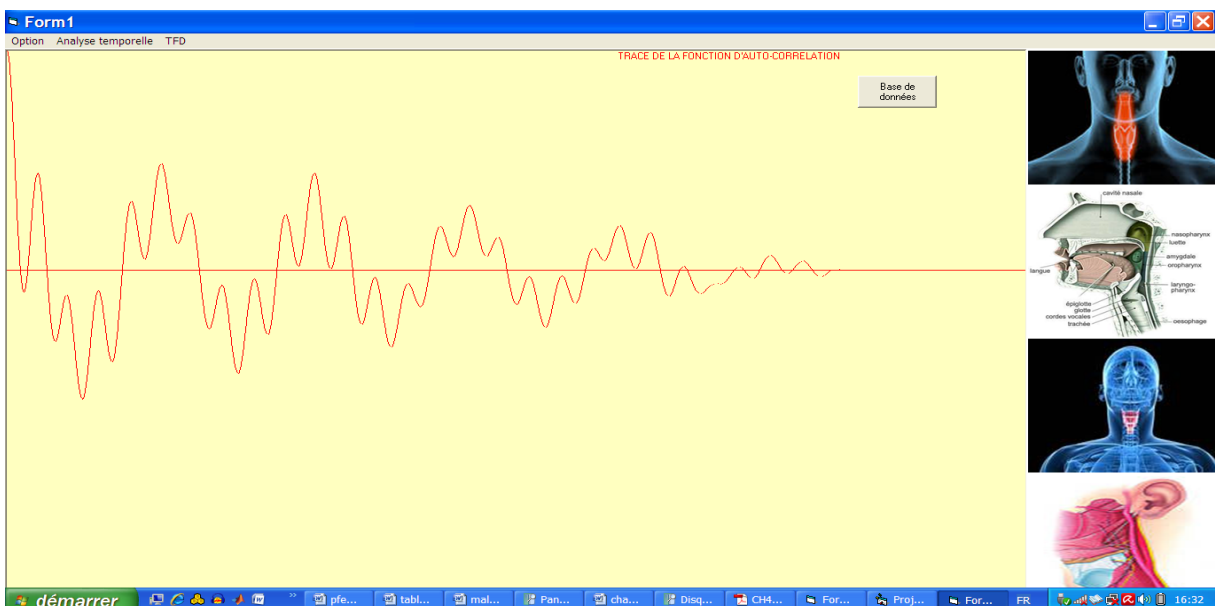


Figure 4.15 : Capture d'écran de la fonction d'auto-corrélation du signal vocal atteint d'une laryngite chronique.

➤ **Tracé de la TFD CT :**



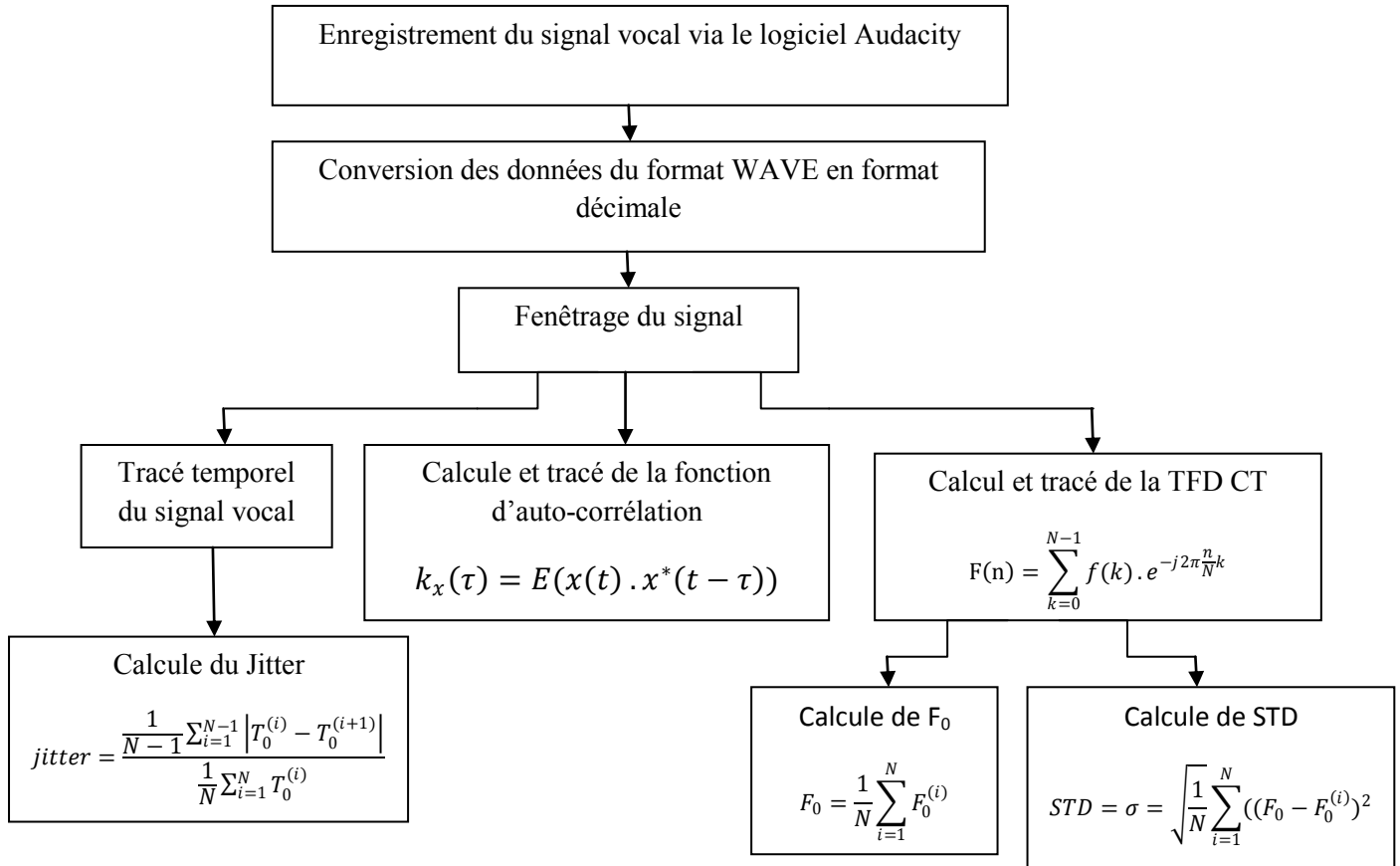
Figure 4.16 : Capture d'écran de la TFD CT du signal vocal atteint d'une laryngite chronique.

❖ **Analyse des résultats :**

Patient âgé de 50 ans tabagique chronique venant consulter pour une dysphonie chronique (trouble de la voix) évoluant depuis 3 mois et dont le bilan ORL révèle une laryngite chronique.

Son tracé temporel contient une certaine irrégularité avec une similarité plus prononcée par rapport au tracé temporel des patients sains et un spectre contenant de fréquences aiguës plus riches par rapport au polype inflammatoire. La fréquence fondamentale est 147.85 Hz. Le Jitter est de 1.018 et le STD est de : 10.61 Hz. La fonction d'auto-corrélation présente une grande similarité avec les sujets sains avec de maximum locaux.

4.6. Présentation de l'organigramme globale de notre application :



4.7. Conclusion :

Ce chapitre a été pour nous l'occasion de présenter les résultats obtenus au moyen des différents algorithmes que nous avons implémentés pour l'évaluation objective des dysphonies vocales chroniques par analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique et d'effectuer l'évaluation clinique de ces résultats en engageant une discussion interprétative de ces derniers. Ce qui a permis d'élaborer une classification des dysphonies vocales chroniques selon les catégories suivantes :

- ✓ sujets sains.
- ✓ sujets présentant une laryngite chronique.

- ✓ sujets atteints d'un polype inflammatoire.
- ✓ sujets atteints d'un cancer du larynx.

Les paramètres pertinents intervenant dans cette classification sont :

- ✓ La fréquence fondamentale.
- ✓ Le STD.
- ✓ Le Jitter.
- ✓ La fonction d'auto corrélation.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce travail de recherche de thèse de Doctorat en Génie Biomédical notre objectif été l'étude et la mise en œuvre d'une plateforme télé médicale destinée à l'évaluation objective et au suivi des dysphonies chroniques d'origine laryngée par analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique.

Cette plateforme nous a permis la concrétisation de trois différentes applications de la télémédecine : la télésurveillance, la téléconsultation et la téléassistance.

Elle est constituée des éléments suivants :

1. Un site web avec sa base de données. Il permet le suivi a distance des malades bénéficiant d'une prise en charge thérapeutique (radiothérapie, traitement médicamenteux, rééducation vocale,...), surtout ceux résidents dans des zones éloignées leurs évitant des déplacements astreignants, couteux et surtout inutile.
2. Une plate forme d'acquisition mettant en œuvre un microphone, la carte de son d'un terminal informatique, l'environnement Audacity et un protocole d'enregistrement du signal vocal acoustique ciblé sur le territoire cordal. Ce protocole présente l'avantage d'être non invasif, non intrusif et ne demandant pratiquement aucune coopération du patient.
3. Une interface graphique dotée d'un certains nombres d'algorithmes dédiés a l'évaluation de paramètres pertinents représentatifs des propriétés fonctionnelles de l'appareil phonatoire et plus particulièrement celle du larynx.
4. Cette interface graphique développé sous environnement de développement intégré Visual Basic permet de faire bénéficier le signal vocal acoustique d'un traitement analytique temporel et spectral.
5. Cette analyse comprend le calcul de la fréquence fondamentale F_0 , du STD, du contenu spectral, de la fonction d'auto corrélation et du Jitter.

Les résultats obtenus montrent une variabilité des caractéristiques spectro-temporelles entre sujets sains et sujets pathologiques notamment en ce qui concerne la fonction

d'auto corrélation, le Jitter, les contenus spectraux évalués par TFD-CT, le STD, et la fréquence fondamentale F_0 moyennée sur plusieurs trames du signal voisé.

L'analyse des différents enregistrements pathologiques montrent une variabilité de ces caractéristiques entre les sujets présentant une dysphonie chronique selon que le syndrome soit inflammatoire ou tumoral.

Ce travail revêt essentiellement un caractère de développement technologique logiciel s'inscrivant dans le domaine T.I.C. et Santé, mettant à la disposition des professionnels de la santé des outils de traitement du signal puissant pouvant les aider à mieux établir leurs diagnostics et les guider dans leurs démarches thérapeutiques ainsi qu'au suivi télé-médicalisé.

Une validation clinique du système doit naturellement passer par une étude statistique très poussée, réalisée sur un corpus plus important de sujets atteints de diverses pathologies du larynx.

Ce travail a comme perspective :

1. La mise a contribution de différents modèles de production de la parole en vue d'améliorer et de développer d'autres protocoles d'exploration du signal vocal en particulier l'analyse de la vibration des cordes vocales par ultrasonographie distante. Cette perspective est déjà engagée en collaboration avec le Département Opto-Acousto Electronique (DOAO) de l'Institut d'Electronique, de Micro et Nano technologie (IEMN) de l'université de valenciennes (France).
2. L'élargissement de la base de données en vue d'une validation clinique du système et a des fins épidémiologiques.
3. Le développement d'autres algorithmes relatifs à la caractérisation objective des dysphonies vocales chroniques.

Liste des publications

Liste des publications

❖ **Communications Internationales:**

- **S.ABDELOUAHED, M.BENABDELLAH, S.AOUNALLAH, S.RERBAL, N.HAMLIL**, « Analyse Objective des Dysphonies d’Origine Laryngées par Analyse Spectro-Temporelle du Signal Vocal Acoustique », BIOMEIC’12, Octobre 10-11, 2012 Tlemcen - Algeria.
- **S.ABDELOUAHED, S.AOUNALLAH, M.BENABDELLAH**, " Study and Realization of a Tele-medical platform dedicated to the Objective Assessment and to the Follow-up of Dysphonia Chronic Laryngeal Origin by Spectro-Temporal analysis of Acoustic Vocal Signal “, ICCMA’13, Janvier 22-23, 2013 Sousse - Tunis.
- **S.ABDELOUAHED, S.AOUNALLAH, M.BENABDALLAH**, “Etude et réalisation d’une plateforme télémédicale dédiée à l’évaluation objective et au suivi des dysphonies tumorales d’origine laryngée par analyse spectro temporelle du signal vocal acoustique ” Réunion scientifique, PARIS le 28 janvier 2013.
- **S.ABDELOUAHED, M.BENABDELLAH AND S.AOUNALLAH** “Telemonitoring of Three Characteristic Parameters of Acoustics Vocal Signal in Patients with Tumor or Inflammatory Chronic Dysphonia” 9th euromediterranean conference on Telemedicine and medical informatics EMMIT 2013, October 21-23 2013, Nador, Morocco.
- **S. A. AOUNALLAH, NASRI, S. ABDELOUAHED, M. BENABDALLAH, F. HADJ ALLAL** “Approche diagnostique des dysphonies chroniques par examen du signal vocal acoustique ” 2ème congrès maghrébin de la MAFOS 22-24 Novembre 2013 Alger.

Liste des publications

- **S.ABDELOUAHED, M.BENABDELLAH, S.AOUNALLAH, S.RERBAL, N.HAMLIL**, « Etude et Réalisation d'une Plateforme Télémédicale Dédiée à l'Evaluation Objective et au Suivi des Dysphonies Tumorales d'Origine Laryngée par Analyse Spectro-temporelle du Signal Vocal Acoustique.», BIOMEIC'14, Octobre 15-16, 2012 Tlemcen - Algeria.

❖ **Communications Nationales :**

- **S.ABDELOUAHED, M.BENABDELLAH, S.AOUNALLAH** « Etude et Réalisation d'une Plateforme Télé médicale Dédiée à l'Evaluation Objective et au Suivi des Dysphonies Chroniques d'Origine Laryngée par Analyse Spectro-Temporelle du Signal Vocal. », JDGBM'2013 Mai 23, 2013, Tlemcen.
- **S.ABDELOUAHED, M.BENABDELLAH**, salon national de la valorisation des résultats des programmes nationaux de recherche, centre de convention d'Oran 8, 9 Avril 2014.
- **S.ABDELOUAHED, M.BENABDELLAH, S.AOUNALLAH** « Etude et Réalisation d'une plate-forme télé-médicale dédié à l'évaluation objective et du suivi des dysphonies chroniques d'Origine laryngée par analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique», JDGBM'2014 Mai 15, 2014, Tlemcen.

❖ **Publications Internationales :**

- **S.ABDELOUAHED, S.AOUNALLAH, M.BENABDELLAH**, " Study and Realization of a Tele-medical platform dedicated to the Objective Assessment and to the Follow-up of Dysphonia Chronic Laryngeal Origin by Spectro-Temporal analysis of Acoustic Vocal Signal", **Publisher: IEEE Explore , ISSN 978-1-4673-5214-7/13/\$31.00 ©2013 IEEE.**

Liste des publications

- **S.ABDELOUAHED, S.AOUNALLAH, M.BENABDELLAH,** " Objective Evaluation of Chronic Dysphonia Laryngeal origin and follow-up of their treatments by the implementation of a telemedical device" in "Global Telemedicine and eHealth Updates, Vol. 6", **Publisher: International Society for Telemedicine & eHealth (ISfTeH), ISSN 1818-9334, PP.167-171.**

- **S.ABDELOUAHED, S.AOUNALLAH, M.BENABDELLAH,** "Objective Evaluation of Chronic Dysphonia Laryngeal origin by the implementation of a telemedical device" **The journal of MacroTrends in Technology and Innovation.**

- **S Abdelouahed, M Benabdellah and S Aounallah** "Telemonitoring of Three Characteristic Parameters of Acoustics Vocal Signal in Patients with Tumor or Inflammatory Chronic Dysphonia", International Journal of Health & Medical Informatics, ISSN: 2157-7420, Volume 4, issue 4.

- **S. ABDELOUAHED, M. BENABDALLAH, S. A. AOUNALLAH, F. HADJ ALLAL** "Objective evaluation of chronic laryngeal dysphonia by spectro-temporal analysis", Journal of Biomedical Engineering and Medical Imaging, ISSN (online) 2055-1266, Volume 1, Issue 1 (2014) , pp 40-47.

- **S. ABDELOUAHED, M. BENABDALLAH, S. A. AOUNALLAH, F. HADJ ALLAL** "Objective evaluation of chronic dysphonia laryngeal origin and follow-up of their treatments by the implementation of three characteristic parameters of acoustics vocal signal in patients with tumor or inflammatory chronic dysphonia" International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, ISSN: 2319-7463 Vol. 3 Issue 1, January-2014, pp: (325-329), Impact Factor: 1.252.

Liste des publications

- **S. Abdelouahed, M. Benabdallah, S. A. Aounallah, F. Hadj Allal**
“Telemonitoring of Four Characteristic Parameters of Acoustic Vocal Signal in Patients with Tumor or Inflammatory Chronic Dysphonia” International Journal of Engineering Inventions, e-ISSN: 2278-7461, p-ISSN: 2319-6491, Volume 3, Issue 6 (January 2014) PP: 36-40.

Acronymes

Acronymes

A

API : L'alphabet phonétique international

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

D

D.C.E : Data Communication Equipement.

D.T.E: Data Terminal Equipement.

E

ECG: Electrocardiogramme.

N

NTIC : Nouvelles technologies de l'information et des télécommunications.

O

ORL : *Oto-rhino-laryngologie.*

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

R

Acronymes

RTC : Réseau Téléphonique Commuté.

S

STD : Ecart type de la fréquence fondamentale moyenne.

T

TCP/IP : Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

TFD CT : Transformateur de Fourier Discrète a Court Terme.

TFD : Transformateur de Fourier Discrète.

TIC : Technologies de l'information et de la communication.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] Giovanni A., Yu P., Révis J., Guarella MD., Teston B., Ouaknine M. (2006) «Analyse objective des dysphonies avec l'appareillage EVA. Etat des lieux, Revue Oto-rhino-laryngologie Française, 90, p3 183-192

- [2] Castellengo(M);Ronbeau; Valette(C) »Study of the acoustical phenomena characteristic of the transition between chest voice and falsetto « , proceedings of SMCA references, Stokholm,1983, P 113-117.

- [3] GIOVANNI, A., HEIM, C., DEMOLIN, D., and TRIGLIA, J., M. (2000). « Estimate subglottic pressure in normal and dysphonic subjects» Otol. Rhinol. Laryngol, 109, 500-504.

- [4] V.A.Dubsesset «la langue française parlée complétés (LPC) production et perception », Thèse de doctorat de l'institut national polytechniques de Grenoble, soutenu le 25 novembre 2005.

- [5] Lawrence R. Rabiner & Ronald W. Schafer. «Introduction to digital speech» processing. Now Publishers Inc., Hanover, MA, USA, 2007.

- [6] <http://scgwww.epfl.ch/courses>

- [7] J.Cisonni « modélisation et inversion d'un système complexe de production de signaux acoustique application a la voix et aux pathologies » Doctorat de l'institut polytechnique de Grenoble. Soutenu le 24 Février 2009.

- [8] T.Dutoit « Introduction au traitement automatique de la parole », notes de cours Faculté polytechnique de Mons, 2000.

Bibliographies

- [9] C.E.Vilain « Contribution à la synthèse de parole par modèle physique application a l'étude des voix pathologiques ».Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble. Soutenu le 20 Décembre 2002.
- [10] L.M.Tuan « Analyse acoustique de sons bien identifiés par système de reconnaissance de la parole ». Laboratoire Lorrain en informatique et ses applications, institut de francophonie pour l'informatique, mémoire de fin d'étude soutenu le 20 Décembre 2007.
- [11] W.Sernichaes « Etude expérimentale de la perception du train de voisement des occlusives du français ».Thèse de doctorat de l'institut de phonétique, Université libre de Bruxelles ,1986-1987.
- [12] C.meunnier, « Phonétique acoustique ». chapitre 13 Thèse de doctorat, Laboratoire parole et langage, Université de Provence. soutenu le 11fevrier 2008.
- [13] <http://www.orl-parc.com/Activite-ORL-Medicale-Pathologie-Voix-Cordes-Vocales>
- [14] <http://lapc.free.fr/tutorials/Troubles%20de%20la%20voix.pdf>
- [15] S.D.Courbiere médecin ORL, F.Resuel phoniatre, « la voix : la corde vocal et sa pathologie» .collège international de médecine et chirurgie de l'hôpital américain de paris, ISBN 2-905238-23-2.
- [16] A.Grovanni « la voix : la corde vocal et sa pathologie». Orientation diagnostique devant : trouble aigus de la parole. Professeur à la faculté de médecine de Marseille, Juin 2005.

Bibliographies

- [17] A.Reyt « la voix : la corde vocal et sa pathologie. Cancers du larynx : Diagnostique, principes de traitement» .Professeur à la faculté de médecine de Grenoble, Mars 2005.
- [18] http://www.edimark.fr/phototheque/galerie_detail.php?id_galerie=998 .
- [19] <http://blogopedie.canalblog.com/archives/2007/04/05/4535001.html> .
- [20] I.Atallah « la voix : la corde vocal et sa pathologie. Examen du larynx : de laryngoscopie a la stroboscopie », Université Joseph Fourier Science Technologie Médecine, CHU Grenoble.
- [21] A.Hajjij « la voix : la corde vocal et sa pathologie Place de la rééducation orthophonique dans la prise en charge des dysphonies ; étude perspective à propos de 42 cas ».Thèse de doctorat, faculté de médecine et pharmacie, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fes. soutenu le 29/06/2011.
- [22] T.Hézar « la voix : la corde vocal et sa pathologie .Production de la voix, exploration, modèles, analyse et synthèse » .Thèse de doctorat de l'école doctorale SMEP, Université Pierre et Marrie Curie Paris VI, soutenu le 21 décembre 2014.
- [23] [http://www.ouest-france.fr/ni-gout-ni-odeur-il-existe-une-consultation-1916\(nasofib\)](http://www.ouest-france.fr/ni-gout-ni-odeur-il-existe-une-consultation-1916(nasofib))
- [24] <http://www.institut-numerique.org/chapitre-6-application-du-protocole-therapeutique-informatise-de-la-voix-pathologique-paralysie-recurrentielle> .
- [25] T. Dutoit, « Introduction au Traitement Automatique de la Parole », Notes de cours, Faculté Polytechnique de Mons, 2000.

Bibliographies

- [26] LAKHDAR Mohammed Hicham, HASSAM Ahmed, « classification des sons de la parole par la technique PLP », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en contrôle, Université ABOU BEKER BELKIAD TELEMEN, 2001.
- [27] Dr. ANDRZEJ DRYGAJLO, «TRAITEMENT DE LA PAROLE », Interactive Multimodal Information Management (IM)2 , Laboratory of IDIAP (LIDIAP) Institute of Electrical Engineering (IEL) ,Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL).
- [28] Calliope, «la parole et son traitement automatique», Ed. Masson, 1989.
- [29] J. Stern, J. D. Barbeyrac, R. Poggi, «Méthodes pratiques d'étude des Fonctions aléatoires». Edition Dunod.
- [30] J.Max « Méthodes et techniques de Traitement du signal et applications aux mesures physiques », Tome1, Ed. Masson.
- [31] S.Rerbel « Traitement numérique du signal physiologique en télémédecine», Thèse de doctorat, Université ABOU BEKER BELKIAD TLEMEN, 2014.
- [32] Dr Camille Finck, chapitre sur « L'évaluation fonctionnelle des dysphonies d'origine laryngé », Service d'Oto-rhino-laryngologie, CHU Sart Tilman, Université de Liège, Liège, Belgium.
- [33] L.Benlaldj, « Etude de la méthode PLP (Perceptual linear prediction) en reconnaissance automatique de la parole », Thèse de magister en électronique, spécialité : Signaux et Systèmes, promotion 1999/2000.
- [34] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Formant>

Bibliographies

- [35] DEMARTINES N., BATTEGAY E., LIEBERMANN J., OBERHOLZER M., RUFLI Th., HARDER H, «Télémédecine : perspectives et approche pluridisciplinaire.»Schweiz Med Wochenschr 2000; 130:314–23.
- [36] Marilyn, J.Field , «Telemedicine : a Guide to Assessing Telecommunications in Health Care» Editor, Institute of Medicine, National Academy Press, Washington (USA) 1996 - ISBN 09-309-05531-8.
- [37] Le Petit Larousse Illustré / Editions Larousse / 100ème édition ; 2005.
- [38] MS letters of Hallet Turner to James Jurin. Wellcome Institute for the History of Medicine, London; 29 May 1726.
- [39] W. Einthoven « Le télécardiogramme. Archives internationales de physiologie» 1906; 4:132–64.
- [40] A. FRANCO, «La télémédecine au service de l'autonomie», La revue de médecine interne, vol. 24(s.4), pp. 390–393, Décembre 2003.DOI: S0248-8663(03)80347-8
- [41] P. STAB, «Téléconsultation en psychiatrie: évaluation d'une expérience originale dans le haut-pays niçois», Thèse de doctorat en Médecine de l'Université Louis Pasteur,Strasbourg, France, 2001
- [42] E. CAUCHY, «Pôle d'excellence en médecine de montagne au pays du Mont Blanc», Projet en médecine, Institut de formation et de recherche en médecine de montagne, France, 2010.
- [43] BISSI N. D. E. «Etude de faisabilité de la Télémédecine au Cameroun» ; Thèse Médecine ; Bamako ; 2006.

Bibliographies

- [44] DARKINS A. W., CARY M. A., «Telemedicine and Telehealth: Principles, Policies, Performance and Pitfalls», 1st edition (March 15, 2000).
- [45] FRAISSE S., GARCIA E., PASCAL C., PIOVESAN D. ; «La télémédecine, entre fantasme et réalité : de la fascination technique aux besoins des utilisateurs», Colloque de l'Association Latine de l'Analyse des Systèmes de Santé, Lyon, Septembre 2001 ; 19 pages.
- [46] MAJED B., MARQUE G. «Rapport sur les Technologies de l'Information et de la Communication et la santé » ; ORS Nord-Pas-de-Calais ; mai 2003.
- [47] Marescaux J, Smith MK, Fölscher D, Jamali F, Malassagne B, Leroy J. Telerobotic «laparoscopic cholecystectomy: initial clinical experience with 25patients.» Ann Surg 2001; 234: 1-7.
- [48] GREBOT E., CLUZEL J., ALAJOUANINE G. ; «Les nouvelles technologies de l'information au service de la santé en Afrique dans le cadre du NEPAD», Edit : PUF, Isbn : 2-13-053523-2 / Ean 13 : 9782130535232, mars 2003.
- [49] Rapport OMS sur la santé du monde ; Travailler ensemble pour la santé ; JONG-WOOK L. ; 2006 ; p3.
- [50] DU SEJOUR J. D., député, et ETIENNE J. C., sénateur ; Rapport sur les «Télécommunications à haut débit au service du système de santé - La nouvelle révolution médicale » ; Office Parlementaire d'évaluation des travaux scientifiques ; Tome I. n° 1686 ; Assemblée Nationale ; Paris ; juin 2004.
- [51] Abdelmajib MILLED, Ingénieur Informaticien, Spécialiste en TIC ; la télémédecine, l'un des meilleurs exemples.

Bibliographies

- [52] Allal, A., Nicoucar, K., Mach, N., Dulguerov. «Quality of life in patients with oropharynx carcinomas: assessment after accelerated radiotherapy with or without chemotherapy versus radical surgery and postoperative radiotherapy». *Head Neck*, 25(10): 833-9; discussion 9-40. Epub 2003/09/11.
- [53] Arnoux-Sindt, B. «Crico-arytenoid articulation and reconstructive laryngectomy. «*Revue de Laryngol Otol Rhinol (Bord)*, 113(4): 339-42. Articulation crico-arytenoïdienne et laryngectomie reconstructive.
- [54] Babin, E., Joly, F., Vadillo, M., Dehesdin, «Oncology and quality of life. Study in head and neck cancer.» *Annales d'Oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 122(3):134-41, 2005.
- [55] Baum, S., McFarland, The development of speech adaptation to an artificial palate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4): 2353-9, 1997.
- [56] Bless, «Assessment of laryngeal function. Phonosurgery: assessment and surgical management of voice disorders». New York: Raven Press. 1991.
- [57] Blood, « Fundamental frequency and intensity measurements in laryngeal and a laryngeal speakers. *Journal of Communication Disorders*, 17(5): 319-24. 1984.
- [58] Boé, L.-J., Heim, J.-L., Honda, K., Maeda, « The potential Neandertal vowel space was as large as that of modern humans». *Journal of Phonetics*, 30(3): 465-84. 2002.
- [59] Borel-Maisonny, *Méthode de lecture*. Paris: ARPLOE. 1956.
- [60] Bréal, *Essais de sémantique : science des significations*. Paris: Hachette. 1897.

Bibliographies

- [61] Browman, C.P., Goldstein, Articulatory Phonology: An Overview. *Phonetica*, 49(3-4): 155-80. 1992.
- [62] Catford, J. 1964. «Phonation types : the classification of some laryngeal components of speech production.» In honour of Daniel Jones : papers contributed on the occasion of his eightieth birthday, 12 September 1961. London: Longmans.
- [63] Catford, J.C. « Fundamental problems in phonetics». Bloomington: Indiana University Press. 278p. 1977.
- [64] Catford, J.C., Esling, J.H. «Phonetics, Articulatory. In: Brown, K. (eds). *Encyclopedia of Language & Linguistics (Second Edition)* ». Oxford: Elsevier. 425-42.2006.

Résumé

Dans le cadre de ce travail de recherche de thèse de Doctorat en Génie Biomédical notre objectif est l'étude et la mise en œuvre d'une plateforme télé médicale destinée à l'évaluation objective et au suivi des dysphonies chroniques d'origine laryngée par analyse spectro-temporelle du signal vocal acoustique. Ce plateau technique mettra à la disposition du clinicien ORL des indices complémentaires pertinents comme la fréquence fondamentale, le jitter, la TFD-CT, le STD et la fonction d'auto corrélation de celui-ci permettant une évaluation objective des dysphonies chroniques laryngées et leur classification en syndrome d'origine inflammatoire ou tumorale (cancer du larynx, polype de type inflammatoire des cordes vocales, laryngite chronique).

La plateforme télé médicale concrétise plusieurs applications de la télé médecine : la télésurveillance, la téléconsultation et la téléassistance de personnes atteintes de dysphonies chroniques. Elle est constituée de deux parties différentes. Une première partie comportant un site web avec une base de données qui permet de faire l'entrepôt des données relatives aux différents patients, en d'autre terme l'élaboration de leurs dossiers médicaux personnalisés et partagés. Les médecins peuvent ainsi consulter ces dossiers et faire le suivi de ce type de patients à distance leurs évitant un déplacement astreignant, coûteux et souvent inutile.

La seconde partie de ce travail consiste en l'implémentation d'une interface graphique sous environnement Visual Basic qui met en œuvre plusieurs algorithmes de traitement du signal vocal acoustique en vue de l'évaluation des paramètres pertinents représentatifs des propriétés fonctionnelles de l'appareil phonatoire

Mots clés : Télémedecine, dysphonies vocales, sons voisés, TFD CT, fréquence fondamentale, STD, fonction d'auto corrélation, Jitter, Wamp, Visual Basic, Audacity.

Abstract

As part of this research work of PhD thesis in Biomedical Engineering our purpose is the study and implementation of a telemedical platform for objective evaluation and monitoring of laryngeal chronic dysphonia by spectro-temporal analysis of acoustic voice signal. This technical platform will provide to the ENT clinician additional relevant indices like the fundamental frequency, Jitter, the DFT ST, STD and autocorrelation function of it for the objective evaluation of chronic dysphonia and laryngeal classification of inflammatory or tumoral syndrome (laryngeal cancer, inflammatory polyp of vocal cord, chronic laryngitis).

The telemedical platform includes several applications of telemedicine: telemonitoring, teleconsultation and telecare of people with chronic dysphonia. It consists of two different parts. A first part having a website with a database which allows for the storage of data on different patients, in other words the development of their personalized medical records and shared. This allows doctors to consult these files and to follow this type of remote patient their avoiding the constraining trip, expensive and often unnecessary.

The second part of this work is the implementation of a GUI in Visual Basic environment that implements several processing algorithms of acoustic voice signal for the evaluation of relevant parameters representative of the functional properties of the vocal apparatus.

Keywords: Telemedicine, voice dysphonia, voiced sounds, DTF ST, fundamental frequency, STD, autocorrelation function, Jitter, Wamp, Visual Basic, Audacity.

ملخص

في إطار إعداد أطروحة الدكتوراه في الهندسة الطبية الحيوية هدفنا هو دراسة وتنفيذ منصة التطبيب عن بعد لتقييم موضوعي ورصد أي خلل مزمن للحنجرة عن طريق تحليل الطيف الزمني للإشارة الصوتية. هذه القاعدة التقنية سوف تقدم للطبيب المختص في طب أذن أنف حنجرة: مؤشرات إضافية ذات صلة مثل التردد الأساسي، Jitter, STD, TFD CT ووظيفة الارتباط الذاتي الخاصة به تساعد على التقييم الموضوعي لأي خلل في الحنجرة وتصنيفها إلى التهابات أو أورام (سرطان الحنجرة، ورم التهاب الحبال الصوتية، التهاب الحنجرة المزمن).

تشمل منصة التطبيب عن بعد العديد من التطبيقات : المراقبة عن بعد، الاستشارة عن بعد والرعاية عن بعد للأشخاص المعانين من خلل النطق المزمن وهو يتألف من قسمين مختلفين الجزء الأول يشمل موقع على شبكة الإنترنت مع قاعدة بيانات والذي يسمح بتخزين البيانات المتعلقة بمختلف المرضى، وجزء آخر يسمح بتطوير السجلات الطبية الشخصية والمشاركة كما يمكن للأطباء عرض ملفات المريض وتتبع حالته عن بعد وتجنبيه الانتقال الشاق، المكلف والغير لازم أحيانا

الجزء الثاني من هذا العمل هو تنفيذ واجهة المستخدم باستخدام لغة البرمجة Visual Basic الذي ينفذ عدة خوارزميات لمعالجة الإشارة الصوتية لتقييم المعايير ذات الصلة بخصائص وظيفية للجهاز الصوتية.

كلمات مفتاحية: التطبيب عن بعد، خلل في الصوت، صوت حلقي، التردد الأساسي، وظيفة الارتباط الذاتي، STD، Jitter، Visual Basic، Audacity.