

Année 2023/2024

N° 13

## Thèse

Pour le

# DOCTORAT EN MEDECINE

Diplôme d'État

par

**Jean BAQUÉ**

Né le 19 mars 1995 à Paris (75019)

---

**Développement d'un dispositif médical non invasif détectant automatiquement la déglutition pharyngée et la phonation.**

---

Présentée et soutenue publiquement le **29 mars 2024** devant un jury composé de :

Président du Jury :

Professeur David BAKHOS, ORL et Chirurgie cervico-faciale, Faculté de Médecine -Tours

Membres du Jury :

**Professeur Sylvain MORINIÈRE, ORL et Chirurgie cervico-faciale, Faculté de Médecine -Tours**

Professeur Virginie WOISARD, ORL et Chirurgie cervico-faciale, Faculté de Médecine – Toulouse

Docteur Franck MARMOUSET, ORL et Chirurgie cervico-faciale, PH, CHU – Tours

Monsieur Jérôme FARINAS, Traitement automatique de la parole, MCU, Faculté des Sciences et Ingénierie – Toulouse

## Résumé

### Développement d'un dispositif médical non invasif détectant automatiquement la déglutition pharyngée et la phonation.

**Introduction.** La dysphagie est un problème de santé publique. L'élaboration d'un dispositif médical détectant les patients dysphagiques, de manière non invasive et rapide, permettrait leur prise en charge précoce avec un bénéfice médical et économique. La mise au point d'un algorithme détectant automatiquement les déglutitions et phonations, à partir des sons et accélérations du pharyngo-larynx, serait la première étape pour envisager à terme la création d'un dispositif médical dépistant la dysphagie.

**Objectif.** Le but de cette étude était de développer un dispositif médical non invasif détectant automatiquement les fonctions de déglutition et de phonation du pharyngo-larynx.

**Matériel et méthode.** Nous avons utilisé deux capteurs cervicaux non invasifs, un microphone et un accéléromètre, pour recueillir des données sur les sons et accélérations du pharyngo-larynx. Vingt sujets (volontaires sains et patients dysphagiques) ont été inclus, pour réaliser des tests permettant de les faire déglutir et parler, avec les capteurs cervicaux en place et sous contrôle de la nasofibroscopie. Les événements d'intérêt, déglutitions, phonations et toux, ont été annotés sur les signaux issus des capteurs, à partir des images de la nasofibroscopie et du son. Les signaux annotés ont été utilisés pour réaliser l'auto-apprentissage d'un algorithme, fonctionnant avec le principe d'intelligence artificielle, qui avait pour but de reconnaître automatiquement les déglutitions, phonations et toux.

**Résultats.** L'algorithme a atteint un taux de reconnaissance de 80,04 % (précision = 62,93 %) pour les déglutitions, et de 87,83 % (précision = 75,66 %) pour les phonations. L'analyse des données d'un sujet par l'algorithme durait moins de 1 minute, contre plus de 30 minutes pour l'analyse humaine.

**Conclusion.** Notre dispositif médical, associant deux capteurs cervicaux non invasifs et un algorithme, a permis de détecter automatiquement les fonctions de déglutition et de phonation du pharyngo-larynx. La poursuite des inclusions de sujets, et l'ajout d'autres capteurs tels que l'électromyogramme et le saturomètre, rendront le dispositif médical plus performant et pourraient lui permettre de détecter les toux et les fausses-routes. Il deviendrait alors utilisable pour dépister la dysphagie à grande échelle.

**Mots clés :** déglutition, dysphagie, pharyngo-larynx, fausses-routes, acoustique

## Abstract

### Development of a non-invasive medical device for automatic detection of pharyngeal swallowing and phonation.

**Introduction.** Dysphagia represents a significant public health challenge. The development of a medical device capable of detecting dysphagic patients rapidly and non-invasively would facilitate their early management, with medical and economic benefits. The creation of an algorithm analyzing sounds and accelerations of the pharyngolarynx would enable the automatic detection of swallowing and phonation, representing the initial step towards the creation of a medical device for dysphagia screening.

**Objective.** The aim of this study was to develop a non-invasive medical device that automatically detects the swallowing and phonation functions of the pharyngolarynx.

**Materials and Methods.** We used two non-invasive cervical sensors, a microphone and an accelerometer, to collect data on the sounds and accelerations of the pharyngo-larynx. Twenty subjects (healthy volunteers and dysphagic patients) were recruited to perform tests involving swallowing and speaking, with the cervical sensors in place and during flexible endoscopic evaluation of swallowing. The events of interest, swallowing, phonations, and coughs, were annotated on the signals derived from the sensors, based on the endoscopic images and sound. The annotated signals were used for the self-learning of an algorithm based on artificial intelligence principles, aimed at automatically recognize swallowing, phonations, and coughs.

**Results.** The algorithm achieved a recognition rate of 80.04% (precision = 62.93%) for swallowing and 87.83% (precision = 75.66%) for phonations. The algorithm's analysis of a subject's data took less than 1 minute, compared to over 30 minutes for human analysis.

**Conclusion.** Our medical device, comprising two non-invasive cervical sensors and an algorithm, is able to automatically detect the swallowing and phonation functions of the pharyngo-larynx. Further subject inclusions, along with the addition of other sensors such as electromyography and a pulse oximeter, would enhance the performance of the medical device and enable it to detect coughs and aspiration events. This would make it become usable for screening dysphagia on a large scale.

**Keywords:** swallowing, dysphagia, pharyngolarynx, aspiration, acoustic

UNIVERSITE DE TOURS  
**FACULTE DE MEDECINE DE TOURS**

**DOYEN**

**Pr Patrice DIOT**

**VICE-DOYEN**

Pr Henri MARRET

**ASSESEURS**

Pr Denis ANGOULVANT, *Pédagogie*

Pr Mathias BUCHLER, *Relations internationales*

Pr Theodora BEJAN-ANGOULVANT, *Moyens – relations avec l'Université*

Pr Clarisse DIBAO-DINA, *Médecine générale*

Pr François MAILLOT, *Formation Médicale Continue*

Pr Patrick VOUREC'H, *Recherche*

**RESPONSABLE ADMINISTRATIVE**

Mme Carole ACCOLAS

\*\*\*\*\*

**DOYENS HONORAIRES**

Pr Emile ARON (†) – 1962-1966

*Directeur de l'Ecole de Médecine - 1947-1962*

Pr Georges DESBUQUOIS (†) - 1966-1972

Pr André GOUAZE (†) - 1972-1994

Pr Jean-Claude ROLLAND – 1994-2004

Pr Dominique PERROTIN – 2004-2014

**PROFESSEURS EMERITES**

Pr Daniel ALISON

Pr Gilles BODY

Pr Philippe COLOMBAT

Pr Etienne DANQUECHIN-DORVAL

Pr Luc FAVARD

Pr Bernard FOUQUET

Pr Yves GRUEL

Pr Gérard LORETTE

Pr Loïc VAILLANT

**PROFESSEURS HONORAIRES**

P. ANTHONIOZ – P. ARBEILLE – A. AUDURIER – A. AUTRET – C. BARTHELEMY – J.L. BAULIEU – C. BERGER – JC. BESNARD – P. BEUTTER – C. BONNARD – P. BONNET – P. BOUGNOUX – P. BURDIN – L. CASTELLANI – J. CHANDENIER – A. CHANTEPIE – B. CHARBONNIER – P. CHOUTET – T. CONSTANS – C. COUET – L. DE LA LANDE DE CALAN – P. DUMONT – J.P. FAUCHIER – F. FETISSOF – J. FUSCIARDI – P. GAILLARD – G. GINIES – D. GOGA – A. GOUDEAU – J.L. GUILMOT – O. HAILLOT – N. HUTEN – M. JAN – J.P. LAMAGNERE – F. LAMISSE – Y. LANSON – O. LE FLOCH – Y. LEBRANCHU – E. LECA – P. LECOMTE – AM. LEHR-DRYLEWICZ – E. LEMARIE – G. LEROY – M. MARCHAND – C. MAURAGE – C. MERCIER – J. MOLINE – C. MORAINÉ – J.P. MUH – J. MURAT – H. NIVET – D. PERROTIN – L. POURCELOT – R. QUENTIN – P. RAYNAUD – D. RICHARD-LENOBLE – A. ROBIER – J.C. ROLLAND – P. ROSSET – D. ROYERE – A. SAINDELLE – E. SALIBA – J.J. SANTINI – D. SAUVAGE – D. SIRINELLI – J. WEILL

## PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

---

ANDRES Christian.....	Biochimie et biologie moléculaire
ANGOULVANT Denis .....	Cardiologie
APETOH Lionel.....	Immunologie
AUPART Michel.....	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BABUTY Dominique.....	Cardiologie
BACLE Guillaume.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BAKHOS David.....	Oto-rhino-laryngologie
BALLON Nicolas.....	Psychiatrie ; addictologie
BARBIER François.....	Médecine intensive et réanimation
BARILLOT Isabelle.....	Cancérologie ; radiothérapie
BARON Christophe.....	Immunologie
BEJAN-ANGOULVANT Théodora.....	Pharmacologie clinique
BERHOUEZ Julien.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BERNARD Anne.....	Cardiologie
BERNARD Louis.....	Maladies infectieuses et maladies tropicales
BLANCHARD-LAUMONNIER Emmanuelle.....	Biologie cellulaire
BLASCO Hélène.....	Biochimie et biologie moléculaire
BONNET-BRILHAULT Frédérique.....	Physiologie
BOURGUIGNON Thierry.....	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BRILHAULT Jean.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BRUNEREAU Laurent.....	Radiologie et imagerie médicale
BRUYERE Franck.....	Urologie
BUCHLER Matthias.....	Néphrologie
CAILLE Agnès.....	Biostat., informatique médical et technologies de communication
CALAIS Gilles.....	Cancérologie, radiothérapie
CAMUS Vincent.....	Psychiatrie d'adultes
CORCIA Philippe.....	Neurologie
COTTIER Jean-Philippe.....	Radiologie et imagerie médicale
DEQUIN Pierre-François.....	Thérapeutique
DESMIDT Thomas.....	Psychiatrie
DESOUBEAUX Guillaume.....	Parasitologie et mycologie
DESTRIEUX Christophe.....	Anatomie
DI GUISTO Caroline.....	Gynécologie obstétrique
DIOT Patrice.....	Pneumologie
DU BOUEXIC de PINIEUX Gonzague.....	Anatomie & cytologie pathologiques
DUCLUZEAU Pierre-Henri.....	Endocrinologie, diabétologie, et nutrition
EHRMANN Stephan.....	Médecine intensive – réanimation
EL HAGE Wissam.....	Psychiatrie adultes
ELKRIEF Laure.....	Hépatologie – gastroentérologie
ESPITALIER Fabien.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
FAUCHIER Laurent.....	Cardiologie
FOUGERE Bertrand.....	Gériatrie
FRANCOIS Patrick.....	Neurochirurgie
FROMONT-HANKARD Gaëlle.....	Anatomie & cytologie pathologiques
GATAULT Philippe.....	Néphrologie
GAUDY-GRAFFIN Catherine.....	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
GOUPILLE Philippe.....	Rhumatologie
GUERIF Fabrice.....	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
GUILLOIN Antoine.....	Médecine intensive – réanimation
GUILLOIN-GRAMMATICO Leslie.....	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
GUYETANT Serge.....	Anatomie et cytologie pathologiques
GYAN Emmanuel.....	Hématologie, transfusion
HALIMI Jean-Michel.....	Thérapeutique
HANKARD Régis.....	Pédiatrie
HERAULT Olivier.....	Hématologie, transfusion
HERBRETEAU Denis.....	Radiologie et imagerie médicale
HOURIOUX Christophe.....	Biologie cellulaire
IVANES Fabrice.....	Physiologie
LABARTHE François.....	Pédiatrie
LAFFON Marc.....	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LARDY Hubert.....	Chirurgie infantile
LARIBI Saïd.....	Médecine d'urgence
LARTIGUE Marie-Frédérique.....	Bactériologie-virologie
LAURE Boris.....	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
LECOMTE Thierry.....	Gastroentérologie, hépatologie

LEGRAS Antoine.....	Chirurgie thoracique
LESCANNE Emmanuel.....	Oto-rhino-laryngologie
LEVESQUE Éric.....	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LINASSIER Claude.....	Cancérologie, radiothérapie
MACHET Laurent.....	Dermato-vénérologie
MAILLOT François.....	Médecine interne
MARCHAND-ADAM Sylvain.....	Pneumologie
MARRET Henri.....	Gynécologie-obstétrique
MARUANI Annabel.....	Dermatologie-vénérologie
MEREGHETTI Laurent.....	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
MITANCHEZ Delphine.....	Pédiatrie
MOREL Baptiste.....	Radiologie pédiatrique
MORINIERE Sylvain.....	Oto-rhino-laryngologie
MOUSSATA Driffa.....	Gastro-entérologie
MULLEMAN Denis.....	Rhumatologie
ODENT Thierry.....	Chirurgie infantile
OUAISSI Mehdi.....	Chirurgie digestive
OULDAMER Lobna.....	Gynécologie-obstétrique
PAINTAUD Gilles.....	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
PATAT Frédéric.....	Biophysique et médecine nucléaire
PERROTIN Franck.....	Gynécologie-obstétrique
PISELLA Pierre-Jean.....	Ophthalmologie
PLANTIER Laurent.....	Physiologie
REMERAND Francis.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
ROINGEARD Philippe.....	Biologie cellulaire
RUSCH Emmanuel.....	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
SAINT-MARTIN Pauline.....	Médecine légale et droit de la santé
SALAME Ephrem.....	Chirurgie digestive
SAMIMI Mahtab.....	Dermatologie-vénérologie
SANTIAGO-RIBEIRO Maria.....	Biophysique et médecine nucléaire
SAUTENET-BIGOT Bénédicte.....	Thérapeutique
THOMAS-CASTELNAU Pierre.....	Pédiatrie
TOUTAIN Annick.....	Génétique
VELUT Stéphane.....	Anatomie
VOURC'H Patrick.....	Biochimie et biologie moléculaire
WATIER Hervé.....	Immunologie
ZEMMOURA Ilyess.....	Neurochirurgie

## **PROFESSEUR DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE**

---

DIBAO-DINA Clarisse  
LEBEAU Jean-Pierre

## **PROFESSEURS ASSOCIES**

---

MALLET Donatien.....Soins palliatifs

## **PROFESSEUR CERTIFIE DU 2<sup>ND</sup> DEGRE**

---

MC CARTHY Catherine.....Anglais

## **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS**

---

AUDEMARD-VERGER Alexandra .....	Médecine interne
BISSON Arnaud .....	Cardiologie (CHRO)
BRUNAUT Paul .....	Psychiatrie d'adultes, addictologie
CARVAJAL-ALLEGRIA Guillermo .....	Rhumatologie (au 01/10/2021)
CLEMENTY Nicolas .....	Cardiologie
DOMELIER Anne-Sophie .....	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
DUFOUR Diane .....	Biophysique et médecine nucléaire
FOUQUET-BERGEMER Anne-Marie.....	Anatomie et cytologie pathologiques
GARGOT Thomas .....	Pédopsychiatrie
GOUILLEUX Valérie.....	Immunologie
HOARAU Cyrille .....	Immunologie
KERVARREC Thibault .....	Anatomie et cytologie pathologiques
LE GUELLEC Chantal.....	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
LEDUCQ Sophie .....	Dermatologie
LEFORT Bruno.....	Pédiatrie
LEJEUNE Julien .....	Hématologie, transfusion
LEMAIGNEN Adrien .....	Maladies infectieuses
MACHET Marie-Christine .....	Anatomie et cytologie pathologiques
MOUMNEH Thomas .....	Médecine d'urgence
PARE Arnaud.....	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
PIVER Éric.....	Biochimie et biologie moléculaire
ROUMY Jérôme .....	Biophysique et médecine nucléaire
STANDLEY-MIQUELESTORENA Elodie .....	Anatomie et cytologie pathologiques
STEFIC Karl.....	Bactériologie
TERNANT David.....	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
VAYNE Caroline .....	Hématologie, transfusion
VUILLAUME-WINTER Marie-Laure.....	Génétique

## **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES**

---

AGUILLON-HERNANDEZ Nadia.....	Neurosciences
NICOGLU Antonine .....	Philosophie – histoire des sciences et des techniques
PATIENT Romuald.....	Biologie cellulaire
RENOUX-JACQUET Cécile .....	Médecine Générale

## **MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES**

---

AUMARECHAL Alain .....	Médecine Générale
BARBEAU Ludivine.....	Médecine Générale
CHAMANT Christelle .....	Médecine Générale
ETTORI Isabelle .....	Médecine Générale
MOLINA Valérie .....	Médecine Générale
PAUTRAT Maxime .....	Médecine Générale
PHILIPPE Laurence.....	Médecine Générale
RUIZ Christophe.....	Médecine Générale
SAMKO Boris.....	Médecine Générale

## CHERCHEURS INSERM - CNRS - INRAE

---

BECKER Jérôme.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUAKAZ Ayache .....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUTIN Hervé.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BRIARD Benoit.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
CHALON Sylvie.....	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
DE ROCQUIGNY Hugues .....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
ESCOFFRE Jean-Michel.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GILOT Philippe.....	Chargé de Recherche Inrae – UMR Inrae 1282
GOMOT Marie.....	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GOUILLEUX Fabrice .....	Directeur de Recherche CNRS – EA 7501 - ERL CNRS 7001
GUEGUINOU Maxime.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
HEUZE-VOURCH Nathalie.....	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
KORKMAZ Brice.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
LATINUS Marianne.....	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LAUMONNIER Frédéric .....	Directeur de Recherche Inserm - UMR Inserm 1253
LE MERRER Julie .....	Directrice de Recherche CNRS – UMR Inserm 1253
MAMMANO Fabrizio.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
MEUNIER Jean-Christophe .....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
PAGET Christophe .....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
RAOUL William .....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
SECHER Thomas.....	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SI TAHAR Mustapha.....	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SUREAU Camille .....	Directrice de Recherche émérite CNRS – UMR Inserm 1259
TANTI Arnaud .....	Chargé de Recherche Inserm - UMR Inserm 1253
WARDAK Claire.....	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253

## CHARGES D'ENSEIGNEMENT

---

### *Pour l'éthique médicale*

BIRMELE Béatrice.....Praticien Hospitalier

### *Pour la médecine manuelle et l'ostéopathie médicale*

LAMANDE Marc .....

### *Pour l'orthophonie*

BATAILLE Magalie.....Orthophoniste  
CLOUTOUR Nathalie.....Orthophoniste  
CORBINEAU Mathilde.....Orthophoniste  
EL AKIKI Carole .....

HARIVEL OUALLI Ingrid.....Orthophoniste

IMBERT Mélanie .....

SIZARET Eva .....

### *Pour l'orthoptie*

BOULNOIS Sandrine.....Orthoptiste

# SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des enseignants et enseignantes  
de cette Faculté,  
de mes chers condisciples  
et selon la tradition d'Hippocrate,  
je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur  
et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je donnerai mes soins gratuits aux indigents,  
et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis(e) dans l'intérieur des maisons, mes yeux  
ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira  
les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas  
à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Respectueux(euse) et reconnaissant(e) envers mes Maîtres,  
je rendrai à leurs enfants  
l'instruction que j'ai reçue de leurs parents.

Que les hommes et les femmes m'accordent leur estime  
si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert(e) d'opprobre  
et méprisé(e) de mes confrères et consœurs  
si j'y manque.

## Table des matières

<b>I. Introduction – contexte médical et scientifique .....</b>	<b>11</b>
1. La dysphagie, un enjeu de santé publique .....	11
2. Un diagnostic invasif .....	12
3. Une nouvelle méthode d'évaluation de la déglutition ? .....	12
<b>II. Objectif .....</b>	<b>14</b>
<b>III. Matériel et méthode .....</b>	<b>15</b>
1. Déroulement de l'étude .....	15
2. Le dispositif médical expérimental .....	16
3. Recrutement et inclusion des patients et volontaires sains .....	17
4. Tests prévus par le protocole .....	18
5. Méthode d'annotation des données .....	19
6. Élaboration de l'algorithme et de ses statistiques .....	22
<b>IV. Résultats .....</b>	<b>25</b>
1. Sujets de l'étude .....	25
2. Résultats de l'algorithme .....	26
3. Déroulement expérimental .....	28
4. Évènements annotés sur les données .....	28
<b>V. Discussion .....</b>	<b>30</b>
1. Résultats de l'algorithme .....	30
2. Résultats des annotations .....	32
<b>VI. Conclusion .....</b>	<b>33</b>
<b>VII. Perspectives .....</b>	<b>33</b>
1. L'ajout de nouveaux capteurs et de leurs données dans l'algorithme .....	33
2. Un outil analysant le pharyngo-larynx dans sa globalité .....	34
<b>VIII. Références .....</b>	<b>35</b>
<b>IX. Annexes .....</b>	<b>37</b>

## I. Introduction – contexte médical et scientifique

### 1. La dysphagie, un enjeu de santé publique

La dysphagie est un problème de santé publique [1]. Elle est définie par le Collège Français d'Oto-Rhino-Laryngologie (ORL) comme une « perturbation du processus de déglutition et le symptôme caractérisé par la sensation de blocage, d'arrêt de la progression alimentaire ». Toute pathologie modifiant l'anatomie des voies aéro-digestives supérieures, ou les fonctions neurologiques centrales ou périphériques (Parkinson, accident vasculaire cérébral [AVC], neuropathies) peut entraîner une déglutition pathologique. Les conséquences de la dysphagie sont diverses et parfois sévères : dénutrition, fausses-routes (pénétration d'aliments dans les voies respiratoires) et infections broncho-pulmonaires [2–7], pouvant conduire au décès. À l'inverse, il a été démontré que la détection précoce de la dysphagie et son traitement, permettent de réduire ses complications, les hospitalisations, l'utilisation d'antibiotiques, ainsi que les taux de mortalité [8–10].

On estime que la dysphagie touche 30 à 50 % des personnes âgées [1,11], dont la proportion va augmenter dans les sociétés occidentales vieillissantes. Ces populations sont particulièrement sensibles aux complications de la dysphagie, qui représente désormais un facteur de risque à part entière en gériatrie [12]. Outre les complications habituelles, les troubles de la déglutition ont des impacts indirects sur les personnes âgées, en perturbant la prise per os de certaines galéniques de médicaments [13], tels que gélules ou comprimés non écrasables. Ils sont également un facteur d'isolement, les repas en groupe devenant une source d'anxiété sociale à cause d'une déglutition trop lente et de la nécessité d'éviter certaines textures d'aliments [14].

Les troubles neurologiques centraux sont fréquemment pourvoyeurs de dysphagie. Selon la littérature, une dysphagie est retrouvée en phase aiguë d'AVC chez 65 % des patients, et persiste chez 11 à 13 % d'entre eux à 6 mois [15,16]. La dysphagie est aussi associée aux démences (13 à 57 % des patients) et aux maladies des neurones moteurs (30 à 100 % des patients selon le stade) [16]. Chez les patients atteints de cancers ORL, la dysphagie peut être en rapport avec la tumeur, mais elle est surtout liée aux traitements par chirurgie et radiothérapie : 45 % des patients suivis pour un cancer ORL sont dysphagiques 2 ans après traitement [17]. La dysphagie a un fort impact sur leur qualité de vie, elle représente une des principales plaintes des patients traités pour un cancer de l'oropharynx [18].

En cas de fausse route, la toux est un réflexe physiologique qui permet d'expulser les aliments ayant pénétré dans les voies respiratoires. Ce réflexe peut cependant disparaître en cas de baisse de sensibilité du larynx liée au vieillissement ou à des troubles neurologiques [19]. Il s'agit alors de fausses-routes silencieuses, dangereuses car non perceptibles par le patient et son entourage. Cette absence de toux lors des fausses-routes est en réalité fréquente : elle est retrouvée dans 55 % des fausses-routes d'après Garon et al [20], et retarde fortement le diagnostic de dysphagie.

Au vu de sa forte incidence, et de ses conséquences évitables en cas de traitement, le diagnostic précoce de la dysphagie dans les populations à risque est devenu un enjeu majeur de santé publique.

## **2. Un diagnostic invasif**

Il existe actuellement deux méthodes de référence considérées comme le gold-standard pour évaluer la dysphagie : la nasofibroscope de déglutition, et le radiocinéma de déglutition [21,22].

La nasofibroscope permet une visualisation directe du pharyngo-larynx (PL), ce qui en fait une méthode de choix pour évaluer la déglutition [22]. Il s'agit cependant d'une technique invasive et désagréable pour le patient [23,24]. Cette méthode peut également déclencher le réflexe nauséux du patient, ajoutant à l'inconfort du geste et gênant la visualisation de la zone anatomique explorée. Les artéfacts liés à la salive ou la buée sont un autre inconvénient de cette technique, notamment dans les cancers ORL ou troubles neurologiques, pathologies pourvoyeuses de stases salivaires au niveau du PL.

Le radiocinéma de déglutition est l'autre méthode de référence pour évaluer la déglutition, elle repose sur l'ingestion par le patient d'une préparation mélangée à du produit de contraste. Il permet une exploration dynamique de la déglutition, avec une résolution pouvant dépasser 25 images par seconde. Le radiocinéma implique une irradiation des patients, avec un risque potentiel d'augmentation de l'incidence de cancers au niveau de la thyroïde [25]. Cette méthode requiert un plateau technique de radiologie avec du matériel spécifique, nécessitant un transport du patient dans un centre équipé.

La nasofibroscope et le radiocinéma de déglutition ne sont pas adaptés pour la détection à grande échelle des patients dysphagiques. Outre leur aspect invasif et irradiant, ils présentent la contrainte de devoir être interprétés par un médecin spécialisé. Ils nécessitent également de faire déplacer des patients souvent peu mobiles, car âgés ou séquellaires d'AVC, dans une structure de soin pratiquant ces examens.

## **3. Une nouvelle méthode d'évaluation de la déglutition ?**

Il n'existe pas de procédé utilisable à pour détecter les patients dysphagiques dans les nombreuses populations à risque, malgré l'intérêt médico-économique de leur traitement précoce [8–10]. Ce constat justifie la recherche d'une méthode permettant de détecter la dysphagie à grande échelle. Cette méthode doit s'inspirer des caractéristiques d'un test de dépistage : être non invasive, facile et rapide à mettre en œuvre, et reproductible, pour un moindre coût [26,27].

### **a) Vers une approche globale de la déglutition**

La dysphagie n'est actuellement explorée qu'au travers de deux des fonctions du PL : la fonction de transport du bol alimentaire, et la fonction de protection pendant ce transport (éviter les fausses-routes). Cette vision semble réductrice au regard des autres fonctions du PL. La voix peut être modifiée après une fausse-route [28], prenant alors le nom de « voix mouillée ». Il y aurait même une corrélation entre l'aliment à l'origine de la fausse-route et le degré de voix mouillée [29]. De même des altérations ont été retrouvées au niveau du couplage respiration-déglutition dans certaines pathologies neurologiques ou les cancers ORL, associées à des fausses-routes [30]. Ainsi les baisses de la saturation en oxygène permettraient de détecter les fausses-routes selon certains auteurs, même si ce point reste discuté dans la littérature [31].

L'analyse de la phonation et la respiration pourrait donc apporter des données utiles pour évaluer le caractère normal ou pathologique de la déglutition d'un patient.

b) De nouveaux paramètres d'analyse

Une revue de la littérature répertoriant les méthodes non invasives d'enregistrement du PL (Annexe 1), a mis en évidence que les mouvements pharyngo-laryngés sont à l'origine de paramètres physiques quantifiables. Parmi ces paramètres, deux sont facilement mesurables avec un microphone et un accéléromètre : les sons et les accélérations (tout mouvement est associé à une accélération qui le caractérise). Les sons et accélérations produits lors du fonctionnement du PL pourraient ainsi être utilisés comme marqueurs pour analyser la déglutition dans une population de patients, et permettre de détecter les déglutitions pathologiques.

c) L'apport de l'intelligence artificielle

Les sons et accélérations produits par les mouvements pharyngo-laryngés sont des données physiques, qui sont mathématiquement modélisables. Il semble donc possible de développer une méthode pour les analyser automatiquement, cette méthode devra cependant être capable de traiter un immense volume de données. La littérature montre que l'intelligence artificielle (IA) rend possible le traitement d'un tel volume d'informations : Verde et al. ont réussi à mettre au point, grâce à l'analyse de données sonores par l'IA, un algorithme de détection et d'analyse automatique de la voix humaine [32]. Un algorithme pourrait ainsi être capable de détecter automatiquement les déglutitions et phonations d'un patient, s'il arrive à analyser avec succès les sons et accélérations de son PL.

La mise au point d'un dispositif médical (DM), associant des capteurs cervicaux non invasifs et un algorithme détectant automatiquement les déglutitions et les phonations, serait la première étape pour envisager à terme la création d'un DM dépistant la dysphagie.

## II. Objectif

L'objectif de ce travail a été de développer un dispositif médical non invasif détectant automatiquement les fonctions de déglutition et de phonation du pharyngo-larynx.

Ce travail a été réalisée dans le cadre de l'étude multicentrique « Modélisation de l'Efficacité Pharyngo-Laryngée pour évaluer les troubles de la déglutition (Eph-L) ».

### III. Matériel et méthode

Il s'agit d'une étude interventionnelle chez l'Homme, de catégorie 2 (à risques et contraintes minimales). Le protocole a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP), Numéro SI : 23.00117.000173 ; Numéro national : 2023-A00054-41.

**Note importante :** dans toute la suite de ce travail, nous employons le terme « déglutition » pour désigner la phase pharyngée de la déglutition. Tous nos travaux ont été réalisés sur la phase pharyngée de la déglutition, et non sur les phases orale et œsophagienne.

#### 1. Déroulement de l'étude

Notre avons recruté des volontaires sains et des patients atteints de pathologies affectant la déglutition. Les sujets inclus dans l'étude ont dû réaliser les tests prévus par le protocole (Figure 1) : avaler différentes textures et parler, avec un DM composé d'un microphone et d'un accéléromètre en place sur la région cervicale. Un contrôle étant nécessaire pour évaluer les résultats de notre démarche expérimentale, pour chaque sujet les tests ont été réalisés en temps réel sous contrôle d'une méthode de référence pour évaluer la déglutition : la nasofibroscopie.

Les signaux pharyngo-laryngés détectés par les capteurs du DM pendant les tests, ont été transférés sur un ordinateur. Les événements d'intérêt (déglutitions et phonations) ont été annotés sur les signaux, c'est-à-dire isolé, à partir d'un logiciel dédié. Des toux ont été retrouvées dans les enregistrements chez les patients dysphagiques. Nous avons choisi de les annoter comme évènement d'intérêt, car la toux appartient à la fonction de déglutition au sens large, en permettant d'expulser les aliments ayant pénétré dans les voies respiratoires suite à une fausse-route. De plus la toux semble bien détectable par le microphone et l'accéléromètre, car elle entraîne des mouvements du PL.

L'annotation des évènements d'intérêt sur les signaux s'est faite sous le contrôle des images de la nasofibroscopie. Les données annotées, considérées comme les données de référence, ont ensuite été utilisées pour permettre l'auto-apprentissage d'un algorithme fonctionnant avec le principe d'IA. Cet algorithme a été programmé pour retrouver automatiquement les déglutitions et phonations, à partir des données captées par les capteurs du DM.

Nous avons enfin pu évaluer les performances l'algorithme, en comparant ses annotations automatiques avec les annotations de référence faites par l'examineur à partir de la nasofibroscopie. Pour éviter tout biais, les données utilisées pour tester l'algorithme n'appartenaient pas au pool de données ayant servi pour son auto-apprentissage.

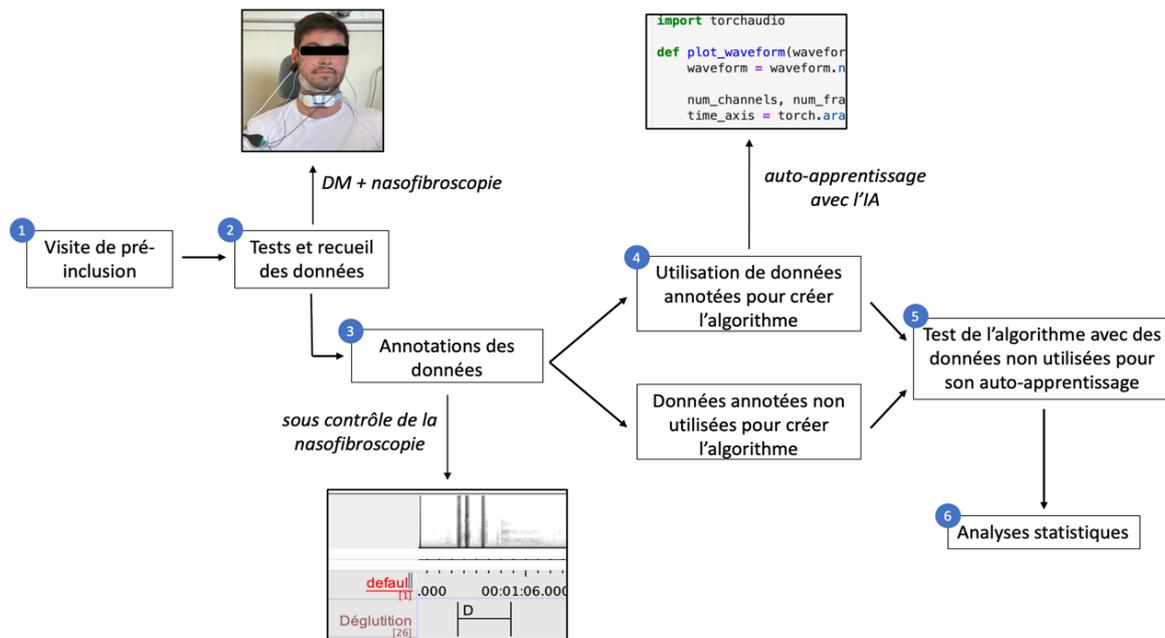


Figure 1 : Protocole de l'étude. DM : Dispositif médical.

## 2. Le dispositif médical expérimental

Nous avons choisi deux capteurs pour notre étude, un microphone et un accéléromètre :

- Le microphone en position cervicale : capte les sons du PL lors de la phase pharyngée de la déglutition et de la phonation.
- L'accéléromètre en position cervicale : capte l'accélération liée aux mouvements du PL lors de la phase pharyngée de la déglutition et de la phonation.

Ces capteurs sont adaptés à notre objectif : recueil de données en rapport avec les fonctions de déglutition et phonation, caractère non invasif, compatibilité en termes de localisation, et compatibilité avec l'examen de référence (nasofibroscopie). Nos recherches pour commander ces capteurs nous ont amenés à choisir le collier cervical Swallis DSA® (Figure 2), commercialisé par l'entreprise Swallis Medical. Ce collier contient un accéléromètre trois-axes et un microphone, ces deux capteurs ont une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz. Il permet une acquisition synchrone des signaux d'accélération et du son. Il présente l'avantage d'une certaine ergonomie en réunissant les deux capteurs d'intérêt au sein d'une même structure, sans interférence entre eux.

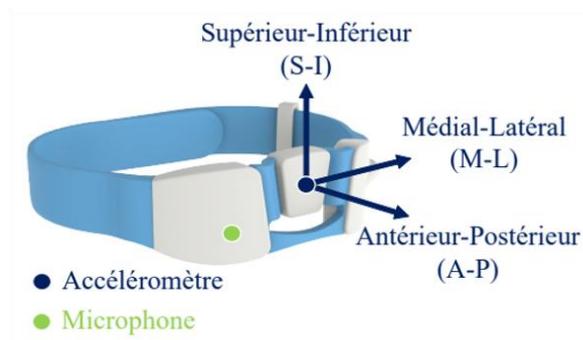


Figure 2 : Collier cervical Swallis DSA®, réunissant un microphone et un accéléromètre trois-axes.

Le DM a été testé sur un volontaire sain, dont les résultats n'ont pas été inclus dans l'étude, avant de commencer les inclusions. Les buts de ce test étaient :

- Vérifier la capacité des capteurs du DM à capter des données avec les tests prévus protocole de l'étude.
- Vérifier que la nasofibroscope n'était pas source d'artéfact pour les capteurs du DM.

Ce pré-test a été concluant : des signaux issus du microphone et l'accéléromètre ont bien été captés pendant les tests du protocole. Ces signaux étaient transférables et analysables sur ordinateur (Figure 3). Il n'y a pas eu de signe d'artéfact au niveau des capteurs lors du passage du nasofibroscope.

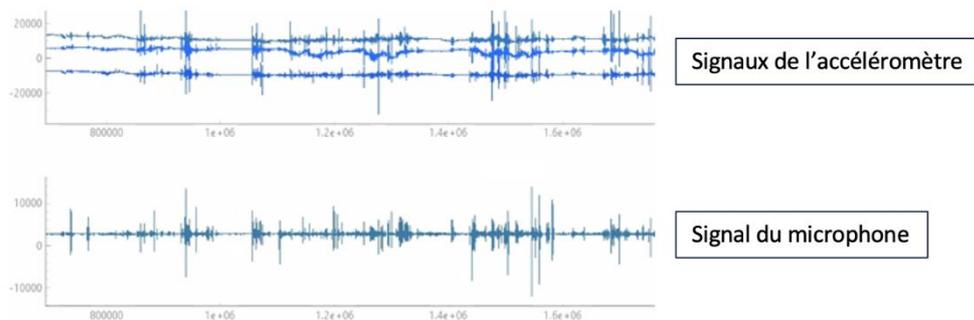


Figure 3 : Données issues des capteurs. 1<sup>re</sup> ligne : signaux de l'accéléromètre (3 lignes car l'accéléromètre a 3 axes). 2<sup>e</sup> ligne : signal du microphone. Ces signaux sont temporellement synchrones.

### **3. Recrutement et inclusion des patients et volontaires sains**

Notre protocole a prévu d'inclure des volontaires sains, ainsi que des patients atteints de divers types de pathologies affectant la fonction de déglutition, pour recueillir des données sur le plus de types de déglutition possible. Le recrutement des patients dysphagiques s'est fait lors de consultation relative à leurs soins, le recrutement des sujets sains à travers la diffusion d'une information relative à l'étude et parmi les accompagnants des patients dysphagiques.

#### **a. Critères d'inclusion**

Pour les patients ayant des troubles de la déglutition :

- Age > 18 ans
- Indication à réaliser un bilan de déglutition (trouble de déglutition suspecté ou avéré)
- Sujet affilié ou bénéficiaire du système de sécurité sociale
- Consentement de participation signé

Pour les volontaires sains :

- Mêmes critères, sauf : absence de trouble ou de gêne liée à la déglutition (Déglutition Handicap Index (DHI) < 8)

## b. Critères de non-inclusion

### Pour les patients ayant des troubles de la déglutition :

- Lésions cutanées au niveau cervical
- Trachéotomie ou trachéostomie
- Sonde nasogastrique
- Refus ou pathologie incompatible avec l'examen de référence (nasofibroscopie) ou un des capteurs utilisés
- Toute pathologie grave (état de santé ou trouble du comportement sévère) lorsque, selon l'investigateur, cela pourrait exposer les participants à des risques additionnels
- Protection juridique (tutelle, curatelle, sauvegarde de justice)
- Femmes enceintes (vérifié par un test de grossesse urinaire pour les femmes non ménopausées) et allaitantes

### Pour les volontaires sains :

- Lésions cutanées au niveau cervical
- Antécédent médical pouvant entraîner une altération de la déglutition de façon chronique (antécédents de cancer ORL ou de maladie neurologique) ou temporaire (infections des voies respiratoires supérieures)
- Présence d'un trouble ou d'une gêne liés à la déglutition (Score au DHI  $\geq$  8)
- Refus ou toute pathologie incompatible avec l'examen de référence ou un des capteurs utilisés
- Toute pathologie grave (état de santé ou trouble du comportement sévère) lorsque, selon l'investigateur, cela pourrait exposer les participants à des risques additionnels
- Protection juridique (tutelle, curatelle, sauvegarde de justice)
- Femmes enceintes (vérifié par un test de grossesse urinaire pour les femmes non ménopausées) et allaitantes

## **4. Tests prévus par le protocole**

Le sujet est en position assise sur un fauteuil de consultation, dans une pièce équipée du matériel nécessaire aux gestes de consultation et d'urgences ORL. Le protocole prévoit plusieurs bolus de volumes et consistances différentes à faire avaler au sujet. Ces différents bolus sont préparés à l'avance de façon standardisée. La consistance des produits à déglutir est mesurée selon la méthode préconisée par l'International Dysphagia Diet Standardisation Initiative (IDDSI). Les préparations sont ensuite colorées par du sirop de menthe pour faciliter leur visualisation en nasofibroscopie. Une fois ces produits préparés, le volume de chaque bolus est prélevé dans ces préparations à partir de seringues graduées.

Le DM est installé sur le cou du sujet, puis le nasofibroscope est introduit dans une des fosses nasales et poussé jusqu'au PL. Quand une bonne vision du PL obtenue, le patient réalise les tests prévus par le protocole : avaler successivement les bolus alimentaires qui lui sont présentés soit dans une cuillère, soit dans un verre :

- 3 ml d'IDDSI 2 (liquide épaissi), 3 fois
- 3 ml d'IDDSI 0 (liquide), 1 fois
- 5 ml d'IDDSI 0 (liquide), 1 fois
- 60 ml d'IDDSI 0 (liquide), 1 fois (*volume équivalent à un verre d'eau, nécessitant plusieurs déglutitions*)
- 3 ml d'IDDI 4 (liquide très épais), 1 fois
- 5 ml d'IDDI 4 (liquide très épais), 1 fois
- 10 ml d'IDDI 4 (liquide très épais), 1 fois

Les sujets sont amenés à parler pendant le protocole, pour livrer leurs impressions, ou poser des questions. De même, de potentielles toux peuvent être enregistrées, notamment chez les sujets dysphagiques.

Le sujet est équipé d'un oxymètre de pouls pendant les tests, permettant un monitoring de sa saturation en oxygène. En cas de fausse-route avec un Penetration-Aspiration Scale (PAS) = 8 (= le bolus pénètre dans les voies respiratoires, passe sous les cordes vocales et aucun effort de toux n'est fait pour l'éjecter), ou en cas de chute de la saturation de 3 points à 2 reprises, le protocole est stoppé pour éviter tout événement indésirable.

Les signaux détectés par les capteurs pendant les tests du protocole, et les images de la nasofibroscopie, sont enregistrés.

## **5. Méthode d'annotation des données**

Les données enregistrées par les capteurs du DM sont transférées et enregistrées sur un ordinateur. Pour annoter les enregistrements, nous avons choisi d'utiliser le logiciel libre ELAN (EUDICO Linguistic Anotator). Il s'agit d'un logiciel d'annotation audio et vidéo développé par le Max Plank Institute for Psycholinguistics au Pays-Bas. Ce logiciel permet d'avoir sur une même interface la vidéo de la nasofibroscopie, les données issues des capteurs, et le son enregistré par le DM (Figure 4). Cependant, ouvrir sur le logiciel la vidéo, le son et les données de tous les capteurs (le signal du microphone et les 3 signaux de l'accéléromètre) le rend extrêmement lent. Pour réaliser les annotations, nous n'avons pas mis les données de l'accéléromètre, uniquement celles du microphone, vidéo de la nasofibroscopie et le son.

Pour tous les sujets, les événements suivants ont été annotés : déglutition, phonation et toux. Une lecture au ralenti est possible sur le logiciel (10 vitesses différentes de lecture au ralenti disponibles) permettant d'améliorer la précision des annotations.

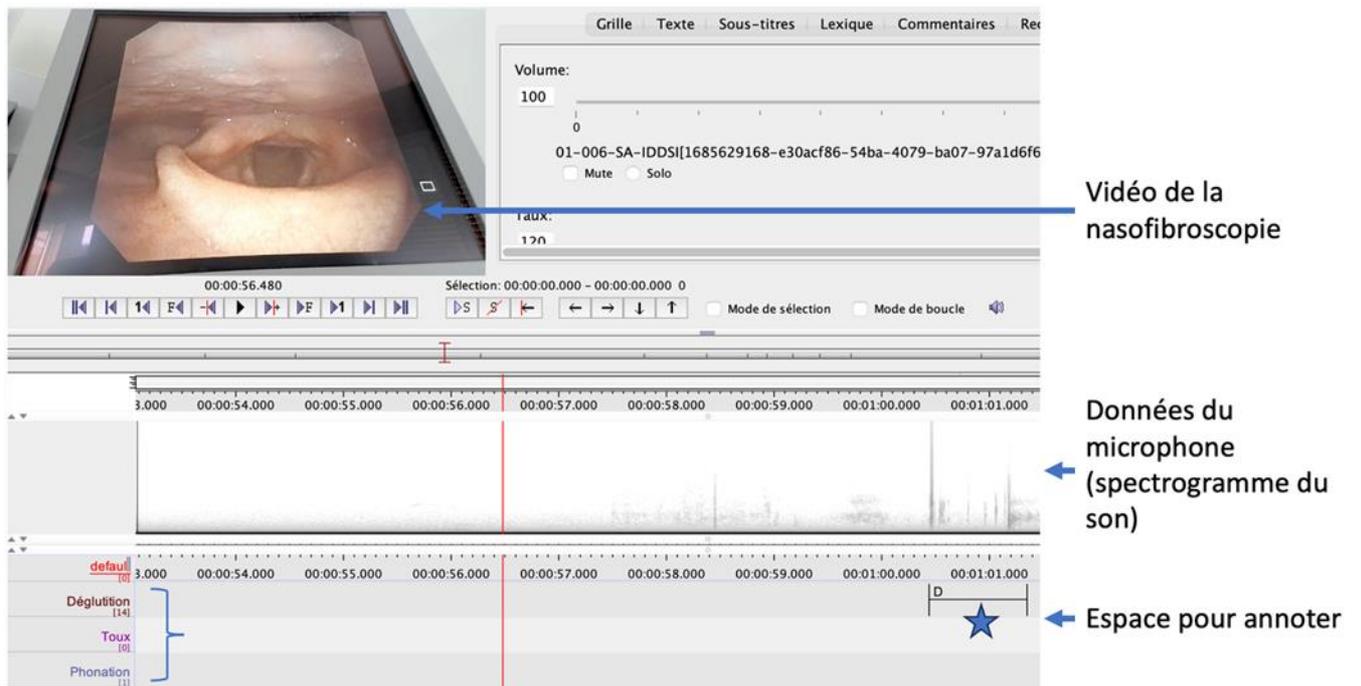


Figure 4 : Annotation sur le logiciel ELAN. La vidéo de la nasofibroscopie est en haut à gauche de l'écran, et défile en même temps que les données enregistrées sur le microphone. L'espace pour annoter permet d'annoter les événements choisis (ici dans l'accolade bleue « Déglutition », « Toux », « Phonation ».) L'étoile bleue montre l'annotation d'une déglutition.

#### a. Annotation des déglutitions

L'annotation de la phase pharyngée de la déglutition s'est faite avec la nasofibroscopie, dont la vidéo est présente sur l'interface du logiciel ELAN. Quand l'examineur repère une déglutition sur la vidéo de la nasofibroscopie, il visualise et analyse au moins 2 fois la séquence de la déglutition dans son ensemble avant de l'annoter. Une fois cette analyse faite, l'évaluateur place un premier curseur dans l'espace pour annoter au moment où il repère le début de la déglutition, puis place un deuxième curseur au moment où la déglutition prend fin (Figure 5). L'espace entre les 2 curseurs correspond à une déglutition annotée. Nous avons considéré pour l'annotation que le début d'une déglutition correspondait au moment où un recul de la base de langue était visible, ou en cas de base de langue non visible (nasofibroscope trop bas) au moment de la bascule de l'épiglotte. La fin d'une déglutition correspondait au moment où le plan glottique (ou les aryténoïdes si le plan glottique est non visible à cause de l'angle du nasofibroscope) redevenait visible.

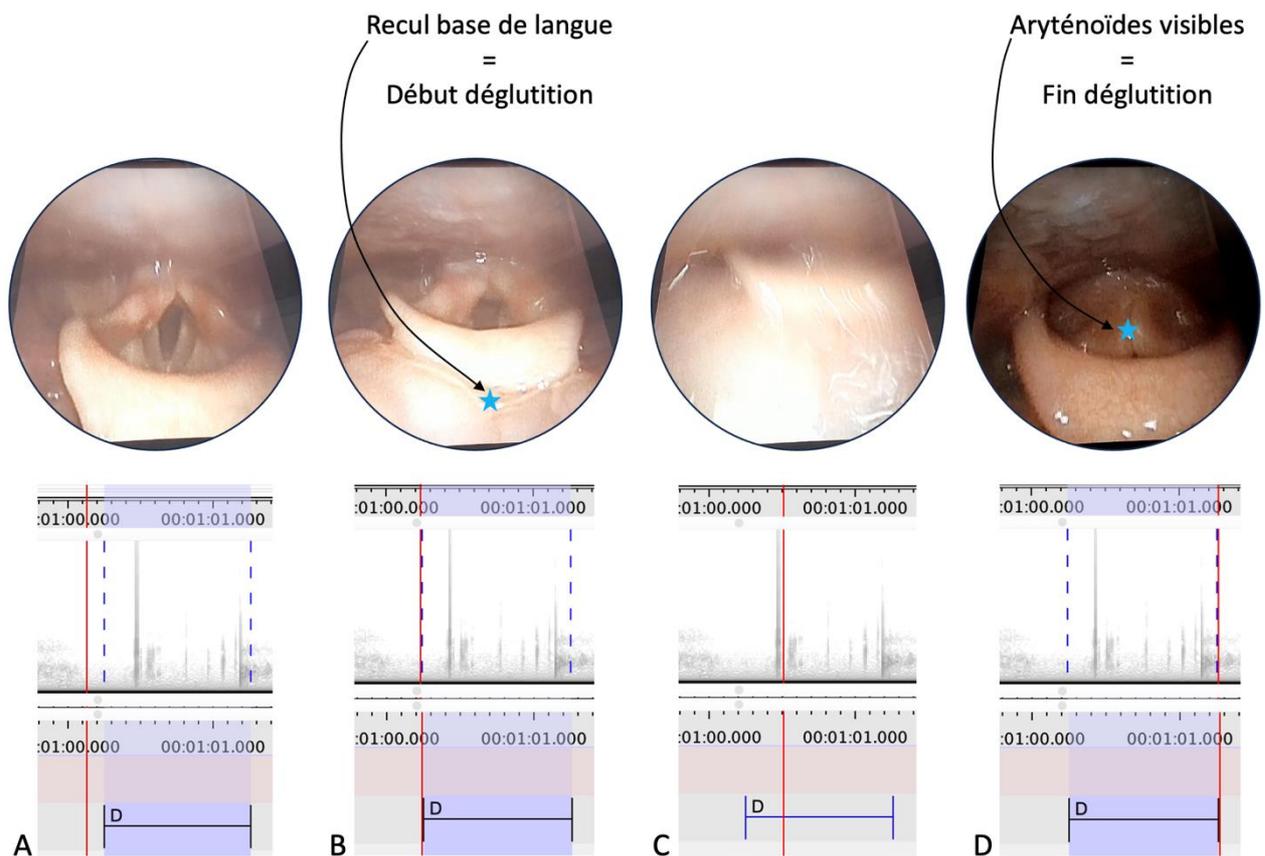


Figure 5 : Méthode d'annotation d'une déglutition, illustrée avec le cas d'un sujet. A : PL en position de repos, épiglotte non abaissée et cordes vocales ouvertes en semi-abduction. B : Début de recul de la base de langue, venant au contact de l'épiglotte qui commence sa bascule. Début de la déglutition qui est marquée par le premier curseur C : Épiglotte en pleine bascule D : Aryténoïdes redevenant visibles (le plan glottique est ici masqué par l'épiglotte). Fin de la déglutition, marquée par le deuxième curseur.

#### b. Annotation des phonations

Le son de la parole humaine est reconnaissable à l'oreille. Nous avons donc annoté les moments de phonation des sujets, à partir du son de l'enregistrement et du spectrogramme sonore. Un curseur a été placé au début et la fin de chaque phonation (Figure 6).

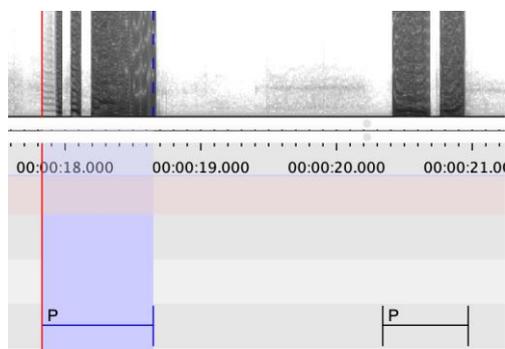


Figure 6 : Méthode d'annotation de la phonation, illustrée avec le cas d'un sujet. Les deux zones d'activités intenses sur le spectrogramme sonore correspondent à des moments où le sujet parle. Elles sont donc annotées comme des « phonations ».

### c. Annotation des toux

Les toux ont été annotées à partir du son de l'enregistrement, le son d'une toux étant lui aussi caractéristique et reconnaissable à l'oreille. Dès que le bruit d'une toux est entendu par l'examineur, il vérifie que ce son est associé avec une séquence rapide fermeture/ouverture du larynx, caractéristique d'une toux. Une fois cette vérification faite, un curseur est placé au début et à la fin de la toux sur le spectrogramme du son (Figure 7).

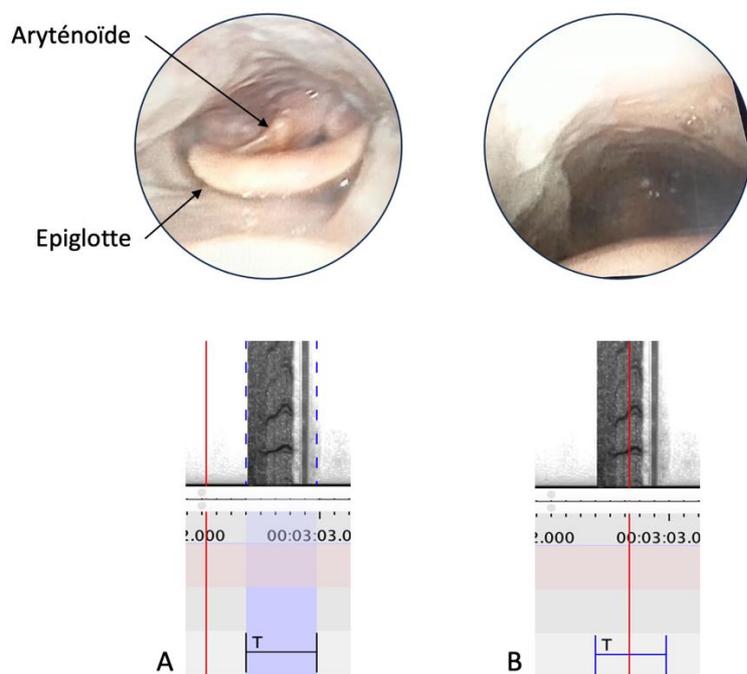


Figure 7 : Méthode d'annotation d'une toux, illustrée avec le cas d'un sujet. A : Moment juste avant la toux, le larynx est en position de repos, l'épiglotte non abaissée et les cordes vocales ouvertes en semi-abduction avec des aryténoïdes visibles. B : Toux, dont le son est caractéristique et reconnaissable à l'oreille humaine. La nasofibroskopie permet de vérifier qu'il y a bien la séquence rapide fermeture/ouverture du larynx, attendue lors d'une toux. On peut donc annoter le début et la fin de l'empreinte sonore comme une toux sur le spectrogramme.

## 6. Élaboration de l'algorithme et de ses statistiques

Tous les enregistrements annotés ont été transférés sur le serveur sécurisé OSIRIM de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (Unité mixte de recherche 5505, sous la tutelle du CNRS, UT3, UT2J, UT1, INP). J'ai intégré l'équipe SAMOVA pour pouvoir travailler avec ses chercheurs à la création de l'algorithme de notre étude.

La modélisation proposée des événements de déglutition, phonation et toux se base sur un modèle décrit en annexe (Annexe 2), qui utilise la plateforme Pyannotate. Le modèle proposé est de type « End-to-end », c'est-à-dire qu'il utilise une modélisation qui prend en entrée les signaux (microphone et accéléromètres) et qu'il produit directement une segmentation multilabel (D : Déglutition, P : Phonation, T : Toux). Le modèle est composé :

1. D'une première partie qui est un SincNet produisant une représentation vectorielle du signal en entrée. Il s'agit d'un réseau de neurone profond (DNN) qui produit une représentation du signal.
2. D'un modèle récurrent profond (RNN) de type Long Short Term Memory (LSTM) qui va modéliser les changements temporels apparaissant dans la représentation SincNet.

La plateforme Pyannote permet de réaliser les découpages de fenêtres d'analyse et d'alimenter l'apprentissage des modèles et la reconnaissance de chaque label (D, P, T). L'algorithme est programmé pour prendre une fenêtre d'analyse toutes les 0,625 ms. Les résultats des fenêtres sont fusionnés pour obtenir un résultat toutes les 10 ms, et donc produire une courbe toutes les 10 ms correspondant à la probabilité de chaque modèle. Nous en déduisons des segments correspondant au label quand cette probabilité dépasse 60 % pour le début du segment, et repasse en dessous de 50 % pour la fin du segment (Figure 8).

Avant le calcul du SincNet, les différents signaux sont moyennés et rééchantillonnés à 16 kHz (pour les besoins de la plateforme Pyannote utilisée). Au final, la réutilisation d'une plateforme issue à l'origine de la modélisation de locuteurs nous permet de réaliser la modélisation d'événements de déglutition, phonation et toux en bénéficiant de tous les outils créés pour traiter des signaux audio.

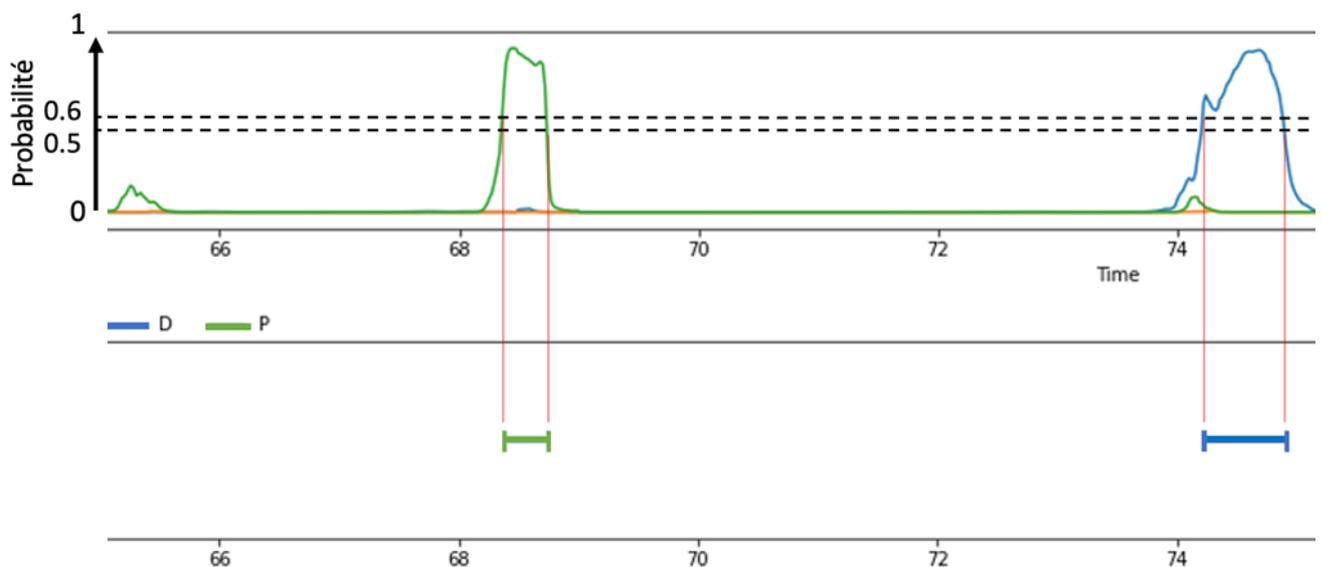


Figure 8 : Fonctionnement de l'algorithme. Les courbes dans la partie haute de la figure sont les probabilités pour chaque évènement (jaune : toux, vert : phonation, bleu : déglutition). Un évènement commence quand il atteint plus de 60 % de probabilité, et se termine quand sa probabilité passe à moins de 50 %. Les segments dans la partie basse de la figure correspondent aux annotations automatiques faites par l'algorithme.

Nous avons appliqué un protocole de validation croisée en 10 segmentations (pour chaque segmentation 18 sujets étaient utilisés pour l'auto-apprentissage, et 2 sujets pour le test). Les résultats finaux de l'algorithme correspondent au cumul des résultats de l'algorithme pour chaque sujet.

Les annotations automatiques de l'algorithme ont été comparées aux annotations de référence, trois cas étaient possible (Figure 9) :

- « HIT » signifie que l'évènement a été retrouvé avec succès par l'algorithme. Pour qu'il soit

considéré comme retrouvé par l'algorithme, il faut que l'intervalle entre l'annotation de référence et l'annotation de l'algorithme soit vide.

- « MISS » signifie que l'évènement a été raté par l'algorithme.
- « INSERT » signifie qu'un évènement a été créé à tort par l'algorithme.

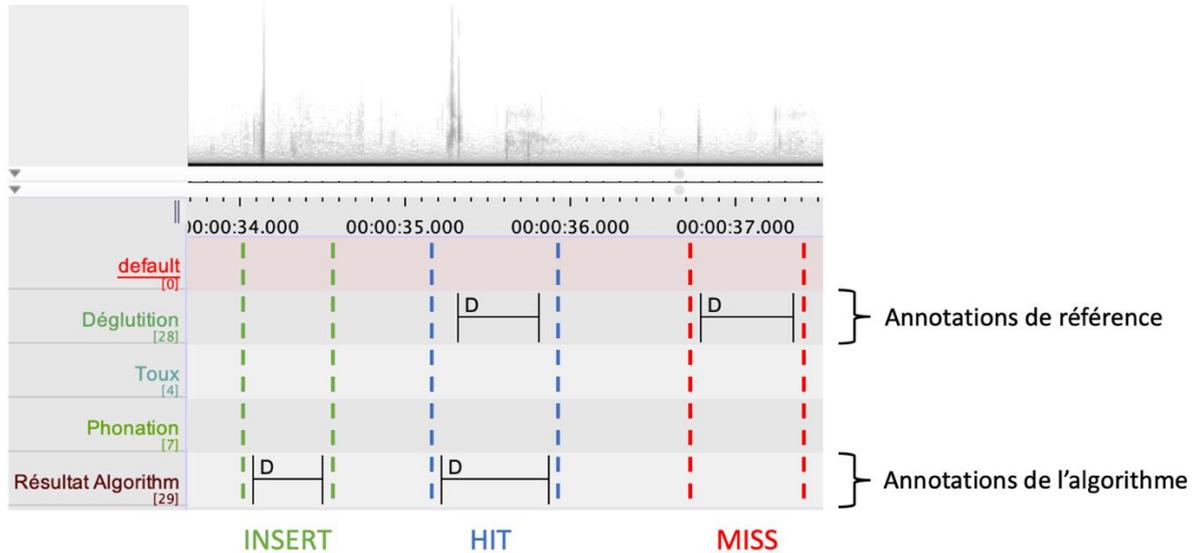


Figure 9 : Les 3 différents types de résultats de l'algorithme, exemple à partir de la lecture des signaux d'un sujet par l'algorithme. INSERT : évènement créé à tort par l'algorithme, HIT : évènement trouvé par l'algorithme, MISS : évènement raté par l'algorithme.

Dans les résultats finaux, le taux de reconnaissance et la précision sont définis par les formules suivantes :

$$\text{Taux de reconnaissance} = \frac{\text{Nombre de HIT}}{\text{Nombre d'évènements à trouver}}$$

$$\text{Précision} = \frac{(\text{Nombre de HIT} - \text{Nombre d'INSERT})}{\text{Nombre d'évènements à trouver}}$$

Une fois le modèle de l'algorithme créé, nous avons conçu plusieurs versions de l'algorithme en modifiant différents types de paramètres (nombre de cycles d'auto-apprentissage, fenêtre d'analyse) pour trouver la version la plus performante.

## IV. Résultats

### 1. Sujets de l'étude

Nous avons pu inclure 26 sujets dans le cadre de cette étude, correspondant à des patients atteints de diverses pathologies affectant la déglutition, et des volontaires sains. Les données de 6 d'entre eux n'ont pas pu être utilisées : 3 sujets ont vu leurs données effacées ou rendues inexploitable à cause d'un problème informatique, 2 sujets présentaient des déglutitions tellement pathologiques que leur annotation n'était pas possible ou très incertaine, et 1 sujet a présenté des sons de trop faible intensité pour permettre l'annotation. Trois groupes différents de type de sujets ont émergé de notre recrutement : les volontaires sains, les patients atteints de cancer ORL, les patients atteints de troubles neurologiques.

Nous avons pu exploiter les données de 20 sujets, dont les caractéristiques sont décrites dans le Tableau 1.

*Tableau 1 : Caractéristiques générales des sujets inclus et analysés dans l'étude. Moyenne  $\pm$  Standard deviation.*

N	20
Sexe (nombre de femmes, %)	15 (75 %)
Âge (années)	62,45 $\pm$ 15,98
Poids (kg)	68,85 $\pm$ 14,93
Taille (cm)	164,9 $\pm$ 8,16
Index de Masse Corporelle (kg/m <sup>2</sup> )	25,07 $\pm$ 3,82
Durée habituelle de repas (minutes)	32,25 $\pm$ 14,81
Mobilité pharyngo-laryngée présente (nombre de sujets, %)	8 (80 %)
Sensibilité pharyngo-laryngée présente (nombre de sujets, %)	17 (85 %)
DHI/120	34,4 $\pm$ 29,43
<b>Volontaires sains</b> (nombre de sujets, %, DHI moyen)	4 (20 %), DHI moyen : 0,25
<b>Patients atteints de cancer ORL</b> (nombre de sujets, %, DHI moyen)	5 (25 %), DHI moyen : 52,6
<b>Patients atteints de troubles neurologiques</b> (nombre de sujets, %, DHI moyen)	11 (55 %), DHI moyen : 38,5

*Légende : DHI : Deglutition Handicap Index.*

## 2. Résultats de l'algorithme

Les performances de l'algorithme, dont le but était la détection automatique des événements d'intérêt, sont résumées dans le Tableau 2. L'analyse des données d'un sujet par l'algorithme durait moins de 1 minute, contre plus de 30 minutes pour l'analyse humaine. Pour obtenir ces résultats, l'algorithme a dû analyser au total 6 769 600 fenêtres.

Tableau 2 : Performances de l'algorithme pour la détection des événements d'intérêt.

	HIT	MISS	INSERT (n)	PRÉCISION (%)
Déglutitions (n = 456)	80,04 % (n = 365)	19,96 % (n = 91)	78	62,93 %
Phonation (n = 189)	87,83 % (n = 166)	12,17 % (n = 23)	16	75,66 %
Toux (n = 41)	NA	NA	NA	NA

Légende : HIT : événement trouvé. MISS : événement non trouvé. INSERT : événement créé à tort par l'algorithme. NA : non applicable, l'algorithme n'a pas pu donner de résultats pour la toux.

Tous les MISS et INSERT des déglutitions ont été analysés en relisant les enregistrements annotés par l'algorithme, puis classés (Tableaux 3 et 4).

Tableau 3 : Analyse des MISS pour les déglutitions (déglutitions ratées par l'algorithme).

	Déglutition au son typique	Déglutition peu sonore	Déglutition au son atypique	Bruit parasite concomitant dans la salle (parole, bipper...)	Déglutition reconnue comme une parole	Déglutition reconnue comme une toux
VS	4	6	0	0	0	0
K ORL	19	17	5	2	1	1
Neuro	22	7	7	0	0	0
<b>Total 91 (100 %)</b>	<b>45 (49,4 %)</b>	<b>30 (33,0 %)</b>	<b>12 (13,2 %)</b>	<b>2 (2,2 %)</b>	<b>1 (1,1 %)</b>	<b>1 (1,1 %)</b>

Légende : VS : volontaires sains, K ORL : patients ayant eu un cancer ORL, Neuro : patients atteints de troubles neurologiques.

Tableau 4 : Analyse des INSERT pour les déglutitions (déglutitions inventées par l'algorithme).

	Mouvement du PL	Bruit parasite (frottement collier, téléphone, conversation...)	Déglutition masquée en fibro (salive, buée)	Déglutition ratée par l'examineur	Toux reconnue comme une déglutition	Phonation reconnue comme une déglutition	Expiration du sujet
VS	10	1	0	0	0	3	0
K ORL	6	3	2	4	1	0	0
Neuro	31	6	6	0	3	1	1
<b>Total 78 (100 %)</b>	<b>47 (60,3 %)</b>	<b>10 (12,8 %)</b>	<b>8 (10,3 %)</b>	<b>4 (5,1 %)</b>	<b>4 (5,1 %)</b>	<b>4 (5,1 %)</b>	<b>1 (1,3 %)</b>

Légende : VS : volontaires sains, K ORL : patients ayant eu un cancer ORL, Neuro : patients atteints de troubles neurologiques, Fibro : nasofibroscopie.

Plusieurs prototypes d'algorithmes ont été créés et successivement améliorés pour atteindre ces résultats sur la reconnaissance des déglutitions et des phonations avec l'algorithme final. Un premier prototype d'algorithmes, uniquement basé sur le son, a été modifié en modulant ces 2 paramètres : la taille de la fenêtre d'analyse du signal, et le nombre d'epoch (1 epoch = 1 cycle d'apprentissage de l'algorithme).

Les différents essais de taille de fenêtre, avec un epoch fixé à 50 et 100 cycles, nous ont amenés à conclure que 3 secondes étaient la meilleure valeur. Avec une fenêtre de 3 secondes, nous obtenions le meilleur compromis taux de reconnaissance/précision pour les epochs 50 et 100. Nous avons ensuite fait des tests avec différentes valeurs d'epoch et une fenêtre fixée à 3 secondes. Les meilleurs résultats étaient obtenus pour 95 epochs. Avec cette version (microphone seul), le taux de reconnaissance était de 65,41 % et la précision 15,96 %.

Une fois l'algorithme créé avec les données du microphone et les paramètres apportant les meilleurs résultats, nous avons pu rajouter dans le système les données de l'accéléromètre. Nous avons de nouveau cherché avec la même technique les paramètres donnant la meilleure version de l'algorithme (Figure 10). Les meilleurs résultats étaient obtenus avec une fenêtre de 3 secondes (Figure 10A et 10B) et 90 epochs (Figure 10C). Nous avons ainsi obtenu l'algorithme final dont les résultats sont exposés en début de chapitre. L'accéléromètre a fait gagner 14,63 % en reconnaissance des déglutitions, et 46,97 % en précision.

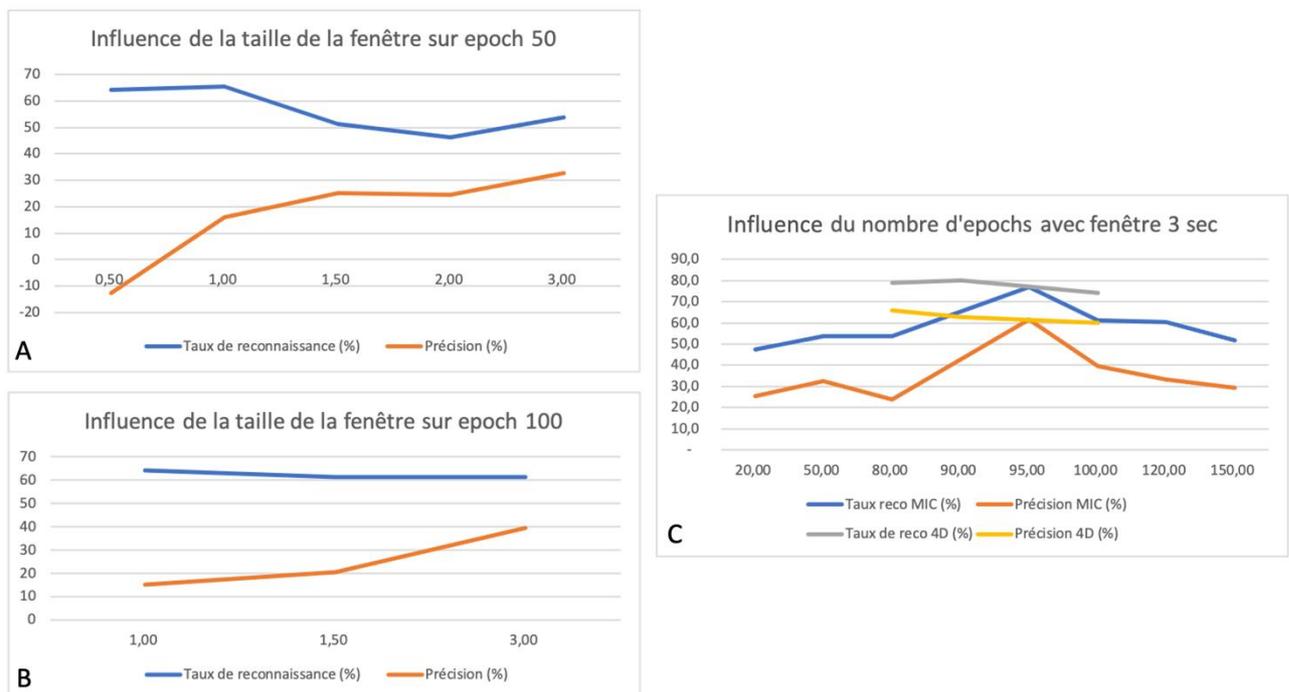


Figure 10 : Recherche des meilleurs paramètres pour l'algorithme. Sec : seconde. MIC : microphone. 4D : 4 dimensions (le microphone et l'accéléromètre trois-axes). 10C : les courbes jaune et grise sont celles de l'algorithme n'utilisant que les données du microphone. Les courbes bleue et orange sont les courbes de l'algorithme final regroupant les données du microphone et de l'accéléromètre.

### 3. Déroulement expérimental

Tous les sujets ont été soumis au même protocole et ont dû avaler dans le même ordre les différents bolus ou yaourt qui leur étaient présentés. Tous les bolus alimentaires ont été avalés dans leur intégralité par tous les sujets.

Aucun patient n'a présenté de fausse-route avec un Penetration-Aspiration Scale (PAS) = 8, ni de chute de la saturation de 3 points à 2 reprises. Le protocole n'a donc jamais été arrêté pour raison de sécurité pendant les tests. Aucun effet indésirable n'a été constaté pendant l'application du protocole sur les sujets de l'étude.

### 4. Évènements annotés sur les données

Avec les 20 sujets inclus, nous avons pu analyser au total 1 heure 10 minutes et 34 secondes d'enregistrements, pendant lesquels les sujets déglutissaient les différents bolus alimentaires, parlaient et parfois toussaient.

L'analyse des enregistrements a permis d'annoter au total 456 déglutitions, 189 phonations et 41 toux. Le nombre d'évènements annotés par sujet était variable, le détail pour chaque sujet est présenté dans le Tableau 5. Ces évènements ont également été classés par groupe de sujets dans le Tableau 6.

Tableau 5 : Évènements annotés pour chaque sujet.

Numéro du sujet	Déglutition	Phonation	Toux
1 (VS)	19	14	0
2 (VS)	14	1	0
3 (VS)	14	5	0
4 (VS)	10	11	0
5 (K ORL)	43	7	1
6 (K ORL)	29	15	0
7 (K ORL)	15	8	0
8 (K ORL)	30	6	14
9 (K ORL)	36	14	12
10 (Neuro)	40	24	0
11 (Neuro)	23	5	6
12 (Neuro)	21	12	0
13 (Neuro)	15	13	0
14 (Neuro)	16	15	0
15 (Neuro)	23	14	2
16 (Neuro)	30	11	0
17 (Neuro)	24	5	1
18 (Neuro)	28	7	4
19 (Neuro)	13	1	0
20 (Neuro)	14	2	1
Total	<b>456</b>	<b>189</b>	<b>41</b>
Moyenne ± SD	22,8 ± 9,50	9,45 ± 5,77	2,05 ± 4,02

Légende : VS : volontaire sains, K ORL : cancer de la sphère ORL, Neuro : trouble neurologique, SD : standard deviation.

Tableau 6 : Moyenne des événements  $\pm$  standard deviation par groupe de sujets.

	Déglutition	Phonation	Toux
Volontaires sains	14,25 $\pm$ 3,69	7,75 $\pm$ 5,85	0
Groupe neuro	22,45 $\pm$ 8,12	9,91 $\pm$ 6,74	1,27 $\pm$ 2,00
Groupe cancer ORL	30,4 $\pm$ 10,41	9,80 $\pm$ 3,90	5,4 $\pm$ 7,00

La durée moyenne des 456 déglutitions de l'étude était de 853,84  $\pm$  320,77 millisecondes (ms). La durée de toutes les déglutitions est représentée sur la Figure 11, la déglutition la plus courte durait 260 ms, la plus longue 2049 ms.

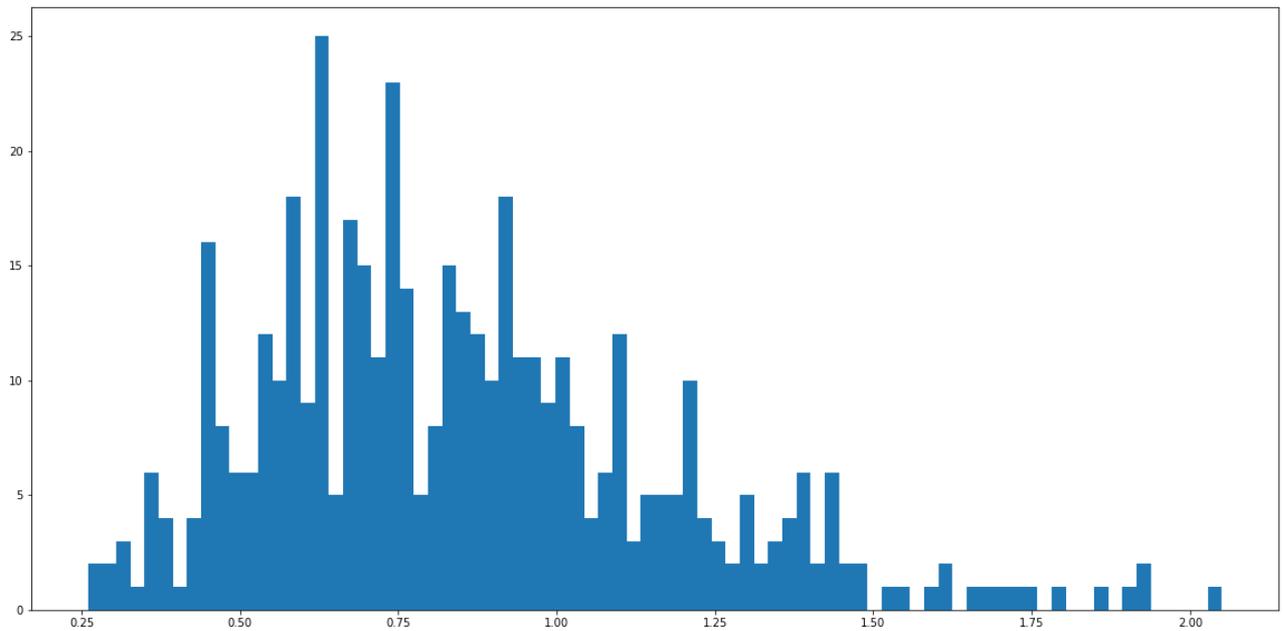


Figure 11 : Histogramme des durées des déglutitions. En abscisse : durée en seconde. En ordonnée : nombre de déglutitions.

## V. Discussion

### 1. Résultats de l'algorithme

#### a. Déglutitions

Un taux de reconnaissance des déglutitions de 80,04 %, avec une précision de 62,93 %, est satisfaisant au vu du nombre d'évènements utilisés pour l'auto-apprentissage de l'algorithme et devant le grand polymorphisme des déglutitions en termes de durée et de son (Annexe 3). Ces bons résultats ont été atteints malgré une forte proportion de sujets dysphagiques dans notre étude, renforçant le polymorphisme des déglutitions [33] à auto-apprendre et à reconnaître.

Nos résultats sont comparables à ceux publiés dans la littérature. Lee et al. [34] ont trouvé un taux de reconnaissance des déglutitions similaire dans leur étude (84,57 %), mais avec un algorithme utilisant ses images de radiocinéma, méthode irradiante et pratiquée uniquement en centre spécialisé. Olubanjo et al. [35] ont atteint un taux de reconnaissance des déglutitions proche du nôtre (79,9 %, précision : 67,6 %) en utilisant un microphone enregistrant les bruits cervicaux. Cette dernière étude n'avait cependant aucune méthode de référence pour vérifier les déglutitions, et n'a recruté que des sujets sains avec une déglutition normale.

On constate que 49,4 % des déglutitions non reconnues étaient « typiques » et donc a priori facilement reconnaissables par l'algorithme. Cette valeur souligne la nécessité de recueillir plus de données pour son auto-apprentissage. Nos résultats soulignent également le problème des déglutitions peu sonores, retrouvées notamment chez les patients pathologiques, et non reconnues par l'algorithme (33,0 % des MISS). L'ajout d'un capteur de type électromyogramme (EMG) pourrait permettre une nette amélioration dans leur reconnaissance. Les mouvements du PL sont altérés en cas de chirurgie ou radiothérapie cervicale, et leur bruit potentiellement diminué : dans notre étude, 56 % des déglutitions ratées car trop peu sonores appartiennent au groupe de sujets atteints de cancer ORL (seulement 20 % de l'effectif). La détection par l'EMG de l'énergie électrique des muscles pharyngo-laryngés, elle toujours présente, pourrait compenser la baisse du volume sonore de ces déglutitions pathologiques.

La majeure source de reconnaissance à tort de déglutition (faux positifs) est les mouvements du PL. Les séquences physiologiques fermeture/ouverture des cordes vocales sans parole, avec des mouvements aryténoïdiens, ont souvent été reconnues comme des déglutitions par l'algorithme. Il y a eu peu de confusion entre les déglutitions et les toux ou phonation, ce qui démontre la bonne capacité dont dispose l'algorithme à discriminer les évènements qui lui sont donnés à apprendre. Annoter les mouvements du PL et les inclure dans l'auto-apprentissage de l'algorithme pourrait lui permettre de mieux les reconnaître, et donc de ne pas les annoter à tort comme des déglutitions.

Plusieurs déglutitions ont été créées à tort par l'algorithme, ou masquées et non reconnues, à cause du bruit environnant. Les tests prévus par le protocole nécessitaient la présence de plusieurs personnes (médecins, infirmières, informaticien ou ingénieur au début des inclusions...). Cela a été à l'origine de bruits environnants (bips de téléphone, conversations, réponses aux questions du sujet...) venant artéfacter les signaux du microphone. Il ne semble cependant pas judicieux de demander le

silence pendant les prochains enregistrements. Le DM et son algorithme sont destinés à être utilisés à large échelle, notamment en EPHAD ou service de gériatrie. Il faut donc qu'ils composent avec ces sons parasites et apprennent à les reconnaître.

#### b. Phonations

La voix des sujets a été l'évènement le mieux reconnu par l'algorithme (plus de 87 %). Une meilleure reconnaissance de la voix par rapport à la déglutition était attendue, car la parole est facilement identifiable sur un spectrogramme sonore (Annexe 4). Ces bons résultats permettent d'envisager d'annoter spécifiquement les modifications de la voix lors des fausses-routes (voix mouillée). Le repérage par l'algorithme de la voix mouillée aiderait à la détection des fausses-routes silencieuses. Cet objectif semble atteignable au vu des données de la littérature, qui montrent d'excellents résultats en termes de reconnaissance vocale avec l'IA. Certaines études ont en effet produit des algorithmes suffisamment fins pour faire de la reconnaissance vocale avec succès malgré des accents étrangers [36], ou réussir à reconnaître automatiquement les émotions dans la voix humaine (dégoût, ennui tristesse, neutralité, bonheur) [37].

#### c. Toux

La toux est l'évènement le moins bien reconnu par l'algorithme, qui a réussi à en détecter quelques-unes, mais trop peu pour faire de réelles statistiques. Ce résultat peut s'expliquer par le faible nombre de toux utilisées pour l'auto-apprentissage, leur courte durée, et le caractère « explosif » du volume sonore d'une toux (Annexe 5) qui la rend complexe à modéliser et à faire auto-apprendre. Malgré les mauvais résultats de la reconnaissance de la toux, il est important de ne pas la retirer des évènements à rechercher : la présence d'une toux après une déglutition est un marqueur potentiel de fausse-route.

#### d. Auto-apprentissage

Les différentes versions créées de l'algorithme ont montré qu'un nombre élevé d'époques n'était pas systématiquement associé à une augmentation du taux de reconnaissance ou de la précision. Ce résultat est cohérent avec le fonctionnement de l'auto-apprentissage utilisant l'IA [38] : plus un algorithme a de cycles d'auto-apprentissage d'un jeu de données, moins il accepte ensuite de reconnaître des données différentes de celles apprises. Si une déglutition légèrement différente de celles auto-apprises par l'algorithme se présente, plus l'algorithme aura eu de cycles d'apprentissage, moins il y a de chance qu'il la reconnaisse (phénomène de sur-apprentissage, Figure 12). Il s'agit de trouver un équilibre entre suffisamment d'époques pour que l'algorithme parvienne à différencier les déglutitions des autres évènements, mais pas trop d'époques pour éviter que l'algorithme n'exclut pas les déglutitions qui sont légèrement différentes de celles utilisées pour son apprentissage.

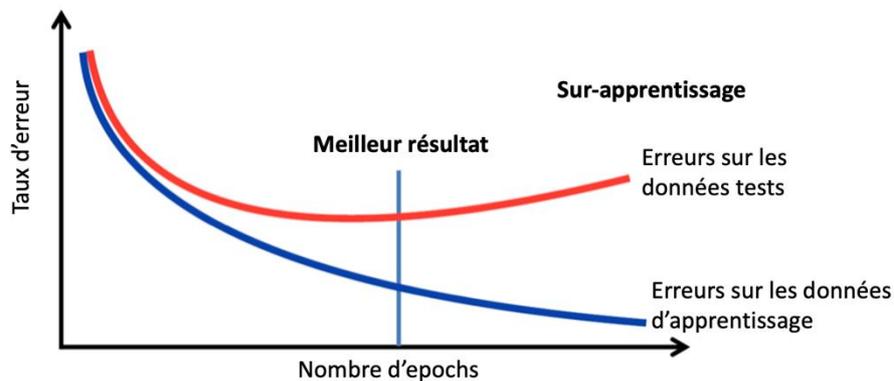


Figure 12 : Principe du sur-entraînement en intelligence artificielle. Figure originale conçue à partir des images de ericdatascience.wordpress.com.

#### e. Ajout de l'accéléromètre

Les données des accéléromètres ont fait gagner 14,63 % en reconnaissance des déglutitions, et 46,97 % en précision, à l'algorithme n'utilisant que le son. Cette forte augmentation de la précision avec les accéléromètres était attendue. Avec l'algorithme n'utilisant que le microphone, un son parasite ressemblant à une déglutition peut être reconnu à tort comme une déglutition. L'ajout de données des accéléromètres permet de constater l'absence de mouvement du PL, et donc de faire comprendre à l'algorithme que ce son ne correspond en réalité pas à une déglutition. L'apport des accéléromètres a donc eu plus d'impact sur l'élimination des fausses déglutitions que la reconnaissance des vraies déglutitions.

Les mouvements du PL, notamment les séquences fermeture/ouverture des cordes vocales sans parole, étaient la première cause d'INSERT de déglutitions par l'algorithme. Ces mouvements de cordes vocales sont réalisés dans un plan horizontal, soit dans l'axe antéro-postérieur de l'accéléromètre (Figure 2), or le mouvement du larynx lors d'une déglutition est dans l'axe supérieur-inférieur (élévation puis abaissement). Une nouvelle version de l'algorithme, sans les données de l'axe antéro-postérieur de l'accéléromètre, pourrait montrer une diminution du nombre d'INSERT de déglutitions.

## 2. Résultats des annotations

La durée moyenne des déglutitions de notre étude ( $853,30 \pm 320,77$ ) est cohérente avec les travaux de Morinière et al. [39,40] et Hennessey et al. [41], qui retrouvent, selon la consistance du bolus dégluti, une durée moyenne entre 628 et 710 ms chez des sujets sains. Notre durée moyenne de déglutition légèrement plus élevée s'explique par la présence d'une majorité de déglutitions issues de patients pathologiques.

Nous avons retrouvé un nombre très homogène d'évènements annotés en fonction des sujets. Cela n'est pas surprenant au vu des divers profils des sujets (volontaires sains, patients avec troubles de la déglutition), et de la forte variation interpersonnelle qui existe autour de la fonction de déglutition. Pour avaler un même bolus alimentaire, il faut une seule ou plusieurs déglutitions en fonction de l'âge et de l'état du sujet. Le nombre plus important de déglutitions dans les deux groupes

pathologiques, par rapport au groupe de sujets sains, est cohérent. Les troubles neurologiques et cancers ORL étant pourvoyeurs de troubles de déglutition [15–17], il est logique que, pour une même quantité à avaler les sujets pathologiques aient besoin de plus de déglutitions. De plus, les déglutitions spontanées, qui sont physiologiques, étaient également prises en compte et annotées. La fréquence des déglutitions spontanées est d'environ une déglutition par minute chez un sujet sain, fréquence qui augmente lors de la prise alimentaire et en cas de troubles de la déglutition [42]. Cela participe à expliquer le nombre très important de déglutitions retrouvées chez certains sujets pathologiques.

Aucune toux n'a été retrouvée dans le groupe des volontaires sains. Ce résultat était attendu, car une toux dans un contexte de repas est souvent en rapport avec une fausse-route, or un sujet sain ne présente théoriquement pas de fausse-route lors de l'alimentation.

L'exclusion de 2 sujets, à la déglutition trop pathologique pour être correctement annotée, ne constitue pas un biais à notre étude. En effet, notre outil est destiné à dépister les troubles de la déglutition dans les populations à risque. Or, les sujets ayant une déglutition très pathologique sortent du cadre du dépistage : ils sont naturellement détectés lors d'hospitalisation en rapport avec la dysphagie (inhalation, alimentation per os impossible), ou alors leur dysphagie était attendue dans le cadre d'une chirurgie cervicale délabrante.

## VI. Conclusion

Notre étude a mis en évidence qu'il était possible, à partir des données détectées par un microphone et un accéléromètre cervicaux chez 20 sujets, de créer un algorithme capable de reconnaître automatiquement les fonctions de déglutition et phonation du PL. L'analyse des données d'un sujet par l'algorithme était rapide, elle durait moins de 1 minute contre plus de 30 minutes pour l'analyse humaine.

Cette étude préliminaire est une première étape encourageante pour le développement d'un DM non invasif dépistant la dysphagie.

## VII. Perspectives

### 1. L'ajout de nouveaux capteurs et de leurs données dans l'algorithme

#### a. L'électromyogramme

Un EMG de surface en position sous-mentale (2 électrodes, une côté gauche et une côté droit) permettrait de capter l'activité électrique des muscles sous-mentaux (ventre antérieur du digastrique, génio-hyoïdien, mylo-hyoïdien) lors de la déglutition. Ces muscles se contractent et émettent un potentiel d'action nerveux lors d'une déglutition. Ce capteur améliorerait la détection des déglutitions et l'exclusion des bruits parasites.

#### b. La thermistance nasale

Une sonde de thermistance nasale capte les changements de température du flux d'air nasal, et les traduit en monitoring du cycle respiratoire (inspiration quand la température de l'air se refroidit, expiration quand la température de l'air se réchauffe). La déglutition est un processus se réalisant en apnée. Des signaux sonores ou nerveux ressemblant à une déglutition, mais concomitants à une phase d'inspiration ou expiration, pourront donc ne pas être reconnus comme une déglutition par l'algorithme.

#### c. L'oxymètre de pouls

L'oxymètre sur le lobule de l'oreille offre un monitoring en temps réel de la saturation en oxygène du sujet. Ce capteur pourrait permettre de repérer des fausses-routes, en détectant une baisse de la saturation en oxygène suite à une déglutition.

### 2. Un outil analysant le pharyngo-larynx dans sa globalité

À partir de ces 5 capteurs et d'un algorithme analysant leurs signaux, nous pourrions créer un DM détectant automatiquement les différentes fonctions du PL (déglutition, phonation, respiration, protection des voies aériennes). La poursuite des inclusions dans le cadre de l'étude Eph-L, avec au total 440 sujets prévus, offrira une très grande quantité de données pour l'auto-apprentissage de l'algorithme et augmentera sa précision. À terme, l'objectif serait que le DM détecte les fausses-routes, même silencieuses, et analyse si elles sont suivies ou non d'une toux protectrice. Ses capteurs étant non invasifs, et l'analyse automatique et rapide (de l'ordre de quelques secondes), cet outil sera adapté au dépistage à grande échelle de la dysphagie.

## VIII. Références

1. Kuhlemeier KV. Epidemiology and dysphagia. *Dysphagia*. 1994;9(4):209-17.
2. Mu L, Sobotka S, Chen J, Su H, Sanders I, Adler CH, et al. Altered pharyngeal muscles in Parkinson disease. *J Neuropathol Exp Neurol*. 2012;71(6):520-30.
3. Daniels SK, Brailey K, Priestly DH, Herrington LR, Weisberg LA, Foundas AL. Aspiration in patients with acute stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 1998;79(1):14-9.
4. Marik PE, Kaplan D. Aspiration pneumonia and dysphagia in the elderly. *Chest*. 2003;124(1):328-36.
5. Blitzer A. Approaches to the patient with aspiration and swallowing disabilities. *Dysphagia*. 1990;5(3):129-37.
6. Power ML, Hamdy S, Singh S, Tyrrell PJ, Turnbull I, Thompson DG. Deglutitive laryngeal closure in stroke patients. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2007;78(2):141-6.
7. Starmer H, Gourin C, Lua LL, Burkhead L. Pretreatment swallowing assessment in head and neck cancer patients. *The Laryngoscope*. 2011;121(6):1208-11.
8. Ickenstein GW, Riecker A, Höhlig C, Müller R, Becker U, Reichmann H, et al. Pneumonia and in-hospital mortality in the context of neurogenic oropharyngeal dysphagia (NOD) in stroke and a new NOD step-wise concept. *J Neurol*. 2010;257(9):1492-9.
9. Sherman V, Greco E, Martino R. The Benefit of Dysphagia Screening in Adult Patients With Stroke: A Meta-Analysis. *J Am Heart Assoc Cardiovasc Cerebrovasc Dis*. 5 2021;10(12):e018753.
10. Duncan S, McAuley DF, Walshe M, McGaughey J, Anand R, Fallis R, et al. Interventions for oropharyngeal dysphagia in acute and critical care: a systematic review and meta-analysis. *Intensive Care Med*. 2020;46(7):1326-38.
11. Doan TN, Ho WC, Wang LH, Chang FC, Nhu NT, Chou LW. Prevalence and Methods for Assessment of Oropharyngeal Dysphagia in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Clin Med*. 2022;11(9):2605.
12. Poulsen SH, Rosenvinge PM, Modlinski RM, Olesen MD, Rasmussen HH, Holst M. Signs of dysphagia and associated outcomes regarding mortality, length of hospital stay and readmissions in acute geriatric patients: Observational prospective study. *Clin Nutr ESPEN*. 1 2021;45:412-9.
13. Carnaby-Mann G, Crary M. Pill swallowing by adults with dysphagia. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 2005;131(11):970-5.
14. Farri A, Accornero A, Burdese C. Social importance of dysphagia: its impact on diagnosis and therapy. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2007;27(2):83-6.
15. González-Fernández M, Ottenstein L, Atanelov L, Christian AB. Dysphagia after Stroke: an Overview. *Curr Phys Med Rehabil Rep*. 2013;1(3):187-96.
16. Panebianco M, Marchese-Ragona R, Masiero S, Restivo DA. Dysphagia in neurological diseases: a literature review. *Neurol Sci Off J Ital Neurol Soc Ital Soc Clin Neurophysiol*. 2020;41(11):3067-73.
17. Hutcheson KA, Nurgalieva Z, Zhao H, Gunn GB, Giordano SH, Bhayani MK, et al. Two-year prevalence of dysphagia and related outcomes in head and neck cancer survivors: An updated SEER-Medicare analysis. *Head Neck*. 2019;41(2):479-87.
18. Goepfert RP, Fuller CD, Gunn GB, Hanna EY, Lewin JS, Zaveri JS, et al. Symptom burden as a driver of decisional regret in long-term oropharyngeal carcinoma survivors. *Head Neck*. 2017;39(11):2151-8.
19. Ramsey D, Smithard D, Kalra L. Silent Aspiration: What Do We Know? *Dysphagia*. 2005;20(3):218-25.
20. Garon BR, Sierzant T, Ormiston C. Silent aspiration: results of 2,000 video fluoroscopic evaluations. *J Neurosci Nurs J Am Assoc Neurosci Nurses*. 2009;41(4):178-85/
21. Wirth R, Dziewas R, Beck AM, Clavé P, Hamdy S, Heppner HJ, et al. Oropharyngeal dysphagia in older persons – from pathophysiology to adequate intervention: a review and summary of an

- international expert meeting. *Clin Interv Aging*. 2016;11:189-208.
22. Nacci A, Ursino F, La Vela R, Matteucci F, Mallardi V, Fattori B. Fiberoptic endoscopic evaluation of swallowing (FEES): proposal for informed consent. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2008;28(4):206-11.
  23. Hwang SH, Park CS, Kim BG, Cho JH, Kang JM. Topical anesthetic preparations for rigid and flexible endoscopy: a meta-analysis. *Eur Arch Oto-Rhino-Laryngol Off J Eur Fed Oto-Rhino-Laryngol Soc EUFOS Affil Ger Soc Oto-Rhino-Laryngol - Head Neck Surg*. 2015;272(2):263-70.
  24. Aviv JE, Kaplan ST, Thomson JE, Spitzer J, Diamond B, Close LG. The safety of flexible endoscopic evaluation of swallowing with sensory testing (FEESST): an analysis of 500 consecutive evaluations. *Dysphagia*. 2000;15(1):39-44.
  25. Bonilha HS, Huda W, Wilmskoetter J, Martin-Harris B, Tipnis SV. Radiation risks to adult patients undergoing Modified Barium Swallow Studies. *Dysphagia*. 2019;34(6):922-9.
  26. Maxim LD, Niebo R, Utell MJ. Screening tests: a review with examples. *Inhal Toxicol*. 2014;26(13):811-28.
  27. Comment évaluer a priori un programme de dépistage ? Haute Autorité de Santé. 2023.
  28. Kang YA, Kim J, Jee SJ, Jo CW, Koo BS. Detection of voice changes due to aspiration via acoustic voice analysis. *Auris Nasus Larynx*. 2018;45(4):801-6.
  29. Sampaio M, Argolo N, Melo A, Nóbrega AC. Wet voice as a sign of penetration/aspiration in Parkinson's disease: does testing material matter? *Dysphagia*. 2014;29(5):610-5.
  30. Martin-Harris B. Clinical implications of respiratory–swallowing interactions. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*. 2008;16(3):194-9.
  31. Britton D, Roeske A, Ennis SK, Benditt JO, Quinn C, Graville D. Utility of Pulse Oximetry to Detect Aspiration: An Evidence-Based Systematic Review. *Dysphagia*. 2018;33(3):282-92.
  32. Verde L, De Pietro G, Ghoneim A, Alrashoud M, Al-Mutib KN, Sannino G. Exploring the Use of Artificial Intelligence Techniques to Detect the Presence of Coronavirus Covid-19 Through Speech and Voice Analysis. *IEEE Access*. 2021;9:65750-7.
  33. Matsuo K, Palmer JB. Anatomy and Physiology of Feeding and Swallowing – Normal and Abnormal. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2008;19(4):691-707.
  34. Lee KS, Lee E, Choi B, Pyun SB. Automatic Pharyngeal Phase Recognition in Untrimmed Videofluoroscopic Swallowing Study Using Transfer Learning with Deep Convolutional Neural Networks. *Diagn Basel Switz*. 2021;11(2):300.
  35. Olubanjo T, Ghovanloo M. Tracheal activity recognition based on acoustic signals. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf*. 2014;1436-9.
  36. Zhang C, Tan T. Voice disguise and automatic speaker recognition. *Forensic Sci Int*. 2008;175(2-3):118-22.
  37. Shen P, Changjun Z, Chen X. Automatic Speech Emotion Recognition using Support Vector Machine. In: *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. 2011. p. 621-5.
  38. Ying X. An Overview of Overfitting and its Solutions. *J Phys Conf Ser*. févr 2019;1168(2):022022.
  39. Morinière S, Beutter P, Boiron M. Sound component duration of healthy human pharyngoesophageal swallowing: a gender comparison study. *Dysphagia*. 2006;21(3):175-82.
  40. Morinière S, Boiron M, Alison D, Makris P, Beutter P. Origin of the sound components during pharyngeal swallowing in normal subjects. *Dysphagia*. 2008;23(3):267-73.
  41. Hennessey NW, Fisher G, Ciccone N. Developmental changes in pharyngeal swallowing acoustics: a comparison of adults and children. *Logoped Phoniatr Vocol*. 2018;43(2):63-72.
  42. Dodds WJ, Stewart ET, Logemann JA. Physiology and radiology of the normal oral and pharyngeal phases of swallowing. *AJR Am J Roentgenol*. 1990;154(5):953-63.

## IX. Annexes

### Annexe 1 : résultats de la revue de littérature.

Les mots clefs tapés dans la barre de recherche de PubMed devaient nous permettre de trouver les articles traitant d'au moins une des fonctions du PL, avec une notion de détection/observation à l'aide d'un capteur ou d'un autre instrument, et de manière non invasive. Nous avons donc utilisé les mots clefs suivants pour notre recherche d'articles : « sensor OR instrument OR device » AND « assessment OR evaluation OR detection OR observation » AND « swallowing OR respiration OR breathing OR coughing OR airway protection OR phonation OR voice ». La méthode PRISMA a permis de retenir 116 articles dans cette revue de la littérature.

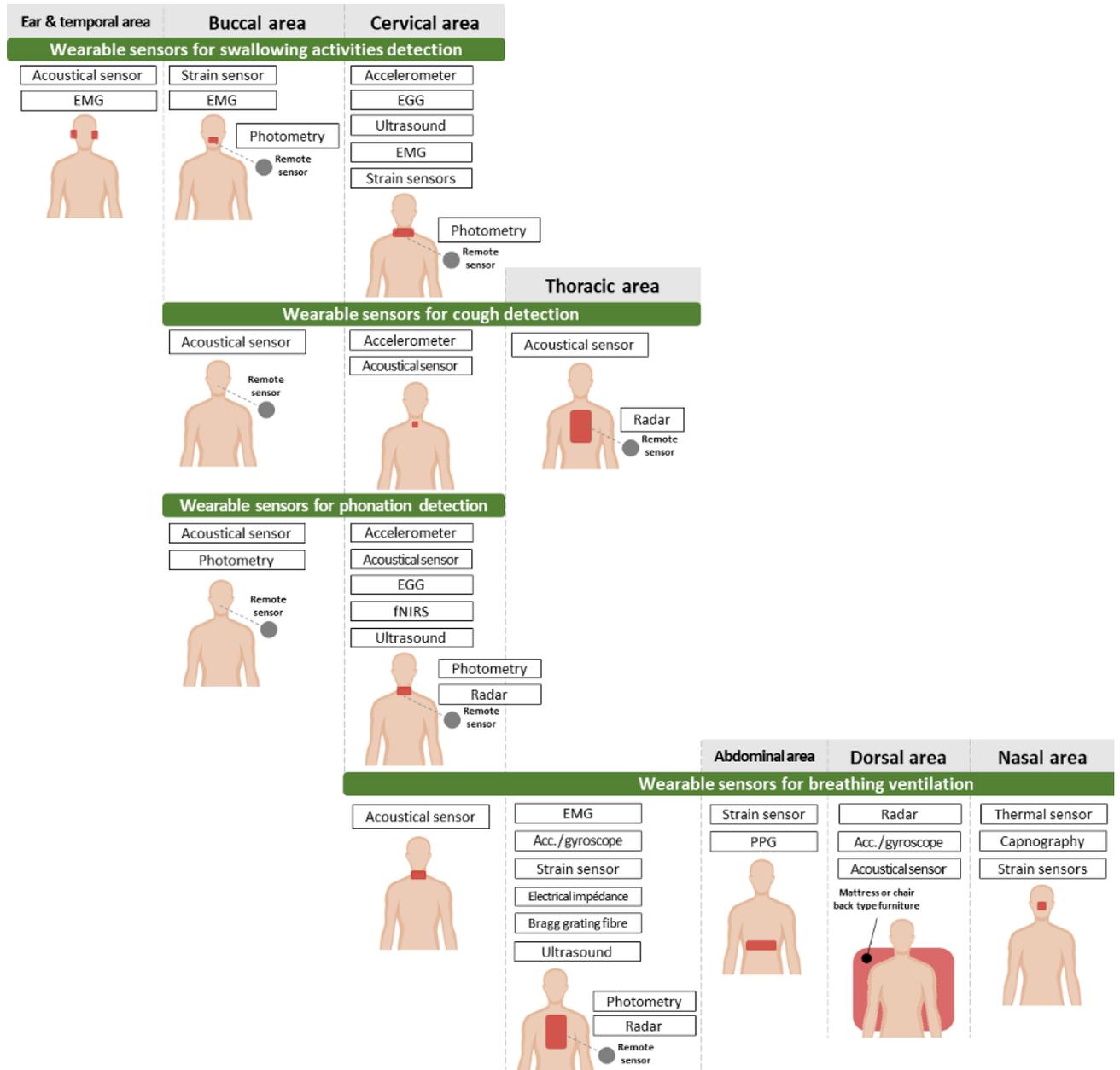
#### 1. Tableau récapitulant tous les types de capteurs non invasifs et le paramètre pharyngo-laryngé détecté

Domaine technologique	Ex. de capteur cités	Fonctions pharyngo-laryngées				
		Déglutition	Protection VA	Phonation	Respiration	
					Cycle respi.	Etat respi.
Analyse vidéo	Photométrie avec traitement d'image, motion tracking	2	0	1	11	0
Electromyographie	EMG de surface	7	0	0	6	0
Acoustique	Microphone, stéthoscope	12	4	7	7	0
Capteurs de contraintes	Résistance à capteur de force, capteur de flexion, capteur d'étirement, pléthysmographie d'inductance, tensiomètre, transducteur de capteur de débit d'air	7	0	0	17	0
Centrale à inertie	Accéléromètre, gyroscope	14	1	5	7	0
Impédance électrique	EKG, tomographie à impédance électrique	2	0	3	11	0
Ultrason	Echographe	4	0	3	7	0
Impédance électro-magnétique	Radar, GEMS	0	1	2	15	0
Capnographie	Capnographe	0	0	0	3	0
Capteurs thermiques	Thermistance, thermomètre infrarouge	0	0	0	6	0
Autres instruments spectroscopiques	Fibre à réseau de Bragg, PPG, oxymètre, vidéocapillaroscopie	0	0	1	15	15

*Légende : VA : voies aériennes, EMG : électromyogramme, EKG : électroglottographe, GEMS : glottal electromagnetic micropower sensor, PPG : photopléthysmographie, respi : respiratoire.*

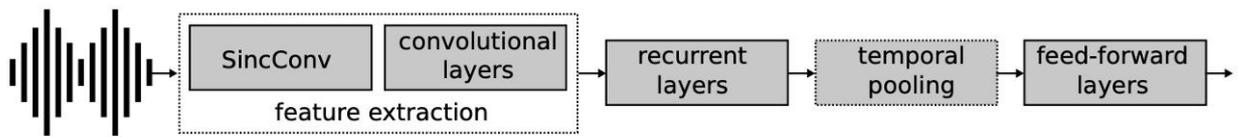
*NB : la somme des valeurs dans le tableau est de 196 même si 116 articles ont été inclus, car certains articles sont retrouvés pour plusieurs fonctions du pharyngo-larynx.*

2. Figure résumant le positionnement des différents types de capteurs retenus dans la revue de la littérature. La région cervico-faciale étant étroite, il est important d'anticiper la position de chaque capteur en cas de combinaison de plusieurs capteurs.



Légende : EMG : électromyogramme. EGG : électroglottographe. fNIRS : functional near-infrared spectroscopy. Acc : accéléromètre. On note que de nombreux capteurs doivent se placer sur la région cervico-faciale.

**Annexe 2 : architecture de la modélisation de l'algorithme.**



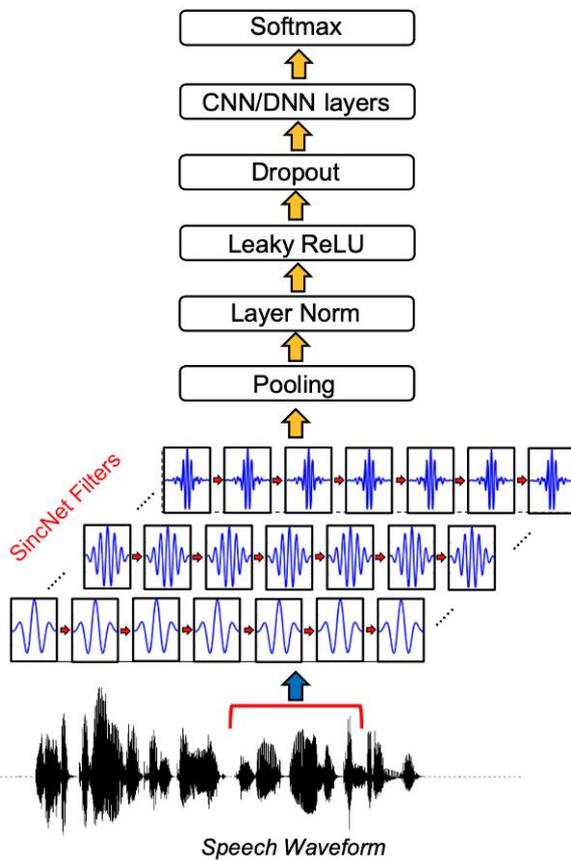
A

	Name	Type	Params	In sizes	Out sizes
0	sincnet	SincNet	42.6 K	[1, 1, 48000]	[1, 60, 175]
1	lstm	LSTM	589 K	[1, 175, 60]	[[1, 175, 256], [[4, 1, 128], [4, 1, 128]]]
2	linear	ModuleList	49.4 K	?	?
3	classifier	Linear	387	[1, 175, 128]	[1, 175, 3]
4	activation	Sigmoid	0	[1, 175, 3]	[1, 175, 3]
5	validation_metric	MetricCollection	0	?	?

682 K	Trainable params
0	Non-trainable params
682 K	Total params
2.729	Total estimated model params size (MB)

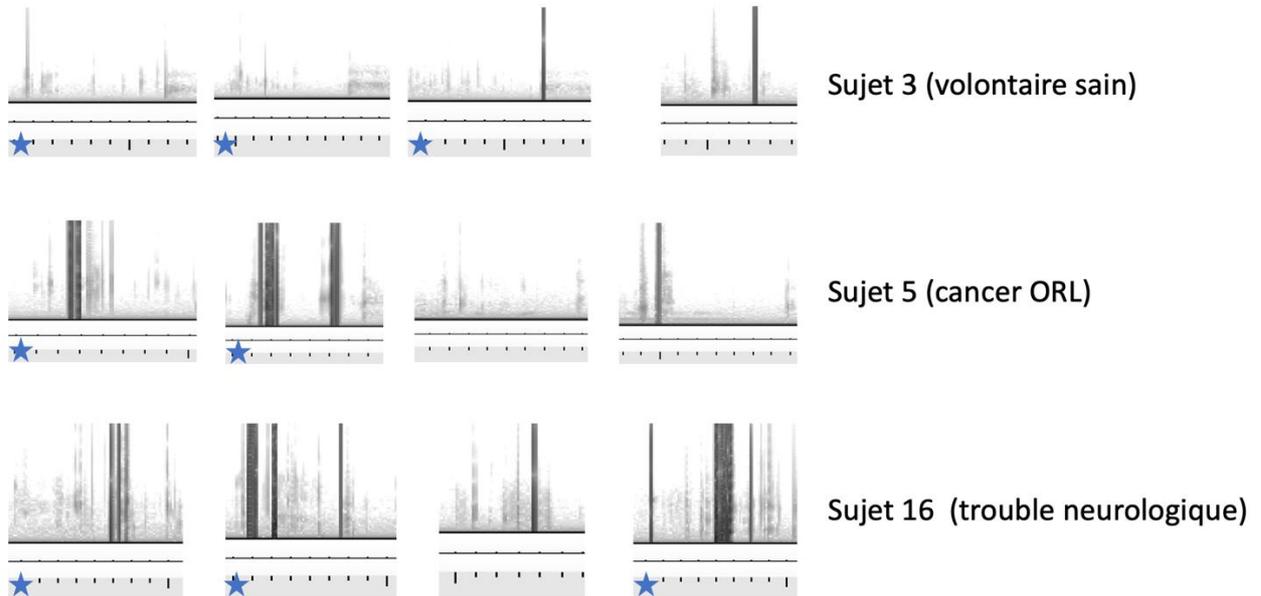
B



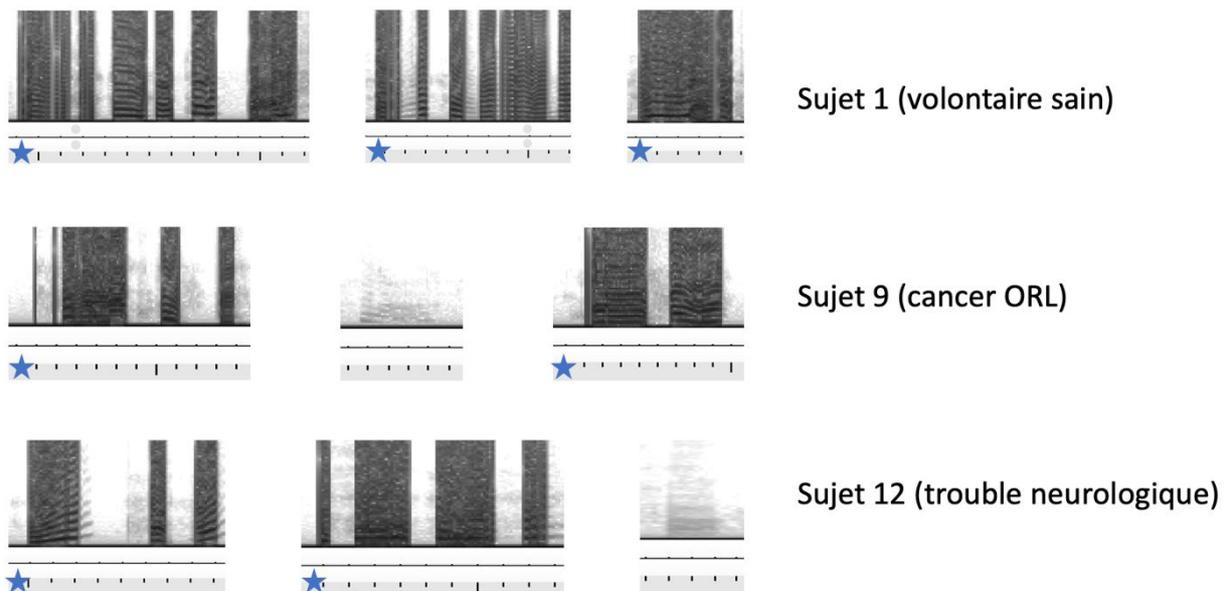
C

Légende : A : Architecture générale du système. B : Nombre de paramètres du système. C : Modélisation SincNet. Figure originale conçue à partir des illustrations de Ravanelli et al. (2018) et Bredin et al. (2019).

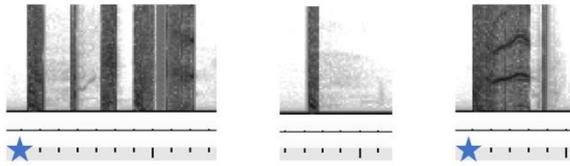
**Annexe 3 :** polymorphisme des déglutitions sur le spectrogramme du son. Cette annexe montre 12 déglutitions de notre étude, celles retrouvées avec succès par l'algorithme sont marquées par une étoile bleue. On remarque l'important polymorphisme des déglutitions (entre les différents sujets, et chez un même sujet) avec lequel a dû composer notre algorithme.



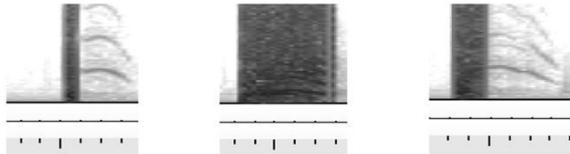
**Annexe 4 :** polymorphisme des phonations sur le spectrogramme du son. Cette annexe montre 9 phonations de notre étude, celles retrouvées avec succès par l'algorithme sont marquées par une étoile bleue. On note un polymorphisme moins important qu'avec les déglutitions.



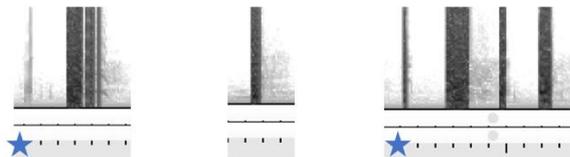
**Annexe 5** : polymorphisme des toux sur le spectrogramme du son. Cette annexe montre 9 toux de notre étude, celles retrouvées avec succès par l'algorithme sont marquées par une étoile bleue. On remarque une certaine proximité dans la forme du signal sonore avec les phonations.



Sujet 8 (cancer ORL)

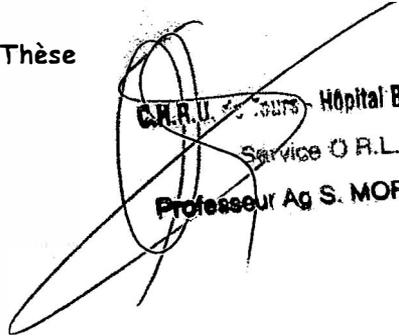


Sujet 9 (cancer ORL)



Sujet 18 (trouble neurologique)

Vu, le Directeur de Thèse

  
C.H.U. de Tours Hôpital Bretonneau  
Service O.R.L.  
Professeur Ag S. MORINIÈRE

Vu, le Doyen  
De la Faculté de Médecine de Tours  
Tours, le

## BAQUÉ Jean

43 pages – 6 tableaux – 12 figures

### Résumé :

**Introduction.** La dysphagie est un problème de santé publique. L'élaboration d'un dispositif médical détectant les patients dysphagiques, de manière non invasive et rapide, permettrait leur prise en charge précoce avec un bénéfice médical et économique. La mise au point d'un algorithme détectant automatiquement les déglutitions et phonations, à partir des sons et accélérations du pharyngo-larynx, serait la première étape pour envisager à terme la création d'un dispositif médical dépistant la dysphagie.

**Objectif.** Le but de cette étude était de développer un dispositif médical non invasif, détectant automatiquement les fonctions de déglutition et de phonation du pharyngo-larynx.

**Matériel et méthode.** Nous avons utilisé deux capteurs cervicaux non invasifs, un microphone et un accéléromètre, pour recueillir des données sur les sons et accélérations du pharyngo-larynx. Vingt sujets (volontaires sains et patients dysphagiques) ont été inclus, pour réaliser des tests permettant de les faire déglutir et parler, avec les capteurs cervicaux en place et sous contrôle de la nasofibroscopie. Les événements d'intérêt, déglutitions, phonations et toux, ont été annotés sur les signaux issus des capteurs, à partir des images de la nasofibroscopie et du son. Les signaux annotés ont été utilisés pour réaliser l'auto-apprentissage d'un algorithme, fonctionnant avec le principe d'intelligence artificielle, qui avait pour but de reconnaître automatiquement les déglutitions, phonations et toux.

**Résultats.** L'algorithme a atteint un taux de reconnaissance de 80,04 % (précision = 62,93 %) pour les déglutitions, et de 87,83 % (précision = 75,66 %) pour les phonations. L'analyse des données d'un sujet par l'algorithme durait moins de 1 minute, contre plus de 30 minutes pour l'analyse humaine.

**Conclusion.** Notre dispositif médical, associant deux capteurs cervicaux non invasifs et un algorithme, a permis de détecter automatiquement les fonctions de déglutition et de phonation du pharyngo-larynx. La poursuite des inclusions de sujets, et l'ajout d'autres capteurs tels que l'électromyogramme et le saturo-mètre, rendront le dispositif médical plus performant et pourraient lui permettre de détecter les toux et les fausses-routes. Il deviendrait alors utilisable pour dépister la dysphagie à grande échelle.

**Mots clés :** déglutition, dysphagie, pharyngo-larynx, fausses-routes, acoustique

### Jury :

Président du Jury : Professeur David BAKHOS  
Directeur de thèse : Professeur Sylvain MORINIÈRE  
Membres du Jury : Professeur Virginie WOISARD  
Docteur Franck MARMOUSET  
Monsieur Jérôme FARINAS