

Conception de la commande d'un système d'occlusion de la trachée pour un larynx artificiel implantable actif



Présenté par:

Adrien Mialland

Directrice de thèse:

Agnès Bonvilain

Médecin ORL:

Ihab Atallah

Laboratoire d'accueil :

Grenoble Image Parole Signal Automatique (Gipsa-Lab)
Université Grenoble Alpes (UGA)

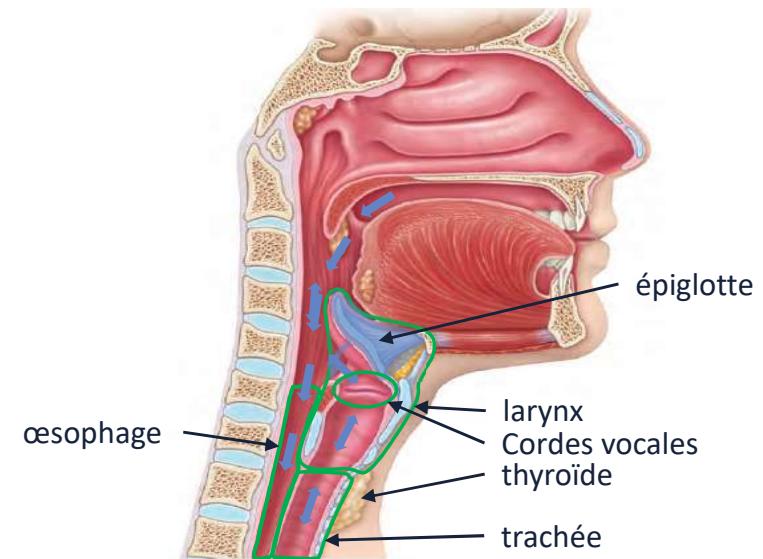
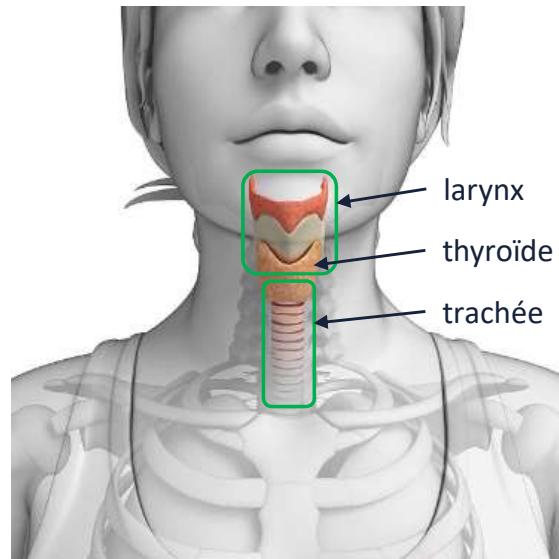


Plan de la présentation

1. Contexte
2. Protocole de Recherche Clinique (PRC)
3. Étude statistique
4. Détection temps réel
5. Larynx Artificiel Implantable Actif (LAIA)
6. Conclusion et perspectives



1. Contexte - Le larynx

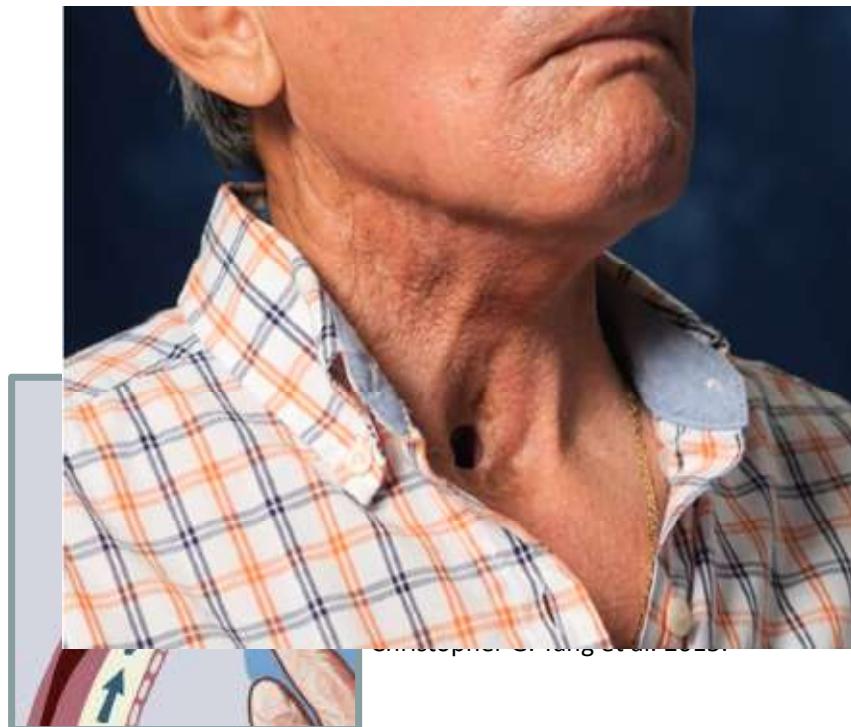


E. Maried et al. 2013

3 principales fonctions:

Respiration - Déglutition - Phonation

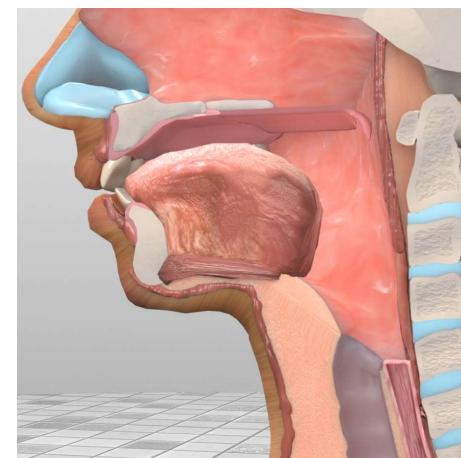
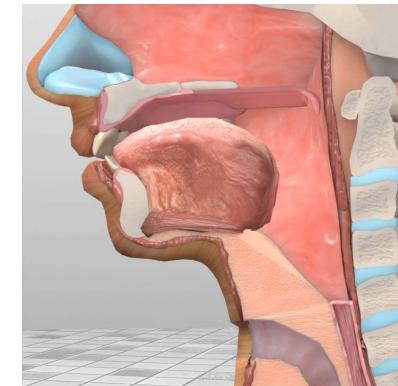
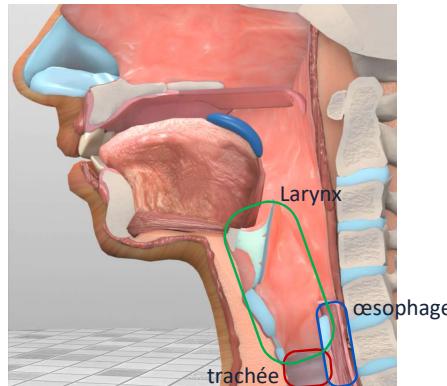
1. Contexte - La laryngectomie totale



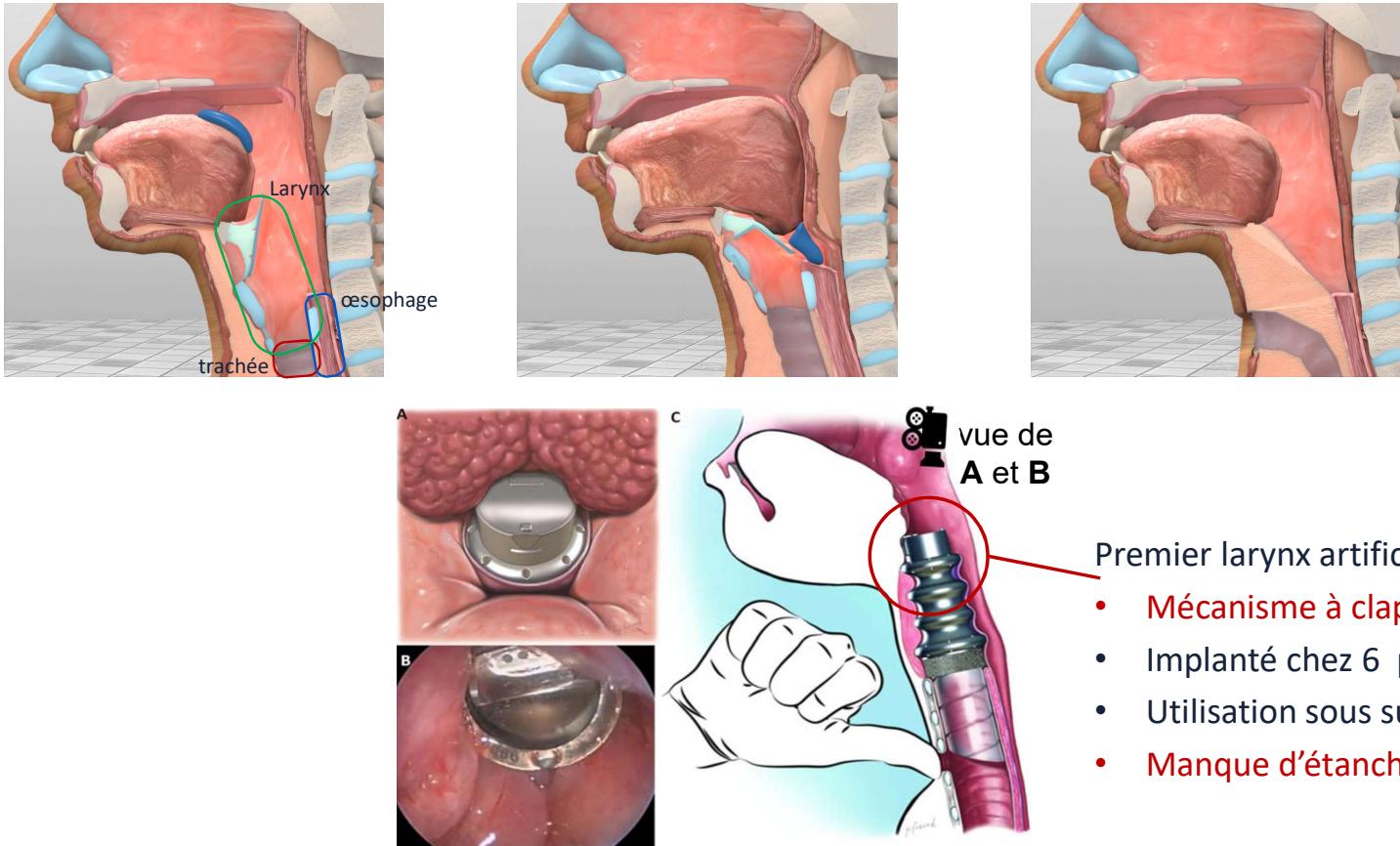
Les méthodes de réhabilitation:

- Trachéostomie.
- Restauration de la voix.

1. Contexte - Restauration de la déglutition

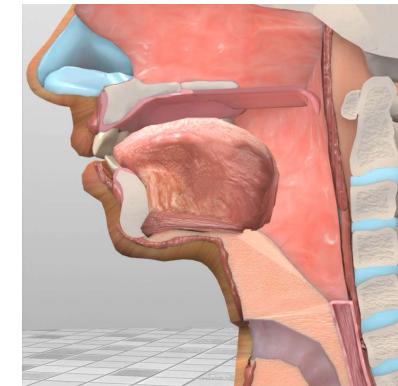
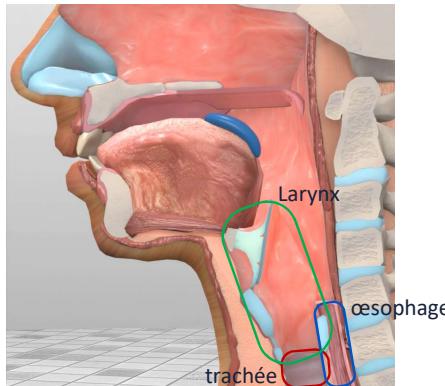


1. Contexte - Restauration de la déglutition

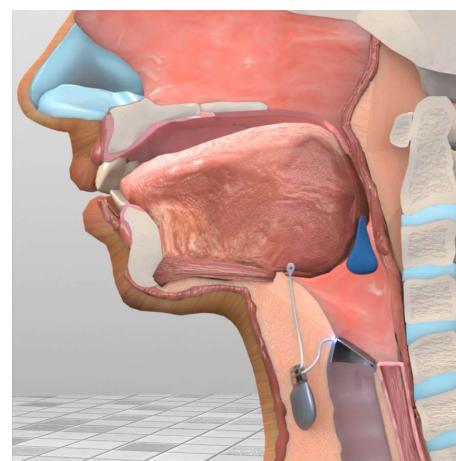
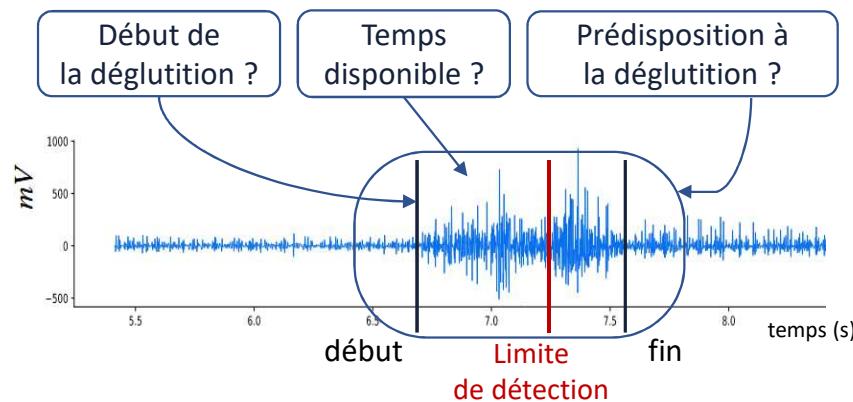


Debry C. et al. 2014.

1. Contexte - Restauration de la déglutition



Exemple d'un signal de déglutition



Détection temps réel - contraintes:

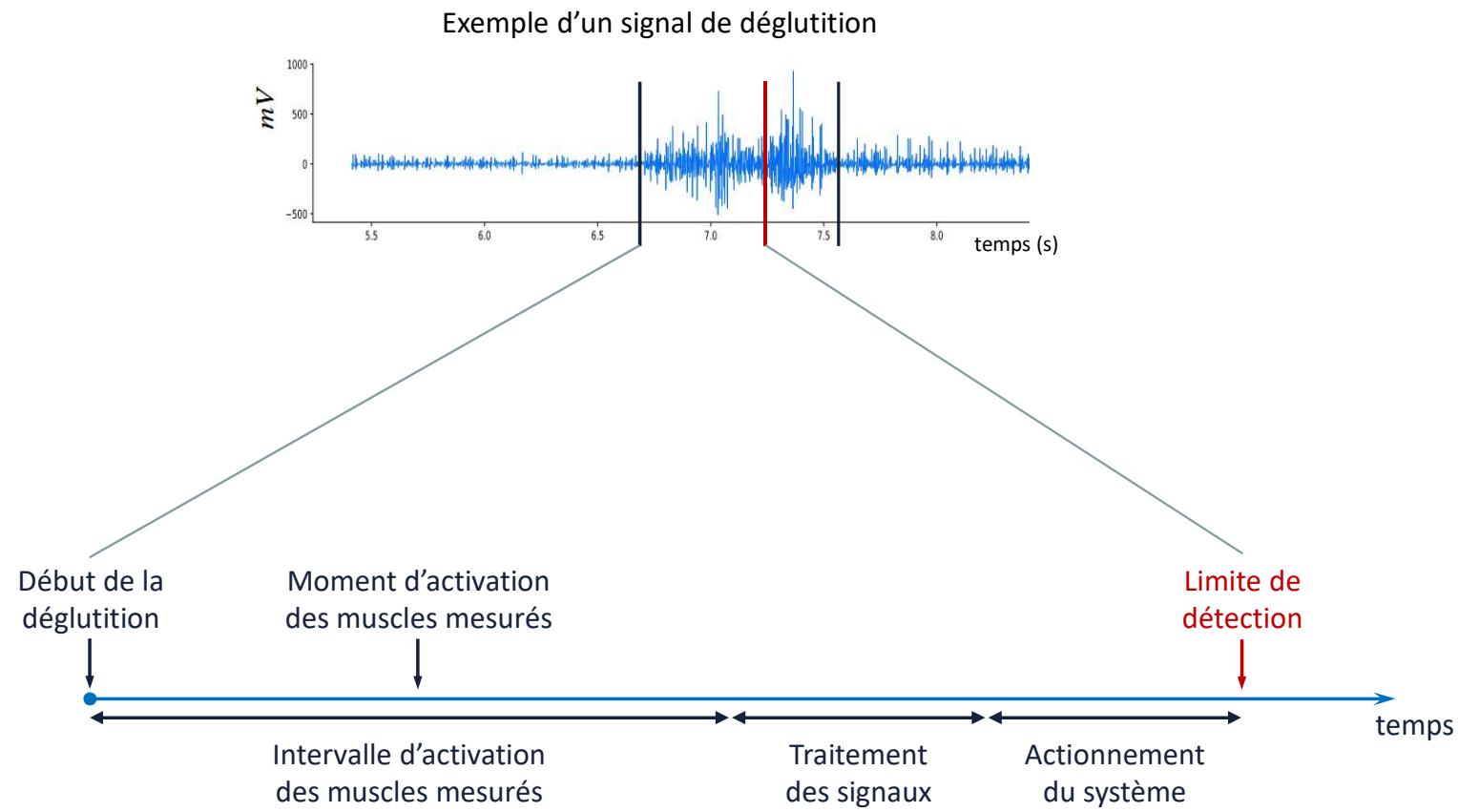
- Précocité
- Justesse
- Préservation
- Consommation

Plan de la présentation

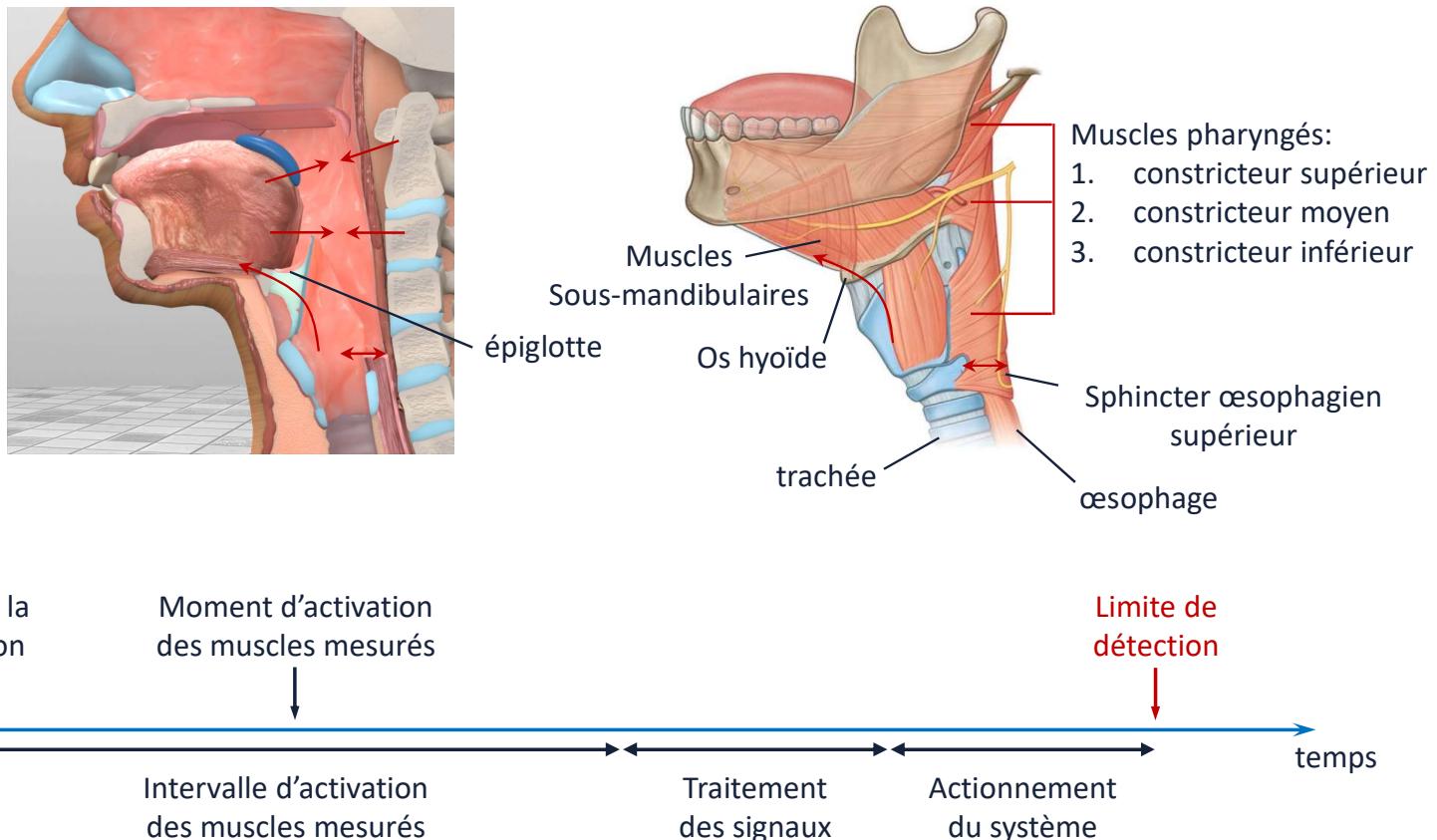
- 1. Contexte**
- 2. Protocole de Recherche Clinique (PRC)**
- 3. Étude statistique**
- 4. Détection temps réel**
- 5. Larynx Artificiel Implantable Actif (LAIA)**
- 6. Conclusion et perspectives**



2. PRC - Critère principal: la précocité

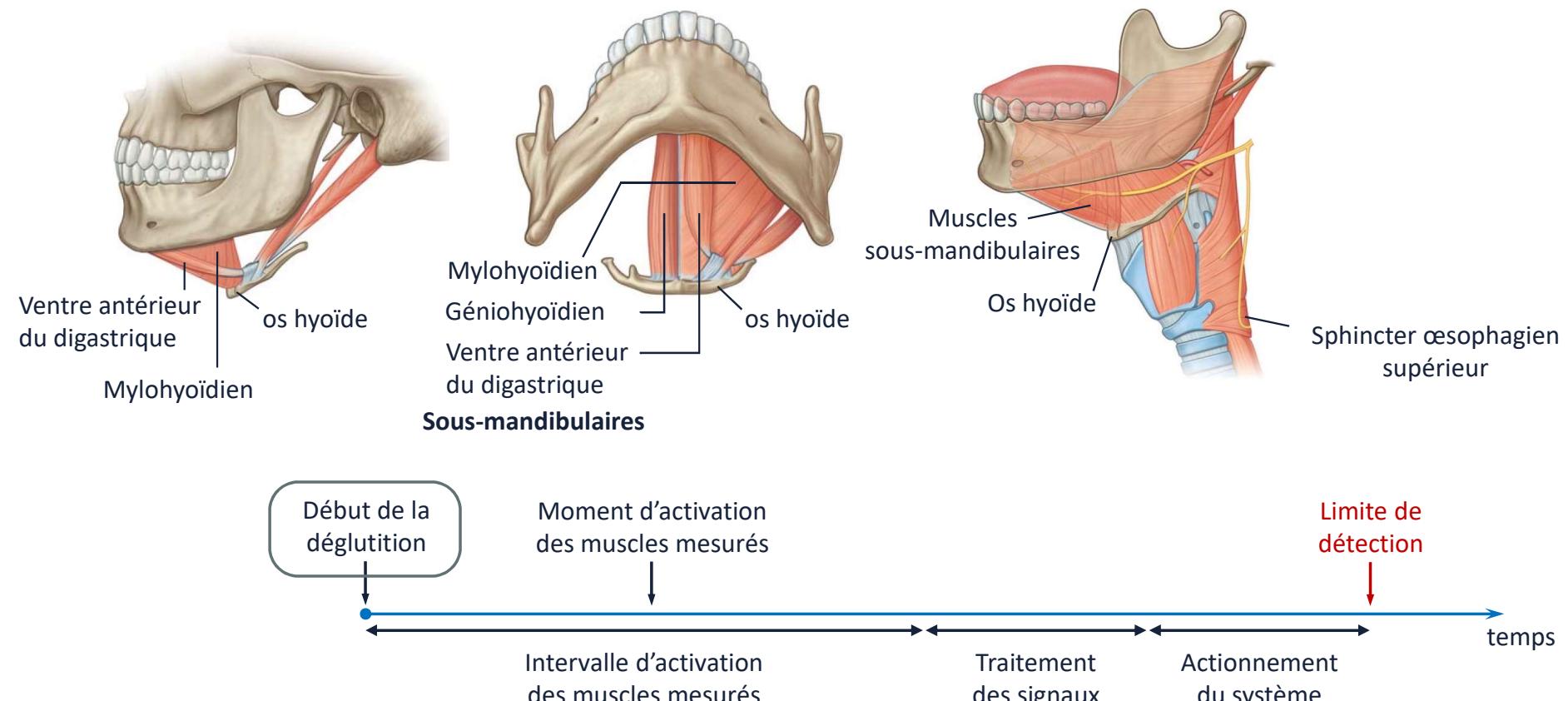


2. PRC - Critère principal: la précocité



2. PRC – Début de la déglutition

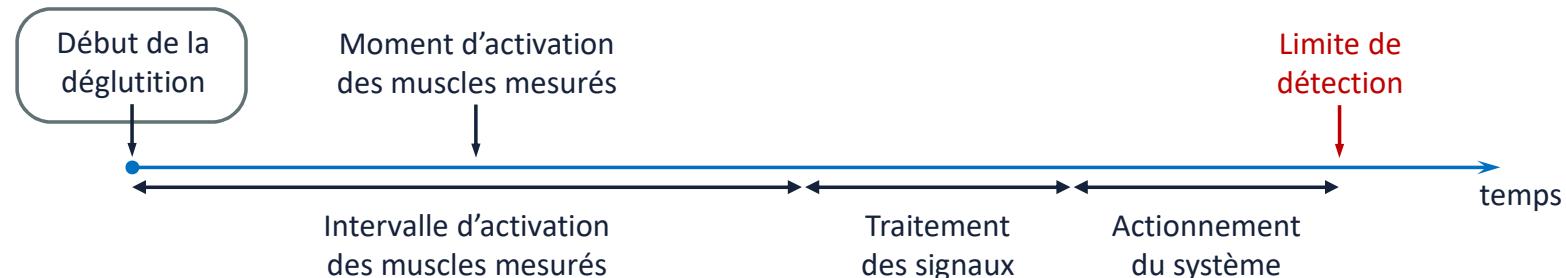
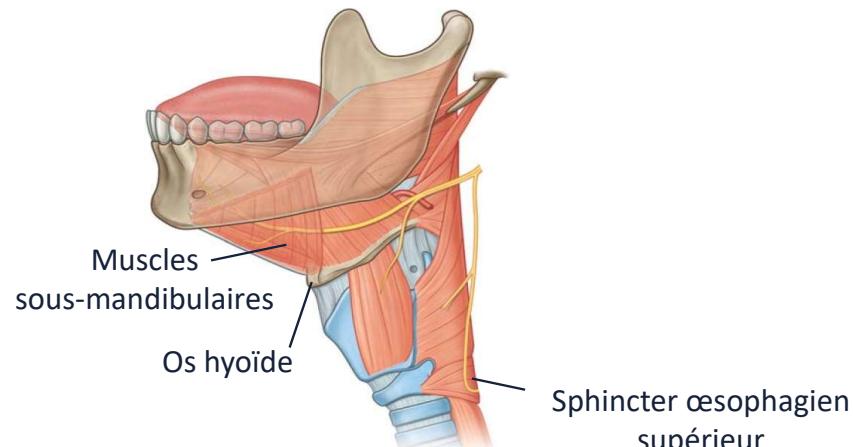
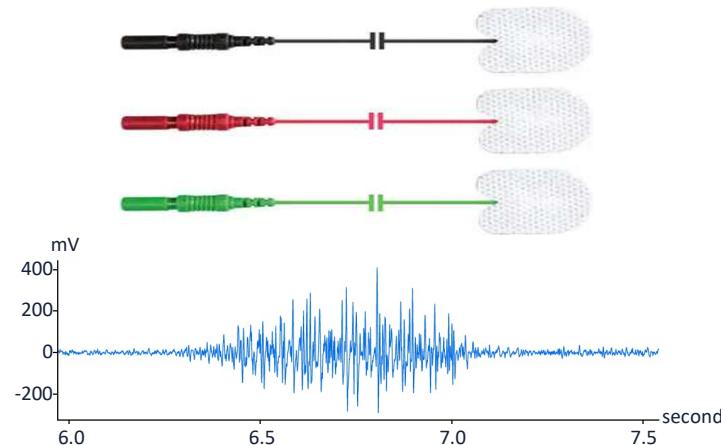
[D. Park et al. 2017, J. Walton et al. 2018, R. L. Drake et al. 2010]



A. Mialland et al. Toward a robust swallowing detection for an implantable active artificial larynx: A survey. In: Med. Biol. Eng. Comput. (2023).

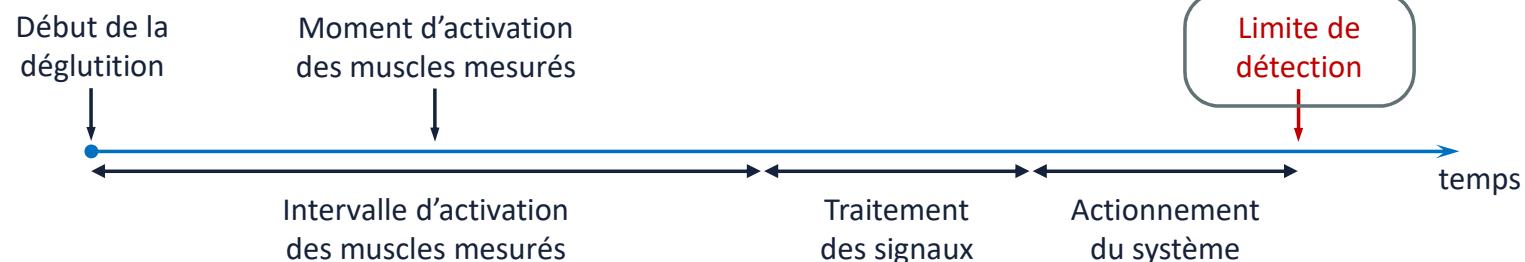
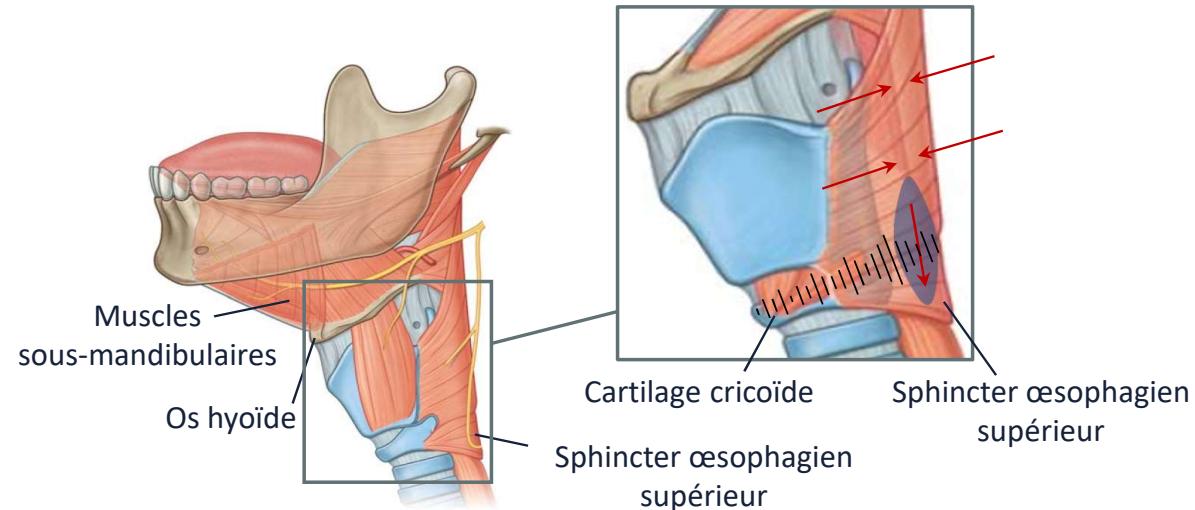
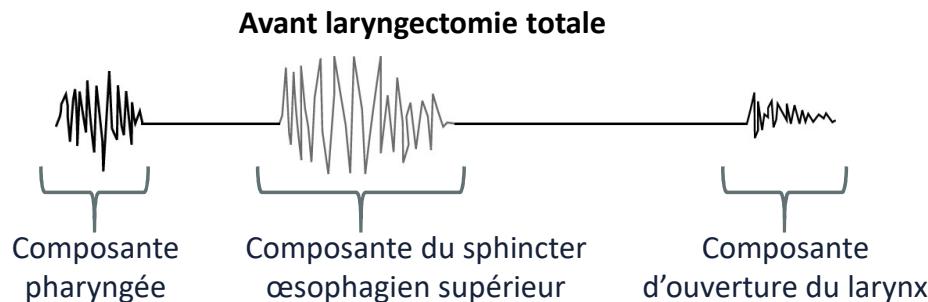
2. PRC – Début de la déglutition

Électrodes
électromyographiques de surface



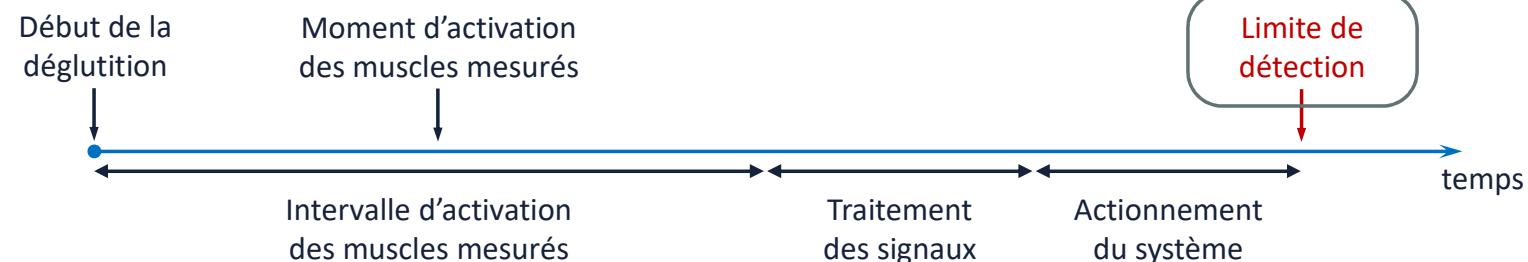
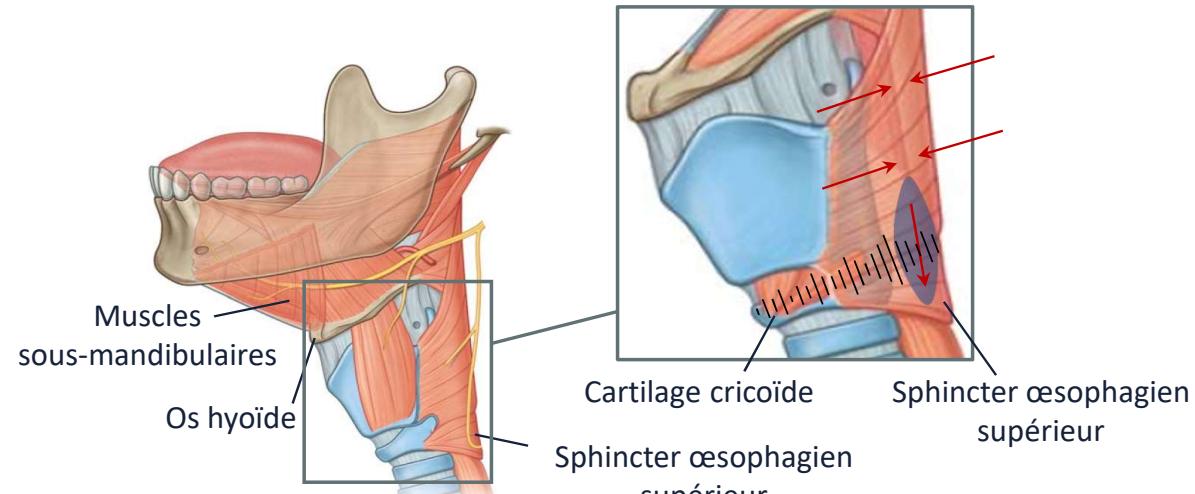
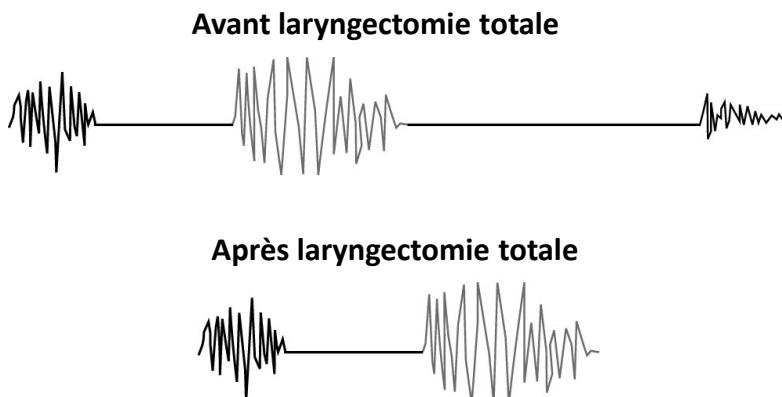
2. PRC – Limite temporelle de détection

[Morinière et al. 2011, M. Hasegawa et al. 2018, T. Omari et al 2018,
A. Pal et al. 2003, J. Lee et al. 2008, J. M. Dudik et al. 2015]



2. PRC – Limite temporelle de détection

[Morinière et al. 2011, M. Hasegawa et al. 2018, T. Omari et al 2018,
A. Pal et al. 2003, J. Lee et al. 2008, J. M. Dudik et al. 2015]



2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur

Précocité

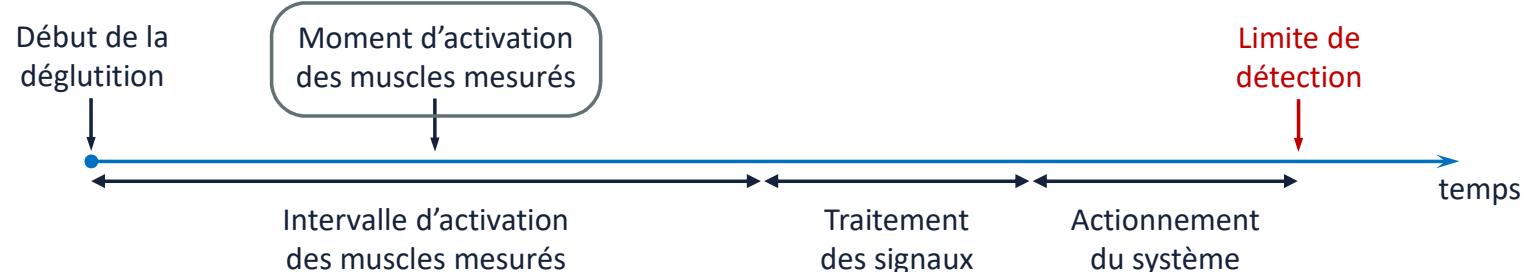
Justesse

Consommation

Préservation

Variabilité d'activation des muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur:

- Activation en même temps que les muscles sous-mandibulaires
 - Étude par EMG sur l'animal [Rebecca Z. German et al. 2009, A. J. Thexton et al. 2007 , R. W. Doty et al. 1956].
 - Étude par imagerie sur l'humain [T. Okada et al. 2013]
 - Propriétés anatomiques sur l'humain [W. G. Pearson et al. 2011]



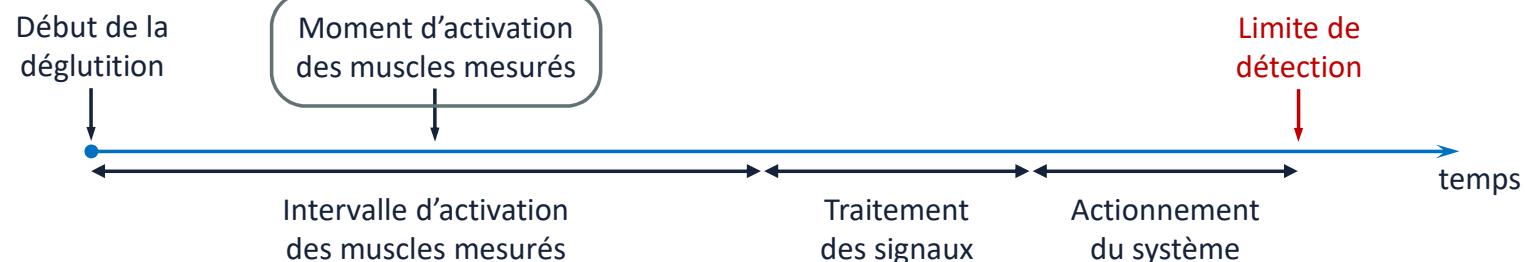
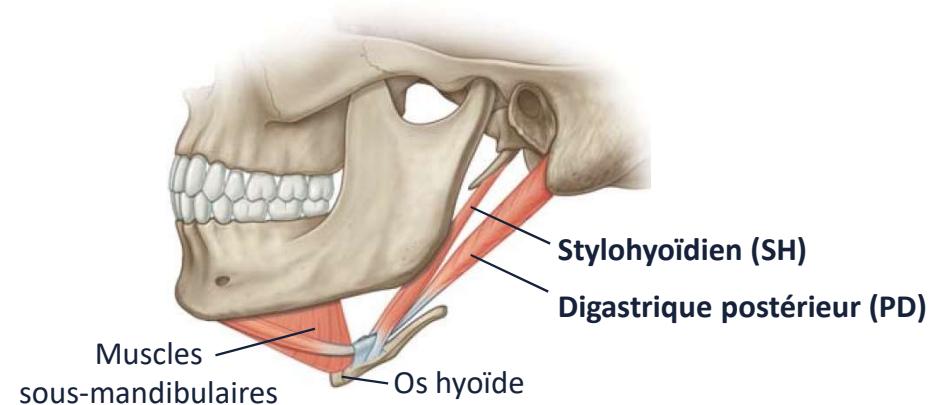
2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur

Précocité

Justesse

Consommation

Préservation



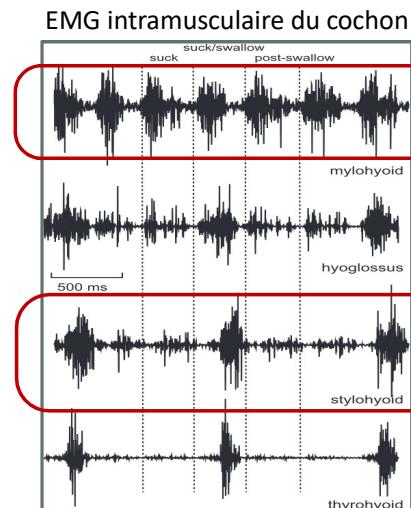
2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur

Précocité

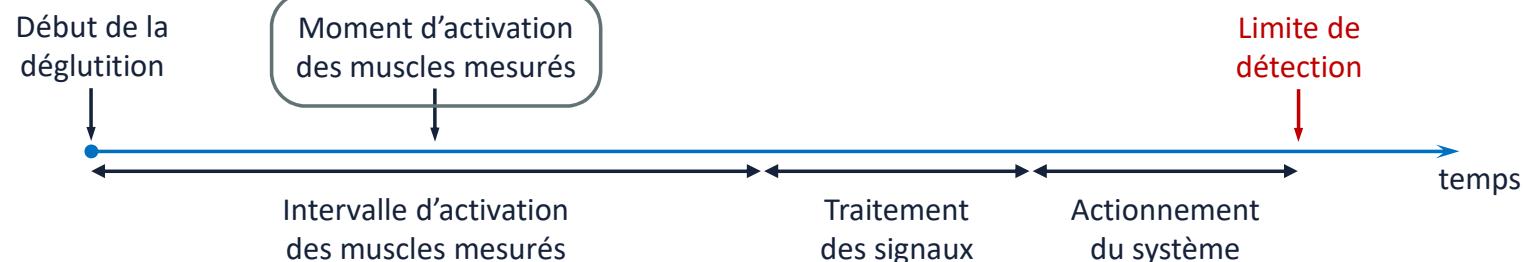
Justesse

Consommation

Préservation



A. J. Thexton et al. 2012



2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur

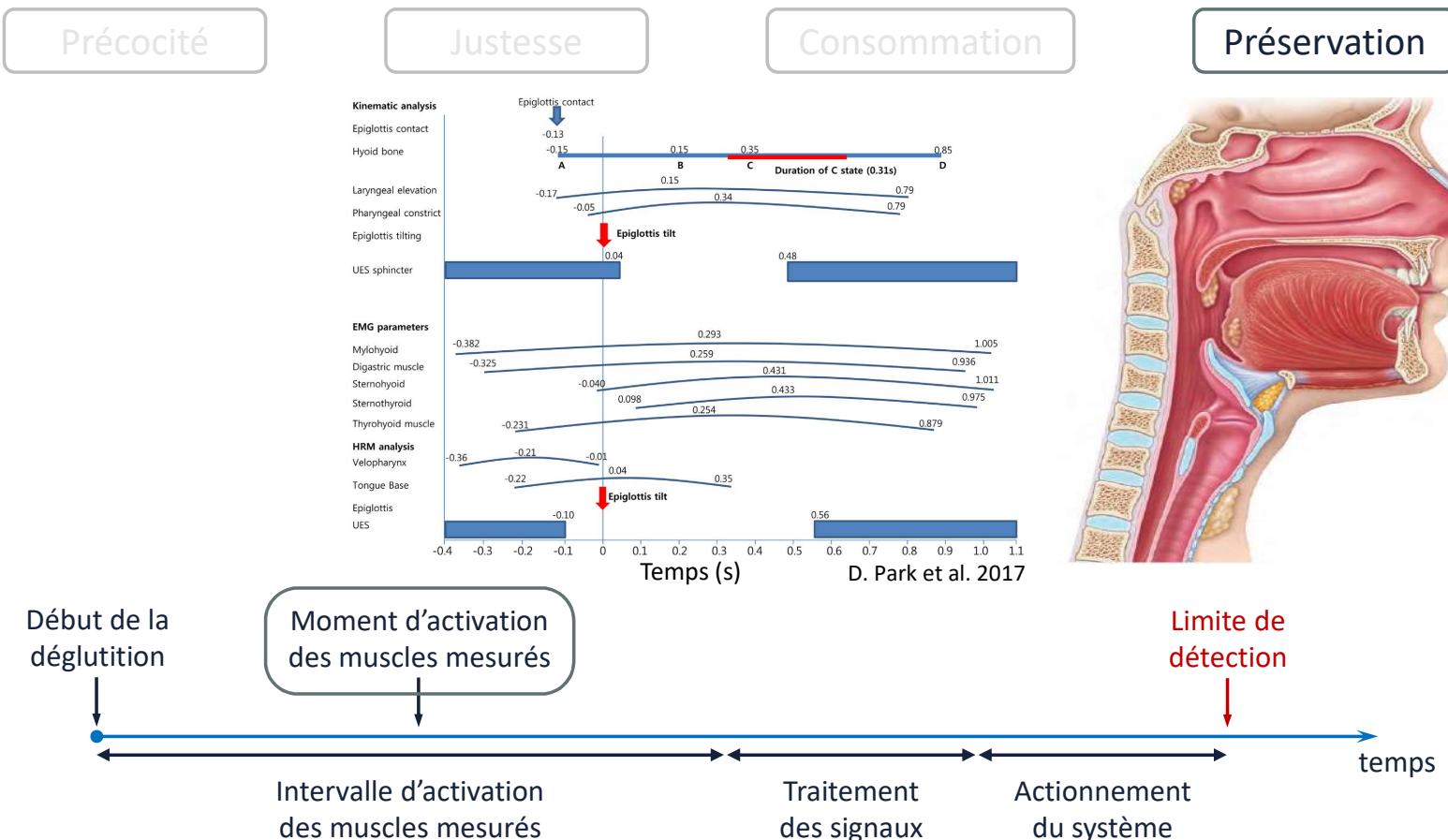


Muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur:

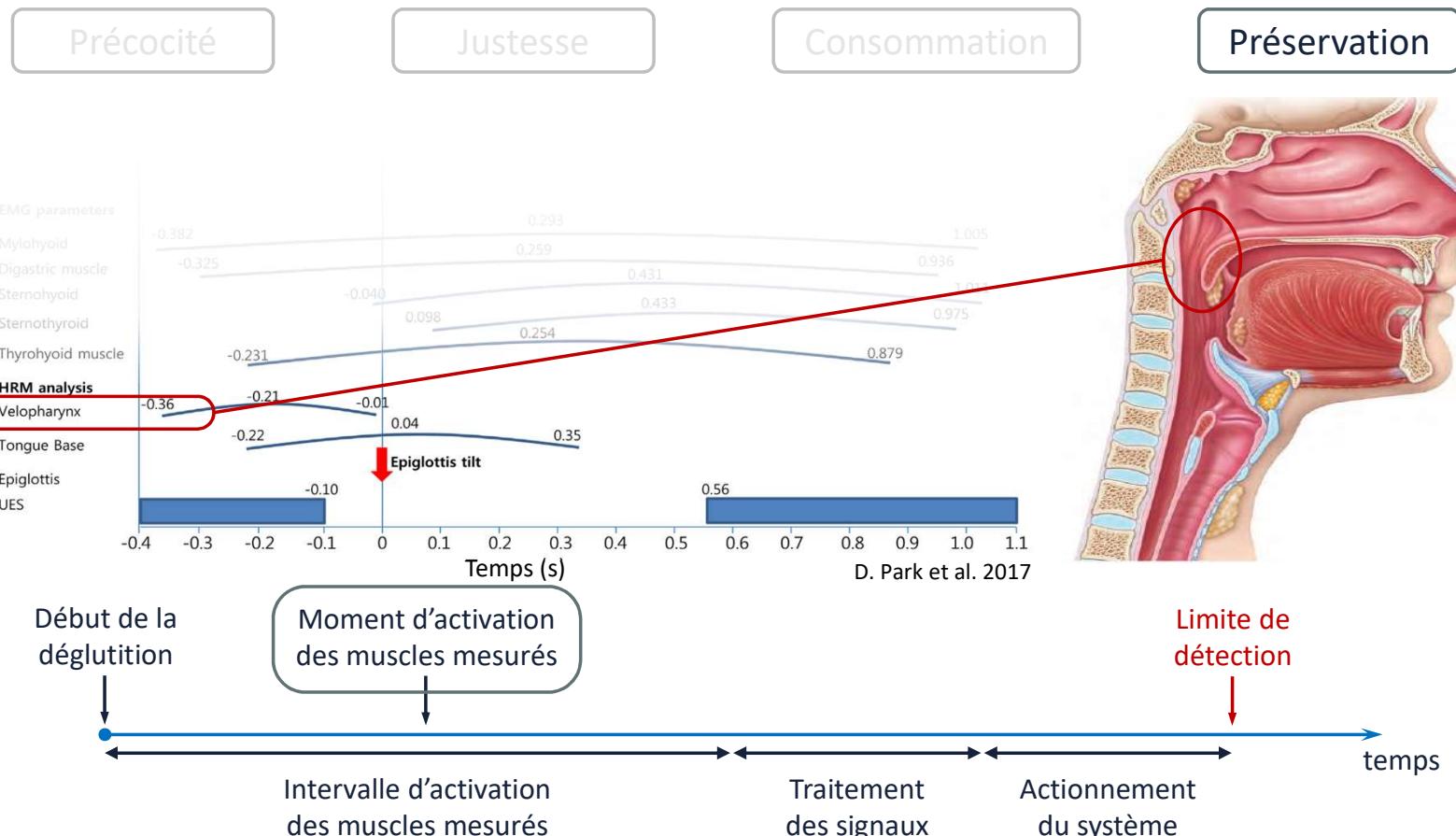
- Propension à s'activer pour la déglutition
 - Étude par EMG sur l'animal [Rebecca Z. German et al. 2009, C. J. Mayerl et al. 2021, A. J. Thexton et al. 2012].
 - Étude par imagerie sur l'humain [W. G. Pearson et al. 2013]
 - Étude des propriétés anatomiques sur l'humain [W. G. Pearson et al. 2011]



2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur



2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur



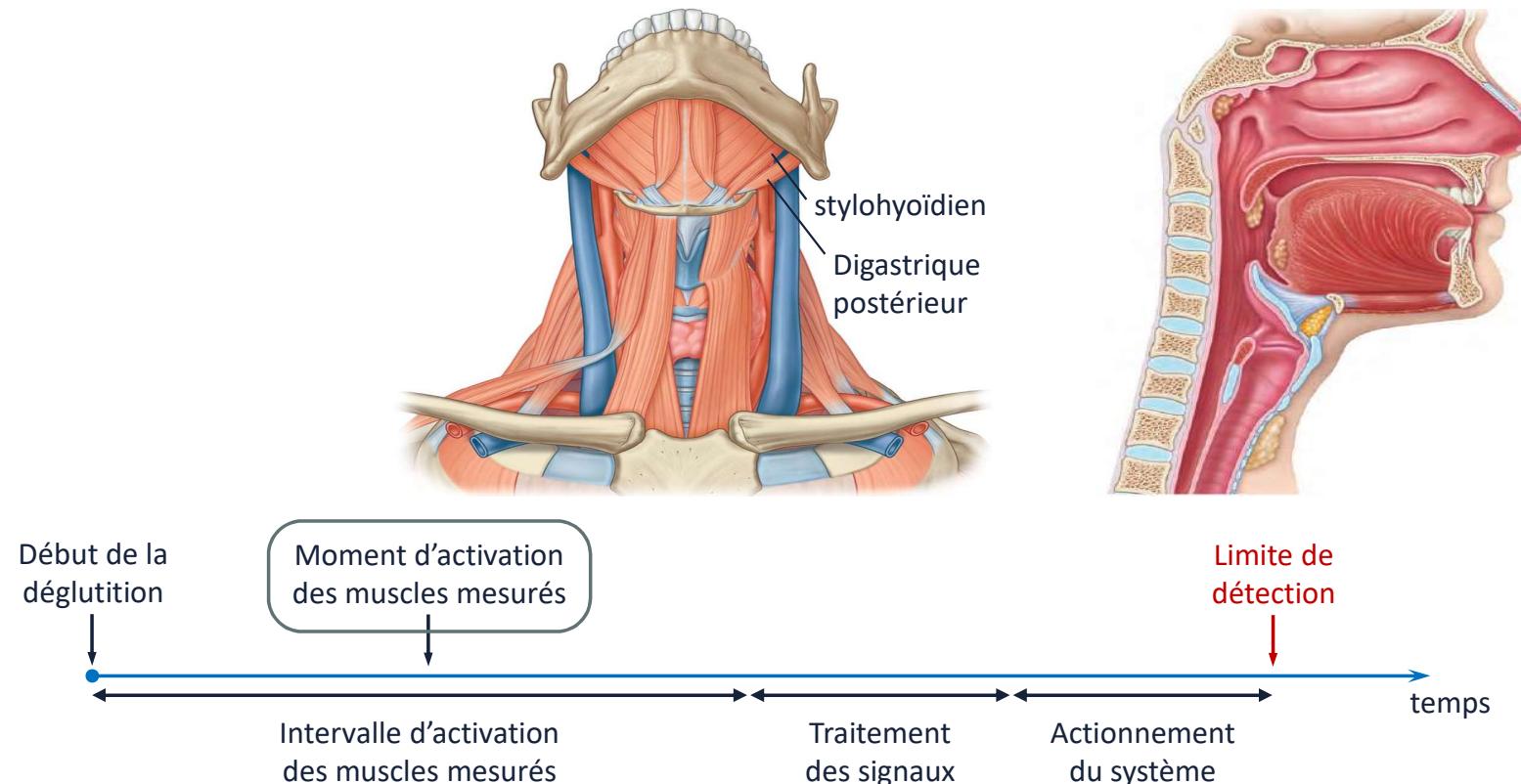
2. PRC – muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur

Précocité

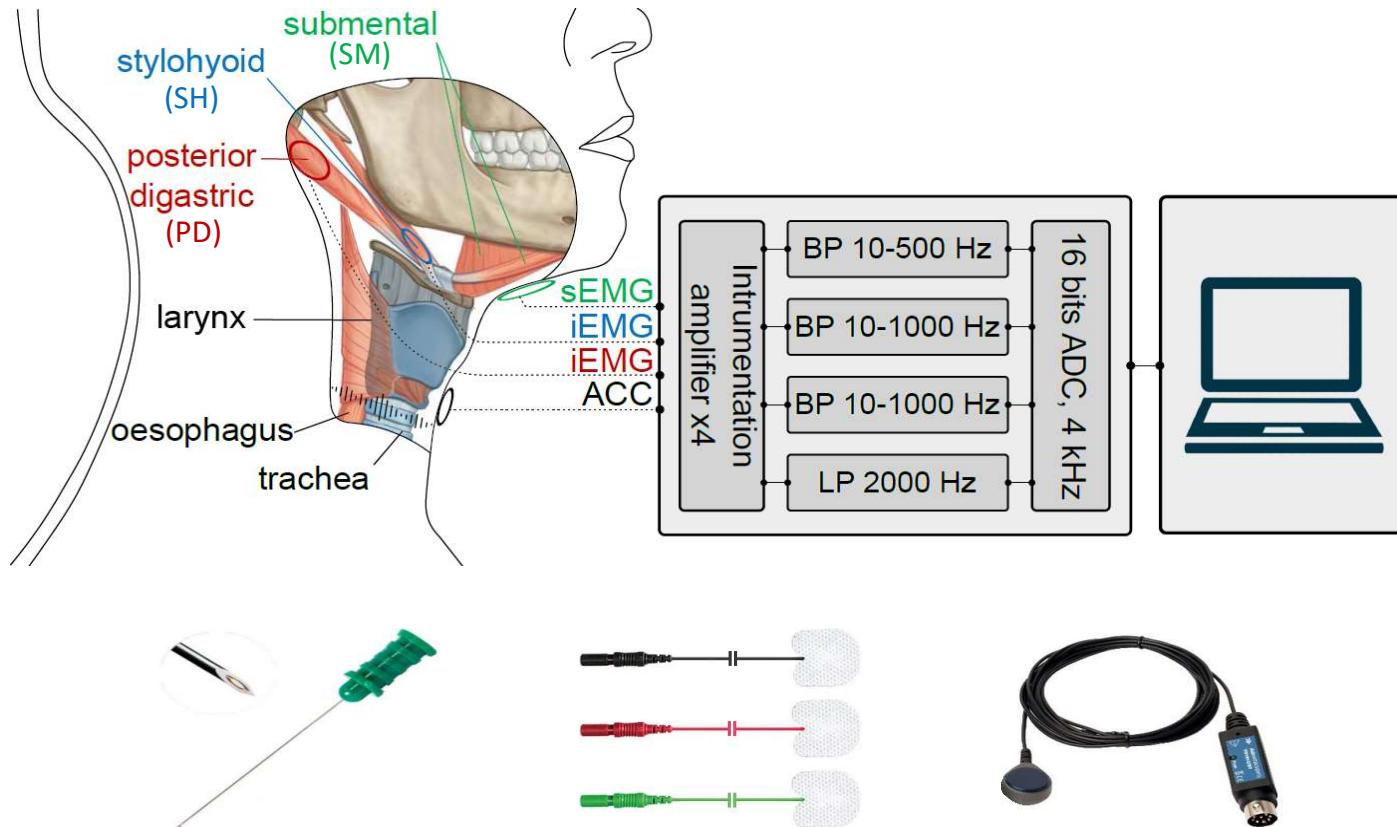
Justesse

Consommation

Préservation

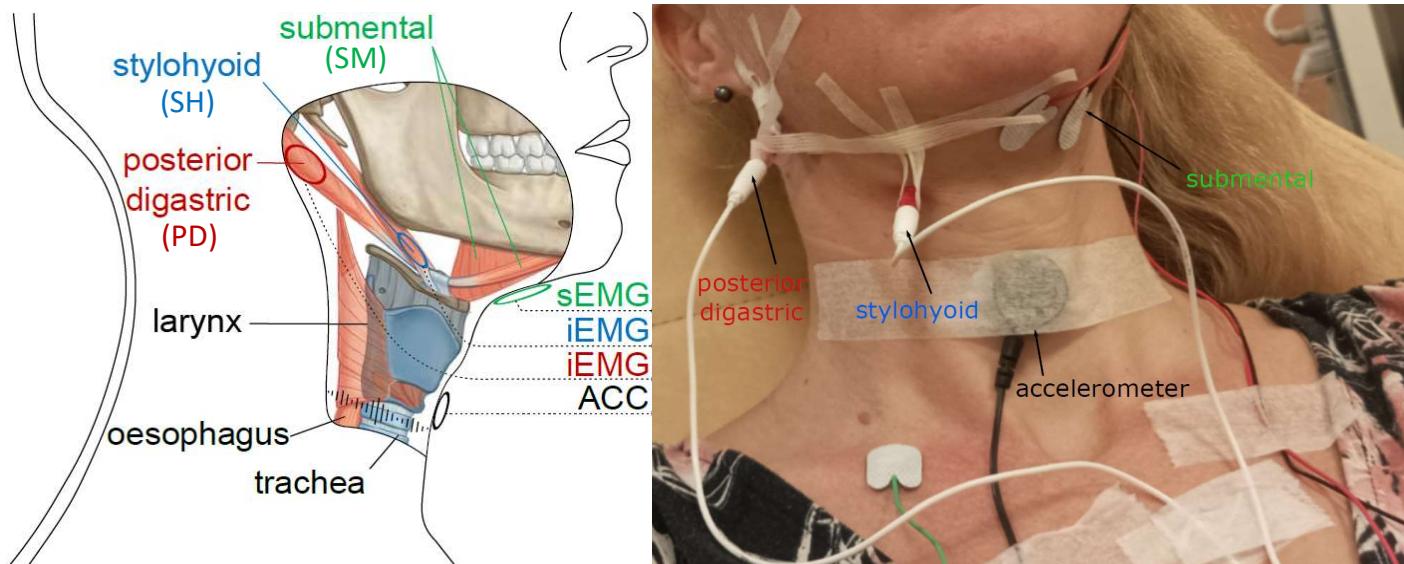


2. PRC – Méthode de mesure innovante



A. Mialland et al. Stylohyoid and posterior digastric measurement with intramuscular EMG, submental EMG and swallowing sound. In: BIOSIGNALS (2023)

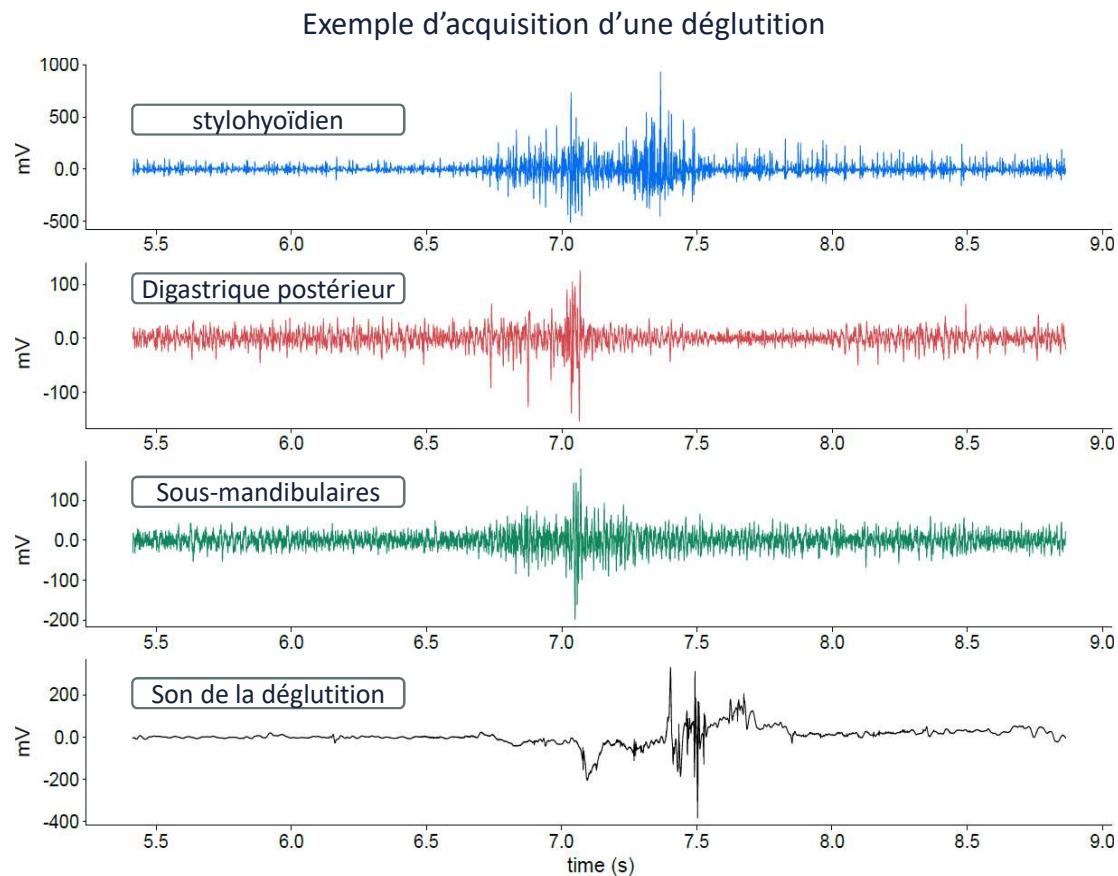
2. PRC – Méthode de mesure innovante



- 17 participants sains (8 hommes / 9 femmes)
- 4 déglutitions: salive, eau, épais (compote), solide (madeleine).
- 13 non-déglutitions: ouvrir la bouche, pincer les lèvres, serrer les dents, sourire, siffler, tousser, souffler, parler, dire « *iii* », mouvements de la mâchoire, rotation de la tête, flexion/extension de la tête, mastication.

A. Mialland et al. Stylohyoid and posterior digastric measurement with intramuscular EMG, submental EMG and swallowing sound. In: BIOSIGNALS (2023)

2. PRC – Méthode de mesure innovante

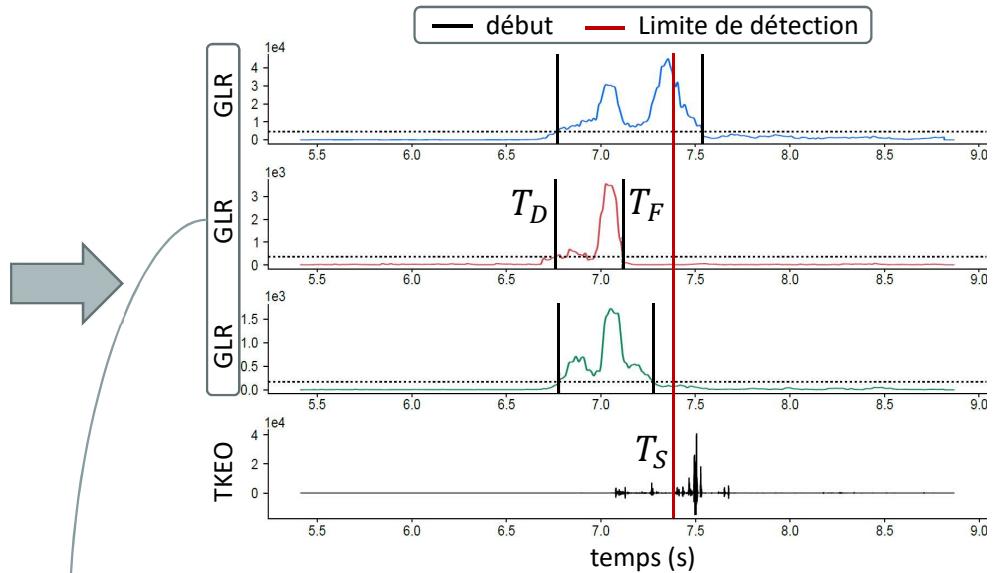
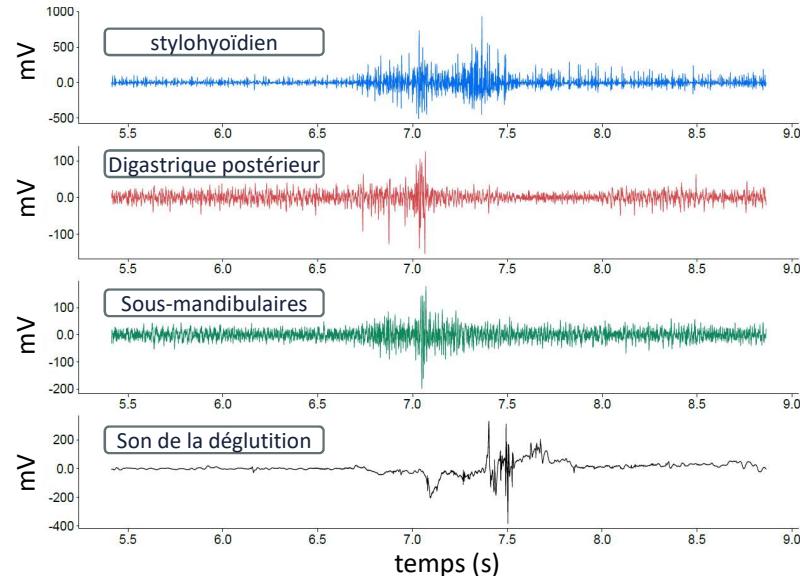


Plan de la présentation

- 1. Contexte**
- 2. Protocole de Recherche Clinique (PRC)**
- 3. Étude statistique**
- 4. Détection temps réel**
- 5. Larynx Artificiel Implantable Actif (LAIA)**
- 6. Conclusion et perspectives**



3. Étude statistique – Extraction de données



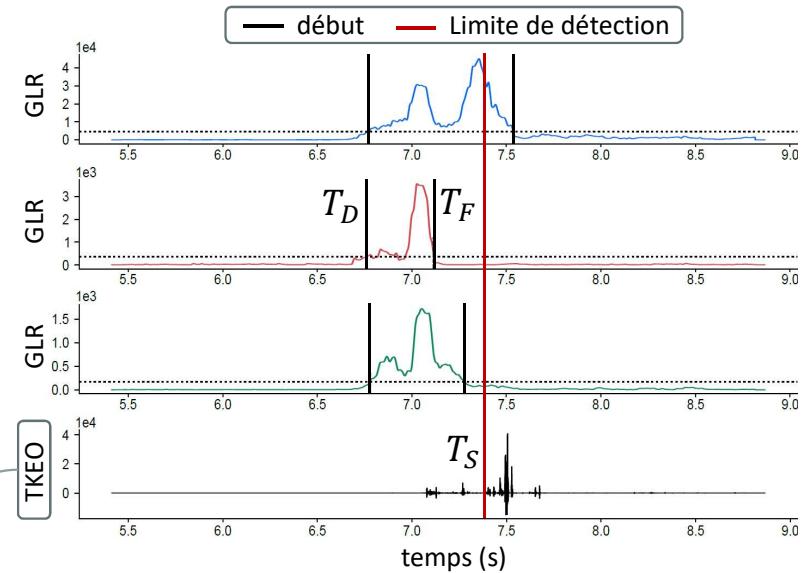
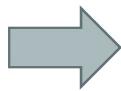
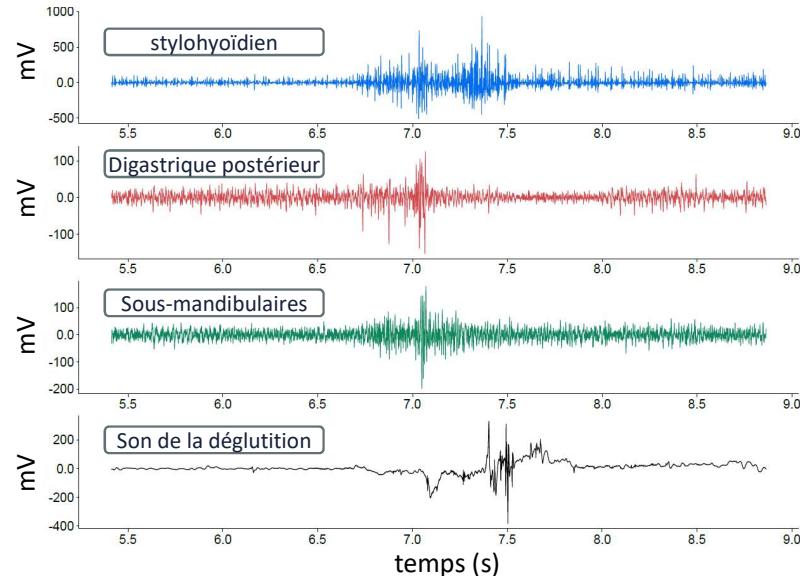
Generalized Likelihood Ratio (GLR):

$$\frac{L_1(r, y_0^n)}{L_0(y_0^n)} = \frac{p_0(y_0^{r-1}) p_1(y_r^n)}{p_0(y_0^n)} = \prod_{t=r}^n \frac{P_1(y(t))}{P_0(y(t))}$$

$P_i(y(t))$: hypothèse de muscle activé/non-activé.

A. Mialland et al. Stylohyoid and posterior digastric measurement with intramuscular EMG, submental EMG and swallowing sound. In: BIOSIGNALS (2023)

3. Étude statistique – Extraction de données

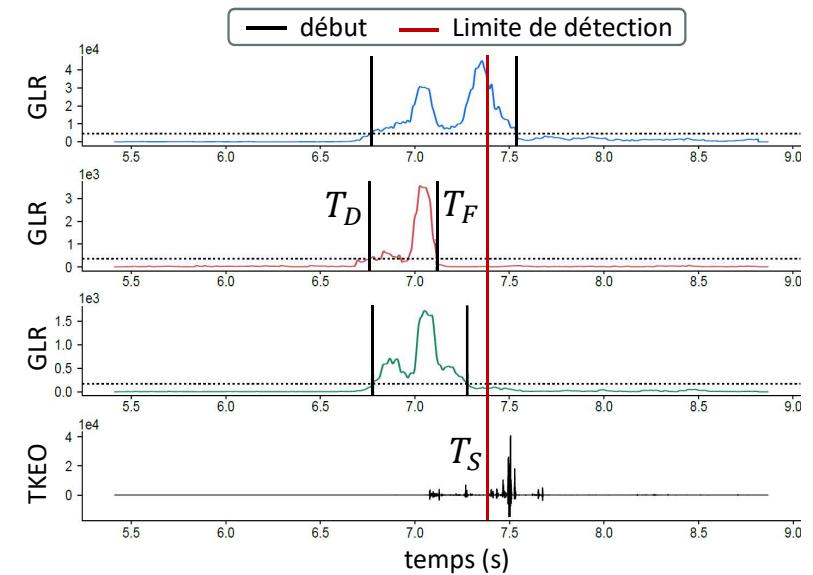
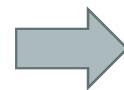
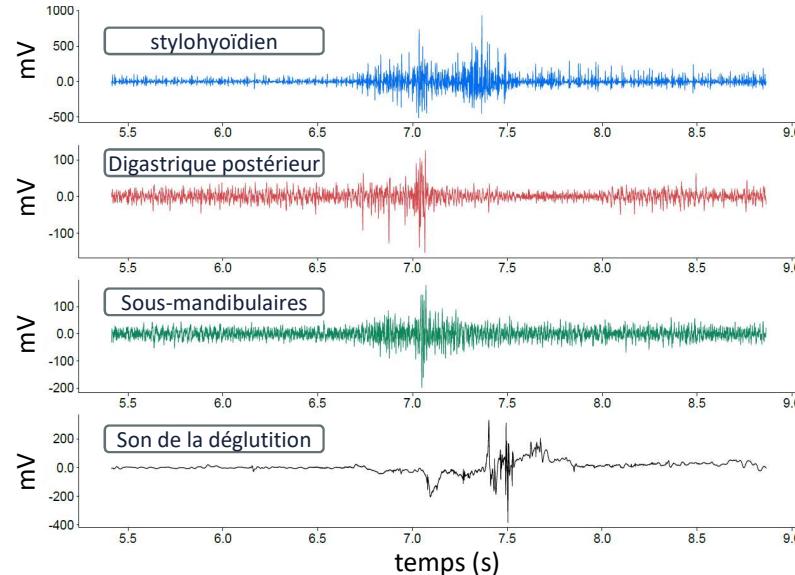


Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO):

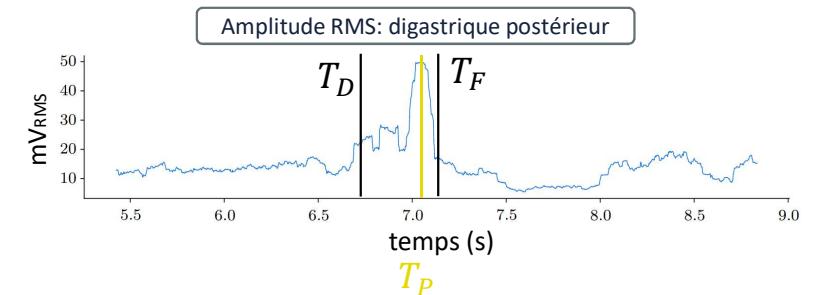
$$\psi[x(n)] = x(n)^2 - x(n-1)x(n+1)$$

Proportionnel à l'amplitude et au contenu fréquentiel du signal

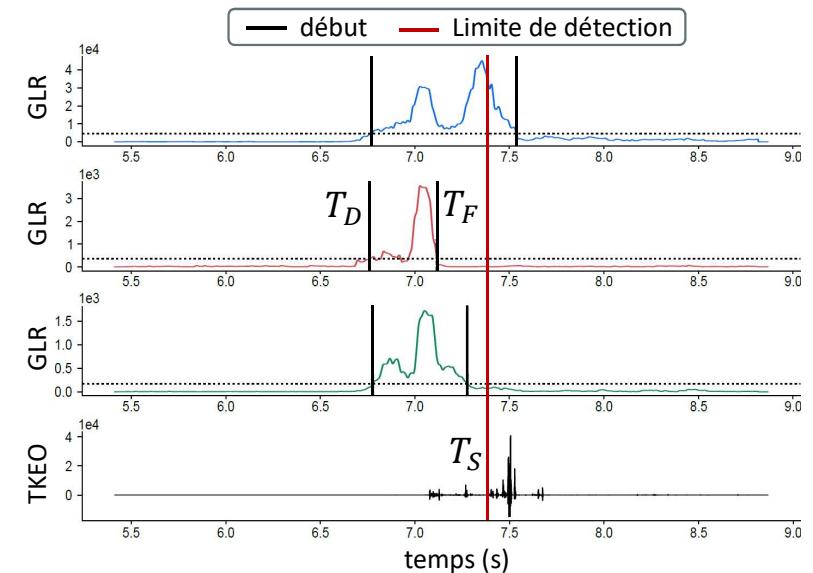
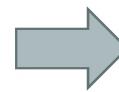
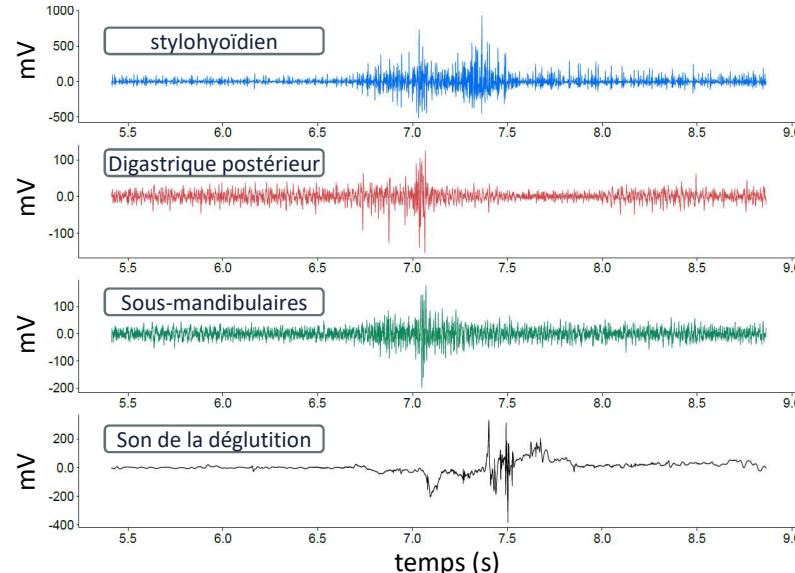
3. Étude statistique – Extraction de données



Valeur RMS des échantillons contenus dans une fenêtre glissante de 200ms

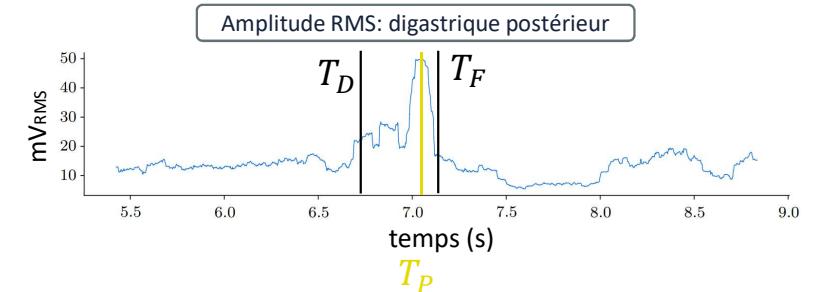


3. Étude statistique – Extraction de données

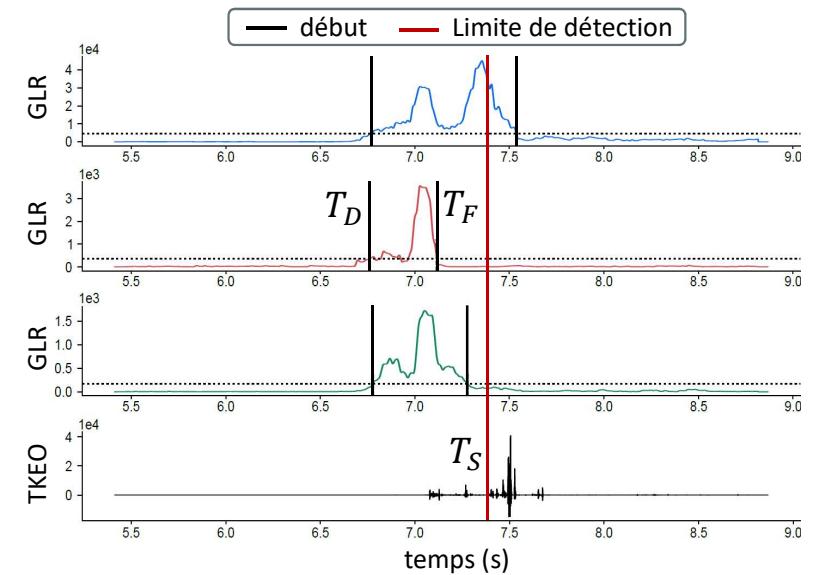
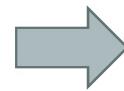
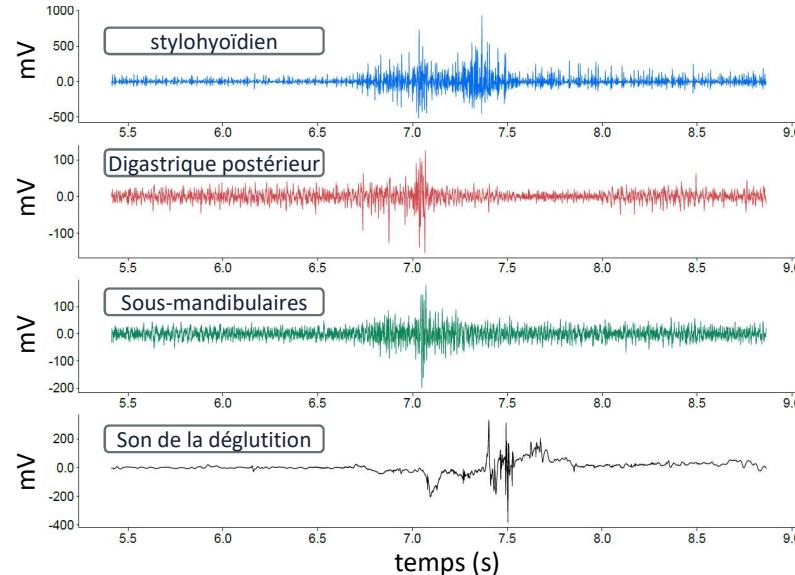


$$M_{md} = \frac{1}{N} \sum_{T_D}^{T_F} A_{RMS\,md}(i)$$

$$P_{md} = \max(A_{RMS\,md})$$

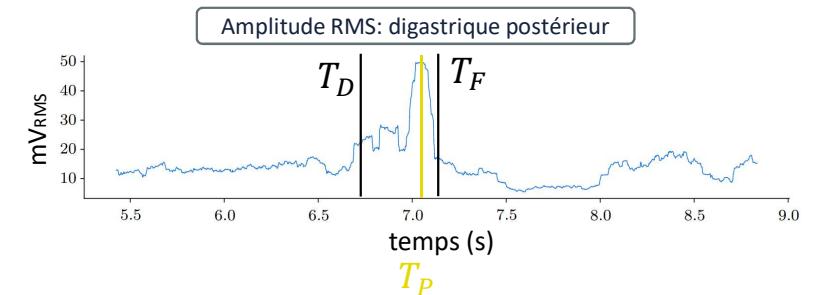


3. Étude statistique – Extraction de données



$\forall m \in \{SH, PD, SH\}$ et $\forall d \in \{0, \dots, N_{deglutition}\}$:

- Variables temporelles:
 $T_{Dm}, T_{Pm}, T_{Fm}, T_{Sd}$
- Variables d'amplitudes:
 M_m, P_m



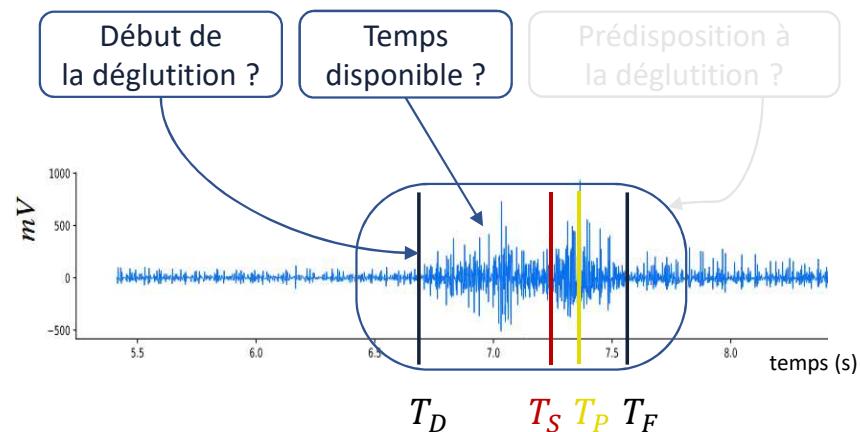
3. Étude statistique – Analyse des timings

Variables temporelles normalisées:

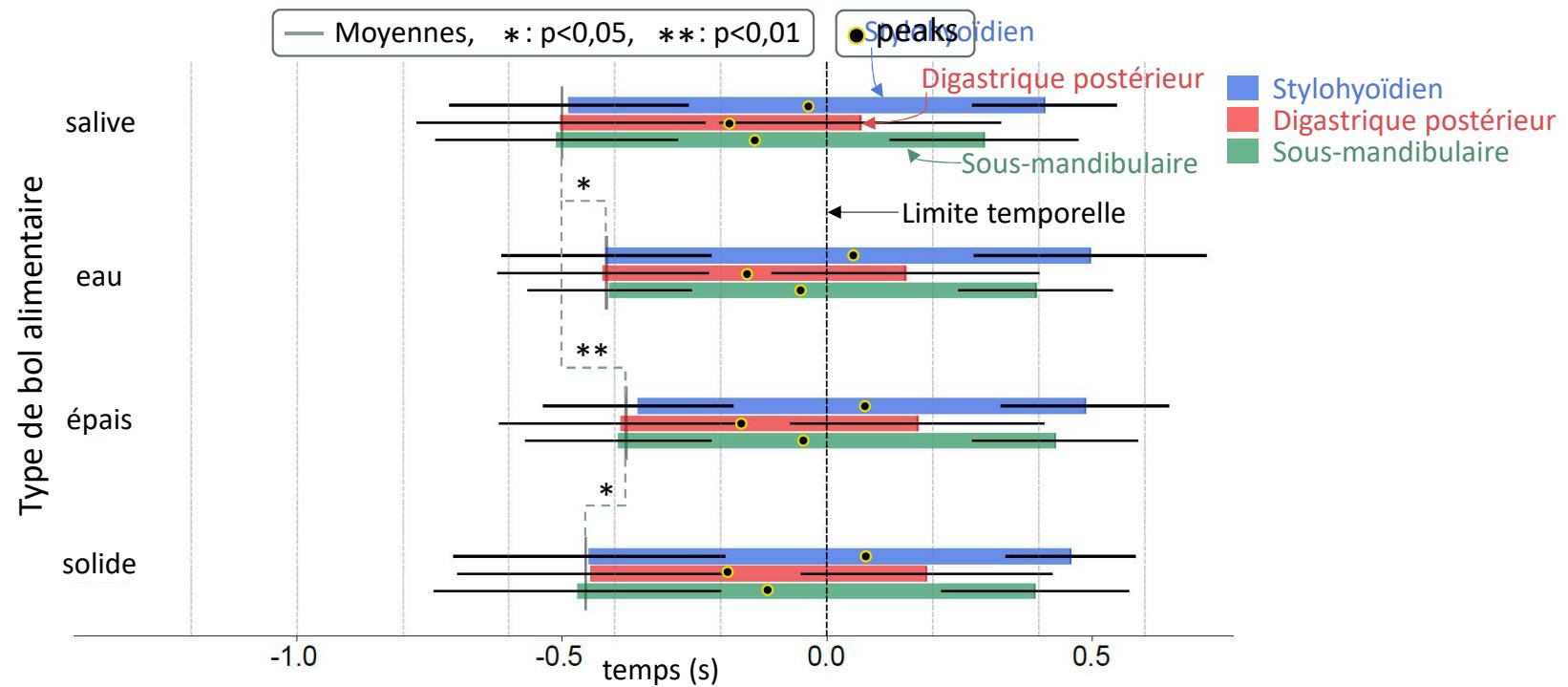
- $T_{DS_m} = T_{Dm} - T_S$
- $T_{PS_m} = T_{Pm} - T_S$
- $T_{FS_m} = T_{Fm} - T_S$

➤ ANOVA à mesures répétées:

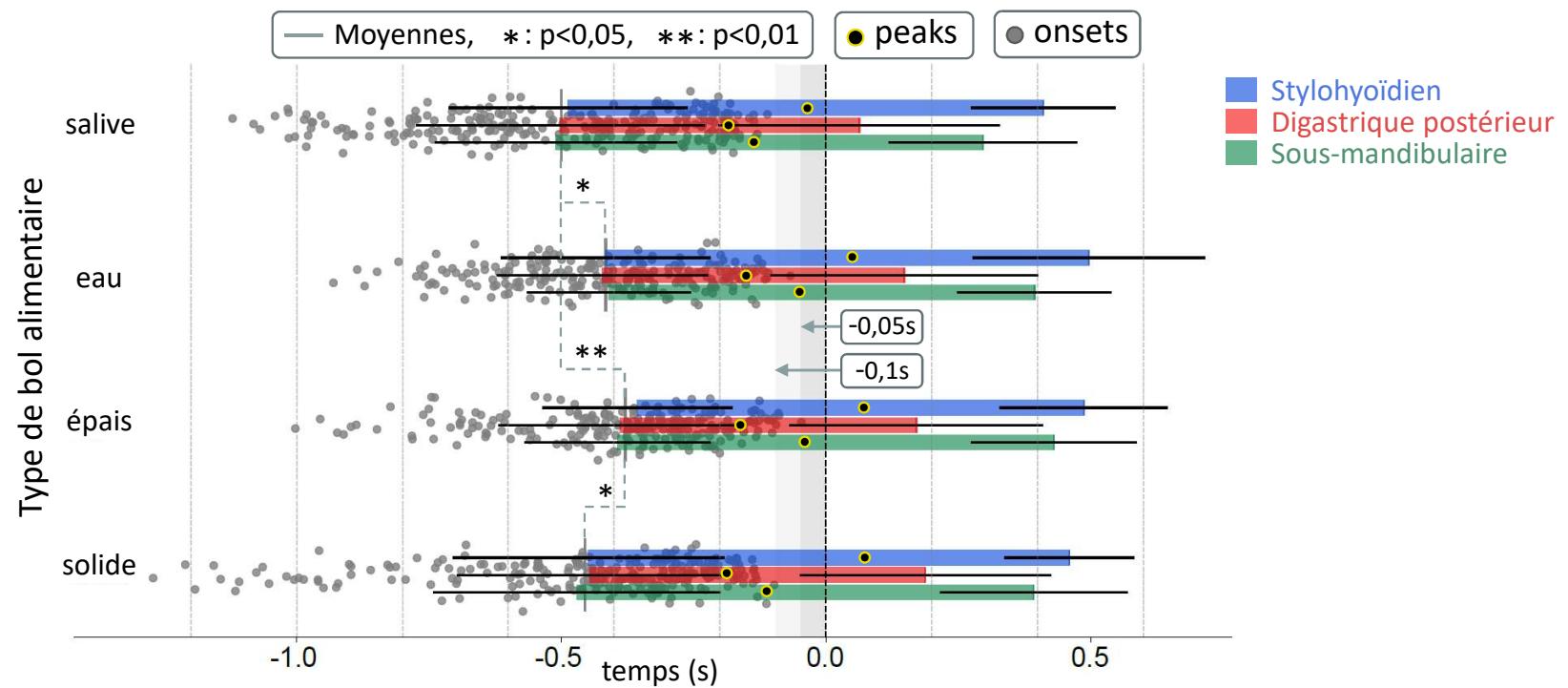
- Effet du type de bol ?
- Effet du type de muscles ?



3. Étude statistique – Analyse des timings



3. Étude statistique – Analyse des timings



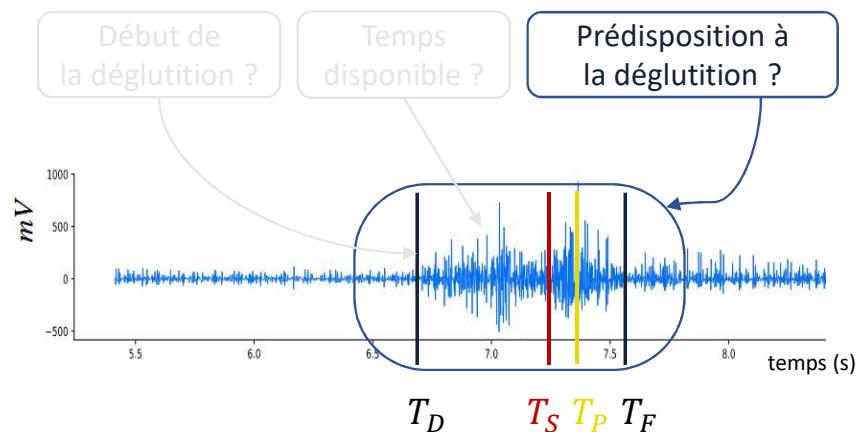
3. Étude statistique – Analyse des modes de recrutements

Variable d'amplitudes:

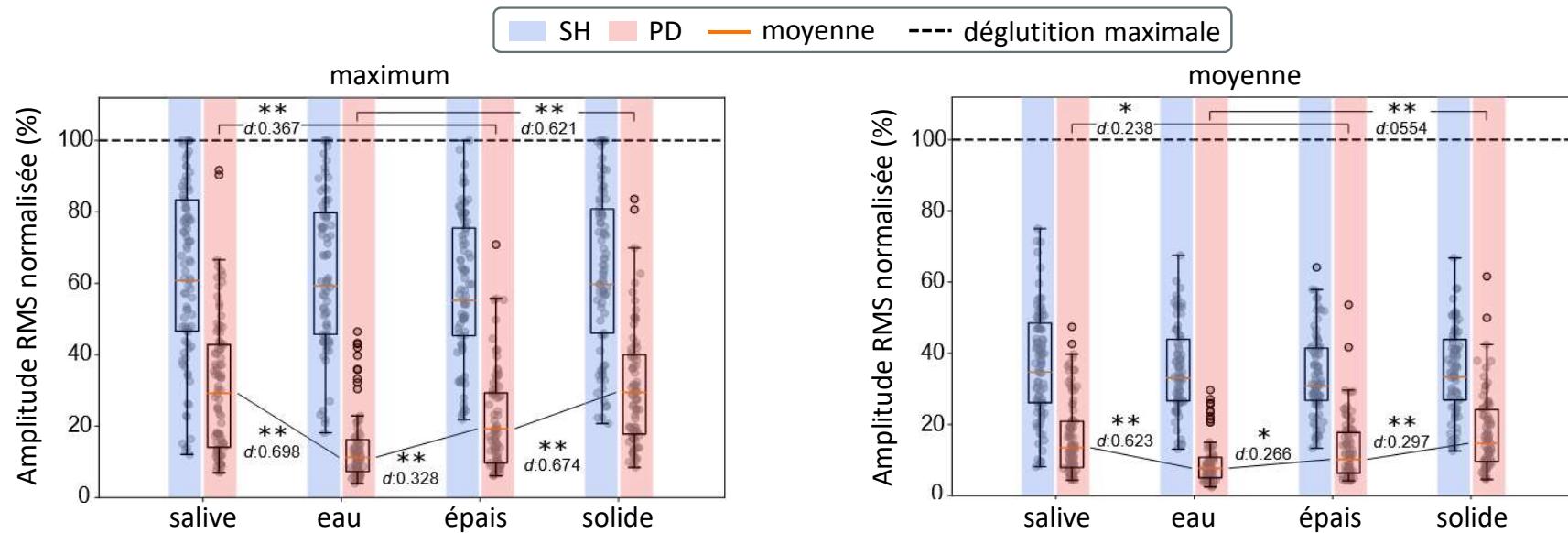
- M_m
- P_m

➤ **Modèle linéaire mixed**

- Effet du type de muscles ?
- Effet du type de tâches ?



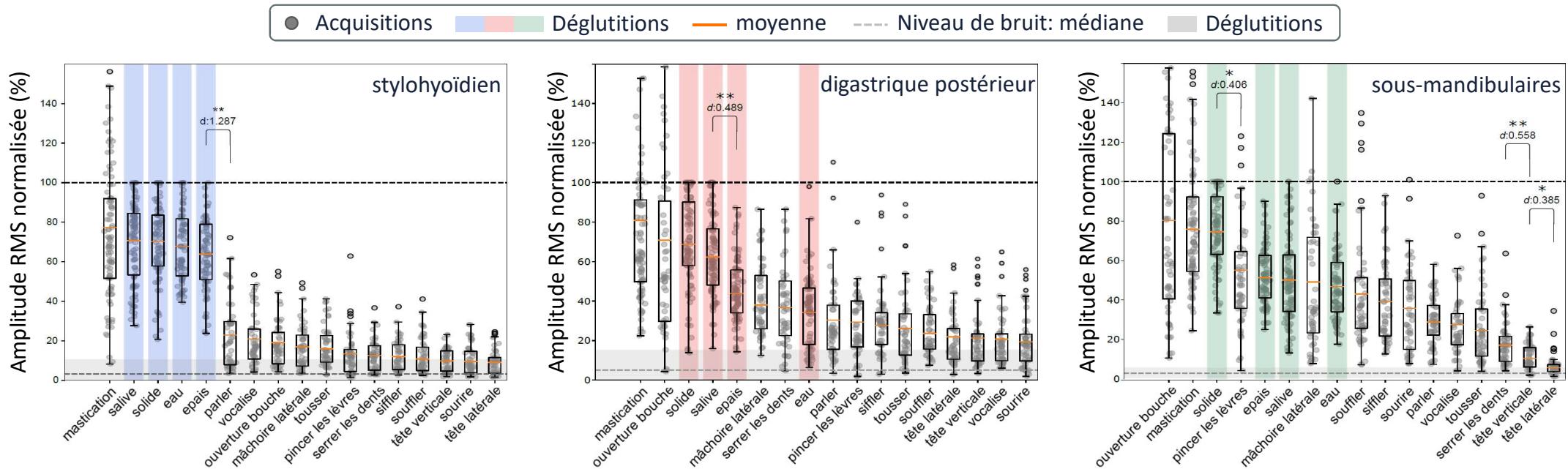
3. Étude statistique – Analyse des modes de recrutements



Normalisation: pour chaque sujet, les signaux RMS sont divisés par la **valeur maximale issue de l'ensemble des déglutitions**, au sein des **muscles stylohyoïdien et digastrique postérieur**.

- Le digastrique postérieur possède l'amplitude la plus petite.
- Le stylohyoïdien ne montre aucune variation significative en fonction du bol alimentaire,

3. Étude statistique – Analyse des modes de recrutements



Normalisation: pour chaque sujet, les signaux RMS sont divisés par la **valeur maximale issue de l'ensemble des déglutitions**, au sein du **muscle considéré**.

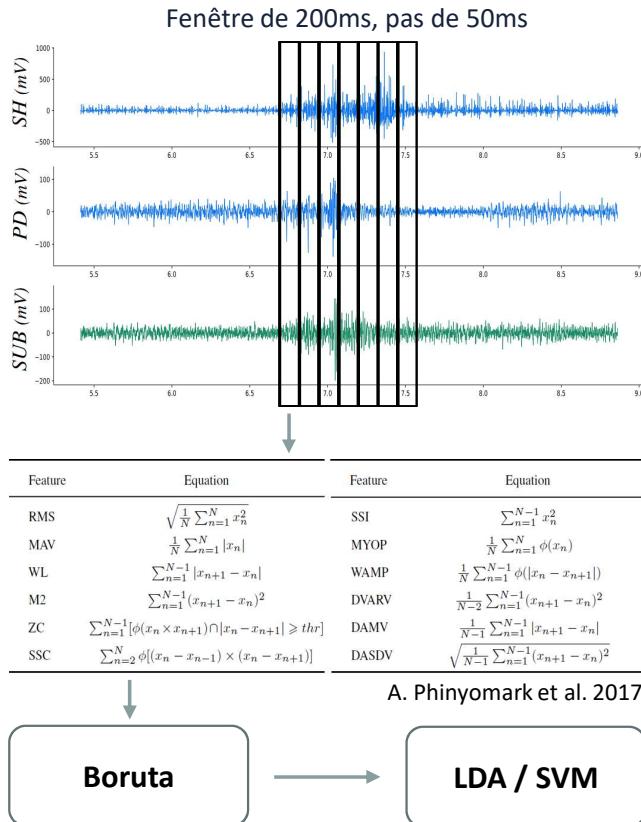
- Prédisposition claire du stylohyoïdien pour la déglutition. Tendance pour le digastrique postérieur
- Pas de tendance claire pour les muscles sous-mandibulaires

Plan de la présentation

1. Contexte
2. Protocole de Recherche Clinique (PRC)
3. Étude statistique
- 4. Détection temps réel**
5. Larynx Artificiel Implantable Actif (LAIA)
6. Conclusion et perspectives



4. Détection temps réel – Comparaison avec la littérature



Reproduction des études comparables:

- Constantinescu et al. 2018:
 - EMG de surface: muscles sous-mandibulaires.
 - Déglutitions, pincer les lèvres, mouvements de la tête, mouvements de la langue.
 - Déglutitions, pincer les lèvres, rotation tête, flexion/extension tête.
- McNulty et al. 2021:
 - Sujets sains et sujets laryngectomisés totaux
 - EMG de surface: muscles sous-mandibulaires, diaphragme, muscles intercostaux.
 - Déglutition, tousser, parler, lever, assoir, toucher tête, tourner buste, marcher.
 - Déglutition, tousser, parler, dire "iii", tourner tête, flexion/extension tête.

4. Détection temps réel – Comparaison avec la littérature

Comparaison avec Constantinescu et al.
précision : 83.9%, rappel : 92.3%, F1-score : 87.9%

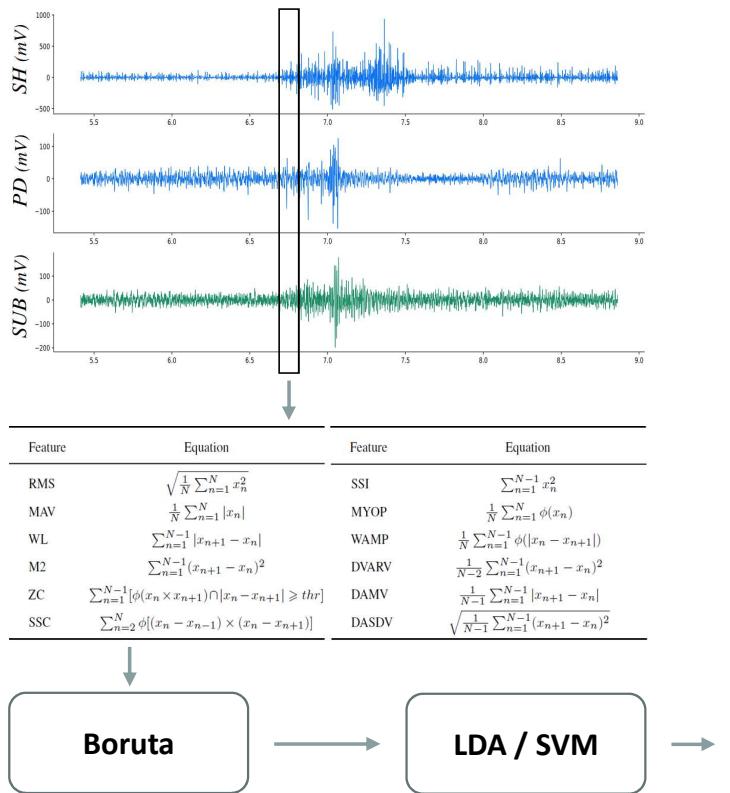
	LDA				SVM			
	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel
SH-PD-SM	95.31 (0.41)	89.72 (1.25)	92.43 (0.62)	98.27 (0.54)	98.87 (0.37)	99.31 (0.29)	99.09 (0.15)	99.94 (0.16)
SH-SM	94.26 (0.66)	90.93 (1.13)	92.57 (0.68)	98.11 (0.87)	98.54 (0.45)	97.83 (0.64)	98.18 (0.38)	99.85 (0.23)
PD-SM	84.03 (1.32)	80.89 (1.43)	82.43 (1.09)	92.88 (1.12)	95.74 (0.61)	94.43 (0.86)	95.08 (0.52)	99.03 (0.63)
SH-PD	95.07 (0.63)	89.97 (0.95)	92.45 (0.59)	97.66 (0.69)	98.42 (0.43)	97.97 (0.47)	98.19 (0.31)	99.74 (0.35)
SH	93.87 (0.98)	92.17 (0.87)	93.01 (0.49)	97.91 (0.71)	96.93 (0.52)	95.58 (0.66)	96.25 (0.37)	99.24 (0.59)
PD	81.15 (2.12)	47.07 (2.59)	59.58 (2.28)	61.34 (2.61)	81.31 (1.61)	70.06 (2.41)	75.27 (1.88)	88.06 (2.28)
SM	83.06 (1.21)	80.65 (1.48)	81.83 (0.86)	91.66 (1.24)	88.44 (1.13)	83.54 (1.38)	85.92 (0.78)	94.93 (1.29)

Comparaison avec McNulty et al.
précision : 77%, rappel : 57%, F1-score : 66%

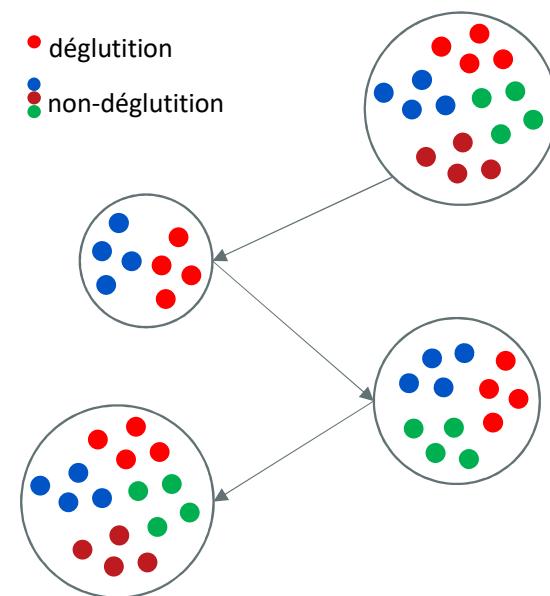
	LDA				SVM			
	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel
SH-PD-SM	92.51 (0.52)	81.58 (1.38)	86.71 (0.91)	94.59 (1.13)	97.79 (0.45)	98.02 (0.52)	97.91 (0.32)	99.78 (0.32)
SH-SM	92.56 (0.72)	83.01 (1.31)	87.53 (0.81)	94.74 (0.84)	95.86 (0.76)	94.19 (0.81)	95.02 (0.55)	99.26 (0.58)
PD-SM	86.67 (1.24)	74.76 (1.56)	80.28 (1.09)	89.98 (1.29)	93.42 (1.03)	90.99 (1.06)	92.19 (0.74)	98.37 (0.82)
SH-PD	90.82 (0.96)	82.38 (1.27)	86.39 (0.84)	94.91 (1.07)	96.01 (0.75)	94.64 (0.69)	95.32 (0.56)	99.32 (0.46)
SH	90.92 (1.01)	84.87 (1.16)	87.79 (0.81)	94.74 (1.09)	93.31 (0.96)	88.55 (1.13)	90.87 (0.81)	96.78 (0.98)
PD	75.03 (2.58)	36.54 (1.78)	49.15 (1.95)	50.79 (2.51)	75.65 (2.15)	58.88 (2.35)	66.22 (1.88)	78.95 (2.82)
SM	85.07 (1.04)	73.87 (1.48)	79.08 (1.02)	88.21 (1.42)	90.44 (0.97)	74.94 (1.64)	81.96 (1.08)	89.19 (1.54)

- Résultats les plus proche des travaux comparés.
- Amélioration substantielle avec le muscle stylohyoïdien seulement.
- Potentiel effet synergique entre les muscles SH et PD.

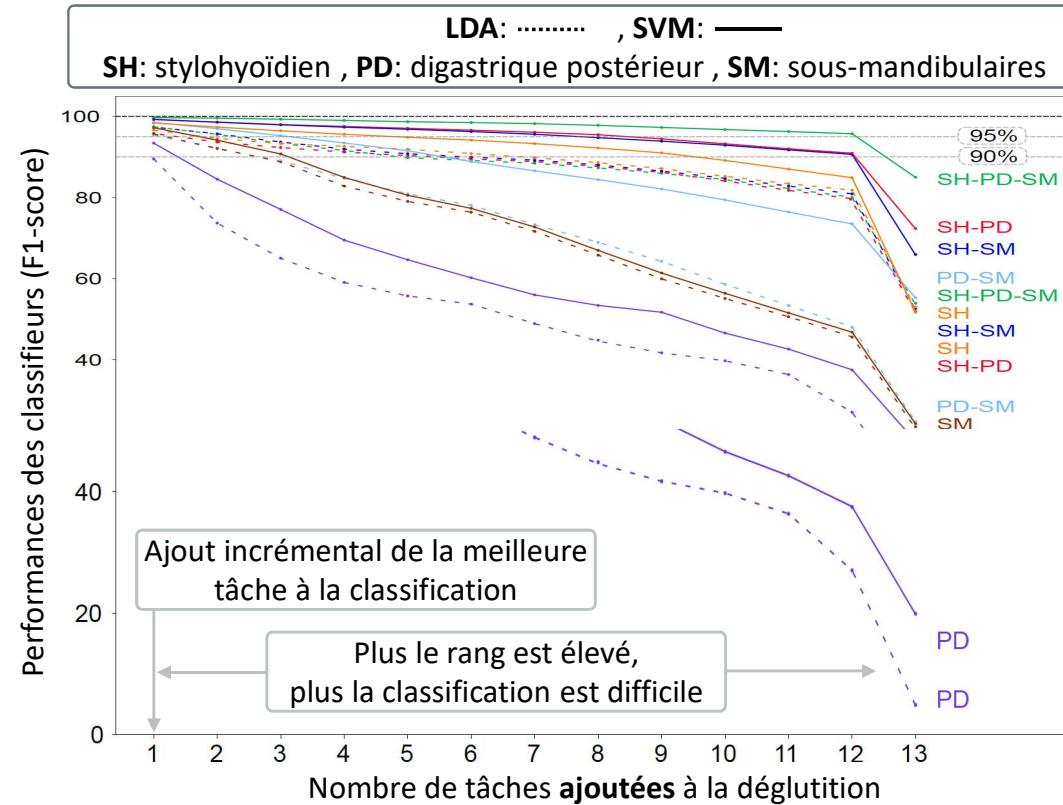
4. Détection temps réel – Classification des tâches



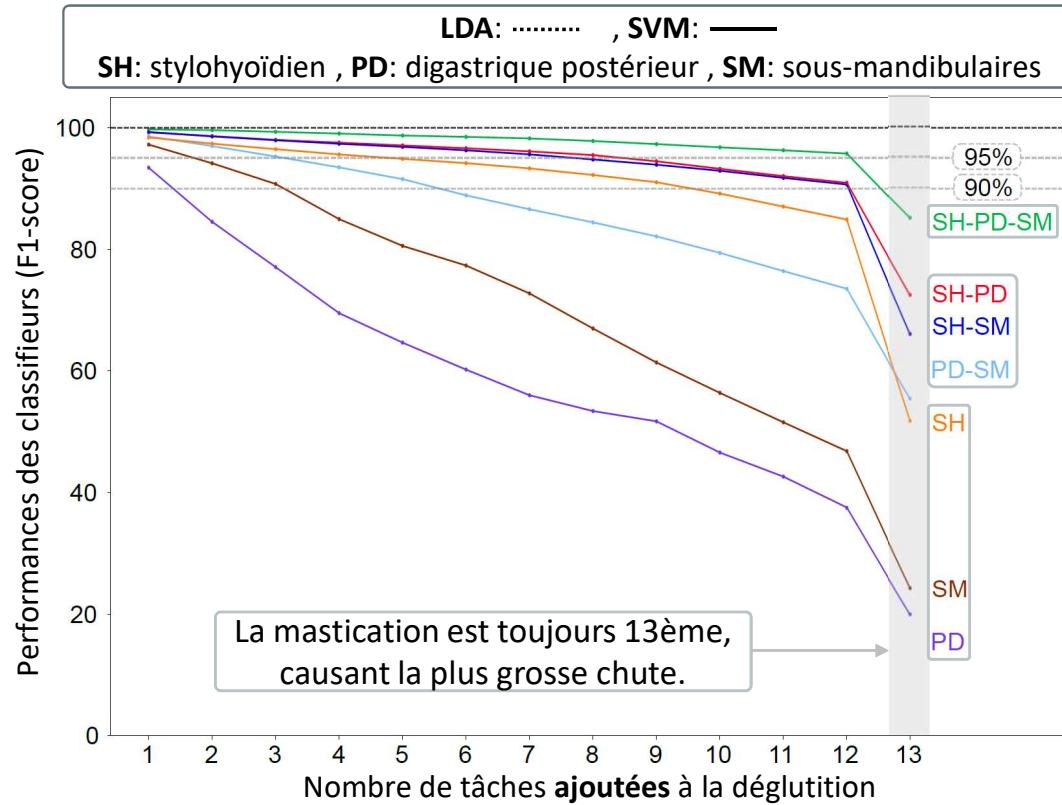
Méthode:
Sequential forward selection



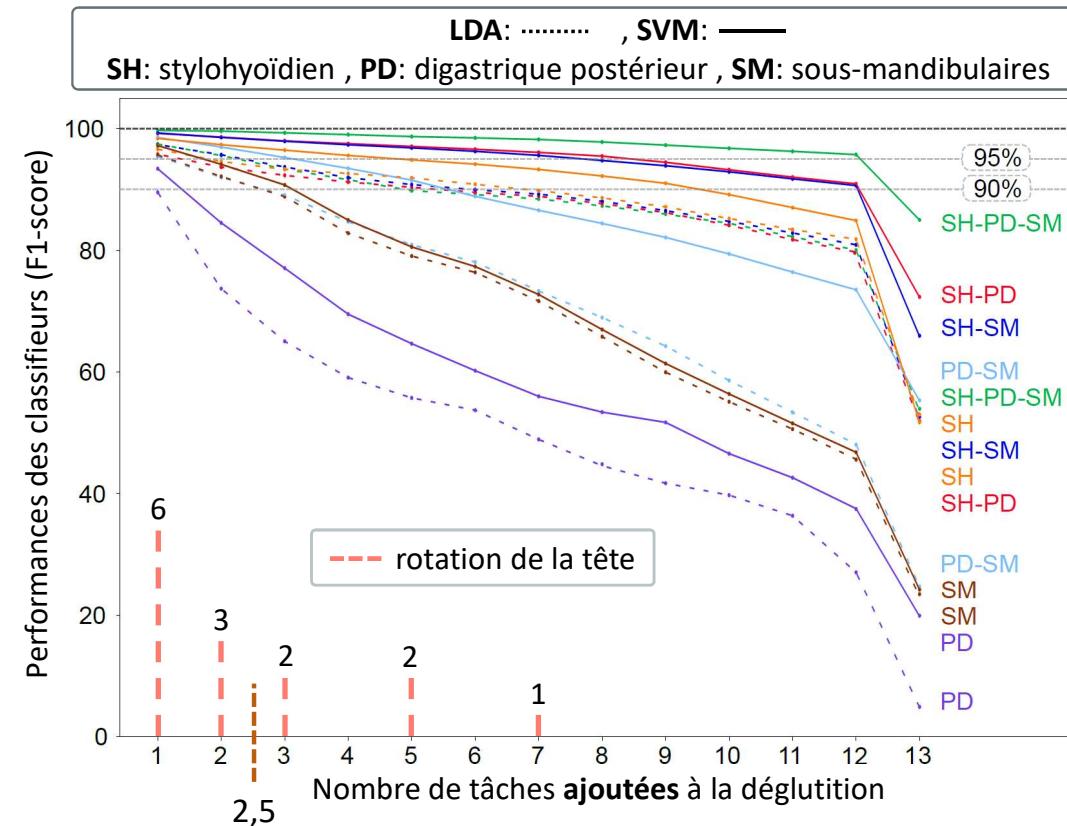
4. Détection temps réel – Classification des tâches



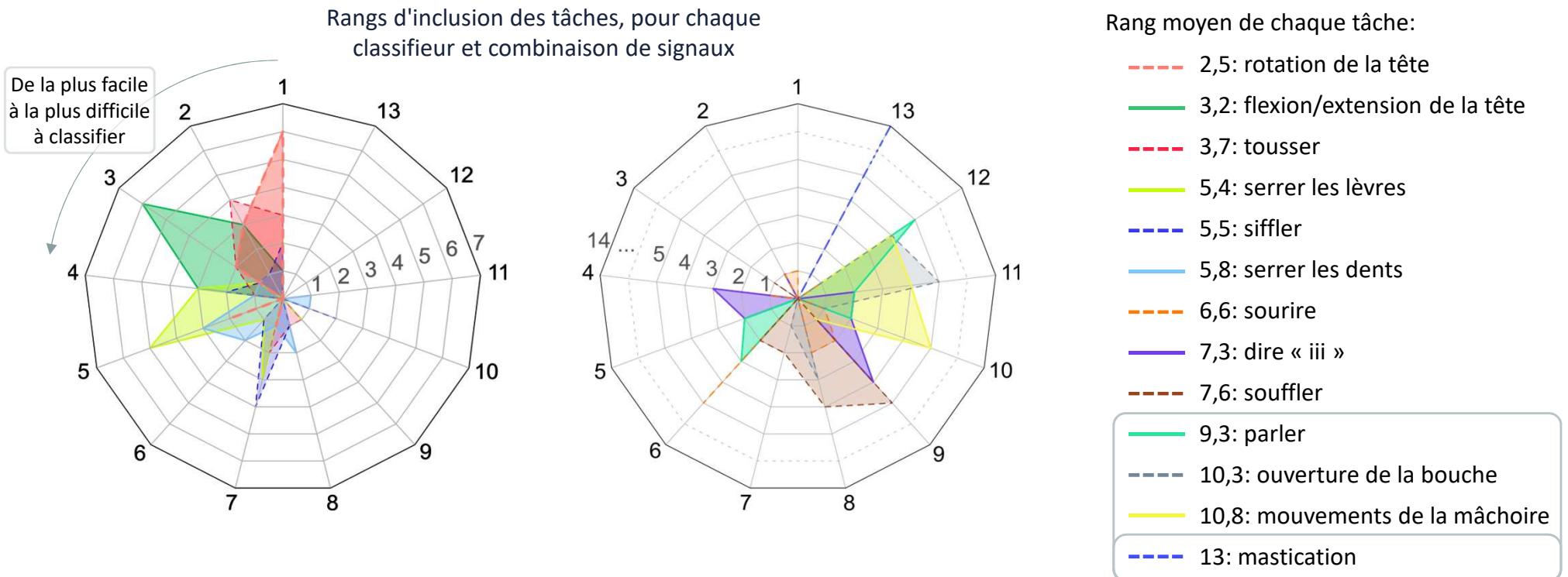
4. Détection temps réel – Classification des tâches



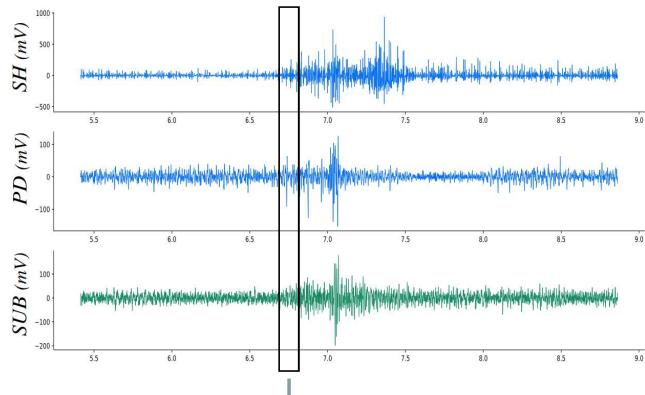
4. Détection temps réel – Classification des tâches



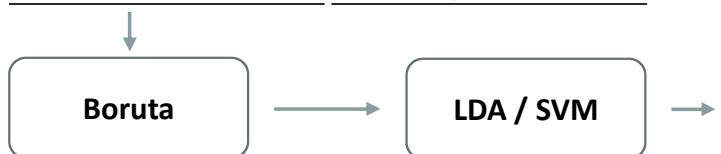
4. Détection temps réel – Classification des tâches



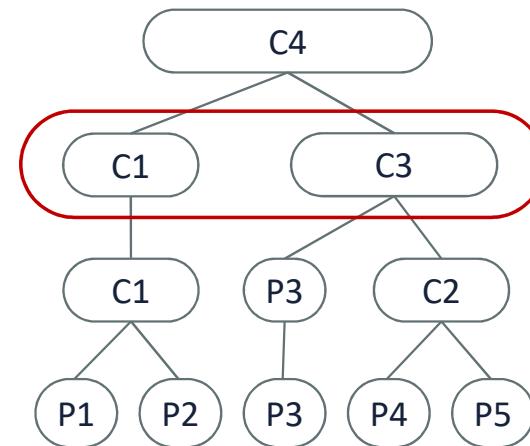
4. Détection temps réel – Regroupement de participants



Feature	Equation	Feature	Equation
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2}$	SSI	$\sum_{n=1}^{N-1} x_n^2$
MAV	$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n $	MYOP	$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi(x_n)$
WL	$\sum_{n=1}^{N-1} x_{n+1} - x_n $	WAMP	$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \phi(x_n - x_{n+1})$
M2	$\sum_{n=1}^{N-1} (x_{n+1} - x_n)^2$	DVARV	$\frac{1}{N-2} \sum_{n=1}^{N-1} (x_{n+1} - x_n)^2$
ZC	$\sum_{n=1}^{N-1} [\phi(x_n \times x_{n+1}) \cap x_n - x_{n+1} \geq thr]$	DAMV	$\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} x_{n+1} - x_n $
SSC	$\sum_{n=2}^N \phi[(x_n - x_{n-1}) \times (x_n - x_{n+1})]$	DASDV	$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (x_{n+1} - x_n)^2}$



Méthode:
Agglomerative hierarchical clustering



Distance euclidienne moyenne entre les déglutitions.

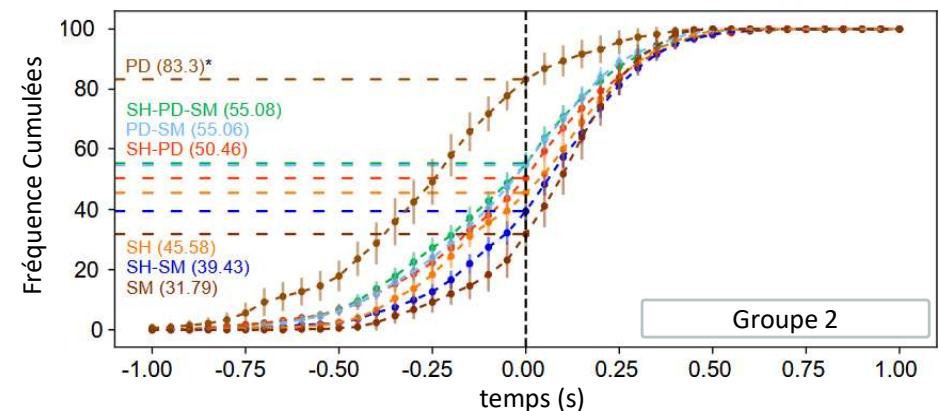
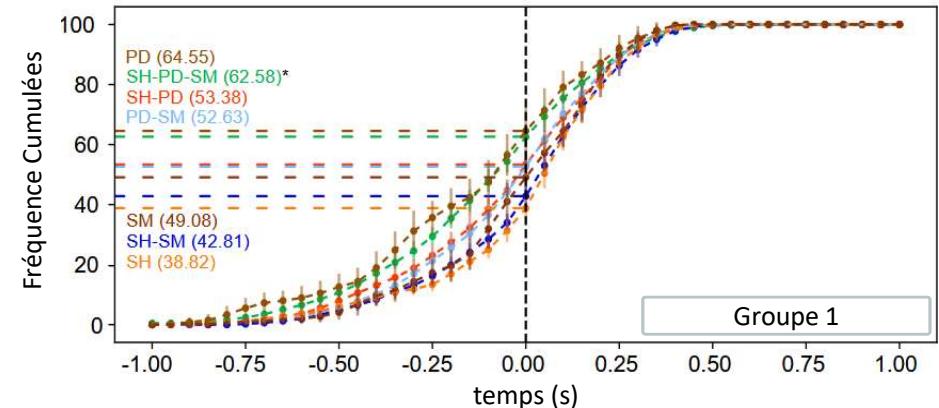
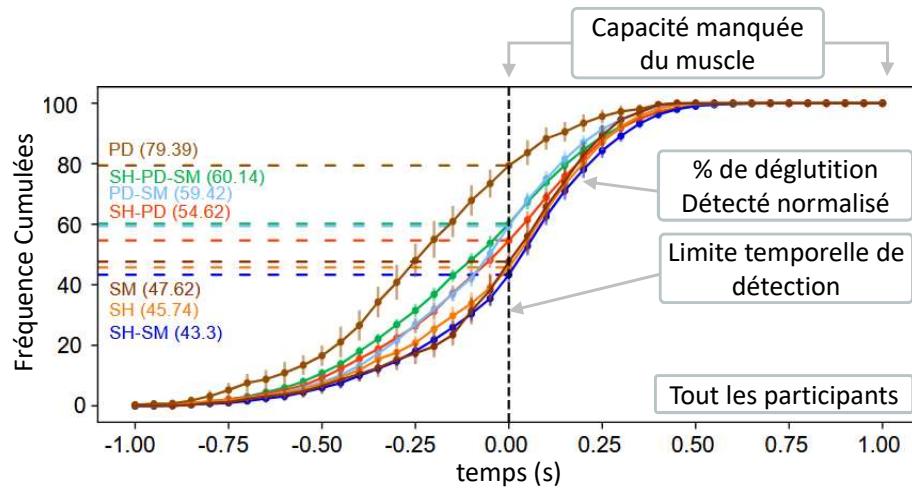
4. Détection temps réel – Regroupement de participants

Effet du regroupement des participants en deux groupes

	Tout les participants			
	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel
SH-PD-SM	90.36 (1.03)	80.27 (1.31)	84.98 (0.76)	96.31 (1.49)
SH-SM	82.51 (1.52)	54.77 (1.56)	65.84 (1.33)	84.83 (2.31)
PD-SM	80.79 (2.01)	41.98 (1.49)	55.25 (1.51)	70.65 (2.21)
SH-PD	76.72 (1.01)	68.39 (1.51)	72.28 (1.44)	90.11 (1.44)
SH	73.86 (1.86)	39.71 (1.74)	51.65 (1.68)	68.46 (2.58)
PD	61.51 (6.01)	11.81 (0.93)	19.81 (1.92)	19.95 (1.81)
SM	47.71 (3.11)	15.91 (1.29)	23.85 (1.74)	33.51 (1.57)
	Groupe 1			
	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel
SH-PD-SM	92.65 (1.29)	86.47 (1.67)	89.45 (1.13)*	97.71 (1.33)
SH-SM	86.81 (1.64)	63.82 (2.41)	73.56 (1.83)*	90.76 (2.26)
PD-SM	86.17 (2.23)	55.62 (2.53)	67.59 (2.11)*	81.93 (3.04)
SH-PD	86.37 (2.01)	69.58 (2.37)	77.07 (1.74)*	90.56 (2.33)
SH	77.22 (2.37)	49.23 (2.43)	60.13 (2.15)*	77.17 (3.69)
PD	75.45 (9.94)	15.01 (1.21)	25.04 (2.91)*	26.77 (1.76)
SM	53.39 (4.07)	24.84 (2.15)	33.87 (2.57)*	36.38 (3.82)
	Groupe 2			
	Précision	Rappel	F1-score	D-Rappel
SH-PD-SM	91.77 (1.45)	85.06 (1.58)	89.29 (1.11)*	96.81 (1.42)
SH-SM	83.35 (2.28)	62.61 (2.06)	71.64 (1.74)*	89.56 (2.65)
PD-SM	81.55 (2.44)	46.78 (2.31)	59.45 (2.05)*	71.46 (3.21)
SH-PD	80.67 (1.66)	73.91 (1.86)	77.14 (1.52)*	93.22 (2.11)
SH	72.52 (2.91)	34.98 (2.34)	47.19 (2.34)	58.06 (3.34)
PD	75.92 (8.98)	10.96 (1.71)	19.15 (3.19)	20.05 (2.81)
SM	47.52 (3.52)	21.94 (1.13)	29.98 (2.01)*	36.25 (1.05)

■ Plus grande amélioration, par rapport au groupe contenant tous les participants

4. Détection temps réel – Regroupement de participants



Plan de la présentation

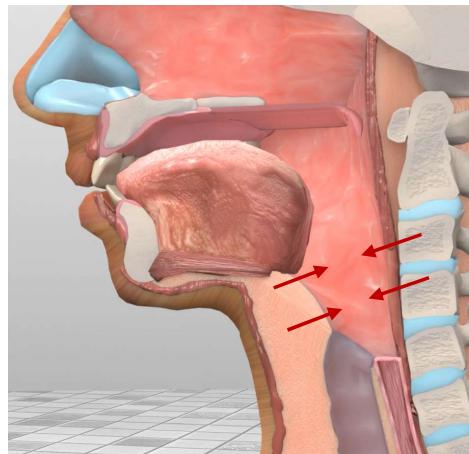
1. Contexte
2. Protocole de Recherche Clinique (PRC)
3. Étude statistique
4. Détection temps réel
- 5. Larynx Artificiel Implantable Actif (LAIA)**
6. Conclusion et perspectives



5. LAIA - Faisabilité

Reconstruction des voies aériennes

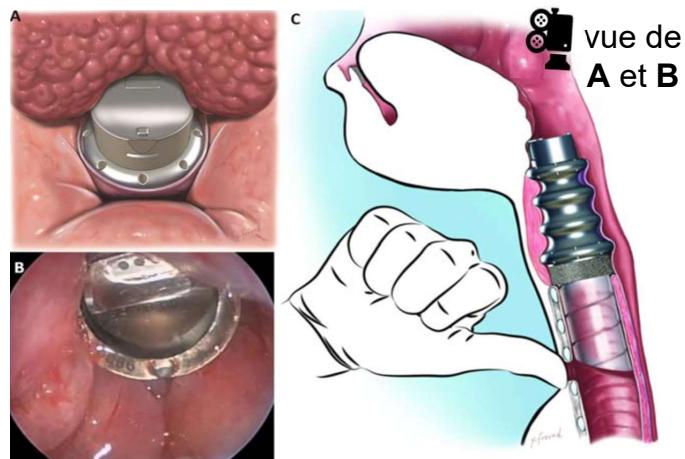
Système de protection actif



[H. C. Grillo 2002] prothèse synthétique inefficace.

5. LAIA - Faisabilité

Reconstruction des voies aériennes



Debry C. et al. 2014.

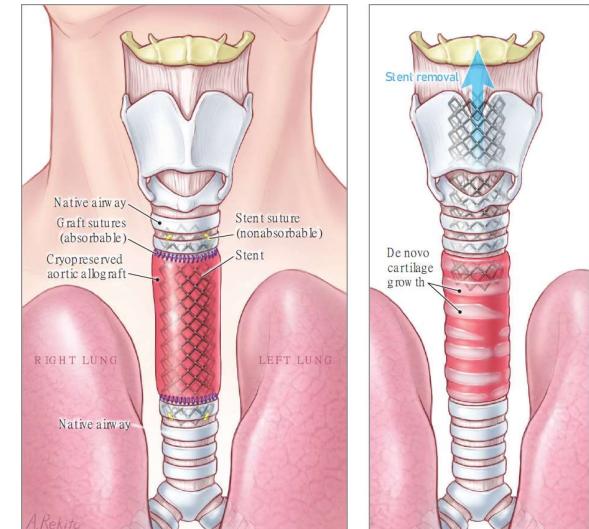
5. LAIA - Faisabilité

Reconstruction des voies aériennes

Prothèse trachéale fonctionnelle [H. Etienne et al. 2018, H. C. Grillo 2002]:

- Flexibilité longitudinale.
- Rigidité.
- Étanchéité: épithélium respiratoire.
- Non-immunogénicité.
- Fiabilité et reproductibilité de la méthode.
- Biocompatibilité des matériaux.

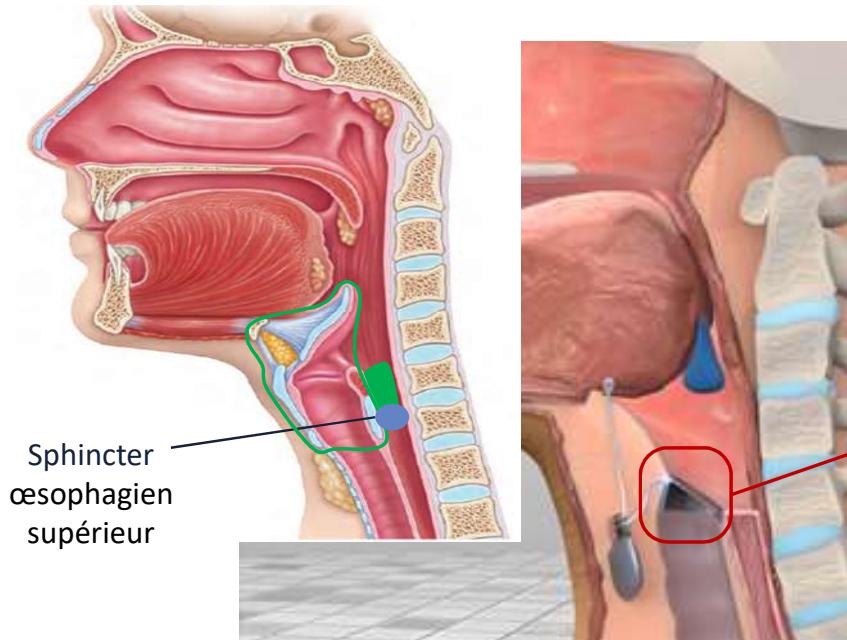
[H. C. Grillo 2002] prothèse synthétique inefficace.



E. Martinod et al. 2018

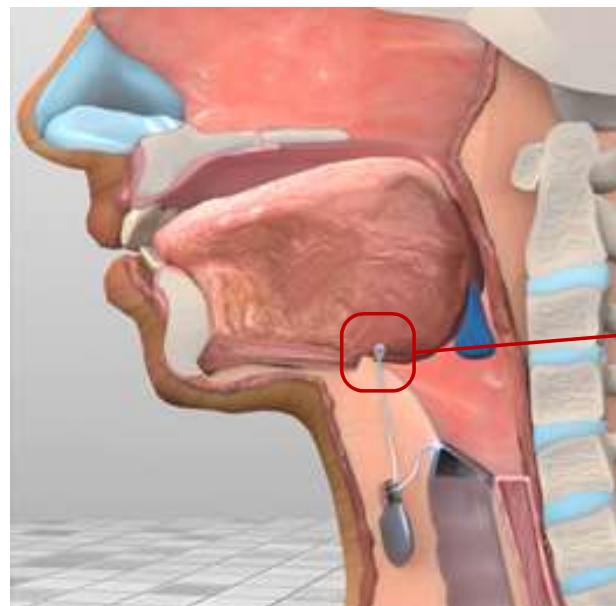
5. LAIA - Faisabilité

Système de protection actif



- Mécanisme de protection fonctionnel:
- Surélévation de l'entrée du larynx
 - Détournement du bol alimentaire
 - Permettre une intervention médicale
 - Compatibilité avec la radiothérapie
 - Permettre l'expectoration des sécrétions
 - Interdire toute fermeture définitive
 - Rapidité de fermeture
 - Petite taille

5. LAIA - Faisabilité

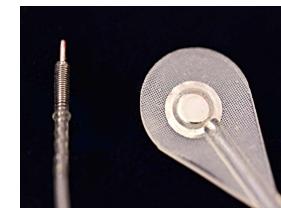


Reconstruction des voies aériennes

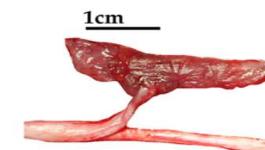
Système de protection active

Mesures implantables:

- K. A. Yildiz et al. 2020 (survey)

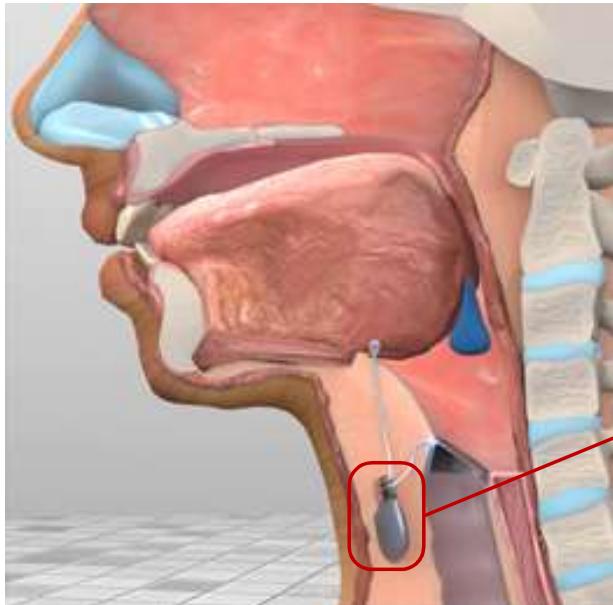


- Vue et al. 2020, K. L. Burke et al. 2022:



5. LAIA - Faisabilité

Reconstruction des voies aériennes

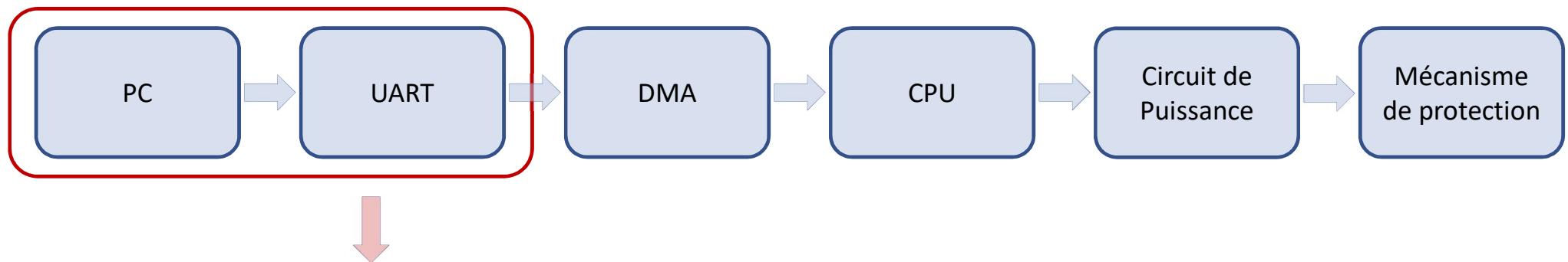


Système de protection active

Rapidité de l'unité de calcul:

- Prothèses de bras robotisées [A. Jaramillo-Yáñez et al. 2020, N. Parajuli et al. 2019, R. H. Chowdhury et al. 2013]:
 - Contraintes de temps et de calcul comparables
 - Signaux relativement stationnaires
 - Pas de contrainte de consommation majeure
 - Pas d'enjeux vitaux

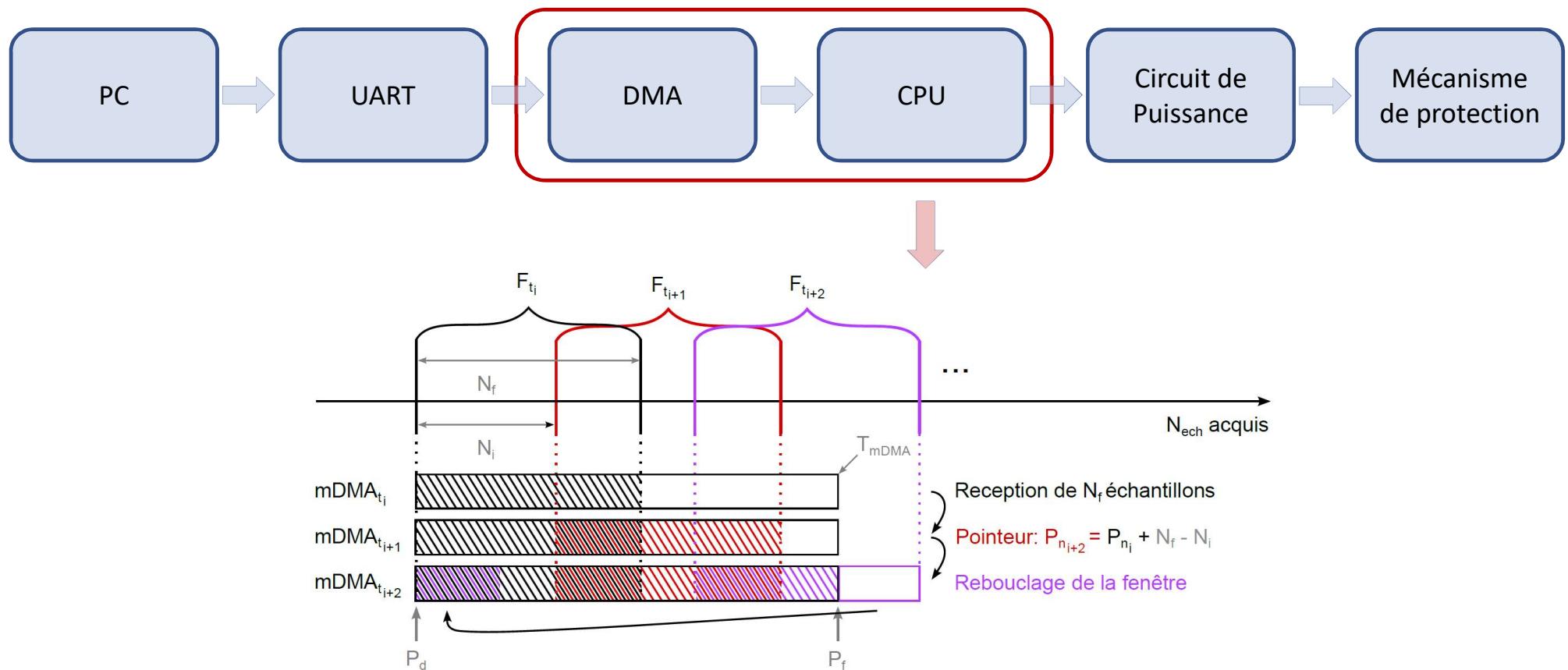
5. LAIA – Prototype de laboratoire



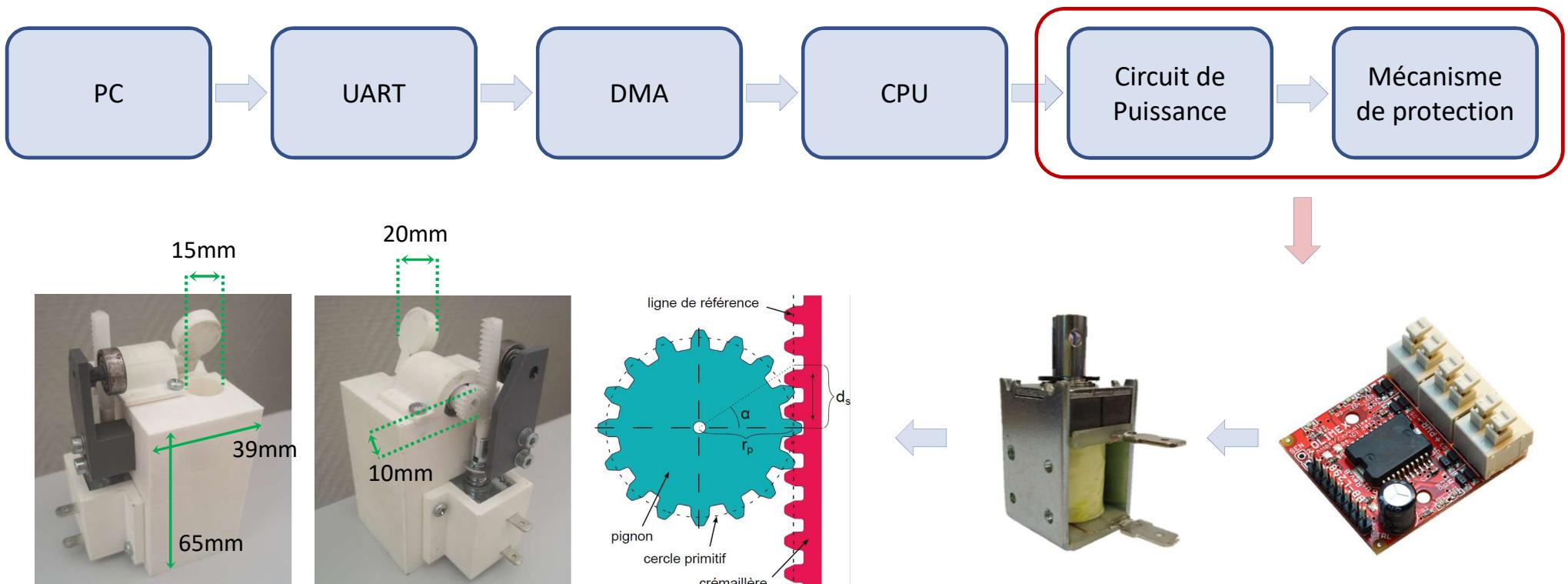
- Liaison série.
- Envoi temps réel.



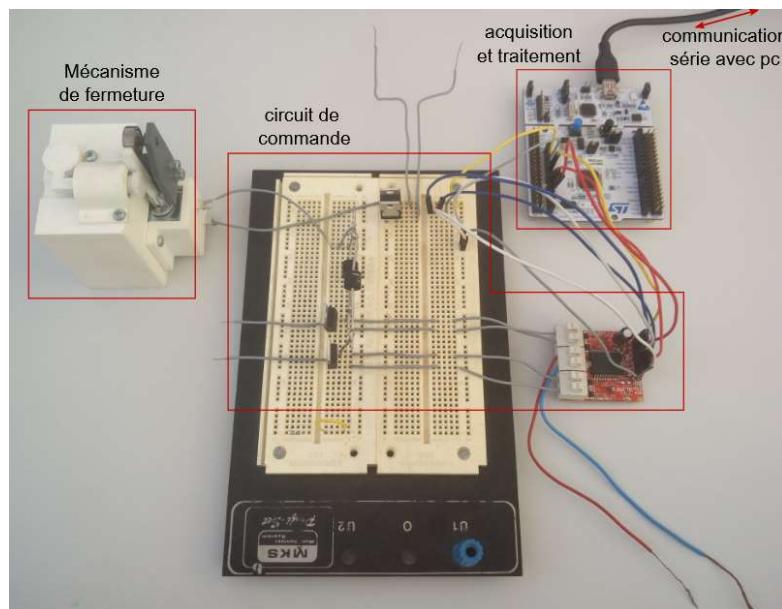
5. LAIA – Prototype de laboratoire



5. LAIA – Prototype de laboratoire



5. LAIA – Prototype de laboratoire



Microcontrôleurs utilisés

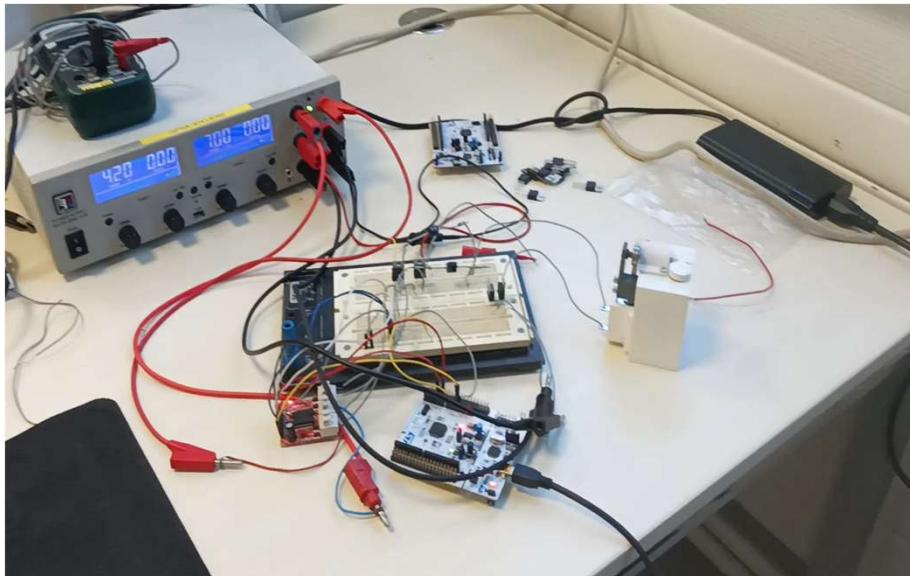
	CPU	Fréquence CPU max (MHz)	Mémoire Flash (Kbytes)	Consommation (μ A/MHz)	UART	DMA	FPU	DSP
NUCLEO-L010RB	Cortex M0	32	128	93	✓	✓	X	X
NUCLEO-F446RE	Cortex M4	180	512	100	✓	✓	✓	✓
NUCLEO-U575ZI	Cortex M33	160	2000	19.5	✓	✓	✓	✓

✓ : module présent, X : module non-présent.

Configurations évaluées:

- Classificateurs: LDA, SVM, ANN
- Taille de fenêtre: 200 points, 400 points
- Intervalle entre fenêtres: 50 ms
- Signaux considérés: SH-PD, SH-PD-SM

5. LAIA – Prototype de laboratoire



Caméra rapide (1000 fps):

- La détection d'une déglutition allume une LED
- $T_a = T_f - T_{LED}$
- $T_a = 22ms$

Résultats par configuration

microcontrôleur	classifieur	taille de la fenêtre	signaux	temps (ms)	consommation (mA)	durée (ms)
L010RB	LDA	400	SH-PD	72.78	5.15	100
			SH-PD-SM	108.85	7.15	100
		200	SH-PD	38.18	5.44	50
			SH-PD-SM	55.26	3.93	100
	ANN	—	—	—	—	—
	SVM	—	—	—	—	—
F446RE ■	LDA	400	SH-PD	1.41	8.13	50
			SH-PD-SM	1.92	8.37	50
		200	SH-PD	0.76	7.91	50
			SH-PD-SM	1.13	8.03	50
	ANN	400	SH-PD-SM	2.31	24	50
	SVM	—	—	—	—	—
U575ZI ■	LDA	400	SH-PD-SM	2.69	1.93	50
	ANN	400	SH-PD-SM	3.27	1.95	50
	SVM	400	SH-PD-SM	135	3.5	50

■ classificateurs non implémentés. ■ possède un module FPU et DSP.

Temps total pire scénario - 400 points, SH-PD-SM, ANN:

$$T_T = 22 + 3,27 = \mathbf{25,27ms}$$

Plan de la présentation

- 1. Contexte**
- 2. Protocole de Recherche Clinique (PRC)**
- 3. Étude statistique**
- 4. Détection temps réel**
- 5. Larynx Artificiel Implantable Actif (LAIA)**
- 6. Conclusion et perspectives**



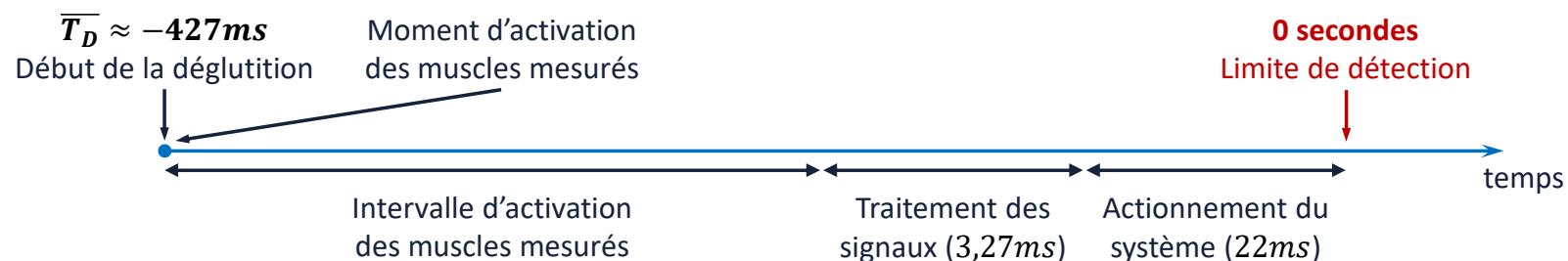
6. Conclusion et perspectives

- Mesure des muscles stylohyoïdien (SH) et digastrique postérieur (PD):
 - Élaboration d'une méthode novatrice par électromyographie intramusculaire.
- Timings:
 - Activation des muscles SH et PD au début de la déglutition.
 - Précocité de l'activité du muscle PD.
- Amplitude:
 - Prédisposition du muscle SH à la déglutition.
 - Stabilité du muscle SH.

6. Conclusion et perspectives

- Détection temps réel:
 - Amélioration significative de la **justesse** de détection avec le muscle SH.
 - Amélioration significative de la **précocité** de détection avec le muscle PD.
 - Potentiel effet synergique entre les muscles SH et PD.

- Larynx artificiel implantable actif:
 - Les méthodes de mesure et de reconstruction des voies aériennes sont prometteuses.
 - Prototype de laboratoire actionnable en **25,27ms**.



6. Conclusion et perspectives

- Recherche d'informations complémentaires sur l'activité du cou.
- Développement d'un mécanisme de protection de la trachée.
- Étude du système sur des patients laryngectomisés totaux.
- Élaboration d'un algorithme aux contraintes temporelles fortes.
- Étude des cas particuliers: vomissement, sommeil, évolution temporelle, ...



Publications

- Revues internationales à comité de lecture:
 - Survey
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. "Toward a robust swallowing detection for an implantable active artificial larynx : a survey". In : Medical & Biological Engineering & Computing (2023), p. 1299-1327. doi : [10.1007/s11517-023-02772-8](https://doi.org/10.1007/s11517-023-02772-8).
 - Articles
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. "Stylohyoid and posterior digastric potential evaluation for a real-time swallowing detection, with intramuscular EMG". In: IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics (2023), doi: [10.1109/TMRB.2023.3336960](https://doi.org/10.1109/TMRB.2023.3336960).
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. "Stylohyoid and posterior digastric recruitment pattern evaluation in swallowing and non-swallowing tasks". In : Innovation and Research in BioMedical engineering (2023). Doi: [10.1016/j.irbm.2024.100823](https://doi.org/10.1016/j.irbm.2024.100823).
 - **A. Mialland** et al. "Submental MechanoMyoGraphy (MMG) to Characterize the Swallowing Signature". In : Innovation and Research in BioMedical engineering (2021). doi : [10.1016/j.irbm.2021.05.001](https://doi.org/10.1016/j.irbm.2021.05.001).
- Conférences internationales à comité de lecture:
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. "Stylohyoid and posterior digastric measurement with intramuscular EMG, submental EMG and swallowing sound." In : Biomedical Engineering Systems and Technologies (2023). Lisbonne. doi : [10.5220/0011628100003414](https://doi.org/10.5220/0011628100003414).
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. "Stylohyoid and posterior digastric timing evaluation". In : Body Sensor Networks (2023). Boston. Doi: [10.1109/BSN58485.2023.10331308](https://doi.org/10.1109/BSN58485.2023.10331308).
- Conférence internationale:
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. *The inherent complexity of an implantable active artificial larynx*. Recherche en Imagerie et Technologies pour la Santé. Brest. 2022.
- Conférence nationale:
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. *Vers la faisabilité d'un larynx artificiel implantable actif*. Société Française de Phoniatrie et Laryngologie. Tours. 2021.
- Protocole de recherche clinique:
 - **A. Mialland**, I. Atallah et A. Bonvilain. *Detection of Early Swallowing Time by Electromyogram and Sound Recording in Healthy Volunteers*. <https://clinicaltrials.gov/>. Protocol ID : 38RC22.0096.2022.