



## **Contrôle optimal des articulateurs de la parole.**

Contact : [Pascal.Perrier@gipsa-lab.fr](mailto:Pascal.Perrier@gipsa-lab.fr), [Pierre.Baraduc@gipsa-lab.fr](mailto:Pierre.Baraduc@gipsa-lab.fr)

### **Contexte**

La production de la parole est une tâche qui requiert une grande dextérité. Certains sons, comme le /i/, le /s/ ou le // nécessitent un positionnement très précis de la langue dans l'espace buccal au cours du temps. Pourtant, sauf situation pathologique, chaque humain est capable de cette tâche motrice, depuis son plus jeune âge (1 an pour les premiers mots) jusqu'à un âge très avancé. Cette tâche peut aussi être exécutée avec précision dans des conditions très variables : en marchant, courant ou sautant, en mangeant, allongé ou debout... Cette précision et cette stabilité sont favorisées par les propriétés physiques et physiologiques de l'appareil de production de la parole (langue, mandibule, lèvres, plis vocaux), mais elles seules ne suffisent pas à expliquer toutes les situations d'adaptation observées. Par ailleurs, la parole est une tâche très rapide, dont les transitions entre sons peuvent être de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes, alors même qu'une centaine de millisecondes est nécessaire au cerveau pour ajuster l'articulation sur la base des retours sensoriels, auditifs et somatosensoriels.. Le contrôle précis de la production de la parole ne peut donc pas s'appuyer exclusivement sur un contrôle de type feedback qui se baserait uniquement sur les signaux d'erreur entre les objectifs de la production de la parole et les signaux effectivement produits. Il nécessite une forme de prédiction des conséquences sensorielles de l'action, en fonction des caractéristiques de l'environnement et de la possibilité de perturbations. Enfin, même en conditions idéalement stables, la production de parole est variable, et ce, pour deux raisons très différentes. D'une part, la production d'une même syllabe répétée sera variable à cause des limites de fiabilité temporelle et spatiale des signaux sensoriels et moteurs, d'effets d'hystérésis, et peut-être de la propagation de bruit dans le système non-linéaire complexe qu'est un réseau de neurones. D'autre part, la production d'un même phonème (p. ex. voyelle) sera différente en fonction des phonèmes qui l'ont précédé ou qui le suivront : c'est ce qu'on appelle la co-articulation. Cette variation dans la production d'un même phonème réduit l'effort de parole. En résumé, pour produire une phrase, le cerveau gère une trajectoire complexe entre sous-buts de parole, dans un contexte d'information sensorielle et de précision motrice limitée. Comment fait-il ?

L'hypothèse d'un contrôle feedback optimal (Todorov et Jordan, 2002) semble une piste intéressante. Le principe du contrôle feedback optimal consiste à prendre en compte (1) les retours sensoriels avec leur retard et leur imprécision, (2) des prédictions de l'état effectif instantané du système de production à l'aide d'un modèle interne de ce système dans le cerveau, et (3) des principes de minimisation d'un coût (effort, imprécision...) pour assurer la stabilité de la tâche et la correction des commandes motrices dans le cas d'un choix initial inapproprié des commandes motrices ou dans le cas de perturbations externes inattendues. Pour un système à contrôler suffisamment simple, une solution formelle à ce problème a été démontrée.

L'objectif du travail dans le cadre du master sera d'explorer les prédictions d'un tel modèle en fonction des hypothèses formulées sur le coût à minimiser et l'imprécision des signaux sensorimoteurs. En fonction de l'aisance mathématique du candidat, celui-ci pourra tester des formulations plus ou moins complexes du contrôle optimal. Ce stage vient à la suite d'une thèse en sciences cognitives (à soutenir au premier trimestre 2017) qui a étudié les possibilités de traitements de perturbations soudaines de la production de la parole, sans pour autant se placer dans le cadre du contrôle feedback optimal. Ce stage pourra ensuite donner lieu à une thèse se focalisant, selon les intérêts scientifiques du candidat, plutôt sur les aspects de contrôle optimal ou plutôt sur les aspects liés à la prise en compte d'un feedback dans le schéma général du contrôle en temps réel de la parole, et combinant éventuellement à la modélisation des aspects expérimentaux.

### **Programme de travail**

L'hypothèse d'un contrôle feedback optimal sera testée sur le contrôle d'un modèle biomécanique de la langue qui produit des mouvements d'articulation à partir des commandes motrices envoyées aux principaux muscles linguaux. Ce modèle est couplé à un modèle acoustique qui permet de calculer les caractéristiques spectrales du signal de parole associé aux mouvements de la langue, caractéristiques pertinentes pour le système perceptif de l'auditeur. Un grand nombre de simulations (environ 20000) a été réalisé, qui permet de caractériser les relations entre commandes motrices, déplacement de la langue et caractéristiques spectrales du signal de parole.

Dans une phase préparatoire, avant l'arrivée au laboratoire, une courte étude bibliographique permettra de se familiariser avec les concepts et la structure des systèmes de contrôle optimal classiques. Au début du stage, l'étudiant sera guidé dans sa compréhension du code Matlab déjà développé au laboratoire pour calculer rapidement une approximation non-linéaire du modèle de langue dérivée des simulations. Le stage proprement dit débutera avec la familiarisation avec cette base de travail, et la simplification à un modèle linéaire invariant. Ensuite, on cherchera à tester progressivement des principes de contrôle de complexité croissante.

Une première étape se centrera sur l'optimisation de l'effort (ou de la variabilité puisqu'elle en est étroitement dépendante) dans un modèle purement en boucle ouverte, selon le principe décrit par Harris & Wolpert (1998). On dérivera ainsi des trajectoires articulatoires dont on étudiera la dépendance aux caractéristiques biomécaniques de l'articulateur et qu'on comparera aux données expérimentales. On examinera les variations induites par différents choix de modélisation des retours proprioceptifs.

Dans une deuxième étape, on rajoutera un étage d'estimation optimale des retours sensoriels, auditifs et proprioceptifs, pour obtenir un système en boucle fermée. Ceci permettra de tester l'effet de perturbations du retour auditif ou de perturbations mécaniques de la langue. On cherchera à caractériser l'impact de la fiabilité (bruit) et du retard de ces signaux. On s'intéressera également aux effets de co-articulation prédits par le modèle. Enfin, les prédictions de ce modèle de contrôle stochastique feedback optimal seront confrontées aux données de la littérature expérimentale sur la compensation de perturbations inattendues de la production de la parole. Ces comparaisons permettront à la fois d'améliorer le modèle et de guider de futures expériences.

### **Références**

Todorov, E., & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature neuroscience*, 5(11), 1226-1235.

Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in cognitive sciences*, 2(9), 338-347.

Harris C., Wolpert, D.M. (1998) Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394 (6695) 780-784