

# Mise au point d'un paradigme de perturbation motrice pour l'étude de la perception de la parole

*Ali Hadian Cefidekhanie, Christophe Savariaux, Marc Sato, Jean-Luc Schwartz*

Gipsa-Lab, Département Parole Cognition, UMR 5216 CNRS, Grenoble INP,

Université Joseph Fourier, Université Stendhal, Grenoble, France

jean-luc.schwartz@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

## RESUME

---

Pour mettre en évidence le rôle des connaissances motrices dans la perception de la parole, il peut être nécessaire de tenter de moduler l'accès à ces connaissances lors d'une tâche de perception, ce qui peut passer par l'utilisation de paradigmes de double tâche. Mais il faut alors s'assurer que la tâche motrice supposée moduler la perception ne produit pas directement de son ou n'évoque pas d'image auditive par copie d'efférence. Nous proposons et testons des tâches de production de gestes orofaciaux de la mâchoire ou des lèvres, ne produisant pas d'image auditive, mais dont nous montrons qu'elles mobilisent bien le système de production de la parole en perturbant une tâche de production de parole intérieure (comptage mental). Des sujets devant à la fois compter mentalement et produire ces gestes orofaciaux, sont fortement ralentis comparativement à une tâche contrôle de production de gestes manuels.

## ABSTRACT

---

### Defining a motor perturbation paradigm for speech perception studies

To display the role of motor knowledge in speech perception it may be necessary to attempt to modulate access to such knowledge during perception, in double tasks paradigms. But the motor task supposed to modulate perception must not produce itself some auditory perturbation either directly or through auditory imagery due to efference copy mechanisms. We propose and test tasks involving cyclic jaw or lip gestures, which do not produce such auditory images, but however perturbate inner speech production. This is evidenced in a task in which subjects must mentally count while producing such orofacial gestures, leading to a strong slowing of mental counting in respect to manual perturbations used as controls.

---

MOTS-CLES: lien perceptuo-moteur, double tâche, parole intérieure, comptage mental, perturbation  
KEYWORDS: perceptuo-motor link, double task, inner speech, mental counting, perturbation

---

## 1. Introduction

### 1.1. Les relations entre perception et action dans la communication parlée

Les découvertes des neurosciences cognitives ces 20 dernières années ont profondément transformé le débat sur les processus mis en œuvre dans la perception de la parole. La question de la nature des représentations, auditives (voir par exemple Diehl et al., 2004) ou motrices (voir par exemple Liberman & Whalen, 2000) a laissé place à un nouvel enjeu central, celui des interactions entre processus moteurs et perceptifs. Les données de neuroimagerie ont permis de mettre en évidence une architecture corticale reliant aires auditives (dans le cortex temporal) et aires motrices (dans le cortex frontal) au sein d'une « voie dorsale » passant par le lobe pariétal, et dont le rôle principal serait de relier représentations auditives et motrices dans les processus d'apprentissage et de répétition (Hickok & Poeppel, 2007).

La question récurrente est celle de l'implication de cette voie dorsale dans les processus de communication en ligne. En ce qui concerne la production de la parole, si l'on se réfère au modèle DIVA (Guenther, 2006), la voie dorsale est impliquée au cours du développement dans la mise en place des cartes sensori-motrices permettant de configurer dans le cortex prémoteur des commandes motrices associées à des cibles auditives. Par la suite, ces commandes feedforward permettent un contrôle en ligne de la production ne nécessitant que peu de recours à la voie

dorsale, sauf en cas de perturbations (auditives ou somesthésiques) qui impliquent la mise en œuvre de mécanismes de correction.

En ce qui concerne la perception de la parole, les données de neuroimagerie montrent clairement que les zones motrices et prémotrices sont activées dans diverses tâches de traitement perceptif de l'information phonétique auditive ou visuelle (Fadiga et al., 2002; Watkins et al., 2003; Wilson et al., 2004; Skipper et al., 2007 ; Pulvermüller et al., 2006). Mais ces activations, qui découlent de l'implication de la voie dorsale, ne démontrent pas ipso facto l'existence d'un rôle fonctionnel des centres moteurs dans les traitements perceptifs. On trouvera ainsi des propositions minimisant ce rôle fonctionnel (voir Hickok & Poeppel, 2007 ; Scott et al., 2009) ; d'autres le considérant au contraire comme central (Pulvermüller & Fadiga, 2010) ; et finalement, notre position dans le cadre de la PACT (Perception for Action Control Theory, Schwartz et al., 2010) considérant que les non-linéarités articulatoire-acoustiques jouent un rôle structurant, qui implique une nature auditive des représentations ; mais avec un rôle fonctionnel des processus moteurs, notamment dans les mécanismes de liage et de structuration des flux perceptifs (Basirat et al., 2011). Parallèlement, des arguments de modélisation computationnelle suggèrent que les connaissances motrices pourraient apporter un gain dans les mécanismes de décodage phonétique dans des conditions de communication dégradée, par le bruit ou le traitement d'un accent par exemple (voir Castellini et al., 2011, Moulin-Frier et al., 2012).

Pour progresser expérimentalement sur cette question du rôle fonctionnel des processus moteurs dans la perception de la parole, une solution consiste à essayer de trouver un moyen de moduler les possibilités d'accès aux capacités de production et d'examiner si cette modulation produit des effets sur les performances de compréhension. C'est dans ce cadre que se situe le présent travail.

## 1.2. Perturber les capacités perceptives par modulation des capacités motrices

Le premier type de modulation est fourni par les données neurologiques de patients aphasiques. Les méta-analyses qui en ont été faites notamment par Hickok & Poeppel (2004, 2007) concluent à une double dissociation entre tâches de « perception » sous-lexicales (n'impliquant pas le contact avec le lexique) et dépendant de l'intégrité des zones motrices et de la voie dorsale, et tâches de « compréhension » ou « reconnaissance » impliquant l'accès au lexique et ne présentant pas de dégradation significative dans le cas de lésion frontale des zones motrices ou prémotrices (d'Ausilio et al., 2009b, font cependant une lecture plus contrastée). Reste que ces données sont toujours fragmentaires et d'interprétation complexe, et ne fournissent que des tests partiels et limités de l'hypothèse d'un rôle fonctionnel des centres moteurs sur les mécanismes de compréhension.

C'est pourquoi les chercheurs ont tenté de provoquer eux-mêmes des micro-perturbations temporaires, localisées et bien sûr réversibles, sur des régions spécifiques du cortex frontal (principalement, cortex moteur, cortex prémoteur, aire de Broca). Ainsi, l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS) sur le cortex prémoteur ventral a montré des effets perturbateurs sur l'identification phonémique de stimuli bruités (Meister et al., 2007) ou impliquant une segmentation préalable (Sato et al., 2009). L'application sélective de stimulation au niveau d'articulateurs spécifiques du cortex moteur (région des lèvres ou de la langue) permet de produire des modifications sélectives de catégorisation ou de discrimination phonétique en rapport avec la zone motrice impliquée (Möttönen & Watkins, 2009 ; d'Ausilio et al., 2009a). Sato et al. (2011) ont répliqué cet effet en remplaçant la technique de TMS par un effet de plasticité motrice consécutif à une période de production répétée d'actions de la langue ou des lèvres, et obtenu des effets similaires de modulation sélective, relative à l'articulateur mobilisé. Enfin, des études de Sato et al. (2009) et de d'Ausilio et al. (2011) montrent que ces effets de modulation de la performance perceptive disparaissent dans le cas de stimuli non bruités ; les effets de modulation motrice seraient donc limités aux conditions de communication dégradée, conformément aux résultats de modélisation computationnelle.

Ainsi ces expériences de perturbations temporaires montrent des effets, faibles mais concordants, d'une perturbation prémotrice ou motrice dans le cas de stimuli perceptifs ambigus. Néanmoins, ces perturbations sont indirectes et difficiles à contrôler et évaluer précisément.

## 1.3. Le paradigme de la double tâche

Un troisième outil est alors disponible, celui de la double tâche. Ce paradigme consiste à proposer à des sujets de réaliser une tâche motrice en même temps que leur tâche perceptive, et à évaluer comment la première perturbe la seconde. Dans le raisonnement à la base de ce paradigme de

double tâche, l'existence de perturbations démontre l'impact des processus moteurs, impliqués dans la tâche perturbatrice, sur les mécanismes perceptifs impliqués dans la tâche cible.

Ainsi, des mouvements manuels peuvent modifier la perception de la direction du mouvement dans des stimuli ambigus (Wohlschlaeger, 2000), ou l'identification de la direction d'un stimulus visuel concordant ou non avec la direction du mouvement manuel associé (Musseler & Hommel, 1997) ; soulever un objet plus ou moins lourd affecte le jugement perceptif sur la masse d'un objet observé (Hamilton et al., 2004) ; et les exemples abondent qui indiquent des effets, facilitant ou contrariant, d'une action motrice compatible ou incompatible avec une tâche perceptive simultanée.

Dans le domaine du traitement de stimuli langagiers, le paradigme de la double tâche a été utilisé abondamment par Baddeley et coll. dans l'étude de la mémoire de travail verbale (Baddeley, 2003). Dans ce paradigme, on montre que si des sujets doivent utiliser leur système orofacial en même temps qu'ils cherchent à maintenir une liste d'items en mémoire, leurs performances chutent considérablement (effet de « suppression articulatoire » : voir Murray, 1968 ). Ce processus est interprété dans le cadre du modèle de la « boucle phonologique » dans laquelle un processus de répétition mentale permet de maintenir en mémoire de travail les stimuli langagiers au-delà de la durée d'environ 2s accessible au stockage phonologique (Baddeley & Hitch, 1974). L'interprétation est que la tâche perturbatrice (répéter un mot en boucle, par exemple) empêche ou gêne la répétition mentale et donc diminue significativement la capacité de mémorisation.

La boucle articulatoire étant probablement impliquée dans des mécanismes de resegmentation de stimuli répétés en boucle (effet de transformation verbale, Warren, 1961), l'effet de double tâche conduit à une diminution significative de l'effet de transformation verbale (Reisberg et al., 1989). De même, Rogalski et al. (2008) mettent en évidence le rôle de la mémoire de travail verbale dans le traitement syntaxique de séquences complexes en utilisant un paradigme de suppression articulatoire conjointe à une tâche de traitement syntaxique.

#### **1.4. Contenu perceptuo-moteur de la suppression articulatoire**

Le paradigme de la double tâche avec perception et production conjointe n'a été que très peu utilisé pour l'instant dans l'étude des mécanismes de décodage phonétique, qui sont pourtant au cœur des débats entre théories motrices et auditives. La raison en est probablement la difficulté de contrôler et caractériser précisément le contenu de la perturbation motrice. Dans la plupart des expériences sur les effets de suppression articulatoire sur la mémoire de travail verbale, la tâche perturbatrice implique la répétition à haute voix de stimuli langagiers, plus ou moins complexes, porteurs de sens ou non (typiquement, mono ou bisyllabiques). Cette tâche comporte donc à la fois une composante articulatoire et une composante auditive, susceptibles l'une et l'autre d'interférer avec la tâche perceptive cible. Une série d'expériences ingénieuses de Gupta & MacWhinney (1995) a permis à la fois de confirmer l'existence de composantes auditives (la suppression articulatoire étant moins perturbante pour la mémorisation lorsqu'elle est silencieuse que lorsqu'elle est sonore), mais aussi de confirmer le rôle de mécanismes articulatoires en tant que tels (la suppression articulatoire étant plus perturbante qu'une simple perturbation par stimuli sonores concomitants, perturbation dénommée « irrelevant speech effect »).

Une perturbation par production silencieuse ou interne (inner speech) semble évidemment plus adaptée. Néanmoins, on sait depuis longtemps que la production silencieuse génère également de l'imagerie auditive (ce que Gupta & MacWhinney considèrent sous le nom de « speech inside the head »), par un mécanisme de copie d'efférence. Ainsi, si une expérience de double tâche impliquant perception de parole et production silencieuse modifie le résultat de la tâche perceptive, on ne peut aisément séparer (1) l'appel du système perceptif aux compétences motrices pour la catégorisation (Fig. 1a), qui serait modulé par l'occupation du système moteur à sa tâche perturbatrice (Fig. 1b), (2) de l'interférence de l'image auditive générée par la perturbation, sur le stimulus cible à traiter perceptivement (Fig. 1c). C'est dans ce contexte que l'on peut interpréter l'une des rares expériences ayant impliqué le paradigme de double tâche dans l'étude des processus de décodage. Dans cette expérience, Sams et al. (2005) montrent que la production silencieuse d'une syllabe « pa » ou « ka » concomitante avec la présentation auditive d'une syllabe bruitée « pa » ou « ta » concordante ou discordante module la réponse du sujet, avec des effets très semblables aux effets de fusion audiovisuelle (renforcement de réponses correctes dans le cas de stimuli perçus et produits concordants, diminution de réponses correctes dans le cas de stimuli discordants, avec génération d'effets de type McGurk). Ces résultats peuvent s'interpréter aussi bien dans le cadre d'un processus feedforward-feedback (voir par exemple Skipper et al., 2007) avec appel feedforward aux connaissances motrices – sièges alors de la

perturbation – puis retour feedback vers les zones perceptives pour le décodage (Fig. 1b), que dans le cadre d'un processus de génération d'une image auditive par copie d'efférence et fusion de l'input auditif avec l'image auditive perturbatrice directement dans les aires auditives (Fig. 1c). C'est plutôt dans le cadre de la seconde hypothèse que Sams et coll. interprètent leurs données (voir aussi Sato et al., 2008 ; Kauramäki et al., 2010).

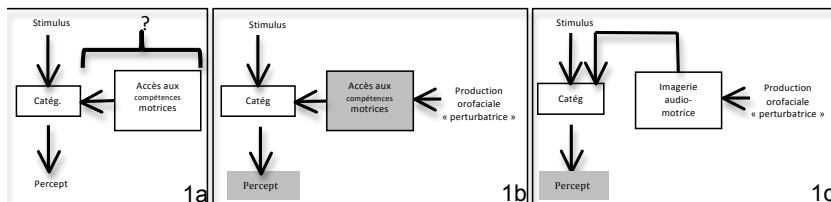


FIGURE 1 - Pour tester le rôle fonctionnel des compétences motrices dans la perception (a), on peut utiliser une perturbation orofaciale modulant l'accès à ces compétences motrices (b), mais une interprétation à l'aide de génération d'imagerie audio-motrice par copie d'efférence ne peut être écartée (c)

C'est pourquoi il peut sembler préférable d'utiliser une tâche mobilisant le système orofacial sans impliquer de production, même mentale, de stimuli de parole. Ce type de perturbation a été parfois utilisé, par exemple dans l'étude de Reisberg et al. (1989) cherchant à diminuer l'effet de transformation verbale sur des stimuli produits en parole intérieure, par des tâches perturbatrices telles que blocage de la mâchoire, maintien des lèvres jointes et de la langue collée au palais, mâchement de chewing-gum. Des données convergentes de neuroimagerie confirment que, si les aires auditives font partie intrinsèque du réseau du contrôle moteur en production de la parole (Bohland & Guenther, 2006), elles ne sont pas activées (ou en tout état de cause le sont significativement moins) par la production de gestes orofaciaux élémentaires (ouvrir la mâchoire, protrure les lèvres, rétracter la langue) (Grabski et al., 2012). La production de tels gestes orofaciaux semble ainsi résoudre les deux objectifs que l'on peut attendre d'un paradigme de « suppression articulatoire » dans l'étude de la perception de la parole : mettre à contribution le système de production et donc possiblement en moduler l'efficacité dans la tâche perceptive (Fig. 1b) sans produire d'image auditive par copie d'efférence (Fig. 1c).

Reste à déterminer jusqu'à quel point ce type de perturbation est capable de mettre à contribution le système de production de la parole, et donc de jouer un possible rôle modulateur en perception. C'est la question de l'efficacité de ce type de perturbation, et du choix de perturbations optimales, qui est l'enjeu du présent travail. Pour y répondre, nous allons également avoir recours à un paradigme de double tâche, mais ici de double tâche motrice, dans laquelle nous explorons comment différentes tâches de production de gestes orofaciaux perturbent la génération de la parole intérieure. Nous faisons le raisonnement suivant. Il est connu qu'une tâche de production de parole intérieure fait appel à réseau cortical proche de celui de production ouverte de la parole (Yetkin et al., 1995), et donc implique le réseau de ce que nous avons appelé les « compétences motrices ». Si une perturbation orofaciale est capable de mobiliser efficacement l'ensemble du système de production de la parole, elle doit alors perturber significativement la parole intérieure.

Le résultat n'est pas certain. Il a fait l'objet de vifs débats dans le passé. Ainsi, dans son étude sur la parole intérieure durant la lecture silencieuse, Pintner (1913) rappelle les positions opposées de Stricker (1880) considérant qu'on ne peut pas avoir « l'idée du son 'b' sans avoir la sensation d'un mouvement musculaire ou d'une innervation des lèvres » et de Paulhan (1886) affirmant qu'il était capable d'avoir l'idée d'une voyelle tout en en prononçant une autre. Ce rappel historique est également abordé par Jeannerod (2003) dans une revue de question sur la reconnaissance de soi : « *Authors of the time (e.g. Binet, 1886) claimed that mental images in general resulted from excitation of the same cerebral centers as the corresponding actual sensation (...)* for example, it was shown to be impossible for a subject to generate the image of pronouncing the letter /b/ if he kept the mouth wide open: this was because, supposedly, the motor system cannot be engaged in two contradictory actions at the same time ».

Les paradigmes de double tâche impliquant motricité réelle et motricité imaginée et visant à montrer l'influence de la première sur la seconde ont déjà été utilisés avec succès dans des tâches de rotation mentale (Wexler et al., 1998 ; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) ou de locomotion (Kunz et al., 2009) par exemple. Mais ils n'ont jamais à notre connaissance été utilisés

directement pour la parole. Dans le présent travail, nous explorons différents types de perturbation (geste de la mâchoire ou des lèvres ; statique ou dynamique, lent ou rapide ; geste manuel produisant une tâche contrôle) sur une tâche de parole intérieure de comptage mental. La mesure de la perturbation potentielle est basée sur le temps de comptage : nous faisons l'hypothèse que plus une perturbation est forte, plus le temps de comptage est ralenti.

## 2. Méthode et analyses

L'objectif de l'expérience est de déterminer comment une tâche motrice perturbatrice peut moduler le résultat d'une tâche cible de comptage. 10 sujets français natifs (5 femmes et 5 hommes), d'âge entre 22 et 36 ans (âge moyen 26 ans et demi, sans problème visuel ou auditif, ont participé à l'expérience (après avoir donné leur consentement informé).

La tâche cible consistait en une série de deux comptages consécutifs de 1 jusqu'à 30, le plus rapidement possible, et ce dans 11 conditions différentes. Le comptage s'effectuait à voix haute dans la première condition, mentalement dans les 10 autres. Parmi celles-ci, l'une était une condition de base sans perturbation, les 9 autres impliquaient une tâche motrice perturbatrice. La tâche motrice perturbatrice consistait à produire, en même temps que le comptage mental, une action spécifique avec l'un des 3 effecteurs : main, mâchoire ou lèvres. 3 types d'actions étaient proposées : statique (ouvrir la main, baisser la mâchoire, protrusion des lèvres) ou dynamique cyclique (ouvrir et fermer la main, baisser et élever la mâchoire, protrusion et étirement des lèvres) et ce à deux rythmes, lent ou rapide (0.5 cycle vs. 1 cycle par seconde). Pour chaque participant, les 11 conditions étaient présentées en ordre aléatoire dans 5 blocs complets consécutifs.

Pour chaque essai, le protocole comprenait la séquence d'étapes suivante : (1) lire sur l'écran le type de condition à produire parmi les 11 tâches possibles, (2) cliquer sur une touche avec leur main droite pour lancer le processus, (3) dans le cas de perturbation dynamique, à l'affichage d'une croix rouge flashant au rythme de 0.5 cycles par seconde (condition lente) ou 1 cycle par seconde (condition rapide), synchroniser leur geste de la main gauche, de la mâchoire ou des lèvres sur le rythme de la croix, puis, une fois la tâche perturbatrice lancée (statique ou dynamique), (4) fermer les yeux pour se concentrer et ne pas être perturbé par la croix, (5) appuyer sur une touche avec leur main droite en commençant le premier cycle de comptage de 1 à 30, (6) cliquer à nouveau avec leur main droite dès la fin de ce premier cycle pour lancer le second cycle, et (7) appuyer une dernière fois avec leur main droite pour signaler la fin du comptage et passer à l'essai suivant. Une courte phase d'entraînement (sur les 11 conditions présentées consécutivement) permettait au sujet de bien comprendre la tâche.

L'expérience a été réalisée en chambre sourde, avec le logiciel Presentation® ([www.neurobs.com](http://www.neurobs.com)). Pour vérifier que la tâche perturbatrice était exécutée correctement, et aussi pour pouvoir disposer de données quantitatives sur l'exécution de cette tâche perturbatrice et sur d'éventuelles perturbations de la tâche perturbatrice elle-même par la tâche cible, nous avons maquillé les lèvres des sujets en bleu, et collé une petite pastille bleue sur leur menton, une sur le dos de leur main et une sur la dernière phalange de leur majeur. Ainsi, un système de Chroma-Key, éliminant les zones de couleur bleue, permet de détecter automatiquement les zones correspondantes, et donc d'analyser quantitativement les mouvements des lèvres (Lallouache, 1990) ou de la main (Heracleous et al., 2010).

La mesure de performance de la tâche cible de comptage était la durée de chacun des 2 comptages consécutifs, estimée par différence entre les temps d'appui sur la touche (premier comptage : délai entre les étapes (5) et (6) ci-dessus, second comptage : délai entre les étapes (6) et (7)). L'hypothèse était que ces temps de comptage seraient augmentés par la tâche perturbatrice par rapport au comptage mental sans tâche perturbatrice. La tâche de production à voix haute servait de repère pour vérifier que la tâche de comptage mental était bien effectuée, sous l'hypothèse que les temps de comptage devraient être similaires entre action réelle et action imaginée (Jeannerod, 1995). La perturbation manuelle servait de contrôle sous l'hypothèse qu'elle ne ralentirait que faiblement le comptage mental (par un simple effet possible de double tâche) tandis que les perturbations orofaciales (mâchoire ou lèvres) devraient, elles, perturber beaucoup plus par interférence sur le même système d'actions (système orofacial mis en œuvre à la fois dans le comptage mental et dans la perturbation). Nous n'avions pas d'hypothèse a priori sur le caractère plus perturbant d'une action statique, dynamique lente ou rapide. Enfin le fait de répéter deux fois consécutivement l'action de comptage permettait de déterminer si la perturbation était plus forte au début puis décroissait : dans ce cas, on devrait observer moins de perturbation des tâches orofaciales pour le second comptage que pour le premier.

### 3. Résultats

Une analyse informelle des films enregistrés a permis de vérifier que l'exécution des tâches perturbatrices a été bien effectuée, démontrant un rythme régulier des sujets conforme au rythme imposé (0.5 ou 1 cycle par seconde). Nous n'avons pas jusqu'à présent analysé systématiquement les données vidéo pour déterminer si l'exécution de la tâche a été régulière ou si des modulations apparaissent à certains moments clé de l'exécution de la tâche.

Nous avons obtenu pour chaque sujet des temps de comptage (T) pour chacune des 11 conditions (C), chacun des deux essais de comptage (E) et chacun des 5 blocs (B). Une analyse de la variance à mesures répétées à 3 facteurs (C, E, B) a été effectuée, avec correction de Greenhouse-Geisser dans les cas de violation de l'hypothèse de sphéricité. Cette analyse fait apparaître un effet de la condition C [ $F(10, 90) = 20.56, p < 0.001$ ] et de l'essai E [ $F(1, 9) = 14.93, p < 0.005$ ], sans aucun autre effet, ni de bloc ni d'aucune des interactions à 2 ou 3 facteurs.

L'effet de la condition est résumé par la Fig. 2. On y observe que c'est la condition de parole à voix haute qui produit le temps de comptage le plus court (6.25 s), le comptage en parole intérieure prenant une durée d'environ 1.5 s plus longue (7.77 s), différence non significative (notons qu'on considère en général la motricité intérieure comme conduisant à des durées plus courtes que la motricité réelle sur des tâches identiques, voir Oppenheim & Dell, 2010). Parmi les conditions en double tâche, les conditions de perturbation orofaciale (mâchoire ou lèvres) dynamique, lente ou rapide, produisent les temps les plus longs. Nous reviendrons sur l'analyse statistique de ces écarts.

En ce qui concerne l'effet du facteur essai (E), le temps moyen de comptage pour le premier essai est significativement plus court que pour le second essai (10 s contre 10.7 s). L'observation de cette différence pour les 11 conditions fait apparaître une tendance à voir la différence augmenter avec la durée du premier comptage. La corrélation entre le temps du premier essai et la différence entre les deux essais est significative [ $r^2 = 0.56, t(9) = 3.39, p < 0.01$ ], avec un accroissement de 7% du temps de comptage du premier au second essai. Le point important est que ce ralentissement, proportionnel à la durée du comptage, ne montre pas de capacité des sujets à gérer de mieux en mieux la perturbation d'un essai à l'autre (ce qui se traduirait au contraire par une diminution du second essai par rapport au premier, surtout dans les cas de perturbation). L'effet de la perturbation est donc stable d'un essai à l'autre, et également à travers les 5 blocs, donc tout au long de l'expérience.

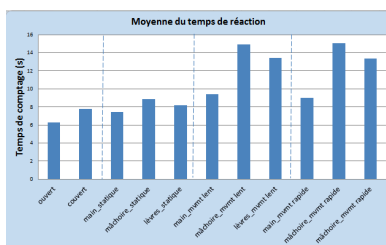


FIGURE 2 – Temps de comptage (en secondes) moyenné sur les 10 sujets, les 5 blocs et les 2 essais de comptage, pour les 11 conditions : voix haute, parole intérieure, puis parole intérieure avec les 9 perturbations (les erreurs standards sont indiquées par condition)

Pour analyser plus précisément l'effet des différentes perturbations, nous avons conduit une seconde analyse sur les effets des 3 types de perturbation (T, pour statique vs. dynamique lent vs. dynamique rapide) et des 3 gestes moteurs impliqués (G, soit la main, la mâchoire ou les lèvres), en réalisant une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs intra-sujets (T et G) portant sur les 9 conditions en double tâche, le facteur dépendant étant ici, pour chaque sujet, le temps de comptage moyenné sur les deux essais et les 5 blocs. Il apparaît que les deux facteurs sont significatifs [facteur T :  $F(2, 18) = 17.476, p = 0.002$ ]; facteur G :  $F(2, 18) = 22.36, p < 0.001$ ], ainsi que leur interaction [ $F(2, 18) = 11.24, p = 0.001$ ]. Des tests post-hoc (à probabilité  $< 0.05$  avec correction de Scheffé) montrent que :

- la perturbation statique produit des durées de comptage significativement plus courtes que les perturbations dynamiques, lente ou rapide, qui ne diffèrent pas ;

- le geste de la main produit des durées de comptage significativement plus courtes que les deux gestes orofaciaux, mâchoire et lèvres, qui ne diffèrent pas ;
- si l'on prend comme référence la perturbation manuelle statique, les perturbations statiques pour les 3 gestes moteurs ainsi que les 2 perturbations dynamiques pour la main produisent des temps de comptage non significativement différents, tandis que les 2 perturbations dynamiques, lente et rapide, pour les 2 articulateurs orofaciaux, mâchoire ou lèvres, produisent des temps plus élevés, et non significativement différents les uns des autres. En résumé :  
main stat. = lèvres/mâchoire stat. = main dyn. lente/rapide < mâchoire/lèvres dyn. lente/rapide

## 4. Discussion et conclusion

Le premier résultat important est le fait qu'une perturbation statique semble inopérante, quel que soit l'articulateur : les temps de comptage sont non significativement différents quel que soit l'effecteur impliqué, manuel ou orofacial, et similaires au temps de comptage sans perturbation (voir Fig. 2). Ceci montre que les intuitions anciennes de Stricker ou Binet, rapportées précédemment, sont sans doute erronées : la parole intérieure n'est pas perturbée significativement par un positionnement orofacial stable, quel qu'il soit. Un résultat récent de Tuomainen et al. (2002), cité par Sams et al. (2005) semble confirmer ce point : « We recently studied the effect of silently articulating a Finnish vowel /Q/ or /ø/ on the perception of acoustic vowels on the /Q/-/ø/ continuum. Silent articulation of /Q/ shifted the phoneme boundary significantly toward /ø/. Importantly, a similar shift was not obtained when the same subjects were instructed to position their articulation system as if they would say /Q/ or /ø/, but not to silently articulate the vowel ». L'interprétation est sans doute qu'une perturbation stationnaire n'empêche pas réellement la production, moyennant les adaptations motrices nécessaires (voir les expériences de bite-block – Lindblom et al., 1977 – ou lip-tube – Savariaux et al., 1995).

Les perturbations dynamiques, elles, produisent l'effet recherché : si une perturbation manuelle ne modifie que peu le temps de comptage par rapport à la condition sans perturbation, les deux perturbations orofaciales produisent une perturbation significative. Si l'on prend la condition « main statique » comme référence pour une condition de double tâche, le temps de comptage passe de 7.5s à environ 14s pour les 4 conditions orofaciales dynamiques, soit presque 100% d'augmentation. Le fait que les deux rythmes de perturbation orofaciale dynamique produisent des effets semblables peut paraître surprenant. On aurait pu imaginer que la production mentale se synchroniserait avec la perturbation et donc serait d'autant plus ralentie que le débit est lent, ou au contraire qu'un rythme lent laisserait plus de place à un mécanisme de production parallèle, et donc produirait moins de perturbation. Il faudrait tester ce qui se passe à d'autres rythmes pour déterminer si toute perturbation orofaciale produit des effets semblables, ou si des effets d'accrochage sur certains rythmes peuvent modifier les performances dans la double tâche.

Le résultat majeur de cette étude est qu'on peut obtenir une perturbation de la parole intérieure par une action orofaciale (cycles d'ouverture-fermeture de la mâchoire, ou de protrusion-rétraction des lèvres) qui ne devrait pas générer en tant que telle d'image auditive par copie d'efférence, ce qui résout notre « cahier des charges » développé dans la section 1. Le fait que cette perturbation soit stable d'un essai de comptage au suivant montre que la perturbation ne faiblit pas pendant au moins 25 à 30 s. La stabilité à travers les 5 blocs confirme la stabilité de l'efficacité de la perturbation. Le fait que des effets similaires soient obtenus pour les lèvres et la mâchoire et pour les 2 rythmes utilisés permet d'imaginer un paradigme efficace de test du rôle de la motricité dans des tâches perceptives : si l'on prend la condition « perturbation manuelle » comme contrôle de la double tâche, on peut ainsi alterner au cours d'une expérience assez longue des conditions avec double tâche mais sans perturbation orofaciale (gestes manuels) ou avec perturbation orofaciale (mâchoire ou lèvres). Reste à déterminer si d'éventuelles tâches d'identification phonétique ou lexicale sont susceptibles de produire des modulations significatives de performance dans ce type de paradigme de double tâche perceptuo-motrice.

## Références

- BADDELEY, A. D. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nat Rev Neurosci*, 4, 829-39.
- BADDELEY, A.D., & HITCH, G. (1974). *Working memory*. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 8, pp. 47-89). New York: Academic Press.
- BASIRAT, A. ET AL. (2011). Perceptuo-motor interactions in the perceptual organization of speech: Evidence from the verbal transformation effect. *Philos T Roy Soc B*, in press.
- BINET, A. (1886). *La psychologie du raisonnement. Recherches expérimentales par l'hypnotisme*. Alcan: Paris.
- BOHLAND, J.W., & GUENTHER, F.H. (2006). An fMRI investigation of syllable sequence production. *Neuroimage*, 32, 821-841.
- CASTELLINI, C., ET AL. (2011). The use of phonetic motor invariants can improve automatic phoneme discrimination. *PLoS One*, 6(9):e24055.

- D'AUSILIO, A., ET AL. (2011). The role of the motor system in discriminating normal and degraded speech sounds. *Cortex* doi:10.1016/j.cortex.2011.05.017.
- D'AUSILIO, A., ET AL. (2009a). The motor somatotopy of speech perception. *Curr Biol*, 19, 381-5.
- D'AUSILIO, A., ET AL.. (2009b). Speech perception may causally depend on the activity of motor centers. *Curr Biol*, http://www.cell.com/current-biology/comments Dausilio.
- DIEHL, R. L., ET AL. (2004). Speech perception. *Annu Rev Psychol*, 55, 149-179.
- FADIGA, L., ET AL. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *Eur J Neurosci*, 15, 399-402.
- GRABSKI, K., ET AL. (2012). Functional MRI assessment of orofacial articulators: neural correlates of lips, jaw, larynx and tongue movements. *HBM*, à paraître.
- GUENTHER, F.H. (2006). Cortical interactions underlying the production of speech sounds. *Journal of Communication Disorders*, 39, 350-365.
- GUPTA, P., & MACWHINNEY, B. (1995). Is the articulatory loop articulatory or auditory? Reexamining the effects of concurrent articulation on immediate serial recall. *JML*, 34, 63-88.
- HAMILTON, A., ET AL. (2004). Your own action influences how you perceive another person's action. *Curr Biol*, 14, 493-498.
- HERACLEOUS, P., ET AL. (2010). Cued Speech Automatic Recognition in Normal-hearing and Deaf Subjects. *Speech Comm*, 52, 504-512.
- HICKOK, G., & POEPEL, D. (2004). Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92, 67-99
- HICKOK, G., & POEPEL, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci* 8, 393-402.
- JEANNEROD M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33, 1419-1432.
- JEANNEROD, M. (2003). The mechanism of self-recognition in humans. *Behav Brain Res*, 142, 1-15.
- KAURAMÄKI, J., ET AL. (2010). Lipreading and covert speech production similarly modulate human auditory-cortex responses to pure tones. *Journal of Neuroscience* 30, 1314-1321.
- KUNZ, B.R., ET AL. (2009). Evidence for motor simulation in imagined locomotion. *J Exp Psychol Human*, 35, 1458-1471.
- LALLOUACHE, M.T. (1990). Un poste « visage-parole » : acquisition et traitement de contours labiaux. In *Actes des XVIIIèmes Journées d'Etudes sur la Parole*, pp. 282-286.
- LIBERMAN, A.M., & WHALEN, D. H. (2000). On the relation of speech to language. *TICS*, 4, 187-196.
- LINDBLOM, B., LÜBKER, J., & GAY, T. (1977). Formant frequencies of some fixed-mandible vowels and a model of speech motor programming by predictive simulation. *JASA*, 62, S15-S15.
- MEISTER I.G. ET AL. (2007). The essential role of premotor cortex in speech perception. *Curr Biol* 17 1692-1696.
- MÖTTÖNEN, R., & WATKINS, K.E. (2009). Motor representations of articulators contribute to categorical perception of speech sounds. *J Neurosci*, 29, 9819-9825.
- MOULIN-FRIER, C., ET AL. (2012). Adverse conditions improve distinguishability of auditory, motor and perceptuo-motor theories of speech perception. *Lang Cognitive Proc* (in press).
- MUESSELER, J., & HOMMEL, B. (1997). Blindness to response-compatible stimuli. *J Exp Psychol Human Performance*, 23, 861-872.
- MURRAY, D.J. (1968). Articulation and acoustic confusability in short term memory. *J Exp Psychol Human* 78, 679-684.
- OPPENHEIM, G.M., & DELL, G.S. (2010). Motor movement matters: The flexible abstractness of inner speech. *Mem Cognition*, 38, 1147-1160
- PAULHAN, F. (1886). Le langage intérieur et la pensée. *Revue philosophique*, XXI, 21, 26-58.
- LINTNER, R. (1913). Inner speech during silent reading. *Psychol Rev*, 20, 129-153.
- PULVERMÜLLER, F., & FADIGA, L. (2010). Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nat Rev Neurosci*, 11, 351-60.
- PULVERMÜLLER, F., ET AL. (2006). Motor cortex maps articulatory features of speech sounds. *PNAS* 103 7865-70.
- REISBERG, D., ET AL. (1989). "Enacted" auditory images are ambiguous; "pure" auditory images are not. *Q J Exp Psychol B*, 41, 619-641.
- ROGALSKY, C., ET AL. (2008). Broca's area, sentence comprehension, and working memory: an fMRI study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 1-13.
- SAMS, M., ET AL. (2005). Seeing and hearing others and oneself talk. *Brain Res*, 23, 429-35.
- SATO, M., ET AL. (2011). Articulatory bias in speech categorization: evidence from use-induced motor plasticity. *Cortex*, 47, 1001-1003.
- SATO, M., ET AL. (2009). A mediating role of the premotor cortex in phoneme segmentation. *Brain Lang* 111 1-7.
- SATO, M., ET AL. (2008). Listening while speaking: new behavioral evidence for articulatory-to-auditory feedback projections. *Proc AVSP* 2008, 26-29.
- SAVARIUX, C. PERRIER, P. AND ORLIAGUET, J.-P. (1995). Compensation strategies for the perturbation of the rounded vowel [u] using a lip-tube. *JASA*, 98, 2428-2442.
- SCHWARTZ, J.L., et al. (2010). The Perception for Action Control Theory (PACT): a perceptuo-motor theory of speech perception. *Journal of NeuroLinguistics*, \*\*\*, 1-19
- SCOTT, S.K., ET AL. (2009). A little more conversation, a little less action: candidate roles for motor cortex in speech perception. *Nat Rev Neurosci*, 10, 295-302.
- SKIPPER, J.I., ET AL.. (2007). Hearing lips and seeing voices: how cortical areas supporting speech production mediate audiovisual speech perception. *Cereb Cortex*, 17, 2387-2399.
- STRICKER, S. S. (1880). *Studien fiber die Sprachvorstellungen*. Wien: Braumüller.
- TUOMAINEN, J., ET AL. (2002). Motor and auditory interactions: silent articulation affects vowel categorization. *First Dutch Neuro-Endo-Psycho Meeting*, 4-7 June 2002, Doorwerth, The Netherlands.
- WARREN, R.M. (1961). Illusory changes of distinct speech upon repetition - the verbal transformation effect. *Brit J Psychol*, 52, 249-258.
- WATKINS, K.E., ET AL. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41, 989-994.
- WEXLER, M., ET AL.. (1998). Motor Processes in Mental Rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- WILSON, S.M., ET AL. (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature Neuroscience*, 7, 701-702.
- WOHLSCHLAGER, A. (2000). Visual motion priming by invisible actions. *Vision Research*, 40, 925-930.
- WOHLSCHLAGERA, & WOHLSCHLAGER A. (1998). Mental and manual rotation. *J Exp Psychol Human* 24, 397-412.
- YETKIN, F. Z., ET AL. (1995). A comparison of functional MR activation patterns during silent and audible language tasks. *Am J Neuroradiol*, 16, 1087-1092.