



HAL
open science

Aux origines de la limitation centrale du traitement de l'information : représentation et préparation des tâches

Morgan Lyphout-Spitz

► **To cite this version:**

Morgan Lyphout-Spitz. Aux origines de la limitation centrale du traitement de l'information : représentation et préparation des tâches. Psychologie. Université Bourgogne Franche-Comté, 2023. Français. NNT : 2023UBFCC040 . tel-04544206

HAL Id: tel-04544206

<https://theses.hal.science/tel-04544206v1>

Submitted on 12 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
Préparée à l'Université de Franche-Comté
UFR Sciences du Langage, de l'Homme et de la société

École doctorale n°594 - Sociétés, Espaces, Pratiques, Temps (SEPT)

Doctorat de Psychologie Cognitive

Par

Morgan Lyphout-Spitz

**Aux origines de la limitation centrale du
traitement de l'information : représentation et
préparation des tâches**

Thèse soutenue à Besançon, le 14 décembre 2023

Devant le jury composé de :

Thérèse COLLINS	Professeure, Université de Paris Cité	Rapporteure
Gaën PLANCHER	Maître de Conférences, Université Lyon 2	Rapporteure
Éric LAURENT	Maître de Conférences, Université de Franche-Comté	Examineur
Eric RUTHRUFF	Professeur, University of New Mexico	Examineur
Catherine THEVENOT	Professeur, Université de Lausanne	Présidente
François MAQUESTIAUX	Professeur, Université de Rouen Normandie	Directeur

Titre : Aux origines de la limitation centrale du traitement de l'information : représentation et préparation des tâches

Mots clés : interférence en double tâche ; mémoire de travail ; préparation ; traitement central

Résumé : Les individus rencontrent souvent des difficultés lorsqu'ils tentent de réaliser plusieurs tâches à la fois. Ces difficultés ont été attribuées à des limitations de la capacité de traitement de l'information. Plus spécifiquement, une contrainte bien établie a été identifiée au niveau central du traitement de l'information, soit le niveau des opérations permettant l'adaptation. La littérature rapporte l'omniprésence de cette limitation centrale. Il existe pourtant des exceptions : des tâches très faciles ou grandement pratiquées ont parfois permis de grandement diminuer les difficultés en double tâche. Dans cette thèse, nous questionnons le sens de ces exceptions : sont-elles seulement des exceptions à la règle générale d'une limitation centrale ou, au contraire, reflètent-elles un phénomène plus général ? La limitation centrale reflète-t-elle réellement la présence d'une contrainte inhérente à l'architecture cognitive ? Une nouvelle hypothèse que la thèse vise à développer et tester est celle d'une limitation centrale envisagée sous l'angle de la préparation des tâches. Cette hypothèse accorde une place essentielle au rôle de la préparation qui permettrait aux représentations des tâches d'être plus facilement chargées en mémoire de travail et être ainsi traitées plus automatiquement. Pour ce faire, nous examinons dans une première étude le rôle modérateur de la compatibilité idéomotrice sur l'ampleur de l'interférence en double tâche. Nous avons développé différents indicateurs comportementaux et des simulations cognitives dont les résultats convergent en faveur de l'automatisme des tâches idéomotrices. Dans une seconde étude, nous avons interrogé si l'automatisme tient à la spécificité de l'association stimulus-réponse (S-R) ou à la facilité de chargement des associations S-R en mémoire de travail. Pour cela, nous avons conçu des tâches très faciles mais non idéomotrices (des tâches sémantiques) et testé leur automatisme. Les résultats convergent en faveur de l'automatisme des tâches sémantiques. Si l'automatisme tient à la facilité de chargement des associations S-R, comme le suggèrent les deux premières études de la thèse, alors des tâches aux associations S-R véritablement arbitraires peuvent être traitées automatiquement dans des conditions facilitant leur chargement en mémoire de travail ; des conditions boostant leur préparation. Cette proposition nous a amenés à formuler une nouvelle hypothèse de l'interférence en double tâche: l'hypothèse du manque de préparation. Selon cette hypothèse, un manque de préparation est la cause de l'interférence en double tâche. Pour la tester, nous avons mené une troisième série de quatre expériences dans laquelle nous avons utilisé les mêmes deux tâches arbitraires non pratiquées dans quatre conditions. La première condition consistait à ne réaliser que des essais classiques de double tâche. La deuxième condition visait à optimiser la préparation de la tâche la plus ralentie en condition classique de double tâche (i.e., la tâche 2), en insérant des essais de simple tâche de la tâche 2 mélangés aléatoirement avec des essais de double tâche. Deux conditions supplémentaires visaient à confirmer le rôle clé de la préparation. En accord avec les théories dominantes, une limitation centrale était présente dans des conditions classiques de double tâche. Mais dans des conditions boostant la préparation de la tâche 2, la limitation centrale a disparu chez près de la moitié des participants. Ce résultat va à l'encontre des prédictions des théories dominantes, mais est en accord avec notre hypothèse du manque de préparation. Les travaux de cette thèse nous ont progressivement permis d'entrevoir et de valider l'hypothèse du manque de préparation. Cette nouvelle hypothèse de l'interférence en double tâche offre de nouvelles perspectives sur l'attention dont le fonctionnement est régi avant tout par les manières dont les individus se représentent et se préparent aux tâches et actions à venir.

Title: The origins of the central limitation of information processing: task representation and preparation

Keywords: central processing; dual-task interference; preparation; working memory

Abstract: Individuals often encounter difficulties when they attempt to do several tasks at once. These difficulties have been attributed to limitations in the ability to process information. More specifically, a well-established constraint has been identified at the central level of information processing, that is the level of operations enabling adaptation. The literature reports the ubiquity of this central limitation. However, there exist exceptions: tasks that are very easy or highly practiced have sometimes permitted the diminution of dual-task difficulties. In this dissertation, we question the meaning of these exceptions: are they merely exceptions to the general rule of a central limitation or, on the contrary, do they reflect a more general phenomenon? Does the central limitation truly reflect the presence of a structural constraint inherent to cognitive architecture? A novel hypothesis this dissertation aims to develop, and test, is that of a central limitation considered from the angle of task preparation. This hypothesis gives an important place to the role of preparation which might enable the tasks representations to be more easily loaded into working memory and thus to be processed more automatically. To this end, in a first study, we examine the moderating role of ideomotor compatibility on the magnitude of dual-task interference. We developed different behavioral indicators and cognitive simulations, whose results converge in favor of the automaticity of ideomotor-compatible tasks. In a second study, we asked whether the automaticity is due to the specificity of the stimulus-response (S-R) association, or to the ease with which S-R associations can be preloaded in working memory. To do so, we created tasks that are very easy but non-ideomotor (semantic tasks) and tested their automaticity. The results converge in favor of the automaticity of semantic tasks. If automaticity is due to the ease of S-R associations preloading, as suggested by the two first studies of this dissertation, then tasks with truly arbitrary S-R associations can be processed automatically in conditions facilitating their loading into working memory; conditions boosting their preparation. This proposal led us to formulate a new hypothesis of dual-task interference: the preparation-neglect hypothesis. According to this hypothesis, a lack of preparation is the cause of dual-task interference. To test it, we carried out a third series of four experiments in which we used the same two nonpracticed arbitrary tasks through four conditions. The first condition consisted in performing only classic dual-task trials. The second condition aimed at optimizing the preparation of the task the most slowed down in a classic dual-task condition (i.e., Task 2), by introducing single-task trials on Task 2 randomly intermixed with dual-task trials. Two supplemental conditions aimed at confirming the key role of preparation. In accordance with prevailing theories, a central limitation was present in the classic dual-task conditions. But in the conditions boosting the preparation of Task 2, the central limitation disappeared in almost half of the participants. This result goes against the predictions of prevailing theories, but is in line with our novel hypothesis of preparation neglect. As a whole, the works of this thesis progressively enabled us to glimpse and validate the preparation-neglect hypothesis. This novel hypothesis of dual-task interference offers new perspectives on attention, whose functioning is primarily ruled by the ways individuals represents and prepare upcoming tasks and actions.

Table des matières

Introduction générale.....	8
I. Cadre théorique	12
Chapitre 1. Théories de l'interférence en double tâche	13
1.1. Le goulet d'étranglement central	17
1.2. Le partage des ressources attentionnelles centrales	19
1.3. Le <i>crosstalk</i>	23
1.4. Une limitation stratégique : le modèle du contrôle exécutif adaptatif.....	27
Résumé du Chapitre 1	29
Chapitre 2. Procédures de double tâche	31
2.1. Simple objectivation des difficultés en double tâche : tâches continues	32
2.1.1. Tâches continues et introspection.....	33
2.1.2. Tâches continues en laboratoire	35
2.2. Étude de la nature de la limitation centrale : tâches discrètes	37
2.2.1. Le protocole de la période réfractaire psychologique	37
2.2.2. Le protocole de présentation simultanée	40
Résumé du Chapitre 2.....	41
Chapitre 3. Les théories à l'épreuve des faits	43
3.1. Identification d'une exception avec le protocole PRP.....	45
3.2. La pratique	46
3.2.1. De la pratique en double tâche... ..	47
3.2.2. Hypothèses	47
3.2.3. De la nécessité de ne pratiquer qu'une seule tâche	50
3.3. Une limitation stratégique en réponse au protocole PRP	51
3.4. Les systèmes de réponse intrinsèquement automatiques.....	53
3.5. La compatibilité idéomotrice	56
3.5.1. Compatibilités stimulus-réponse	56
3.5.2. La compatibilité idéomotrice.....	57
3.5.3. Le grand débat de la compatibilité idéomotrice	59
Résumé du Chapitre 3.....	63
II. Problématique	65
III. Approche expérimentale générale.....	72

Procédure	73
Indicateurs comportementaux et prédictions	77
IV. Travaux expérimentaux	81
Étude 1 – Test de l’automatisme d’une tâche à caractère idéomoteur	82
Objectifs et prédictions	82
Ideomotor Compatibility Enables Automatic Response Selection.....	85
Discussion.....	97
Étude 2 – Par-delà l’idéomotricité : l’automatisme des tâches sémantiques	99
Objectifs et prédictions	99
Bypassing the Central Bottleneck with Easy Tasks: Beyond Ideomotor Compatibility ...	104
Discussion.....	117
Étude 3 – Test de l’hypothèse de la négligence préparatoire	119
Objectifs et prédictions	119
Uncorking the Central Bottleneck: Even Novel Tasks Can Be Performed Automatically	122
Discussion.....	154
V. Discussion générale.....	156
1. Synthèse des résultats	156
2. L’hypothèse novatrice de la négligence préparatoire	160
3. Travaux exploratoires intermédiaires	162
3. 1. Rôle de la mémoire de travail et hypothèse de la séparabilité.....	162
3. 2. Réplication de Pashler et Johnston (1989).....	166
4. Limites et considérations méthodologiques	167
Conclusions	170
Bibliographie.....	172

Table des figures

Figure 1 Modèle classique des stades de traitement de l'information	15
Figure 2 Le modèle du goulet d'étranglement central	18
Figure 3 Le modèle du partage des ressources attentionnelles centrales, adapté de Tombu et Jolicoeur (2003)	22
Figure 4 L'hypothèse du crosstalk appliquée au modèle de la mémoire de travail de Baddeley et Hitch (1974)	26
Figure 5 Le modèle du contrôle exécutif adaptatif	28
Figure 6 Schéma du protocole de la période réfractaire psychologique et du protocole de présentation simultanée	38
Figure 7 Exemple classique d'effet de la période réfractaire Psychologique	45
Figure 8 Représentation d'un cas de goulet d'étranglement latent par opposition à l'absence de goulet d'étranglement et à la présence d'un goulet d'étranglement, adaptée de Ruthruff, Johnston, Van Selst, Whitsell, et Remington (2003)	49
Figure 9 Procédure long/court vs. procédure court/court en cas de traitement central sériel ou parallèle	75
Figure 10 Indicateurs comportementaux utilisés et prédictions selon que le traitement central est parallèle (panel de gauche) ou sériel (panel de droite)	78
Figure 11 Design expérimental de Halvorson et Hazeltine (2015), extrait du même papier	102
Figure 12 Récapitulatif des conditions expérimentales du projet d'étude du rôle de la séparabilité	164

Nomenclature

AV Auditivo-vocal

DT Double tâche

IM Idéomoteur

IRI Intervalle inter-réponses (*inter-response interval*)

PRP Période réfractaire psychologique

RR Inversion des réponses (*response reversal*)

TR Temps de réaction

S-R Stimulus-réponse

ST Simple tâche

VM Visuo-manuel

Introduction générale

Le terme *double tâche* définit une situation lors de laquelle deux tâches sont réalisées simultanément. Entretenir une conversation en marchant, dîner tout en regardant la télévision, prendre des notes lors d'une conférence, etc. ; de nombreux autres exemples journaliers illustrent que la double tâche est une situation fréquemment rencontrée dans la vie quotidienne, souvent même sans que nous en prenions conscience. Certaines de nos activités sont par ailleurs intrinsèquement multitâches, telles que la conduite automobile pour laquelle le conducteur doit prendre en compte plusieurs flux simultanés d'informations visuelles tout en maintenant le contrôle du véhicule (e.g., contrôle du volant, manipulation du levier de vitesse, qui constituent autant de nouvelles tâches indépendantes). Ainsi, faire plusieurs choses en même temps, faire du *multitasking* (e.g., Fischer & Plessow, 2015 ; Koch et al., 2018 ; Strobach et al., 2018) est un comportement auquel nous avons fréquemment recours.

L'efficacité des performances en double tâche est cependant très variable. S'il est possible de réaliser plusieurs tâches à la fois (e.g., des individus parviennent sans trop de peine à composer des messages sur leur téléphone portable tout en faisant du vélo ; voir Watson & Strayer, 2010, pour des exemples atypiques de *multitasking* efficace), la double tâche présente bien souvent des risques. En effet, les personnes rencontrent régulièrement des difficultés lorsqu'elles tentent de réaliser plusieurs activités à la fois. Ces difficultés se manifestent généralement sous la forme d'interférences ; les temps de réaction s'allongent et s'accompagnent parfois d'une augmentation du nombre d'erreurs commises. Les conséquences de telles interférences sont relativement minimales lorsqu'écouter la radio nous fait presser la mauvaise touche sur notre clavier, mais peuvent s'avérer tragiques si l'on considère des activités telles que la conduite automobile. Une étude Inserm/IFSTTAR¹ en 2011 rapporte notamment 10% d'accidents de voiture causés par des automobilistes au téléphone ; cet effet néfaste du téléphone portable sur l'attention a aussi été observé en laboratoire (Stothart et al., 2015 ; Strayer et al., 2003 ; Strayer & Drews, 2007). Ainsi, le risque de provoquer un accident est plus élevé quand nous sommes au téléphone que lorsque nous sommes pleinement concentrés sur la tâche de conduite. Comment expliquer que des tâches réalisées isolément sans grande difficulté se mettent à interférer lorsque l'on tente de les réaliser simultanément avec d'autres tâches ?

¹ Inserm : Institut national de la santé et de la recherche médicale ; IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.

La question de la performance en double tâche présente un intérêt écologique significatif, surtout si l'on considère les conséquences préjudiciables qu'un mauvais partage de l'attention peut avoir. Pour autant, la présente thèse ne vise pas directement l'amélioration de notre performance en double tâche. Au lieu de cela, les situations de double tâche sont ici considérées comme un outil méthodologique afin de répondre à un questionnement sur les représentations et processus cognitifs : comment expliquer l'interférence entre processus cognitifs concurrents ? Ce questionnement fondamental nous place à un niveau représentationnel plutôt que comportemental ; la finalité n'est pas d'observer et quantifier l'évolution de la performance en double tâche sous diverses conditions, mais de comprendre comment les représentations et processus cognitifs influencent les comportements. L'intérêt de ce positionnement est que placer notre loupe à l'échelle des représentations et processus cognitifs permet de proposer des explications aux comportements habituellement observés en condition de double tâche. Dans leur ensemble, les travaux expérimentaux rapportés dans cette thèse de psychologie cognitive visent à une meilleure compréhension des capacités attentionnelles humaines.

Notre système cognitif est-il équipé pour nous permettre de prendre plusieurs décisions simultanément ? La littérature s'accorde sur le fait que l'interférence en double tâche, caractérisée par un ralentissement des réponses et une augmentation du nombre d'erreurs, est un phénomène robuste : il est rapporté par nombre d'auteurs, pour de nombreuses conditions (e.g., Bertelson, 1966 ; Halvorson et al., 2015 ; Janczyk & Kunde, 2020 ; Koch et al., 2018 ; Logan & Schulkind, 2000 ; Meyer & Kieras, 1997a, 1997b ; Navon & Miller, 1987 ; Pashler, 1994 ; Telford, 1931 ; Tombu & Jolicoeur, 2003 ; Welford, 1952). Si l'origine attribuée à cette interférence diffère d'un auteur à l'autre, la littérature tombe également d'accord sur le fait que ce problème survient au niveau central du traitement de l'information ; sous la forme d'une limitation structurale (Pashler, 1994) ou stratégique (Meyer & Kieras, 1997a, 1997b) de la capacité de traitement, via un partage graduel des ressources attentionnelles centrales (Tombu & Jolicoeur, 2003), ou encore sous la forme d'une confusion entre les représentations des tâches (e.g., Halvorson et al., 2015 ; Logan & Schulkind, 2000 ; Navon & Miller, 1987).

Cependant, des auteurs rapportent des cas isolés de conditions permettant de réaliser deux tâches avec pas ou relativement peu d'interférence, suggérant ainsi le dépassement des capacités centrales limitées (e.g., Greenwald & Shulman, 1973 ; Pashler et al., 1993). Ces exceptions sont-elles véritablement des exceptions ? Ces exceptions cachent-elles une autre réalité du fonctionnement cognitif en situation de double tâche ? C'est cette piste méconnue, voire ignorée, que nous nous proposons d'emprunter dans ce travail de thèse. Nous pensons

qu'en prenant appui sur ces exceptions, il va être possible de questionner la nature de la capacité limitée au niveau central du traitement de l'information, au niveau des opérations cognitives de décision et de sélection de réponses adaptées aux buts poursuivis. La limitation attentionnelle trouve-t-elle son origine au niveau des possibilités d'allocation de ressources limitées en attention au niveau des stades centraux de traitement de l'information ? Mais alors pourquoi est-il possible d'éliminer l'interférence centrale ? Que peuvent nous dire les exceptions relevées dans la littérature sur le fonctionnement attentionnel central ? Finalement, la limitation centrale est-elle elle-même la conséquence d'un autre processus jusque-là non identifié ?

L'objectif de cette thèse est double. Il s'agit premièrement de questionner la nature des problèmes rencontrés au niveau central du traitement de l'information. Alors que la littérature semble s'accorder sur la présence de limitations centrales (Meyer & Kieras, 1997a, 1997b, 1999 ; Navon & Miller, 1987 ; Pashler, 1994, Tombu & Jolicoeur, 2003) nous proposons d'éprouver ces limitations en essayant de permettre aux participants de les dépasser, c'est-à-dire de s'en affranchir et donc de parvenir à traiter deux tâches concurrentes sans interférence. Étant donné que l'approche consistant à entraîner les participants à automatiser les tâches aboutit à des résultats mitigés (très peu d'études sont parvenues à une véritable automaticité ; e.g., Hazeltine et al., 2002 ; Van Selst et al., 1999), il semble que l'entraînement, consistant en la pratique d'une tâche sur quelques centaines voire milliers d'essais, ne soit pas un levier suffisant pour s'affranchir de la limitation centrale. Pour cette raison, notre deuxième objectif est de questionner les exceptions actuelles à la règle d'une limitation centrale. Des exceptions semblent montrer que les traitements centraux de deux tâches peuvent avoir lieu en parallèle. Cependant, ces exceptions sont sujettes à controverse par manque d'outils suffisamment précis pour détecter l'hypothèse d'une succession très rapide et brève des traitements centraux. Par conséquent, dans cette thèse, nous avons emprunté une approche nouvelle – l'appariement d'une tâche lente et d'une tâche rapide (l'approche long / court ; Maquestiaux et al., 2008, 2010, 2013, 2018) – pour tester l'automaticité en double tâche de tâches très faciles, tout en neutralisant l'hypothèse d'un traitement central sériel. Dans l'étude 1, nous avons utilisé une tâche idéomotrice, c'est-à-dire une tâche pour laquelle il y a un très fort recouvrement conceptuel entre le stimulus et la réponse, comme lorsqu'un stimulus représentant une flèche pointant à droite implique une réponse de la main droite ou une flèche pointant à gauche une réponse de la main gauche. Après la confirmation d'exceptions, il s'est agi de tester leur généralité. Est-ce vraiment une affaire de recouvrement conceptuel quasi identique entre le stimulus et la réponse ? Dans l'étude 2, nous avons manipulé des tâches sémantiques, pour lesquelles le stimulus et la réponse reposent sur des associations préexistantes en mémoire à

long terme, comme lorsqu'il faut répondre PONG au mot PING, et PING au mot PONG. Ces études, en particulier l'étude 2, nous ont amené à entrevoir une nouvelle hypothèse théorique : l'hypothèse d'un manque de préparation aux tâches, notamment à la tâche dont le stimulus survient généralement en deuxième position (le stimulus de la tâche 2). Pour la tester, nous avons utilisé dans l'étude 3 des tâches non pratiquées et aux associations stimulus-réponse arbitraires : la tâche 1 auditivo-vocale consistait à répondre le mot HAUT à un son aigu et le mot BAS à un son grave, et la tâche 2 visuo-manuelle consistait à presser la touche E ou P sur le clavier selon que la forme présentée à l'écran était un triangle ou un cercle. Ces deux mêmes tâches ont été employées dans quatre conditions expérimentales. Elles ont en premier lieu été réalisées dans deux conditions classiques de double tâche, similaires à celles de nombreuses études de la littérature ayant toutes rapporté un traitement central sériel des tâches (e.g., Pashler & Johnston, 1989 ; Telford, 1931) et dans deux conditions de double tâche visant à booster la préparation de la tâche 2. En d'autres termes, quatre groupes de participants ont réalisé les deux mêmes tâches non pratiquées et arbitraires pour lesquelles la littérature prédit de l'interférence conduisant habituellement à de l'interférence. Et pour deux groupes de participants, nous avons adapté la procédure de double tâche pour que la seconde tâche présentée puisse être davantage préparée par les participants que lors d'une procédure de double tâche classique. Nos efforts visant à comprendre les problèmes centraux nous ont amené à proposer et tester de nouvelles hypothèses et, comme nous le verrons, à formuler une proposition théorique inédite de l'interférence en double tâche.

I. Cadre théorique

Chapitre 1. Théories de l'interférence en double tâche

1.1. Le goulet d'étranglement central	17
1.2. Le partage des ressources attentionnelles centrales	19
1.3. Le <i>crosstalk</i>	23
1.4. Une limitation stratégique : le modèle du contrôle exécutif adaptatif.....	27
Résumé du Chapitre 1	29

Le hollandais Franciscus Cornelis Donders, dans l'introduction de son travail sur la vitesse des actes psychiques, pose la question suivante : « Quelle est la nature des actions qui se passent dans le cerveau pendant que nous sentons, pensons et voulons ? » (1868, p. 1). Inspiré par les progrès de la physiologie qui parvint à déterminer la vitesse d'un influx nerveux (environ 200 pieds par seconde, soit 219 km/h)², Donders cherche le moyen d'appliquer cette précision à la mesure du temps nécessaire pour former une idée et prendre une décision. À travers cette interrogation, Donders pose les bases de ce que l'on appelle la chronométrie mentale, soit l'analyse du comportement au moyen de la mesure du temps de réaction. Donders postule que le temps qu'un individu met pour répondre à un stimulus correspond à la somme des durées de toutes les opérations mentales nécessaires à l'élaboration de sa réponse. Mais comment déterminer la durée respective de ces opérations alors que les pensées ne sont pas directement observables ? Donders développe alors une méthode ingénieuse consistant à moduler la complexité d'une tâche et étudier l'évolution des temps de réaction qui résulte de cette manipulation, afin d'inférer la durée des diverses opérations qui composent la tâche en question. Ainsi, la rapidité d'une tâche est selon Donders fonction du nombre d'étapes de traitement nécessaires à sa réalisation. Considérons maintenant une tâche A pour laquelle il faut presser une touche en réponse à un son, et une tâche B pour laquelle il faut presser une touche en réponse à l'un de deux sons (i.e., une tâche *go/no-go*). La tâche A est une tâche de réaction simple nécessitant la production d'une unique réponse (le sujet n'a pas besoin de sélectionner une réponse parmi de multiples options), tandis que la tâche B implique une étape de traitement supplémentaire : la discrimination des sons afin de produire la réponse correcte (i.e., le sujet presse ou non la touche après avoir correctement identifié le son). La durée de cette étape de traitement supplémentaire peut alors être calculée en soustrayant le temps de réaction à la tâche A au temps de réaction à la tâche B. Cette méthode soustractive a reçu quelques critiques³, mais elle a également inspiré de nombreux auteurs à développer une approche chronométrique du comportement humain, comme en témoignent les travaux de Sternberg (1969) et Posner (1978).

De cette lignée de travaux sur la décomposition des temps de réponse ressort un modèle « classique » (e.g., Czyz, 2021 ; Schmidt et al., 2018) de traitement sériel de l'information, comprenant trois stades successifs : l'identification du stimulus, la sélection de la réponse, et

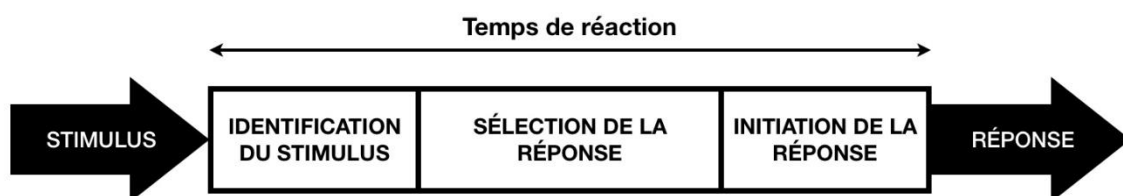
² Ces résultats ont été rapportés par le physicien et physiologiste allemand Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz en 1850.

³ La critique principale émise sur les travaux de Donders (1868) est qu'il est difficile de créer des tâches expérimentales pour lesquelles seule une étape de traitement diffère. Chaque tâche étant sensiblement différente des autres, nous pouvons présumer que l'ajout ou la suppression d'un stade peut également impacter les autres stades. Ainsi, déterminer les stades nécessaires au traitement de tâches choisies pour des raisons relativement subjectives manque de fiabilité.

l'initiation de la réponse (voir figure 1). L'identification du stimulus, également connue sous le nom *stade précentral*, consiste à percevoir l'information, c'est-à-dire à transformer une stimulation externe captée par nos organes sensoriels en une représentation interne. Notre capacité à réagir de manière appropriée à ces stimulations de notre environnement immédiat dépend ensuite d'un stade intermédiaire, communément appelé *stade central* et correspondant à la sélection de la réponse. Cette étape de sélection de la réponse revêt une importance cruciale puisqu'elle nous permet de nous adapter à notre environnement et détermine par extension notre survie. Enfin, l'initiation de la réponse, qualifiée de *stade post-central*, consiste en la programmation de la commande motrice nécessaire à la réponse. La réponse à la stimulation perçue, préalablement sélectionnée lors du stade central, peut ainsi être initiée. Bien qu'il soit certainement possible de diviser davantage ces stades de traitement, nous nous en tiendrons dans cette thèse au modèle cognitif en trois stades que nous venons de présenter, puisque la majorité des procédures et théories de l'interférence en double tâche (e.g., Pashler, 1994 ; Tombu & Jolicoeur, 2004 ; Welford, 1952) et même des travaux en neurosciences (e.g., Dux et al., 2006 ; Hesselmann et al., 2013 ; Ivry et al., 1998 ; Sigman & Dehaene, 2006, 2008) se basent sur ce dernier pour expliquer l'orchestration des opérations mentales et le locus de l'interférence observée en situation de double tâche.

Figure 1

Modèle classique des stades de traitement de l'information



Le traitement cognitif d'une tâche connaît des ralentissements considérables et peut s'accompagner d'erreurs, en cas de réalisation en même temps d'une autre tâche ; on parle alors d'interférence en double tâche. La succession des stades de traitement (i.e., identification du stimulus, sélection de la réponse et initiation de la réponse) se retrouve impactée par la situation de double tâche. S'il est pour l'instant impossible de déterminer ce qui a vraiment lieu entre l'apparition du stimulus et le début de la réponse, la littérature supporte l'idée que l'interférence

trouve essentiellement son origine au niveau central du traitement de l'information (e.g., Pashler, 1994). Il serait possible d'identifier plusieurs stimuli ou d'initier plusieurs réponses à la fois, mais il ne serait pas possible de sélectionner la réponse de plus d'une tâche à la fois. Nos difficultés à traiter plusieurs informations simultanément proviendraient de limitations situées au niveau central. La nature de ces limitations a fait l'objet de nombreux débats depuis plus de 40 ans.

L'appellation *attention centrale* fait référence à l'ensemble des ressources attentionnelles mobilisées au niveau central du traitement de l'information (e.g., la sélection de la réponse). L'attention centrale étant disponible en quantité très limitée (Kahneman, 1973), celle-ci ne serait pas disponible en quantité suffisante dans des situations d'interférence pour lesquelles deux décisions doivent être prises simultanément. La littérature s'accorde effectivement sur le fait qu'il existe un problème central lorsqu'il s'agit de réaliser deux tâches simultanément. Il semble cependant plus ardu pour les auteurs de s'accorder sur la nature de cette limitation (pour une revue, voir Pashler, 1994). En effet, savoir que l'attention centrale est disponible en quantité limitée ne suffit pas à expliquer l'origine des difficultés observées en double tâche. Peut-être avons-nous suffisamment d'attention à allouer aux opérations centrales de deux tâches, mais que nous ne sommes pas assez habiles pour la partager efficacement ? Il est également possible que l'attention soit indivisible et qu'une fois engagée dans un traitement il faille attendre que ce dernier s'achève pour pouvoir la mobiliser à nouveau. Nombre de théories ont été proposées pour expliquer l'interférence en double tâche, afin de tenter de comprendre les conditions d'allocation des ressources attentionnelles centrales.

Dans ce premier chapitre, nous passerons en revue les modèles majeurs de l'interférence en double tâche. Le premier modèle est celui du goulet d'étranglement central (Pashler, 1994 ; Welford, 1952). Il postule que la limitation centrale est inhérente au fonctionnement de notre système cognitif et par conséquent inévitable. Le deuxième modèle suggère un partage graduel des ressources attentionnelles centrales et que la performance en double tâche dépend de l'efficacité de ce partage (Tombu & Jolicoeur, 2003). Le troisième modèle de l'interférence en double tâche présenté dans ce chapitre est l'hypothèse du *crosstalk* (diaphonie en Français, correspondant au mélange de conversations de deux circuits téléphoniques). Les auteurs de cette proposition théorique (e.g., Navon & Miller, 1987) proposent que deux tâches peuvent être réalisées en parallèle pour peu que leurs représentations respectives soient bien distinctes en mémoire de travail (i.e., les modalités et concepts requis pour la réalisation des deux tâches doivent être distincts afin d'éviter toute confusion entre les représentations des tâches). Enfin, le dernier modèle majeur ayant tenté d'expliquer la source de l'interférence en double tâche est

le modèle du contrôle exécutif adaptatif (Meyer & Kieras, 1997a, 1997b, 1999). Selon ce modèle, la limitation centrale est exclusivement stratégique et régie par des mécanismes exécutifs, ce qui signifie qu'elle peut être surmontée sous certaines conditions.

1.1. Le goulet d'étranglement central

Un premier courant théorique considère l'attention comme un filtre placé à un moment spécifique du traitement de l'information. La caractéristique commune à toutes les théories structurales est le postulat premier que l'attention provient de la compétition des tâches pour une structure (i.e., un mécanisme cognitif) de la chaîne du traitement de l'information (e.g., Keele & Boies, 1973 ; Kerr, 1973). Les auteurs de ce courant théorique proposent que l'attention opère en ne traitant qu'une représentation pour rejeter toutes les autres : le mécanisme cognitif en question est un filtre strict qui fonctionne sur la base du tout ou rien. Cette notion de filtre a été particulièrement développée dans le domaine de l'attention sélective (e.g., Broadbent, 1958 ; Deutsch & Deutsch, 1963 ; Treisman, 1960), mais la présente thèse s'intéresse à son application au niveau central du traitement de l'information, c'est-à-dire au traitement des informations déjà perçues et pour lesquelles il s'agit de sélectionner une réponse.

La possibilité d'un goulet d'étranglement au niveau central du traitement de l'information a été sous-entendue par Craik (1948) face à la récurrence d'un phénomène dans des études de la phase réfractaire chez l'Homme⁴ : quand les stimuli de deux tâches manuelles sont présentés quasi simultanément, le temps de réponse au deuxième stimulus présenté est plus long que le temps de réponse au premier (e.g., Telford, 1931). Welford (1952) développe cette idée sur la base d'études ayant obtenu des résultats similaires (e.g., Hick, 1948 ; Vince, 1949). Welford (1959) présente alors cette théorie en trois points. Le premier point consiste à admettre l'existence de mécanismes perceptifs capables de récolter des données sensorielles et de les maintenir pour une durée limitée. Deuxièmement, il existe des mécanismes effecteurs composés d'éléments centraux et périphériques et capables de mener à bien des séries d'actions, telles que la pression de touches d'un clavier. Enfin, il existerait entre ces deux types de mécanismes un mécanisme décisionnel à canal unique. Welford suppose que le temps nécessaire aux mécanismes centraux pour traiter les informations perçues en vue d'initier une réponse (temps qu'il nomme temps d'organisation - *organizing time* en Anglais) ne peut avoir lieu pour deux

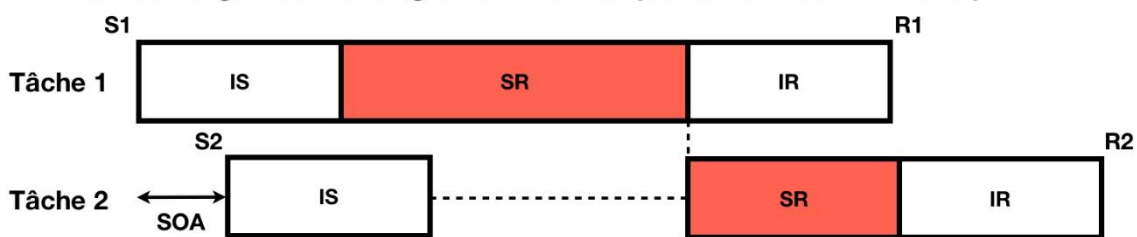
⁴ La *phase* ou *période réfractaire* désigne initialement un phénomène physiologique observé à la suite de la stimulation d'un nerf ou bien d'un muscle : ces derniers ne peuvent être à nouveau stimulés pendant une courte période. Un phénomène similaire a été observé au niveau cognitif. La procédure nécessaire à son observation sera présentée dans le Chapitre 2.

tâches à la fois. Si le traitement central d'une première tâche est en cours, les informations de la seconde tâche sont alors maintenues jusqu'à ce qu'elles puissent à leur tour être traitées, une fois le traitement de la première tâche achevé. En d'autres termes, l'interférence en double tâche serait causée par l'incapacité de réaliser les opérations centrales requises par la tâche 2 en même temps que les opérations centrales requises par la tâche 1 (cf. figure 2, scénario A).

Figure 2

Le modèle du goulet d'étranglement central

A. Présence du goulet d'étranglement central (traitement central sériel)



B. Absence du goulet d'étranglement central (traitement central parallèle)



Note. S1 et R1 : Stimulus et réponse de la tâche 1. S2 et R2 : Stimulus et réponse de la tâche 2. IS : Identification du stimulus, SR : Sélection de la réponse et IR : Initiation de la réponse. SOA : *Stimulus Onset Asynchrony*, soit l'intervalle séparant la présentation de chaque stimulus (cf. Chapitre 2 pour une explication détaillée de la procédure employée).

La théorie de Welford (1959) a été reprise, opérationnalisée et rendue célèbre par Harold Pashler (Fagot & Pashler, 1992 ; Levy et al., 2006 ; Pashler, 1984, 1992, 1994 ; Pashler & Johnston, 1989 ; Ruthruff et al., 2001, 2003). Pashler et Johnston (1989) indiquent : « *interference arises between two tasks because certain cognitive operations require a single mechanism to be exclusively dedicated to that operation for some period of time. When that mechanism is occupied in one task, processing stages in the other task that require the mechanism must be postponed until it becomes available - thus the concept of a processing*

bottleneck or single channel » (p. 21)⁵. Cela signifie qu'il existerait, à des moments précis du traitement de l'information, une limitation structurale engendrée par les besoins exclusifs de certaines opérations cognitives, nous contraignant à traiter les tâches de façon sérielle et nous rendant par conséquent incapables de réaliser des doubles tâches simples. Cette théorie, nommée théorie du goulet d'étranglement central (Pashler, 1994), est supportée par nombre d'études démontrant de l'interférence en condition de double tâche (e.g., McCann & Johnston, 1992 ; Pashler & Johnston, 1989 ; Van Selst & Jolicoeur, 1997). Selon Pashler et Johnston (1989), il nous serait possible d'allouer notre attention à divers traitements perceptifs et d'exécuter diverses réponses motrices à la fois, mais deux traitements centraux ne pourraient avoir lieu en même temps car l'attention, disponible en quantité très limitée, ne serait allouable qu'au traitement central d'une seule tâche à la fois.

1.2. Le partage des ressources attentionnelles centrales

D'autres auteurs ont posé l'attention comme une ressource « divisible », « partageable » entre traitements cognitifs concurrents. Ainsi, chaque tâche à réaliser viendrait puiser la quantité de ressources attentionnelles dont elle a besoin, sous réserve de disponibilité. Il existe divers modèles traitant l'attention comme une ressource, et ces derniers ont deux principales caractéristiques en commun. Premièrement, les auteurs postulent que la performance aux tâches est fonction de la quantité de ressources attentionnelles allouées à leur traitement (e.g., Kahneman, 1973 ; McLeod, 1977 ; Wickens, 1984). Plus nous déployons d'attention pour réaliser une tâche, plus notre performance à la tâche en question sera satisfaisante. A contrario, une tâche n'ayant pas ou peu reçu d'attention sera piètrement réalisée. La seconde caractéristique commune à ces modèles est la place accordée aux processus *top-down*, c'est-à-dire les processus guidés par les buts et intentions, en lien avec la volonté des individus. En effet, ces modèles posent le partage de l'attention comme un mécanisme plus ou moins dépendant de la volonté. L'individu serait capable de volontairement moduler la plus ou moins grande quantité d'attention portée aux différentes opérations qu'il doit réaliser, de manière graduelle (e.g., Moray, 1967). Ce partage graduel de la ressource est contraire aux modèles structuraux selon lesquels l'allocation de l'attention centrale opère de façon binaire, en tout ou

⁵ Traduction de la citation de Pashler et Johnston (1989) : « De l'interférence survient entre deux tâches car certaines opérations cognitives nécessitent qu'un seul mécanisme leur soit exclusivement dédié pendant une certaine période. Quand ce mécanisme est occupé par une tâche, les stades de traitement de l'autre tâche qui requièrent ce mécanisme doivent être différés jusqu'à ce qu'il soit disponible – d'où le concept d'un filtre de traitement ou d'un canal unique. »

rien (i.e., le choix d'allouer l'attention au traitement central d'une tâche se fait au détriment du traitement central d'une autre tâche).

Les modèles divergent toutefois sur la source des ressources attentionnelles. Certains auteurs ont postulé que l'attention est une ressource généralisée provenant d'un unique réservoir (Kahneman, 1973), tandis que d'autres ont défendu l'existence de réservoirs attentionnels multiples, sollicités ou non en fonction des caractéristiques des traitements à réaliser (Navon & Gopher, 1979 ; Wickens, 1980).

Kahneman (1973) considère que l'attention est une ressource qui provient d'un réservoir unique, et que « *in a capacity model, interference is nonspecific, and it depends only on the demands of both tasks* » (p. 11)⁶. Selon Kahneman, il est donc possible de partager son attention entre de nombreux traitements sans causer d'interférence, à partir du moment où chaque traitement reçoit un niveau suffisant d'attention. Le partage de la ressource attentionnelle entre les tâches dépend de quatre facteurs : le niveau d'éveil physiologique, les biais attentionnels, les buts de l'individu, et le coût attentionnel des tâches. Premièrement, le niveau d'éveil physiologique (*arousal*) vient moduler la quantité de ressources attentionnelles disponibles : un haut niveau d'éveil physiologique suppose que la totalité du réservoir est allouable, tandis qu'un faible niveau implique une quantité réduite d'attention disponible. Deuxièmement des biais attentionnels inhérents à notre système cognitif peuvent intervenir. Par exemple, l'attention qu'un individu alloue à une tâche peut être détournée par la détection de son prénom dans une conversation concurrente (e.g., Moray, 1959) ou encore par l'apparition d'une nouvelle information visuelle dans son environnement direct (e.g., Folk et al., 1992 ; Posner, 1980 ; Yantis & Jonides, 1990). Troisièmement, des phénomènes endogènes viennent moduler le degré d'attention allouée à chaque traitement. De fait, les buts momentanés de l'individu ont une grande influence sur l'allocation des ressources attentionnelles centrales. Ces buts proviennent de la volonté même de l'individu dans la vie quotidienne, ou des consignes délivrées par l'expérimentateur dans un cadre expérimental. Enfin, toutes les tâches n'ont pas le même coût attentionnel. Les besoins attentionnels des traitements à réaliser sont fonction de la difficulté des tâches : plus une tâche est complexe, plus son traitement nécessitera de l'attention. Ainsi, le traitement d'une tâche complexe (i.e., mobilisant un haut niveau d'attention) laissera moins d'attention disponible pour le traitement d'autres tâches. Pour Kahneman, le traitement d'une tâche est mis en échec seulement s'il n'y a plus assez de

⁶ Traduction de la citation de Kahneman (1973) : « Dans un modèle considérant l'attention comme une capacité, l'interférence est non spécifique et dépend uniquement des coûts des deux tâches. »

ressources pour assurer son traitement ou si le système d'allocation des ressources décide de les allouer à une autre tâche⁷.

Le modèle d'une ressource unique de Kahneman (1973) présente cependant quelques faiblesses. Par exemple, il ne permet pas de rendre compte de l'effet modérateur des modalités des tâches sur l'efficacité du partage de l'attention (Navon & Gopher, 1979 ; Wickens, 1984). L'existence d'une ressource attentionnelle générale (Kahneman, 1973) suppose que les tâches viennent puiser librement de l'attention et que le contenu représentationnel des tâches n'est pas un critère d'allocation. Or, des études ont porté sur une interférence qui dépendrait du contenu des tâches (*content-dependent interference* ; Hazeltine et al., 2006 ; Navon & Miller, 1987) et ont obtenu des résultats étayant l'importance du contenu représentationnel des tâches⁸. De fait, il a été prouvé que la manière dont les tâches se partagent l'attention varie selon que leurs réponses sont réalisées dans la même modalité (e.g., Heuer, 1995 ; Pashler, 1990 ; Swinnen & Wenderoth, 2004) ou lorsque les tâches mêmes partagent des caractéristiques communes de type sémantique entre les stimuli (Logan & Schulkind, 2000 ; Navon & Miller, 1987) ou encore de type spatial (Wickens, 1984).

Pour expliquer le phénomène d'interférence dépendante des contenus, des auteurs ont enrichi le modèle de Kahneman (1973) en admettant cette fois-ci l'existence de plusieurs réservoirs attentionnels (e.g., Norman & Bobrow, 1975, 1976 ; Navon & Gopher, 1979 ; Wickens, 1984). La notion de ressources attentionnelles multiples est une extension directe de la notion d'une ressource attentionnelle unique : à la place d'un unique réservoir attentionnel dans lequel viendraient puiser toutes les tâches, il est ici considéré qu'il existe différents réservoirs attentionnels selon les traitements à accomplir (e.g., traitements linguistiques vs. visuo-spatiaux, etc.). Ces réservoirs seraient relativement indépendants les uns des autres et disposeraient de leurs propres ressources attentionnelles. Ainsi, le fait qu'une tâche puise dans un réservoir attentionnel donné ne réduit pas la quantité de ressources disponibles dans un autre réservoir. Les ressources des réservoirs restent cependant limitées, et l'interférence surgit par conséquent lorsque deux tâches ont besoin des mêmes ressources limitées (Navon & Gopher, 1979).

Le modèle proposé par Wickens (1984) est un bon exemple de modèles à ressources multiples. Wickens postule l'existence de plusieurs réservoirs attentionnels selon trois

⁷ Il est également possible qu'une tâche ne soit pas correctement traitée car les informations sensorielles disponibles sont insuffisantes. Par exemple, nous ne pourrions pas répondre à un message auditif si son volume est trop faible pour être correctement perçu, indépendamment de toute l'attention que nous pouvons y allouer.

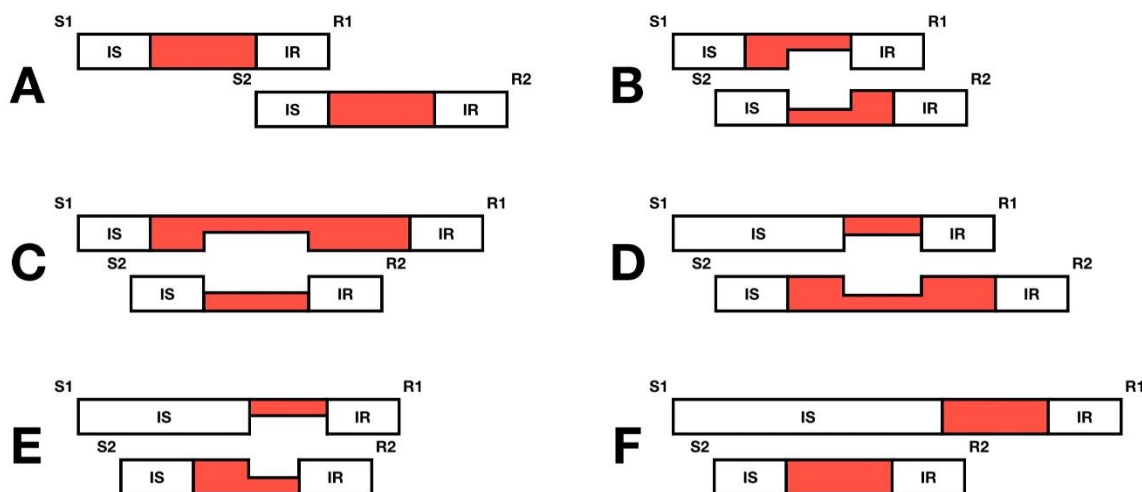
⁸ La notion d'interférence dépendante du contenu représentationnel des tâches sera davantage développée dans la partie 1.3.

dimensions : le canal sensoriel d'entrée ou de sortie de l'opération cognitive à réaliser (visuel ou auditif), la nature du code de traitement (spatial ou verbal), et le stade de traitement (identification du stimulus, sélection de la réponse, et initiation de la réponse). Précisément, Wickens propose que chaque modalité dispose d'un réservoir attentionnel spécifique pour chaque stade de traitement (l'identification du stimulus, la sélection de la réponse, et l'initiation de la réponse) en fonction de la nature du code de traitement (spatial et verbal). Selon ce modèle, l'identification d'un stimulus auditif ne devrait par exemple pas interférer avec la sélection d'une réponse manuelle, dans la mesure où les réservoirs dans lesquels viennent puiser ces traitements sont distincts.

Dans la continuité des travaux de Kahneman (1973), Tombu et Jolicoeur (2003) considèrent que les ressources attentionnelles sont divisibles entre les tâches au niveau central du traitement de l'information (cf. figure 3). Cette division a pour conséquence d'allonger le temps de réaction des tâches. L'attention centrale constitue une unique ressource que les tâches se partagent et lorsque l'une des deux tâches reçoit toute l'attention disponible, on retrouve la situation classique du goulet d'étranglement (Pashler, 1994).

Figure 3

Le modèle du partage des ressources attentionnelles centrales, adapté de Tombu et Jolicoeur (2003)



Note. S1 et R1 : Stimulus et Réponse de la tâche 1. S2 et R2 : Stimulus et Réponse de la tâche 2. IS : Identification du stimulus et IR : Initiation de la réponse. Le stade coloré correspond à la sélection de la réponse ; nous ne l'avons pas annoté pour rendre le partage des ressources attentionnelles centrales plus évident. Chacune des lettres indique un partage différent, conditionné par l'agencement des stades périphériques, soit l'identification du stimulus et

l'initiation de la réponse. Ce sont en effet les stades périphériques qui modulent la durée du chevauchement des stades centraux des deux tâches.

Notons que dans cette théorie, le réservoir attentionnel partagé correspond à l'attention centrale et non à l'entièreté de l'attention allouée au traitement complet des tâches. Pour Tombu et Jolicoeur (2003), les stades périphériques (i.e., la détection du stimulus et l'initiation de la réponse motrice) ne seraient pas soumis à des limitations de traitement. Selon cette idée, un nombre indéfini de stimuli pourraient donc être perçus simultanément, et plusieurs réponses motrices pourraient être exécutées en parallèle. Tombu et Jolicoeur ne sont cependant pas certains des conditions qui déterminent le partage des ressources attentionnelles centrales. Le partage de l'attention centrale n'est pas une stratégie optimale, puisqu'il engendre un ralentissement des réponses à la première tâche, sans pour autant accélérer les réponses à la seconde tâche. Pourquoi partager notre attention entre deux tâches pour une moindre performance ? Tombu et Jolicoeur (2005) émettent deux hypothèses. La première hypothèse suppose que le traitement central de la tâche 2 doit avoir lieu à un moment précis ou sinon il est mis en danger. En d'autres termes, de l'interférence surgit en double tâche lorsque le traitement central de la tâche 2 n'a pas été initié dans la fenêtre temporelle qui lui était bénéfique. La seconde hypothèse suppose que la simple présentation du stimulus de la tâche 2 suffit à capturer une partie des ressources originellement allouées à la tâche 1, et donc à initier un partage des ressources attentionnelles centrales.

Tombu et Jolicoeur (2003) admettent que leur modèle pourrait être complété par des hypothèses accordant plus d'importance aux caractéristiques des tâches à accomplir. De fait, ils proposent notamment de considérer la possibilité de ressources centrales multiples, par opposition à la ressource centrale généralisée sur laquelle se base la notion de *central capacity sharing* : « *we have assumed that there is only one, central resource; but the model could be intended to incorporate the idea of multiple resources* »⁹ (p. 6).

1.3. Le *crosstalk*

Une autre hypothèse théorique accordant beaucoup d'importance au contenu représentationnel des tâches à accomplir est celle du *crosstalk*. Pour comprendre le phénomène de *crosstalk*, il convient en premier lieu de se poser les questions suivantes : la réalisation de

⁹ Traduction de la citation de Tombu et Jolicoeur (2003) : « Nous avons supposé qu'il n'y a qu'une seule ressource centrale, mais le modèle pourrait être conçu pour intégrer l'idée de ressources multiples. »

deux tâches concurrentes est-elle plus aisée lorsque ces tâches sont similaires ? Au contraire, est-il plus facile de réaliser deux tâches dont les représentations sont bien distinctes ? Intuitivement, deux réponses s'offrent à nous. La première consiste à penser que des tâches au contenu extrêmement similaire (i.e., des tâches aux représentations sensorielles et/ou conceptuelles similaires) seraient plus faciles à réaliser simultanément que des tâches dont les représentations respectives sont bien distinctes, car il y aurait moins d'informations à manipuler et par conséquent moins de processus cognitifs à activer. La deuxième réponse suppose que des tâches faisant appel à des modalités d'entrée et de sortie différentes présenteront moins d'interférence car les mécanismes cognitifs impliqués pour chaque tâche sont distincts. La littérature sur la performance en double tâche témoigne majoritairement en faveur de cette deuxième réponse. En effet, plus les tâches présentent des caractéristiques similaires, plus il devient difficile de les traiter en même temps car cela génère une confusion entre les représentations de chaque tâche (e.g., Hazeltine et al., 2006 ; Huestegge & Koch, 2009 ; Navon & Miller, 1987). Le terme *crosstalk* (diaphonie en Français) a été employé pour définir ce phénomène (Heuer, 1996 ; Lien & Proctor, 2002 ; Miller, 2006).

Le *crosstalk* désigne initialement un phénomène d'interférence rencontré dans divers systèmes de communication et plus précisément la manière dont le contenu d'un signal d'un canal de communication A vient interférer avec le contenu d'un autre signal d'un canal de communication B. Il s'agit en d'autres termes d'une détérioration des signaux causée par la similarité des informations qu'ils véhiculent. Appliqué à la performance en double tâche, le *crosstalk* correspond à l'influence néfaste de deux tâches partageant les mêmes caractéristiques (e.g., lorsque deux tâches requièrent des réponses directionnelles). Kinsbourne (1981) aurait emprunté ce terme au secteur de l'ingénierie pour justifier l'existence de certaines situations d'interférence en condition de double tâche, métaphore reprise par Navon et Miller (1987) lorsqu'ils proposent la notion d'*outcome conflict* (conflit de sortie), selon laquelle une tâche « *produces outputs, throughputs, or side effects that are harmful to the processing of another task*¹⁰ » (p. 435).

Afin d'illustrer l'hypothèse du *crosstalk* et comprendre les conditions de son émergence, il est essentiel de s'intéresser à l'architecture et au fonctionnement de la mémoire de travail¹¹.

¹⁰ Traduction de la citation de Navon et Miller (1987) : « produit des sorties, des rendements, ou des effets secondaires qui sont préjudiciables au traitement d'une autre tâche. »

¹¹ L'importance de la compréhension du rôle de la mémoire de travail dans l'orchestration de doubles tâches sera considérée plus en détail dans la discussion générale.

La mémoire de travail est un concept relativement récent en psychologie cognitive¹² mais son importance a suscité l'engouement de nombreux chercheurs, tant et tant que de nombreuses définitions lui ont été attribuées¹³ (e.g., Baddeley & Hitch, 1974 ; Barrouillet & Camos ; Cowan, 1999 ; Daneman & Carpenter, 1980 ; Engle, 2002 ; Laird, 2012 ; Oberauer, 2009). La majorité des modèles de la mémoire de travail se rejoignent toutefois sur un point : ils posent la mémoire de travail comme un espace de stockage temporaire dans lequel sont maintenues et manipulées les représentations de tâches cognitives en vue d'y apporter des réponses (e.g., Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 1986, 2000 ; Cowan, 2017 ; Ericsson & Kintsch, 1995). La mémoire de travail est donc un registre mnésique à court terme qui possède deux fonctions principales : le maintien et le traitement des représentations (Barrouillet & Camos, 2012). Elle est pour cette raison considérée active, par opposition à la mémoire à court terme à laquelle on n'attribue classiquement qu'un rôle de rétention des informations sans traitement.¹⁴

De nombreux auteurs ont tenté de modéliser le fonctionnement de la mémoire de travail, lui accordant un nombre variable de composantes, de fonctions et de limites (e.g., Baddeley & Hitch, 1974 ; Barrouillet & Camos ; 2012 ; Cowan, 2017 ; Oberauer et al., 2003). Le modèle de référence de la littérature, représenté dans la figure 4, est le modèle à composantes multiples de Baddeley et Hitch (1974), initialement constitué de trois composantes¹⁵ (pour une revue, voir Baddeley & Logie, 1999). Baddeley et Hitch (1974) proposent un modèle à composantes multiples, avec un chef d'orchestre nommé administrateur central, et deux sous-systèmes distincts appelés boucle phonologique et calepin visuo-spatial. La première composante, l'administrateur central (*central executive*), est un système attentionnel chargé de superviser l'activité des deux autres composantes. L'administrateur central est pour cette raison très similaire à ce que d'autres auteurs nomment l'attention exécutive (Engle, 2002 ; Kane & Engle,

¹² On doit la première mention du terme « mémoire de travail » (*working memory*) à Miller, Galanter et Pribram (1960). Cette appellation désignait alors un registre mnésique dédié à la planification en vue d'atteindre un objectif. Atkinson et Shiffrin (1968) auraient ensuite employé ce terme pour décrire leur *short-term store* (STS) ; registre mnésique permettant spécifiquement la prise de décision et la résolution de problèmes grâce à l'intervention de processus de contrôle (pour une revue, voir Hoareau, 2017).

¹³ En 2016, Stephan Lewandowsky constate qu'environ 54 000 publications portent sur la mémoire de travail sans pour autant parvenir à un consensus quant à sa définition (2016). Cowan (2017) décrit quant à lui 9 définitions majeures de la mémoire de travail ; supposant également l'existence d'un flou théorique.

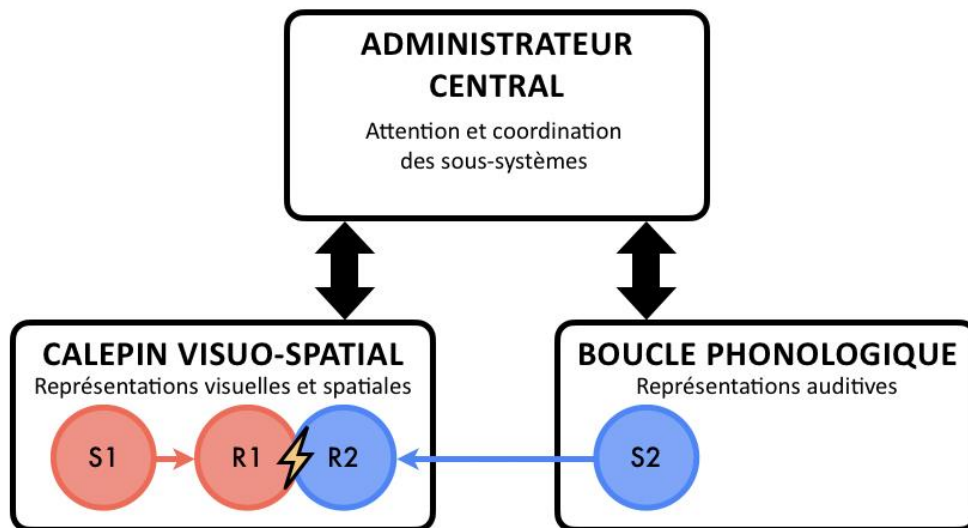
¹⁴ Cette différence s'observe notamment au niveau des empan. L'empan moyen de la mémoire à court terme, communément appelé *chiffre magique de Miller* (1956), est de 7+/-2 items. L'empan moyen de la mémoire de travail est de 4+/-1 items seulement (Barrouillet & Camos, 2012 ; Cowan, 2010).

¹⁵ Jugé trop vague et négligeant par Baddeley (1996), ce modèle a été enrichi par la suite, notamment avec l'inclusion d'une nouvelle composante nommée *buffer épisodique* (*episodic buffer*) qui permettrait notamment une interaction avec la mémoire à long terme (Baddeley, 2000). Une subdivision du calepin visuo-spatial a également été proposée par Logie (1995), avec le *visual cache* (passif) et l'*inner scribe* (actif). Nous utiliserons cependant le modèle d'origine pour expliquer l'hypothèse du *crossstalk*, car son caractère épuré permet de se concentrer sur l'essentiel : l'interaction entre les représentations des tâches en mémoire de travail.

2003). Les deux autres composantes sont des sous-systèmes chargés de maintenir les informations via des mécanismes de répétition afin de préparer l'individu à l'action. Le calepin visuo-spatial (*visuospatial sketchpad*) permet le maintien des représentations visuo-spatiales, tandis que la boucle phonologique (*phonological loop*) permet le maintien des représentations phonologiques.

Figure 4

L'hypothèse du *crosstalk* appliquée au modèle de la mémoire de travail de Baddeley et Hitch (1974)



Note. S1 et R1 : Stimulus et Réponse de la tâche 1. S2 et R2 : Stimulus et Réponse de la tâche 2. Ici, la tâche 1 est visuo-manuelle et la tâche 2 auditivo-manuelle. Le double recours au registre manuel crée une confusion entre les représentations des tâches, et cette confusion est considérée responsable de l'interférence en double tâche selon l'hypothèse du *crosstalk*.

Considérons maintenant quelques exemples de tâches sur la base de ce modèle de la mémoire de travail (cf. figure 4). Lorsque j'effectue une tâche auditivo-vocale (e.g., dire UN quand j'entends le son A et DEUX quand j'entends le son B), le code perceptif et le code moteur de la tâche sont tous deux activés dans un même sous-système, à savoir la boucle phonologique. Admettons maintenant qu'il faille presser une touche en réponse à un stimulus auditif (i.e., tâche auditivo-manuelle), le code perceptif est activé dans la boucle phonologique tandis que le code moteur est généré dans le calepin visuo-spatial. La localisation des représentations est la source même du phénomène de *crosstalk*. Si une première tâche est auditivo-vocale et la

seconde tâche est visuo-manuelle, les tâches résident dans des sous-systèmes distincts donc il n'y a pas (ou peu) de friction entre elles susceptible de causer une quelconque confusion des représentations. En revanche, si la première tâche est visuo-manuelle et la seconde auditivo-manuelle, alors la double appartenance au calepin visuo-spatial pour les réponses manuelles peut créer une confusion au niveau des représentations, ce qui engendre le phénomène de *crosstalk*.

Le phénomène de *crosstalk* peut aussi avoir lieu à un niveau conceptuel (et pas qu'à un niveau sensoriel comme vu dans l'exemple précédent). Prenons par exemple une première tâche qui nécessite de répondre vocalement UN au son A et DEUX au son B, et une seconde tâche pour laquelle il s'agit de presser la touche A quand le chiffre 1 apparaît à l'écran, et la touche B pour le chiffre 2. Si l'on ne considère que les modalités d'entrée et de sortie de ces tâches, nous ne devrions pas observer de *crosstalk*. En revanche, le recouvrement conceptuel de ces deux tâches est tel que les représentations s'activent certainement ensemble en mémoire de travail¹⁶, créant par conséquent de l'interférence en condition de double tâche (e.g., Logan & Schulkind, 2000, rapportent de l'interférence d'origine sémantique).

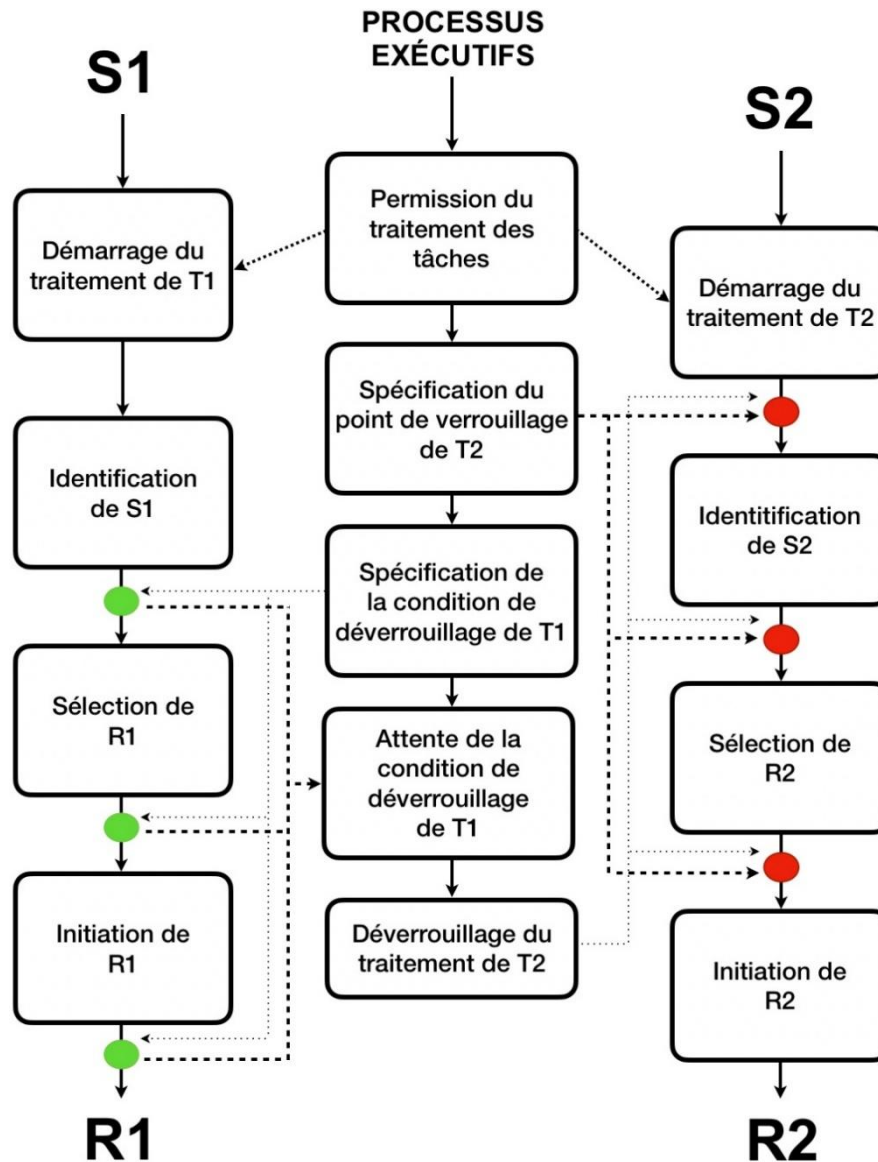
1.4. Une limitation stratégique : le modèle du contrôle exécutif adaptatif

Le modèle du contrôle exécutif adaptatif (*adaptive executive control models*) propose une conception stratégique de l'interférence en double tâche (Meyer & Kieras, 1997a, 1997b, 1999). Meyer et Kieras (1997a, 1997b) ont ainsi proposé un modèle computationnel et complexe dans lequel les choix stratégiques sont à l'origine des interruptions de certains stades de traitement d'une tâche pendant le traitement de certains stades d'une autre tâche. La figure 5 montre une version simplifiée de la conception originale de Meyer et Kieras (1997b). Selon ce modèle stratégique, l'interférence en double tâche n'est par conséquent ni la résultante de la présence d'un goulet d'étranglement central (e.g., Pashler, 1994), ni dépendante de la quantité de ressources attentionnelles disponibles (e.g., Tombu & Jolicoeur, 2003). De fait, Meyer et Kieras supposent qu'il n'y aurait pas un unique goulet d'étranglement localisé à un stade spécifique du traitement de l'information (i.e., au niveau du stade central selon la théorie du goulet d'étranglement central), et qu'une limitation peut surgir lors de n'importe quel stade de traitement en fonction du paramétrage des processus exécutifs.

¹⁶ Les concepts numérique et alphabétique peuvent être représentés à la fois verbalement et spatialement, donc il est difficile de déterminer dans quel sous-système l'interférence prendra sa source.

Figure 5

Le modèle du contrôle exécutif adaptatif



Note. S1 et R1 : Stimulus et Réponse de la tâche 1. S2 et R2 : Stimulus et Réponse de la tâche 2. Les points verts correspondent aux points de déverrouillage de la tâche 1, et les points rouges aux points de verrouillage de la tâche 2.

Plus spécifiquement, Meyer & Kieras (1997b) admettent l'existence de points de verrouillage (*lockout points*) de la tâche 2 ; points auxquels le traitement de la tâche 2 serait temporairement suspendu si le traitement de la tâche 1 n'entre pas dans un état de complétion.

Il existerait au minimum trois points de verrouillage, localisés en amont de l'identification du stimulus, de la sélection de la réponse, et de l'initiation de la réponse. En parallèle, Meyer et Kieras proposent l'existence d'événements de déverrouillage (*unlocking events*) pour la tâche 1, qu'ils définissent comme des événements au cours du traitement de la tâche 1 qui permettent de considérer cette dernière « accomplie » et ainsi permettre au traitement de la tâche 2 d'avancer au-delà de son point de verrouillage. Pour les auteurs, ces états de complétion peuvent être atteints immédiatement après l'identification du stimulus de la tâche 1, de la sélection ou encore de l'initiation de sa réponse. En d'autres termes, les processus exécutifs permettent un plus ou moins grand chevauchement des traitements de la tâche 1 et de la tâche 2 en fonction de l'interaction entre leurs points de verrouillage et de déverrouillage. Meyer et Kieras postulent l'existence d'une première stratégie prudente (*cautious task-coordination strategy*) qui consiste à mettre en attente le traitement de la tâche 2 en attendant que le traitement parallèle soit à nouveau possible. Ils admettent aussi l'existence d'une stratégie audacieuse (*daring task-coordination strategy*), pour laquelle les opérations centrales des deux tâches sont réalisées en parallèle. Le recours à l'une ou l'autre de ces stratégies n'est pas aléatoire et la mise en place d'une stratégie optimale dépendrait de cinq prérequis (Meyer & Kieras, 1999) : (1) les deux tâches ont la même importance, les participants sont encouragés à les traiter de manière égale, sans prioriser l'une des deux tâches, (2) les deux tâches doivent être effectuées rapidement, (3) il n'y a pas de contrainte relative à l'ordre de réponse, (4) les tâches dépendent de registres perceptivo-moteurs distincts, il n'y a pas de conflit périphérique, et (5) les tâches ont été suffisamment pratiquées afin de permettre l'intégration de leurs règles d'exécution respectives. Théoriquement, le non-respect d'un de ces prérequis conduit au déploiement de la stratégie prudente, et le traitement d'une tâche est mis en attente jusqu'à ce qu'il soit à nouveau possible de traiter les deux tâches simultanément.

Résumé du Chapitre 1

L'interférence en double tâche traduit les difficultés souvent rencontrées lorsque l'on essaie de réaliser deux tâches simultanément. Sur le plan comportemental, on observe un ralentissement des temps de réaction et davantage d'erreurs. Les modèles de référence s'accordent sur le fait que ce phénomène omniprésent est principalement dû à une interférence située entre les stimuli et les réponses, au niveau central du traitement de l'information. En dépit de divergences sur la nature de l'interférence centrale (limitation structurale, limitation stratégique, conflits entre représentations), des capacités attentionnelles limitées au niveau

central du traitement de l'information sont très souvent invoquées pour expliquer les difficultés (e.g., Navon & Miller, 2002 ; Pashler, 1994 ; Tombu & Jolicoeur, 2003). Il est proposé que cette interférence peut être causée soit par un *crosstalk* entre les représentations centrales des tâches, lorsque celles-ci partagent des caractéristiques conceptuelles communes (e.g., Logan & Schulkind, 2000 ; Navon et Miller, 1987), soit par des conflits entre représentations qui résident dans un même sous-système de la mémoire de travail (e.g., Halvorson & Hazeltine, 2015, 2019 ; Maquestiaux et al., 2018). Dans le modèle dominant proposé par Pashler (1994), il est postulé l'existence d'une limitation cognitive robuste, appelée "goulet d'étranglement central", qui empêche le déploiement d'un traitement central simultané pour deux tâches concurrentes. Cela signifie qu'il est impossible d'effectuer simultanément des processus tels que la sélection de la réponse appropriée à un stimulus pour deux tâches différentes. D'un autre côté, Meyer et Kieras (1997a, 1997b) avancent l'idée que les limitations centrales reflètent plutôt un report stratégique des étapes centrales. En d'autres termes, les processus centraux nécessaires pour effectuer les traitements des deux tâches sont délibérément différés ou reportés, ce qui entraîne une inefficacité dans le traitement en double tâche. Pour résumer, les principaux modèles de l'interférence en double tâche s'accordent sur le fait que, sans une pratique extensive des tâches, il n'y a pas de traitement central simultané en raison de la nature même de l'allocation de l'attention au niveau des opérations centrales. Les capacités attentionnelles limitées au niveau central du traitement de l'information créent un obstacle pour mener à bien plusieurs tâches en même temps. Cet obstacle peut être vu comme une limite ou encore comme un moyen de garantir le bon déroulement d'un traitement central.

Chapitre 2. Procédures de double tâche

2.1. Simple objectivation des difficultés en double tâche : tâches continues	32
2.1.1. Tâches continues et introspection.....	33
2.1.2. Tâches continues en laboratoire	35
2.2. Étude de la nature de la limitation centrale : tâches discrètes	37
2.2.1. Le protocole de la période réfractaire psychologique	37
2.2.2. Le protocole de présentation simultanée	40
Résumé du Chapitre 2.....	41

Pour comprendre les difficultés en double tâche, les psychologues ont mis au point une grande variété de procédures de double tâche. Ces procédures ont permis de tester différentes hypothèses sur les sources de l'interférence et l'allocation de l'attention entre les tâches. L'approche générale consiste à varier les conditions d'interférence pour mieux appréhender le fonctionnement de tel ou tel processus cognitif, et l'on passe donc par la réalisation de plusieurs tâches concurrentes pour étudier les processus centraux.

Dans cette thèse, la double tâche n'est pas l'objet d'étude, mais l'outil avec lequel nous étudierons les représentations et processus cognitifs en jeu lorsque l'on tente de faire différentes tâches en même temps. La procédure de Paulhan (1887) consistait à s'auto-tester sur diverses combinaisons de tâches complexes et déduire les états psychiques en s'appuyant sur les temps de réponse, les erreurs et l'expérience introspective. Actuellement, les procédures de double tâche varient de complexes à très simples. Les procédures complexes (e.g., conduire tout en faisant des traitements en mémoire de travail ; Watson & Strayer, 2010) possèdent une validité écologique certaine. L'inconvénient est que la complexité rend difficile l'étude précise du fonctionnement attentionnel. À l'autre extrémité du continuum complexe/simple se situent les procédures appariant des tâches très simples dites discrètes et consistant à réagir à quelques stimuli très simples (e.g., des sons, des lettres) en donnant quelques réponses brèves (e.g., répondre par monosyllabe ou pression d'une touche de clavier). L'inconvénient possible est peut-être le manque de validité écologique (mais voir, e.g., Levy et al., 2006). Surtout, l'avantage d'une procédure très simple est la grande validité interne et la facilité (relative) à identifier des processus cognitifs rapides et, plus généralement, à tester différentes hypothèses théoriques du fonctionnement attentionnel en situation de double tâche. Finalement, le choix des procédures de double tâche dépend principalement du caractère plus ou moins appliqué de la question de recherche.

2.1. Simple objectivation des difficultés en double tâche : tâches continues

Si le but de l'expérimentateur est de comprendre les difficultés rencontrées en double tâche, l'emploi de tâches continues est adéquat. Un avantage des tâches continues est qu'elles peuvent être relativement écologiques. Notre quotidien est composé de nombreuses tâches continues (e.g., la conduite, l'écriture, dialoguer) et l'on peut supposer que la manipulation de telles tâches est préférable à des tâches discrètes de laboratoire. Placer l'individu dans des conditions écologiques favoriserait supposément sa performance en double tâche, puisque

l'aisance expérimentée au quotidien lors de la réalisation de double tâches (e.g., envoyer des messages en marchant n'engendre pas une baisse de performance dans la vie quotidienne) est bien moins souvent rapportée en laboratoire (i.e., l'interférence en double tâche est un phénomène robuste, même pour des tâches très simples).

Dans cette première partie, nous détaillerons l'utilisation et l'utilité des procédures de double tâches employant des tâches continues afin de comprendre la raison pour laquelle ces dernières ne sont pas adaptées à l'étude fine des processus centraux.

2.1.1. Tâches continues et introspection

La première procédure de double tâche, proposée par Paulhan (1887), repose essentiellement sur l'introspection. À la fois expérimentateur et participant, Paulhan s'est chronométré alors qu'il résolvait une multiplication complexe sur papier (e.g., 7 897 654 987 687 786 par 7, p., 687) et a mesuré le nombre de vers d'un poème qu'il était capable de réciter simultanément :

Sans récitation l'opération me prend 62 secondes, et comme je me presse, je fais une erreur ; avec récitation de 25 vers de 12 pieds, elle me prend 98 secondes. La récitation seule m'en prend 37 à 38, le total de la récitation et de l'écriture est donc de 99 à 100 secondes ; avec les chances d'erreur, on peut le considérer comme sensiblement égal au temps qu'il me faut pour faire simultanément les deux opérations. (Paulhan, 1887, p. 687).

Cette citation plaide en faveur de la simultanété des opérations mentales, dans la mesure où Paulhan (1887) rapporte avoir mis autant de temps à réaliser deux tâches simultanément (i.e., résoudre une multiplication complexe tout en récitant un poème) qu'à traiter ses tâches successivement et additionner leurs temps de réalisation respectifs. Afin d'étudier ce phénomène de manière exhaustive et de renforcer ses observations, Paulhan s'est soumis à d'autres combinaisons de tâches. Il a notamment mesuré le temps nécessaire à la résolution de deux multiplications complexes à la fois, l'une avec la main gauche et l'autre avec la main droite. Il a aussi étudié le temps qu'il lui fallait pour réciter des vers tout en écrivant d'autres d'un autre auteur. Dans ses expérimentations, Paulhan utilisait donc comme variables dépendantes le temps de réponse en condition de simple tâche (i.e., chaque exercice réalisé séparément) et en condition de double tâche (i.e., les deux tâches réalisées ensemble), ainsi que ses impressions concernant ses propres états psychiques. Les indicateurs comportementaux de Paulhan étaient donc à la fois objectifs (i.e., le temps nécessaire pour réaliser les tâches en fonction de la condition ainsi que le nombre d'erreurs commises) et subjectifs (i.e., les états psychiques de l'expérimentateur/participant).

Les observations de Paulhan (1887) le mènent à conclure que la simultanéité des actes psychiques, soit le traitement simultané de plusieurs tâches, semble être la règle plutôt qu'une exception. Plus précisément, le traitement parallèle « est une règle qui n'a peut-être pas d'exceptions, ou qui n'en a que de très rares » (1887, p. 689). Que s'est-il passé, de Paulhan (1887) à nos jours, pour que nous considérions maintenant l'omniprésence d'un traitement sériel ?

De nombreuses évolutions méthodologiques expliquent certainement les changements de conception, entre la fin du 19^e siècle et aujourd'hui, de la capacité de traitement en situation de double tâche. L'une des premières évolutions aura été l'abandon de l'introspection comme méthode d'étude des états mentaux. L'introspection est par essence subjective et n'offre donc pas d'arguments empiriques convaincants. Un sentiment de difficulté peut certes refléter de réelles difficultés au niveau central, mais ces dernières ne pourront être avérées qu'au moyen d'un test rendu possible par des procédures expérimentales fiables. Des études portant sur la fiabilité de l'introspection en contexte de double tâche ont par ailleurs démontré que l'usage de l'introspection comme indicateur de la nature du traitement central n'est possible qu'en contexte de simple tâche, car les participants ne sont pas capables de correctement apprécier leurs propres performances à une seconde tâche en cas d'interférence (Corallo et al., 2008). De plus, les indicateurs utilisés par Paulhan (1887) ne permettent pas de directement étudier le traitement central et donc de rendre compte des mécanismes impliqués dans l'allocation des ressources attentionnelles centrales.

Si les observations de Paulhan (1887) sont à nuancer, il semble en revanche important de noter que ses travaux ont apporté deux choses essentielles à la psychologie expérimentale. Le premier apport est d'avoir suscité un intérêt pour les limites quantitatives de l'attention et offert une procédure pour les étudier. Les auteurs s'intéressaient initialement à la nature de l'attention, mais poser la question de la simultanéité des actes psychiques revient à questionner les limites de l'attention et, indirectement, à enrichir notre compréhension des mécanismes attentionnels. Le deuxième apport des travaux de Paulhan est l'introduction de l'idée d'une oscillation de l'attention entre les tâches. Paulhan propose que deux actes psychiques peuvent coexister et que l'accumulation d'informations en faveur de l'un ou de l'autre engendre des oscillations de l'attention et des modifications de nos intentions : « Les deux systèmes [de pensée] coexistent ou peuvent coexister pendant un certain temps ; mais [...] les associations avec un grand nombre d'autres éléments psychiques peuvent varier et se produire tantôt pour l'un, tantôt pour l'autre ; c'est ce qui constitue l'oscillation de l'attention et aussi les hésitations de la volonté » (pp. 688-689). Cette idée d'une alternance de l'attention n'est pas vérifiable

avec les méthodes de Paulhan. Elle est néanmoins est très ressemblante à ce que l'on appelle aujourd'hui l'attention spatiale (e.g., Folk, Remington, & Johnston, 1992 ; Simons & Chabris, 1999 ; Yantis & Jonides, 1984). L'attention spatiale peut se définir comme la manière dont l'esprit va allouer de l'attention à des éléments de notre environnement visuel direct tout en laissant les autres dans l'ombre, à la manière d'une lampe torche¹⁷.

Dans la continuité des travaux de Paulhan (1887), d'autres auteurs ont conduit des études mêlant tâches continues et introspection (e.g., Downey & Anderson, 1915 ; Solomons & Stein, 1896). Downey et Anderson, tout comme Solomons et Stein, ont évalué leur performance sur une double tâche complexe combinant de la rédaction sous dictée et de la lecture d'histoires. Si leur méthodologie ressemble fortement à celle de Paulhan (1887), leurs interprétations diffèrent. Selon Downey et Anderson, l'attention est efficacement divisée entre les deux tâches, tandis que Solomons & Stein postulent qu'une des deux tâches est traitée inconsciemment. Ces divergences marquent notamment la nécessité de ne pas se fier à nos états de conscience pour analyser la performance en double tâche. Ainsi la psychologie expérimentale a progressivement abandonné les méthodes introspectives au profit de méthodes plus objectives de mesure du comportement. Les évolutions méthodologiques ont certainement participé à l'évolution continue des connaissances sur le fonctionnement de l'attention.

2.1.2. Tâches continues en laboratoire

Les chercheurs ont commencé par développer des protocoles stricts avec des tâches complexes (e.g., Allport et al., 1972 ; Shaffer, 1975; Spelke et al., 1976). Ici, seules les mesures comportementales objectives sont employées. Dans leur étude, Spelke et al. (1976) demandent à deux étudiants de lire des histoires (de 700 à 5 000 mots) tout en écrivant des listes de mots dictées par l'expérimentateur (une vingtaine de mots par liste), pendant 85 sessions d'une heure. Les auteurs rapportent que, grâce à la pratique, la rapidité avec laquelle les tâches sont réalisées conjointement se rapproche progressivement de la rapidité nécessaire à leur réalisation en condition de simple tâche. Les participants ont également développé la capacité de saisir le sens des mots lus et écrits, preuve selon Spelke et al. que l'attention a bien été allouée au deux tâches simultanément.

Il est aisé d'apprécier qualitativement la performance des participants au fil du temps, mais cette méthode ne permet pas de répondre à des questions précises quant aux opérations

¹⁷ Cette métaphore de la lampe torche est proposée par Wilhelm Wundt (1897), l'un des pères fondateurs de la psychologie. Wundt note qu'il est possible d'examiner des portions de notre champ visuel, à la manière d'une lampe torche qui viendrait projeter sa lumière sur différents objets successivement, et cela sans même bouger nos yeux.

centrales. Les auteurs reconnaissent notamment qu'il n'est pas possible de déterminer si l'amélioration de la performance des participants au fil des sessions résulte d'une réelle simultanéité des opérations centrales et non d'une alternance rapide entre les deux tâches : « *Following Paulhan (1887), one might suggest that Diane and John rapidly 'alternated their attention' between the tasks, making use of redundancies in the stories they read to avoid any decrement in performance. This hypothesis is not directly tested in our work, and indeed it may not be testable at all* » (pp. 227-227)¹⁸ Il est effectivement impossible, sur la simple base de la qualité de la performance, de déterminer s'il y a eu allocation successive des ressources attentionnelles ou bien partage efficace de ces dernières. Les auteurs soutiennent toutefois que s'il y avait réellement une alternance rapide de l'attention entre les deux tâches, il faudrait que cette dernière ne prenne pas ou peu de temps pour que cela concorde avec leurs résultats. Un tel niveau d'efficacité n'aurait jamais été prédit ni même atteint par Paulhan (1887), pour aucune des combinaisons de tâches qu'il a employées.

Si l'emploi de tâches continues permet de rendre visibles les difficultés rencontrées en condition de double tâche, elles ne permettent effectivement pas d'étudier les processus attentionnels centraux. Il est très difficile, si ce n'est impossible, de déterminer ce qui se passe au niveau cognitif, et plus particulièrement laquelle des opérations d'une tâche entre en conflit avec les opérations de l'autre tâche. Le début et la fin des tâches continues sont indéterminés et cela complexifie davantage l'étude des opérations centrales. De plus, les tâches continues laissent une grande marge de manœuvre aux participants et réduisent par conséquent le niveau de contrôle expérimental. Pour cette raison, nous avons besoin de tâches discrètes afin d'étudier précisément l'allocation des ressources attentionnelles centrales et les mécanismes sous-jacents. Les tâches discrètes, par opposition aux tâches continues, sont rapides et ont un début (le stimulus) et une fin (la réponse) très précis. Elles rendent donc possible la formulation d'hypothèses sur la base d'un modèle cognitif très simple : le modèle des trois stades successifs de traitement présenté dans l'introduction du Chapitre 1. Ce modèle admet que le traitement de l'information est décomposé en trois stades successifs : l'identification d'un stimulus, la sélection d'une réponse adaptée au stimulus et l'initiation de la réponse. Les tâches discrètes permettent de contrôler le moment précis auxquels les stimuli sont délivrés et de mesurer les

¹⁸ Traduction de la citation de Spelke et al. (1976) : « Selon Paulhan (1887), on pourrait suggérer que Diane et John "alternent rapidement leur attention" entre les tâches, en se servant des redondances dans les histoires qu'ils lisent pour éviter toute diminution de performance. Cette hypothèse n'est pas directement testée dans notre travail, et elle pourrait même ne pas être testable du tout. »

temps de réponse. Il devient désormais possible d'étudier ce qui a lieu entre le stimulus et la réponse, à savoir les processus centraux qui font l'objet de la présente thèse.

2.2. Étude de la nature de la limitation centrale : tâches discrètes

À ce jour, deux protocoles expérimentaux emploient des tâches discrètes : le protocole de la période réfractaire psychologique (PRP), et le protocole de présentation simultanée des stimuli (parfois nommé *simultaneous onset paradigm* ; e.g., Greenwald, 2003). La principale différence tient au délai séparant les stimuli de chaque tâche. Le délai est variable dans le cadre de la procédure PRP alors qu'il est nul dans le cas du protocole de présentation simultanée des stimuli. Il en résulte que les stimuli sont présentés plus ou moins quasi simultanément dans le cas du protocole PRP mais simultanément dans le cas du protocole de présentation simultanée.

2.2.1. Le protocole de la période réfractaire psychologique

En 1931, Telford se questionne sur la présence d'une période réfractaire au niveau cognitif car aucune technique n'avait alors été développée pour étudier la possible existence d'un tel phénomène en ce qui concerne les actes volontaires : « *if such a period of decreased excitability does follow voluntary response, it may possibly show itself (1) as a more or less pronounced tendency not to repeat a given act, (2) as an increase in time of response to stimuli occurring at less than the period necessary for recovery, or (3) as a decrease in accuracy of responses which occur very rapidly, or in combinations of these phenomena* » (p. 6)¹⁹. Pour répondre à sa question, Telford a mené une étude dans laquelle les participants devaient réaliser des réponses manuelles sur 100 essais, en réaction à des signaux sonores séparés par un intervalle temporel variable, allant de 500 ms à 4 000 ms. Les temps de réaction observés sont plus rapides lorsque la durée séparant les signaux sonores est longue (e.g., 2 000 ms). Le ralentissement des réponses aux signaux lorsque l'intervalle de présentation est plus court (ce ralentissement peut s'élever à 100 ms lorsque l'intervalle est de 500 ms) implique un report des opérations mentales et par extension l'existence d'une période réfractaire psychologique. Dans la mesure où les réponses sont plus lentes lorsque les signaux sonores sont proches, il est facile d'inférer que l'attention allouée aux tâches nécessite un certain délai avant de pouvoir être à

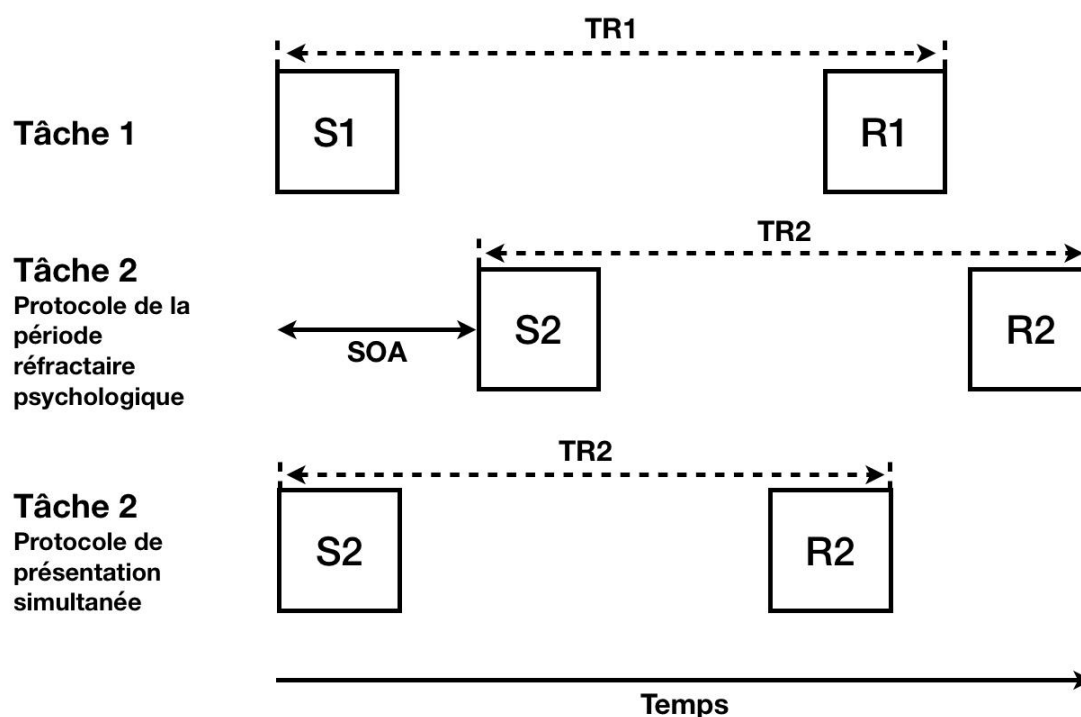
¹⁹ Traduction de la citation de Telford (1931) : « Si une telle période de diminution de l'excitabilité suit une réponse volontaire, elle pourrait probablement se manifester (1) comme une tendance plus ou moins prononcée à ne pas répéter un acte donné, (2) comme une augmentation du temps de réponse aux stimuli apparaissant avant la fin de la période nécessaire à la récupération, ou (3) comme une diminution de la précision de réponses très rapides, ou comme une combinaison de ces phénomènes. »

nouveau mobilisée. Les résultats obtenus semblent donc confirmer l'hypothèse de l'existence d'une période réfractaire au niveau psychologique.

Le protocole de la période réfractaire psychologique, schématisé dans la figure 6, est aujourd'hui fréquemment employé pour étudier l'interférence en double tâche et l'allocation de l'attention entre les tâches.

Figure 6

Schéma du protocole de la période réfractaire psychologique et du protocole de présentation simultanée



Note. S1 et R1 : Stimulus et Réponse de la tâche 1. S2 et R2 : Stimulus et Réponse de la tâche 2. TR1 : Temps de réaction à la tâche 1 et TR2 : Temps de réaction à la tâche 2. SOA : *Stimulus Onset Asynchrony*.

Dans le cas spécifique de l'étude des processus centraux, ce protocole comporte quatre caractéristiques essentielles (Maquestiaux, 2012) : la nature des tâches, la suppression des conflits périphériques, l'introduction d'un intervalle temporel entre la présentation de chaque stimulus et l'utilisation de consignes claires.

Nature des tâches. La première caractéristique repose sur le choix des tâches. Il est nécessaire d'utiliser des tâches pour lesquelles une décision est prise, sinon il n'y aura pas de stade de sélection de la réponse. De fait, le traitement central n'est pas universel, puisque certaines activités ne nécessitent pas la prise d'une décision (e.g., tâches de capture

attentionnelles, réflexes). Il ne faut pas pour autant que les tâches soient complexes, car nous ne voulons pas que nos observations soient attribuables à une quelconque complexité des tâches. Concrètement, il ne s'agit pas de tester les participants sur leur aptitude à réussir des tâches, mais plutôt de déterminer si le jeune adulte est en mesure de traiter deux tâches simultanément. En d'autres termes, les tâches doivent être suffisamment aisées pour que les participants n'aient pas besoin d'un effort de concentration pour réaliser l'une des deux tâches. Enfin, il est également nécessaire que ces tâches soient discrètes pour permettre une analyse précise de données relatives à la réalisation des tâches. En somme, il faut employer des tâches élémentaires, discrètes et de choix, telles que le fait de répondre avec des mots à quelques sons (dire « un » au son aigu, dire « deux » au son grave), ou d'appuyer sur les touches d'un clavier d'ordinateur en réponse à des stimulations présentées à l'écran (appuyer avec l'index à la lettre A, avec le majeur à la lettre B).

Suppression des conflits périphériques. Si l'on souhaite étudier l'interférence centrale, une seconde caractéristique essentielle du protocole PRP est de s'assurer que les tâches dépendent de registres perceptifs et moteurs distincts. Cette caractéristique a pour but de grandement limiter toute possibilité de conflit périphérique, c'est-à-dire des situations pour lesquelles la modalité sensorielle de présentation d'un stimulus viendrait empêcher la perception de l'autre stimulus (e.g., deux stimulations visuelles), ou pour lesquelles la modalité sensorielle de réponse à une tâche entraverait l'exécution de la réponse requise pour l'autre tâche (e.g., deux réponses vocales). Il s'agit concrètement de choisir une combinaison de tâches pour lesquelles l'interférence serait principalement localisée au niveau central du traitement de l'information, entre les actes perceptifs et les actes moteurs. Cette caractéristique se place dans la continuité de l'hypothèse du *crosstalk* évoquée plus tôt (e.g., Navon & Miller, 1987), supposant que des tâches dépendant des mêmes modalités engendreraient une grande confusion des représentations et donc une grande interférence en double tâche.

Intervalle temporel. L'asynchronie de la présentation des stimuli est la caractéristique du protocole PRP qui le différencie du protocole de présentation simultanée. Il s'agit de séparer la présentation des stimuli de chaque tâche par un intervalle temporel d'une durée variable, nommé *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA) (cf. figure 6). Cette durée varie aléatoirement d'un essai à l'autre au sein d'une même expérience, et peut être très courte (de l'ordre de quelques millisecondes) ou très longue (jusqu'à quelques centaines de millisecondes). L'intérêt du SOA est qu'il va permettre de contrôler exactement les informations dont disposent les individus à chaque moment de l'expérience, créant tantôt des conditions dans lesquelles le recouvrement temporel des deux tâches est quasi-total (i.e., les phases de traitement central sont censées avoir

lieu en même temps), tantôt des conditions pour lesquelles les tâches sont bien distinctes et par conséquent plus faciles à traiter. La variation de ce délai permet donc de mettre en évidence une éventuelle interférence entre les deux tâches.

Consignes claires. La consigne traditionnelle consiste à demander aux participants de répondre le plus rapidement et le plus précisément possible, tout en accentuant leur vitesse de réponse à la première tâche. Le but de cette consigne est d'engager l'attention sur le traitement de la tâche 1. De cette façon, nous pensons circonscrire l'interférence sur la tâche 2 et éviter que les participants traitent la tâche 2 puis la tâche 1 de façon sérielle (i.e., goulet d'étranglement central sur la tâche 1). Par ailleurs, il ne s'agit pas non plus de demander aux participants de répondre à la tâche 1 avant de répondre à la tâche 2, comme certaines études l'ont explicitement demandé (Schumacher et al., 1999, 2001). L'ordre de réponse demeure complètement libre et, comme nous le verrons dans notre travaux expérimentaux, cela n'empêche aucunement d'inverser l'ordre des réponses. En cas d'interférence entre les tâches, la théorie du goulet d'étranglement central (Pashler, 1994) déclare que le traitement central de la seconde tâche débutera lorsque le traitement central de la tâche 1 sera achevé. Si le traitement est parallèle, le traitement central de la tâche 2 débutera indépendamment de l'avancée du traitement central de la tâche 1. Les prédictions dépendent par conséquent de la priorité accordée à la première tâche. S'il était demandé aux participants de prioriser le traitement de la seconde tâche, le traitement de la première tâche serait mis en attente et il deviendrait impossible d'étudier les modalités d'allocation de l'attention centrale.

2.2.2. Le protocole de présentation simultanée

Le protocole de présentation simultanée (*simultaneous onset paradigm*, littéralement paradigme du déclenchement simultané) est une variante du protocole PRP consistant à présenter les stimuli des deux tâches en même temps (e.g., Greenwald, 2003 ; Halvorson et al., 2013, Schumacher et al., 2001). Il peut être vu comme une variante du protocole PRP si l'on considère que les stimuli sont présentés avec un SOA de 0 ms (cf. figure 6). Les différences entre les deux procédures sont autrement relativement minimales. Comme pour le protocole PRP, les tâches manipulées sont des tâches discrètes et épurées, et l'on s'assure que les modalités de ces dernières n'entrent pas en conflit lorsque l'on souhaite étudier les processus centraux.

Le protocole de présentation simultanée a été développé en réponse à des doutes concernant l'efficacité du protocole PRP. Quelques auteurs postulent que la présentation asynchrone des stimuli dans le cadre de la procédure PRP induirait nécessairement un mode de traitement central sériel (e.g., Huestegge & Hazeltine, 2011 ; Meyer & Kieras, 1999 ;

Schumacher et al., 2001). De fait, puisque la tâche 1 est toujours présentée en premier et la tâche 2 en deuxième après un SOA variable, les auteurs supposent que la procédure apprendrait aux participants à traiter la tâche 1, puis la tâche 2. Selon ces auteurs, il est donc possible que la pléthore de résultats soutenant l'existence du goulet d'étranglement central reflète en réalité une stratégie adoptée en réponse au mode de présentation sériel du paradigme PRP, jugé artificiel. Notons toutefois que la présentation simultanée de deux stimuli est relativement rare au quotidien ; les stimuli ne sont pas délivrés avec la précision de nos expérimentations minutieusement programmées en laboratoire. De cette façon, le protocole PRP a sans doute plus de validité écologique que le protocole de présentation simultanée. En outre, nous verrons dans le Chapitre 3 que l'utilisation du protocole PRP et par extension de consignes accentuant la vitesse de réponse à la tâche 1 n'empêche aucunement de répondre à la tâche 2 avant la tâche 1 (e.g., Maquestiaux et al., 2008 ; Pashler et al., 1993).

Résumé du Chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes procédures de double tâche utilisées pour étudier la performance en double tâche. Nous avons vu que chaque protocole présente des avantages et des inconvénients. Certes, les exigences de la psychologie contemporaine ont progressivement écarté les méthodes introspectives des laboratoires (mais pour une étude récente mêlant introspection et protocole PRP, voir Corallo et al., 2008). Nous ne pouvons pour autant pas déclarer que la manipulation de tâches discrètes est préférable à celle de tâches continues, car nous avons démontré que la procédure employée dépend en réalité du questionnement de l'expérimentateur. L'étude de la performance en double tâche a deux niveaux de questionnement. Le premier niveau, que l'on pourrait qualifier d'*appliqué*, consiste à étudier les difficultés rencontrées par les individus lors de la réalisation de doubles tâches. Il est ici question de savoir si un individu subit des baisses de performance en contexte de double tâche par opposition à de la simple tâche, et l'objet d'étude est donc la performance même des participants (e.g., la conduite automobile, Levy & Pashler, 2007 ; Strayer & Johnston, 2001 ; Walker et al., 2021). Les tâches continues semblent idéales pour l'étude de la variation de la performance, et la possibilité de rendre les tâches écologiques (de nombreuses activités de la vie quotidienne sont continues, telles que l'écriture ou la conduite automobile) permet d'autant plus d'objectiver les difficultés rencontrées au quotidien et de développer des techniques pour les amoindrir. Le second niveau est quant à lui plus *fondamental*, et cherche à identifier les processus impliqués dans l'allocation de l'attention centrale en double tâche. Dans ce cas, l'expérimentateur s'intéresse à la performance des participants comme un moyen d'étudier et

de déduire la nature des processus centraux. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser des protocoles stricts avec des tâches discrètes pour lesquelles la durée de présentation des stimuli est contrôlée à la milliseconde près. L'emploi de tels protocoles permet d'observer, quoiqu'indirectement, les phénomènes centraux autrement inaccessibles.

Chapitre 3. Les théories à l'épreuve des faits

3.1. Identification d'une exception avec le protocole PRP	45
3.2. La pratique	46
3.2.1. De la pratique en double tâche... ..	47
3.2.2. Hypothèses	47
3.2.3. De la nécessité de ne pratiquer qu'une seule tâche	50
3.3. Une limitation stratégique en réponse au protocole PRP	51
3.4. Les systèmes de réponse intrinsèquement automatiques	53
3.5. La compatibilité idéomotrice	56
3.5.1. Compatibilités stimulus-réponse	56
3.5.2. La compatibilité idéomotrice.....	57
3.5.3. Le grand débat de la compatibilité idéomotrice	59
Résumé du Chapitre 3.....	63

Dans la conclusion de sa revue sur l'interférence en double tâche, Pashler (1994) pose la question suivante : « *Do mental processes produce a bottleneck because they require the activity of a single brain structure or ensemble of structures or because of mutual inhibition, or do they do for some as-yet-unsuspected reason ?* » (p. 241)²⁰. La théorie du goulet d'étranglement central a été largement soutenue dans de nombreux travaux et rarement remise en cause, laissant croire à une limitation centrale structurale et par conséquent inévitable. La limitation centrale est d'ailleurs un élément faisant partie des modèles intégratifs du *multitasking* (voir la revue de Koch et al., 2018). Cependant, quelques exceptions ont été identifiées dans la littérature et il semble désormais nécessaire de se questionner sur l'existence d'une « raison encore insoupçonnée » (*as-yet-unsuspected reason*). Avec des tâches très simples dites « idéomotrices » (e.g., Greenwald & Shulman, 1973 ; Halvorson & Hazeltine, 2015) ou des tâches très pratiquées (Hazeltine et al., 2002 ; Maquestiaux et al., 2008 ; Ruthruff et al., 2006 ; Van Selst et al., 1999), des niveaux très bas voire négligeables d'interférence en double tâche ont pu être observés. Ces résultats ont été interprétés comme démontrant une absence de limitation centrale. Mais tout le monde n'est pas d'accord : l'absence d'interférence ne signifie pas nécessairement que les stades centraux des deux tâches opèrent en parallèle (e.g., Lien et al., 2006). Une autre interprétation que nous présenterons dans ce chapitre est que les stades centraux opèrent en série mais de manière très rapide, sans interférence observable (Ruthruff et al., 2003, cf. figure 8).

De notre point de vue, ces exceptions questionnent la nature du goulet d'étranglement central. Est-il invariablement présent ou existe-t-il des tâches et des conditions susceptibles de l'éliminer ? La recherche de conditions permettant d'éliminer le goulet n'a pas pour finalité de chercher à optimiser les traitements en double tâche. Dans cette thèse, la finalité est de tester la nature de la limitation. S'il existe des conditions permettant de l'éliminer, il s'agira de comprendre alors la nature des processus autorisant cela. La quête de nouvelles exceptions offre des indices essentiels. Tester l'hypothèse d'un traitement central sans attention sous différents angles permet d'identifier les conditions de l'élimination de la limitation centrale. En identifiant les conditions de la présence et de l'absence de la limitation centrale, il va alors être possible de proposer une nouvelle explication du fonctionnement attentionnel et de l'allocation de l'attention entre traitements concurrents.

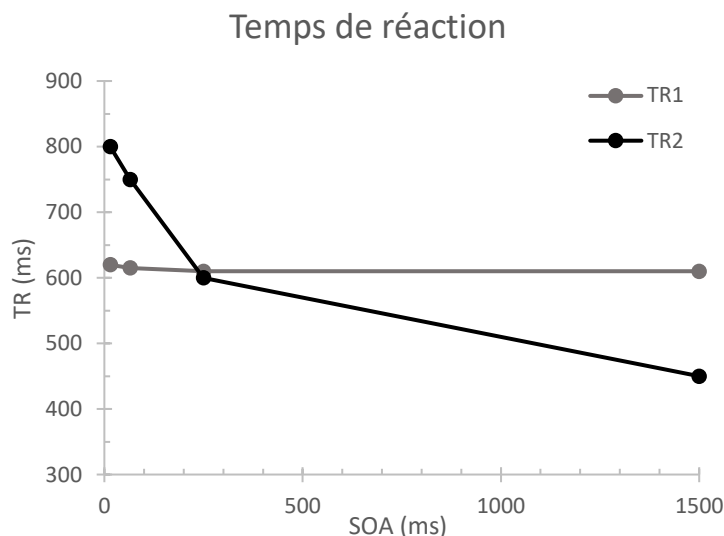
²⁰ Traduction de la citation de Pashler (1994) : « Est-ce que les traitements mentaux produisent un goulet d'étranglement car ils requièrent l'activité d'une structure cérébrale unique ou d'un ensemble de structures ou à cause d'une inhibition mutuelle, ou le font-ils pour une raison encore insoupçonnée ? »

3.1. Identification d'une exception avec le protocole PRP

Dans le cadre du protocole de la période réfractaire psychologique (PRP), l'ampleur de l'interférence en double tâche est classiquement mesurée par la valeur de l'effet de la période réfractaire psychologique (PRP). « Effet PRP » est le nom donné à un phénomène fréquemment obtenu lorsque l'on utilise le protocole PRP : le temps de réaction à la seconde tâche (i.e., celle dont le stimulus a été présenté en deuxième) augmente à mesure que le SOA diminue (Telford, 1931). Cet effet, représenté dans la figure 7, est relativement robuste, puisqu'il a été répliqué par de nombreux auteurs et avec une grande variété de stimuli et de réponses (Bertelson, 1966 ; Pashler, 1994).

Figure 7

Exemple classique d'effet de la période réfractaire psychologique (PRP)



Note. Le temps de réponse à la tâche 2 augmente considérablement à mesure que l'intervalle séparant la présentation des stimuli (SOA) diminue. Le temps de réponse à la tâche 1 reste constant.

L'usage préférentiel du protocole PRP par rapport à d'autres protocoles de double tâche repose sur le postulat classique que le besoin en attention consciente d'une opération mentale diminue à mesure que son automaticité se développe (e.g., James, 1890 ; Schneider & Shiffrin, 1977). De fait, parmi toutes les définitions de l'automaticité (cf. Moors & De Houwer, 2006, 2007, pour une revue), nous choisissons dans cette thèse de déterminer si les traitements opèrent

avec ou sans attention. La conséquence d'un retrait des besoins attentionnels avec l'automatisme est que si l'une des deux tâches est traitée automatiquement, la sélection de sa réponse devrait se faire sans recourir aux ressources attentionnelles qui pourront être pleinement allouées au traitement de l'autre tâche. En d'autres termes, il ne devrait pas y avoir de compétition au niveau central du traitement de l'information, et cette absence de compétition se manifeste sous la forme d'un effet PRP proche de zéro. De cette façon, un faible effet PRP devient un indicateur de l'automatisme d'une tâche et signifie selon la théorie de Pashler (1994) que le goulet d'étranglement central a bien été éliminé.

3.2. La pratique

Au quotidien, nous pouvons régulièrement observer que la pratique d'une tâche nous permet de l'effectuer plus efficacement. Aujourd'hui, je suis par exemple capable de taper sur le clavier de mon ordinateur avec une expertise que je n'avais pas lorsque j'ai commencé à utiliser un ordinateur pour la première fois. Cette pratique considérable de milliers d'heures sur plusieurs années m'a fait gagner en rapidité, mais suis-je pour autant capable de taper mes phrases automatiquement ? Probablement pas. Mais des mots très simples ? Peut-être. La pratique permet-elle de s'affranchir des besoins attentionnels ? Est-il possible que la pratique permette aux stades centraux de deux tâches d'opérer simultanément, en s'affranchissant de leurs besoins en attention (i.e., un retrait de l'attention) ?

La question des effets de la pratique sur l'automatisation des traitements cognitifs a été grandement étudiée en psychologie cognitive (Kahneman & Treisman, 1984 ; Logan, 1988 ; Posner & Snyder, 1975 ; Schneider & Shiffrin, 1977 ; Shiffrin & Schneider, 1977). Diverses études ont prouvé que la pratique intensive d'une tâche (e.g., Ruthruff et al., 2006) ou des deux tâches (e.g., Hazeltine et al., 2006 ; Spelke et al., 1976 ; Van Selst et al., 1999) permet aux deux tâches d'être efficacement traitées en parallèle en réduisant l'interférence en double tâche. Des travaux ultérieurs (e.g., Maquestiaux et al., 2018) ont démontré que cet effet facilitateur peut être décuplé grâce à la compatibilité sensorimotrice, c'est-à-dire lorsque le stimulus et la réponse de chacune des deux tâches font appel à un système sensoriel distinct (e.g., une tâche 1 visuo-manuelle et une tâche 2 auditivo-vocale), une tâche reposant uniquement sur le registre visuel et l'autre n'employant que des informations auditives, et par extension lorsqu'il y a compatibilité entre la modalité sensorielle d'entrée et la modalité sensorielle de sortie pour une même tâche.

3.2.1. De la pratique en double tâche...

L'étude de référence sur l'effet de la pratique sur l'interférence en double tâche est sans doute celle de Van Selst et al. (1999). Van Selst et al. ont réalisé une longue étude pour laquelle 6 participants (dont les trois auteurs) ont réalisé 36 sessions expérimentales de PRP. La tâche 1 était auditive-vocale (tâche classique d'identification de la fréquence d'un son, grave ou aigu) et la tâche 2 était visuo-manuelle (pression de touche en fonction d'un caractère alphanumérique présenté à l'écran), ce qui écarte d'emblée l'éventualité d'une interférence périphérique. Lors de chaque session, les participants réalisaient 384 essais expérimentaux précédés par 16 essais d'échauffement. Au total, les participants ont donc réalisé 13 824 essais expérimentaux, un nombre amplement suffisant pour déclarer que les tâches ont été grandement pratiquées²¹. Malgré ce nombre conséquent d'essais, l'effet PRP n'est complètement éliminé que pour un participant. Les auteurs rapportent toutefois une diminution conséquente de l'effet PRP pour les autres participants. Les effets PRP résiduels sont significatifs, supposant que la pratique à elle seule ne suffit pas pour éliminer le goulet d'étranglement central, mais la diminution de l'ampleur de l'interférence au fil des sessions est telle que l'on ne peut ignorer son rôle modérateur : l'effet PRP moyen passe de 350 ms avant la pratique, à 40 ms à la fin de l'expérience. Ce faible effet PRP résiduel est d'autant plus intéressant si l'on considère la complexité des tâches, bien plus élevée que celle des tâches habituellement utilisées pour des expériences de double tâche²² : la tâche 1 avait quatre stimuli auditifs (80, 200, 1 250 et 3 125 Hz) et deux réponses vocales possibles, et la tâche 2 huit stimuli visuels (1, 2, 3, 4, A, B, C et D) avec quatre réponses manuelles possibles. Comment interpréter ces résultats ?

3.2.2. Hypothèses

Selon Ruthruff et al.(2003), trois hypothèses sont à considérer pour expliquer les effets de la pratique sur l'ampleur de l'interférence en double tâche : l'hypothèse de l'automatisation, l'hypothèse de l'intégration des tâches, et l'hypothèse du goulet d'étranglement intact mais raccourci.

Hypothèse de l'automatisation. Selon l'hypothèse de l'automatisation, la pratique (que cela soit en condition de simple tâche ou de double tâche) permet aux participants d'apprendre à réaliser les tâches sans recourir aux ressources attentionnelles centrales et par conséquent à traiter deux tâches simultanément sans être soumis à la limitation centrale. De fait, cette

²¹ Par exemple, dans l'expérience 1 de Schneider et Shiffrin (1977) portant sur l'automatisation des traitements grâce à l'entraînement, 2 100 essais ont suffi pour observer le déploiement d'un traitement automatique.

²² La complexité des tâches manipulées est un choix méthodologique. Les auteurs voulaient empêcher que les participants apprennent à appairer les stimuli à leurs réponses associées.

hypothèse se place dans la continuité des travaux sur l'automatisme qui malgré leurs divergences (pour une revue, voir Moors & De Houwer, 2006) s'accordent sur un point précis : « *habit diminishes the conscious attention with which our acts are performed* » (James, 1890/2013, p. 114)²³. Ce principe énoncé par James (1890) est régulièrement retrouvé dans les théories de l'automatisme, bien qu'expliqué différemment. Ainsi, Schneider et Shiffrin (1977) postuleront l'existence d'une dichotomie séparant les traitements contrôlés, coûteux en attention, des traitements automatiques pouvant être réalisés sans recourir aux ressources attentionnelles. En parallèle, Logan (2002) avance quant à lui que la présentation répétée d'une association stimulus-réponse génère un grand nombre de traces mnésiques stockées en mémoire à long terme, et qu'il arrive un moment au cours de la pratique où ces traces seront directement accessibles et il n'est plus nécessaire de dépendre des algorithmes de résolution coûteux de la mémoire de travail. Quelle que soit la théorie, l'automatisation est permise par la présentation répétée des tâches. Selon cette hypothèse, toutes les formes de pratique (tâche 1, tâche 2 ou double tâche) devraient mener à une réduction significative de l'effet PRP.

Hypothèse de l'intégration des tâches. Cette première hypothèse suppose que la pratique en condition de double tâche permettrait aux participants de combiner les deux tâches en une seule. Cette intégration des tâches signifie que notre système cognitif ne traiterait plus les tâches comme deux tâches distinctes, mais plutôt comme une seule supra-tâche. Par conséquent, une seule opération cognitive est nécessaire pour sélectionner conjointement les réponses des deux tâches, devenues une. Selon cette hypothèse, l'entraînement en double tâche devrait engendrer une réduction conséquente de l'effet PRP par rapport à de l'entraînement en simple tâche (de la tâche 1 comme de la tâche 2). En effet, l'entraînement en double tâche favorise l'intégration des tâches grâce à la présentation récurrente des deux tâches à chaque essai, comparativement à l'entraînement en simple tâche qui renforce la singularité des tâches avant leur introduction dans des essais de double tâche.

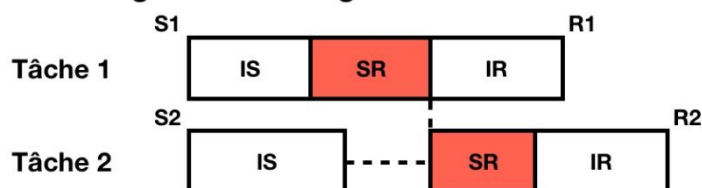
Hypothèse du goulet d'étranglement intact. Selon l'hypothèse du goulet d'étranglement intact, la pratique ne mène pas à de l'intégration des tâches ni à de l'automatisation. Bien que le goulet d'étranglement demeure intact avec la pratique, sa durée peut être réduite par la réduction progressive des stades précentral et central de la tâche 1, menant ainsi à de faibles effets PRP (voir la figure 8).

²³ Traduction de la citation de James (1890/2013) : « L'habitude amoindrit l'attention consciente avec laquelle nos actes sont réalisés. »

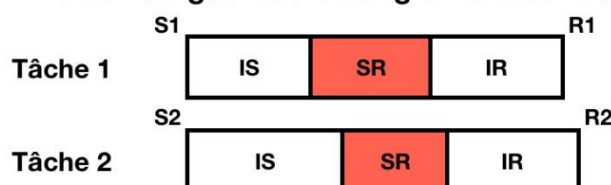
Figure 8

Représentation d'un cas de goulet d'étranglement latent par opposition à l'absence de goulet d'étranglement et à la présence d'un goulet d'étranglement, adaptée de Ruthruff, Johnston, Van Selst, Whitsell, et Remington (2003)

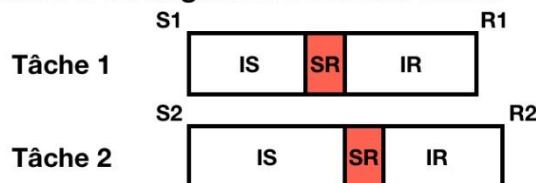
A. Modèle du goulet d'étranglement central



B. Élimination du goulet d'étranglement central



C. Goulet d'étranglement central latent



Note. Dans les deux cas (i.e., goulet d'étranglement latent et élimination du goulet d'étranglement), les temps de réaction sont très courts, mais l'on voit bien que dans le cas d'un goulet d'étranglement latent, les ressources attentionnelles centrales ne sont pas mobilisées au même moment. Sur la simple base d'un faible effet PRP, il est donc possible de ne pas voir ce goulet d'étranglement puisqu'il est à l'état latent.

Selon cette hypothèse du goulet d'étranglement intact, seuls l'entraînement à la tâche 1 et l'entraînement en double tâche peuvent réduire l'ampleur de l'interférence, par opposition à l'entraînement de la tâche 2 qui n'aura pas d'effet. Cette hypothèse correspond à l'hypothèse du goulet d'étranglement latent explicitement décrite par Ruthruff et al. (2003). Il faut prendre en compte que l'effet PRP ne suffit pas pour attester de l'automatisme d'une opération mentale. Concrètement, l'observation de faibles effets PRP ne signifie pas nécessairement que le goulet

d'étranglement central a été éliminé (Ruthruff et al., 2003). De fait, il est également possible que le temps nécessaire pour traiter chaque tâche soit tellement différent (e.g., à cause de l'utilisation d'une tâche 1 trop facile et dont le traitement central s'effectue rapidement) que les traitements centraux des deux tâches n'ont jamais lieu au même moment. L'idée centrale de cette hypothèse d'un goulet d'étranglement latent est que les stades sensoriels jouent également un rôle dans l'orchestration des tâches. Dans le cas où la complexité des tâches serait trop inégale en faveur de la tâche 1, le goulet d'étranglement central ne disparaît pas ; il est tout simplement latent car les tâches n'ont pas besoin des ressources attentionnelles centrales en même temps. Cette éventualité montre que la mesure de l'effet PRP ne suffit pas à statuer sur la nature des traitements centraux en double tâche.

3.2.3. De la nécessité de ne pratiquer qu'une seule tâche

Les données du participant de Van Selst et al. (1999) pour lequel l'effet PRP a été complètement éliminé ne permettent pas de rejeter l'hypothèse du goulet d'étranglement latent. Ce participant a-t-il vraiment éliminé le goulet d'étranglement central ? Pour répondre à cette question, Ruthruff et al. (2003) ont retesté le participant concerné sur 8 blocs de 50 essais de double tâche après avoir légèrement modifié leur procédure. Spécifiquement, ils ont introduit des SOA négatifs pour que le stimulus de la tâche 2 apparaisse avant celui de la tâche 1, car les temps de réponse à la tâche 1 étaient très courts pour ce participant. Si l'absence d'effet PRP est effectivement due à un goulet d'étranglement latent pour ce participant (i.e., un désalignement des stades centraux des deux tâches causé par la rapidité de réponse à la tâche 1), alors l'emploi de SOA négatifs permettra d'observer un effet PRP (i.e., les stades centraux des deux tâches sont à nouveau alignés et l'interférence inévitable). Les résultats obtenus amènent les auteurs à déclarer que la pratique extensive en double tâche dans une procédure PRP ne permet de déterminer si la limitation a été véritablement éliminée (i.e., traitement central parallèle) ou si elle est présente mais dans un état latent (i.e., traitement central d'une tâche terminé avant le début du traitement central de l'autre tâche ; cf. modèle C de la figure 8). Plus généralement, Ruthruff et al. (2003 ; voir aussi Lien et al., 2006) invitent à ne pas conclure que l'absence d'interférence s'explique nécessairement par un traitement central parallèle, notamment lorsque les deux tâches sont très rapides telles que les tâches grandement pratiquées ou les tâches idéomotrices, qui seront évoquées à la fin de cette partie sur les exceptions suspectées (e.g., Greenwald & Shulman, 1973 ; Lien et al., 2002).

L'absence de coûts de double tâche peut en réalité être due à un goulet d'étranglement latent, que l'utilisation d'une tâche 1 plus lente que la tâche 2 permet de mettre en évidence.

L'obtention d'un traitement central parallèle est également difficile avec la pratique d'une seule tâche, mais une telle procédure aura permis de démontrer qu'une grande rapidité ne signifie pas nécessairement que les opérations centrales des tâches ont opéré en parallèle, puisque cela cache parfois un goulet d'étranglement. Cet étude invite donc les chercheurs à bien choisir leurs tâches et analyser plus finement leurs résultats avant de rapporter la découverte d'une exception. De fait, l'effet PRP est un indicateur faillible puisqu'il correspond à l'évolution du temps de réponse à la tâche 2 en fonction du SOA. Le temps de réponse s'étend de la présentation du second stimulus à l'exécution de sa réponse, mais nous ne pouvons directement déterminer quand débute le stade central. Pour cette raison, il est nécessaire d'adapter nos procédures pour s'assurer que le traitement central de la tâche 1 est toujours en cours lorsqu'apparaît le second stimulus en manipulant des tâches 1 plus coûteuses (Lien et al., 2006 ; Maquestiaux et al., 2018).

3.3. Une limitation stratégique en réponse au protocole PRP

Une autre hypothèse de la nature du goulet d'étranglement central est qu'il serait la conséquence d'une stratégie du report du traitement central, induite par la procédure PRP. Il a été postulé que la présentation asynchrone des stimuli, la consigne d'accentuer la vitesse de réponse à la tâche 1, ainsi que les feedbacks donnés uniquement pour TR1 favoriseraient nécessairement un mode de traitement central sériel (e.g., Huestegge & Hazeltine, 2011 ; Meyer & Kieras, 1997a, 1997b, 1999). Pour les auteurs qui soutiennent ce point de vue, il est possible que la pléthore de résultats soutenant l'existence du goulet d'étranglement central reflète en réalité une stratégie adoptée en réponse au mode de présentation sériel du paradigme PRP, qualifié d'artificiel (Huestegge & Hazeltine, 2011). Ces arguments sont alimentés notamment par des études dans lesquelles l'emploi d'un SOA variable, couplé à de la pratique intensive, a conduit à l'observation de coûts de double tâche plus élevés que ceux obtenus en présentant les stimuli simultanément (Israel & Cohen, 2011 ; Schumacher et al., 2001).

Schumacher et al. (2001) ont testé 8 participants sur deux tâches. La première tâche était auditivo-vocale et consistait à identifier un son parmi trois sons possibles d'une durée de 40 ms : le son de fréquence grave (220 Hz) en répondant « un », le son de fréquence intermédiaire (880 Hz) en répondant « deux », et le son de fréquence aiguë en répondant « trois » (3520 Hz). La seconde tâche était visuo-manuelle et les participants devaient presser une touche en fonction de la localisation d'une cible visuelle : O - -, - O -, ou - - O (avec l'index, le majeur, et l'annulaire de la main droite, respectivement). Ces deux tâches sont employées dans les deux premières expériences de cette étude, et pratiquées par les participants au travers de 5 sessions

expérimentales. À l'issue des 5 sessions, chaque tâche a été pratiquée sur 2 064 essais respectivement. Les auteurs ont cependant contrasté la procédure employée entre ces deux expériences. Dans la première expérience, les stimuli ont été présentés simultanément (i.e., sans SOA), alors que dans la seconde, les auteurs ont introduit des SOA variables entre les stimuli (50, 150, 250, 500 et 1000 ms). Les deux expériences ont mené à des résultats différents malgré l'utilisation des mêmes tâches : avec le protocole PRP, les auteurs observent de l'interférence se manifestant avec des effets PRP significatifs (e.g., environ 200 ms), tandis que la présentation simultanée des stimuli donne lieu à un traitement sans interférence. Cette conclusion est essentiellement basée sur le fait que la différence entre les temps de réponse en double tâche et les temps de réponse en simple tâche est globalement inférieure à 100 ms. Pour la tâche auditivo-vocale, la différence est de 121 ms en session 2, puis diminue progressivement de session en session pour atteindre seulement 11 ms en session 5. Pour la tâche visuo-manuelle, cette différence est plus faible dès la session 2 : seulement 46 ms, puis 4 ms en session 5. Les auteurs en déduisent qu'il est possible que la limitation centrale ne puisse être structurale et qu'elle relève donc de stratégies régies par les processus exécutifs²⁴. De fait, si un goulet d'étranglement contraignait réellement le traitement de deux tâches concurrentes, de l'interférence aurait été observée même dans leur expérience 1 pour laquelle les tâches ont été présentées en même temps.

Selon l'hypothèse d'un traitement central sériel d'origine stratégique, les participants choisiraient (de manière consciente ou inconsciente) de mettre en attente le traitement central de la tâche 2 pendant le traitement central de la tâche 1. Ce choix stratégique serait induit par les caractéristiques du protocole PRP lui-même. Pour cette raison, il serait nécessaire d'utiliser une autre procédure pour étudier la limitation attentionnelle centrale, telle que le protocole de présentation simultanée (Greenwald, 2003 ; Hazeltine et al., 2001 ; Ruthruff et al. 2001) pour tester l'hypothèse d'une élimination de l'effet PRP lorsque les instructions soulignent l'importance de la simultanéité et de la rapidité de réponse, contrairement aux consignes PRP traditionnelles qui viennent soutenir la rapidité de réponse à la première tâche. De fait, des expériences ultérieures soutiennent l'idée que la présentation simultanée des stimuli, ainsi que des consignes appuyant l'importance des deux tâches de manière égale, sont des facteurs jouant

²⁴ Notons toutefois que les auteurs ont testé les mêmes participants pour ces deux expériences. En d'autres termes, les participants ont d'abord été soumis à un protocole de présentation simultanée au cours de laquelle ils ont probablement développé des stratégies d'exécution ; stratégies qu'ils ont dû abandonner lors de la deuxième expérience qui était cette fois-ci une procédure PRP. Il est tout à fait possible que l'interférence observée par les auteurs dans cette seconde expérience soit en réalité due à une certaine persévération des stratégies développées par les participants lors de la première expérience.

un rôle crucial dans la performance en double tâche (e.g., Halvorson, Ebner, & Hazeltine, 2013 ; Hazeltine, Weinstein, & Ivry, 2008 ; Magen & Cohen, 2010). Sans ces critères, un partage efficace des ressources serait impossible pour des tâches qui n'ont pas été grandement pratiquées.

Pour autant, l'usage du protocole de présentation simultanée présente un certain nombre de faiblesses. Halvorson et al. (2013) admettent par exemple que leurs résultats ne peuvent être véritablement comparés à ceux obtenus avec une procédure PRP, qui avec des SOA variables ajoute une dimension d'incertitude (i.e., les participants ne peuvent être totalement préparés pour l'essai suivant car chaque essai est différent du précédent) qu'une présentation simultanée des stimuli ne peut reproduire. De plus, des études ont prouvé que même la présentation simultanée des stimuli conduit à des résultats prédits par le modèle du goulet d'étranglement central (e.g., Ruthruff et al., 2001). Par ailleurs, présenter les stimuli simultanément à chaque essai favorise notamment l'intégration des tâches, phénomène engendrant de faibles coûts de double tâche sans pour autant signifier que les tâches ont été traitées indépendamment l'une de l'autre.

En d'autres termes, aucun des protocoles n'est parfait. Chacun présente des avantages et des inconvénients. Pour tester les hypothèses théoriques, la plupart des recherches se sont basées sur un effet d'interférence, l'effet PRP dans le cas des études PRP. Mais à lui seul, l'effet PRP peut masquer la réalité du fonctionnement attentionnel. Comme l'ont démontré Ruthruff et al. (2003), l'absence d'effet PRP ne garantit pas que les stades centraux de deux tâches opèrent véritablement en parallèle. D'autres élaborations sont nécessaires pour contrecarrer la possibilité d'une limitation centrale latente, et d'apporter des réponses vérifiées à la question de la possibilité d'un traitement central parallèle (i.e., élimination de la limitation centrale du traitement de l'information). Le protocole de présentation simultanée n'est par conséquent pas plus adapté que le protocole PRP en ce qui concerne l'étude des mécanismes attentionnels au niveau central du traitement de l'information. À défaut d'apporter des conclusions claires, ces études de l'effet d'un SOA variable sur l'orchestration des opérations centrales viennent prouver qu'il est nécessaire d'améliorer les procédures actuelles. L'identification des exceptions au goulet d'étranglement central dépend en grande partie de la procédure de double tâche utilisée ; il est important que cet outil soit d'une fiabilité optimale.

3.4. Les systèmes de réponse intrinsèquement automatiques

La seconde exception concerne des réponses comportementales très habituelles. Les études de l'interférence en double tâche emploient régulièrement des systèmes de réponse pour

lesquels la réponse est activement contrôlée, comme les réponses manuelles (i.e., on ne presse pas des touches sans but) ou vocales (la prise de parole implique un choix préalable de mots à prononcer). Il existe cependant d'autres systèmes moteurs plus rarement manipulés, comme les mouvements oculaires, que nous utilisons de manière continue sans vraiment y penser. Ces derniers sont-ils automatiques, c'est-à-dire capables d'outrepasser la limitation centrale ?

Pashler et al. (1993) ont étudié les mouvements oculaires et obtenu de faibles coûts de double tâche avec des tâches de saccades. Spécifiquement, les auteurs ont demandé aux participants, au travers d'une série d'expériences PRP, de presser une touche du clavier en fonction de la fréquence d'un son (grave ou aigu, avec deux réponses manuelles possibles - tâche 1), tout en effectuant des saccades visuelles (tâche 2). Au travers des quatre expériences menées, la tâche 1 et les SOA (variant de -150 ms à 750 ms) restaient les mêmes et seule la difficulté de la saccade à réaliser a été manipulée. La saccade de la première expérience consistait à déplacer son regard vers un stimulus apparaissant à gauche ou à droite de l'écran. Dans la deuxième expérience, il s'agissait de regarder un rectangle d'une couleur spécifique : deux rectangles de couleur apparaissaient sur la gauche et sur la droite de l'écran, et les participants avaient pour consigne de regarder celui dont la couleur leur a été donnée par l'expérimentateur (vert pour la moitié des participants, rouge pour l'autre moitié). Pashler et al. (1993) constatent que ces deux types de saccades peuvent être réalisées sans interférence notable, en parallèle avec la première tâche. En effet, bien que le temps de réponse à la tâche visuelle augmente sensiblement à mesure que le SOA diminue (e.g., de 194 à 245 ms quand le SOA passe de 750 à 50 ms pour l'expérience 1, correspondant à un effet PRP de 51 ms malgré de longs TR1), l'ampleur de cette augmentation est trop faible pour permettre d'attester d'un traitement central sériel. La conclusion des auteurs est également étayée par de faibles corrélations de TR1 et TR2, signifiant que le traitement central de la tâche 2 n'a pas attendu la fin du traitement central de la tâche 1 pour débiter. Un troisième argument est offert par l'ordre de réponse des participants, qui répondaient fréquemment à la tâche 2 avant de répondre à la tâche 1 sans que cela n'affecte TR1.

Dans l'expérience 3, il a été demandé aux participants de diriger leur regard vers la gauche ou vers la droite de l'écran en fonction de la couleur d'un rectangle apparaissant au centre de l'écran (vers la droite s'il est vert, vers la gauche s'il est rouge pour la moitié des participants, et inversement pour l'autre moitié). Enfin, la tâche de saccade de la quatrième expérience nécessitait de regarder le plus grand de deux chiffres. Deux chiffres étaient présentés à gauche et à droite du point de fixation central, et les sujets devaient déplacer leur regard sur celui dont la valeur était la plus élevée. Les résultats des expériences 3 et 4 témoignent en

revanche d'un traitement central sériel. Par exemple, le temps de réaction à la tâche visuelle pour l'expérience 3 passe de 567 ms au SOA de -150 à 290 ms au SOA de 750 ms, engendrant un effet PRP significatif de 277 ms. Les auteurs notent que « *in Experiments 3 and 4 (namely the tasks of moving from the central colour patch, and moving to the highest digit), some operation(s) involved in generating the eye movements must wait for some aspect of the auditory-vocal tasks* ».

Sur la base de ces expériences aux résultats contrastés, il est impossible de conclure que l'entièreté des mouvements oculaires sont complètement automatiques, dans le sens où ils permettraient de contourner le goulet d'étranglement central qui limite habituellement la performance en double tâche et donc de traiter une autre tâche en parallèle. Cependant, les observations des deux premières expériences supposent que certaines saccades (i.e., saccades vers une cible et saccades vers une couleur cible) semblent suffisamment automatiques pour permettre au goulet d'étranglement d'être éliminé. Cependant, même cette conclusion nuancée est contestable. Par exemple, Lien et al. (2006) admettent qu'une autre possibilité est que le fait de regarder un élément précis de notre environnement est une action grandement pratiquée, et que les résultats obtenus seraient essentiellement imputables à la pratique plutôt qu'à la spécificité des mouvements oculaires. D'autres auteurs comme Huestegge et Koch (2009) critiquent quant à eux l'emploi de tâches de saccades dont la rapidité viendrait selon eux fausser l'interprétation des résultats, car la sérialité attendue des réponses pour un protocole PRP est remise en question. Un autre problème soulevé par ces auteurs concerne les modalités d'entrée et de sortie des tâches. Dans cette série d'expériences, la tâche visuelle fait appel à des saccades, et la tâche auditive à des réponses manuelles. Huestegge et Koch soulignent que l'emploi de modalités distinctes prévient toute possibilité de *crosstalk* et faciliterait ainsi le traitement des tâches (e.g., Navon & Miller, 1987 ; Wickens, 1984). Ce point de vue peut toutefois être débattu. Les tâches n'ont certes pas recours au même système de réponse (i.e., une tâche est manuelle tandis que l'autre est oculaire), mais les codes sont de nature spatiale pour les deux tâches (mouvement des doigts pour la tâche manuelle, mouvement des yeux vers un point dans l'espace pour la tâche visuelle). La notion de *crosstalk* impliquant autant les modalités perceptivo-motrices des tâches que la nature des codes à traiter, il est difficile d'infirmer ou de confirmer cet argument. Notons cependant que l'usage d'une tâche auditivo-manuelle et d'une tâche visuo-visuelle n'est pas la configuration idéale pour observer un traitement central parallèle (cf. Maquestiaux et al., 2018). Pashler et al. (1993) ont pourtant des arguments en faveur d'un traitement parallèle de leurs tâches, étayés par plusieurs éléments méthodologiques nouveaux pour tester la nature du traitement central : l'effet PRP, les corrélations des temps de

réaction, les inversions de réponse. Si la généralisation de leurs résultats à des tâches utilisant des réponses peu habituelles peut poser question, cette étude fournit l'une des premières démonstrations de la possibilité d'un traitement central véritablement parallèle.

3.5. La compatibilité idéomotrice

3.5.1. Compatibilités stimulus-réponse

Le terme *compatibilité stimulus-réponse*, créé par Small en 1951²⁵ (voir Small, 1990), désigne des combinaisons de tâches impliquant des associations naturelles ou acquises (Greenwald & Shulman, 1973). Une association naturelle renvoie à une combinaison de tâches rendues compatibles par leur appartenance à un même registre sensoriel. Par exemple, les représentations des stimuli et réponses d'une tâche visuo-manuelle sont exclusivement visuelles et par conséquent localisées dans un même sous-système de la mémoire de travail – le calepin visuo-spatial. Une tâche visuo-manuelle présente donc une compatibilité stimulus-réponse relativement élevée, par rapport à une tâche visuo-vocale pour laquelle les représentations des stimuli et des réponses seraient localisées dans des sous-systèmes distincts de la mémoire de travail – le calepin visuo-spatial pour les stimuli et la boucle phonologique pour les réponses. Cette compatibilité stimulus-réponse spécifique est communément appelée compatibilité sensorimotrice (Stephan & Koch, 2011), désignant plus précisément le degré auquel le stimulus et la réponse d'une tâche donnée font appel à des canaux sensoriels « compatibles ». Une association acquise est quant à elle dépendante de l'apprentissage d'un concept, tel que le concept de latéralité pour un stimulus directionnel faisant appel à une réponse directionnelle (e.g., pour qu'une personne bouge un joystick à droite ou à gauche à l'écoute des mots DROITE et GAUCHE, il faut d'abord qu'elle sache où se situent sa droite et sa gauche), ou la compatibilité sémantique (en faisant appel à des associations développées par la mémoire sémantique tout au long de notre vie). Le succès actuel de la notion de compatibilité stimulus-réponse est dû aux travaux exploratoires de Fitts (Fitts & Deininger, 1954 ; Fitts & Seeger, 1953). Par exemple, Fitts et Seeger (1953) démontrent l'effet de la compatibilité du stimulus et de la réponse sur le traitement de l'information en manipulant le degré de compatibilité entre différents stimuli visuels et différentes réponses manuelles de nature spatiale. En s'appuyant sur les temps de réaction, les taux d'erreurs et la quantité d'informations perdues par stimulus,

²⁵ L'usage du terme a été suggéré dans un article présenté dans le cadre d'une rencontre de l'*Ergonomics Research Society* en 1951, mais ce dernier n'a pas été publié.

les auteurs concluent que plus la compatibilité du stimulus et de la réponse est élevée, plus la performance (i.e., rapide, correcte et avec une moindre perte informationnelle).

Appliquée à la réalisation de doubles tâches, une forte compatibilité S-R présente toujours un effet facilitateur, dans le sens d'une réduction de l'interférence entre les tâches (e.g., Hommel, 1998 ; Huestegge & Koch, 2009 ; Lien & Proctor, 2002 ; Logan & Schulkind, 2000 ; Schuch & Koch, 2004). Certaines compatibilités stimulus-réponse, comme la compatibilité sensorimotrice (Stephan & Koch, 2011), n'ont d'ailleurs d'effet qu'en condition de double tâche (des études rapportent un effet de cette dernière en simple tâche sans pour autant le considérer majeur, e.g., Hazeltine et al., 2006). Cette observation peut être mise en lien avec l'hypothèse du *crosstalk* qui accorde un rôle primordial aux modalités des tâches. En effet, considérer que l'emploi de deux tâches dépendant d'un même sous-système en mémoire de travail générera de l'interférence revient à reconnaître l'importance de la compatibilité sensorimotrice. Pour prévenir une éventuelle confusion entre les représentations des tâches, il est nécessaire qu'elles dépendent de registres distincts. Cependant, en condition de simple tâche, l'incompatibilité d'une tâche sur le plan sensorimoteur importe peu puisqu'il n'y a qu'une seule tâche à traiter. Les représentations activées sont donc celles de la tâche en cours, sans confusion possible avec celles d'une autre tâche.

Si la compatibilité sensorimotrice améliore sensiblement la performance en double tâche (surtout lorsqu'elle est couplée à d'autres facteurs tels que la pratique, e.g., Maquestiaux et al., 2018), il est toutefois important de noter qu'elle ne suffit pas pour éliminer le goulet d'étranglement central. Des auteurs se sont alors intéressés au rôle modérateur d'une compatibilité stimulus-réponse plus forte encore : la compatibilité idéomotrice (e.g., Greenwald, 1970 ; Greenwald & Shulman, 1973).

3.5.2. La compatibilité idéomotrice

Le concept de compatibilité idéomotrice est relativement ancien mais est peu employé en psychologie jusqu'à ce que Greenwald (1970) s'en empare²⁶. Greenwald évoque la

²⁶ La notion de compatibilité idéomotrice est fréquemment attribuée à James (1890) dans la littérature (e.g., Greenwald, 1970). De fait, James présente dans ses écrits l'action idéomotrice, principe selon lequel les mouvements du corps suivraient les conséquences des représentations du mouvement dans notre esprit. Cependant, ce concept trouve en réalité son origine dans une présentation donnée par William Benjamin Carpenter, membre d'un petit groupe de recherche composé de physiologistes et de docteurs, en 1852 à la Royal Institution of Great Britain. Lors de cette présentation, Carpenter offre le réflexe idéomoteur comme explication aux phénomènes parapsychologiques qui étaient alors à la mode : au lieu de considérer de potentielles origines surnaturelles aux observations rapportées (e.g., tables tournantes, pendules magiques, etc.), il propose que ces dernières sont causées par des idées qui s'imposent au corps. Le réflexe idéomoteur désigne alors un déclenchement de l'action par l'idée et la raison pour laquelle les individus seraient occasionnellement soumis à des phénomènes physiques indépendants de leur volonté, tels que la paralysie ou la radiesthésie. L'existence d'un réflexe idéomoteur avait été

compatibilité idéomotrice pour la première fois en 1970, dans un article traitant de l'effet de divers mécanismes de feedback sensoriels sur le contrôle de l'action, et se questionne alors sur la manière de tester ce concept. La compatibilité idéomotrice est alors présentée comme « *the dimension denoting the extent to which the stimulus corresponds to sensory feedback from its required response* » (Greenwald, 1972, p. 52)²⁷, autrement dit le degré auquel ce que nous percevons de la réponse est conceptuellement similaire à ce que nous avons perçu du stimulus (e.g., les tâches de *shadowing*, pour lesquelles il s'agit de répéter vocalement des messages sonores). La théorie idéomotrice considère que les mouvements sont représentés sous la forme de leur feedback sensoriel (e.g., Badets et al., 2016 ; Greenwald, 1970 ; Greenwald & Shulman, 1973 ; Hommel et al., 2001 ; Kunde et al., 2007 ; Prinz, 2002 ; Shin et al., 2010). En d'autres termes, la représentation d'une action motrice est composée à la fois de la commande motrice nécessaire à son exécution, mais également des conséquences sensorielles directes que cette réponse a dans l'environnement. Par exemple, la prononciation d'un mot est représentée par les programmes moteurs nécessaires à la prononciation même, mais aussi par le feedback auditif perçu lors de la prononciation. Par extension, une tâche est dite compatible sur le plan idéomoteur lorsque le stimulus ressemble fortement au feedback sensoriel de la réponse attendue (e.g., la répétition d'un mot tout juste entendu, c'est-à-dire une tâche de *shadowing*). Greenwald suppose alors que la réponse sera directement activée par le stimulus, sans devoir recourir à des opérations centrales coûteuses. Plus qu'un recouvrement perceptif, la compatibilité idéomotrice implique également un recouvrement conceptuel : plus les représentations du stimulus et de la réponse associée se ressemblent, moins nous avons besoin d'attention (Greenwald, 1970). Cette hypothèse est étayée par de faibles coûts de double tâche, au même titre que les tâches qui ont été grandement pratiquées. Pour cette raison, Greenwald

proposée plus tôt encore dans les travaux de Thomas Laycock (1845), membre de la même équipe de recherche que Carpenter. Carpenter nie cependant lui avoir « emprunté » l'idée. Il est également important de noter que l'action idéomotrice, telle que présentée par James (1890), combine à la fois les considérations de Laycock et Carpenter et des travaux allemands plus anciens qui se sont intéressés à l'idéomotricité pour tenter d'expliquer les interactions des entités de la dichotomie cartésienne, soit le corps et l'esprit (pour une revue, voir Stock & Stock, 2004). Comme le note Prinz (1987), l'idéomotricité aurait sans doute eu plus du succès en tant que concept scientifique si elle n'avait pas été invoquée dans un contexte aussi équivoque que la parapsychologie. En tentant d'apporter une raison psychologique aux phénomènes occultes de son époque, Carpenter (1852) condamna l'action idéomotrice alors même qu'il la baptisa. Stigmatisée au même titre que les phénomènes parapsychologiques qu'elle était censée justifier, l'idéomotricité n'a pas été prise au sérieux et l'émergence du behaviorisme au début de XX^{ème} siècle l'a encore plus éloignée des considérations scientifiques. En effet, comme le note Greenwald (1970), les idées ne constituaient pas des objets d'étude fiables pour les behavioristes qui s'intéressaient aux phénomènes directement observables et essentiellement à l'interaction stimulus-réponse (Thorndike, 1913 ; Watson, 1930), et il était difficile de concilier la compatibilité idéomotrice avec le principe du conditionnement behavioriste (Hull, 1931 ; Thorndike, 1913).

²⁷ Traduction de la citation de Greenwald (1972) : « La dimension dénotant le degré auquel le stimulus correspond au feedback sensoriel de sa réponse. »

et Shulman (1973) ont postulé que les tâches idéomotrices sont automatiques et qu'elles permettent par conséquent un partage parfait des ressources attentionnelles, conduisant à l'élimination de l'effet PRP. Dans deux expériences PRP, les auteurs ont utilisé une tâche auditivo-vocale qui était soit idéomotrice (une tâche de *shadowing* avec une présentation auditive de la lettre A ou B) soit non-idéomotrice (répondre « UN » à la lettre A et « DEUX » à la lettre B). La deuxième tâche était visuo-manuelle, et elle était elle aussi soit idéomotrice (un mouvement de joystick dans la direction de la flèche affichée à l'écran – droite ou gauche), soit non-idéomotrice (un mouvement de joystick en réponse au mot « DROITE » ou « GAUCHE » affiché à l'écran). Les auteurs ont calculé la moyenne des temps de réponse aux deux tâches et conclu que la présence d'une tâche idéomotrice suffit à faire apparaître un effet PRP. Cependant, l'effet PRP était complètement éliminé lorsque les deux tâches étaient idéomotrices. En d'autres termes, pour Greenwald et Shulman la présence d'une tâche idéomotrice sur les deux suffit à réduire l'effet PRP mais les deux tâches doivent être idéomotrices pour qu'il y ait traitement central parallèle.

3.5.3. Le grand débat de la compatibilité idéomotrice

Alors que le consensus de la littérature sur l'interférence en double tâche est l'existence de capacités centrales limitées (e.g., présence d'une limitation central structurale), parler de « partage parfait des ressources attentionnelles » (Greenwald & Shulman, 1973) ne peut qu'attirer l'attention. Les conclusions de Greenwald et Shulman ont notamment été éprouvées par deux groupes d'auteurs. Le premier a déclaré reconnaître l'effet facilitateur de la compatibilité idéomotrice, mais que cela ne permettait aucunement de s'affranchir de la limitation centrale (Lien et al., 2002, 2003, 2005 ; Shin et al., 2007 ; Shin & Proctor, 2008). Autrement dit, la compatibilité idéomotrice aurait un avantage certain au niveau des temps de réponse, mais ne permettrait pas pour autant de traiter les tâches en parallèle. Ce positionnement suppose que la limitation centrale demeure présente et que les faibles coûts de double tâche sont essentiellement imputables à un raccourcissement des stades de traitement. Cela rappelle quelque peu les effets de la pratique abordés plus tôt dans ce chapitre : la rapidité accrue des tâches grandement pratiquées n'implique en aucun cas l'affranchissement des limitations attentionnelles centrales. La seconde équipe donne raison à Greenwald et Shulman concernant l'effet modérateur des tâches idéomotrices sur l'ampleur de l'interférence en double tâche, mais diverge quant aux sources de cet effet (Halvorson et al., 2013. Pour Halvorson et al. (2013, 2015, 2019), les tâches idéomotrices permettent effectivement d'éliminer les coûts de la double tâche, mais cet effet serait dû à une caractéristique de la compatibilité idéomotrice accordant

une place essentielle au contenu représentationnel des tâches, plutôt qu'à la compatibilité idéomotrice en tant que telle. Les arguments de chaque point de vue sont détaillés et étudiés dans les paragraphes suivants.

Tâches idéomotrices : pas automatiques. Lien et al. (2002) pointent plusieurs incohérences dans l'interprétation des résultats de Greenwald et Shulman (1973) en termes d'automatisme du traitement central. Dans la littérature, l'étude de Greenwald et Shulman est effectivement souvent citée comme exemple de rare exception à la limitation centrale (e.g., De Jong, 1997 ; Meyer & Kieras, 1997a ; Pashler, 2000), alors que leurs résultats supposent en réalité un partage des ressources moins parfait qu'originellement rapporté. La première raison est que l'absence d'effet PRP largement diffusée dans la littérature ne concerne que leur expérience 2 ; l'expérience 1 ayant en réalité conduit à l'observation d'un effet PRP conséquent alors même que les deux tâches étaient idéomotrices. Par ailleurs, d'autres études employant également deux tâches idéomotrices ne sont pas parvenues à éliminer l'effet PRP (e.g., Brebner, 1977). Sur la base de ces observations, Lien et al. (2002) ont tenté de répliquer les résultats de Greenwald et Shulman dans quatre expériences PRP. Chacune de ces expériences a conduit à l'observation d'effets PRP conséquents (pour la condition avec deux tâches idéomotrices, les auteurs observent un effet PRP de 164 ms sur la tâche 2, et de 70 ms sur la moyenne des TR), remettant en question l'automatisme proclamée des tâches idéomotrices. S'en est alors suivi un échange entre Lien et ses collaborateurs (Lien, Proctor, & Ruthruff, 2003 ; Lien, McCann, Ruthruff, & Proctor, 2005 ; Shin, Cho, Lien, & Proctor, 2007 ; Shin & Proctor, 2008) et Greenwald (2003, 2004, 2005) qui, au fil des études, tente de déterminer les conditions requises pour éliminer l'interférence avec des tâches idéomotrices. Cette série d'études traite majoritairement de différences méthodologiques, telles que la présentation des flèches sur l'écran (i.e., les flèches sont-elles présentées au milieu de l'écran ou sur les côtés ?), la réponse requise pour ces flèches (un mouvement de joystick ou la pression d'une touche ?), ou encore les consignes données au mot près (e.g., la nécessité d'accentuer la vitesse de réponse à la tâche 1 a-t-elle bien été précisée comme le veut le protocole PRP ?). Il n'est donc plus question de démontrer l'automatisme inhérente que Greenwald et Shulman (1973) ont attribuée aux tâches idéomotrices, mais d'examiner les conditions de l'émergence de leur automatisme car d'autres auteurs ne parviennent pas à répliquer ce « *perfectly efficient time sharing* » (Greenwald, 1972).

Greenwald (2005) finira par introduire son article par les termes suivants : « *This debate has already consumed substantial space in this journal, prompting brevity of this comment and the present author's resolve to avoid further debate in the absence of findings that allow a*

decisive advance of theory » (p. 221)²⁸. Dans ces propos, Greenwald exprime notamment la reconnaissance d'une impasse théorique qui ne saurait être dépassée sans apports externes... auxquels il s'oppose en défendant ses positions traditionnellement basées sur la simple observation de faibles effets PRP.

Tâches idéomotrices : automatiques mais pas exceptionnelles. Pour un autre groupe d'auteurs (Halvorson et al., 2013 ; Halvorson & Hazeltine, 2015 ; 2019), la conclusion de Greenwald et Shulman (1973) est également problématique mais pour d'autres raisons. Halvorson et al. (2013) ont conduit quatre expériences de double tâche dans lesquelles le nombre de tâches idéomotrices a été manipulé (les deux tâches étaient idéomotrices dans l'expérience 1, une seule tâche était idéomotrice dans les expériences 2 et 3 et aucune tâche n'était idéomotrice dans l'expérience 4). Les auteurs ont également fait varier la procédure de double tâche. Une procédure PRP a été utilisée dans l'expérience 1, avec des SOA de 0, 200 et 800 ms, tandis que les stimuli ont été présentés simultanément (e.g., avec un SOA fixe de 0 ms) dans les trois autres expériences. Les résultats de l'expérience 1, très similaires à ceux de Greenwald et Shulman (1973), viennent étayer le rôle facilitateur des tâches idéomotrices. En effet, les coûts de double tâche sont faibles lorsque deux tâches idéomotrices sont réalisées dans le cadre du protocole PRP. Dans l'expérience 1 pour laquelle les deux tâches étaient idéomotrices, les auteurs observent un coût de 59 ms pour la tâche 1 et 170 ms pour la tâche 2 idéomotrice, et les temps de réaction des deux tâches une fois additionnés n'offrent pas de différence significative entre le SOA le plus court et le SOA le plus long – comme pour Greenwald & Shulman. Les auteurs observent en revanche de robustes coûts de double tâche dans leurs autres expériences, pour lesquelles une ou les deux tâches n'étaient pas idéomotrices. Pour cette raison, ils considèrent que déclarer que les tâches idéomotrices sont capables d'éliminer le goulet d'étranglement central n'expliquent par leurs résultats. De fait, si les tâches idéomotrices étaient véritablement automatiques, la présence d'une seule tâche idéomotrices devrait à éliminer toute interférence puisqu'il n'y aurait plus de compétition pour l'attention entre les tâches. Si la réponse d'une tâche idéomotrices est directement activée par la simple présentation de son stimulus, les mécanismes centraux sont par conséquent disponibles pour la réalisation d'une autre tâche, même si cette dernière n'est pas idéomotrice. Ainsi, pour Halvorson et al. (2013), les faibles coûts de double tâche rapportés dans le cadre de la manipulation de deux tâches idéomotrices ne tiennent pas de la compatibilité idéomotrice, mais

²⁸ Traduction de la citation de Greenwald (2005) : « Ce débat a déjà occupé un espace conséquent dans ce journal, motivant la concision de ce commentaire et l'intention du présent auteur d'éviter tout débat futur en l'absence de résultats permettant une avancée théorique décisive. »

d'une caractéristique commune à une plus grande catégorie de tâches. Cette caractéristique est précisée par l'étude de Halvorson et Hazeltine (2015).

Halvorson et Hazeltine (2015) considèrent que la caractéristique de l'idéomotricité permettant l'automatisme est la séparabilité des représentations des tâches en mémoire de travail. Pour ces auteurs, la raison pour laquelle les tâches idéomotrices permettent d'éliminer les coûts de double tâche est que ces dernières ne dépendent pas du même système en mémoire de travail. Une tâche idéomotrice auditivo-vocale est généralement couplée à une tâche idéomotrice visuo-manuelle, et cette séparation nette des tâches en mémoire de travail serait la source des faibles effets PRP rapportés par Greenwald et Shulman (1973). En d'autres termes, la raison des faibles interférences entre tâches idéomotrices serait l'absence de *crosstalk*. Pour étayer leur hypothèse, les auteurs ont utilisé un design factoriel. Précisément, ils ont apparié une tâche auditivo-vocale et une tâche visuo-manuelle qui pouvaient respectivement être idéomotrice (I) ou non-idéomotrice (O, pour *Opposite*). La tâche auditivo-vocale idéomotrice était une tâche de shadowing qui consistait à répéter les mots CHAT et CHIEN. La version non-idéomotrice de cette tâche auditivo-vocale consistait à répondre CHAT à l'écoute du mot CHIEN, et CHIEN à l'écoute du mot CHAT²⁹. Pour la tâche visuo-manuelle idéomotrice, les participants devaient presser la touche du clavier située sous le doigt représenté à l'écran (l'index était posé sur la touche 1, et le majeur de la même main sur la touche 2). Pour la version non-idéomotrice de cette tâche visuo-manuelle, il a été demandé aux participants de presser la touche localisée sous l'autre doigt que celui indiqué sur l'écran (i.e., presser la touche 2 lorsque le stimulus visuel représentait l'index, et la touche 1 lorsque le stimulus visuel représentait le majeur). Halvorson et Hazeltine rapportent de faibles coûts de double tâche pour les quatre groupes (inférieurs à 40 ms, et même négatifs lorsque la tâche auditivo-vocale est idéomotrice), malgré la manipulation de tâches non-idéomotrices dans trois de ces groupes. Les coûts de double tâche étaient en effet inférieurs à 50 ms pour chacun des quatre groupes. Les auteurs expliquent qu'ils ne comptent pas argumenter que les coûts de double tâche ont été complètement éliminés et que leur intention première est de prouver que la performance en double tâche ne semble pas directement affectée par la compatibilité idéomotrice. Ainsi, Halvorson et Hazeltine démontrent que la compatibilité idéomotrice n'est pas si spéciale. Ce qui importe est le fait que les tâches soient représentées de manière bien distincte en mémoire de travail.

²⁹ Notons que faire l'inverse d'une action donnée peut constituer une règle tout aussi facile que de faire la même chose. D'autre part, les auteurs n'évoquent pas le lien sémantique qui unit les stimuli et réponses CHAT et CHIEN qui peut potentiellement être à l'origine de leurs résultats (cf. Étude 2 pour un test direct de cette hypothèse).

Résumé du Chapitre 3

Est-il possible d'éliminer les limitations centrales (e.g., le goulet d'étranglement central) responsables de l'interférence en double tâche ? Trois ensembles de travaux ont questionné l'hypothèse d'un traitement central sans attention sous des angles différents. Premièrement, des auteurs sont partis de la définition classique de l'automatisation selon laquelle la pratique réduit progressivement les besoins attentionnels des opérations cognitives (James, 1890 ; Schneider & Shiffrin, 1977). Par exemple, Van Selst et al. (1999) ont utilisé la pratique en double tâche comme levier pour atteindre des traitements automatisés. D'autres auteurs se sont plutôt intéressés à des tâches dont l'automaticité serait une caractéristique inhérente en raison de la forte compatibilité S-R, autrement dit des tâches relativement aisées pour lesquelles la sélection de la réponse serait automatique. L'on compte parmi ces dernières les tâches idéomotrices (e.g., Greenwald, 1972), et des systèmes de réponse hautement pratiqués tels que les mouvements oculaires (Pashler et al., 1993). Enfin, un troisième groupe d'auteurs remet en cause la procédure PRP en démontrant qu'une procédure avec un SOA fixe de 0 ms engendre une réduction des coûts de double tâche par rapport à la procédure PRP (e.g., Schumacher et al., 2001).

Tous ces travaux se heurtent toutefois à un problème commun : l'éventualité d'un goulet d'étranglement latent, c'est-à-dire la possibilité que l'absence d'interférence soit le résultat d'une absence de recouvrement temporel entre les stades centraux des deux tâches (Ruthruff et al., 2003). Dans cet ensemble de travaux, l'identification d'une exception dépend essentiellement de l'ampleur de l'effet PRP. Un effet PRP important indique la présence du goulet d'étranglement central, tandis qu'un effet PRP faible voire nul témoigne de l'élimination du goulet d'étranglement central. Les exceptions rapportées sont donc des tâches rapides pour lesquelles l'effet PRP était relativement faible. Cependant, l'élimination du goulet d'étranglement et la présence d'un goulet d'étranglement latent (cf. figure 8) conduisent à la même prédiction : pas ou peu d'interférence (e.g., faible effet PRP). Il devient donc difficile, voire impossible, de comparer les modèles et donc d'identifier la nature du traitement central (parallèle vs. central). Comme l'indiquent Ruthruff et al. (2003), il est nécessaire de sortir de cette impasse théorique, pour redynamiser la recherche. Les tâches manipulées dans les études de ce chapitre permettent-elles vraiment d'éliminer le goulet d'étranglement central, ou est-il simplement rendu latent par la rapidité du traitement de la première tâche ? Cette question est d'une importance capitale et nous allons voir comment une simple modification des tâches (i.e., l'usage d'une tâche 1 « lente » pour laquelle le traitement central est « long ») peut permettre

de neutraliser le « problème » de la limitation latente, afin de mieux comprendre l'allocation de l'attention au niveau central du traitement de l'information. Cette technique que nous présenterons dans notre approche expérimentale générale, initialement adoptée par Maquestiaux et al. (2008), est utilisée dans les travaux sur l'élimination du goulet d'étranglement central via l'élimination du traitement central d'une tâche pratiquée au préalable (Maquestiaux et al., 2010, 2013, 2018 ; voir également Maquestiaux, 2012).

II. Problématique

En 1938, le philosophe Gaston Bachelard écrit : « avant tout, il faut savoir poser des problèmes. Et quoi qu'on en dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes » (p. 16). La formulation de questions revêt une grande importance en science, car ces questions permettent la réactualisation de nos connaissances, le développement de nouvelles interrogations et les avancées théoriques. La littérature sur l'interférence en double tâche est en ce sens très riche ; de nombreux problèmes ont été posés et nombre d'entre eux ont été résolus en près d'un siècle de recherches. Cependant, un certain nombre de problèmes restent à ce jour sans réponse. Par exemple, les recherches des années 1990/2000 sur la nature de la limitation centrale n'ont pas permis de véritablement statuer quant à la signification de coûts d'interférence en double tâche très faibles, voire inexistants. Attestent-ils d'un traitement central parallèle (i.e., les opérations centrales de deux tâches opèrent simultanément) ou d'une absence de chevauchement temporel entre les stades centraux de deux tâches concurrentes (i.e., limitation centrale inactive car latente) ? Ce genre d'impasse théorique peut inciter à trouver de nouvelles méthodes pour questionner la nature du traitement central, tout en testant de nouvelles hypothèses aux prédictions bien distinctes. C'est la direction de la présente thèse.

Le problème originel des études de la performance en double tâche concerne la source de l'interférence observée en condition de double tâche. La littérature s'accorde sur le fait que l'interférence en double tâche est relativement omniprésente dans de très nombreuses études. Ainsi, bien que les explications théoriques accordées à ce phénomène diffèrent, les auteurs tendent à considérer l'interférence en double tâche et les limitations centrales comme une règle de base de la cognition humaine. Parmi les théories majeures de l'interférence en double tâche, la théorie du goulet d'étranglement central (Pashler, 1994) est certainement la plus connue. L'interprétation classique de la théorie du goulet d'étranglement central est que la limitation centrale serait structurale, et que ce caractère structural de cette limitation implique que cette dernière fait partie intégrante de notre système cognitif et qu'elle est par conséquent inévitable. Le traitement central de deux tâches concurrentes sera donc invariablement sériel.

Le problème actuel provient des exceptions à la règle générale de capacités centrales. Comment donc justifier l'existence de conditions favorables à la double tâche, alors que la théorie supporte l'existence d'une limitation centrale de la performance en double tâche ? Peut-on ignorer ces exceptions ? Ou est-il possible d'entrevoir, en s'y attardant, de nouvelles explications au fonctionnement de l'attention et de son allocation ? Depuis la fin du 20^e siècle, plusieurs études rapportent des résultats en faveur d'une élimination du goulet d'étranglement, c'est-à-dire d'un traitement central parallèle, ou encore d'une réduction considérable de l'interférence en double tâche difficilement compatibles avec la présence d'une limitation

centrale (e.g., Greenwald, 2003 ; Greenwald & Shulman, 1973 ; Halvorson & Hazeltine, 2015, 2019 ; Pashler et al., 1993). Dans ces études sont manipulées des tâches idéomotrices (e.g., Greenwald & Shulman, 1973 ; Halvorson et al., 2015), des tâches grandement pratiquées (e.g., Maquestiaux et al., 2008 Ruthruff et al., 2003 ; Van Selst et al., 1999) et des systèmes de réponse spéciaux tels que les mouvements oculaires (Pashler et al. 1993).

Ainsi, il existe un clivage théorique important entre la conception générale dominante (i.e., des capacités centrales limitées) et les quelques exceptions disponibles dans la littérature. Selon nous, ce clivage mérite d'être étudié et appelle une résolution. D'un côté, la littérature propose que les problèmes d'interférence proviennent du niveau central de traitement de l'attention. De l'autre côté, des études attestent de performances en double tâche avec très peu d'interférence. L'objectif de cette thèse est de démêler les raisons sous-jacentes à cet écart significatif entre la théorie d'une limitation centrale omniprésente et les arguments empiriques récents en faveur d'un traitement central parallèle. Afin de mieux appréhender cette disparité et d'en proposer une résolution, ce problème de divergence sera traité au travers de trois questionnements fondamentaux :

1. *L'écart entre la théorie et les faits est-il imputable aux faiblesses des procédures de double tâche ?*
2. *Les exceptions à la limitation centrale tiennent-elles à la spécificité des tâches ?*
3. *L'automatisme des tâches faciles est-elle généralisable à des tâches plus difficiles ?*

1. *L'écart entre la théorie et les faits est-il imputable aux faiblesses des procédures de double tâche ?*

Ce premier questionnement consiste à donner une chance à la possibilité du traitement central parallèle, en supposant que les procédures de double tâche utilisées jusqu'à présent n'ont peut-être pas permis de tester l'hypothèse d'un traitement central parallèle. Cette supposition n'a pas été éprouvée de manière systématique, probablement en raison du consensus selon lequel les comportements de double tâche sont nécessairement contraints par des capacités attentionnelles limitées au niveau des traitements centraux. Il est possible qu'il y ait un certain parti pris « inconscient » des auteurs qui n'envisagent absolument pas que ce qui se passe au niveau central pourrait être plutôt une conséquence dont la cause se situe ailleurs. De fait, le statut d'exception n'a pas encore été officiellement posé sur les quelques conditions rapportées (e.g., compatibilité idéomotrice) puisque les résultats font

encore l'objet de discussions. Ces discussions soulèvent des points de divergence concernant la procédure et les indicateurs employés pour déclarer qu'une tâche a bien permis l'élimination du goulet d'étranglement central. Pour répondre à cette première question, nous testerons dans l'étude 1 l'automatisme des tâches idéomotrices avec une procédure nouvelle visant à remédier aux lacunes que nous avons identifiées dans les méthodes utilisées dans la littérature. Cette première étude de la thèse a fait l'objet de la publication suivante :

Maquestiaux, F., Lyphout-Spitz, M., Ruthruff, E., & Arexis, M. (2020). Ideomotor compatibility enables automatic response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27, 742-750.

2. *Les exceptions à la limitation centrale tiennent-elles à la spécificité des tâches ?*

Si les tâches idéomotrices sont automatiques, le sont-elles parce qu'elles sont idéomotrices (et donc extrêmement simples) ou pour une autre raison plus générale, potentiellement transférable vers un plus grand nombre de tâches ? Concrètement, il s'agit de savoir si les exceptions rapportées dans la littérature sont véritablement des exceptions, ou si elles présentent des caractéristiques qui pourraient s'appliquer à d'autres tâches et situations. Dans l'étude 2, nous manipulons des tâches dont les stimuli et les réponses sont sémantiquement compatibles, c'est-à-dire des tâches faciles mais non-idéomotrices. Les participants ont par exemple dû répondre vocalement PONG à l'écoute du mot PING et PING au mot PONG, ou encore BAS au mot HAUT et HAUT au mot BAS. Les associations stimulus-réponse sont phonologiquement différentes mais sémantiquement compatibles ; elles supposent donc une étape supplémentaire par rapport à la réalisation d'une tâche idéomotrice (e.g., simple répétition du mot entendu). Cette deuxième étude a donné lieu à la publication suivante :

Lyphout-Spitz, M., Maquestiaux, F., & Ruthruff, E. (2022). Bypassing the central bottleneck with easy tasks: Beyond ideomotor compatibility. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29, 501-511.

3. *L'automatisme des tâches faciles est-elle généralisable à des tâches plus difficiles ?*

En testant l'automatisme des tâches idéomotrices, nous avons proposé que le doute qui subsistait dans la littérature (i.e., l'incapacité de discerner le traitement central parallèle du traitement central sériel mais latent) ne pouvait être levé au moyen des procédures de double tâche classiques ; celles-ci ne permettaient pas de neutraliser la possibilité d'un traitement central sériel mais latent. En testant l'automatisme de tâches non-idéomotrices mais très faciles en raison de la forte compatibilité sémantique entre le stimulus et la réponse (e.g., dire PING lorsque l'on entend PONG), nous avons cherché à questionner si l'automatisme en double tâche est spécifique à certaines tâches (i.e., les tâches idéomotrices) ou si elle ne serait pas plutôt le reflet d'un phénomène plus général dont les processus restent à élucider. Grâce aux études 1 et 2, nous avons entrevu que la plus ou moins grande automatisme en double tâche pourrait dépendre de la plus ou moins grande facilité à charger les associations stimulus-réponse des tâches en mémoire de travail, en amont de la présentation des stimuli. L'étude 3 se propose de tester cette hypothèse novatrice de l'interférence en double tâche. Cette hypothèse suppose que l'interférence habituellement rencontrée en condition de double tâche relève en réalité d'un manque de préparation, c'est-à-dire d'une insuffisance du chargement en mémoire de travail des représentations des tâches, et non de capacités centrales limitées. Selon nous, cette insuffisance proviendrait des conditions expérimentales. Par exemple, le protocole PRP classique pourrait encourager les participants à négliger le traitement central d'une tâche au détriment de l'autre. Le protocole de présentation simultanée des stimuli, malgré des caractéristiques surmontant les « faiblesses » du protocole PRP (les stimuli sont présentés en même temps et les consignes donnent une importance égale aux deux tâches), pourrait laisser la possibilité aux participants d'encourager le traitement d'une tâche et de négliger le traitement de l'autre tâche ; par défaut, les personnes ont peut-être tendance à négliger l'une des tâches. La préparation, que nous proposons de définir comme le préchargement des représentations des tâches en mémoire de travail (i.e., lorsque nous sommes plus ou moins préparés, les représentations des tâches sont plus ou moins activées), permettrait de réconcilier la théorie et les faits. Les exceptions rapportées jusqu'alors concernent des tâches dont les représentations semblent facilement activables en mémoire de travail : les tâches idéomotrices et sémantiques reposeraient sur des associations existantes en mémoire à long terme, et dont les activations en amont seraient relativement faciles car peu coûteuses en ressources attentionnelles. Il

s'agira dans cette troisième étude de manipuler la procédure pour aider les participants à mieux précharger les représentations de la tâche bien souvent négligée en condition de double tâche, à savoir la tâche 2. Plus précisément, nous emploierons des tâches archétypales du domaine de la double tâche ; des tâches menant classiquement à l'observation d'un goulet d'étranglement central. Ces tâches sont arbitraires et non pratiquées. Avec de telles tâches, tous les modèles majeurs de l'interférence en double tâche prédisent de l'interférence en double tâche. Par exemple, même si selon le modèle stratégique (Meyer & Kieras, 1997a, 1997b), les capacités sont surmontables (i.e., le traitement central peut être parallèle), sans pratique et avec des associations S-R arbitraires, le traitement central est nécessairement sériel et contraint la performance en double tâche. À notre connaissance, seule l'hypothèse du manque de préparation permet de prédire la possibilité d'un traitement central parallèle sans aucune pratique, avec des tâches utilisant des combinaisons S-R arbitraires, sous réserve d'un boost préparatoire de la tâche 2. En somme, l'étude 3 vise à évaluer le rôle de la préparation, c'est-à-dire des représentations des tâches, au niveau du traitement central en situation de double tâche. Si nous parvenons à éliminer le goulet d'étranglement central sans aucune pratique, cela signifie que cette limitation n'est pas de nature structurale. Une telle démonstration reviendrait à donner raison aux faits qui par le biais d'exceptions attestent de la possibilité du traitement central parallèle. Surtout, une telle démonstration suggérerait que la limitation centrale est imputable à un manque de préparation. L'article issu de cette troisième étude est sous presse :

Lyphout-Spitz, M., Maquestiaux, F., Ruthruff, E., & Chaloyard, S. (2024).
Uncorking the central bottleneck : Even novel tasks can be performed automatically. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 50, 74-98.

Dans l'ensemble, les études de cette thèse cherchent à proposer un nouvel éclairage sur le fonctionnement de l'allocation de l'attention entre traitements concurrents. Ce nouvel éclairage provient de notre lecture critique de la littérature et de l'examen minutieux de nos propres données.

Dans notre thèse, nous avons cherché à comprendre les écarts observés entre les théories postulant en l'existence de capacités centrales limitées (e.g., présence d'un goulet

d'étranglement central) et les études rapportant des exceptions (e.g., de faibles coûts d'interférence lorsque les tâches sont faciles). Nous verrons que d'expérience en expérience, nous avons progressivement mis à jour une hypothèse nouvelle selon laquelle un manque de préparation est la source de l'interférence en double tâche. Plus généralement, cette thèse consiste à re-questionner la « simultanéité des actes psychiques » (Paulhan, 1887). Ce questionnement a pu voir le jour grâce au développement de nouveaux outils méthodologiques que nous présenterons en détail dans la partie suivante, consacrée à la présentation de notre approche expérimentale générale. Ce questionnement soulève des perspectives quant à la possibilité d'apporter de nouvelles explications sur le fonctionnement de l'attention en double tâche, et nous laisse ainsi entrevoir une nouvelle proposition théorique de l'allocation de l'attention en psychologie.

III. Approche expérimentale générale

Cette section intermédiaire propose une description l'approche expérimentale utilisée dans les différentes études (1, 2, et 3) de la thèse. Nous avons développé cette approche afin de répondre aux problèmes théoriques exposés dans le Chapitre 3, et sur la base des procédures de double tâche présentées dans le Chapitre 2. Cette approche a aussi permis de concevoir et utiliser différents indicateurs comportementaux que nous décrirons ici et appliquerons dans les différentes études, afin de tester la nature du traitement central (sériel vs. parallèle). Enfin, au cours de cette thèse, nous avons simulé les comportements de double tâche prédits par les différents modèles théoriques, y compris le modèle dominant de Pashler (1994), afin de les comparer aux comportements observés lors de nos expérimentations. Nous décrirons également dans cette section comment ces simulations cognitives ont été mises en œuvre puis comparées aux comportements observés.

Procédure

Protocole de la période réfractaire psychologique (PRP). Le protocole PRP a été employé tel que présenté dans le Chapitre 2. Dans ce protocole, l'apparition d'un premier stimulus (S1) est suivie de l'apparition d'un second stimulus (S2). L'intervalle de temps séparant les deux stimuli, appelé SOA (*stimulus onset asynchrony*), varie aléatoirement d'un essai à l'autre. Par souci de simplification et pour permettre les comparaisons entre nos études, nous avons toujours utilisé les quatre mêmes SOA : 15, 65, 250, et 1500 ms. Les SOA courts (i.e., 15, 65 et 250 ms) assurent un chevauchement temporel plus ou moins important entre le traitement de la tâche 1 et le traitement de la tâche 2, le SOA le plus court (i.e., 15 ms) induisant un chevauchement maximal. Le SOA le plus long (i.e., 1500 ms) est relativement rare et nouveau pour les chercheurs, qui utilisent rarement des SOA supérieurs à 1 000 ms (e.g., 400 ms, pour Pashler & Johnston, 1989 ; 1 000 ms pour Karlin & Kestenbaum, 1968 ; 1 200 ms pour Hawkins et al., 1979). Nous l'utilisons comme condition contrôle afin de mesurer les TR des deux tâches en l'absence de tout chevauchement temporel, puisque la réponse à la tâche 1 (R1) est généralement émise avant l'apparition de S2 pour un SOA aussi long.

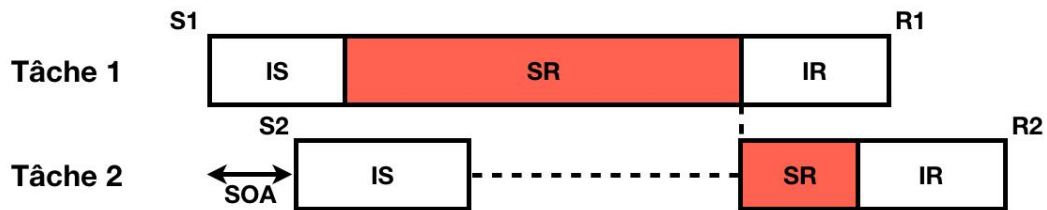
Procédure long/court. Afin de statuer sur la nature du traitement central (i.e., sériel vs parallèle), il est important d'écarter la possibilité d'une limitation centrale latente (i.e., lorsque les stades centraux des deux tâches ne sont pas demandés au même moment ; i.e., Ruthruff et al., 2003, cf. figure 8). Pour cela, nous avons opté pour l'appariement d'une tâche 1 lente et d'une tâche 2 plus rapide (voir figure 9). Nous faisons l'hypothèse d'un stage central « long » lorsque la tâche est lente mais « court » lorsque la tâche est rapide. L'appariement entre une

tâche 1 lente et une tâche 2 rapide, combiné à l'usage de SOA variables (e.g., Maquestiaux et al., 2018), augmente les chances que les stades centraux des deux tâches soient demandés simultanément, écartant ainsi la possibilité d'une limitation centrale latente. En effet, les exceptions présentées dans le Chapitre 3 témoignent de la difficulté de déterminer si le goulet d'étranglement central a bien été éliminé (e.g., Lien et al., 2002 ; Van Selst et al., 1999). Lorsque le traitement central de la tâche 1 est très rapide (e.g., lorsque le temps de réaction est très court, comme cela est le cas avec des tâches très faciles ou grandement entraînées), il devient difficile de savoir si le traitement central de la tâche 2 qui la suit de près aux SOA courts est réalisé sans interférence pendant le traitement central de la tâche 1, ou s'il a simplement évité toute interférence puisque le traitement central de tâche 1 est arrivé à terme, avant le début du traitement central de la tâche 2.

Figure 9

Procédure long/court vs. procédure court/court en cas de traitement central sériel ou parallèle

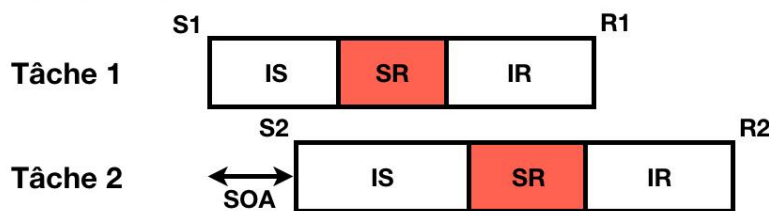
A. Procédure long/court en cas de traitement central sériel



B. Procédure long/court en cas de traitement central parallèle



C. Procédure court/court



Note. Lorsque les deux tâches sont rapides (panel C), il y a de grandes chances que les stades centraux des tâches ne soient pas requis simultanément, rendant ainsi presque impossible l'observation du goulet d'étranglement central et par extension il est très difficile d'avoir la certitude que le goulet d'étranglement central a bien été éliminé. Utiliser une tâche 1 lente avec une tâche 2 plus rapide (panel A) permet de s'assurer que le traitement central de la tâche 2 sera obligatoirement requis en même temps que le traitement central de la tâche 1 aux SOA les plus courts. De cette façon, il est possible d'affirmer que le goulet d'étranglement central a bien été éliminé sur la base de courts TR2 et d'inversions fréquentes de l'ordre de réponse.

Essais de simple tâche entremêlée. Nous avons mélangé les essais PRP de double tâche à des essais de simple tâche. Plus précisément, nous avons inséré de manière aléatoire des essais de simple tâche aux essais classiques de double tâche PRP. Dans les études 1 et 2, nous avons inséré des essais de simple tâche 1 et de simple tâche 2. Mais dans l'étude 3, nous avons uniquement inséré des essais de simple tâche 2 afin de tester l'hypothèse du manque de

préparation. Ces essais de simple tâche « entremêlés » (*mixed single-task trials* en Anglais) présentent un certain nombre d'avantages.

Dans les études 1 et 2, les essais entremêlés nous ont servi de mesure contrôle des TR des tâches 1 et 2. Nous avons ainsi calculé un autre coût de l'interférence en double tâche, en faisant la différence entre les TR au SOA le plus court et les TR mesurés en condition de simple tâche entremêlée. Les blocs d'essais de simple tâche et d'essais de double tâche avec un long SOA engendrent une meilleure préparation des tâches que des essais de simple tâche entremêlée³⁰. Au cours d'un bloc de simple tâche classique, le participant sait à l'avance quelle tâche il doit réaliser donc il peut traiter le stimulus présenté sans avoir à se préparer à l'éventualité qu'un autre stimulus apparaisse, ce qui améliore sa performance par rapport à un bloc de double tâche. Le même avantage se retrouve avec les SOA très longs. Pour un essai de double tâche avec un long SOA (e.g., 1 500 ms), le délai séparant R1 de S2 est certainement long, ce qui laisse du temps pour précharger les associations stimulus-réponse de la tâche 2, avant même que S2 n'apparaisse, ce qui n'est pas possible aux SOA courts puisque S2 survient très souvent avant l'émission de R1. Par opposition, un certain degré d'incertitude est introduit dans les essais de simple tâche entremêlée (i.e., des essais de simple tâche pour lesquels il peut s'agir soit de la tâche 1, soit de la tâche 2), mais le participant est informé du fait que chaque tâche apparaît seule et doit ainsi se préparer à toutes les possibilités. Calculer le coût de l'interférence en double tâche à partir d'une condition de référence pour laquelle la tâche a pu être surpréparée (i.e., la condition SOA très long) induirait une surestimation : le coût de double tâche serait plus élevé qu'il ne l'est en réalité puisque le TR de référence est anormalement court, laissant croire à une interférence centrale alors qu'il s'agit en réalité de différences d'ordre préparatoire. Comme le notent Tombu et Jolicoeur (2004), les essais entremêlés induisent un degré d'incertitude que nous avons décidé d'utiliser à notre avantage. Dans notre procédure PRP optimisée, les essais de double tâche PRP sont entremêlés d'essais de simple tâche (sur la tâche 1 et la tâche 2 dans les études 1 et 2, sur la tâche 2 uniquement dans l'étude 3). Le participant ne peut prédire l'apparition randomisée de ces essais, et le temps mis pour

³⁰ Halvorson et al. (2013) argumentent d'ailleurs leur choix méthodologique par une remarque de Tombu et Jolicoeur (2004) sur le fait que mélanger des essais de simple tâche et des essais de double tâche cause une incertitude chez les participants qui ne les prépare pas assez à l'essai à venir. Cependant, l'utilisation d'essais de simple tâche entremêlée égalise l'état préparatoire entre essais de simple tâche et essais de double tâche, ce qui permet des calculs de coûts sans contamination de différences d'état préparatoire. Notons aussi que la comparaison entre essais de double tâche et essais de simple tâche entremêlée minore le calcul des coûts de double tâche, puisque les TR mesurés en condition de simple tâche entremêlée sont vraisemblablement plus longs que les TR mesurés en condition de pure simple tâche.

répondre à ces derniers sert par conséquent de niveau de base fiable, non contaminé par des différences préparatoires.

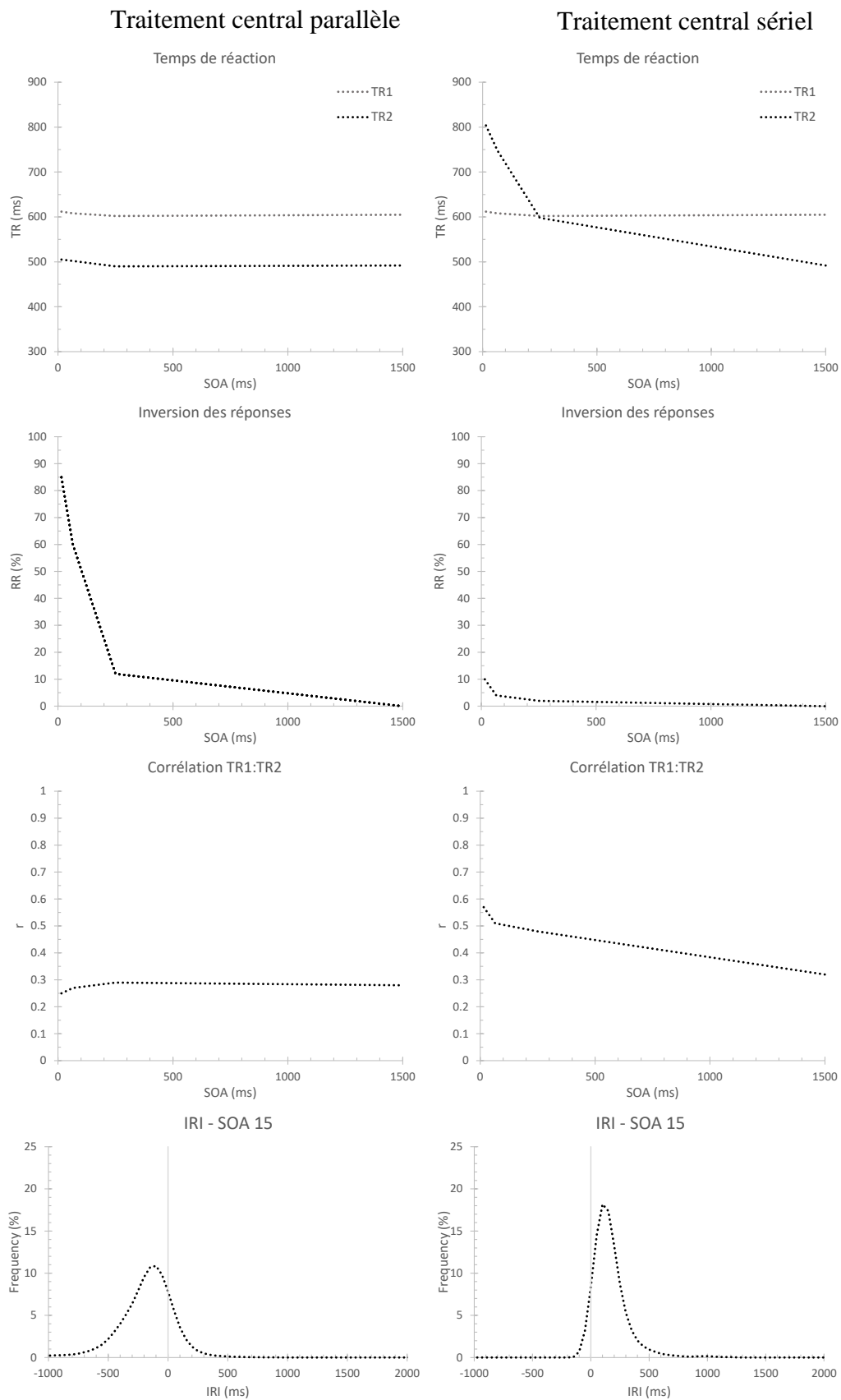
Dans l'étude 3, seuls des essais entremêlés de la tâche 2 ont été présentés. Le but de ces essais était alors de favoriser la préparation de la seconde tâche, afin de tester l'hypothèse théorique de la négligence préparatoire. Puisque le stimulus de la tâche 2 pouvait apparaître soit seul soit précédé du stimulus de la tâche 1, les participants avaient besoin de se préparer systématiquement à la tâche 2.

Indicateurs comportementaux et prédictions

Effet PRP. Comme toutes les autres études utilisant le protocole PRP, nous avons calculé l'effet PRP. Cet indicateur classique correspond à la différence entre le temps de réponse à la tâche 2 (TR2) au SOA le plus court et TR2 au SOA le plus long. L'élimination du goulet d'étranglement central (i.e., le traitement central parallèle des tâches) prédit un effet PRP faible, tandis que la présence du goulet (i.e., le traitement central sériel des tâches) prédit un effet PRP élevé (généralement supérieur à 300 ms dans la littérature, e.g., 364 ms pour l'expérience 1 de Tomasik et al., 2009). Comme on peut le voir figure 10, le traitement de la tâche 2 est ralenti lorsqu'une limitation centrale est présente ; ce ralentissement est symbolisé par une ligne pointillée horizontale. Mais le traitement de la tâche 2 n'est pas ralenti lorsque la limitation centrale est éliminée ou dans un état latent. L'effet PRP ne suffit donc pas à attester de la présence ou de l'élimination du goulet d'étranglement central, puisqu'un goulet d'étranglement latent peut également justifier un faible effet PRP. Pour cette raison, et également pour comprendre plus précisément l'orchestration des opérations centrales des deux tâches, nous avons utilisé un panel d'indicateurs complémentaires en plus de l'effet PRP. L'utilisation de ces indicateurs est permise par le choix de la procédure long/court qui, comme expliqué plus haut, permet d'avoir des prédictions distinctes selon que le traitement central est parallèle ou sériel.

Figure 10

Indicateurs comportementaux utilisés et prédictions selon que le traitement central est parallèle (panel de gauche) ou sériel (panel de droite).



Coûts de double tâche. Les coûts de double tâche ont été calculés pour chaque tâche comme la différence entre le temps de réaction au SOA le plus court et le temps de réponse en condition de simple tâche entremêlée (i.e., lorsque les tâches étaient présentées isolément parmi des essais de double tâche). Cette mesure est certainement plus précise que la mesure classique de l'effet PRP, puisqu'elle est nettement moins contaminée par des différences relatives à la préparation. Comme pour l'effet PRP, un traitement central parallèle s'accompagne de faibles coûts de double tâche, tandis qu'un traitement central sériel se manifeste par des coûts élevés.

Corrélations de TR1 et TR2. Nous avons également calculé les corrélations entre TR1 et TR2. En cas de traitement central parallèle, le traitement central de la tâche 2 n'attend pas que celui de la tâche 1 s'achève pour débiter. La corrélation TR1:TR2 devrait donc être relativement faible à tous les SOA. A contrario, le traitement central sériel des tâches prédit de fortes corrélations aux SOA courts, puisque le commencement du traitement central de la tâche 2 sera dépendant de l'achèvement du stade central de la tâche 1.³¹

Inversion des réponses. Une inversion de réponses correspond à un essai pour lequel la réponse à la deuxième tâche présentée est émise avant la réponse à la première tâche présentée (i.e., R2 puis R1). Dans le cadre du protocole PRP, les stimuli des tâches sont toujours présentés sériellement (S1 puis S2). Ainsi, si l'attention allouée au traitement central de la tâche 1 ne peut être simultanément sollicitée pour le traitement central de la tâche 2, alors le traitement central de la tâche 1 suivi du traitement central de la tâche 2 résulte en l'émission de la réponse à la tâche 1 suivie de l'émission de la réponse à la tâche 2 (R1 puis R2). Un traitement central sériel des tâches ne prédit donc pas (ou peu) d'inversion de l'ordre de réponse, quel que soit le SOA. En revanche, si les opérations centrales des tâches peuvent être réalisées en parallèle, le pourcentage d'inversion des réponses est plus élevé.

L'utilisation de la procédure long/court confère une grande utilité à cet indicateur. De fait, la rapidité de la tâche 2 (et donc une durée courte de traitement) suppose qu'en cas de traitement parallèle, le traitement de la tâche 2 aux SOA les plus courts prendra le pas sur le traitement de la tâche 1 qui elle est moins rapide (durée longue de traitement). En d'autres termes, on s'attend à ce que la réponse à la tâche 2 soit fréquemment exécutée avant celle de la

³¹ Nous verrons cependant dans l'étude 2 que cet indicateur peut s'avérer faillible, puisque des tâches aux temps de réponse très similaires peuvent donner lieu à de fortes corrélations même lorsqu'elles ont été réalisées indépendamment l'une de l'autre, sans interférence, en raison d'une stratégie de « groupement » des réponses R1 et R2.

tâche 1 aux SOA courts (R2 puis R1). En revanche, si le traitement central demeure sériel, alors l'ordre des réponses suivra l'ordre de la présentation des stimuli : réponse à la tâche 1 suivie de la réponse à la tâche 2 (R1 puis R2) la plupart du temps.

Intervalles inter-réponses (IRI, pour *Inter-Response Intervals* en Anglais). L'IRI correspond au délai séparant les réponses R1 et R2. Nous le calculons avec la formule $SOA + TR2 - TR1$. Alors que le taux d'inversion des réponses fournit une information binaire (inversion vs. absence d'inversion), les IRI offrent une plus grande richesse d'information : l'ordre et le délai séparant les réponses. Les IRI permettent une quantification de l'inversion. En cas de traitement parallèle, on s'attendra à un pic de fréquence avant -100 ms, signifiant que la réponse à la tâche 2 aura fréquemment été émise avant la réponse à la tâche 1. En cas de traitement central sériel, nous prédirens plutôt un pic de fréquence après 100 ms, car la réponse à la tâche 2 aura été régulièrement émise après la réponse à la tâche 1. Nous proposons que des IRI situés entre -100 ms et 100 ms signifient que les réponses aux deux tâches ont été groupées, c'est-à-dire émises ensemble (Ulrich & Miller, 2008). Le groupement régulier des réponses est un phénomène pour le moins complexe, car il peut résulter d'un traitement central sériel (le participant attend d'avoir initié R2 pour exécuter R1 en même temps) comme d'un traitement central parallèle (le participant a déjà préparé R2 mais attend R1, plus lente à préparer, pour l'exécuter). En outre, il est possible que le groupement des réponses soit purement fortuit, c'est-à-dire causé par des tâches traitées en parallèle, dont les temps de réaction sont similaires.

Dans nos trois études, nous détaillerons comment nous avons simulé de nouveaux IRI à partir des essais de simple tâche entremêlée (études 1 et 2) et des essais de double tâche au SOA le plus long (étude 3). La simulation d'IRI nous a permis de confronter les performances prédites par la présence ou l'absence du goulet d'étranglement central aux performances observées chez nos participants.

IV. Travaux expérimentaux

Étude 1 – Test de l’automatisme d’une tâche à caractère idéomoteur

Objectifs et prédictions

Le traitement central d’une tâche idéomotrice peut-il opérer sans recruter l’attention centrale, c’est-à-dire de manière automatique ? En d’autres termes, une tâche idéomotrice présentée comme tâche 2 dans une procédure PRP peut-elle permettre d’éliminer le goulet d’étranglement central (i.e., traitement central parallèle) et donc conduire à de l’automatisme en double tâche ? Les nombreux échanges entre Greenwald (2003, 2004, 2005) et Lien et al. (2002, 2004, 2005) à ce sujet ont abouti à une impasse théorique. En effet, selon Greenwald, les arguments empiriques disponibles sont compatibles avec l’hypothèse d’un traitement central sans attention d’une tâche idéomotrice, à l’opposé de Lien et al. qui les considèrent incompatibles. Malgré l’absence de consensus, les échanges entre les deux groupes contiennent des indices, idées mais aussi des écueils méthodologiques dont nous nous sommes inspirés pour concevoir cette première étude.

Premièrement, nous pensons que l’effet PRP ne permet pas à lui seul de saisir la nature du traitement central (i.e., parallèle vs. sériel) en situation de double tâche. Il est possible de manquer l’alignement temporel entre les traitements centraux des deux tâches, notamment lorsque les tâches sont rapides. Ce qui est le cas des tâches idéomotrices pour lesquelles les TR peuvent être très courts. La rapidité d’une tâche idéomotrice tient à la facilité de l’association stimulus-réponse en raison d’un fort recouvrement conceptuel. Par exemple, lorsque la tâche consiste à dire à voix haute un mot tout juste entendu (e.g., dire CHAT lorsque l’on entend CHAT, et CHIEN lorsque l’on entend CHIEN), le stimulus et la réponse associée à ce dernier sont identiques sur le plan conceptuel, ce qui rend cette tâche idéomotrice extrêmement facile et par conséquent rapide. La rapidité d’une tâche idéomotrice tient aussi à la forte compatibilité entre la modalité sensorielle du stimulus et la modalité sensorielle des conséquences de la réponse : la même modalité auditive dans le cas de la tâche idéomotrice de *shadowing*. Lorsque les deux tâches sont très rapides, il est alors possible que le goulet d’étranglement central n’émerge pas car inactif en raison d’un manque de chevauchement temporel entre les traitements centraux (Ruthruff et al., 2003). Le goulet d’étranglement étant rendu latent par cette absence de chevauchement, les auteurs ne peuvent statuer sur la nature du traitement central (i.e., sériel vs. parallèle), puisque les deux modes de traitement produisent le même

résultat : très peu d'interférence en double tâche, soit un effet PRP très faible. Pourtant, des auteurs interprètent un faible effet PRP comme un argument en faveur de l'élimination de la limitation centrale (e.g., Greenwald & Shulman, 1973) et d'autres comme un argument en faveur de la présence d'une limitation résiduelle entre les sélections des réponses aux deux tâches (e.g., Lien et al., 2002). Selon Ruthruff et al. (2003) et Lien et al. (2008), avant de conclure à l'élimination du goulet d'étranglement central (i.e., traitement central parallèle), il est nécessaire de neutraliser l'hypothèse d'un goulet d'étranglement central latent.

Un deuxième indice et conséquence directe de la fragilité de l'effet PRP est l'automatisme conférée aux tâches idéomotrices. Si comme l'avait déclaré Greenwald (1972) les tâches idéomotrices sont véritablement automatiques, il n'est pas nécessaire que les deux tâches soient idéomotrices pour que le goulet d'étranglement central soit éliminé : « ... *highly efficient time sharing could be obtained even if one of the two simultaneous tasks is not highly ideomotor compatible* » (p. 57). Cette déclaration est en accord avec la conception classique de l'automatisme, selon laquelle les traitements automatiques opèrent sans attention (e.g., Schneider & Shiffrin, 1977). En conséquence, si le traitement central d'une tâche idéomotrice peut opérer sans attention (i.e., automatiquement), le traitement central d'une tâche non-idéomotrice et le traitement central d'une tâche idéomotrice peuvent opérer en parallèle.

Dans l'étude 1 de la thèse, nous avons tenté d'apporter une réponse vérifiée au débat sur la question de l'automatisme des tâches idéomotrices. Bien que cette question ait fait l'objet de très nombreuses recherches (e.g. Greenwald, 1973 ; Greenwald & Shulman, 1973 ; Halvorson & Hazeltine, 2015 ; 2019 ; Lien et al., 2002, 2005), celles-ci n'ont pas permis de statuer sur l'automatisme des tâches idéomotrices. Pour sortir de l'impasse théorique, nous avons apporté plusieurs modifications au protocole PRP et développé de nouveaux indicateurs comportementaux afin de sonder la nature du traitement central. Nous avons également développé une technique de simulation cognitive afin de comparer les comportements réels à des comportements simulés. Notre étude constitue donc un énième test de l'automatisme des tâches idéomotrices, se démarquant cependant des précédents par des modifications majeures du protocole PRP classique.

Si l'on considère la conception classique de l'automatisme, selon laquelle les traitements automatiques ne requièrent pas d'attention (Schneider & Shiffrin, 1977), alors il n'est pas nécessaire d'utiliser deux tâches idéomotrices pour tester l'hypothèse d'un traitement central parallèle. Nous avons ainsi apparié une tâche 1 non-idéomotrice avec une tâche 2 idéomotrice au moyen du protocole PRP. Dit autrement, nous avons apparié une tâche 1 dont le traitement central est relativement lent à une tâche 2 dont le traitement central est rapide. L'utilisation de

cette procédure long/court (e.g., Maquestiaux et al., 2018) a deux conséquences. Premièrement, cette procédure permet de neutraliser l'éventualité d'un goulet d'étranglement central latent. La littérature rapporte que la rapidité des tâches idéomotrices peut parfois masquer la présence d'un goulet d'étranglement latent (Lien et al., 2002 ; Ruthruff et al., 2003). En contrebalançant notre usage d'une tâche 2 rapide (i.e., idéomotrice dans notre cas) par une tâche 1 lente (non-idéomotrice), nous nous assurons que le traitement central de la tâche 1 sera toujours en cours lorsqu'apparaîtra le stimulus de la tâche 2 après le SOA, neutralisant l'émergence d'un goulet d'étranglement latent. Deuxièmement, cette manipulation permet d'examiner précisément l'automatisme du traitement central de la tâche 2. La présentation de la tâche idéomotrice comme tâche 2 revêt une importance cruciale : la tâche 1 mobilise les ressources attentionnelles, ce qui permet alors de tester le traitement central de la tâche 2 alors que l'attention n'est pas disponible (car mobilisée par la tâche 1).

Nous avons testé 48 étudiants de psychologie de l'Université de Franche-Comté, répartis en groupes égaux dans deux conditions. Dans un premier groupe idéomoteur, 24 participants ont réalisé une tâche 2 idéomotrice visuo-manuelle couplée à une tâche 1 non-idéomotrice auditivo-vocale. La tâche idéomotrice dont nous avons testé l'automatisme consistait à presser la touche E lorsque la flèche présentée à l'écran pointait vers la gauche, et la touche P lorsque la flèche pointait vers la droite. Les 24 autres participants ont été placés dans la condition contrôle, soit le groupe non-idéomoteur, pour lequel la même tâche 1 non-idéomotrice auditivo-vocale a été couplée à une tâche 2 non-idéomotrice visuo-manuelle. La tâche 2 non-idéomotrice consistait à presser la touche E si un triangle apparaissait à l'écran, et la touche P si c'était un cercle.

Enfin, en plus du classique effet PRP, nous avons utilisé un panel de marqueurs comportementaux dont l'utilisation a été rendue possible par la procédure long/court. Nous avons donc ajouté à nos analyses les indicateurs présentés dans notre section Approche Expérimentale Générale (pp. 76-86), à savoir des coûts de double tâche, le calcul du taux d'inversion des réponses, et des corrélations des temps de réponse aux deux tâches. Nous avons également introduit des simulations d'intervalles inter-réponses, réalisées à partir de nos essais de simple tâche mêlés aux essais expérimentaux de double tâche, afin de comparer les performances observées aux prédictions du modèle du goulet d'étranglement central. Ces indicateurs et la simulation cognitive offrent des outils complémentaires afin de tester les prédictions opposées et dérivées de modèles concurrents.

Ideomotor Compatibility Enables Automatic Response Selection

MANUSCRIPT PUBLISHED IN PSYCHONOMIC BULLETIN & REVIEW
Psychonomic Bulletin & Review (2020), 27, 742-750
<https://doi.org/10.3758/s13423-020-01735-6>

François Maquestiaux^{1,2} *Morgan Lyphout-Spitz*¹, *Eric Ruthruff*³, & *Mahé Arexis*¹

¹*Université de Franche-Comté*

²*Institut Universitaire de France*

³*University of New-Mexico*

A task is ideomotor (IM)-compatible when there is high conceptual similarity between the stimulus and the associated response (e.g., pressing a left key when an arrow points to the left). For such an easy task, can response selection operate automatically, bypassing the attentional bottleneck that normally constrains dual-task performance? To address this question, we manipulated the IM compatibility of a Task 2 that was performed concurrently with a non-IM-compatible Task 1, using the psychological refractory period procedure. Single-task trials, randomly intermixed with dual-task trials, served as a baseline against which to assess dual-task costs. The results indicated bottleneck bypassing (i.e., simultaneous response selection on both tasks) when Task 2 was IM-compatible, as evidenced by negligible dual-task costs on Task 2 (as well as on Task 1), very high percentages of response reversals, and weak correlations between Task-1 and Task-2 reaction times. These findings were supported by a fine-grained simulation analysis of inter-response intervals. We conclude that the perception of an IM-compatible stimulus directly activates the response code, which can then be selecting automatically, without recruiting central attention, consistent with A. G. Greenwald's (Journal of Experimental Psychology, 94, 52-57, 1972) original theory of IM compatibility.

Keywords

Automatic processing, central bottleneck, dual-task interference, ideomotor compatibility, response selection

Dual-task costs are often attributed to a central bottleneck that prevents central stages of tasks (e.g., response selection) from operating at the same time (Pashler, 1994). One possible exception, however, has been proposed for pairs of ideomotor (IM)-compatible tasks, defined by Greenwald and Shulman (1973; hereafter G&S) as tasks for

which “the stimulus resembles sensory feedback from the response” (p. 70). Because of the very high conceptual overlap between the stimulus and the response, IM-compatible tasks represent a special case of stimulus-response compatibility. G&S reported dual-task costs that were small, if not entirely absent, when their participants performed a

shadowing task (i.e., repeating aloud a spoken word) while indicating the direction of a left/right-pointing arrow by a movement in the corresponding direction. Subsequent studies confirmed that dual-task costs can be very small, even without training, when both tasks are IM-compatible (Greenwald, 2003, 2004; Halvorson, Ebner, & Hazeltine, 2013; Halvorson & Hazeltine, 2015).

The assumption in previous studies that both tasks must be IM-compatible to enable bypassing – in the sense of performing in parallel the central stages (e.g., response selection) of the two tasks¹ – is, however, at odds with the typical definition of automaticity (Shiffrin & Schneider, 1977). An automatic task should not require limited resources and therefore should be able to proceed without them. So even when a non-IM-compatible task engages limited central resources, this should not interfere with the performance of an IM-compatible task. The present study addressed this issue.

Background

According to Pashler's (1994) central bottleneck model, attention is allocated to the central operations (e.g., response selection) of only one task at a time: while Task-1 central processing is underway, Task-2 central processing is delayed (see Fig.1A). This central limitation has been tested in numerous studies using the psychological refractory period (PRP) procedure, which involves varying the stimulus-onset asynchrony (SOA) between two stimuli (S1 and S2), each requiring a speeded response (R1 and R2). PRP studies show longer Task-2 reaction time (RT2) at short SOAs relative to long SOAs, a robust phenomenon called the PRP effect. Ideomotor theory assumes that responses are centrally coded by the representations of their sensory feedback (Greenwald, 1970). From

¹ Here we assume that response selection intervenes between stimulus perception and response generation, even when IM-compatible. This assumption fits with G&S's assertion that the "translation process [response selection] is especially simple when S-R relationships are characterized by IM compatibility" (p. 70). Halvorson and Hazeltine's (2019) also interpreted G&S this way: "When the stimulus cuing the action matches the environmental outcome of the action, the response code can be directly activated and response selection is highly efficient (Greenwald and Shulman, 1973)." (p. 2).

this, Greenwald (1972) hypothesized that "The stimulus of highly ideomotor-compatible combinations should effectively select the response without burdening limited-capacity decision processes" (p. 52). To test this hypothesis, G&S conducted two PRP experiments pairing an auditory-vocal (AV) task that was either IM-compatible (repeat aloud the auditory letter "A" or "B") or non-IM-compatible (say "ONE" to "A" or "TWO" to "B"), along with a visual-manual (VM) task that was either IM-compatible (left/right movement to a left/right-pointing arrow) or not (left/right movement to the visual word "left" or "right"). After averaging RTs across the two tasks, G&S reported that PRP effects were absent when both were IM compatible but still present when at least one of them was not IM compatible.

Starting with G&S, the virtual elimination of dual-task interference has often been taken as a direct indication of bottleneck bypassing, where two responses are selected in parallel (e.g., Schumacher et al., 2001). Lien, Proctor, and Allen (2002) reported PRP effects ranging from 85 ms to 119 ms in experiments replicating G&S's Experiment 2 and therefore argued against bypassing. Subsequent studies further debated whether pairing two IM-compatible tasks truly eliminates the PRP effect (e.g., Greenwald, 2003, 2004; Lien, McCann, Ruthruff, & Proctor, 2005). Halvorson et al. (2013) investigated why dual-task costs are small when pairing two IM-compatible tasks. The first two experiments used two IM-compatible tasks: an AV task (letter shadowing) and a VM task (pressing a key positioned in the direction of an arrow). Substantial dual-task costs were found with the classical PRP instruction to prioritize Task 1 over Task 2 (Experiment 1). But, when the same stimuli and tasks were presented simultaneously, with instructions to treat them equally, near-perfect timesharing was found (Experiment 2). Experiment 3 was similar to Experiment 2 except that the AV task was to shadow a word and the VM task was to imitate the posture of images of hands. Dual-task costs on the IM-compatible VM Task 2 were small when both tasks were IM-compatible but large (200+ ms) when the AV

Task 1 used an arbitrary (non-IM) stimulus-response mapping.

From these findings, Halvorson et al. (2013) concluded that the structure of the dual-task paradigm matters: elimination of dual-task costs requires simultaneous presentation of S1 and S2. They also concluded that “both tasks must be IM-compatible to nearly eliminate the dual-task cost” (Halvorson et al., 2013, p. 413). This latter conclusion seriously challenges the assumption of ideomotor theory that the mere presentation of a stimulus directly activates the associated response code. Indeed, Greenwald’s (1972) original paper explicitly asserted that “...highly efficient time sharing could be obtained even if one of the two simultaneous tasks is not highly ideomotor compatible” (p. 57).

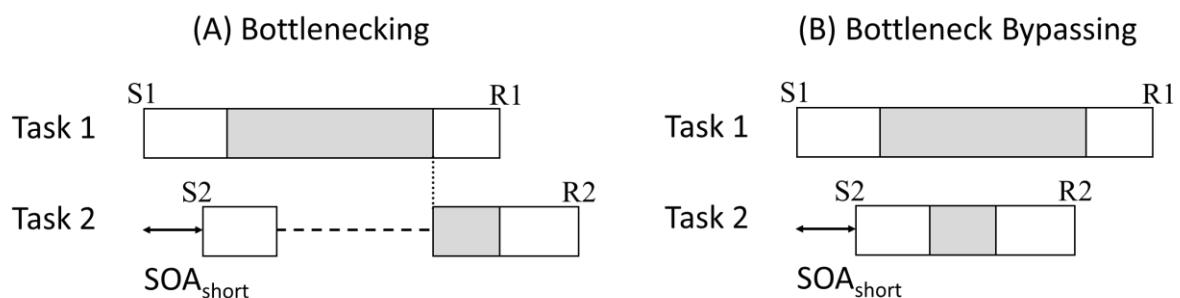
The current study

We re-examined whether one IM-compatible task can operate automatically and thereby bypass the bottleneck, even when the other task is not IM compatible. True response-selection automaticity, as proposed by G&S’s original theory, suggests that it should be possible. However, the preponderance of evidence described above says it cannot (e.g., Greenwald, 2003; Halvorson et al., 2013). We suspect that this conclusion is incorrect due to over-reliance on dual-task costs as the primary indicator of bottleneck bypassing. Modest dual-task costs do not necessarily indicate the presence of a bottleneck. For instance, Hazeltine, Ruthruff,

and Remington (2006) reported modest dual-task costs even though they argued that their participants selected two responses in parallel after dual-task training. Because peripheral conflicts were greatly minimized (the tasks shared neither the same sensory modality nor the same motor modality), Hazeltine et al. proposed that dual-task interference stemmed not from a central bottleneck, but rather from conflict between central codes of the tasks residing in working memory during parallel central processing. Conversely, negligible dual-task costs do not provide conclusive evidence of bottleneck bypassing. When pairing two IM-compatible tasks, their respective central stages may be so short in duration that they rarely demand attention simultaneously, thus rendering the bottleneck latent (Ruthruff, Johnston, Van Selst, Whitsell, & Remington, 2003). Accordingly, one cannot unambiguously determine whether the central bottleneck was truly bypassed or merely latent. Indeed, both bottlenecking and bypassing predict basically the same thing: very small dual-task cost. Anderson, Taatgen, and Byrne (2005) nicely illustrated this impasse: they simulated Hazeltine, Teague, and Ivry’s (2002) report of an absence of dual-task cost after dual-task practice with a model incorporating a central bottleneck. To overcome the theoretical impasse of pairing two fast tasks (see Anderson et al., 2005), we used an approach developed in our previous PRP studies on dual-task automatization: the slow/fast procedure, which pairs a slow Task 1 along

Figure 1

(A) Bottlenecking should produce large dual-task costs (represented by the dashed line), with R1 emitted before R2. (B) Bottleneck bypassing should produce little or no dual-task costs, with R2 typically occurring before R1. S = Stimulus, R = response.



with a fast Task 2. This slow/fast pairing avoids the latent-bottleneck problem by ensuring that Task-1 response is slow, which (as explained in more detail below) leads to very distinctive and testable predictions from bottlenecking versus bypassing (see Fig. 1; Maquestiaux, Laguë-Beauvais, Ruthruff, & Bherer, 2008; Maquestiaux, Ruthruff, Defer, & Ibrahime, 2018). In addition to the PRP dual-task trials, we randomly intermixed single-task trials of Task 1 and single-task trials of Task 2. This encouraged participants to prepare both tasks before each trial (either task might be performed next), thus alleviating the impact of one potential drawback of the traditional PRP approach: excessive prioritization of Task 1. Importantly, mixed single-task trials on Task 2 also provide a more precise baseline against which to assess RT2 lengthening at the shortest SOA (e.g., Schumacher et al., 2001). Traditionally, PRP studies have used the long SOA as a baseline, but this approach has a subtle problem. Prior to trial onset, participants presumably focus preparation on Task 1 (e.g., instantiating the S-R mapping in working memory), and then also prepare Task 2 with whatever resources are leftover. At a long SOA, participants can finish Task 1 and then begin loading up preparation exclusively for Task 2, which would artificially speed up RT2. The same preparation boost is not possible at short SOAs because there is no spare time to prepare. The mixed single-task trials avoid this preparation confound because Task 2 appears at trial onset, leaving no spare time to boost preparation. So, our primary indicator of dual-task costs will be the RT2 difference between the shortest SOA and the single-task condition (although we still report the PRP effect, for the sake of completeness). We probed for bottleneck bypassing versus bottlenecking with three distinct, converging indicators: dual-task costs, rates of response reversals (i.e., R2 before R1) at the shortest SOA, and RT1:RT2 correlations (see Maquestiaux et al., 2018). Bottleneck bypassing predicts negligible dual-task costs, frequent response reversals at short SOAs (because the fast Task 2 reliably wins the parallel race against the slower Task 1), and weak RT1:RT2 correlations at all SOAs

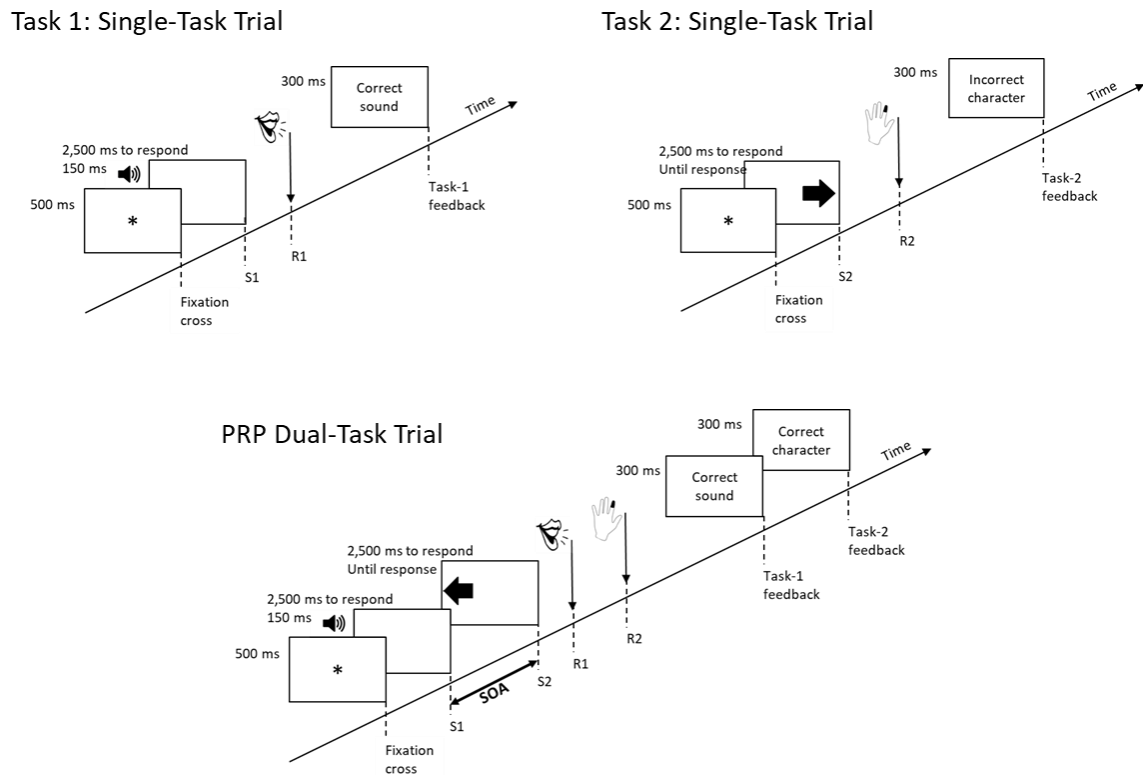
(because the tasks are performed more or less independently). But bottlenecking predicts large dual-task costs (because Task-2 central processing is delayed), rare response reversals (i.e., R1 should almost always be emitted before R2) at all SOAs, and higher RT1:RT2 correlations at short SOAs (because random variation in Task-1 precentral and central stages is inherited by Task 2 after the bottleneck delay) than at long SOAs.

Method

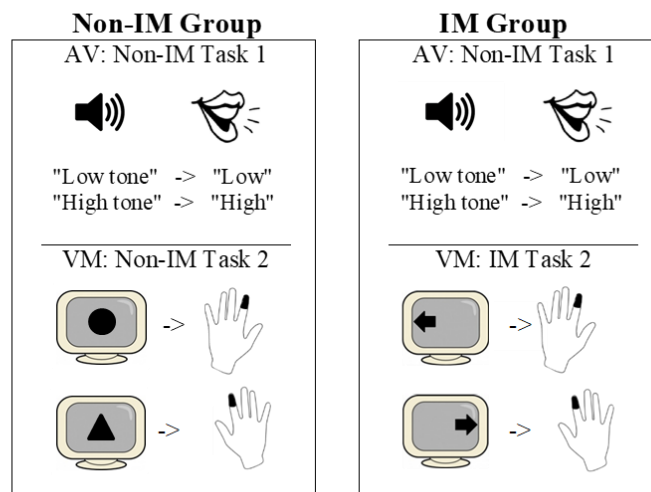
Figure 2 shows the stimulus-response sets and trial types.

Figure 2
Stimulus-response sets (A) and event sequence within a trial (B)

B. Mixed Single-Task and Dual-Task Trials



A. Stimulus-Response Sets



Participants. Forty-eight undergraduate psychology students were recruited from the University of Franche-Comté in exchange for partial course credit. They were randomly assigned to the Task-2 non-IM group ($n=24$) or the Task-2 IM group ($n=24$). This sample size of 24 ensured that we had at least as much power as previous studies, which have used sample sizes ranging from 10 to 20 ($n=12-16$

in Halvorson et al., 2013; $n=20$ in Halvorson & Hazeltine, 2015; $n=10-13$ in Lien, Proctor, & Allen, 2002).

Apparatus and Stimuli. The experiment was programmed with E-Prime and run on a laptop computer using an AZERTY keyboard, coupled with the PST Serial Response Box. Auditory stimuli were presented through headphones. Voice onset

was detected by the voice key integrated within the box; the experimenter manually entered the participant's vocal response using the box. The 250-ms Task-1 tone was either low-pitched (400 Hz) or high-pitched (1,800 Hz). The visual Task 2 was IM compatible or non-IM compatible. For the IM version, the visual stimulus was a left-pointing arrow positioned on the left or a right-pointing arrow positioned on the right. The arrows measured 1.8 cm in width and 1.3 cm in height. For the non-IM version, the visual stimulus was a black circle (diameter of 2.2 cm) or triangle (3 cm in width and 2 cm in height) in the screen center.

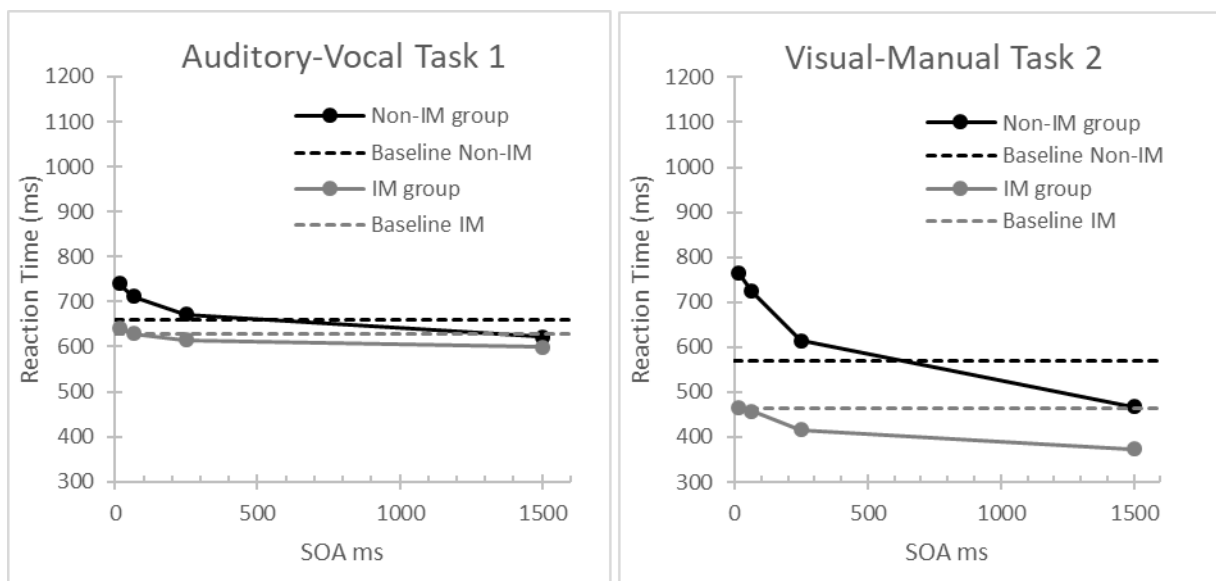
Design and procedure. Participants responded vocally to the Task-1 tone ("bas" for low, "haut" for high). The Task-2 IM group ($n=24$) responded to the left arrow by pressing the E key with their left index finger and to the right arrow by pressing the P key with their right index finger. The Task-2 non-IM group ($n=24$) responded to the shapes using the same fingers. Participants first performed familiarization trials on Task 1 and Task 2 separately (96 trials each). They then performed 16 familiarization trials followed by 288 experimental trials randomly intermixing PRP trials (192 trials) and single-task trials (48 for Task 1, 48 for Task 2). The

192 dual-task trials resulted from 12 repetitions of the 16 possible combinations of Task-1 stimulus, Task-2 stimulus, and SOA between Task-1 onset and Task-2 onset (15, 65, 250, and 1,500 ms). The 288 experimental trials were divided into nine blocks. During each 2-min block break, the computer provided performance feedback for the preceding block: Task-1 speed, Task-1 accuracy, and Task-2 accuracy. Participants were asked to copy the feedback scores onto a grid to ensure awareness of their performance and to promote efforts at improvement. They were informed that one stimulus or two would occur on each trial. They were also instructed to respond as fast and accurately as possible and were given the typical PRP instructions (i.e., emphasizing Task-1 speed).

Every trial began with a 500-ms black asterisk in the screen center. For AV single-task trials, the tone was then presented and participants had up to 2,500 ms to respond before timing out. Then, a 300-ms visual message indicated whether the response was correct. For VM single-task trials, the visual stimulus was presented and remained until response or 2,500 ms had elapsed. For dual-task trials, the tone was presented, followed after the SOA by the Task-2 stimulus (which

Figure 3

Mean reaction time on Task 1 and Task 2 as a function of stimulus onset asynchrony (SOA), for the IM Task-2 group and the non-IM Task-2 group. Dashed lines represent baseline (single-task) performance.



remained until response or 2,500 ms had elapsed). Then, two successive 300-ms messages indicated whether the Task-1 and Task-2 responses were correct. If no response to a task was detected, an additional 200-ms message stated that fact. The intertrial interval was 800 ms.

Results

We removed trials for which RT was below 100 ms or above 2,500 ms on Task 1 (single-task: 0.7%; dual-task: 1.0%) or Task 2 (single-task: 0.1%; dual-task: 0.1%). Also, error trials were removed from RT analyses. The resulting mean RTs are shown in Fig. 3.

Reaction Times and Error Rates

AV Task 1 RT1 was shorter for the IM group than the non-IM group (621 ms vs. 686 ms), $F(1, 46) = 4.53, p < .05$; an easy Task 2 might allow people to better prepare for Task 1. There was a main effect of SOA, $F(3, 138) = 35.60, p < .001$, that was qualified by Task-2 compatibility group, $F(3, 138) = 8.04, p < .001$. From the longest to the shortest SOA, the mean RT1 increase was 118 ms for the non-IM group, $F(3, 69) = 25.84, p < .001$, but only 43 ms for the IM group, $F(3, 69) = 9.81, p < .001$. The IM group committed more errors than the non-IM group (2.5% vs. 1.8%), $F(1, 46) < 1$. Task-1 error rates gradually increased from the longest SOA (1.50%) to the shortest SOA (3.01%), $F(3, 138) = 5.79, p < .001$. Task-2 compatibility group and SOA did not significantly interact, $F(3, 138) < 1$. VM Task 2 Mean RT2 was 214 ms shorter for the IM group than the non-IM group (428 ms vs. 642 ms), $F(1, 46) = 55.67, p < .001$. RT2 significantly increased from the longest SOA ($M = 420$ ms) to the shortest SOA ($M = 615$ ms), $F(3, 138) = 76.12, p < .001$; the overall PRP effect was 195 ms. The PRP effect was much smaller for the IM group than for the non-IM group (94 ms vs. 295 ms), $F(3, 138) = 19.82, p < .001$. Task-2 error rates were smaller with the IM Task 2 than the non-IM Task 2 (0.50% vs. 3.72%), $F(1, 46) = 36.47, p < .001$. Error rates were larger at the short SOAs (2.39% on average) than at the longest SOA (1.19%), $F(3, 138) = 3.48, p < .05$. Task-2 compatibility group and

SOA did not significantly interact, $F(3, 138) = 1.68, p = .18$.

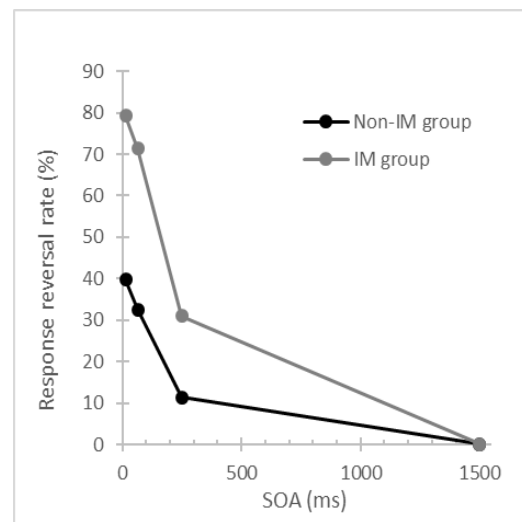
Three converging indicators of bypassing

Dual-task costs. Dual-task costs were measured with respect to the single-task baseline, rather than the long SOA, to avoid contamination from differential Task-2 preparation. On Task 2, the dual-task cost was large for the non-IM group but negligible for the IM group (194 ms vs. 3 ms), $t(46) = 7.46, p < .05$. On Task 1, the dual-task cost was larger for the non-IM group than for the IM group (80 ms vs. 13 ms), $t(46) = 3.35, p < .01$. The IM group's dual-task cost did not differ significantly from 0 for Task 1 (13 ms), $t(23) = 1.24, p = .22$, or Task 2 (3 ms), $t(23) < 1$.

Response reversal rates Figure 4 shows response reversal rates across SOAs. For bottleneck bypassing, the response order should routinely be reversed at short SOAs. Bottlenecking, in contrast, requires Task 2 to be processed after Task 1, making response reversals unlikely.

Figure 4

Percentages of response reversals at each stimulus onset asynchrony (SOA) for the non-IM Task-2 group and the IM Task-2 group



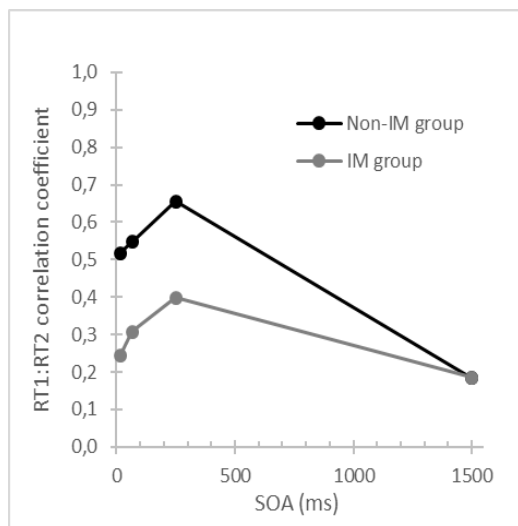
The response reversal rate was more than twice as high for the IM Task-2 group than for the non-IM Task-2 group (45.4% vs. 20.9%), $F(1, 46) = 27.73, p < .001$. The main effect of SOA was significant, $F(3, 138) = 182.25, p < .001$, with the response reversal rate being virtually null at the longest SOA (0.05%) and gradually increasing up to the shortest SOA

(59.5%). There was a significant interaction between SOA and Task-2 compatibility group, $F(3, 138) = 20.86, p < .001$, with a sharper increase in reversals at the shortest SOA for the IM group (79.2%) than the non-IM group (39.7%).

RT1:RT2 correlations. Figure 5 shows mean RT1:RT2 correlation coefficients as a function of SOA. Bottleneck bypassing predicts weak RT1:RT2 correlations at all SOAs, whereas bottlenecking predicts stronger correlations at short SOAs than long SOAs. The coefficient of correlation was weaker for the IM group than for the non-IM group (.28 vs. .48), $F(1, 46) = 12.09, p < .01$.

Figure 5

Mean RT1:RT2 correlation coefficient as a function of stimulus onset asynchrony (SOA) for the non-IM Task-2 group and the IM Task-2 group



There was a significant main effect of SOA, $F(3, 138) = 26.27, p < .001$, which was qualified by Task-2 compatibility group, $F(3, 138) = 5.41, p < .01$. For the non-IM group, correlations were stronger at short SOAs (average of .57) than the longest SOA ($M = .18$), $F(3, 69) = 33.48, p < .001$. But, for the IM group, the correlations at the 15-ms SOA (.24) and at the 65-ms SOA (.31) did not differ significantly from the coefficient correlation at the 1,500-ms SOA (.19); the only significant difference was between the 250-ms and 1,500-ms SOAs (.40 vs. .19), $F(3, 69) = 4.37, p < .01$. The small increase in correlations for the IM group at the 250-ms SOA might reflect occasional (but infrequent)

bottlenecking. Note that bottlenecking would produce especially strong correlations for the IM Task 2 (which is low variability); yet the data show the exact opposite pattern.

Discussion

Previous studies have often implied that IM-compatible tasks cannot bypass the central bottleneck (Lien et al., 2002, 2005), or can do so only when both tasks are IM compatible (G&S; Halvorson et al. 2013; but see also Halvorson & Hazeltine 2015, 2019). However, according to Greenwald's (1972) original conception of ideomotor compatibility, as well as the definition of automaticity, a single IM task should be sufficient to bypass the bottleneck. To test this possibility, we used three different indicators of bottleneck bypassing: dual-task costs, response reversal rates, and RT1:RT2 correlations. All three converged on the conclusion that a single IM Task 2 can bypass the bottleneck: negligible dual-task cost on Task 2 (4 ms), very high rates of response reversals at the shortest SOA (79.2%), and weak RT1:RT2 correlations (.28 overall). Thus, the perception of the IM-compatible stimulus directly activates the associated response code that can be selected without recruiting central attentional resources (i.e., automatically), allowing bottleneck bypassing even when the other task is not IM compatible. These findings, plainly consistent with Greenwald's (1972) view of IM compatibility, also echo previous findings showing that response selection can become automatic following extensive single-task training (Maquestiaux et al., 2008, 2018).

In contrast to previous studies with conflicting results (e.g., G&S; Lien et al., 2002, 2005), we did not rely on only one indicator of bottleneck bypassing, but three. In addition, we used single-task trials (intermixed with dual-task trials) as a baseline, rather than long-SOA trials. The latter approach may have inflated dual-task costs in many previous PRP studies (e.g., Lien et al., 2002; G&S) because long-SOA RT2 is artificially fast due to heightened preparation.

Our slow/fast PRP approach sidesteps the latent-bottleneck problem, because Task 1

demands central operations for an extended period of time. In contrast, one can discount G&S's findings of very small dual-task costs with two IM tasks, because both were performed very quickly (in less than 350 ms). Therefore, our findings provide clearer evidence of parallel central processing.

The data for the non-IM task, meanwhile, were consistent with frequent bottlenecking, consistent with previous studies (e.g., Pashler 1994). Surprisingly, these data also suggest a substantial amount of bypassing. Even though the non-IM group showed a dual-task cost of 194 ms on Task 2, it is relatively small given the long mean RT1 (686 ms) and previous PRP studies (typically showing 300+ ms PRP effects). Also, their percentage of response reversals at the shortest SOA was still surprisingly high (39.7%). Some reversals at short SOAs could reflect grouping of the two responses together (i.e., delaying R1 to emit it simultaneously with R2), but presumably not most because there was no evidence of the predicted RT1 delay. One speculation is that the inclusion of single-task trials within dual-task blocks increased preparation for Task 2, which allowed Task-2 to sporadically bypass the bottleneck.

Simulated versus observed inter-response intervals distributions

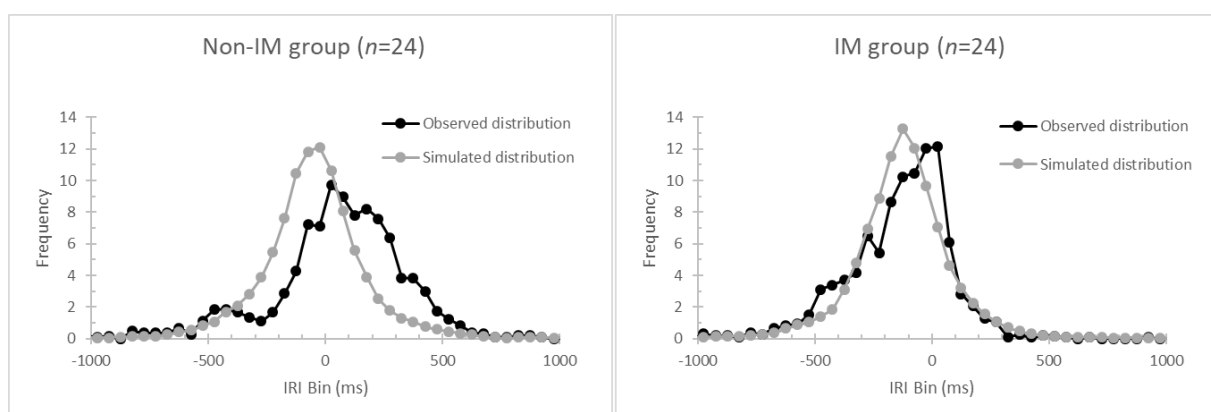
If the two tasks were truly performed independently at the 15-ms SOA, then the distribution of RTs from the dual-task trials, and their IRIs, should mimic that from the mixed single-task trials. Following Hazeltine et al. (2006), we tested this fine-grained prediction by simulating fully automatic

response selection. For each of the 48 participants, we paired each of their 48 single-task trials on Task 1 with each of their 48 single-task trials on Task 2, resulting in 2,304 simulated dual-task trials. For each trial, we then calculated the simulated IRI at the 15-ms SOA: $15 \text{ ms} + \text{RT}_2 - \text{RT}_1$. Note that the IRI is a continuous (and much richer) version of the categorical “response reversal” rate discussed above (i.e., negative IRIs are response reversals). Then, we filtered the simulated data in exactly the same way as for the actual dual-task data (eliminating outliers and errors). Figure 6 depicts the results of these simulations. Bottlenecking should cause the observed IRI distributions to be shifted well to the right of the simulated distribution. This prediction was confirmed for the non-IM group, as evidenced by a significant difference between the means of the two distributions (38 ms vs. -79 ms), $t(23) = 4.66$, $p < .001$. Bottleneck bypassing, meanwhile, predicts nearly perfect overlap between the simulated and observed IRI distributions. Consistent with this prediction for the IM group, the means between the observed and simulated distributions did not differ significantly (-160 ms vs. -150 ms), $t(23) < 1$. Furthermore, the standard deviations between the two distributions did not differ for the IM group (180 ms vs. 188 ms), $t(23) < 1$. These simulations again demonstrate that selecting the response associated with the perception of an IM-compatible stimulus is automatic.

Ideomotor compatibility versus task separability

Figure 6

Simulated vs. observed histograms of interresponse intervals (IRIs) at the 15-ms stimulus onset asynchrony for the non-IM Task-2 group and the IM Task-2 group



Halvorson et al. (2013) proposed that the relationship between tasks plays a critical role in dual-task performance. When two tasks can be kept entirely separated, within distinct working-memory subsystems (visual vs. verbal), dual-task interference should be minimal. This intriguing visual-verbal account predicts that tasks do not necessarily need to be IM compatible to achieve minimal dual-task interference, provided that the visuospatial sketchpad holds codes exclusively from the VM task and the phonological loop holds codes exclusively from the AV task (for a similar proposal but regarding practiced tasks, see Maquestiaux et al., 2018).

To test this account, Hazeltine and Halvorson (2015) had participants perform a VM task and an AV task. These authors devised an ingenious manipulation of IM compatibility for each task (a between-subjects manipulation). The IM-compatible task required imitating the stimulus: the AV task was to repeat aloud an auditory stimulus (“cat” or “dog”) and the VM task was to press the same key as a pictured hand. The non-IM-compatible tasks required making the opposite response, such as saying “cat” when hearing “dog” and pressing the opposite key to the pictured hand. Consistent with the visual-verbal account, dual-task costs (summing the VM and AV RTs) were small for all groups (see also Halvorson & Hazeltine, 2019). The results are intriguing and arguably challenge the present conclusion that IM compatibility is the key factor. However, the opposite tasks might actually be nearly IM compatible. Responding to “cat” with an automatically primed associated “dog” is quite easy. Also, it might be easy to re-interpret the “index” hand image as actually indicating the middle finger, and vice versa. If either of these tasks was effectively IM compatible, then IM compatibility could still be the key factor.

To reconcile the present findings with the visual-verbal account, one needs to assume that the VM Task 2 is purely visual when IM compatible but uses verbal stores when non-IM compatible. Consistent with this assumption, mean RT1 (AV) was shorter when Task 2 was IM versus non-IM

compatible; however, this could instead reflect greater Task-1 preparation when Task 2 is IM and therefore easier to prepare. Furthermore, the assumptions about modalities are questionable and there is no easy way to verify them. The non-IM task (pushing keys in response to shapes) could have been entirely visual. Likewise, the IM task might have been verbal. For example, participants might have increased the congruence between a left-pointing arrow and the left key by thinking “left.” Future studies are needed to evaluate the visual-verbal account and determine whether the key to bottleneck bypassing is task separability, IM compatibility, or both.

Conclusions

In sum, the present study makes the following empirical and theoretical contributions. First, we have shown that IM tasks can bypass the central bottleneck. Unlike previous work, which has generally focused exclusively on dual-task costs, we relied upon multiple converging indicators of bypassing: dual-task cost, response reversals, and RT1:RT2 correlations, along with a fine-grained analysis of simulated versus observed IRIs. This resolves the controversy regarding whether IM-compatible tasks can bypass the central bottleneck (e.g., G&S) or not (Lien et al., 2002). Second, contrary to the apparent consensus in the literature, we have shown that bottleneck bypassing is possible even when only task is IM compatible. Third, the above findings support G&S’s original conception of IM tasks as automatic, not requiring central attentional resources. Fourth, these findings indicate that central bottleneck is not structural, but rather can be overcome in select circumstances.

Author Notes

We are grateful for the assistance of José Lages with the simulation analysis.

This research was supported by a grant from Région Bourgogne Franche-Comté and a grant from Institut Universitaire de France to François Maquestiaux.

References

- Anderson, J. R., Taatgen, N. A., & Byrne, M. D. (2005). Learning to achieve perfect timesharing: Architectural implications of Hazeltine, Teague, and Ivry (2002). *Journal of Experimental Psychology*, *31*, 749-761.
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideomotor mechanism. *Psychological Review*, *77*, 73-99.
- Greenwald, A. G. (1972). On doing two things at once: Time sharing as a function of ideomotor compatibility. *Journal of Experimental Psychology*, *94*, 52-57.
- Greenwald, A. G. (2003). On doing two things at once: III. Confirmation of perfect timesharing when simultaneous tasks are ideomotor compatible. *Journal of Experimental Psychology*, *29*, 859-868.
- Greenwald, A. G. (2004). On doing two things at once: IV. Necessary and sufficient conditions: Rejoinder to Lien, Proctor, and Ruthruff (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *3*, 632-636.
- Greenwald, A. G., & Shulman, H. G. (1973). On doing two things at once: II. Elimination of the psychological refractory period effect. *Journal of Experimental Psychology*, *101*, 70-76.
- Halvorson, K. M., Ebner, H., & Hazeltine, E. (2013). Investigating perfect timesharing: The relationship between IM-compatible tasks and dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*, 413-432.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2015). Do small dual-task costs reflect ideomotor compatibility or the absence of crosstalk? *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*, 1403-1409.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2019). Separation of tasks into distinct domains, not set-level compatibility, minimizes dual-task interference. *Frontiers in Psychology*, *10*:711.
- Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R. W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*, *52*, 291-345.
- Hazeltine, E., Teague, D., & Ivry, R. (2002). Simultaneous dual-task performance reveals parallel response selection after practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 527-545.
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., & Proctor, R. W. (2005). Dual-task performance with ideomotor-compatible tasks: Is the central processing bottleneck intact, bypassed, or shifted in locus? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 122-144.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W., & Allen, P. A. (2002). Ideomotor compatibility in the psychological refractory period effect: 29 years of oversimplification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 396-409.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., & Bherer, L. (2008). Bypassing the central bottleneck after single-task practice in the psychological refractory period paradigm: Evidence for task automatization and greedy resource recruitment. *Memory & Cognition*, *36*, 1262-1282.
- Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defer, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization: The key role of sensory-motor modality compatibility. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*, 752-772.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, *116*, 220-244.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., Van Selst, M., Whitsell, S., & Remington, R. (2003). Vanishing dual-task interference after practice: Has the bottleneck been eliminated or is it merely latent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 280-289.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect timesharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, *12*, 101-108.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, *84*, 127-190.

Open Access. The raw data are publicly available at <https://sites.google.com/site/frmaquestiaux/home/data-sharing>. The experiment was not preregistered.

Discussion

Dans cette première étude de la thèse, nous avons testé l'automatisme d'une tâche à caractère idéomoteur. Concrètement, nous avons réalisé une expérience PRP de double tâche dans laquelle une tâche 1 arbitraire et une tâche 2 idéomotrice ont été appariées, afin de déterminer si une tâche 2 idéomotrice peut permettre l'élimination du goulet d'étranglement central et ainsi conduire à l'observation d'un traitement central parallèle des tâches. La tâche 1 était auditivo-vocale et la tâche 2 était visuo-manuelle, de sorte à minimiser les conflits périphériques. Si la littérature est relativement divisée sur l'automatisme des tâches idéomotrices, les auteurs s'accordent toutefois sur les résultats à attendre avec la combinaison d'une tâche non-idéomotrice et d'une tâche idéomotrice : du traitement central sériel. D'un côté, certains auteurs défendent l'automatisme des tâches idéomotrices mais prédisent que l'utilisation d'une seule tâche idéomotrice engendre nécessairement des coûts de double tâche (Halvorson, Ebner, & Hazeltine, 2013 ; Halvorson & Hazeltine, 2015, 2019 ; Greenwald & Shulman, 1973). D'autres auteurs arguent en retour que les tâches idéomotrices ne sont pas automatiques et qu'elles ne permettent par conséquent pas d'éliminer le goulet d'étranglement central (Lien et al., 2002, 2005). Lien et al. (2002) soulignent par ailleurs que, si les tâches idéomotrices étaient réellement automatiques comme originellement proposé par Greenwald (1972), une seule tâche idéomotrice devrait permettre de contourner le goulet d'étranglement central (Lien et al., 2002). En d'autres termes, le prérequis énoncé par Greenwald (Greenwald, 1972, 2003 ; Greenwald & Shulman, 1973) que les deux tâches doivent être idéomotrices remet directement en question l'automatisme des tâches à caractère idéomoteur. Selon nous, ce débat trouve son origine dans l'absence de procédure et d'indicateurs permettant d'identifier et neutraliser un éventuel goulet d'étranglement central latent (Ruthruff et al., 2003). En vue d'y apporter une réponse vérifiée, nous avons donc employé une procédure long/court afin de nous assurer que les traitements centraux des deux tâches aient toujours lieu simultanément.

Les résultats obtenus à partir de notre étude fournissent un faisceau d'arguments empiriques en faveur de l'hypothèse d'un traitement central parallèle en double tâche, et donc de l'automatisme du traitement d'une tâche idéomotrice. Ces résultats démontrent la possibilité de traiter simultanément une tâche non-idéomotrice et une tâche idéomotrice, et ainsi d'éliminer le goulet d'étranglement de l'attention centrale si souvent rencontré dans la littérature (e.g., Pashler & Johnston, 1989). Cette conclusion est étayée par l'utilisation d'une procédure long/court et par l'introduction d'un ensemble d'indicateurs complémentaires incluant des

mesures telles que les coûts associés à la réalisation d'une double tâche comparativement à une simple tâche, les taux d'inversion des réponses et les corrélations des temps de réaction des deux tâches. Cette étude fournit différents arguments empiriques en faveur de la sélection automatique de la réponse au stimulus de la tâche à caractère idéomoteur. En effet, les résultats du groupe pour lequel la tâche 2 était idéomotrice supportent clairement l'hypothèse du traitement central parallèle des tâches : le coût de double tâche sur la tâche 2 était très faible (4 ms), les participants inversaient régulièrement l'ordre de réponse (sur 79.2% des essais) et la corrélation des temps de réaction aux deux tâches était relativement faible (.28 tous SOA confondus). Par opposition, les résultats du groupe pour lequel la tâche 2 était non-idéomotrice convergent vers l'hypothèse du traitement central sériel : le coût de double tâche sur la tâche 2 était conséquent (194 ms), le taux d'inversion des réponses était relativement bas (39.7%) et les temps de réaction étaient plus fortement corrélés que pour le groupe idéomoteur (.48). Dans leur ensemble, ces résultats étayaient l'hypothèse que la présence d'une seule tâche idéomotrice suffit à éliminer le goulet d'étranglement central. Cette conclusion donne raison à la conception originelle de Greenwald (1972), ainsi qu'à la définition classique de l'automatisme (e.g., Schneider & Shiffrin, 1977) : une tâche idéomotrice est effectivement automatique, et son automatisme lui permet effectivement d'être traitée en parallèle d'une autre tâche, sans mobiliser d'attention.

Il reste cependant à déterminer si l'automatisme du traitement de la tâche idéomotrice dépend spécifiquement de son caractère idéomoteur ou de processus plus généraux et communs à d'autres tâches non-idéomotrices. Dans l'étude 2, nous allons tester si l'automatisme en double tâche est généralisable à une tâche non-idéomotrice mais facile. En effet, nous spéculons que ce qui a pu permettre l'automatisme de la tâche idéomotrice tient à la relative facilité avec laquelle les associations stimulus-réponse peuvent être activées en mémoire de travail. Selon notre spéculation, l'automatisme en double tâche peut s'observer avec une tâche non-idéomotrice mais dont les représentations sont facilement activables en mémoire de travail. Plus généralement, l'ambition de l'étude 2 est de tester, au moyen de la procédure long/court et de nos techniques d'analyse (i.e., indicateurs comportementaux, simulations cognitives), si le phénomène d'automatisme en double tâche est généralisable à des tâches non-idéomotrices quoique relativement faciles.

Étude 2 – Par-delà l'idéomotricité : L'automatisme des tâches sémantiques

Objectifs et prédictions

L'objectif de cette seconde étude est d'éprouver plus encore la théorie du goulet d'étranglement central avec une nouvelle catégorie de tâches non-idéomotrices mais relativement aisées, à savoir des tâches sémantiques. Dans l'étude 1, nous avons testé et prouvé l'automatisme des tâches idéomotrices pour lesquelles il s'agit essentiellement de reproduire ce que l'on perçoit (e.g., tâches de *shadowing*). Le traitement central de telles tâches peut effectivement opérer sans recourir aux ressources attentionnelles centrales, permettant à la tâche concurrente idéomotrice d'être traitée sans interférence avec une autre tâche. Néanmoins, nos résultats ne permettent pas de déterminer la source de cet effet facilitateur. L'automatisme inhérent des tâches idéomotrices pourrait dépendre d'une caractéristique qui leur est propre, ou d'une caractéristique plus universelle dont disposent de nombreuses autres tâches cognitives. Déterminer la source de l'automatisme des tâches idéomotrices est d'une importance capitale pour la conceptualisation de la limitation centrale. La conception dominante d'une limitation centrale structurale (i.e., le goulet d'étranglement central ; Pashler, 1984) est certes remise en question par l'automatisme rapportée dans notre première étude, mais il est maintenant nécessaire d'identifier la véritable nature de cette limitation rencontrée au stade central du traitement de l'information. S'il ne s'agit pas d'une limite invariablement imposée par notre système cognitif, quelles sont les conditions qui permettent son élimination ? Obtenir du traitement central parallèle avec des tâches non-idéomotrices permettrait l'extraction de nouveaux indices et possiblement la formulation de nouvelles hypothèses quant à la nature de la limitation centrale. Pour cette raison, nous avons dans cette deuxième étude manipulé des associations stimulus-réponse sémantiquement compatibles ; autrement dit des paires pour lesquelles les représentations du stimulus et de la réponse sont déjà associées en mémoire (mais ne sont pas identiques).

Le choix de la compatibilité sémantique est motivé par de nombreux arguments théoriques. Ces arguments proviennent d'un ensemble de travaux sur la mémoire sémantique et les effets d'amorçage d'une part, et d'indices fournis par de récentes expériences de double tâche manipulant des tâches non-idéomotrices d'autre part. Nous détaillons ces éléments dans les paragraphes qui suivent.

Mémoire sémantique et effets d'amorçage

Une association sémantique repose sur des associations préexistantes en mémoire. Les nombreuses représentations sémantiques dont nous faisons l'expérience au quotidien sont stockées en mémoire sémantique³² (Tulving, 1972) et s'entrelacent progressivement à notre insu. Des auteurs considèrent que la simple activation d'une de ces représentations déclencherait involontairement l'activation des concepts qui lui sont associés (e.g., Collins & Loftus, 1975). Plus précisément, la théorie de l'activation diffuse (*spreading-activation theory*) proposée par Collins et Loftus postule que la mémoire sémantique est composée de deux réseaux entremêlés : le réseau lexical (connectant des unités orthographiques et phonologiques) et le réseau sémantique (connectant les unités sur la base de leur sens). Chaque unité lexicale ou sémantique, appelée *nœud* (*nodule* en Anglais), est reliée à d'autres unités lexicales ou sémantiques sur la base de leurs similarités, et l'activation d'un nœud s'étend progressivement aux nœuds les plus proches (e.g., l'activation directe du mot CAFÉ se propagera aux éléments sémantiques les plus proches, tels que CAFETIÈRE ou TASSE). Il est à noter que ces activations peuvent avoir lieu entre les deux réseaux ; les réseaux sémantique et lexical ne sont pas mutuellement exclusifs. Cette conception dynamique de la mémoire sémantique suggère que le traitement sémantique peut être optimisé (amorçage sémantique) ou au contraire entravé (interférence sémantique ; e.g., Kleinman, 2013 ; Piai, Roelofs, & Schriefers, 2014 ; Piai, Roelofs, & Schriefers, 2015) en fonction de la manière dont les réseaux qui la constituent sont sollicités. Puisque le focus de la présente étude est le traitement optimal des tâches, nous nous concentrerons essentiellement sur l'amorçage sémantique.

L'amorçage sémantique définit une situation pour laquelle le traitement d'un mot est facilité par le traitement antérieur d'un mot appartenant à la même catégorie sémantique. Pour expliquer ce phénomène sous l'angle de la théorie de l'activation diffuse (Collins & Loftus, 1975), le traitement d'un mot est optimal lorsqu'il est précédé par le traitement d'un nœud voisin. Par exemple, la simple lecture du mot CIEL permettra le traitement accéléré du mot subséquent NUAGE. Cet effet a été observé pour la première fois par Meyer et Schvaneveldt (1971), bien que leur description corresponde en réalité à un autre type d'amorçage, nommé amorçage associatif (Fischler, 1977). La différence entre ces deux amorçages est

³² La mémoire sémantique peut être définie comme « *a mental dictionary, encyclopedia, and thesaurus, all rolled into one* » (McNamara & Holbrook, 2003, p. 447) (« un dictionnaire mental, une encyclopédie, et un thesaurus, le tout en un »). Contrairement à la mémoire épisodique à laquelle elle est souvent comparée (e.g., Tulving, 1972), la mémoire sémantique permet le maintien de traces mnésiques hors de leur contexte spatiotemporel d'encodage. L'absence d'étiquettes spatiales et temporelles suppose l'existence d'une autre méthode d'organisation, que de nombreux modèles ont tenté de déterminer. La théorie de l'activation diffuse (Collins & Loftus, 1975) est l'un d'entre eux.

essentiellement normative : l'amorçage sémantique dépend de la proximité sémantique et lexicale de deux items, tandis que l'amorçage associatif repose sur la fréquence de leurs cooccurrences. Autrement dit, deux mots d'une même catégorie sémantique peuvent ne pas être fortement associés car ils sont rarement évoqués ensemble (e.g., bien que CHAT, CHIEN et CYGNE appartiennent à la même catégorie sémantique – les animaux – CHAT est plus fortement associé à CHIEN qu'à CYGNE). Dans une méta-analyse portant sur la rapidité de traitement de diverses tâches d'amorçage, Lucas (2000) note que l'amorçage sémantique dans sa forme la plus pure (i.e., sans association) peut être automatique. Lucas déclare également que l'amorçage sémantique peut être boosté par l'amorçage associatif bien que la raison de ce boost reste encore floue. Une revue de littérature conduite par Hutchison (2003) rapporte que l'amorçage automatique est imputable à un recouvrement des caractéristiques des items et de la force de l'association de ces derniers, ce qui étaye le rôle essentiel des relations associatives dans le traitement lexical.

Tâches sémantiques et performance en double tâche

















Du côté de la limitation centrale, nous soupçonnons que le rôle modérateur de la compatibilité sémantique sur l'ampleur de l'interférence en double tâche a déjà été involontairement observé par Halvorson et Hazeltine (2015). Dans leur étude visant à infirmer l'automatisme des tâches idéomotrices, les auteurs ont employé une tâche de *shadowing* dans deux de leurs conditions (répondre CHAT à CHAT et CHIEN à CHIEN ; voir figure 11, conditions II et IO). Dans deux autres conditions, il a été demandé aux participants de dire l'inverse, c'est-à-dire CHIEN à l'écoute du mot CHAT, et CHAT au mot CHIEN ; figure 11, conditions OI et OO). L'intention des auteurs était alors de défaire le lien idéomoteur présent dans la tâche de *shadowing* (i.e., reproduire la stimulation perçue) en donnant comme consigne de produire le contraire de ce qui était perçu (*opposite task*). Dans ce design, les auteurs ont cependant omis de considérer que cette tâche non-idéomotrice présentait une nouvelle forme de compatibilité : la compatibilité sémantique des mots CHIEN et CHAT. En outre, la règle de produire une réponse contraire à la stimulation perçue diffère peu de la consigne de reproduire la stimulation même, dans la mesure où l'association stimulus-réponse repose sur un lien évident qui facilite la sélection de la réponse. Si l'automatisme des tâches idéomotrices provient de la règle « faire pareil » qui ne nécessite pas de recherche approfondie de la réponse appropriée puisqu'elle est directement activée en mémoire de travail, il est possible que la règle de « faire l'inverse » mène également une élimination des coûts de double tâche par simple activation diffuse de la stimulation perçue à son contraire. Les résultats de Halvorson et Hazeltine semblent soutenir cette idée, puisqu'une réduction conséquente de l'interférence en

double tâche a été observée pour chacune de leurs conditions (moins de 50 ms de coût de double tâche à chaque fois). Les auteurs ont entrevu dans ces résultats la non-spécificité des tâches idéomotrices en tant qu'exception au goulet d'étranglement central, puisque de faibles coûts de double tâche ont été obtenus avec et sans compatibilité idéomotrice. Et si ces nouvelles tâches contraires constituaient en réalité une nouvelle exception à la théorie du goulet d'étranglement central ? Dans la présente étude, nous passons ces tâches sémantiques sous notre microscope expérimental.

Notre échantillon expérimental est composé de 48 étudiants en licence de psychologie à l'Université de Franche-Comté. Ils ont été répartis en deux groupes égaux dans deux expériences. La seule différence entre ces deux expériences est la paire sémantique utilisée en tâche 2.

Figure 11

Design expérimental de Halvorson et Hazeltine (2015), extrait du même papier

		AV: Ideomotor task		AV: Opposite task		
VM: Ideomotor task		II			OI	
	"Cat"	->	"Cat"	"Cat"	->	"Dog"
	"Dog"	->	"Dog"	"Dog"	->	"Cat"
		->	Index Key 1		->	Index Key 1
	->	Middle Key 2		->	Middle Key 2	
VM: Opposite task		IO			OO	
	"Cat"	->	"Cat"	"Cat"	->	"Dog"
	"Dog"	->	"Dog"	"Dog"	->	"Cat"
		->	Index Key 2		->	Index Key 2
	->	Middle Key 1		->	Middle Key 1	

Dans l'expérience 1, la tâche 2 sémantique dont nous avons testé l'automatisme consistait à répondre vocalement PONG à l'écoute du mot PING, et PING à l'écoute du mot PONG. Les mots PING et PONG sont fréquemment utilisés ensemble (que cela soit en tant que nom composé ou simples onomatopées, e.g., dans le jargon informatique) et cette association est renforcée par leur grande similarité phonologique et orthographique. En outre, PING et PONG partagent une relation exclusive : leur association est tellement forte que chercher des

alternatives au fait de répondre PONG à PING nécessiterait un effort certain. Du point de vue de la littérature sur les associations sémantiques, l'association PING-PONG bénéficierait à la fois d'un effet d'amorçage sémantique et d'un amorçage associatif. Cette première association constitue donc le candidat idéal pour éprouver une nouvelle fois le goulet d'étranglement central et ainsi généraliser l'observation d'un traitement central parallèle à d'autres tâches que les tâches idéomotrices.

Dans l'expérience 2, les participants ont reçu pour consigne de répondre HAUT au mot BAS, et BAS au mot HAUT. Le but de cette seconde expérience était de manipuler une nouvelle paire de mots dont la compatibilité sémantique était plus faible que PING-PONG. La cooccurrence de HAUT et BAS est en effet moins fréquente que celle de PING et PONG, et il n'y a aucun recouvrement phonologique. Néanmoins, ces termes sont fréquemment usités au quotidien et reposent sur des concepts universels (i.e., les repères directionnels), conférant à l'association stimulus-réponse une compatibilité sémantique suffisante pour que nous prédisions son automaticité au même titre que celle de l'association PING-PONG.

La force de nos tâches sémantiques rappelle l'évidente simplicité des tâches idéomotrices ; il est donc difficile d'imaginer qu'elles puissent mener à de grands coûts de double tâche. Couplée aux résultats intrigants de Halvorson et Hazeltine (2015), cette observation nous a conduits à prédire l'émergence d'un traitement central parallèle pour nos deux expériences. Plus précisément, nous émettons dans cette étude l'hypothèse que la véritable clé de l'élimination du goulet d'étranglement central serait l'aisance avec laquelle les représentations des deux tâches peuvent être simultanément préchargées en mémoire de travail.

Bypassing the Central Bottleneck with Easy Tasks: Beyond Ideomotor Compatibility

MANUSCRIPT PUBLISHED IN PSYCHONOMIC BULLETIN & REVIEW
Psychonomic Bulletin & Review (2022), 29, 501-511
<https://doi.org/10.3578/s13423-021-01974-1>

*Morgan Lyphout-Spitz*¹, *François Maquestiaux*^{1,2}, & *Eric Ruthruff*³

¹*Université de Franche-Comté*

²*Institut Universitaire de France*

³*University of New-Mexico*

Maquestiaux, Lyphout-Spitz, Ruthruff, and Arexis (2020) demonstrated that ideomotor-compatible (IM) tasks (e.g., pressing the left key when an arrow points left) can operate automatically, entirely bypassing the central bottleneck that constrains dual-task performance. But is bottleneck bypassing a specific consequence of IM compatibility or is it due to task ease? To answer this question, we tested the automaticity of a task that was easy but not IM. The task was easy due to the high semantic compatibility between the stimulus and the response: saying “ping” when hearing “pong” and “pong” to “ping” in Experiment 1, saying “low” when hearing “high” and “high” to “low” in Experiment 2. We presented it as Task 2, along with a Task 1 that was not easy, due to the use of an arbitrary stimulus-response mapping. Single-task trials were randomly intermixed with dual-task trials and then used as baselines to assess dual-task costs and to simulate distributions of inter-response intervals (IRIs) predictive of bottleneck bypassing vs. bottlenecking. The results of both experiments provided converging evidence that the entire Task 2 bypassed the bottleneck on virtually all trials: very small dual-task costs, high percentages of response reversals, and a close match between the observed IRI distributions and that predicted by bottleneck bypassing. Neither ideomotor compatibility nor task speed (the semantic task was not particularly fast) explain these findings. We therefore propose that the key to bypassing the central bottleneck is the ease with which people can fully load the stimulus-response mapping into working memory.

Keywords

Automatic processing, central bottleneck, dual-task interference, ideomotor compatibility, response selection

People routinely experience difficulty performing two tasks at once. For instance, talking can interfere with driving (Strayer & Johnston, 2001) and cause accidents. To explain the ubiquity of dual-task interference, Pashler (1994) proposed a processing

bottleneck that precludes concurrent central processing on two tasks. Central processes are those that come after perceiving the stimuli but before executing the response (e.g., response selection and decision-making). Many subsequent experiments have supported this

account across a wide range of tasks. Recent research, however, has identified a rare exception: the bottleneck can be entirely bypassed with ideomotor-compatible (IM) tasks (e.g., Maquestiaux, Lyphout-Spitz, Ruthruff, & Arexis, 2020). Tasks are deemed IM when “the stimulus resembles sensory feedback from the response” (Greenwald & Shulman, 1973, p. 70). Examples would be pressing a left key to a left-pointing arrow or repeating aloud auditory words (shadowing). Why do such tasks bypass the bottleneck? Does it reflect a special property of IM tasks or task ease more generally, such as the ease of representing tasks within working memory? Here we addressed these questions by using a non-IM task that has high semantic compatibility.

Background

Pashler (1994) proposed that a central bottleneck prevents attention from being simultaneously allocated to the central operations of two distinct tasks. The key assumption is that central stages of the first task (e.g., selecting the response associated with the current stimulus) recruit all available attention, thereby delaying the central stages of the second task (the horizontal dashed line in Figure 1A). Studies employing the psychological refractory period (PRP) procedure are generally consistent with a

central bottleneck (Janczyk & Kunde, 2020; Koch, Poljac, Müller, & Kiesel, 2018; Maquestiaux, 2012; for a review of forms of parallel processing during the central bottleneck, see Fischer & Plessow, 2015). This dual-task procedure involves presenting two stimuli (S1 and S2) separated by a variable onset asynchrony (SOA), each requiring a speeded response (R1 and R2). Participants are typically instructed to respond to each task as fast as possible, with extra emphasis on Task-1 speed. These instructions confine interference on Task 2 only, thus simplifying the predictions of the competing models. Reliably, Task-1 reaction time (RT1) remains constant across SOAs, whereas Task-2 reaction time (RT2) increases by hundreds of milliseconds from the longest to the shortest SOA. This RT2 increase is called the PRP effect.

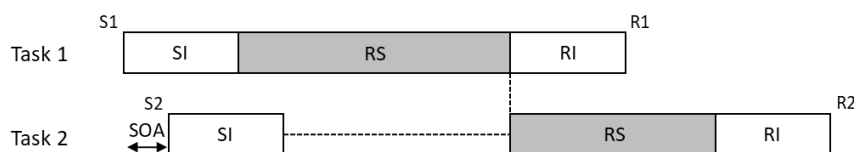
Bottleneck Bypassing With an Ideomotor-Compatible Task

Recently, Maquestiaux et al. (2020) revisited the issue of whether response selection on IM tasks is “automatic”, meaning that they can operate in parallel with all the stages of another task, even the central stage. We henceforth refer to this simply as bypassing the central bottleneck, or just bypassing. Although previous studies demonstrated that IM tasks sometimes

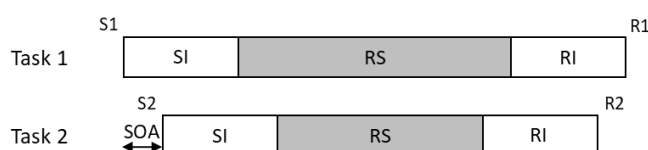
Figure 1

Two distinct central processing modes when pairing a Task 1 that produces long reaction times (due to the long duration of its central stage) and a Task 2, using the Psychological Refractory Period (PRP) procedure. SOA: stimulus onset asynchrony, SI: stimulus identification, Rs: response selection; RI: response initiation

A Serial Processing of Response Selection (Bottlenecking)



B Parallel Processing of Response Selection (Bottleneck Bypassing)



produce small dual-task costs (e.g., 18 ms in Greenwald & Shulman, 1973), this does not necessarily indicate bottleneck bypassing. The reason is that small dual-task costs are also consistent with the presence of a brief central bottleneck (Anderson, Taatgen, & Byrne, 2005; Lien, McCann, Ruthruff, & Proctor, 2005; Lien, Proctor, & Allen, 2002; Lien, Proctor, & Ruthruff, 2003), especially when both tasks are IM-compatible (e.g., Halvorson, Ebner, & Hazeltine, 2013). Indeed, when the central stages of both tasks are short, which is likely in the case of IM tasks, bypassing and bottlenecking predict the same thing: small dual-task costs. To overcome this theoretical impasse, Maquestiaux et al. (2020) presented an IM task as Task 2 in a PRP experiment, along with a “slow” Task 1 that produced long RT1s due to a long central stage. With this pairing, the candidate models make highly distinctive predictions regarding the amount of dual-task cost on Task 2: negligible in case of bottleneck bypassing but large in case of bottlenecking (because Task-2 central processing is delayed; see Figure 1A). Using a slow Task 1 also permits two additional indicators: the rate of response reversals and the RT1:RT2 correlations. Bottleneck bypassing predicts frequent response reversals (R2 then R1) at short SOAs because Task 2 would routinely win the race against the slow Task 1. It predicts weak RT1:RT2 correlations at all SOAs because the tasks are performed more or less independently. Meanwhile, bottlenecking predicts rare response reversals because Task 1 is attended before Task 2. It predicts higher RT1:RT2 correlations at short SOAs because random variation across trials in Task-1 pre- bottleneck and/or bottleneck stages should carry-over onto Task 2 following the bottleneck delay.

In Maquestiaux et al. (2020), the IM Task 2 required indicating the direction of an arrow (pointing to the left or to the right) with a spatially-compatible keypress (left index or right index keypress). The control group performed a non-IM, shape discrimination for Task 2 (circle vs. triangle). Task-1 and Task-2 stimuli were separated by a variable SOA of 15, 65, 250, or 1,500 ms. Intermixed within these dual-task trials were single-task trials, which offer an appropriate baseline against

which to assess dual-task interference. PRP studies have traditionally measured dual-task costs using the long SOAs as a baseline; however, long SOAs allow participants to finish Task 1 then use any available time to selectively prepare for only Task 2 (something not possible at short SOAs and not possible on single-task trials).

The indicators were plainly consistent with bottleneck bypassing when Task 2 was IM: a negligible dual-task cost on Task 2 (3 ms), very frequent response reversals at the shortest SOA (79%), and weak RT1:RT2 correlations (.28). But the indicators were consistent with bottlenecking when Task 2 was non-IM: a large dual-task cost on Task 2 (194 ms), infrequent response reversals (21%), and strong RT1:RT2 correlations (.48).

Maquestiaux et al. (2020) also simulated the entire distribution of inter-response intervals (IRIs) predicted by the bottleneck-bypassing hypothesis. These simulations paired every single-task RT on Task 1 with every single-task RT on Task 2 (for more details, see the Results section below). At the shortest SOA, Maquestiaux et al. reported a close match between the observed and simulated IRI distributions, indicating bottleneck bypassing.

The Current Study

Because IM task have been found to entirely bypass all processing bottlenecks, and other tasks have not, one might assume that the key to bypassing is IM compatibility. That is, response selection is automatic specifically because the stimulus is essentially the same as the response, requiring no attention to navigate between them. However, another possibility is that IM tasks are simply at one extreme end of a continuum of task difficulty. For example, perhaps the real key to bypassing is simply the ease of loading both tasks into working memory simultaneously.

With regard to this question, Halvorson and Hazeltine’s study (2015) is highly intriguing: they obtained small dual-task costs with tasks that are undoubtedly non-IM, such as saying “dog” when hearing “cat” or pressing the key opposite to the pictured hand. This finding goes against a large number of previous studies reporting robust dual- task costs with

non-IM tasks. However, equating these small dual-task costs with bottleneck bypassing is problematic because Halvorson and Hazeltine did not specifically set out to assess bypassing. In addition, their use of only a 0-ms SOA for tasks with very different mean RTs (e.g., 365 vs. 518 ms) raises the concern that the central operations of the two tasks were often asynchronous (Ruthruff, Johnston, Van Selst, Whitsell, & Remington, 2003). Therefore, the finding of small dual-task costs is a tantalizing clue, but does not provide unambiguous evidence of bottleneck bypassing.

Here we evaluated whether a non-IM yet easy task can operate automatically, thereby entirely bypassing the central bottleneck. In Experiment 1, Task 2 required saying “ping” when hearing “pong” and “pong” to “ping”. In Experiment 2, Task 2 required saying “high” to “low” and “low” to “high” (actual words in French were “haut” and “bas”). These pairings are not IM because merely echoing the stimulus would lead to an error rate of 100%. Yet, they still rely on a strong semantic association, thus making the tasks very easy (e.g., easy to prepare). Using the PRP procedure, our approach involved presenting this task as Task 2, along with a visual-manual Task 1 that produced long RTs (due to a long central stage). To probe for bottleneck bypassing, we relied upon three converging indicators: dual-task cost on Task 2, response reversal rate, and simulations of IRI distributions.

EXPERIMENT 1

Method

Figure 2 depicts the tasks and procedure.

Participants. Twenty-four undergraduate psychology students from the University of Franche-Comté ($M = 19.6$ years old, $SD = 1.8$ years; 21 women) participated in exchange for partial course credit. The sample size of 24 was fixed in advance and chosen so we would have as much statistical power as the most comparable study (i.e., $N=24$ in Maquestiaux et al., 2020).

Apparatus and Stimuli. The experiment was programmed with E-Prime and run on a laptop computer using an AZERTY keyboard, coupled with headphones and a PST Serial

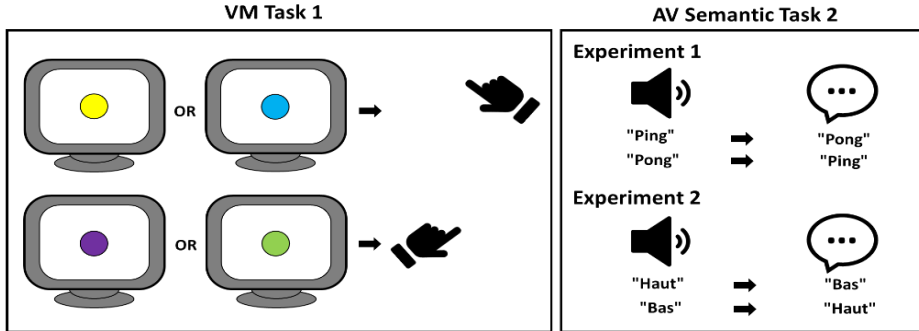
Response Box. Voice onset was detected by the voice key integrated within the box; the experimenter manually entered the participant’s vocal response using the box. The visual Task-1 stimulus was a colored circle – purple, blue, green, or yellow – displayed in the screen center. The circle diameter was 2 cm. The auditory Task-2 stimulus was the spoken word “ping” or “pong”, lasting 250 ms.

Design and procedure. For Task 1, participants pressed the E key with their left index finger when the circle was purple or green, and the P key with their right index finger when it was blue or yellow. For Task 2, they responded to the spoken word “ping” by saying “pong” and vice versa. Participants started with 96 familiarization trials on Task 1 and then 96 familiarization trials on Task 2. They then performed 16 familiarization dual-task trials followed by 288 experimental trials consisting of a random mixture of PRP trials (192 trials) and single-task trials (48 for Task 1, 48 for Task 2). The combination of the four Task-1 stimuli and the two Task-2 stimuli with each of the four SOAs (15, 65, 250, and 1,500 ms) resulted in 32 distinct trial types, each of which was repeated 6 times within a session to obtain the 192 dual-task trials. The 288 experimental trials were broken into 9 blocks of 32 trials. During each 2-minute break between blocks, the computer provided performance feedback regarding the preceding block: Task-1 speed and accuracy, and Task-2 accuracy. Participants were asked to copy these scores on a grid to ensure awareness of their performance and to promote efforts at improvement. They were informed that either one stimulus or two would occur on each trial. They were also instructed to respond as fast and accurately as possible and were given the typical PRP instructions emphasizing Task-1 speed. Note that the instructions did not constrain response order, and both orders – R1 then R2 and R2 then R1 – were allowed and

Figure 2

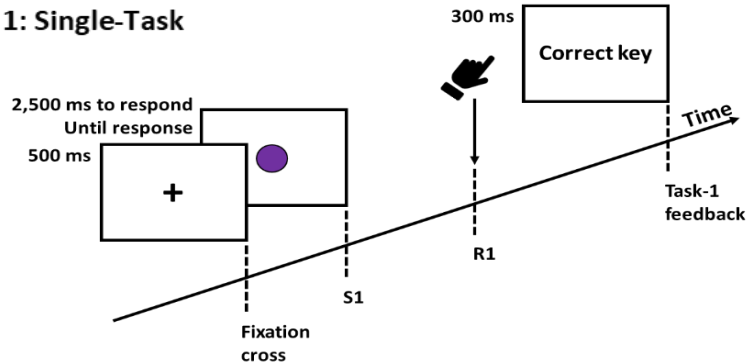
Stimulus-response associations (A) and types of trials (B) in Experiments 1 and 2. In the example PRP dual-task trial, response order was reversed: Task-2 response (R2) was emitted before Task-1 response (R1). S1: Task-1 stimulus, S2: Task-2 stimulus, SOA: stimulus onset asynchrony

A) Stimulus—Response Associations

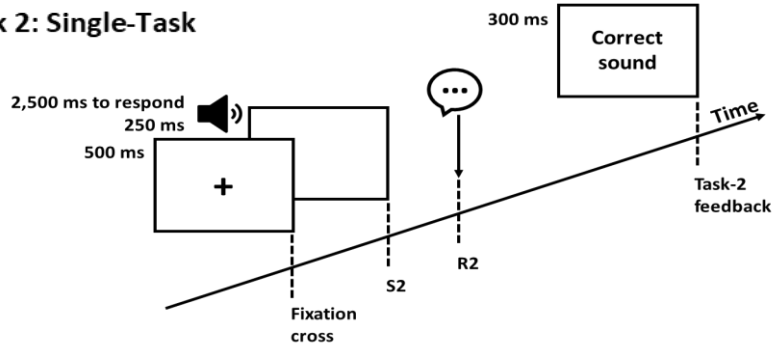


B) Types of Trials

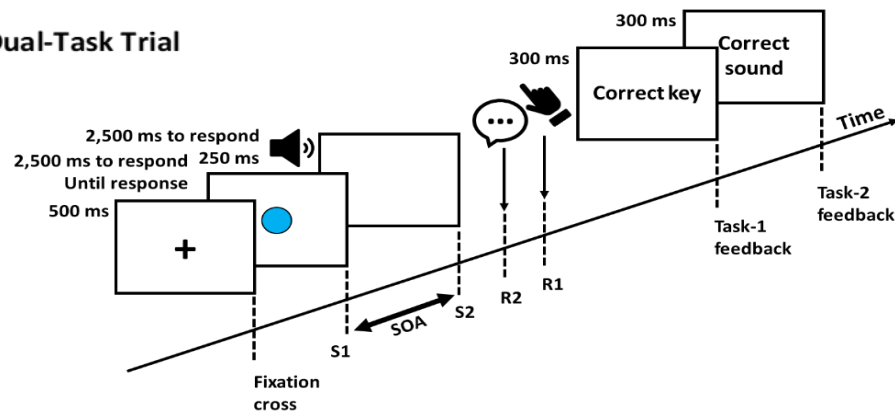
Task 1: Single-Task



Task 2: Single-Task



PRP Dual-Task Trial

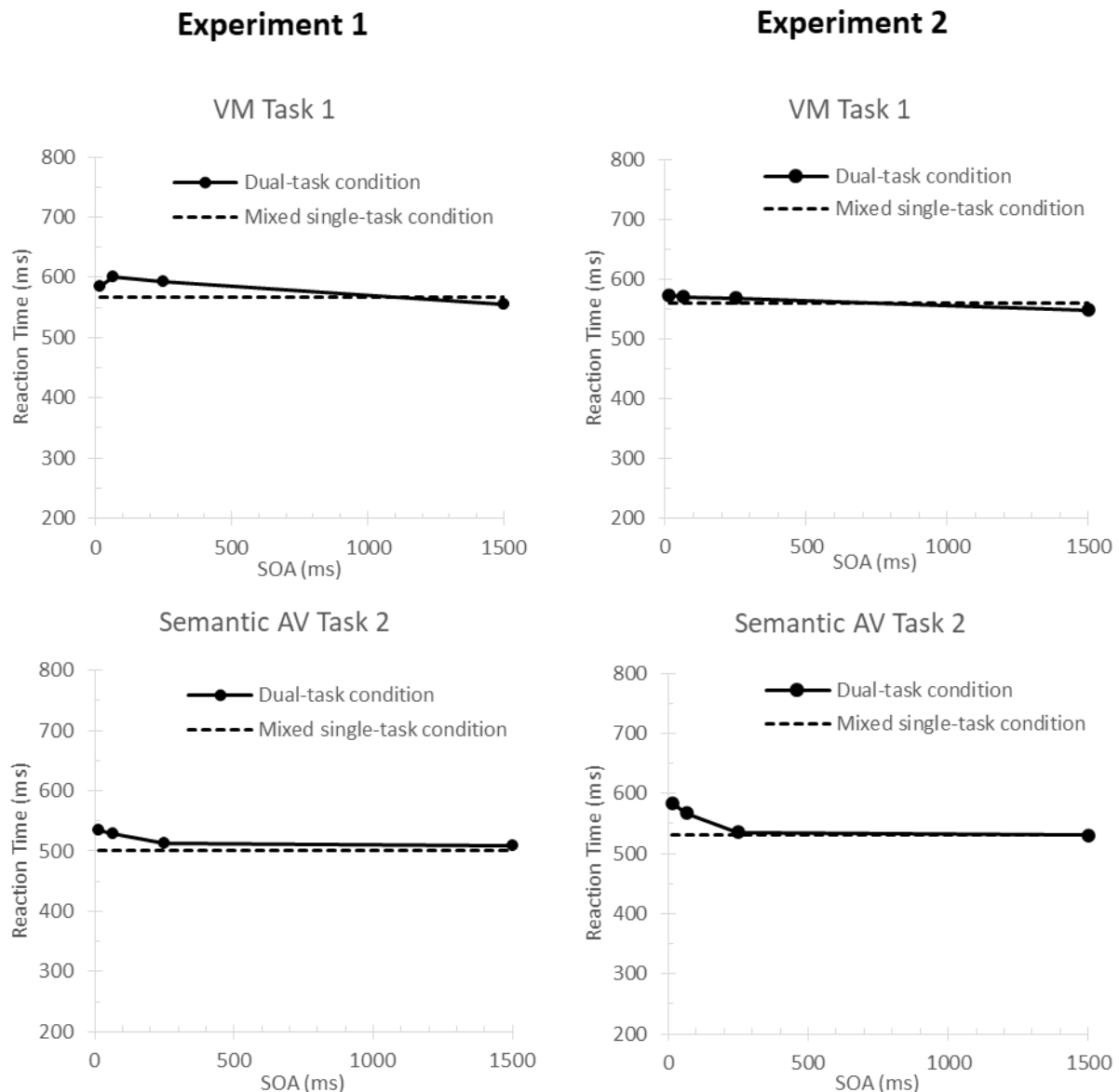


included in analyses. Every trial began with a black fixation cross displayed for 500 ms in

the screen center. For Task-1 single-task trials, the colored circle was then presented and

Figure 3

Mean reaction time on Task 1 and Task 2 as a function of stimulus onset asynchrony (SOA) in Experiments 1 and 2. Dashed lines represent baseline performance in the mixed single-task condition



remained until response or 2,500 ms had elapsed. For Task-2 single-task trials, the word was played and participants had up to 2,500 ms to respond before timing out. Then, a 300-ms visual message indicated whether the response was correct. For dual-task trials, the circle was presented, followed after the SOA by the auditory word. Then, two successive 300-ms messages indicated whether the Task-1 and Task-2 responses were correct. If no response to a task was detected, an additional 200-ms message stated that fact. The intertrial interval was 800 ms.

Results

We removed trials for which RT was below 100 ms or above 2,500 ms on Task 1 (single-task: 0.17%; dual-task: 0.17%) or Task 2 (single-task 2.17%; dual-task: 1.95%). Error trials were also removed from RT analyses. Figure 3 shows the resulting mean RTs. See also Table 1 for descriptive statistics.

Reaction Times and Error Rates

Task 1. The main effect of SOA was significant, $F(3, 69) = 4.99, p < .01, \eta_p^2 = 0.18$. Post hoc comparisons using the Bonferroni procedure showed a 44-ms RT1 increase from the longest SOA to the two intermediate SOAs, with no other significant comparisons.

Mean Task-1 error rate was relatively uninfluenced by SOA, $F(3, 69) = 1.53, p = .21, \eta_p^2 = 0.06$.

Semantic Task 2. RT2 slightly increased from the longest SOA to the shortest SOA, $F(3,69) = 3.33, p < .05, \eta_p^2 = 0.13$, yielding a mean PRP effect of only 25 ms. Mean Task-2 error rate was uninfluenced by SOA, $F(3, 69) = 2.00, p = .12, \eta_p^2 = 0.08$.

Probing For Bottleneck Bypassing

Dual-Task Costs. Dual-task costs were calculated as the RT difference between the shortest SOA and the mixed single-task trials. The mean dual-task cost was significant but only 34 ms on Task 2, $t(23) = 3.26, p < .01, d_z = 0.67$, and only 18 ms on Task 1, $t(23) = 1.44, p = .16, d_z = 0.30$. Such small dual-task costs are consistent with bottleneck bypassing.

Response

Reversal Rates. Response reversals should be frequent at short SOAs in case of bottleneck bypassing (because Task 2 would often win the race against the slow Task 1), but relatively rare in case of bottlenecking. Consistent with bottleneck bypassing, the rate of response reversals was much higher at short SOAs (e.g., 52.4% at the shortest SOA) than at the longest SOA (0.1%), $F(3, 69) = 118.34, p < .001, \eta_p^2 = 0.84$.

Simulations of IRI Distributions. We used the mixed single-task trials on Task 1 and Task 2 to simulate the IRI distributions that should occur on dual-task trials, at each SOA, for bottleneck bypassing as well as for bottlenecking. The question is whether the observed IRIs more closely match the predictions from bypassing or bottlenecking.

Bypassing. For each participant, we first paired each of the 48 mixed single-task trials

on Task 1 with each of the 48 mixed single-task trials on Task 2, resulting in 2,304 simulated dual-task trials. To simulate complete bottleneck bypassing, we then calculated the predicted IRI for each trial at a given SOA as follows: $IRI = SOA + RT2 - RT1$. These simulated data were then filtered exactly as with the real dual-task data, by removing outliers and error trials.

Bottlenecking. We also predicted the distribution of IRIs that would be observed if the tasks were performed serially, i.e., in the case of bottlenecking. Our simulation was based on the finding that the mean PRP effect is roughly equal to mean $RT1 - SOA - 300$ ms (Van Selst, Ruthruff, & Johnston, 1999). Applying this at the level of individual trials, we estimated the bottleneck delay as $RT1 - SOA - 300$ ms (note that this value could not go below zero). We simply added this bottleneck delay to the observed single-task RT2 for that simulated trial to obtain the predicted dual-task RT2.

Findings. Figure 4 (left panels) shows, for each SOA, the observed IRI distribution along with the predicted IRI distributions. When task overlap was very high (i.e., at the 15-ms and 65- ms SOAs), the observed distributions were consistently quite well-fitted by the distribution predicted by bottleneck bypassing. For instance, at the 15-ms SOA, the means did not statistically differ (-35 ms vs. -51 ms), $t(23) = 1.11, d_z = 0.23$. In contrast, the distributions predicted from bottlenecking provided very poor fits. For instance, at the 15-ms SOA, the difference between the observed and predicted means (-35 vs. 191 ms) was large, $t(23) = -12.13, p < .001, d_z = 2.48$. Note that, at long SOAs (i.e., at the 250-ms and

Table 1

Mean Reaction Time (RT), Mean Error Rate (ER), and Mean Rate of Response Reversals (RR), As a Function of Stimulus Onset Asynchrony (SOA) in Experiments 1 and 2.

Measure	Experiment 1 (Ping/Pong Task 2)				Experiment 2 (Haut/Bas Task 2)			
	SOA (ms)				SOA (ms)			
	15	65	250	1,500	15	65	250	1,500
VM Task 1								
RT1 (ms)	585	601	594	554	573	570	569	548
ER1 (%)	3.55	2.86	2.25	3.48	3.66	3.91	3.30	4.22
AV Semantic Task 2								
RT2 (ms)	535	529	512	510	584	568	535	531
ER2 (%)	1.41	0.80	1.06	0.44	0.35	0.26	0.52	0.00

1,500-ms SOAs), bypassing and bottlenecking make similar predictions. If participants tend to group responses together (e.g., Ulrich & Miller, 2008), there should be more IRIs near 0 ms than predicted by pure bypassing. This is indeed what happened at the 15-ms and 65-ms SOAs. The excess of trials near 0-ms could be explained by grouping on approximately 10% of trials; this tendency was likely encouraged by the similarity of RTs on Task 1 and Task 2 (554 ms vs 510 ms at the longest SOA)¹.

Discussion

In this PRP experiment, we wished to determine whether the central bottleneck can be bypassed with a Task 2 that is non-IM but very easy due to a strong semantic association. This semantic Task 2 involved saying “ping” when hearing “pong” and vice versa. The results showed converging evidence for bottleneck bypassing. First, the dual-task cost on Task 2 was very small: only 34 ms (PRP effect of 25 ms). Such a value is strikingly small given the mean long RT1 (584 ms); Van Selst et al. (1999), for example, reported a PRP effect of 352 ms with an unpracticed Task 1 that produced a similarly long mean RT1. Second, the rate of response reversals was much higher at short SOAs than at the longest

SOA. Third, the observed IRI distributions at the short SOAs of 15 ms and 65 ms (i.e., when processing overlap between Task 1 and Task 2 was very high) were more closely matched by the predictions from bypassing than by the predictions from bottlenecking. Our stimuli and responses were not only semantically associated but are also frequently paired together in the compound noun ping-pong. Indeed, single-task RTs were shorter for ping-pong (464 ms) than pong-ping (538 ms), $t(23) = -7.40$, $p < .001$, $d_z = -1.51$. If this factor is critical, then hearing “ping” and saying “pong” should be processed automatically (i.e., bottleneck bypassing) while the opposite association (which forms a nonword) should not (i.e., bottlenecking). Inconsistent with this prediction, both associations yielded similar dual-task costs (40 ms for ping-pong, 28 ms for pong-ping), $t(23) = 1.13$, $p = .27$, $d_z = 0.2$, and similar PRP effects (26 ms for ping-pong, 25 ms for pong-ping), $t(23) < 1$. Both associations also yielded high rates of response reversals at the shortest SOA (61.0% for ping-pong, 43.8% for pong-ping), $t(23) = 5.62$, $p < .001$, $d_z = 1.15^2$. These data suggest that bottleneck bypassing does not depend on previous exposure to a particular order.

EXPERIMENT 2

The ping-pong task from Experiment 1 is not IM because merely echoing the stimulus would always produce an error. A peculiarity of this task, however, is that it involves onomatopoeia with nearly similar sounds ([pɪŋ] and [pɔŋ]). One could argue that it is nearly IM in that the response is similar to the stimulus. In Experiment 2, we wished to establish whether bottleneck bypassing could also be observed with a semantic task that is undoubtedly non-IM. To this end, we devised a semantic task composed of two antonyms: “haut” and “bas” (French for “high” / “low”). Because the stimuli and responses have highly distinctive sounds ([ʰo] and [ba]), they cannot be IM compatible. Furthermore, unlike like the ping-pong task, the words “haut” and “bas” do not form a frequently-used compound noun.

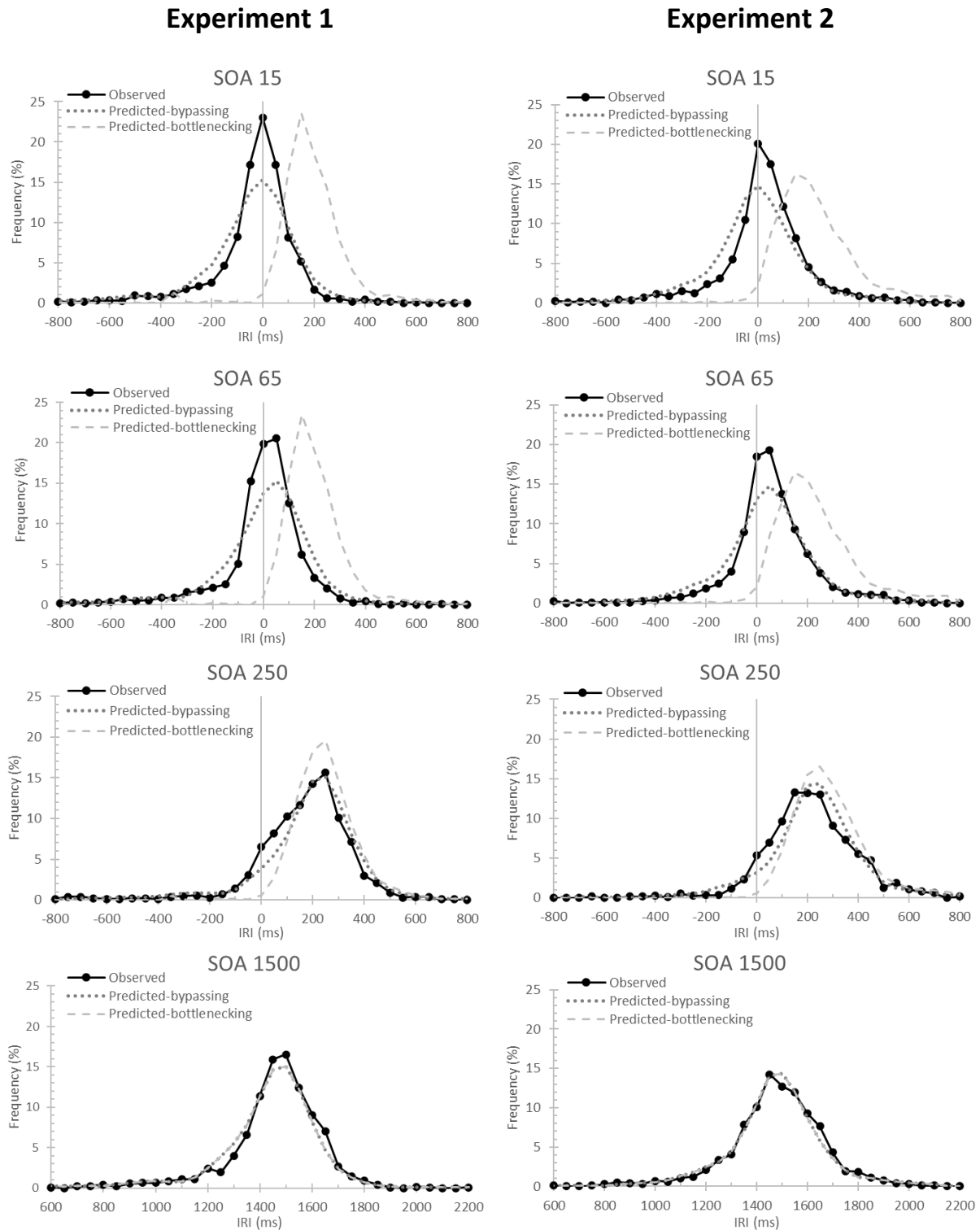
To probe for bottleneck bypassing on the semantic haut-bas Task 2, we used the exact

¹ The observed tendency to group responses hinders the analysis of RT1:RT2 correlations. Normally, bottleneck bypassing clearly predicts weak RT1:RT2 correlations because the tasks are performed independently. However, bypassing followed by response grouping would necessarily produce very high correlations. To address this issue, we first identified participants who grouped and participants who did not. For the short SOAs (15-ms and 65-ms), we estimated how often each participant produced IRIs suggestive of grouping (i.e., -25 ms to 25 ms) beyond that predicted from bypassing. We then carried out a median split on this excess, which was 0.08% for infrequent groupers and 13.9% for frequent groupers, $t(22) = 5.01$, $p < .001$, $d_z = 2.04$. Consistent with bypassing, the coefficient of correlation for non-groupers was weak overall (.27) and the main effect of SOA was not significant, $F(3, 33) < 1$, $\eta_p^2 = 0.08$; the correlations were .30, .27, .31, and .19 at the SOAs of 15 ms, 65 ms, 250 ms, and 1,500 ms, respectively. This is less than what Maquestiaux et al. (2020) reported for the case of bottlenecking with a non-IM task (~.57 at the short SOAs) but comparable to what they reported for the case of bypassing with an IM task (~.32). Meanwhile frequent groupers showed a sizable correlation at short SOAs (.43).

² This difference can be explained by the fact noted above that baseline single-task RT2 was much faster for ping-pong, $t(23) = -7.40$, $p < .001$, $d_z = -1.51$, increasing the opportunity for it to be produced before R1.

same methodology (aside from the sounds) and indicators as Experiment 1.

Figure 4
Observed vs. predicted distributions of inter-response intervals (IRIs) at each stimulus onset asynchrony (SOA), for Experiment 1 and Experiment 2



Method

Participants. A new sample of 24 psychology students participated ($M = 20.1$ years old, $SD = 2.2$ years; 20 women).

Stimuli The auditory Task-2 stimuli were the spoken words “haut” or “bas”.

Results

We removed trials for which RT was below 100 ms or above 2,500 ms on Task 1 (single-task: 0.09%; dual-task: 0.15%) or Task 2 (single-task: 0.43%, dual-task: 0.56%). Error trials were removed from RT analyses. The results are shown in Figure 3 and Table 1.

Reaction Times and Error Rates

Task 1. SOA did not influence RT1, $F(3,69) = 2.68$, $p < 1$, $\eta_p^2 = 0.10$, or Task-1 error rate, $F(3,69) < 1$.

Semantic Task 2. RT2 modestly increased from the longest SOA to the shortest SOA, $F(3,69) = 12.64$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.36$, yielding a small mean PRP effect of only 53 ms. Mean Task-2 error rate was uninfluenced by SOA, $F(3,69) = 2.12$, $p = .11$, $\eta_p^2 = 0.08$.

Probing for Bottleneck Bypassing

Dual-Task Costs. The mean dual-task cost was only 50 ms on Task 2, $t(23) = 6.70$, $p < .001$, $d_z = 1.37$, which is small given the long RT1, and only 11 ms on Task 1, $t(23) = 1.01$, $p = .32$, $d_z = 0.21$.

Response Reversal Rates. Consistent with bottleneck bypassing, the rate of response reversals was higher at short SOAs (e.g., $M = 37.4\%$ at the shortest SOA) than at the longest SOA ($M = 0.0\%$), $F(3,69) = 50.55$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.69$.

Simulations of IRI Distributions. The predicted IRI distributions of bottleneck bypassing and bottlenecking (simulated just as in Experiment 1) are shown for each SOA in Figure 4 (right panels). At the two short SOAs, the observed distributions closely resemble the predicted distributions of bottleneck bypassing. For instance, at the 15-ms SOA, the difference between the observed and predicted means was only 36 ms (25 ms vs. -11 ms), $t(23) = 3.96$, $p < .001$, $d_z = 0.81$. In contrast, when comparing the observed distributions and the predicted distributions of bottlenecking at the two short SOAs, the differences were much larger. For instance, at the 15-ms SOA, the difference between the

observed and predicted means was of 209 ms (25 ms vs. 234 ms), $t(23) = -9.51$, $p < .001$, $d_z = 1.94$. As in Experiment 1 at the 15-ms SOA and the 65-ms SOA, the excess of trials centered near 0- ms suggests a tendency to group responses on approximately 5-10% of trials³.

Discussion

This experiment assessed the generality of the findings reported in Experiment 1. In particular, we relied on a semantic Task 2 (“haut” / “bas”) that is clearly non-IM (in contrast to the ping-pong Task 2 used in Experiment 1, which could be argued to be nearly IM). This resulted in a slight RT slowing of 33 ms relative to Experiment 1 (534 vs. 501 ms in mixed single-task trials), $t(46)$, 1.09 , $p = .28$, $d_z = 0.32$. Nevertheless, the results again provided converging evidence for bottleneck bypassing: a small dual-task cost on Task 2 (50 ms; PRP effect of 53 ms) given the long mean RT1 (565 ms), a high rate of response reversals at the shortest SOA (37.4%), and a close match between the observed IRI distributions and the distributions predicted bottleneck bypassing. In sum, these findings replicate those from Experiment 1, and verify that the bypassing was not due to co-occurrence in language or to near IM compatibility (similar sounds).

General Discussion

We wished to examine why bottleneck bypassing occurs with IM tasks; that is, does bypassing depend specifically on IM compatibility or, in contrast, does it merely depend on task easiness? We addressed this question in two PRP experiments. Specifically, we assessed whether a semantically easy but non-IM Task 2 – the ping-pong task in Experiment 1, the haut-bas task in Experiment 2 – could operate automatically, thereby entirely bypassing the central bottleneck.

³ As in Experiment 1, we separately analyzed participants who grouped and those who did not group. Consistent with bottleneck bypassing, the infrequent groupers showed a weak RT1:RT2 correlation (.22) and the main effect of SOA was not significant, $F(3,33) < 1$, $\eta_p^2 = 0.06$; the correlations were .20, .26, .27, and .16 at the SOAs of 15, 65, 250, and 1,500 ms, respectively.

In both experiments, we found converging evidence of bottleneck bypassing: very small dual-task cost on the semantic Task 2, high rate of response reversals at the shortest SOA, and simulation analyses consistent with parallel central processing.

Can Task Speed Account for Automaticity?

Having demonstrated that easy, non-IM tasks can entirely bypass the central bottleneck, it becomes natural to wonder what exactly enables bottleneck bypassing. One plausible factor is the speed of the semantic Task 2. However, this task was not particularly fast neither in Experiment 1 (501 ms in mixed single-task trials) nor in Experiment 2 (534 ms). As a stricter test of the speed hypothesis, we examined the indicators of bottleneck bypassing as a function of participants' baseline RT2. If speed truly is the key, then we should observe greater bypassing for participants who were the fastest on the semantic Task 2. To evaluate this prediction, we first carried out a median split on baseline RT2 (as measured in mixed single-task trials), separately for each experiment. After pooling across the two fast subgroups ($n = 12$ each) and the two slow subgroups ($n = 12$ each), we then compared the resulting fast and slow groups ($n = 24$ each) on the indicators of bottleneck bypassing. Baseline RT2 was, of course, shorter for the fast subgroup than the slow subgroup: 439 vs. 596 ms, $t(46) = -7.47$, $p < .001$, $d_z = -2.16$. Nevertheless, the fast and slow subgroups both produced small dual-task costs on Task 2 (only 32 and 52 ms), $t(46) < 1$, $d_z = -0.49$. Also, their rates of response reversals at the short SOAs (33.8 and 27.1%) did not differ, $t(46) = 1.49$, $p = .14$, $d_z = 0.43$. Because even the slowest participants bypassed routinely, speed does not appear to be the key enabler of bottleneck bypassing. Similarly, as noted in Experiment 1, the ping-pong association produced faster RTs than pong-ping, yet did not yield more evidence of automaticity. In our view, processing speed must at least be correlated with automaticity and bypassing overall, but is neither necessary nor sufficient. It is not necessary because we found dual-task automaticity even for tasks and participants that were not particularly fast. Processing speed is also not sufficient. For instance, in our previous aging studies, we

found that older adults were rarely bypassing even when younger adults with the same speed could do so routinely (Maquestiaux, Laguë-Beauvais, Ruthruff, Hartley, & Bherer, 2010; Maquestiaux, Didierjean, Ruthruff, Chauvel, & Hartley, 2013; Maquestiaux & Ruthruff, 2021; for a review, see Maquestiaux, 2016).

Is Task Preparation Paramount?

If neither ideomotor compatibility per se nor task speed are the keys to enabling bottleneck bypassing, then what is? We conjecture that what matters the most is task preparation, specifically the ease with which people can load the S-R mapping into working memory (for evidence that the availability of working memory helps to reduce dual-task interference across practice, see Schubert & Strobach, 2018). Getting ready for the semantic task might be especially easy given the very strong association between the words “ping” and “pong” and between “haut” and “bas”. Moreover, intermixing single-task trials on Task 2 with PRP dual-task trials may have further encouraged pre-loading of Task-2 S-R mapping into working memory. Note that, in classic PRP studies, which have no such single-task trials and always present Task 1 first, participants may tend to neglect advance preparation of Task 2. They might instead load up on Task 1 until finished, and then need to use central attention to boost Task-2 preparation.

This preparation account can also explain why the central bottleneck can be bypassed following extensive practice (Maquestiaux, Laguë-Beauvais, Ruthruff, & Bherer, 2008; Maquestiaux, Ruthruff, Defer, & Ibrahim, 2018): with practice, people learn to prepare more efficiently. Although this preparation account seems promising (see also Maquestiaux & Ruthruff, 2021), further research is needed to evaluate it more directly.

The spatial-verbal account proposed by Halvorson and Hazeltine (2015, 2019; for a similar proposal for highly-practiced tasks, see Maquestiaux et al., 2018) offers an alternative account of our findings. According to this account, dual-task interference is minimal when the two task representations reside within distinct working-memory subsystems. As this is plausible for our tasks (e.g., the visuospatial sketchpad for the VM Task 1 and

the phonological loop for the semantic AV Task 2), we cannot discard the spatial-verbal account. One difficulty in testing the spatial-verbal account, however, is that there is no accepted test of where task representations are held. It is unclear, for example, whether our participants did or did not use any verbal codes (e.g., “blue” and “green”) when selecting manual responses to our colored stimuli. In any case, we can now safely conclude that ideomotor compatibility is not necessary for enabling bypassing.

Conclusions

The present study demonstrated a rare exception to the central bottleneck, made possible by using easy but non-IM tasks (i.e., semantic associates). This demonstration is based on two experiments, each using multiple SOAs and multiple converging indicators of bypassing: small dual-task cost on Task 2 (as well as on Task 1), high rates of response reversals, and high overlap between observed and predicted IRI distributions. These findings suggest IM tasks bypass the central bottleneck (Maquestiaux et al., 2020) not because of ideomotor compatibility per se but because of task easiness. Because our easy semantic tasks were not particularly fast, task speed is not sufficient to explain the findings. Instead, we conjecture that the key to enabling bottleneck bypassing is task preparation, in particular the ease with which people load the S-R mapping into working memory. Open Access The original data are publicly available at <https://sites.google.com/site/frmaquestiaux/home/data-sharing>. The experiment was not pre-registered.

References

- Anderson, J. R., Taatgen, N. A., & Byrne, M. D. (2005). Learning to achieve perfect timesharing: Architectural implications of Hazeltine, Teague, and Ivry (2002). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *31*, 749-761.
- Fischer, R., & Plessow, F. (2015). Efficient multitasking: parallel versus serial processing of multiple tasks. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1-11.
- Greenwald, A. G., & Shulman, H. G. (1973). On doing two things at once: II. Elimination of the psychological refractory period effect. *Journal of Experimental Psychology*, *101*, 70-76.
- Halvorson, K. M., Ebner, H., & Hazeltine, E. (2013). Investigating perfect timesharing: The relationship between IM-compatible tasks and dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*, 413-432.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2015). Do small dual-task costs reflect ideomotor compatibility or the absence of crosstalk? *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*, 1403-1409.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2019). Separation of tasks into distinct domains, not set-level compatibility, minimizes dual-task interference. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1- 10.
- Janczyk, M., & Kunde, W. (2020). Dual tasking from a goal perspective. *Psychological Review*, *127*, 1079-1096.
- Koch, I., Poljac, E., Müller, H., & Kiesel, A. (2018). Cognitive structure, flexibility, and plasticity in human multitasking—An integrative review of dual-task and task-switching research. *Psychological Bulletin*, *144*, 557-583.
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., & Proctor, R. W. (2005). Dual-task performance with ideomotor-compatible tasks: Is the central processing bottleneck intact, bypassed, or shifted in locus? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 122-144.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W., & Allen, P. A. (2002). Ideomotor compatibility in the psychological refractory period effect: 29 years of oversimplification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 396-409.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W., & Ruthruff, E. (2003). Still no evidence for perfect timesharing with two ideomotor-compatible tasks: A reply to Greenwald (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 1267-1272.

- Maquestiaux, F. (2012). The simultaneity of mental acts: Contributions from PRP procedure [La simultanéité des actes psychiques : apports du protocole PRP]. *Topics in Cognitive Psychology [L'Année Psychologique]*, *112*, 631-663.
- Maquestiaux, F. (2016). Qualitative attentional changes with age in doing two tasks at once. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*, 54-61.
- Maquestiaux, F., Didierjean, A., Ruthruff, E., Chauvel, G., & Hartley, A. A. (2013). Lost ability to automatize task performance in old age. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*, 1206-1212.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., & Bherer, L. (2008). Bypassing the central bottleneck after single-task practice in the psychological refractory period paradigm: Evidence for task automatization and greedy resource recruitment. *Memory & Cognition*, *36*, 1262-1282.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., Hartley, A. A., & Bherer, L. (2010). Learning to bypass the central bottleneck: Declining automaticity with advancing age. *Psychology and Aging*, *25*, 177-192.
- Maquestiaux, F., Lyphout-Spitz, M., Ruthruff, E., & Arexis, M. (2020). Bottleneck bypassing and ideomotor compatibility: Ideomotor compatibility enables automatic response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, *27*, 742-750.
- Maquestiaux, F., & Ruthruff, E. (2021). Testing the over-reliance on central attention (ORCA) hypothesis: Do older adults have difficulty automatizing especially easy tasks? *Journal of Experimental Psychology: General*. Advance online publication. <http://dx.doi.org/10.1037/xge0001020>
- Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defer, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization: The key role of sensory motor modality compatibility. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*, 752-772.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological Bulletin*, *116*, 220-244.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., Van Selst, M., Whitsell, S., & Remington, R. (2003). Vanishing dual-task interference after practice: Has the bottleneck been eliminated or is it merely latent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 280-289.
- Schubert, T., & Strobach, T. (2018). Practice-related optimization of dual-task performance: Efficient task instantiation during overlapping task processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*, 1884-1904.
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: Dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular phone. *Psychological Science*, *12*, 462-466.
- Ulrich, R., & Miller, J. (2008). Response grouping in the psychological refractory period (PRP) paradigm: Models and contamination effects. *Cognitive Psychology*, *57*, 75-121.
- Van Selst, M. A., Ruthruff, E., & Johnston, J. C. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 1268-1283

Discussion

Dans l'étude 2 de la thèse, l'automatisme des tâches sémantiques a été testée au moyen de deux expériences PRP de double tâche. L'objectif a été de déterminer si la compatibilité idéomotrice était une exception isolée au goulet d'étranglement central, ou si d'autres tâches pourraient également contourner cette limitation robuste pour peu qu'elles soient faciles à préparer, c'est-à-dire à charger et à activer en mémoire de travail. Nous avons donc manipulé des tâches dont les associations stimulus-réponse étaient préalablement ancrées en mémoire à long terme – les mots PING et PONG dans l'expérience 1, et les mots HAUT et BAS dans l'expérience 2. L'intérêt de ces tâches est double. Leur facilité est garantie par la préexistence de leurs associations stimulus-réponse en mémoire, mais elles ne sont pas idéomotrices pour autant puisque répéter le mot entendu (e.g., répondre PING au mot PING) constituerait une erreur. En dépit de leur caractère non-idéomoteur, nos tâches sémantiques ont toutes deux conduit au déploiement d'un traitement central parallèle. Les résultats des deux expériences convergent effectivement vers la conclusion que les réponses de tâches sémantiques peuvent être sélectionnées automatiquement, c'est-à-dire sans recourir aux ressources attentionnelles centrales, éliminant ainsi le goulet d'étranglement central.

Cette seconde étude atteste en premier lieu de l'automatisme de tâches non-idéomotrices. Nous savons désormais que la compatibilité idéomotrice n'est pas la clé de l'élimination de l'interférence en double tâche, et que cette clé est par conséquent une caractéristique plus générale : la préparation ou chargement et activation en mémoire de travail des représentations de la tâche. De fait, les tâches idéomotrices, souvent considérées comme autorisant une élimination du goulet d'étranglement central (mais voir, e.g., Lien et al., 2002), ne sont pas si spéciales et feraient plutôt partie d'une catégorie de tâches dont la caractéristique commune n'a pas encore été identifiée. Il semble en effet que la raison pour laquelle les tâches idéomotrices peuvent être traitées automatiquement est une caractéristique commune à d'autres tâches, telles que les tâches sémantiques manipulées dans la présente étude. Par quel(s) mécanisme(s) cognitif(s) l'automatisme des tâches idéomotrices et sémantiques est-elle soutenue ?

Un premier indice fourni par nos deux expériences est qu'automatisme et vitesse de traitement ne vont pas de pair. Nos tâches 2 sémantiques étaient relativement lentes (en condition entremêlée : 501 ms pour la tâche PING-PONG et 534 ms pour la tâche HAUT-BAS), et des analyses complémentaires ont démontré qu'il n'y a pas d'influence significative de la

vitesse de traitement sur les coûts de double tâche sur la tâche 2. Tous nos participants, indépendamment de leur vitesse de réponse, sont parvenus à éliminer le goulet d'étranglement central. Cette observation est relativement contre-intuitive dans la mesure où la majorité des théories de l'automatisme considèrent qu'un traitement automatique est un traitement rapide (e.g., Anderson, 1992 ; Carlson & Lundy, 1992 ; Logan, 1988 ; Schneider & Shiffrin, 1977). Or, nos multiples indicateurs offrent un solide faisceau de preuves en faveur de l'automatisme de nos tâches sémantiques malgré leur vitesse d'exécution supérieure à celle des rares conditions ayant permis l'observation de faibles coûts de double tâche dans la littérature (e.g., TR2 était inférieur à 500 ms dans l'étude 1 de Maquestiaux et al., 2020). Il ne s'agit pas ici de nier l'importance de la vitesse de traitement. Cependant, nos résultats invitent à questionner davantage le lien qui unit la vitesse de traitement à l'automatisme. Il serait par exemple intéressant d'augmenter le nombre d'associations sémantiques. Ici, deux mots ont été utilisés dans chaque expérience, pour former deux paires (PING-PONG et PONG-PING dans l'expérience 1 ; HAUT-BAS et BAS-HAUT dans l'expérience 2). Qu'aurions-nous observé si nous avions utilisé plus de paires ? Nous savons que les tâches sémantiques sont automatiques, mais augmenter le nombre de paires engendrerait un ralentissement de la sélection des réponses à la tâche 2 sémantique à cause de l'augmentation du nombre de réponses possibles. L'automatisme des tâches sémantiques résisterait-elle à ce ralentissement du traitement central ?

Si le traitement central parallèle observé dans les études 1 et 2 ne provient ni de la compatibilité idéomotrice ni de la vitesse de traitement, à quoi est-il dû ? La réponse à cette question pourrait nous permettre de généraliser l'élimination du goulet d'étranglement central à des tâches arbitraires, même sans pratique. Sur la base de nos observations, nous proposons que la caractéristique commune à la tâche idéomotrice de l'étude 1 et aux tâches sémantiques de cette étude est la facilité avec laquelle les représentations des tâches peuvent être chargées en mémoire de travail. En effet, le mapping stimulus-réponse des tâches est facile à précharger en mémoire de travail, dans la mesure où le stimulus fait directement appel à la réponse associée (e.g., il n'est pas nécessaire de devoir dire PONG pour que ce mot soit activé en mémoire de travail lorsque le mot PING est entendu), et ce préchargement permettrait de mieux traiter les tâches dès leur apparition. Par extension, cela suppose que la limitation centrale habituellement rencontrée dans la littérature serait essentiellement due à une impossibilité de charger les représentations des tâches en amont de l'essai, ou à un mauvais chargement de ces dernières. Concrètement, nous émettons l'hypothèse que la limitation centrale résulterait d'un manque de préparation et qu'elle prendrait sa source en amont de la performance en double tâche.

Étude 3 – Test de l’hypothèse de la négligence préparatoire

Objectifs et prédictions

Dans cette troisième étude de la thèse, nous avons formalisé et testé l’hypothèse émise sur la base des expériences menées dans les études 1 et 2 : le traitement central sériel provient d’une forme de négligence à se préparer efficacement aux tâches, en particulier à la tâche la plus ralentie dans le contexte du protocole PRP (i.e., la tâche 2). Selon cette hypothèse nouvelle, la limitation centrale provient d’une activation insuffisante en mémoire de travail des représentations de la tâche 2. Cette hypothèse, que nous avons nommée hypothèse de la négligence préparatoire (*Preparation-Neglect hypothesis*), propose que le goulet d’étranglement central habituellement rencontré dans la littérature serait essentiellement dû à un manque de préparation de la tâche 2. Nous supposons que certaines caractéristiques du protocole PRP induisent un manque de préparation : l’ordre de présentation des stimuli (S1 puis S2), la consigne accentuant la vitesse de réponse à la tâche 1, et les feedbacks sur le TR moyen donnés uniquement sur la tâche 1. Cette négligence induite par le protocole PRP de la tâche 2 favoriserait l’émergence d’effets PRP conséquents au niveau comportemental, sous-tendus par un délai dans l’exécution des opérations centrales de la tâche 2 au niveau cognitif (i.e., une limitation centrale). L’hypothèse de la négligence préparatoire propose aussi qu’un manque de préparation est responsable de la présence de limitations centrales dans d’autres contextes de double tâche, par exemple dans des contextes de double tâche avec présentation simultanée des stimuli et des consignes favorisant une égale priorité aux deux tâches (e.g., Halvorson et al., 2013).

Afin de tester cette hypothèse novatrice de la négligence préparatoire, nous avons manipulé des tâches complètement nouvelles, c’est-à-dire des tâches n’ayant jamais été pratiquées et dont les associations stimulus-réponse sont arbitraires. Précisément, la tâche 1 auditivo-vocale consistait à répondre HAUT à l’écoute d’un son aigu (1 800 Hz) et BAS à l’écoute d’un son grave (400 Hz). La tâche 2 visuo-manuelle nécessitait quant à elle de presser la touche E du clavier lorsqu’un triangle apparaissait au centre de l’écran, et la touche P lorsqu’il s’agissait d’un cercle. Le caractère arbitraire de ces tâches ainsi que l’absence de pratique intensive fait prédire de l’interférence en double tâche à toutes les théories majeures du domaine (e.g., Meyer & Kieras, 1997a, 1997b ; Pashler, 1994 ; Schumacher et al., 2001). Ces deux tâches

ont par ailleurs été employées dans la condition contrôle de l'étude 1, ce qui vient confirmer qu'à elles seules ces tâches ne permettent pas d'éliminer le goulet d'étranglement central. Obtenir du traitement central parallèle avec de telles tâches constituerait donc une preuve certaine du rôle de la préparation dans l'allocation des ressources attentionnelles centrales.

Quatre-vingt-seize participants ont réalisé les deux tâches précédemment présentées sur le même nombre d'essais : 384 essais expérimentaux. Ces 96 participants ont cependant été répartis dans quatre expériences dont nous avons manipulé la procédure. La table 2 récapitule les principales différences entre les expériences.

Table 1

Récapitulatif des types d'essais utilisés pour chacune des expériences de l'étude 3

		Boost préparatoire (introduction d'essais entremêlés pour la Tâche 2)	
		Non	Oui
Pratique préalable de la Tâche 2	Non	Expérience 1	Expérience 4
	Oui	Expérience 3	Expérience 2

Note. La pratique préalable de la tâche 2 renvoie aux essais de simple tâche présentés avant les essais classiques de double tâche (PRP), tandis que les essais entremêlés correspondent aux essais de tâche 2 mélangés aléatoirement parmi les essais PRP de double tâche.

L'expérience 1 est une expérience dont l'objectif est de répliquer ce que quelques centaines d'études PRP ont observé : des effets d'interférence élevés entre deux tâches arbitraires et attribués à des interférences centrales (e.g., Pashler & Johnston, 1989). Dans l'expérience 1, 24 participants ont réalisé 384 essais classiques de double tâche PRP, en accord avec le protocole classique PRP. Dans l'expérience 2, un nouveau groupe de participants a d'abord effectué 96 essais de simple tâche pour la tâche 2 uniquement, puis 192 essais de double tâche classiques parmi lesquels ont été glissés 96 essais simples de tâche 2.

Si le manque de préparation est véritablement à l'origine de l'interférence en double tâche dans les expériences PRP, alors l'expérience 1 devrait mener à l'observation d'un goulet d'étranglement central évident, étayé par un solide effet PRP et confirmé par nos indicateurs complémentaires (i.e., corrélations des TR, distributions d'IRI observées et simulées). La procédure de l'expérience 2 favorise la préparation de la seconde tâche en familiarisant davantage les participants aux associations stimulus-réponse de la tâche 2 d'une part (grâce à

la pratique³³ préalable de la tâche 2 en condition de simple tâche) et incitant les participants à précharger ces dernières en mémoire de travail d'autre part (les essais de double tâche étant mêlés à des essais de tâche 2 seule, il est nécessaire d'anticiper l'apparition des deux tâches pour être efficace). Ainsi, cette procédure devrait permettre aux opérations centrales des deux tâches d'être traitées en parallèle. Les expériences 3 et 4 ont été ajoutées suite à des critiques émises lors de la soumission pour publication des expériences 1 et 2.³⁴ L'une des critiques est que la procédure de l'expérience 2 ne permet pas de dissocier les effets respectifs de deux types d'essais : les 96 essais de simple tâche présentés avant les essais entremêlant essais PRP et essais simples, vs. les 96 essais de simple tâche entremêlés aléatoirement avec les essais PRP. Ces expériences complémentaires 3 et 4 ont servi à examiner les effets respectifs de la pratique en simple tâche et des essais de simple tâche entremêlés aux essais de double tâche. Les 24 participants de l'expérience 3 ont réalisé 288 essais de double tâche précédés de 96 essais de pratique de la tâche 2 en simple tâche. Enfin, les 24 derniers participants ont suivi la procédure de l'expérience 4, pour laquelle 128 essais de tâche 2 étaient mêlés à 256 essais de double tâche.

L'avantage du plan expérimental de l'étude 3 tient au nombre fixe d'essais expérimentaux sur la tâche 2 : 384 au total. Dans chaque expérience, les participants ont donc réalisé le même nombre d'essais de pratique de la tâche 2. De notre point de vue, ce nombre d'essais est très faible comparativement au nombreux essais de pratique répartis sur plusieurs sessions dans les études PRP visant à éliminer la limitation centrale (e.g., plus de 10 000 dans l'étude de Maquestiaux et al., 2013 ; 13 824 pour Van Selst et al., 1999).

³³ Le terme pratique est ici utilisé pour désigner la réalisation de quelques essais sans viser l'automatisation de la tâche, contrairement aux longues sessions de pratique évoquées dans le Chapitre 3.

³⁴ Ces deux expériences faisaient partie de notre projet initial, mais nous n'avions présenté que les expériences 1 et 2 dans notre première version du manuscrit. Nous remercions donc les rapporteurs qui nous ont suggéré d'ajouter les expériences 3 et 4 et ainsi d'enrichir notre étude.

Uncorking the Central Bottleneck: Even Novel Tasks Can Be Performed Automatically

MANUSCRIPT IN PRESS AT *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*

*Morgan Lyphout-Spitz*¹, *François Maquestiaux*², *Eric Ruthruff*³, & *Steeven Chaloyard*¹

¹*Université de Franche-Comté*

²*Université de Rouen Normandie*

³*University of New-Mexico*

Can people perform two novel tasks in parallel? Available evidence and prevailing theories overwhelmingly indicate that the answer is no, due to stubborn capacity limitations in central stages (e.g., a central bottleneck). Here we propose a new hypothesis, which suggests otherwise: people are capable of fully parallel central processing (i.e., bypassing the central bottleneck), yet often fail to do so mainly due to preparation neglect. This preparation-neglect hypothesis was evaluated in four dual-task experiments pairing novel tasks (Task 1 and Task 2) using arbitrary stimulus-response mappings. Experiment 1, using a classic psychological refractory period (PRP) procedure, replicated the finding of dozens of previous PRP studies: none of the participants bypassed the bottleneck, instead exhibiting large dual-task interference on Task 2 (445 ms). In Experiment 2, the same dual-task PRP trials were randomly intermixed with single-task trials on Task 2, to boost preparation on that task. Here, nearly half the sample of participants bypassed the central bottleneck, exhibiting small dual-task interference on Task 2 (48 ms). Two additional experiments showed that initial practice does not by itself enable bottleneck bypassing, but boosting preparation of Task 2 (via intermixing single-task trials of Task 2) does. We conclude that, when properly prepared, people are capable of far more dual-task automaticity than was previously believed.

Keywords

Attention, automaticity, central bottleneck, dual-task interference, preparation

Public significance

- This study examined the source of the processing limitations that people generally encounter when attempting to perform two tasks at the same time.
- We demonstrated that novel tasks, when properly prepared, can be performed entirely automatically (i.e., without recruiting attentional resources), thereby bypassing the processing limitations.
- This finding of dual-task automaticity is striking given that the tasks were neither particularly easy nor previously trained.
- The key enabler of dual-task automaticity was not practice but boosting advanced preparation of the to-be-performed tasks.

Dual-task interference, manifested by slowed reaction times (RTs) or increased mistakes, usually arises when individuals attempt to simultaneously perform two novel tasks (i.e., unpracticed tasks with arbitrary stimulus-response [S-R] mappings). Despite controversies, almost all prevailing accounts agree that the problem lies within the central processes that fall between sensory encoding and motor execution, such as response selection (e.g., Pashler, 1984; Pashler & Johnston, 1989), memory retrieval (e.g., Carrier & Pashler, 1995; but see Green, Johnston, & Ruthruff, 2011), or mental rotation (Ruthruff, Miller, & Lachman, 1995). Specifically, the problem has been attributed to capacity limitations in central processing stages (Navon & Miller, 2002; Pashler, 1994; Tombu & Jolicoeur, 2003), and/or crosstalk between central task representations due to shared conceptual similarities (Logan & Schulkind, 2000; Navon & Miller, 1987) or due to shared working-memory subsystems (Halvorson & Hazeltine, 2015, 2019; Hazeltine et al., 2006; Maquestiaux et al., 2018).

In one dominant account, Pashler (1994) hypothesized a stubborn cognitive limitation, called a central bottleneck, that prevents central processing (e.g., selecting the appropriate response to the current stimulus) from simultaneously operating on two tasks. At the other extreme, Meyer and Kieras (1997a, 1997b) proposed that central limitations reflect a strategic postponement of central stages. However, even these authors and their collaborators implied that central limitations are in force with unpracticed tasks (the first few sessions), prior to proceduralization (Schumacher et al., 2001). These prevailing models agree that, without extensive practice, dual-task processing is inefficient due to constraints in central processes. The empirical data appear to support this claim, as large dual-task costs are nearly universally obtained with novel tasks (see, e.g., Janczyk & Kunde, 2020; Koch, Poljac, Müller, & Kiesel, 2018; Maquestiaux, 2012, 2017).

In the present article, we tested the neglected possibility of fully parallel central processing with novel tasks. Fully parallel central processing means that while one is performing the central operations for one task, all the central operations required by another task can operate in parallel. In other words, the tasks are automatic in that they can operate “without recruiting attention” (for other meanings of automaticity, such as uncontrolled or autonomous, see Moors & De Houwer, 2006). Below, for the sake of simplicity, we will use the shorthand *bottleneck bypassing*.

Bottleneck bypassing has been reported in only a few rare exceptions, such as highly practiced tasks

(e.g., thousands of trials; Maquestiaux et al., 2008, 2018; Ruthruff et al., 2006) or those involving specialized systems (e.g., eye movements; Pashler et al., 1993) or extremely easy tasks that might not require any central processing (e.g., ideomotor compatibility, Maquestiaux et al., 2020; semantic compatibility, Lyphout-Spitz et al., 2022). But bypassing is currently not believed to be possible for novel tasks. We use the term *novel tasks* to refer to tasks that (a) a participant has not been extensively practiced and (b) do not benefit from associations previously established between the stimuli and responses (as in moving in the direction of an arrow). A majority of dual-task studies have used novel tasks.

Of course, numerous studies with novel tasks have demonstrated partially automatic processing of certain specific central operations such as visual word recognition (Ruthruff et al., 2006), response activation (Hommel, 1998; Janczyk et al., 2018), or motoric aspects of central operations (Hartley et al., 2015). But even these studies still reported substantial dual-task costs indicative of central interference (e.g., bottlenecks) and did not claim to have observed bottleneck bypassing (in fact, they often explicitly assume a central bottleneck). Studies demonstrating bottleneck bypassing with novel tasks are essentially non-existent.

As unlikely as bottleneck bypassing may appear given previous work, a recent accumulation of hints from studies with easy tasks (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020; Maquestiaux & Ruthruff, 2021) suggests otherwise. Concretely, we hypothesize that dual-task interference often results from *preparation neglect*, rather than a true capacity limitation in central processing, and that central bottlenecks can be bypassed merely by boosting task preparation.

The Preparation-Neglect Hypothesis

The present preparation-neglect hypothesis was inspired, albeit indirectly, by recent studies demonstrating unexpectedly high amounts of parallel central processing with very easy tasks (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020). We began to suspect that this parallel processing was enabled by one uncommon aspect of the methodology – intermixing single-task trials within dual-task trials. These recent studies, described below, relied on variants of the classic psychological refractory period (PRP) procedure, in which participants perform two tasks (Task 1 and Task 2) as quickly as possible, with the Task-1 stimulus (S1) and Task-2 stimulus (S2) separated by a stimulus onset asynchrony (SOA) that randomly

varies from very short (e.g., 15 ms) to very long (e.g., 1,500 ms). The fact that Task 1 always precedes Task 2 might encourage participants to neglect Task 2. However, this neglect might be counteracted by intermixing single-task trials of Task 2.

One such study investigated bottleneck bypassing with ideomotor (IM)-compatible tasks (i.e., pressing a left key when an arrow points left or a right key when it points right; Maquestiaux et al., 2020). This study reported negligible dual-task costs consistent with fully parallel central processing. An IM Task 2 could operate in parallel even with a non-IM Task 1.

IM tasks are very easy due to the very high conceptual overlap between the stimulus and the response (e.g., pressing a left key when an arrow points left). But task easiness could not by itself explain bottleneck bypassing in Maquestiaux et al. (2020), since previous PRP studies with IM tasks did not report such evidence (e.g., Lien et al., 2002). One salient methodological difference seemed the most likely culprit: unlike Lien et al., Maquestiaux et al. randomly intermixed single-task trials on both Task 1 and Task 2 within the dual-task PRP trials. The stated purpose of these mixed single-task trials was to provide an optimal performance baseline for assessing dual-task costs (see also Hazeltine et al., 2006). We came to suspect, however, that it may have inadvertently boosted task preparation, thereby enabling bottleneck bypassing. If so, it is logically possible that it would help enable bottleneck bypassing with novel tasks as well (though this idea has not been tested).

We later obtained an equally surprising amount of bottleneck bypassing with highly semantically compatible tasks such as saying “ping” when hearing “pong”, and “pong” to “ping” (Lyphout-Spitz et al., 2022), even though they were not IM compatible. This led us to speculate that “what matters the most is task preparation, specifically the ease with which people can load the S-R mapping into working memory” (p. 510). We further conjectured that “intermixing single-task trials on Task 2 with dual-task PRP trials may have further encouraged pre-loading of Task-2 S-R mapping into working memory” (p. 510). However, this study did not actually manipulate the presence/absence of mixed single-task trials on Task 2, so this speculation was not actually tested.

A similar account may explain dual-task automatization following multiple sessions of single-task practice (Maquestiaux et al., 2008, 2018; Ruthruff et al., 2006). Practicing an arbitrary task may progressively transfer the burden of representing the S-R mappings from working

memory into long-term memory, thus reducing preparation neglect.

Another hint that preparation is crucial comes from Maquestiaux and Ruthruff (2021) who hypothesized that older adults tend to apply too much attention. They reported a counterintuitive finding: age differences in dual-task interference were much larger when Task 2 was IM (i.e., easy) than when it was non-IM (i.e., more difficult, due to the use of arbitrary S-R mappings). According to Maquestiaux and Ruthruff (2021), older adults attended to Task 1 and prepared for it exclusively, thus leaving Task 2 unprepared (for a similar account, see Hartley & Little, 1999). The lack of preparation meant that the very easy Task 2, which could have been performed automatically, was not. If preparation neglect can harm automaticity in older adults, then it might sometimes do the same for younger adults.

Meyer and Kieras (1997a, 1997b) also anticipated the possibility of parallel central processing in that their executive process-interactive control (EPIC) architecture appears to impose no structural central limitations (see also Meyer & Kieras, 1999). However, they did not emphasize specifically the importance of preparation neglect and did not actually demonstrate bottleneck bypassing with novel tasks. Later work by Meyer and colleagues appeared to assume that bottleneck bypassing was possible only after practice (i.e., after proceduralization; see also Hazeltine et al., 2002). This can be seen in Schumacher et al.’s (2001) important paper entitled “Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck”, in which they had participants perform 6 sessions of practice and did not even examine dual-task performance during the first session.

The present work also builds on Hazeltine and Halvorson (2019), who hypothesized that minimization of dual-task costs is possible when each task relies on a distinct working memory subsystem (e.g., one task using verbal working memory and one using visual working memory). However, their empirical work focused not on novel (unpracticed and arbitrary) tasks as conceived in the present work, but rather on what they called paramotor tasks, in which the stimulus shares perceptual features with the response (e.g., seeing a hand and making a corresponding manual response).

The Apparent Ubiquity of Bottlenecking

There is now a very large literature on dual-task performance with novel tasks. Given this literature, bottleneck bypassing seems highly unlikely. Also,

prevailing accounts of dual-task interference (e.g., Pashler, 1994) do not predict bypassing. In fact, recent reviews of multitasking did not mention the possibility of bypassing with novel tasks (see, e.g., Fischer & Plessow, 2015; for a review across several multitasking paradigms, see Koch et al., 2018). A few studies have reported bypassing with special tasks that are not novel, for example those that have uniquely high semantic compatibility between stimulus and response (Halvorson & Hazeltine, 2015; Lyphout-Spitz et al., 2022). With novel tasks, there is also evidence that the Task-2 response code can be activated to some degree during the central bottleneck (i.e., the backward crosstalk effect; Hommel, 1998; Janczyk, 2016; Janczyk et al., 2018). However, even these studies report large dual-task costs consistent with massive central interference (e.g., a central bottleneck). To our knowledge, there are no claims of bottleneck bypassing with novel tasks.

Despite seemingly ubiquitous dual-task interference with novel tasks, we remained optimistic about the possibility of bypassing for two main reasons. First, no study ever reported experiments that were designed to directly boost preparation of Task 2; so, at the very least, there is no evidence that boosting preparation will not enable bottleneck bypassing. A few dual-task studies have included mixed single-task trials, however they focused on easy tasks and/or extensive practice (Hazeltine et al., 2002; Huestegge & Strobach, 2021; Schumacher et al., 2001; Strobach & Schubert, 2017) and did so with the intention of providing a performance baseline for each of the two tasks performed alone, rather than the intention of boosting task preparation. Studies with novel tasks have rarely, if ever, done anything to boost task preparation and this alone might explain why they always found robust dual-task costs.

Another reason to remain optimistic is that almost all studies have reported group data only. So long as the group as a whole shows substantial dual-task costs, one might not even notice if half the sample had bypassed the central bottleneck. There has rarely been any close examination of possible individual differences in the ability to bypass the central bottleneck with novel tasks. A near exception is Brüning et al. (2022) who reported more automatic activation of Task 2 during Task-1 central processing (i.e., a larger backward crosstalk effect) for the subset of participants who tended to prefer a parallel processing mode, as assessed in a task-switching paradigm. However, even this study did not argue that any individual had bypassed the central bottleneck. In sharp contrast, the literature

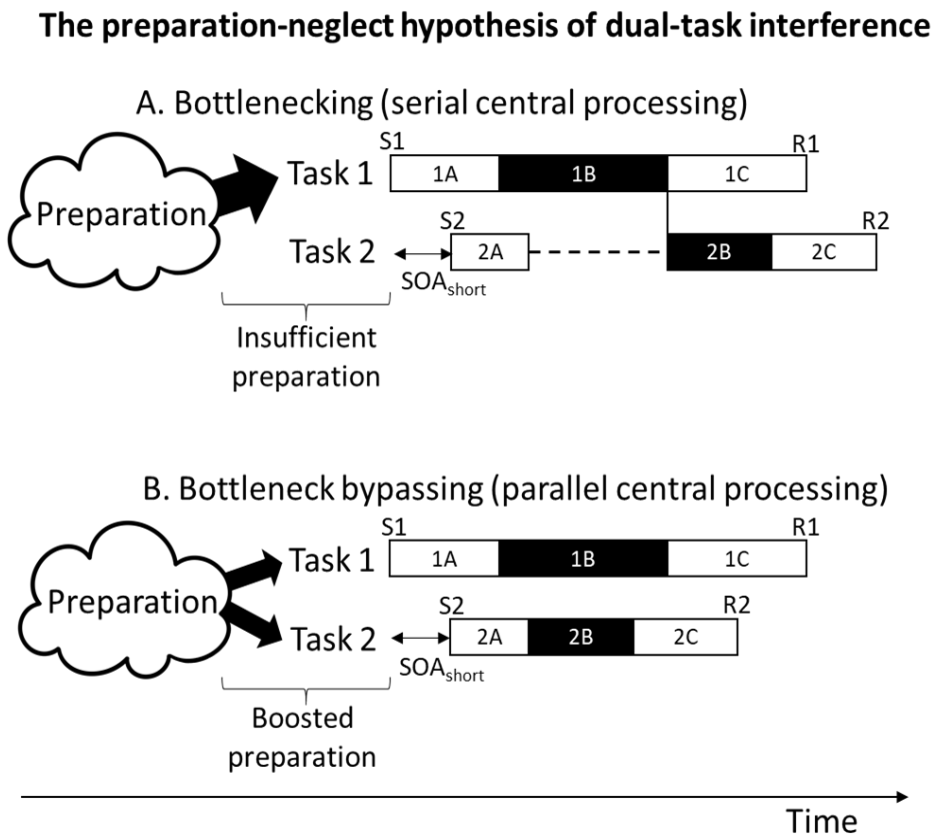
on practice effects has routinely reported striking qualitative differences between individuals (Maquestiaux et al., 2008, 2010, 2013, 2018; Ruthruff et al., 2006; Schumacher et al., 2001; Watson & Strayer, 2010). For instance, Maquestiaux et al. (2018) argued that their sample of highly-practiced individuals included a mixture of bottleneckers (i.e., performing central stages serially) and bypassers (i.e., fully performing the central stages of the two tasks in parallel), producing vastly different amounts of dual-task costs. Given these striking individual differences following practice, it certainly makes sense to also look for them prior to practice.

THE CURRENT STUDY

The aim of the present study was to examine whether boosting preparation on Task 2 (i.e., the task that suffers the most in dual-task PRP experiments) enables people to bypass the central bottleneck that often constrains dual-task performance. Even though bypassing without practice is not predicted by prevailing accounts of dual-task interference (e.g., Pashler, 1994), this prediction follows from the preparation-neglect hypothesis (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020; Maquestiaux & Ruthruff, 2021), shown in Figure 1. According to this new hypothesis, insufficient advance preparation causes serial processing of the Task-1 and Task-2 central stages (e.g., response selection, represented by stage B), also known as bottlenecking (see Figure 1A). The corollary is that boosting task preparation should enable fully parallel central processing of Task-1 and Task-2 central stages (i.e., bottleneck bypassing; see Figure 1B). Note that, even without preparation boosting, stimulus identification (stage A) and response initiation (stage C) of one task are assumed to proceed in parallel with any stage of the other task (Pashler, 1984).

To evaluate the preparation-neglect hypothesis, we looked for evidence of bottleneck bypassing using two different dual-task procedures: a classic PRP procedure (Experiment 1 and Experiment 3) vs. a PRP procedure modified to boost preparation (Experiment 2 and Experiment 4). The classic PRP procedure, used in most dual-task experiments, contained only dual-task PRP trials with the Task-1 stimulus always preceding the Task-2 stimulus by a variable SOA. For the modified PRP procedure, we boosted preparation by intermixing into the dual-task PRP trials some single-task trials on the task most likely to be neglected (Task 2). We reasoned that inclusion of single-task trials on Task 2 would encourage participants to expect Task 2 and prepare to process it without waiting for Task 1.

Figure 1
The Preparation-Neglect Hypothesis of Dual-Task Interference



Note. A: Bottlenecking without preparation boosting: central processing is serial, as in the classic psychological refractory period paradigm. B: Bottleneck bypassing with preparation boosting: central processing is parallel. The clouds represent task preparation prior to stimulus onset. A = stimulus identification, B = response selection, C = response initiation, S = stimulus, R = response, SOA = stimulus onset asynchrony.

Probing for Bottleneck Bypassing

Following previous studies (e.g., Lyphout-Spitz et al., 2022), we probed for bypassing vs. bottlenecking by relying on a Task 1 that produced long RTs (> 500 ms) due to a long central stage. When pairing this slow Task 1 with Task 2, the candidate models make highly distinctive predictions regarding the distributions of inter-response intervals (IRIs), as well as other behavioral indicators (i.e., the amount of dual-task interference on Task 2 also referred to as PRP effect for short, the correlation between Task-1 RTs and Task-2 RTs). A slow Task 1, along with the use of multiple SOAs, sidesteps the problem of a “latent” bottleneck, which occurs when Task-1 and Task-2 central stages are so short (e.g., following extensive practice) and/or misaligned that they are rarely demanded at the same

time (Anderson et al., 2005; Levy & Pashler, 2001; Ruthruff et al., 2003, 2009).

Most dual-task studies analyze data only for the entire group. We believe that this is a mistake because marked individual differences have been documented in many previous dual-task studies (e.g., Maquestiaux et al., 2018; Schumacher et al., 2001; Watson & Strayer, 2010). Therefore, below, we specifically set out to look for possible individual differences.

EXPERIMENT 1: CLASSIC PRP PARADIGM

This experiment aimed to replicate the classic finding from numerous PRP studies: the presence of a central bottleneck constraining dual-task

performance. The main purpose is to provide a baseline against which to compare the results of Experiments 1 and 4, which will attempt to boost Task-2 preparation. Given previous studies (e.g., Pashler, 1984, 1994), we expect this classic PRP paradigm to support a central bottleneck. However, previous PRP studies of this kind have rarely considered individual differences, so it is unclear what percent of participants will be subject to a central bottleneck.

Twenty-four participants completed one session of a typical dual-task PRP experiment, lasting under an hour. Task 1 was the traditional tone identification task (low-pitched tone vs. high-pitched tone) used in many previous PRP studies supporting processing bottlenecks (e.g., De Jong, 1993; Pashler & Johnston, 1989; Ulrich et al., 2006). Participants said “bas” ([ba]; French for low) to a low-pitched tone or “haut” ([ˈo]; French for high) to a high-pitched tone. Task 2 was a shape identification task (triangle vs. circle) with an arbitrary S-R mapping. Because these tasks rely on distinct sensory and motor modalities (Task 1 is auditory-vocal and Task 2 is visual-manual), they minimize peripheral conflicts (Hazeltine et al., 2006; Maquestiaux et al., 2018; Ruthruff et al., 2001; Van Selst et al., 1999).

Very few PRP experiments have required participants to respond to Task 1 before Task 2 (see, e.g., Mittelstädt et al., 2022; Schumacher et al., 2001, Experiment 2). We did not do so because this could create an artificial central bottleneck. Instead, we simply instructed our participants to “respond as quickly as possible to the tone and the shape. Emphasize response speed to the tone. Make as few errors as possible” (in French: “Répondre le plus vite possible au son et à la forme. Accentuer la vitesse de réponse au son. Faire le moins possible d’erreurs”). These instructions are similar to those from several previous PRP studies (see, e.g., Pashler & Johnston, 1989).

Unlike most previous studies that focused on group-level data only, we specifically considered individual differences. First, we estimated how frequently each participant bypassed the central bottleneck. Second, we classified each individual as a bypasser or a bottleneckeer based on whether they bypassed the bottleneck on more or less than half of the dual-task trials (see details in the methods below). This binary classification is an oversimplification (because many participants appeared to use a mixture of processing modes) but it makes it easy to visualize data patterns (e.g., the IRI distribution for all bypassers or all bottleneckers).

Our main tests of bottlenecking vs. bypassing relied upon an examination of entire distributions of IRIs: the time that elapsed between the Task-1 response and the Task-2 response. We have previously shown that it is possible to compare the observed IRI distributions to that predicted by bottleneck bypassing (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020). As will be seen, bottleneck bypassing and bottlenecking predict highly distinct IRI distributions. Bottleneck bypassing predicts a high propensity to emit the Task-2 response first (i.e., mostly negative IRIs), whereas bottlenecking predicts a high propensity to emit the Task-1 response first (i.e., mostly positive IRIs).

Given that there was no attempt to boost preparation in Experiment 1 and the classic PRP paradigm favors Task 1 over Task 2 (because Task 1 always comes first), the preparation neglect hypothesis predicts little or no bypassing. As a consequence, we expected the observed IRI distributions to match those predicted by bottlenecking.

Method

Figure 2 shows the S-R mappings (panel A) and the sequence of events (panel B) for a dual-task PRP trial in Experiment 1 as well as in all subsequent experiments.

Participants. Twenty-four volunteers ($M = 20.5$ years old, $SD = 1.9$ years; 21 women) took part in this experiment. The sample size of 24 was fixed in advance and chosen so that we would have as much statistical power as the most comparable studies (i.e., $N = 24$ in both Lyphout-Spitz, 2022, as well as in Maquestiaux et al., 2020). The methods and procedures of this experiment and subsequent experiments, both involving human participants, strictly followed the standards of the Ethics Committee of the Université de Franche-Comté, as well as the 1964 Helsinki declaration and its later amendments.

Apparatus and Stimuli. The experiment (E-Prime 2.0) was conducted on a laptop computer using an AZERTY keyboard and a PST Serial-Response Box. Participants listened to the auditory tones through headphones and spoke the answer into a microphone connected to the response box. Voice onset was detected automatically by the response box but the response choice (“bas” vs. “haut”) was manually entered by the experimenter.

The Task-1 tone was presented for 250 ms with either a low pitch (400 Hz) or a high pitch (1,800 Hz). The Task-2 stimulus was a filled triangle (3 cm in width and 2 cm in height) or a filled circle (2.2 cm in diameter), displayed in black in the screen center against a white background.

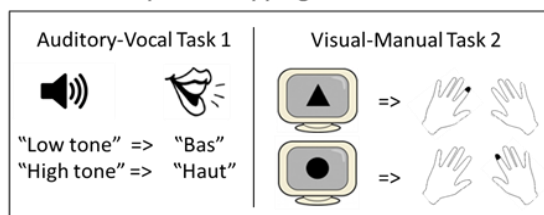
Design and Procedure. For Task 1, participants were asked to respond to the high-pitched tone by saying “haut” (French for “high”) and to the low-pitched tone by saying “bas” (French for “low”). For Task 2, participants responded to the triangle by pressing the E key with their left index finger and to the circle by pressing the P key with their right index finger.

Participants first performed 6 familiarization trials on Task 1, then 6 familiarization trials on Task 2, followed by 24 familiarization trials on both Task 1 and Task 2 (dual-task PRP trials). They then

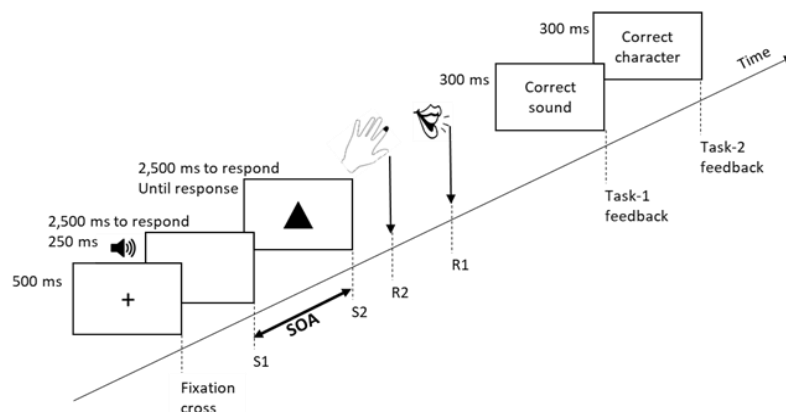
performed the 384 experimental trials (dual-task PRP trials). Each of the 16 distinct trial types (2 Task-1 tones X 2 Task-2 shapes X 4 SOAs [15, 65, 250, and 1,500 ms]) was repeated 24 times, in a random order. The 384 experimental trials were broken into 12 blocks of 32 trials each. Participants were given a 2-minute break between blocks, during which time they viewed performance feedback on the preceding block (Task-1 speed and accuracy plus Task-2 accuracy). To encourage participants to strive to continually improve their performance, we asked them to enter their scores into a matrix on a sheet of paper. Participants received typical PRP instructions: respond as quickly and accurately as possible to each task while emphasizing the speed of Task-1 responses. The instructions did not say anything about response order or response grouping; the computer accepted every possible response order

Figure 2
Stimulus-Response Mappings and Dual-Task PRP Trial in Experiments 1-4

A. Stimulus-Response Mappings



B. Dual-Task PRP Trial



Note. Panel A shows the stimulus-response mappings for Task 1 and Task 2. The finger highlighted in black is the one used to respond to that Task-2 stimulus. Panel B shows the sequence of events in a dual-task psychological refractory period (PRP) trial. The stimulus onset asynchrony (SOA) varied randomly: 15, 65, 250, or 1,500 ms. Even though the Task-1 stimulus (S1) was always followed by the Task-2 stimulus (S2), participants were allowed to respond in either order. In the depicted example, the response order was reversed: the Task-2 response (R2) was emitted before the Task-1 response (R1).

(Task-1 response before Task-2 response, Task-2 response before Task-1 response).¹

Each dual-task PRP trial began with a fixation sign (+) displayed for 500 ms in the screen center. Then the Task-1 tone sounded. After a randomly selected SOA (15, 65, 250, or 1,500 ms), the Task-2 shape appeared and remained until response or 2,500 ms had elapsed. The computer then displayed two consecutive 300-ms messages indicating whether the Task-1 and Task-2 responses were correct or incorrect. If participants failed to respond to both tasks within the 2,500 ms timeout period, then an additional 200-ms message noted that fact. The next trial began 800 ms later.

Simulating Bottleneck Bypassing and Bottlenecking. To simulate the distributions of IRIs for the candidate models (bottleneck bypassing and bottlenecking) for each participant, we used the long-SOA (i.e., 1,500 ms) dual-task PRP trials as a baseline. On these trials there is rarely any processing overlap between Task 1 and Task 2, so they provide a sort of “single-task” baseline without the possibility of dual-task interference. Concretely, for each participant, we paired every such response to Task 1 (96) with every such response to Task 2 (96), so as to create 9,216 simulated dual-task trials.

Bypassing. If participants bypass the bottleneck, with no central interference, then the simulated dual-task RTs are simply equal to the original “single-task” RTs. We then calculate the entire distribution of IRIs, which are particularly diagnostic of the bypassing processing mode, as follows:

$$\text{IRI} = \text{SOA} + \text{RT}_2 - \text{RT}_1$$

After eliminating outliers (i.e., trials for which RT was below 100 ms or above 2,500 ms on Task 1 or Task 2) and errors (i.e., error trials), just as for the real data, we computed the entire IRI distribution predicted by bypassing. Note that this predicted IRI distribution has no free parameters, so it is a true prediction and not a post-hoc fitting exercise (for a critique of data fitting to test theories with free parameters, see Roberts & Pashler, 2000).

To our knowledge, this precaution is rarely mentioned in the dual-task literature. Some dual-task procedures even prevented or discouraged response reversals (Schumacher et al., 1999; 2001). For instance, Schumacher et al. (1999) indicated that “on dual-task blocks, participants had to make their Task 1 response first or else both responses were considered to be incorrect” (p. 797). Similarly, Schumacher et al. (2001, Experiment 2) instructed the participants that “their response for it [an auditory-vocal task] should always occur before responses for the secondary VM [visual-manual] task” (p. 104).

Bottlenecking. Our simulation of bottlenecking was based on the finding that, according to a central bottleneck, the predicted dual-task interference on Task 2 can be expressed as $\text{RT}_1 - \text{SOA} - 1\text{C} - 2\text{A}$ (Ruthruff et al., 2001; Van Selst et al., 1999). Applying this at the level of individual trials, we estimated the bottleneck delay (represented by the horizontal dashed line on Figure 1A) as $\text{RT}_1 - \text{SOA} - 1\text{C} - 2\text{A}$. Van Selst et al., who also used an auditory-vocal Task-1 and a visual-manual Task 2, estimated that $1\text{C} + 2\text{A}$ took 257 ms. Following this finding and assuming that 1C (initiating a vocal response) takes longer than 2A (perceiving a shape), we set the duration of 1C at 150 ms and the duration of 2A at 100 ms. Similar to Lien et al. (2005), we simply forced the coefficient of variation (mean/*SD*) to be .2, yielding standard deviations of 30 ms and 20 ms, respectively. We used the normal distribution, but with the restriction that these stage times were not allowed to go below 0 ms.

We then added this simulated bottleneck delay to the RT₂ for that simulated trial to obtain the predicted dual-task RT₂. Note that the bottleneck delay can be zero, for example at long SOAs, in which case the bottleneck can be said to be latent (i.e., stage 1B finished before stage 2B is demanded; see Ruthruff et al., 2003). Although this model could be considered to have several free parameters, we did not use them to fit the data. Instead, we simulated only once, with the parameters above, specified based only on previous studies.

Initial Classification of Individuals as Bypassers Vs. Bottleneckers. Bottleneck bypassing predicts that R₂ will frequently be emitted before R₁ at short SOAs, producing a high rate of response reversals (negative IRIs), especially when baseline Task 2 is faster than Task 1 (as was the case here). Bottlenecking, in contrast, predicts that R₁ will be emitted before R₂, producing few response reversals (i.e., mostly positive IRIs). It has also been established that some participants have the tendency to synchronize their responses, known as response grouping, which tends to produce IRIs close to zero (within +/-50 or +/-100 ms; Ulrich & Miller, 2008). Note that negative IRIs of less than -100 ms will rarely ever occur while bottlenecking and/or response grouping, but routinely occur while bottleneck bypassing. Thus they are the signature of bottleneck bypassing.

We quantified each individual’s degree of bypassing. Specifically, we calculated how often that individual produced IRIs more negative than -100 ms as a percentage of that expected from the bypassing simulation. For the sake of robustness, we averaged these results across the two shortest SOAs

(15 and 65 ms); note that long SOAs are not diagnostic because bottlenecking and bypassing tend to predict similar IRIs. Even though the percentage of bypassing is a continuous variable, we then classified participants with a percentage greater than 50% as “primarily bypassers” and the others as “primarily bottleneckers.”

A follow-up analysis was then performed to determine whether the identified bypassers were truly bypassing the central bottleneck and not simply performing the central operations of the tasks serially, but starting with the second task (i.e., reverse bottlenecking). The latter would also produce negative IRIs, but with much more extreme negative values. This analysis involved comparing the observed IRI distribution to the distributions derived from (a) simulations of bypassing and (b) simulations of reverse bottlenecking², and then choosing the one with the lowest chi-squared value. In the present study, only one participant’s IRI data (cf. Experiment 2) fit the reverse bottlenecking distribution better than the bypassing distribution. This individual was excluded from subsequent subgroup analyses. Note that this individual could not simply be added to the bottleneckers subgroup, because the predictions are nearly the opposite for bottlenecking and reverse-order bottlenecking.

Confirmation of Bottleneck Bypassing vs. Bottlenecking. After the initial classification of each individual as described above, we then compared each group’s data against classic indicators of bypassing vs. bottlenecking. Following previous studies (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020), we applied multiple indicators: entire IRI distributions, the amount of dual-task interference on Task 2, and the correlation between RT1 and RT2.

Data Analysis. ANOVAs were Greenhouse-Geisser corrected in case the assumption of sphericity was violated. Following Lakens (2013), effect size is reported as Cohen’s d_z for within-subject t tests and Cohen’s d_s for between-subject t tests. Post hoc analyses relied on the Bonferroni procedure.

Transparency and Openness. The study materials and raw data of all experiments are openly available on the Open Science Framework (<https://osf.io/n4jhe/>) and on a personal website

(<https://sites.google.com/site/frmaquestiaux/home/d-ata-sharing>). The Excel files with which we performed the simulations are available upon request.

Results

We excluded from analysis trials for which RT on either task was below 100 ms or above 2,500 ms (dual-task PRP: 2.44%). In addition, error trials were excluded from RT analyses (dual-task PRP: 3.60%).

Initial Classification. Figure 3 shows that none of the 24 participants in Experiment 1 was able to reach the 50% cutoff of bypassing, with a mean bypassing percentage of only 7.3% (ranging from 0.0% to 37.0%). Therefore, all 24 were classified as “bottleneckers”. Note that some of these bottleneckers might have bypassed the central bottleneck on some trials, so this classification should be interpreted as “primarily bottlenecking.”

Confirming Indicators for the Bottleneck Group. Several indicators of bypassing vs. bottlenecking were then applied to the resulting group data (i.e., the 24 bottleneckers, as no participant was classified as primarily a bypasser).

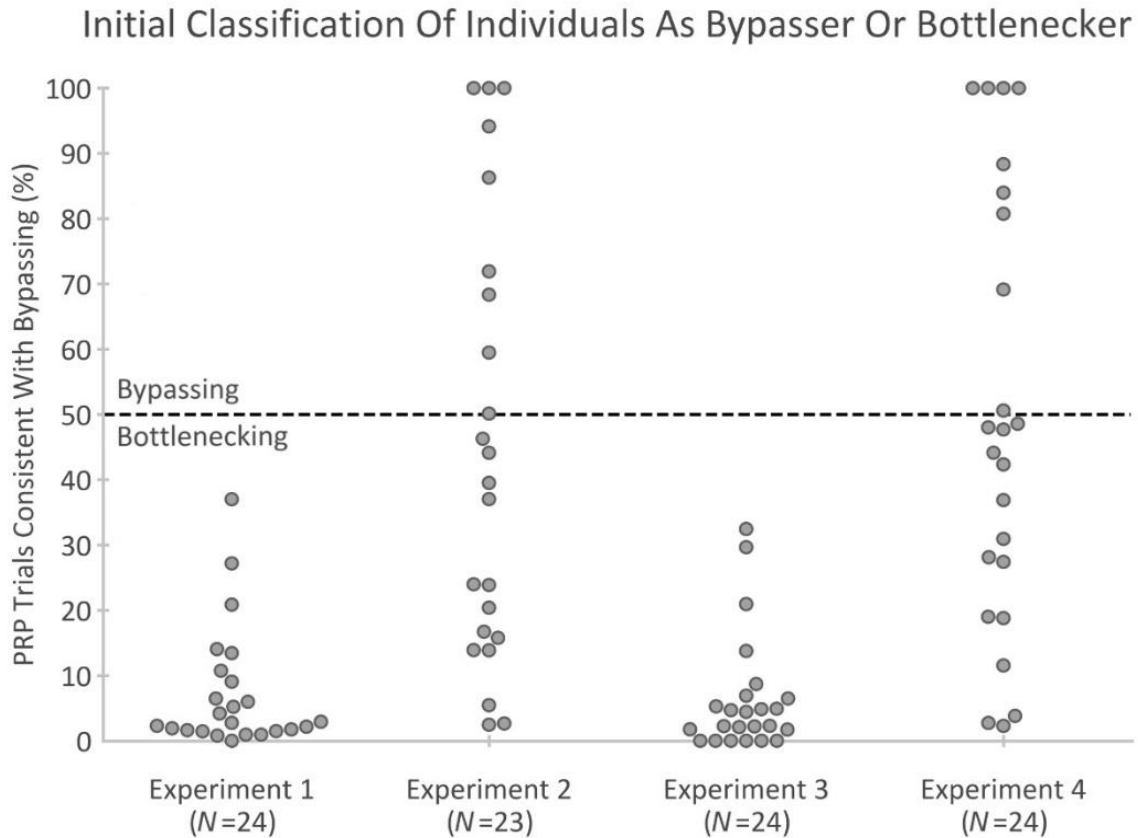
Observed vs. Simulated IRI Distributions.

Figure 4 shows, for each SOA, the observed IRI distribution (using a bin width of 50 ms) along with the predicted IRI distributions based on bottlenecking and bypassing (for details, see the Methods section). When task overlap was high (i.e., at the two short SOAs), the observed distributions were consistently quite well fitted by the distributions predicted by bottlenecking. The mean IRIs did not differ statistically either at the 15-ms SOA (219 ms vs. 223 ms), $t(23) = -0.19, p = .854, d_z = -0.04$, or at the 65-ms SOA (228 ms vs. 224 ms), $t(23) = 0.17, p = .870, d_z = 0.03$. At the 250-ms SOA, however, the observed distribution was shifted right relative the simulated distribution of bottlenecking (293 ms vs. 243 ms), $t(23) = 2.80, p = .010, d_z = 0.57$. In contrast, the simulated distributions predicted from bottleneck bypassing provided very poor fits. At the 15-ms SOA, the difference between the observed and predicted means (219 ms vs. -191 ms) was large, $t(23) = 13.43, p < .001, d_z = 2.74$. The difference between the observed and predicted means was also significant at the 65-ms SOA (226 ms vs. -141 ms), $t(23) = 12.11, p < .001, d_z = 2.47$. This large difference can still be observed at the 250-ms SOA (293 ms vs. 44 ms), $t(23) = 9.82, p < .001, d_z = 2.00$.

² Our simulation of reverse bottlenecking followed the exact same steps as those used to simulate bottlenecking. We estimated the bottleneck delay on Task 1 as $RT2 - SOA - 2C - 1A$. We set the durations of 1A to 150 ms ($SD = 30$ ms) and the duration of 2C to 100 ms ($SD = 20$ ms). For each participant, the simulated IRI distributions were divided into five equal bins, then we compared the expected and observed frequencies in each bin.

Figure 3

Percentage of dual-task psychological refractory period (PRP) trials consistent with bottleneck bypassing for each individual participant in Experiments 1-4



Note. The horizontal dashed line represents the percentage cutoff (50%) for classifying participants as primarily bypassers versus primarily bottleneckers.

Amount of Dual-Task Interference on Task 1 and Task 2. Figure 5 shows the mean RTs on Task 1 and Task 2 as a function of SOA (see also Table 1 for descriptive statistics). The amounts of dual-task interference, in the case of Task 2 referred to as PRP effect, were calculated as the RT difference between the shortest SOA and the longest SOA. In this experiment, RT2 sharply increased from the longest (470 ms) to the shortest SOA (915 ms), $F(1.262, 29.037) = 183.13, p < .001, \eta_p^2 = 0.89$, resulting in a PRP effect of 445 ms. Meanwhile, mean RT1 remained relatively constant across SOAs, with RT1 being slightly longer at the two shortest SOA (an average of 710 ms) compared to the longest SOA ($M = 679$ ms), $F(2.220, 51.053) = 5.78, p = .004, \eta_p^2 = 0.20$. The amount of dual-task interference on Task 1 was small (only 32 ms). This pattern – a very large PRP effect of 445 ms on Task 2 with modest dual-task interference on Task 1 – is plainly consistent

with a central bottleneck and classic PRP results (e.g., Pashler, 1984).

Error Rates. Mean Task-2 error rate was 2.07% and was not significantly influenced by SOA, $F(3, 69) = 2.47, p = .069, \eta_p^2 = 0.10$. Mean Task-1 error rate was 1.61% and was also not significantly influenced by SOA, $F(3, 69) = 2.26, p = .089, \eta_p^2 = 0.09$.

RT1:RT2 Correlations. Bottleneck bypassing predicts weak RT1:RT2 correlations at all SOAs because random variation in Task-1 processing is not inherited by Task-2 processing (the tasks are performed independently). In contrast, bottlenecking predicts stronger correlations at short SOAs (where a bottleneck constrains dual-task processing) than at the long SOA (i.e., where Task 1 is finished before S2 even occurs), because random variation in Task-1 processing (in particular in stages 1A and 1B) is inherited by Task 2 after the bottleneck delay (see

Figure 4

Observed vs. simulated distributions of inter-response intervals (IRIs) at each stimulus onset asynchrony (SOA) for Experiment 1 (classic PRP)

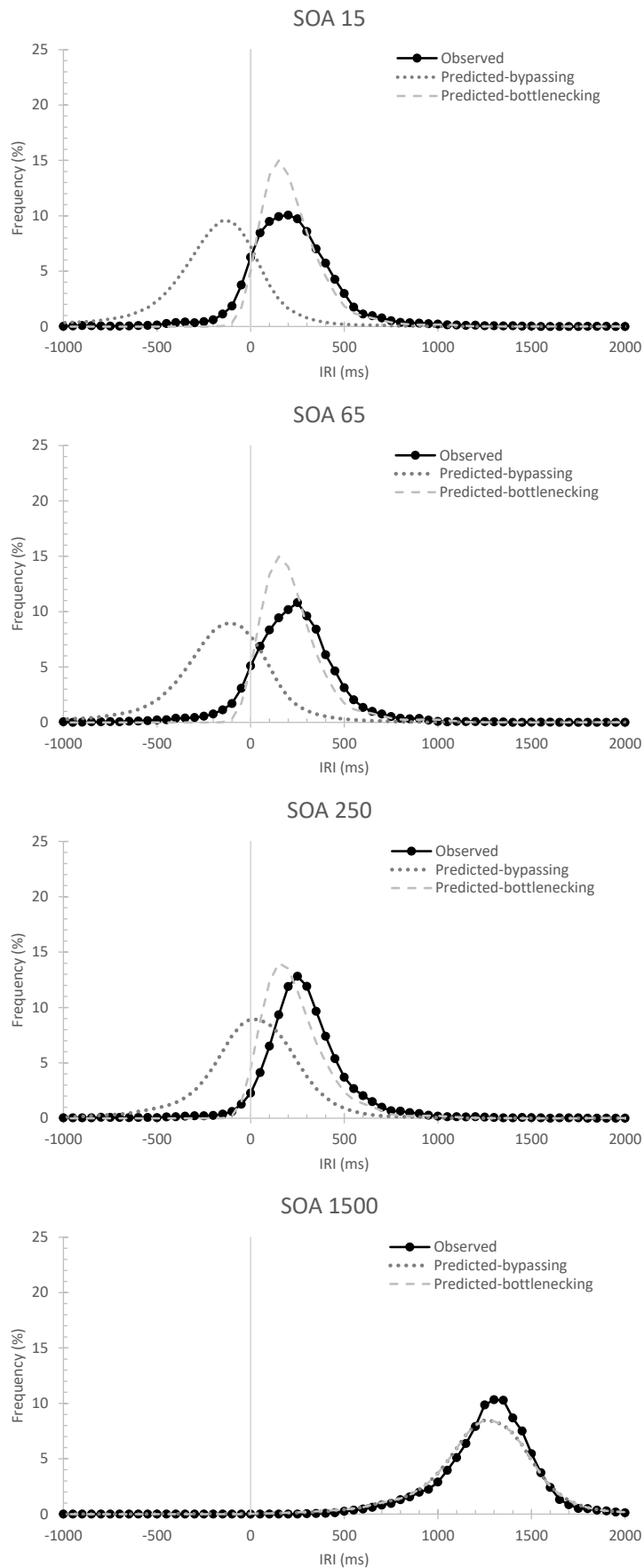
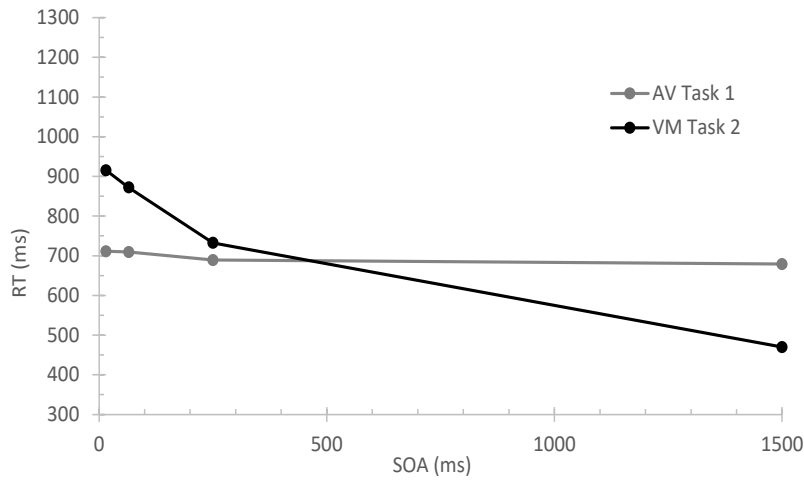


Figure 5

Reaction times on the auditory-vocal (AV) Task 1 and the visual-manual (VM) Task 2 at each stimulus onset asynchrony (SOA) for Experiment 1

**Table 1**

Mean Reaction Time (RT), Error Rate (ER), and PRP effect as a Function of Stimulus Onset Asynchrony (SOA) in Experiments 1-4

		Experiment 1				PRP effect	
Participants classification		SOA (ms)				Task 1	Task 2
		15	65	250	1500		
Bottleneckers (n = 24)	RT1 (ms)	711	710	689	679	32	
	ER1 (%)	2.09	1.43	1.79	1.11		
	RT2 (ms)	915	872	732	470		445
	ER2 (%)	2.83	1.99	1.68	1.78		
		Experiment 2				PRP effect	
Participants classification		SOA (ms)				Task 1	Task 2
		15	65	250	1500		
Bottleneckers (n = 14)	RT1 (ms)	854	860	858	783	71	
	ER1 (%)	3.43	3.78	2.45	1.37		
	RT2 (ms)	923	922	867	512		411
	ER2 (%)	2.44	2.80	1.99	2.96		
Bypassers (n = 9)	RT1 (ms)	904	908	899	804	100	
	ER1 (%)	3.54	3.13	1.42	0.72		
	RT2 (ms)	567	597	641	519		48
	ER2 (%)	2.38	3.64	5.00	4.01		
		Experiment 3				PRP effect	
Participants classification		SOA (ms)				Task 1	Task 2
		15	65	250	1500		
Bottleneckers (n = 24)	RT1 (ms)	617	623	621	618	-1	
	ER1 (%)	1.85	2.41	1.77	1.12		
	RT2 (ms)	826	789	659	412		414
	ER2 (%)	4.11	3.39	2.89	1.94		
		Experiment 4				PRP effect	
Participants classification		SOA (ms)				Task 1	Task 2
		15	65	250	1500		
Bottleneckers (n = 15)	RT1 (ms)	737	761	757	684	53	
	ER1 (%)	3.05	3.17	2.21	0.94		
	RT2 (ms)	794	820	740	462		332
	ER2 (%)	2.57	2.14	3.16	2.06		
Bypassers (n = 9)	RT1 (ms)	850	858	830	728	122	
	ER1 (%)	3.16	2.15	1.57	1.05		
	RT2 (ms)	630	649	673	480		150
	ER2 (%)	3.16	4.27	7.16	6.00		

Figure 1B).³ To evaluate the predictions of competing models (bypassing vs. bottlenecking), we calculated the correlations between RT1 and RT2 at each SOA for each participant, then carried out an ANOVA. Consistent with bottlenecking, the coefficient of correlation was moderate overall (.61) and the main effect of SOA was significant, $F(2.160, 49.678) = 67.83$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.75$. A planned comparison showed that correlations were much stronger at the three shortest SOAs (average of .71) than at the longest SOA ($M = .33$), $t(69) = 14.17$, $p < .001$.

Discussion

In this classic PRP experiment, we looked for evidence of bypassing but did not find any participant who did so consistently. The percentage of dual-task PRP trials consistent with bypassing was below 50% for every individual and very low overall (only 7.3%; see Figure 3). Additional analyses at the group level confirmed the presence of a central bottleneck: there was a very high overlap at short SOAs between the observed IRI distribution and that predicted by bottlenecking (see Figure 4), the dual-task interference on Task 2 was very large (i.e., 445 ms), and the RT1:RT2 correlations were strong at short SOAs (an average of .71).

In short, the results of Experiment 1 replicated the ubiquitous phenomenon of large dual-task costs, as found in dozens of previous PRP studies with novel tasks. We also confirmed that, in a classic PRP paradigm with only dual-task trials, participants rarely processed the central operations of two tasks in parallel (see Pashler, 1984; Pashler, 1994; Pashler & Johnston, 1989).

EXPERIMENT 2: PREPARATION BOOSTING

According to the preparation-neglect hypothesis, bottlenecking bypassing (i.e., fully parallel central processing) without practice is possible in PRP conditions that boost task preparation. To evaluate this novel prediction, we used the same PRP procedure as in Experiment 1 but modified it to boost preparation on Task 2 (i.e., the task that suffered the most in Experiment 1 and, more broadly, in virtually all previous PRP studies). To do so, single-task trials were randomly intermixed with dual-task PRP trials.

We previously found that intermixing single-task trials within dual-task trials led to unusually high

rates of bottleneck bypassing (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020). However, that was with tasks that were uniquely easy due to unusually high S-R compatibility (hearing “ping” and saying “pong”). So, it is unclear whether bypassing would be found here, with more difficult tasks with arbitrary S-R mappings. Also, note that our previous studies did not have a condition without intermixed single-task trials. So, although this technique for preparation boosting seemed promising, it is impossible to say whether it actually increases bypassing, or whether the bypassing was merely due to the extreme ease of the tasks (perhaps not even requiring any central operations).

Here we used the exact same ratios of mixed single-task trials and dual-task trials as in our previous studies (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020): 96/192. However, there was one major difference. Whereas our previous studies included 96 mixed single-task trials divided evenly between Task 1 and Task 2, here we used 96 mixed single-task trials on Task 2 only. The reason is that those studies mixed single-task trials with the sole purpose of providing an ideal baseline for measuring dual-task costs, so it was important to include both tasks. Here the sole purpose is to boost preparation and enable bypassing. According to the preparation-neglect hypothesis, boosting preparation on Task 2 is the key to enabling bottleneck bypassing.

In Experiment 1 (classic PRP), 24 participants performed 384 classic dual-task PRP trials. But, in Experiment 2 (preparation boosting), 24 new participants first performed 96 single-task trials on Task 2, and then 192 dual-task PRP trials randomly intermixed with 96 single-task trials on Task 2. Although participants in Experiment 2 received only half as many PRP trials (i.e., 192 vs 384), the total number of trials on Task 2 was equated between Experiments 1 and 2 (i.e., 384). By holding constant the amount of Task-2 practice, we ensure that the emergence of bypassing cannot be attributed simply to an increase Task-2 skill. Participants were asked to respond as quickly and accurately as possible to Task 2 when performing the 96 single-task trials. They then received typical PRP instructions when performing PRP trials intermixed with single-task trials on Task 2.

We again first classified each individual as primarily a bypasser or primarily a bottleneckeer. We then applied confirming indicators – IRI distributions, dual-task interference on Task 2, and RT1:RT2 correlations – separately for the bypasser group and the bottleneckeer group.

³ Following Navarro and Foxcroft (2022), we will interpret correlations up to .2 as negligible, between .2 and .4 as weak, between .4 and .7 as moderate, and above .7 as strong.

Method

Except where noted, the method was identical to that of Experiment 1.

Participants. A fresh sample of 24 volunteers ($M = 19.6$ years old, $SD = 1.7$ years; 20 women) participated.

Design and procedure. As in Experiment 1, participants first performed familiarization trials on each of the two tasks separately: 6 trials on Task 1 and 6 trials on Task 2. They then performed 96 single-task trials on Task 2, broken into 3 blocks of 32 trials each. They then performed 24 dual-task familiarization trials (as in Experiment 1). Finally, they performed 288 experimental trials consisting of a random mixture of 192 dual-task PRP trials and 96 single Task-2 trials. The 288 experimental trials were broken into 9 blocks of 32 trials each. As in Experiment 1, participants were given typical PRP instructions and received no explicit instructions regarding response order or response grouping.

The event sequence for single-task trials on Task 2 was identical to that of the dual-task PRP trials, except there was no Task-1 tone and no Task-1 feedback.

Simulating Bottleneck Bypassing and Bottlenecking. The simulations of the candidate models were identical to those carried out in Experiment 1. The only difference is that there were fewer simulated trials than in Experiment 1 (2,304 instead of 9,216) because there were half as many long-SOA (1500 ms) dual-task trials.

Results

We removed trials for which RT on either task was below 100 ms or above 2,500 ms (dual-task PRP: 2.80%; mixed single-task: 0.13%; single-task: 0.17%). In addition, error trials were excluded from RT analyses (dual-task PRP: 5.54%; mixed single-task: 1.48%; single-task: 2.91%).

Initial Classification. Figure 3 shows that nearly half the sample (i.e., 9 participants out of 23) was able to go beyond the 50% cutoff, with on average 81.1% of dual-task PRP trials consistent with bottleneck bypassing (ranging from 50.1% to 100%). In contrast, the other participants that fell below the 50% cutoff were classified as primarily bottleneckers ($M = 21.9\%$; range: 2.5% to 46.3%). Note that one participant initially classified as a bypasser was in fact a reverse bottleneck, as revealed by a follow-up analysis (for more details, see the subsection “Initial Classification of Individuals as Bypassers Vs. Bottleneckers” of Experiment 1). As a consequence, this individual was excluded from subsequent analyses.

Confirming Indicators for the Bypassers Group. Our main focus is on the existence of bypassers. We applied the same indicators as before to the group of participants initially classified as bypassers ($n = 9$).

Observed vs. Simulated IRI Distributions. Figure 6 shows, for each SOA, the observed and simulated IRI distributions for the bypassers (left panel). When task overlap was high (i.e., at the two short SOAs), the observed distributions were consistently quite well fitted by the simulated distributions predicted by bottleneck bypassing. Notably, there was a high percentage of negative IRIs (i.e., when Task-2 response is emitted before Task-1 response), which can easily arise from bypassing but not from bottlenecking. The mean IRIs of the observed distribution were very similar to the distribution predicted by bottleneck bypassing at the 15-ms SOA (-322 ms and -339 ms), $t(8) = 0.48$, $p = .646$, $d_z = 0.16$, and also at the 65-ms SOA (-246 ms and -289 ms), $t(8) = 0.70$, $p = .504$, $d_z = 0.23$. At the 250-ms SOA, there was a nonsignificant trend towards a slight shift of the observed distribution to the right of the simulated distribution of bottleneck bypassing (-8 ms vs. -104 ms), $t(8) = 1.86$, $p = .100$, $d_z = 0.62$, perhaps because participants find it more difficult to perform central operations in parallel when the stimuli do not appear to be simultaneous. In contrast, the mean of the observed IRI distributions differed sharply and significantly from the simulated distributions predicted from bottlenecking: -322 ms vs. 263 ms at the 15-ms SOA, $t(8) = -7.09$, $p < .001$, $d_z = -2.36$; -246 ms vs. 264 ms at the 65-ms SOA, $t(8) = -5.03$, $p = .001$, $d_z = -1.68$; and -8 ms vs. 267 ms at the 250-ms SOA, $t(8) = -3.35$, $p = .010$, $d_z = -1.12$.

Amount of Dual-Task Interference on Task 1 and Task 2. Figure 7 shows the RTs on Task 1 and Task 2 as function of SOA (see also Table 1). RT2 was significantly influenced by SOA, $F(3, 24) = 6.53$, $p = .002$, $\eta_p^2 = 0.45$. Post hoc analyses revealed that RT2 increased from the longest SOA (519 ms) to the 250-ms SOA (641 ms)⁴, $t(8) = 4.30$, $p = .001$; no other comparison between SOAs was significant. The resulting PRP effect, calculated as the RT2 difference between the shortest SOA and

⁴ Because Task 1 is slower than Task 2, bypassing would often synchronize responses (i.e., an IRI near zero) at the 250-ms SOA. Response execution conflicts might therefore be strongest at this SOA, explaining the RT2 increase.

Figure 6
Observed vs. predicted distributions of inter-response intervals (IRIs) at each stimulus onset asynchrony (SOA), separately for participants classified as bypassers (left panels) and bottleneckers (right panels), for Experiment 2 (preparation boosting)

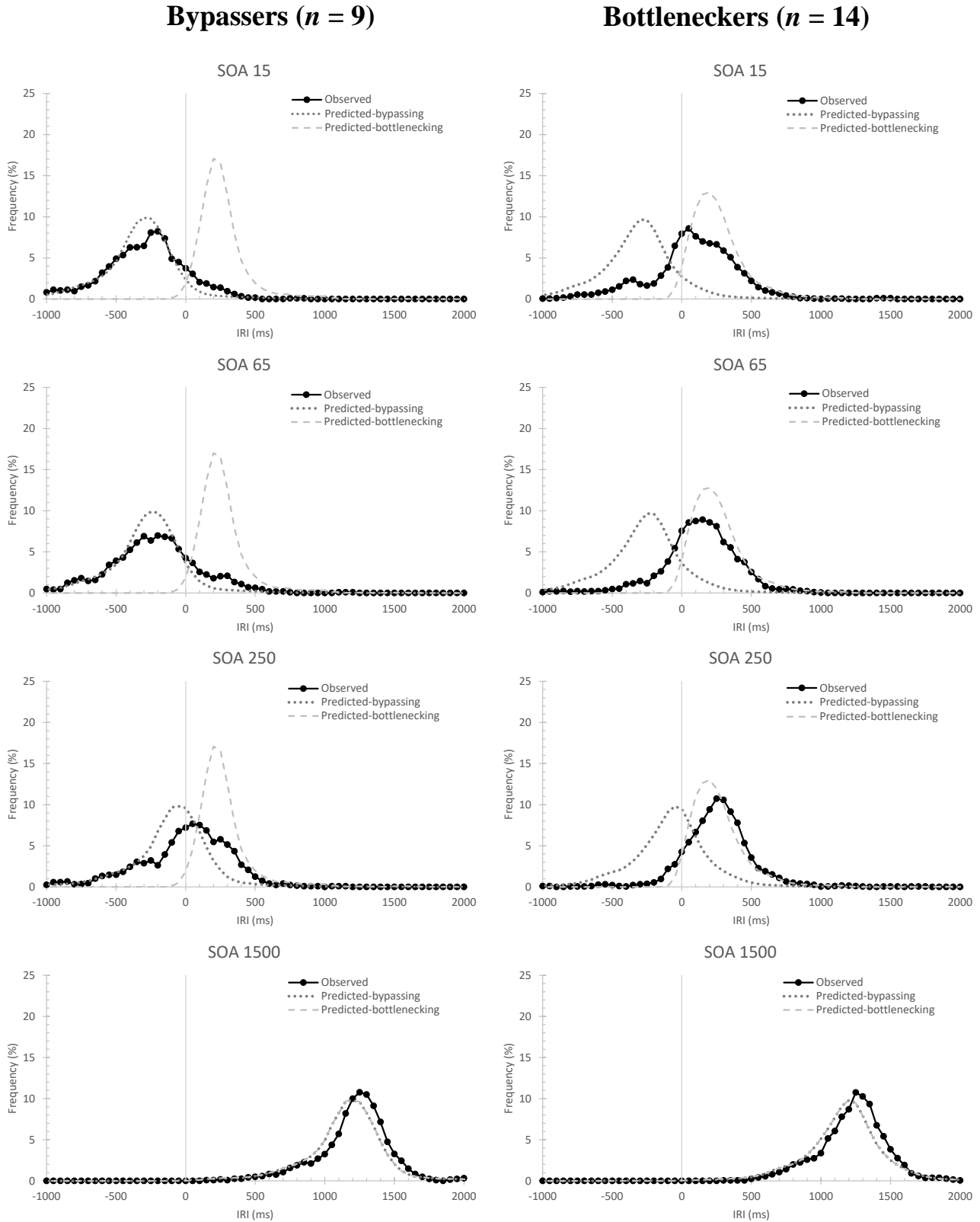
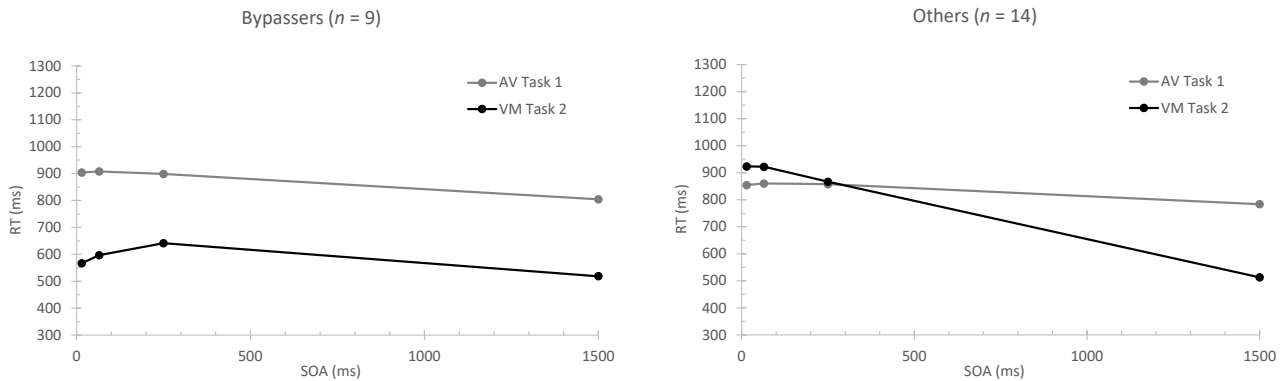


Figure 7

Reaction times on the auditory-vocal (AV) Task 1 and the visual-manual (VM) Task 2 as a function of the stimulus onset asynchrony (SOA) for the bypassers (left panel) and the bottleneckers (right panel) for Experiment 2 (preparation boosting)



Error Rates. Mean Task-2 error rate was 3.76%; it was not significantly influenced by SOA, $F(3, 24) = 1.99$, $p = .143$, $\eta_p^2 = 0.20$. Mean Task-1 error rate was 2.20% and influenced by SOA, $F(3, 24) = 6.11$, $p = .003$, $\eta_p^2 = 0.43$, with more errors committed at the 15-ms SOA (3.54%) and 65-ms SOA (3.13%) than the longer SOAs (1.42% at the 250-ms SOA, and 0.72% at the 1,500-ms SOA); no other comparison was significant.

RT1:RT2 Correlations. Consistent with bottleneck bypassing, the coefficient of correlation was weak overall (.28) and not significantly influenced by SOA, $F(3, 24) = 0.69$, $p = .566$, $\eta_p^2 = 0.08$.

Confirming Indicators for the Bottleneck Group. Even though our main focus was on the existence of bypassers, we will briefly summarize the results for the participants classified as bottleneckers ($n = 14$) for the sake of completeness.

Visually, this group's IRI distribution is best fitted by the simulated distribution of bottlenecking. However, note that their data likely also include a minority of trials with bypassing and possibly also response grouping. For instance, at the 15-ms SOA, the mean of the observed distribution differed from the mean of the simulated distribution of bypassing (84 ms vs. -321 ms), $t(13) = 9.24$, $p < .001$, $d_z = 2.47$, but also from the mean of the simulated distribution of bottlenecking (84 ms vs. 259 ms), $t(13) = -4.91$, $p < .001$, $d_z = -1.31$. Thus, we conjecture that these individuals used a combination of different processing modes on different trials: bypassing, grouping, and bottlenecking.

Amount of Dual-Task Interference on Task 1 and Task 2. RT2 steadily increased from the longest SOA ($M = 512$ ms) to the shortest SOA ($M = 923$ ms), $F(1.848, 24.030) = 77.22$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.86$,

producing a large PRP effect of 411 ms. Meanwhile, RT1 was slightly longer by 74 ms at the two short SOAs (an average of 857 ms) compared to the longest SOA ($M = 783$ ms), $F(3, 39) = 8.34$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.39$.

Error Rates. Mean Task-2 error rate was 2.55% and was not significantly influenced by SOA, $F(3, 39) = 0.34$, $p = .795$, $\eta_p^2 = 0.03$. Mean Task-1 error rate was 2.76% and influenced by SOA, $F(3, 39) = 4.03$, $p = .014$, $\eta_p^2 = 0.24$, with more errors committed at the 15-ms SOA (3.43%) and 65-ms SOA (3.78%) compared to the longest SOA (1.37%); no other comparisons between SOAs were significant.

RT1:RT2 Correlations. The coefficient of correlation was .50 and influenced by SOA, $F(3, 39) = 7.18$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.36$. A planned comparison showed stronger correlations at the three shortest SOAs (average of .56) than at the longest SOA ($M = .32$), $t(39) = 3.86$, $p < .001$. These data suggest that this group of participants were more often bottlenecking (or grouping) than bypassing.

Discussion

This experiment tested the new prediction of the preparation-neglect hypothesis that bottleneck bypassing (i.e., fully parallel central processing) is possible without practice. In a PRP experiment modified to boost preparation on Task 2 (i.e., the secondary task, known to suffer the most in dual-task PRP situations), nearly half the sample of individuals ($n = 9$) could be classified as primarily bypassers. For this group, the average percentage of dual-task PRP trials consistent with bypassing was 81.1% (see Figure 3). Additional analyses confirmed that these individuals did bypass the central bottleneck: there was a very high overlap at

short SOAs between the observed IRI distribution and the bypassing simulations (see Figure 6), dual-task interference on Task 2 was quite small (i.e., a mean PRP effect of only 48 ms), and RT1:RT2 correlations remained weak across SOAs (an average of .28).

For those individuals who did not reach the 50% cutoff of bottleneck bypassing, and henceforth classified as primarily bottleneckers ($n = 14$), the results indicated a preponderance of bottlenecking. Their mean PRP effect was large (411 ms), and the RT1:RT2 correlations were moderate at the three shortest SOAs (.56). Although bottlenecking predominated in this group, note that the IRI distributions indicate that some of these participants, especially those closest to the cutoff of 50%, bypassed the central bottleneck on some trials.

In sum, in PRP conditions modified to boost Task-2 preparation, the estimated percentage of bypassing was high overall (45.1%). We found evidence of more bypassing than bottlenecking for nearly half the sample of participants (9 out of 24). This finding is even more striking when one considers that the two tasks were not particularly easy: Task 1 was the same tone-pitch identification task used in numerous previous studies supporting processing bottlenecks (e.g., Pashler & Johnston, 1989) and Task 2 was a shape identification task (triangle vs. circle) with an arbitrary S-R mapping. The finding of bottleneck bypassing with novel tasks is extremely unusual. It contradicts prevailing accounts of dual-task interference (e.g., Pashler & Johnston, 1989), but supports the preparation-neglect hypothesis.

EXPERIMENT 3: DOES INITIAL PRACTICE ON TASK 2 ENABLE BOTTLENECK BYPASSING?

In Experiment 2, we concluded that the key enabler of bottleneck bypassing was boosting preparation of Task 2, which we induced by intermixing single-task trials on Task 2 with the dual-task PRP trials. Yet, following the procedure of our previous studies showing bottleneck bypassing with easy tasks (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020), we had also added 96 extra practice trials on Task 2 only, prior to the dual-task PRP trials. Thus, we do not know whether bypassing was induced by these initial 96 practice trials or by the 96 single-task trials intermixed within the dual-task blocks.

Experiments 3 and 4 addressed this issue by including only the initial practice trials (Experiment

3) or only the intermixed single-task trials (Experiment 4). Table 2 shows the differences in experimental design between the four experiments. According to the preparation-neglect account, it is the latter (intermixing) that induces bottleneck bypassing, not the former (initial practice). So, Experiment 3 should produce bottlenecking, whereas Experiment 4 should enable bypassing. As will be seen, this is exactly what we found.

Experiment 3 started with 96 trials on Task 2 only, followed by 288 dual-task PRP trials (with no mixed single-task trials). Note that the total number of trials on Task 2 was identical to that of the previous experiments (i.e., 384 overall).

Table 2

Overview of the Experimental Designs Used in Experiments 1-4

Note. Exp. = experiment, PRP = psychological refractory period.

		Preparation boosting (intermixing single-task trials on Task 2)	
		No	Yes
Initial practice on Task 2	No	Exp. 1 (classic PRP)	Exp. 4
	Yes	Exp. 3	Exp. 2

Method

Participants. A fresh sample of 24 volunteers ($M = 22.1$ years old, $SD = 4.2$ years; 19 women) participated.

Design and procedure. Participants first performed familiarization trials on each of the two tasks separately: 6 trials on Task 1 and 6 trials on Task 2. They then performed 96 single-task trials on Task 2, broken into 3 blocks of 32 trials each. They then performed 24 dual-task familiarization trials (as in Experiments 1 and 2). Finally, they performed 288 experimental dual-task PRP trials. As in Experiments 1 and 2, the total number of trials on Task 2 was 384.

Results

We removed trials for which RT on either task was below 100 ms or above 2,500 ms (dual-task PRP: 2.16%; single-task: 0.00%). In addition, error trials were excluded from RT analyses (dual-task PRP: 4.79%; single-task: 3.34%).

Initial Classification. As in Experiment 1 (classic PRP), none of the 24 participants was able

to reach the 50% cutoff of bypassing; the mean percentage was only 6.5% and ranged from 0.0% to 32.5%. All 24 participants were thus classified as “primarily bottleneckers.”

Confirming Indicators for the Bottleneck Group.

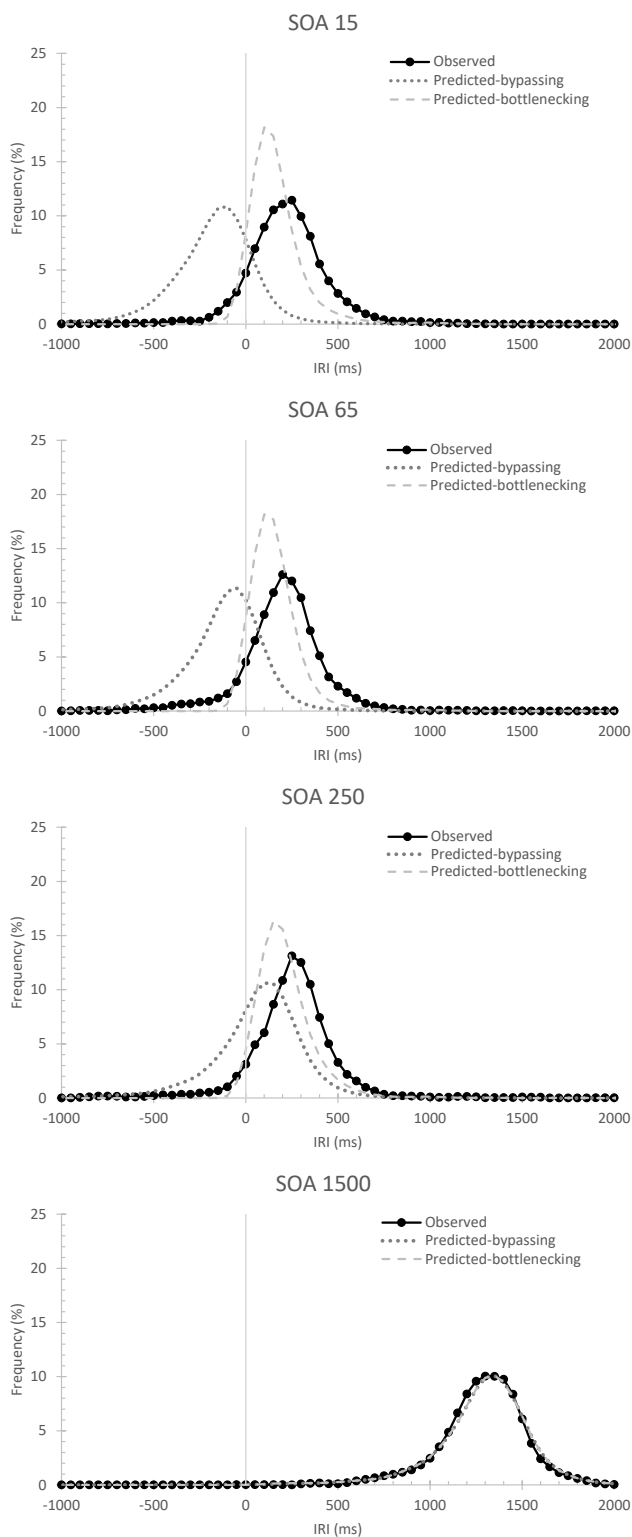
Observed vs. Simulated IRI Distributions. As can be seen in Figure 8, the observed IRI distribution was significantly different from that predicted by bypassing at each of the short SOAs ($p_s < .001$): 225 vs. -189 ms at the 15-ms SOA, $t(23) = 14.08$, $p < .001$, $d_z = 2.87$, 231 vs. -139 ms at the 65-ms SOA, $t(23) = 11.45$, $p < .001$, $d_z = 2.34$, and 288 vs. 46 ms at the 250-ms SOA, $t(23) = 8.85$, $p < .001$, $d_z = 1.81$. The observed IRI distributions were much closer to that predicted by bottlenecking, albeit with statistically significant deviations in the direction of greater than expected IRIs (ranging from ~60 to 90 ms). At the 15-ms SOA, the observed IRI distribution was shifted right relative to the IRI distribution predicted by bottlenecking, as evidenced by a statistically significant difference between their respective means (225 ms vs. 165 ms), $t(23) = 2.52$, $p = .019$, $d_z = 0.52$. A similar discrepancy was observed at the 65-ms SOA (231 ms vs. 166 ms), $t(23) = 2.82$, $p = .010$, $d_z = 0.58$, and at the 250-ms SOA (288 ms vs. 200 ms), $t(23) = 4.79$, $p < .001$, $d_z = 0.98$.

Amount of Dual-Task Interference on Task 1 and Task 2. Figure 9 shows the RTs on Task 1 and Task 2 as function of SOA (see also Table 1 for descriptive statistics). Similar to Experiment 1, mean RT2 sharply increased from the longest to the shortest SOA (412 ms vs. 826 ms), $F(1.431, 32.921) = 136.33$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.86$, yielding a large 414-ms PRP effect. Mean RT1 remained relatively constant across SOAs, $F(3, 69) = 0.17$, $p = .914$, $\eta_p^2 = 0.01$.

Error Rates. Mean Task-2 error rate was 3.08%; it was significantly influenced by SOA, $F(3, 69) = 3.95$, $p = .012$, $\eta_p^2 = 0.15$. Post-hoc analyses revealed that mean Task-2 error rate was significantly higher at the shortest SOA ($M = 4.11\%$) than at the longest SOA ($M = 1.94\%$), $t(23) = 2.18$, $p = .008$; no other pairwise comparison was significant ($p_s > .05$). Mean Task-1 error rate was 1.79%; it was not significantly influenced by SOA, $F(1.967, 45.230) = 2.19$, $p = .125$, $\eta_p^2 = 0.09$.

RT1:RT2 Correlations. Consistent with bottlenecking, the coefficient of correlation was

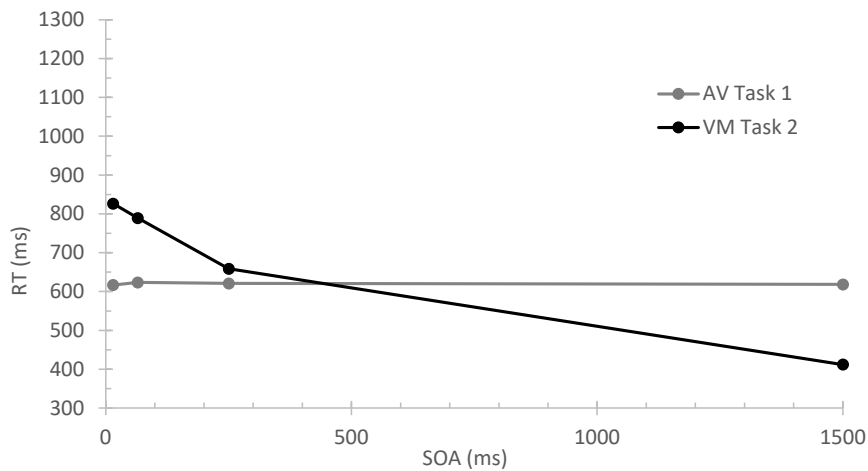
Figure 8
Observed vs. simulated distributions of inter-response intervals (IRIs) at each stimulus onset asynchrony (SOA) for Experiment 3 (initial practice on Task 2)



⁵ Our simulation of bottlenecking slightly underestimated the true observed IRI distributions. This deviation likely occurred because we underestimated the summed duration of stages 1C and 2A, which we fixed in advance following Van Selst et al. (1999).

Figure 9

Reaction times on the auditory-vocal (AV) Task 1 and the visual-manual (VM) Task 2 at each stimulus onset asynchrony (SOA) for Experiment 3 (initial practice on Task 2)



moderate overall (.55), and significantly influenced by SOA, $F(3, 69) = 25.77, p < .001, \eta_p^2 = 0.53$. A planned comparison showed that correlations were much stronger at the three short SOAs (average coefficient of .64) than at the longest SOA ($M = .28$), $t(69) = 8.77, p < .001$.

Discussion

Experiment 3 evaluated whether initial practice on Task 2 is, by itself, sufficient to enable bottleneck bypassing. It was identical to the classic PRP paradigm of Experiment 1, except for the addition of 96 single-task practice trials on Task 2 prior to the dual-task PRP trials. There was no evidence that the additional practice had any effect on bypassing. The overall probability of bypassing was only 6.5%. Furthermore, none of the 24 participants fell into the category of bypassers. Confirmatory analyses were also consistent with bottlenecking: the observed IRI distributions were closer to the IRI distribution predicted by bottlenecking than the one predicted by bypassing, the PRP effect was very large (414 ms), and RT1:RT2 correlations were stronger at short SOAs than at the longest SOA.

Overall, this additional experiment replicated the findings from Experiment 1 (i.e., bottlenecking). We therefore conclude that 96 initial practice trials are not sufficient, by themselves, to enable bottleneck bypassing.

EXPERIMENT 4: CONFIRMING THAT MIXED SINGLE-TASK TRIALS ON TASK 2 (I.E., PREPARATION BOOSTING) ARE A KEY ENABLER OF BOTTLENECK BYPASSING

After having demonstrated that initial practice on Task 2 is not a key enabler of bottleneck bypassing, Experiment 4 aimed at confirming that preparation boosting (via intermixing single-task trials on Task 2) is the actual key. To this end, this experiment removed the 96 initial practice trials but intermixed 128 single-task trials on Task 2 with 256 dual-task PRP trials (see Table 2). Again, the total number of trials on Task 2 was identical to that from previous experiments (384 overall). Also note that the proportion of mixed single-task trials within dual-task PRP trials (one third) was identical to that of Experiment 2. If preparation boosting is the key to enabling bypassing, as asserted by the preparation neglect hypothesis, then bottleneck bypassing should arise even without initial practice.

Method

Participants. A fresh sample of 24 volunteers ($M = 19.1$ years old, $SD = 0.9$ years; 21 women) participated.

Design and procedure. Participants first performed familiarization trials on each of the two tasks separately: 6 trials on Task 1 and 6 trials on Task 2. They then performed 24 dual-task familiarization trials (as in Experiments 1-3). Finally, they performed 384 experimental trials consisting of 256 dual-task PRP trials randomly

intermixed with 128 single Task-2 trials. The 384 experimental trials were broken into 12 blocks of 32 trials each.

Results

We removed trials for which RT on either task was below 100 ms or above 2,500 ms (dual-task PRP: 1.61%; mixed single-task: 0.16%). In addition, error trials were excluded from RT analyses (dual-task PRP: 5.64%; mixed single-task: 1.57%).

Initial Classification. Nine participants were able to reach the cutoff of bypassing, with an average of 85.9% of trials consistent with bypassing (ranging from 50.6% to 100.0%, cf. Figure 3). These participants were thus classified as “primarily

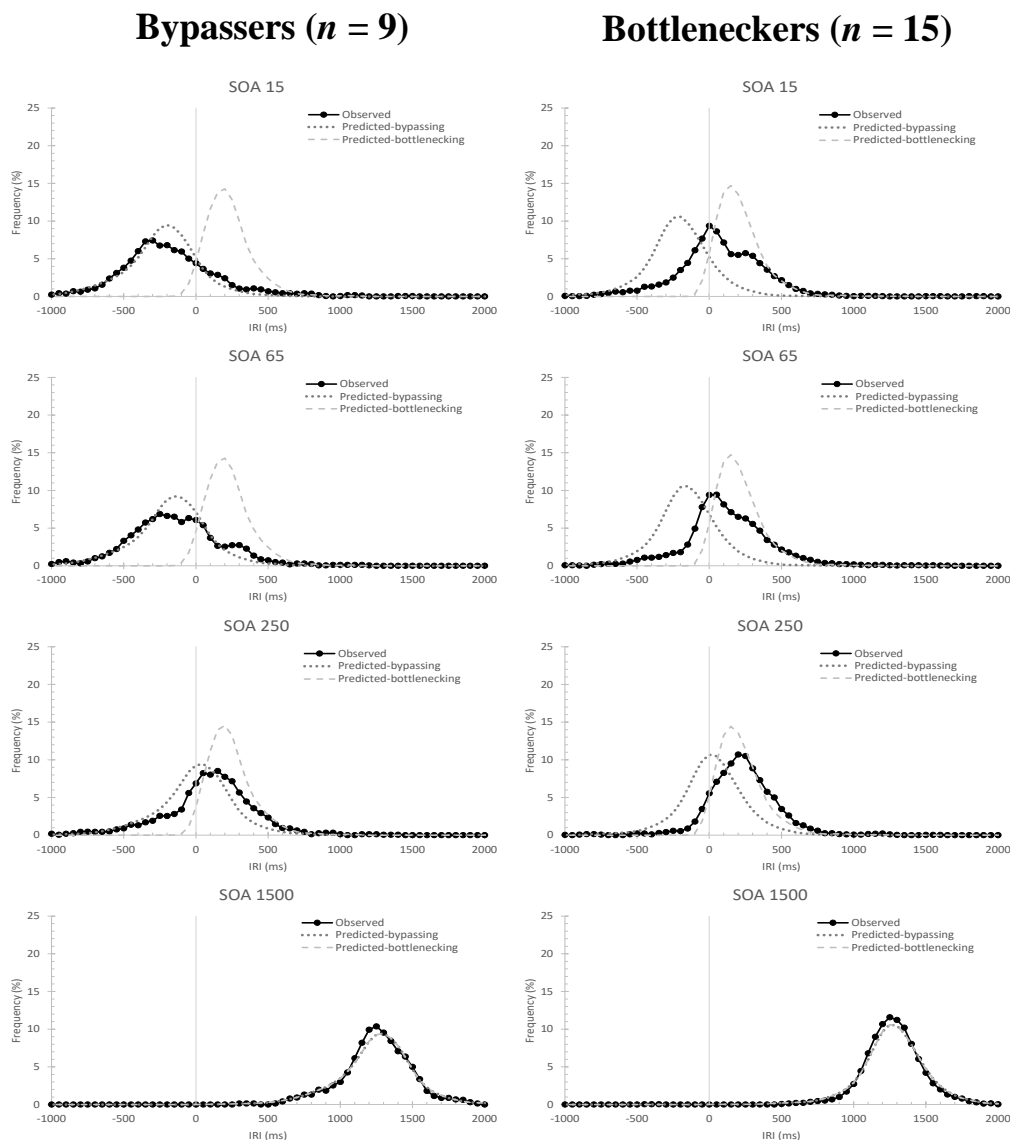
bypassers.” In contrast, the 15 other participants were classified as “primarily bottleneckers”: their mean percentage of bypassing was 27.5% (range: 2.3% to 48.6%).

Confirming Indicators for the Bypasser Group

Observed vs. Simulated IRI Distributions. Figure 10 shows, for each SOA, the observed and simulated IRI distributions. When task overlap was high (i.e., at the two short SOAs), the observed IRI distributions were well-fitted by the distributions predicted by bottleneck bypassing: the mean IRIs did not statistically differ at the 15-ms SOA (-206 ms vs. -237 ms), $t(8) = 1.14, p = .287, d_z = 0.38$, or the 65-ms SOA (-144 ms vs. -187 ms), $t(8) = 1.48, p = .177, d_z = 0.49$. At the 250-ms SOA, the observed IRI

Figure 10

Observed vs. predicted distributions of inter-response intervals (IRIs) at each stimulus onset asynchrony (SOA), separately for participants classified as bypassers (left panel) and bottleneckers (right panel), for Experiment 4 (which included mixed singles on Task 2)



distribution was shifted right relative to the IRI distribution of bottleneck bypassing (94 ms vs. -2 ms), $t(8) = 3.50$, $p = .008$, $d_z = 1.17$, as was also observed in Experiment 2. In contrast, the observed IRI distributions differed dramatically from the predicted bottlenecking distributions at the three short SOA: -206 ms vs. 229 ms at the 15-ms SOA, $t(8) = -9.24$, $p < .001$, $d_z = -3.08$, -144 ms vs. 230 ms at the 65-ms SOA, $t(8) = -7.47$, $p < .001$, $d_z = -2.49$, and 94 vs. 241 ms at the 250-ms SOA, $t(8) = -3.71$, $p = .006$, $d_z = -1.24$.

Amount of Dual-Task Interference on Task 1 and Task 2. Figure 11 shows the mean RTs on Task 1 and Task 2 as a function SOA (Table 1 shows descriptive statistics). RT2 was influenced by SOA, $F(1.394, 11.152) = 12.83$, $p = .002$, $\eta_p^2 = 0.62$. Post hoc analyses revealed that RT2 was longer at the short SOAs (average of 651 ms) than at the longest SOA (480 ms): 630 ms at the 15-ms SOA vs. 480 ms, $t(8) = 4.35$, $p = .001$, 649 ms at the 65-ms SOA vs. 480 ms, $t(8) = 4.90$, $p < .001$, and 673 ms at the 250-ms SOA vs. 480 ms, $t(8) = 5.62$, $p < .001$; no other comparison between SOAs was significant. The PRP effect was 150 ms. Meanwhile, RT1 was long overall (average of 816 ms) and influenced by SOA, $F(3, 24) = 12.46$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.61$. Post hoc analyses showed that mean RT1 was slightly longer at the three short SOAs (average of 846 ms) relative to the longest SOA ($M = 728$ ms): 850 ms at the 15-ms SOA vs. 728 ms, $t(8) = 5.08$, $p < .001$, 858 ms at the 65-ms SOA vs. 728 ms, $t(8) = 5.38$, $p < .001$, and 830 ms at the 250-ms SOA vs. 728 ms, $t(8) = 4.23$, $p = .002$; no other comparison between SOAs was significant.

Error Rates. Mean Task-2 error rate was 5.15%; it was significantly influenced by SOA, $F(3, 24) = 3.60$, $p = .028$, $\eta_p^2 = 0.31$. Post hoc analyses revealed that mean Task-2 error rate was significantly higher

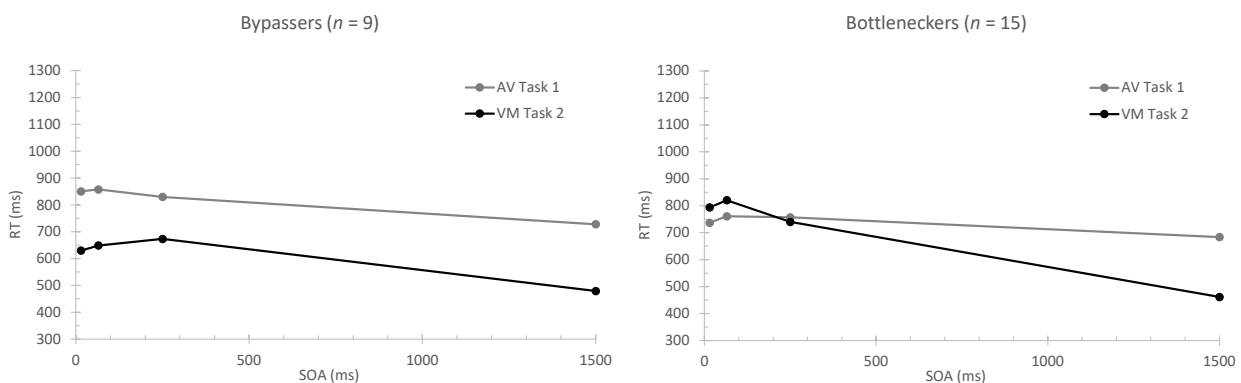
at the 250-ms SOA ($M = 7.16\%$) than at the 15-ms SOA ($M = 3.16\%$), $t(8) = 3.02$, $p = .036$; no other comparison between SOAs was significant. Mean Task-1 error rate was 1.98% and remained relatively constant across SOAs, $F(3, 24) = 1.36$, $p = .280$, $\eta_p^2 = 0.15$.

RT1:RT2 Correlations. Consistent with bottleneck bypassing, the coefficient of correlation was weak overall (.25) and not significantly influenced by SOA, $F(3, 24) = 0.25$, $p = .860$, $\eta_p^2 = 0.03$: the correlations were .22, .23, .29, and .25 at the 15-ms, 65-ms, 250-ms, and 1,500-ms SOAs, respectively.

Confirming Indicators for the Bottleneck Group. Visually, at the two shortest SOAs, this group's IRI distributions were closer to the bottlenecking distribution, but shifted in the direction of the bypassing distribution; this presumably reflects that bypassing (and/or response grouping) occurred on a modest proportion of the trials. At the 15-ms SOA, the mean of the observed IRI distribution was located 280 ms right of the predicted bypassing distribution (72 ms vs. -208 ms), $t(23) = 10.47$, $p < .001$, $d_z = 2.70$, and 141 ms left of the predicted bottlenecking distribution (72 ms vs. 213 ms), $t(23) = -4.32$, $p < .001$, $d_z = -1.12$. The same pattern also held at the 65-ms SOA: the mean of the observed distribution was located 283 ms right of the predicted bypassing distribution (125 ms vs. -158 ms), $t(23) = 8.85$, $p < .001$, $d_z = 2.29$, and 90 ms left of the predicted bottlenecking distribution (124 ms vs. 214 ms), $t(23) = -2.56$, $p = .023$, $d_z = -0.66$. At the 250-ms SOA, the mean of the observed distribution significantly differed from that of the predicted bypassing distribution (233 ms vs. 27 ms), $t(23) = 7.09$, $p < .001$, $d_z = 1.83$, whereas the means of the observed distribution and the predicted

Figure 11

Reaction times on the auditory-vocal (AV) Task 1 and the visual-manual (VM) Task 2 as a function of the stimulus onset asynchrony (SOA) for the bypassers (left panel) and the bottleneckers (right panel) for Experiment 4 (mixed singles on Task 2)



bottlenecking distribution did not statistically differ (233 ms vs. 222 ms), $t(23) = 0.41, p = .686, d_z = 0.11$.

Amount of Dual-Task Interference on Task 1 and Task 2. Mean RT2 was significantly influenced by SOA, $F(1.777, 24.882) = 79.45, p < .001, \eta_p^2 = 0.85$: RT2s were 794 ms, 820 ms, 740 ms, and 462 ms at the 15-ms, 65-ms, 250-ms, and 1,500-ms SOAs, respectively. The mean PRP effect, calculated as the RT difference between the most extreme SOAs, was 332 ms. RT1 was also significantly influenced by SOA, $F(3, 42) = 10.94, p < .001, \eta_p^2 = 0.44$: RT1s were 737 ms, 761 ms, 757 ms, and 684 ms at the 15-ms, 65-ms, 250-ms, and 1,500-ms SOAs, respectively.

Error Rates. Mean Task-2 error rate was 2.48%; it was not significantly influenced by SOA, $F(3, 42) = 0.98, p = .410, \eta_p^2 = 0.07$. Mean Task-1 error rate was 2.34%. It was significantly influenced by SOA, $F(3, 42) = 5.03, p = .005, \eta_p^2 = 0.26$: Task-1 error rates were 3.05%, 3.17%, 2.12%, and 0.94% at the 15-ms; 65-ms, 250-ms, and 1,500-ms SOAs, respectively.

RT1:RT2 Correlations. The coefficient of correlation was .49 overall and influenced by SOA, $F(3, 42) = 14.78, p < .001, \eta_p^2 = 0.51$. A planned comparison showed significantly stronger correlation at the three shortest SOAs (average of .57) than the longest SOA ($M = .24$), $t(42) = 5.93, p < .001$. This pattern suggests that this group of participants were more often bottlenecking than bypassing.

Discussion

Experiment 4 tested whether preparation boosting is the key enabler of bottleneck bypassing. Thus, this experiment intermixed single-task trials on Task 2 with dual-task PRP trials, but did not include the initial 96 practice trials on Task 2 (see Table 2). Despite the absence of initial practice on Task 2 (beyond 30 familiarization trials), 49.4% of the dual-task PRP trials were consistent with bypassing. Relatedly, 9 participants (out of 24) were able to bypass the central bottleneck; their mean percentage of bypassing was high (85.9%). Their observed IRI distributions at the two short SOAs were well fitted by the simulated IRI distributions of bottleneck bypassing. Furthermore, their mean PRP effect was especially small (150 ms) given their long mean RT1 (816 ms). Finally, the RT1:RT2 correlations were weak overall (.25).

In sum, the results of Experiment 4 provided a close replication of the frequent bypassing observed in Experiment 2. They also confirm that the key enabler of bottleneck bypassing is not extra initial practice (which had no apparent effect), but rather

preparation boosting, induced by intermixing single-task trials on Task 2 within the dual-task PRP trials.

Between-Experiment and Between-Group Comparisons

To formally demonstrate the impact of our manipulation to boost preparation (intermixing single-task trials amongst the dual-task PRP trials), we statistically compared across experiments the key indicators of dual-task interference on Task 2 and RT1:RT2 correlations.

The Effects of Preparation Boosting Via Mixed Single-Task Trials

For this analysis we pooled Experiments 1 and 3 (without a preparation boost) and compared them to Experiments 2 and 4 (with a boost). We carried out independent-samples t tests on the two key indicators of bottlenecking vs. bottleneck bypassing: the amount of dual-task interference on Task 2 and the RT1:RT2 correlations averaged across the three shortest SOAs. According to the preparation-neglect hypothesis, preparation enables bottleneck bypassing. Thus, dual-task interference on Task 2 and the correlations at short SOAs should be significantly smaller in Experiments 2 and 4 than in Experiments 1 and 3.

Consistent with preparation neglect, the amount of dual-task interference on Task 2 was significantly smaller in Experiments 2 and 4 ($M = 266$ ms, $SD = 185$ ms) than in Experiments 1 and 3 ($M = 430$ ms, $SD = 141$ ms), $t(93) = -4.86, p < .001$ (one-tailed), $d_s = -1.00$. Also consistent with preparation neglect, the RT1:RT2 correlations at short SOAs were significantly smaller in Experiments 2 and 4 (average of .45) than in Experiments 1 and 3 (average of .67), $t(93) = -5.39, p < .001$ (one-tailed), $d_s = -1.11$. In sum, the comparisons between experiments confirmed that preparation is a key enabler of bottleneck bypassing.

Bottleneckers vs. Bypassers

We classified individuals based on their IRIs. To verify that the bypassers really did show more efficient dual-task performance than the bottleneckers, we compared them statistically. We first combined the bypassers from Experiments 2 and 4 ($n = 18$), as well as the bottleneckers ($n = 29$) from Experiments 2 and 4.

The results showed much smaller dual-task interference on Task 2 for the bypassers than the bottleneckers (99 vs. 370 ms), $t(45) = -6.95, p < .001$ (one-tailed), $d_s = -2.09$. In addition, the RT1:RT2 correlation at short SOAs was significantly smaller for the bypassers than the bottleneckers (.27 vs. .57), $t(45) = -5.21, p < .001$ (one-tailed), $d_s = -1.56$. These

analyses confirm more efficient and more independent performance among the bypassers than the bottleneckers.

General Discussion

In this study, we evaluated the possibility that the central bottleneck can be bypassed even for novel tasks, allowing central processes (e.g., selecting a response) to be fully performed in parallel. Such a result would be unprecedented and should not be possible according to prevailing accounts of dual-task interference and past results (e.g., Pashler, 1994). Indeed, reviews of dual-task interference do not even mention the possibility of bottleneck bypassing with novel tasks (e.g., Koch et al., 2018). The preparation neglect hypothesis, however, predicts that merely boosting task preparation should enable bottleneck bypassing.

Experiment 1 confirmed that, in classic PRP conditions, none of the 24 participants was able to reliably bypass the central bottleneck. The observed IRI distributions closely fitted the bottlenecking simulations but were poorly fitted by the bypassing simulations. In addition, the amount of dual-task interference on Task 2 was very large (445 ms) and the RT1:RT2 correlations were strong at short SOAs (.71). Thus, this classic PRP experiment confirmed the presence of a central bottleneck that severely constrains dual-task performance, thereby replicating dozens of previous PRP studies.

The results of Experiment 2, however, told a different story, despite using the same tasks. The main change was the insertion of additional single-task trials of Task 2 within the dual-task PRP blocks, to give participants extra incentive to prepare for that task. Surprisingly, nearly half the sample of participants (9 participants out of 24) were able to bypass the central bottleneck. This was evidenced by a very high percentage of dual-task PRP trials consistent with bypassing (81.1%; see Figure 3). For these 9 bypassers, the observed IRI distributions closely matched the bypassing simulations, but poorly matched the bottlenecking simulations. In addition, the PRP effect was only 48 ms, and RT1:RT2 correlations were weak (.28 on average). For the 14 other participants who did not reach the cutoff of 50%, the results indicated a preponderance of bottlenecking. Although these individuals primarily bottlenecked, the IRI distributions suggest that some were able to occasionally bypass (see Figure 3).

Experiments 3 and 4 compared the effects of adding single-task practice of Task 2 prior to the dual-task trials (Experiment 3) versus intermixing single-task trials of Task 2 within the dual-task PRP

trials (Experiment 4). According to the preparation neglect account, the latter should boost preparation and therefore enable bypassing, whereas the former should not. That is exactly what we found. Initial practice on Task 2, prior to a classic PRP design, led to bottlenecking (Experiment 3). However, intermixing single-task trials of Task 2 within dual-task PRP blocks led to frequent bypassing (Experiment 4). Closely replicating Experiment 2, we estimated that bypassing occurred on 49% of the trials and that it predominated for 9 of 24 participants.

As noted above, the PRP effect was significantly reduced in the experiments with a preparation boost (266 ms; Experiments 2 and 4), compared to those without the preparation boost (430 ms; Experiments 1 and 3). Furthermore, the proportion of participants classified as bypassers was significantly greater for the preparation boosting Experiments 2 and 4 (18 out of 47) than for the classic PRP Experiments 1 and 3 (0 out of 48), $\chi^2(1, N = 95) = 22.68, p < .001$. Overall, the present study supports the preparation-neglect hypothesis of dual-task interference.

Preparation: A Key Enabler of Bottleneck Bypassing

Previous studies have pointed out that preparation plays at least some role in dual-task interference, albeit secondary (Gottsdanker, 1980; Logan, 1978; Pashler, 1984, 1994). For instance, Pashler (1984) speculated that, in addition to a central bottleneck, some Task-2 slowing stems from insufficient preparation of Task 2. Later, Pashler (1994) summarized this speculation as follows: “the inability to select two responses at the same time (the central bottleneck) is not the only cause of dual-task slowing... dual-task slowing is probably increased by the fact that tasks are prepared less effectively when other tasks must be prepared at the same time” (p. 323). This view, however, clearly does not predict any bypassing with increased task preparation, nor does it note the specific problem with Task-2 preparation.

According to De Jong (1995), preparation is needed to schedule in advance the dual-task processing sequence, in particular the allocation of attention to Task 1 followed by a subsequent switch of attention to Task 2. Even though De Jong speculated that “parallel processing should also be promoted when one or both tasks require only minimal preparation, as when one or both tasks are highly ideomotor compatible” (p. 22), he did not consider it to be a possibility with novel tasks.

In contrast to Pashler’s (1994) or De Jong’s (1995) accounts, the present preparation-neglect hypothesis posits that preparation plays a primary

role in dual-task performance. Consistent with this new hypothesis, we demonstrated that, in conditions boosting preparation on Task 2, the central bottleneck could be entirely bypassed without practice, on almost half the trials. Preparation boosting was induced by randomly intermixing single-task trials on Task 2 with dual-task PRP trials. In our view, these mixed single-task trials on Task 2 encouraged participants to get ready in advance for Task 2, by loading the S-R mapping of Task 2 into working memory. This allowed the Task-2 stimulus to automatically activate the associated response code, and the response to be executed, without recruiting attention. A closely related possibility is that preparing to (possibly) perform Task 2 alone causes participants to set up advance permission for the Task-2 response to execute automatically (e.g., when the response code reaches some threshold of activation).

The Bypassers Really are Bypassing, Not Reverse Bottlenecking

Before concluding that preparation boosting enabled 18 individuals to bypass the central bottleneck most of the time, it is important to show that they did not merely perform the central operations of the tasks serially, but starting with the second task on almost half the trials (i.e., reverse bottlenecking). To examine this possibility, we simulated the IRI distributions predicted by reverse bottlenecking and bottleneck bypassing at the two shortest SOAs (i.e., those the most sensitive to discriminate between candidate models), for all 18 individuals identified as “primarily bypassers” in Experiments 2 ($n = 9$) and 4 ($n = 9$). We then compared their simulated and observed IRI distributions.

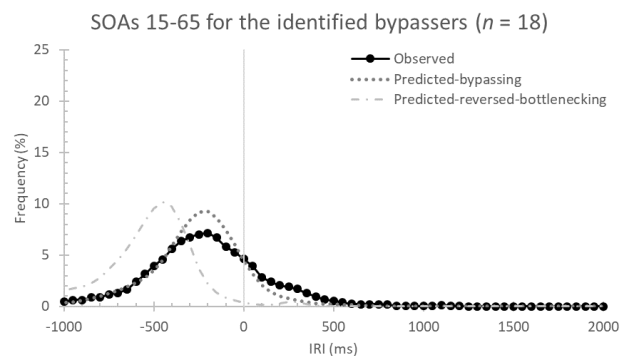
As can be seen in Figure 12, the IRI distribution predicted by reverse bottlenecking provided a very poor fit of the bypasser group’s IRI distribution: the mean of the predicted reverse bottlenecking distribution was located 309 ms left of the observed distribution (-538 ms vs. -229 ms), $t(17) = -10.21$, $p < .001$, $d_z = -2.41$. In sharp contrast, the IRI distribution predicted by bottleneck bypassing provided an excellent fit of the observed IRI distribution: the means of the predicted bypassing distribution (-263 ms) and of the observed distribution (-229 ms) did not statistically differ, $t(17) = -1.30$, $p = .211$, $d_z = -0.31$.

Additionally, mean RT1 at the two shortest SOAs should be much longer in case of reverse bottlenecking (because now Task 1 suffers the PRP effect) than bottleneck bypassing. This is exactly what happened: mean RT1 as predicted by the simulation of reverse bottlenecking (1,076 ms) was

much longer than mean RT1 as observed in the 18 bypassers (880 ms), $t(17) = 9.86$, $p < .001$, $d_z = 2.32$. These analyses confirm the conclusion that the 18 identified bypassers really were able to bypass the central bottleneck.^{6,7}

Figure 12

Observed vs. predicted distributions of inter-response intervals (IRIs) at the two shortest stimulus onset asynchronies (SOAs) for participants classified as bypassers in experiments boosting preparation (i.e., Experiments 2 and 4)



Is Preparation Boosting a Stable and Global Strategy?

After having demonstrated that bottleneck bypassing on the novel Task 2 was enabled by boosting preparation on Task 2, it is then only natural to examine the nature of this boost. Is it a transient strategy or a more stable strategy.⁸ Because this boost was induced by mixed single-task trials on Task 2, we examined whether there was a local influence of the preceding trial (mixed single-task trial on Task 2 vs. dual-task trial) on the

⁶ As rightly pointed out by Iring Koch, our model predicts a longer mean RT1 in case of bottleneck bypassing than in case of bottlenecking, because greater preparation of Task 2 implies less preparation of Task 1 (preparation is a limited resource). To evaluate this prediction, we compared mean RT1 as a function of SOA between Experiment 3 (which revealed bottlenecking) and Experiment 4 (which revealed bottleneck bypassing in nearly half the sample). We compared these two experiments because they used roughly similar numbers of dual-task PRP trials (i.e., 288 in Experiment 3, 256 in Experiment 4). Consistent with the view that preparation is a limited resource, mean RT1 was longer in Experiment 4 (producing bypassing) than in Experiment 3 (producing bottlenecking): 765 ms vs. 620 ms, $F(1, 46) = 9.84$, $p = .003$, $\eta_p^2 = 0.176$.

⁷ Following the multi-phase framework of temporal response-order control (Pieczykolan & Huestegge, 2019), bottleneck bypassing may represent a third response-order control (in addition to no-reversal response order and reversal response order): either response order. Note that this response order might be particularly vulnerable to instructions encouraging participants to explicitly reverse their responses.

⁸ We thank Kate Arrington, Lynn Huestegge, Iring Koch, and an anonymous reviewer for suggesting this analysis.

performance of the subsequent dual-task PRP trial. If preparation is a transient strategy, then RT2 should be faster when preceded by a mixed single-task trial on Task 2 relative to a dual-task PRP trial. But if preparation is a more stable and global strategy, then RT2 should not be significantly influenced by the nature of the preceding trial.

To test these predictions, we analyzed the combined data of Experiments 2 and 4 (i.e., the two experiments using mixed single-task trials on Task 2). Consistent with the view that preparation boosting is a global strategy, Task-2 performance on dual-task PRP trials was virtually identical regardless of whether the preceding trial was a mixed single-task trial on Task 2 or a dual-task PRP trial (692 vs. 690 ms), $F(1, 46) = 0.08, p = .774, \eta_p^2 = 0.002$. Also, neither the type of preceding trial X type of subgroup interaction, $F(1, 45) = 0.60, p = .445, \eta_p^2 = 0.01$, the preceding trial X SOA interaction, $F(2.463, 110.823) = 2.44, p = .080, \eta_p^2 = 0.05$, nor the type of preceding trial X type of subgroup x SOA interaction, $F(2.463, 110.823) = 1.40, p = .250, \eta_p^2 = 0.03$, were significant. In short, we did not detect any task order effects.

We also checked whether bottleneck bypassing occurred only because individual bypassers recognized a stimulus repetition from the preceding trial. For the bypassers identified in Experiments 2 and 4, we examined whether dual-task RT2 across SOAs depended on whether the preceding mixed single-task trial displayed the exact same Task-2 stimulus (e.g., a triangle then another triangle) or different (e.g., triangle then circle).¹⁰ Task-2 stimulus repetition (same vs. different) had no significant effect (696 vs. 688 ms), $F(1, 46) = 0.33, p = .568, \eta_p^2 = 0.007$. Also, Task-2 stimulus repetition did not significantly interact with SOA, $F(2.101, 96.644) = 0.60, p = .561, \eta_p^2 = 0.01$. Therefore, bottleneck bypassing did not occur simply because participants recognized an exact stimulus repetition.

⁹ It is logically possible that some bypassed more than others only because they were fortunate to receive an unusually large number of dual-task trials preceded by a single-task trial. However, an ad hoc analysis confirmed that the number of such occurrences did not differ statistically between the bypassers and the bottleneckers in Experiment 2 (64.1 vs. 66.2 trials), $t(21) = -1.14, p = .266, d_s = -0.49$, or in Experiment 4 (84.4 vs. 87.4 trials), $t(22) = -1.38, p = .182, d_s = -0.58$.

¹⁰ A post hoc analysis showed that the number of stimulus repetition from single-task trials to dual-task PRP trials did not differ statistically between the bypassers and the bottleneckers in Experiment 2 (33.1 vs. 34.4 trials), $t(21) = -0.69, p = .499, d_s = -0.29$. It was statistically significant in Experiment 4, but with fewer stimulus repetitions for the bypassers than the bottleneckers (39.4 vs. 44.4 trials), $t(22) = -2.64, p = .015, d_s = -1.11$.

Individual Differences

Another important contribution of the present study is the demonstration of large individual differences, with the degrees of bypassing ranging from near 0% to near 100% of trials (see Figure 3). Several participants primarily bypassed the bottleneck ($n = 9$ in Experiment 2, $n = 9$ in Experiment 4), whereas others primarily bottlenecked ($n = 14$ in Experiment 2, $n = 15$ in Experiment 4). We therefore suggest that future studies take individual differences into account, rather than solely analyzing data for the entire sample together. Note, however, that the amount of bypassing was not strictly bimodal; rather we observed many individuals with intermediate frequencies of bypassing.

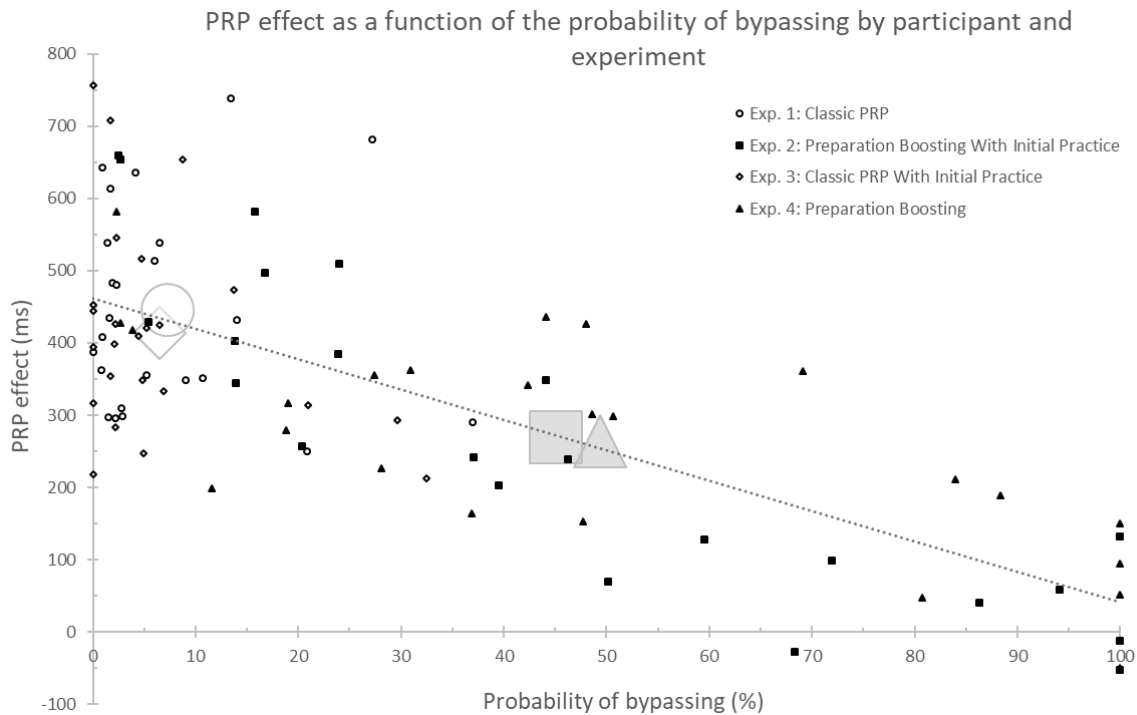
Individual differences are even more salient when plotting PRP effects against bypassing probabilities for each individual across all four experiments, as shown in Figure 13. The PRP effects were linearly related to the individual probabilities of bypassing across Experiments 1-4 ($N = 95$), with a strong negative correlation, $r(95) = -.73, p < .001$. Those individuals with near 0% bypassing probability produced 462 ms of dual-task interference on Task 2 whereas those with 100% bypassing probability produced negligible dual-task interference on Task 2 (only 41 ms). We conclude that residual PRP effects are largely due to the percent of trials in which the bottleneck was still in force (i.e., not bypassed).

What are the causes of these individual differences? As in Maquestiaux and Ruthruff (2021) and Lyphout-Spitz et al. (2022), baseline skill at Task 2 or baseline skill at Task 1, as measured by RT, did not predict who would bypass. In Experiment 2, the percent of trials consistent with bypassing did not significantly correlate with mean RT2 in the initial single-task blocks, $r(23) = -.10, p = .659$. Relatedly, there was also no significant correlation in Experiments 2 and 4 combined, with mean RT2 measured at the longest SOA, $r(47) = .02, p = .906$. Similarly, there was no correlation with Task-1 skill as measured by RT1 at the longest SOA in Experiments 2 and 4, $r(47) = .07, p = .632$. Watson and Strayer (2010) reported a similar finding with practiced tasks: skill level at the individual tasks (i.e., driving and complex arithmetic calculations) did not explain why 2.5% of their participants showed extraordinary dual-tasking ability.

Because both processing modes (i.e., bypassing vs. bottlenecking) emerged from the very beginning,

Figure 13

Psychological refractory period (PRP) effect as a function of the probability of bypassing the central bottleneck for each individual participant of Experiments 1-4 (N = 95)



Note. For the regression line (represented by the oblique dashed line): PRP effect = -4.21 (probability of bypassing) + 462.13 , $r^2 = .528$. The four larger shapes represent the mean values of Experiments 1, 2, 3, and 4.

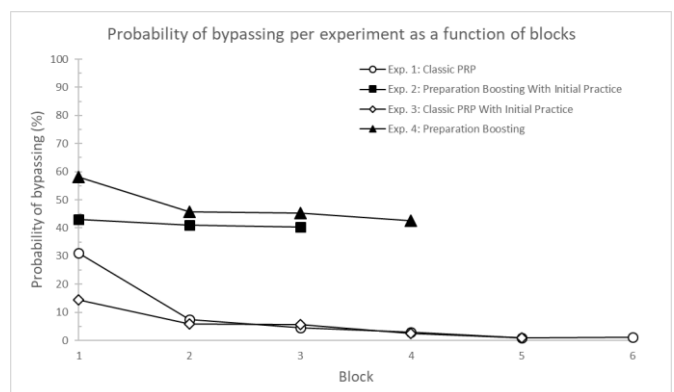
independently of skill level, we tentatively speculate that it is an individual choice for one strategy over another, perhaps driven by metacognitive factors such as confidence in the ability to multitask (for a similar proposal in the field of associative learning, see Tournon & Hertzog, 2004; for a discussion of individual differences in multitasking, see Brüning et al., 2022). Relatedly, some individuals might choose to prepare Task 2 and others to focus their preparation on Task 1.

The Classic PRP Paradigm Teaches Participants to Bottleneck

Does a preparation boost cause bypassing to gradually develop across trials? Or does the classic PRP paradigm teach participants to stop bypassing? Figure 14 shows, for each experiment, the average probability of bypassing across blocks of 64 dual-task PRP trials (a more detailed breakdown across individuals can be found in the online supplemental material). For the experiments with preparation boosting (i.e., Experiments 2 and 4), the estimated probability was fairly high even in the first block and did not tend to increase or decrease.

Figure 14

Mean probability of bypassing across blocks for Experiments 1-4 (N = 95)



For the classic PRP experiments with no preparation boost (i.e., Experiments 1 and 3), however, the probabilities of bypassing began at a modest level then dropped markedly across sessions: from 31.2% in block 1 to 1.1% in blocks 5-6 for Experiment 1, $F(1.239, 28.492) = 16.83$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.423$, and from 14.5% in block 1 to 1.7% in blocks 4-5 for Experiment 3, $F(1.770, 40.721) =$

6.07, $p = .007$, $\eta_p^2 = 0.209$. Apparently, classic PRP trials, with a fixed task order, caused participants to stop bypassing and begin bottlenecking. A preparation boost, however, counteracted this effect and participants continued to bypass despite a fixed task order.

Relation to Previous Work

Broadly speaking, the present findings support the view that there is no immutable structural central limitation (Hazeltine et al., 2002; Meyer & Kieras, 1997a, 1997b, 1999; Schumacher et al., 2001). Meyer and Kieras (1997b) envisioned that the central limitation is under the strategic control of the individual. According to these authors, individuals choosing a daring scheduling strategy can perform the central operations of two tasks at the same time (i.e., bottleneck bypassing).

However, Meyer and Kieras (1997a, 1997b) underestimated the possibility of bottleneck bypassing without practice. In fact, Meyer and Kieras (1999) proposed that highly efficient dual-task processing “occurs when five prerequisite conditions prevail in combination: (a) participants are encouraged to give the task equal priority; (b) participants are expected to perform each task quickly; (c) there are no constraints on temporal relations or serial order among responses; (d) different tasks use different perceptual and motor processors; and (e) participants receive enough practice to compile complete production rule sets for performing each task.” (p. 54). We agree with many of their prerequisites, especially (c) as well as (d), which is supported by research demonstrating that sensory-motor modality compatibility plays a key role in enabling bottleneck bypassing (Halvorson & Hazeltine, 2015, 2019; Hazeltine & Ruthruff, 2006; Hazeltine et al., 2006; Maquestiaux et al., 2018) as well as in reducing switching costs (Stephan & Koch, 2011, 2015, 2016). However, Experiments 2 and 4 of the present study clearly do not meet requisite (e), as we did not provide extensive practice (unlike Schumacher et al., 2001, who had participants perform six sessions). Also, although our manipulation of preparation most closely resembles prerequisite (a), we did not find it necessary to provide equal emphasis on Task 1 and Task 2; rather, it may be sufficient to provide adequate emphasis on Task 2.

Given that bottleneck bypassing is highly sensitive to experimental conditions (e.g., eliminating input and output conflicts, promoting preparation on Task 2), one can question whether it is truly under “strategic control” as advocated by Meyer and Kieras (1997b). Future studies are needed to directly address this question.

Constraints on Generality

The target population for our study is younger adults. We used samples of young adults (average of 20 years old), mostly students enrolled in various bachelor programs at the Université de Franche-Comté, Besançon (France), which is located in a rural region (Bourgogne-Franche-Comté). Although we expect our main finding – parallel central processing, with negligible interference, with novel tasks – to generalize to samples of younger adults with different backgrounds, this has not yet been established.

Older adults generally experience greater dual-task difficulties and are less likely to automatize tasks with practice (e.g., Maquestiaux et al., 2004, 2010, 2013; Hartley & Maquestiaux, 2007; Hartley et al., 2015, 2016; Maquestiaux & Ruthruff, 2021). Therefore, it remains to be seen whether parallel central processing will generalize to this population.

We report a very unusual finding (bottleneck bypassing with novel tasks) in a dual-task PRP experiment boosting task preparation. We did so by randomly intermixing single-task trials on that task along with dual-task PRP trials. However, several caveats are in order regarding the generality of this finding. First, many real-world situations might better resemble the classic PRP paradigm (e.g., typing requires a sequence of actions in a correct order) and thus promote preparation neglect, leading to ubiquitous central bottlenecks.

Second, even with incentives to prepare Task 2, we found that not all participants bypassed the bottleneck consistently; roughly half appeared to be bottlenecking most of the time. It remains to be seen whether the proportion of bypassing can be increased, for example by further incentivizing the preparation of Task 2.

Third, although we used tasks very similar to those used in the seminal studies that originally argued for a central bottleneck, these tasks are admittedly simple compared to many real-world tasks. Presumably, central interference will be strong for particularly complex tasks, such as planning a vacation or driving a car. Further work is therefore needed to identify the boundary conditions of bottleneck bypassing and nearly perfect time-sharing. Based on the preparation neglect account, we speculate that the ease with which a task can be represented in working memory will be particularly critical, rather than task complexity (the number of stimuli and responses) and stimulus-response compatibility, *per se*.

Conclusions and Contributions

The present study confirmed bottlenecking in classic PRP experiments (Experiments 1 and 3) but, most strikingly, found bottleneck bypassing in PRP experiments modified to boost task preparation (Experiments 2 and 4). Evidence for bottleneck bypassing with novel tasks is unprecedented. These novel findings contradict prevailing models of dual-task interference, which do not predict bottleneck bypassing on novel tasks, without extensive practice.

These findings also contradict the view that what matters the most in improving Task-2 performance in PRP experiments is dual-task practice (rather than mere single-task practice), which is supposed to aid the acquisition of dual-task coordination skills and efficient instantiation of task sets (Schubert & Strobach, 2018; Strobach, 2020). Coordination skills might be critical in classic PRP paradigms. Yet here we found more bypassing in Experiment 2 even though these participants actually performed only half as many dual-task trials relative to Experiment 1 (192 vs. 384). As confirmed in Experiments 3 and 4, what matters is not practice but rather boosting task preparation on the task that is most likely to be neglected (i.e., Task 2).

Third, the present study sheds light on the claim that the PRP procedure is not valid for studying dual-task processing (Halvorson et al., 2013; Huestegge & Hazeltine, 2011). According to Huestegge & Hazeltine (2011), “the PRP paradigm may not be a valid model to test to what extent two tasks can principally be processed simultaneously, because its inherent structure (i.e., the variable SOA) seems to impose a task-specific serial processing strategy. This severely limits the validity of PRP paradigm as a general model for cognitive processes during multitasking” (p. 446). On the one hand, our Experiments 1 and 3 confirm that the standard PRP paradigm is in fact not conducive to bottleneck bypassing (and may teach participants to bottleneck). On the other hand, the variant of the PRP paradigm used in Experiments 2 and 4 revealed converging evidence of bottleneck bypassing. What prevented bypassing in Experiments 1 and 3 was not the use of multiple SOAs per se but rather the lack of preparation on Task 2. When boosting Task-2 preparation by intermixing dual-task PRP trials with single-task trials on Task 2, nearly half of the participants in Experiments 2 and 4 (i.e., 9 out of 24 in each experiment) were able to simultaneously process the two tasks without central constraints. Meanwhile, there are advantages to using multiple SOAs. For one, it reduces the chances of a bottleneck being latent (Maquestiaux et al., 2008,

2010; 2013, 2018, 2020; Maquestiaux & Ruthruff, 2021; Ruthruff et al., 2003, 2006, 2009). Another advantage is that multiple SOAs reduce the likelihood of participants combining both tasks into one supertask (in which case there would no longer be any multitasking). In addition, the PRP paradigm mimics many real-world situations that have variable SOAs (e.g., athletics, driving). So, although we agree that the classic PRP paradigm is not well-suited for studying bottleneck bypassing, variants of it are.

Fourth, the theoretical contribution of this study is the validation of the preparation-neglect hypothesis. Preparation neglect not only can explain why dozens of previous experiments have shown large amounts of dual-task interference, but also why the present study obtained unprecedented evidence of dual-task automaticity with novel tasks.

Context of the Research

The main idea of this work, the preparation-neglect hypothesis to explain dual-task interference, was inspired by our previous works showing massive evidence of parallel central processing (i.e., bottleneck bypassing) with very easy tasks (Lyphout-Spitz et al., 2022; Maquestiaux et al., 2020; Maquestiaux & Ruthruff, 2021). This work forms parts of the first author’s PhD dissertation, as well as the four authors’ research program, which investigates the nature of capacity limitations in dual-task performance with a focus on the manner with which tasks are represented in the human mind.

References

- Anderson, J. R., Taatgen, N. A., & Byrne, M. D. (2005). Learning to achieve perfect timesharing: Architectural implications of Hazeltine, Teague, and Ivry (2002). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 749-761.
- Brüning, J., Koob, V., Manzey, D., & Janczyk, M. (2022). Serial and parallel processing in multitasking: Concepts and the impact of interindividual differences on task and stage levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *48*, 724-742.
- Carrier, L. M., & Pashler, H. (1995). Attentional limits in memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 1339-1348.
- De Jong, R. (1993). Multiple bottlenecks in overlapping task performance. *Journal of*

- Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 965-980.
- De Jong, R. (1995). The role of preparation in overlapping-task performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A, 2-25.
- Fischer, R., & Plessow, F. (2015). Efficient multitasking: parallel versus serial processing of multiple tasks. *Frontiers in Psychology*, 6, 1-11.
- Gottsdanker, R. (1980). The ubiquitous role of preparation. In G. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in minor behavior* (pp. 315-371). Amsterdam: North-Holland.
- Green, C., Johnston, J. C., & Ruthruff, E. (2011). Attentional limits in memory retrieval – Revisited. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 1083-1098.
- Halvorson, K. M., Ebner, H., & Hazeltine, E. (2013). Investigating perfect timesharing: The relationship between IM-compatible tasks and dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39, 413-432.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2015). Do small dual-task costs reflect ideomotor compatibility or the absence of crosstalk? *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 1403-1409.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2019). Separation of tasks into distinct domains, not set-level compatibility, minimizes dual-task interference. *Frontiers in Psychology*, 10, 1-10.
- Hartley, A. A., & Little, D. M. (1999). Age-related differences and similarities in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 417-450.
- Hartley, A. A., & Maquestiaux, F. (2007). Success and failure at dual-task coordination by younger and older adults. *Psychology and Aging*, 22, 215-222.
- Hartley, A. A., Maquestiaux, F., Festini, S. B., Frazier, K., & Krimmer, P. J. (2016). Backward compatibility effects in younger and older adults. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78, 1337-1350.
- Hartley, A. A., Seaman, B., & Maquestiaux, F. (2015). Ideomotor-compatible tasks partially escape dual-task interference in both young and elderly adults. *Psychology and Aging*, 30, 36-45.
- Hazeltine, E., & Ruthruff, E. (2006). Modality pairing effects and the response selection bottleneck. *Psychological Research*, 70, 504-513.
- Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R. W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*, 52, 291-345.
- Hazeltine, E., Teague, D., & Ivry, R. B. (2002). Simultaneous dual-task performance reveals parallel response selection after practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 527-545.
- Hommel, B. (1998). Automatic stimulus-response translation in dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1368-1384.
- Huestegge, L., & Hazeltine, E. (2011). Crossmodal action: modality matters. *Psychological Research*, 75, 445-451.
- Huestegge, L., & Strobach, T. (2021). Structuralist mental representation of dual-action demands: Evidence for compositional coding from dual tasks with low cross-task dimensional overlap. *Acta Psychologica*, 103298.
- Janczyk, M. (2016). Sequential modulation of backward crosstalk and task-shielding in dual-tasking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42, 631-647.
- Janczyk, M., & Kunde, W. (2020). Dual tasking from a goal perspective. *Psychological Review*, 127, 1079-1096.
- Janczyk, M., Renas, S., & Durst, M. (2018). Identifying the locus of compatibility-based backward crosstalk: Evidence from an extended PRP paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44, 261-276.
- Koch, I., Poljac, E., Müller, H., & Kiesel, A. (2018). Cognitive structure, flexibility, and plasticity in human multitasking—An integrative review of dual-task and task-switching research. *Psychological Bulletin*, 144, 557-583.
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-test and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, 863.
- Levy, J., & Pashler, H. (2001). Is dual-task slowing instruction dependent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 862-869.
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., & Proctor, R. W. (2005). Dual-task performance with ideomotor-compatible tasks: Is the central bottleneck intact, bypassed, or shifted in locus? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 122-144.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W., & Allen, P. A. (2002). Ideomotor compatibility in the psychological refractory period effect: 29 years of

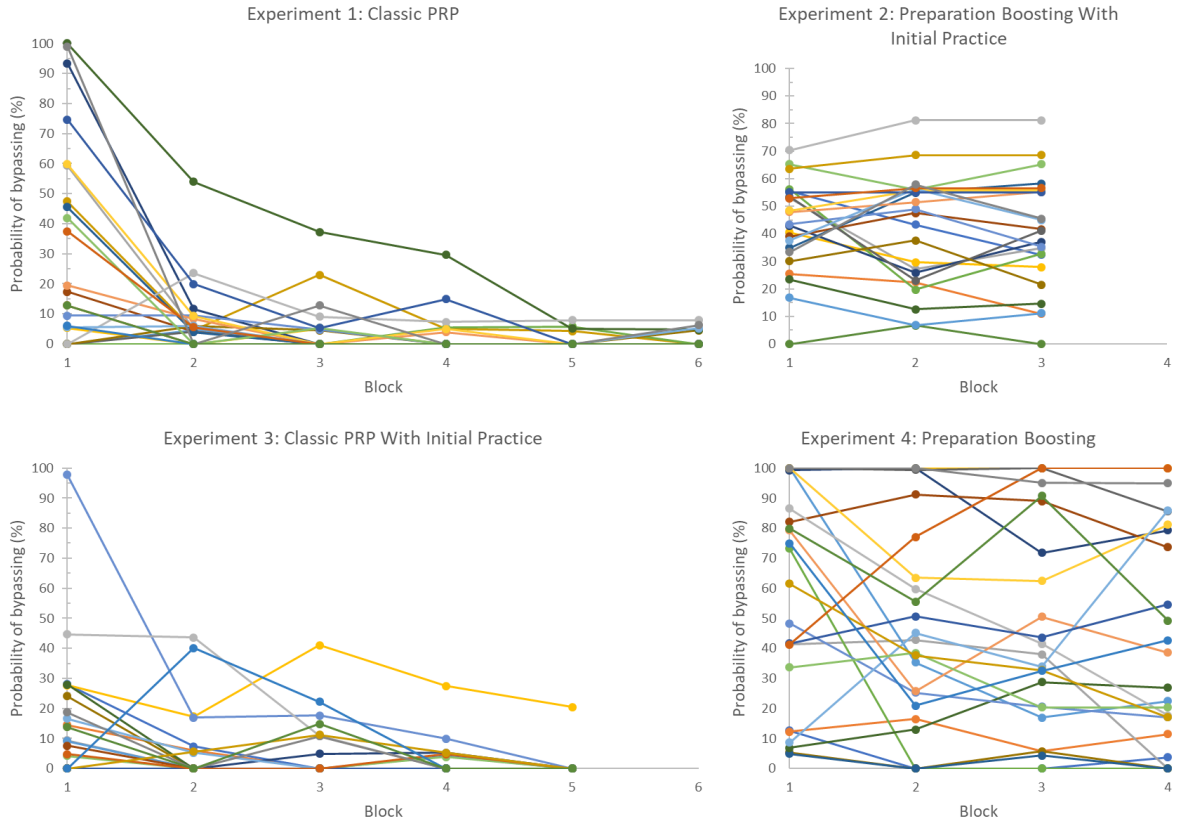
- oversimplification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 396–409.
- Logan, G. D. (1978). Attention in character-classification tasks: Evidence for the automaticity of component stages. *Journal of Experimental Psychology: General*, 107, 32-63.
- Logan, G. D., & Schulkind, M. D. (2000). Parallel memory retrieval in dual-task situations. I. Semantic memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1072-1090.
- Lyphout-Spitz, M., Maquestiaux, F., & Ruthruff, E. (2022). Bypassing the central bottleneck with easy tasks: Beyond ideomotor compatibility. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29, 501-511.
- Maquestiaux, F. (2012). The simultaneity of mental acts: Contributions from PRP procedure [La simultanéité des actes psychiques : apports du protocole PRP]. *Topics in Cognitive Psychology [L'Année Psychologique]*, 112, 631-663.
- Maquestiaux, F. (2017). *Psychologie de l'attention* (2nd ed.). De Boeck Université.
- Maquestiaux, F., Didierjean, A., Ruthruff, E., Chauvel, G., & Hartley, A. A. (2013). Lost ability to automatize task performance in old age. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 1206-1212.
- Maquestiaux, F., Hartley, A. A., & Bertsch, J. (2004). Can practice overcome age-related differences in the psychological refractory period effect? *Psychology and Aging*, 19, 649-667.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., & Bherer, L. (2008). Bypassing the central bottleneck after single-task practice in the psychological refractory period paradigm: Evidence for task automatization and greedy resource recruitment. *Memory & Cognition*, 36, 1262-1282.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., Hartley, A. A., & Bherer, L. (2010). Learning to bypass the central bottleneck: Declining automaticity with advancing age. *Psychology and Aging*, 25, 177-192.
- Maquestiaux, F., Lyphout-Spitz, M., Ruthruff, E., & Arexis, M. (2020). Bottleneck bypassing and ideomotor compatibility: Ideomotor compatibility enables automatic response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27, 742-750.
- Maquestiaux, F., & Ruthruff, E. (2021). Testing the over-reliance on central attention (ORCA) hypothesis: Do older adults have difficulty automatizing especially easy tasks? *Journal of Experimental Psychology: General*, 150, 1722-1740.
- Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defier, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization: The key role of sensory-motor modality compatibility. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80, 752-772.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997a). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms. *Psychological Review*, 104, 3–65.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997b). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 2. Accounts of psychological refractory-period phenomena. *Psychological Review*, 104, 749–791.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1999). Precis to a practical unified theory of cognition and action: Some lessons from EPIC computational models of human multiple-task performance. In D. Gopher & A. Koriari (Eds.), *Attention and performance XVII: Cognitive regulation of performance: Interaction of theory and application* (pp. 17–88). Cambridge, MA: MIT Press.
- Mittelstädt, V., Mackenzie, I. G., & Miller, J. (2022). Evidence of resource sharing in the psychological refractory period (PRP) paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 48, 1279-1293.
- Moors, A., & De Houwer, J. (2006). Automaticity: A theoretical and conceptual analysis. *Psychological Bulletin*, 132, 297-326.
- Navarro, D. J., & Foxcroft, D. R. (2022). Learning statistics with jamovi: A tutorial for psychology students and other beginners. (Version 0.75) <https://doi.org/10.24384/hgc3-7p15>
- Navon, D., & Miller, J. (1987). Role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 435-448.
- Navon, D., & Miller, J. C. (2002). Queuing or sharing. A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193-251.
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks: Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 358-377.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220-244.
- Pashler, H., Carrier, M., & Hoffman, J. (1993). Saccadic eye movements and dual-task

- interference. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46A, 51-82.
- Pashler, H., & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 19-45.
- Pieczkolan, A., & Huestegge, L. (2019). Action scheduling in multitasking: A multi-phase framework of response-order control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 81, 1464-1487.
- Roberts, S., & Pashler, H. (2000). How persuasive is a good fit? A comment on theory testing. *Psychological Review*, 107, 358-367.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Remington, R. W. (2009). How strategic is the central bottleneck: Can it be overcome by trying harder? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1368-1384.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Van Selst, M. (2001). Why practice reduces dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 3-21.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., Van Selst, M., Whitsell, S., & Remington, R. (2003). Vanishing dual-task interference after practice: Has the bottleneck been eliminated or is it merely latent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 280-289.
- Ruthruff, E., Miller, J., & Lachman, T. (1995). Does mental rotation require central mechanisms? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 552-570.
- Ruthruff, E., Van Selst, M., Johnston, J. C., & Remington, R. (2006). How does practice reduce dual-task interference: Integration, automatization, or just stage-shortening? *Psychological Research*, 70, 125-142.
- Schubert, T., & Strobach, T. (2018). Practice-related optimization of dual-task performance: Efficient task instantiation during overlapping task processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44, 1884-1904.
- Schumacher, E. H., Lauber, E. J., Glass, J. M., Zurbriggen, E. L., Gmeindl, L., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1999). Concurrent response-selection processes in dual-task performance: Evidence for adaptive executive control of task scheduling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 791-814.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, 12, 101-108.
- Stephan, D. N., & Koch, I. (2011). The role of input-output modality in task switching. *Psychological Research*, 75, 491-498.
- Stephan, D. N., & Koch, I. (2015). Tactile stimuli increase effects of modality compatibility in task switching. *Experimental Psychology*, 62, 276-284.
- Stephan, D. N., Koch, I. (2016). Modality-specific effects on crosstalk in task switching: Evidence from modality compatibility using bimodal stimulation. *Psychological Research*, 80, 935-943.
- Strobach, T. (2020). The dual-task practice advantage: Empirical evidence and cognitive mechanisms. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27, 3-14.
- Strobach, T., & Schubert, T. (2017). No evidence for task automatization after dual-task training in younger and older adults. *Psychology and Aging*, 32, 28-41.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 3-18.
- Touron, D. R., & Hertzog, C. (2004). Distinguishing age differences in knowledge, strategy use, and confidence during strategic skill acquisition. *Psychology and Aging*, 19, 452-466.
- Ulrich, R., Fernández, S. R., Jentsch, I., Rolke, B., Schröter, H., & Leuthold, H. (2006). Motor limitations in dual-task processing under ballistic movement conditions. *Psychological Science*, 17, 788-793.
- Ulrich, R., & Miller, J. (2008). Response grouping in the psychological refractory period (PRP) paradigm: Models and contamination effects. *Cognitive Psychology*, 57, 75-121.
- Van Selst, M., Ruthruff, E., & Johnston, J. C. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1268-1283.
- Watson, J. M., & Strayer, D. L. (2010). Supertaskers: Profiles in extraordinary multitasking ability. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 479-485.

Supplemental Material

Figure 15

Probability of bypassing across blocks for individual participants (each represented by a color line) in Experiments 1-4



Discussion

Dans la présente étude 3 de la thèse, nous avons testé l'hypothèse de la négligence préparatoire. Cette hypothèse nouvelle a été formulée sur la base des études 1 et 2 qui ont donné lieu à deux publications (Lyphout-Spitz et al., 2022 ; Maquestiaux et al., 2020). Selon cette hypothèse, un manque de préparation aux tâches est responsable des interférences centrales en double tâche. Le protocole PRP est un facteur aggravant mais n'est pas la cause de ce manque de préparation. Ce manque de préparation tient avant tout aux manières dont les participants se représentent les tâches et actions à réaliser. Le corollaire est qu'en invitant les participants à se préparer davantage aux tâches, il est possible d'éliminer les interférences centrales et donc d'atteindre une forme d'automatisme en double tâche (i.e., traitement central parallèle).

Nos résultats permettent de valider notre hypothèse. Dans notre première expérience visant à répliquer de nombreuses autres études de la littérature, nous n'avons utilisé que des essais PRP classiques. Le traitement sériel s'étant rapidement instauré chez tous les participants comme mode de traitement par défaut, aucun des participants n'est parvenu à traiter les tâches en parallèle. Ces résultats sont similaires à ceux de nombreuses études de double tâche (e.g., Pashler & Johnston, 1989 ; Telford, 1931). Dans notre seconde expérience, nous avons boosté la préparation de la tâche 2 en introduisant des essais de simple tâche parmi les essais de double tâche PRP classiques. Cette modification du protocole PRP classique a conduit à des résultats inédits. En effet, en l'absence de pratique préalable, 9 participants sur les 24 participants de l'expérience 2 ont réussi à réaliser les deux tâches en parallèle tandis que le pattern de résultats des 14 participants restants indique un mélange variable de traitement sériel et de traitement parallèle. Le caractère inédit de nos résultats provient du fait que les tâches arbitraires n'ont pas été préalablement pratiquées. Les participants de l'expérience 1, pourtant plus préparés à la double tâche, sont moins efficaces que les participants de l'expérience 2 dont une partie des essais a été allouée à la préparation de la tâche 2. Ces résultats sont inédits si l'on considère que les deux tâches sont arbitraires et qu'elles n'ont pas été pratiquées sur plusieurs sessions, alors que la compatibilité des associations stimulus-réponse (idéomotrice, cf. Maquestiaux et al., 2020 ; ou sémantique, Lyphout-Spitz et al., 2022) et la pratique extensive (e.g., Hazeltine et al., 2002) étaient considérées comme de rares exceptions au goulet d'étranglement central.

Les expériences 3 et 4 avaient pour but de démêler les effets de la pratique préalable en simple tâche (expérience 3) des effets de l'introduction d'essais de simple tâche entremêlée (expérience 4) sur la préparation de la tâche 2. Les résultats de l'expérience 3 reproduisent

exactement le pattern de l'expérience 1, ce qui vient prouver que la pratique initiale n'a aucun effet sur la faculté à préparer une tâche afin de la traiter efficacement en parallèle d'une autre. En d'autres termes, nos résultats ne se conforment pas aux théories selon lesquelles l'affranchissement des besoins en attention se fait au travers de la pratique (e.g., Schneider & Shiffrin, 1977). Pour autant, il semblerait que les essais entremêlés permettent une meilleure préparation de la tâche 2 que sa pratique sur 96 essais, rendant possible le traitement parallèle des tâches. De fait, 9 participants de l'expérience 4 sont parvenus à éliminer le goulet d'étranglement central en traitant les tâches en parallèle dans plus de 50% des essais. Ces résultats viennent préciser les observations de l'expérience 2 : la performance efficace observée avec 96 essais de pratique en simple tâche et 96 essais de simple tâche entremêlée était en réalité entièrement imputable à l'effet des essais entremêlés.

Le fait que certains participants des expériences pour lesquelles la préparation de la tâche 2 était encouragée via l'introduction d'essais de simple tâche entremêlée (expériences 2 et 4) n'aient pas traité les tâches en parallèle sur une certaine portion des essais invite toutefois à se questionner sur l'existence d'autres variables. Ces participants seraient-ils capables d'éliminer toute interférence avec plus d'essais ? Il est possible que le boost induit par l'introduction d'essais de simple tâche ne les ait pas suffisamment invités à contrecarrer l'invitation du protocole PRP. Des variables interindividuelles sont-elles à prendre en compte ? De nombreuses questions qui viennent attester du caractère inédit et contre-intuitif de nos résultats, qu'il faut maintenant incorporer dans une nouvelle conception de la limitation centrale.

S'impose en effet la nécessité de redéfinir la nature de la limitation centrale qui, au vu des résultats de ces trois premières études, ne peut plus être considérée sous un angle structural comme le veut la théorie dominante du goulet d'étranglement central. Il semble désormais nécessaire de considérer le rôle primordial de la préparation dans l'allocation des ressources attentionnelles au niveau central du traitement de l'information, ainsi que de possibles liens avec le fonctionnement de la mémoire de travail. De fait, la préparation consiste selon notre hypothèse à favoriser le préchargement des représentations des tâches en mémoire de travail. Il est par conséquent logique de s'intéresser au fonctionnement de cette dernière et son implication dans la performance en double tâche.

V. Discussion générale

Les avancées des dernières décennies sur l'interférence en double tâche n'ont pas permis de répondre à un problème majeur : comment expliquer l'existence de conditions favorables à la double tâche (i.e., au traitement central parallèle de deux tâches concurrentes), lorsque les théories dominantes soutiennent l'existence de capacités de traitement de l'information limitées au niveau des opérations centrales (e.g., la sélection de réponses adaptées aux stimuli) ? Ces théories dominantes (Logan & Schulkind, 2000 ; Meyer & Kieras, 1997a ; 1997b ; Navon & Miller, 2000 ; Pashler, 1994 ; Tombu & Jolicoeur, 2003) s'accordent sur le fait que, sans une pratique extensive des tâches, il ne peut y avoir de traitement central simultanément en raison de la nature même de l'allocation de l'attention au niveau des opérations centrales. Les capacités attentionnelles limitées au niveau central constitueraient un obstacle pour mener à bien plusieurs tâches en même temps, ou une manière de protéger le bon déroulement du traitement central d'une tâche. D'un autre côté, des auteurs rapportent des cas isolés de traitements parallèles, reposant sur l'utilisation de tâches inhéremment automatiques telles que les tâches idéomotrices (e.g., Greenwald & Schulman, 1973), des systèmes de réponse spéciaux tels que les mouvements oculaires (Pashler et al., 1993), ou l'emploi de procédures de double tâche alternatives (e.g., Israel & Cohen, 2007 ; Schumacher et al., 2001). La résolution de cet écart considérable entre la théorie et les preuves obtenues en laboratoire a été le fil directeur des travaux de recherche rapportés dans la présente thèse, avec comme ambition la meilleure compréhension du fonctionnement de l'allocation de l'attention centrale entre des traitements concurrents.

1. Synthèse des résultats

Afin de préciser la nature de la limitation centrale, notre travail de recherche s'est décliné en trois questionnements, chacun ayant fait l'objet d'une étude. Nous allons reprendre ces questionnements et les réponses obtenues au travers de nos études, avant de présenter la nouvelle hypothèse de l'interférence en double tâche à laquelle nos réponses nous ont guidés.

1. *L'écart entre la théorie et les faits est-il imputable aux faiblesses des procédures de double tâche ?*

Notre premier questionnement portait sur la source de la divergence entre la théorie d'une limitation centrale inamovible et les quelques arguments empiriques en faveur

de traitements centraux parallèles. Puisque les arguments ne s'accordent pas avec la théorie, nous avons émis l'hypothèse que les divergences entre théorie et arguments empiriques pouvaient provenir des procédures de double tâche employées jusqu'alors, qui ne permettaient pas de rendre compte du réel fonctionnement de l'allocation de l'attention centrale. Plus précisément, la possibilité d'un goulet d'étranglement central latent (Ruthruff et al., 2003) et l'absence d'indicateurs permettant son identification rendaient impossible l'observation de réelles exceptions au goulet d'étranglement central.

Dans l'étude 1, nous avons réalisé une expérience PRP de double tâche dans laquelle une tâche 1 arbitraire et une tâche 2 idéomotrice ont été appariées. Dans un premier groupe ($n = 24$), la tâche 1 était auditivo-vocale et la tâche 2 idéomotrice était visuo-manuelle. Dans un second groupe servant de groupe contrôle ($n = 24$), la tâche 2 visuo-manuelle a été rendue non-idéomotrice. Les résultats de cette première étude convergent en faveur de l'automatisme des tâches idéomotrices, tout en écartant la possibilité d'une absence de chevauchement entre les traitements centraux des deux tâches (i.e., neutralisation de l'hypothèse d'un goulet d'étranglement central « latent » ; cf. figure 8). En effet, lorsque la tâche 2 était idéomotrice, l'effet PRP était faible (94 ms), l'ordre de réponse était fréquemment inversé aux SOA courts (79.2% au SOA le plus court), et le coefficient de corrélation moyen de TR1 et TR2 était relativement faible (.28). Une étape d'analyse complémentaire avec les simulations d'IRI a également démontré que la performance des participants correspondait à celle prédite en cas d'élimination du goulet d'étranglement central. Les résultats du groupe non-idéomoteur soutiennent quant à eux la présence d'une limitation centrale, avec un effet PRP conséquent (195 ms), des inversions peu fréquentes des réponses (39.7% au SOA le plus court), ainsi que de fortes corrélations TR1:TR2 (.48 en moyenne). Les simulations d'IRI nous ont permis de confirmer que la performance observée chez ce groupe est identique à celle attendue par le modèle du goulet d'étranglement central. En d'autres termes, la tâche 2 à caractère idéomoteur manipulée dans cette étude a bien été traitée automatiquement, comparativement à la tâche 2 non-idéomotrice. Cette vérification a été rendue possible par l'utilisation de la procédure long/court et des indicateurs comportementaux présentés dans notre approche expérimentale générale. L'étude 1 offre ainsi la réponse suivante à notre première interrogation :

L'écart entre la théorie et les faits est essentiellement dû aux procédures de double

tâche de la littérature. Les procédures classiquement employées ne permettaient pas la vérification des exceptions au goulet d'étranglement central rapportées dans la littérature (Greenwald & Shulman, 1973 ; Pashler et al., 1993 ; Van Selst et al., 1999). L'impossibilité de vérifier ces exceptions était à l'origine de l'impasse théorique que nous avons notée, et donc de la non-résolution de la divergence entre la théorie et les preuves empiriques.

2. *Les exceptions à la limitation centrale tiennent-elles à la spécificité des tâches ?*

Le deuxième questionnement de notre travail de recherche s'intéresse au caractère exceptionnel de la compatibilité idéomotrice. Les tâches idéomotrices constituent-elles une exception isolée au goulet d'étranglement central, ou un indice qui pourrait nous mener à d'autres tâches automatiques ? En d'autres termes, il s'agissait de savoir si l'automatisme des tâches idéomotrices pouvait être généralisée à d'autres tâches non-idéomotrices. Pour répondre à cette question, nous avons testé l'automatisme de tâches non-idéomotrices mais relativement faciles car dépendantes d'associations en mémoire à long terme : les tâches sémantiques. Dans deux expériences PRP utilisant la même tâche 1 visuo-manuelle consistant à presser deux touches du clavier en fonction de la couleur (parmi quatre couleurs possibles) d'un cercle présenté à l'écran, nous avons utilisé une tâche 2 auditivo-vocale pour laquelle le stimulus et la réponse étaient sémantiquement associés. Pour les participants de l'expérience 1 ($n = 24$), il s'agissait de répondre PING au mot PONG et PONG au mot PING. Les participants de l'expérience 2 ($n = 24$) ont quant à eux dû répondre HAUT au mot BAS et BAS au mot HAUT. Les résultats de ces deux expériences convergent en faveur de l'élimination du goulet d'étranglement central, avec notamment de très faibles effets PRP (25 ms pour la tâche PING-PONG, 53 ms pour la tâche HAUT-BAS), des inversions fréquentes des réponses (52.4% au SOA le plus court pour l'expérience 1, et 37.4% en moyenne pour les SOA courts dans l'expérience 2), et des distributions d'IRI observées similaires à celles prédites par l'élimination du goulet d'étranglement central. En d'autres termes, nos tâches sémantiques ont été traitées automatiquement par nos participants malgré une certaine lenteur d'exécution (501 ms et 534 ms en condition de simple tâche entremêlée, pour les expériences 1 et 2 respectivement). Cela nous permet de répondre au second questionnement de cette thèse :

Les exceptions à la limitation centrale ne tiennent aucunement à la spécificité des

tâches, puisque des tâches non-idéomotrices et lentes peuvent également permettre l'élimination de la limitation centrale.

3. *L'automatisme des tâches faciles est-elle généralisable à des tâches plus difficiles ?*

Dans l'étude 3, nous avons cherché à savoir si l'automatisme des tâches faciles (i.e., idéomotrices et sémantiques, cf. études 1 et 2) était généralisable à des tâches plus difficiles, telles que des tâches utilisant des combinaisons stimulus-réponse arbitraires, nouvelles et jamais pratiquées. Sur la base des indices récoltés grâce aux études 1 et 2, nous avons émis l'hypothèse que l'interférence en double tâche résulterait essentiellement d'un manque de préparation des tâches, et plus particulièrement de la tâche 2. Ce manque de préparation tiendrait au protocole PRP lui-même, induit par l'ordre de présentation des stimuli (S1 puis S2), le feedback donné en fin de bloc (feedback sur le TR de la tâche 1 mais pas de la tâche 2), et la consigne d'accentuer la vitesse de réponse à la tâche 1. Ce manque de préparation pourrait aussi, de manière plus générale, tenir à n'importe quelle procédure de double tâche : peut-être que les personnes privilégient le traitement de l'une des deux tâches même lorsque les situations de double tâche sont idéales (S1 et S2 présentés en même temps, les mêmes feedbacks, une consigne de répondre aussi vite aux deux tâches). En accord avec cette dernière spéculation, de nombreuses études non PRP de double tâche rapportent de l'interférence compatible avec l'hypothèse de capacités centrales limitées (e.g., Ruthruff et al., 2001).

Cette négligence préparatoire de la tâche 2 serait à l'origine de l'interférence en double tâche, et booster sa préparation permettrait par conséquent de traiter deux tâches en parallèle. Pour tester cette hypothèse, nous avons testé quatre groupes de 24 participants. Chacun de ces groupes a été soumis aux mêmes tâches, à savoir deux tâches non pratiquées pour lesquelles les associations S-R étaient arbitraires. La tâche 1 était auditivo-vocale et consistait à répondre HAUT à un son aigu (1 800 Hz) et BAS à un son grave (400 Hz). La tâche 2, visuo-manuelle, consistait à presser les touches E et P selon que la forme présentée à l'écran était un triangle ou un rond. Nous avons manipulé la procédure de double tâche dans les quatre conditions. L'expérience 1 était une réplique classique d'expériences PRP ayant conduit à l'observation d'un goulet d'étranglement (e.g., Pashler & Johnston, 1989). Dans cette condition classique, les résultats soutiennent l'hypothèse du traitement central sériel des tâches, avec un effet PRP conséquent (445 ms), des corrélations TR1:TR2

élevées (moyenne de .71 aux SOA courts), et des distributions d'IRI identiques à celles prédites par le modèle du goulet d'étranglement central.

Le but de l'expérience 2 était de booster au maximum la préparation de la tâche 2 en introduisant des essais de simple tâche pour la tâche 2 en amont des essais expérimentaux de double tâche, ainsi que des essais de simple tâche 2 entremêlés avec les essais expérimentaux de double tâche. Presque la moitié des participants de cette condition sont parvenus à traiter les tâches en parallèle, offrant un effet PRP de seulement 48 ms, des corrélations relativement faibles entre TR1 et TR2 (moyenne de .28 tous SOA confondus), et des distributions d'IRI observées en adéquation avec celles dérivées de l'élimination de la limitation centrale. Les expériences 3 et 4 ont eu pour but d'investiguer les effets respectifs des essais de simple tâche simple, soit la pratique préalable de la tâche 2 en simple tâche (expérience 3) et les essais de simple tâche entremêlée, soit les essais de tâche 2 mélangés aux essais PRP de double tâche (expérience 4). L'expérience 3 a répliqué les résultats de l'expérience 1, démontrant que la pratique préalable d'une tâche ne permet pas sa préparation en condition de double tâche. L'expérience 4, en revanche, réplique les résultats de l'expérience 2. En d'autres termes, l'élimination de la limitation centrale est due aux essais de simple tâche 2 entremêlée, qui permettent une meilleure préparation de la tâche 2. L'étude 3 a ainsi permis de valider l'hypothèse de la négligence préparatoire au cœur de cette thèse, et fournir la réponse suivante à notre dernier questionnaire :

L'automatisme observée avec des tâches faciles peut être généralisée à des tâches plus difficiles, car l'automatisme tient à la préparation de ces tâches en amont de l'essai plus qu'à des caractéristiques exceptionnelles. Des tâches arbitraires et non-pratiquées peuvent donc être traitées simultanément, comme le démontre l'étude 3.

2. L'hypothèse novatrice de la négligence préparatoire

En résumé, les travaux expérimentaux présentés dans cette thèse ont permis l'élaboration et le test d'une nouvelle hypothèse de l'interférence en double tâche, à savoir l'hypothèse de la négligence préparatoire. Cette proposition théorique inédite considère que l'interférence habituellement observée entre deux tâches concurrentes provient d'un manque de préparation de ces dernières, dans le sens d'un préchargement insuffisant de leurs représentations en

mémoire de travail. Ainsi, la limitation centrale a selon nous comme origine un manque de préparation en amont. La cause de l'interférence entre plusieurs traitements centraux dépend des représentations activées en amont de l'essai. Par extension, la limitation centrale n'est pas la cause de l'interférence en double tâche, mais la conséquence de réglages cognitifs en amont.

Notre hypothèse vient infirmer de nombreux points de la littérature. Elle contredit en premier lieu la notion d'une limitation centrale structurale (Pashler, 1994 ; Welford, 1952), puisque les participants de l'étude 3 ont eu recours au traitement central parallèle ou sériel selon nos manipulations de la procédure expérimentale (i.e., introduction ou non d'essais de simple tâche 2 entremêlée). La limitation centrale est en ce sens le reflet des réglages cognitifs relatifs à la manière dont les tâches sont préparées. Ce constat nous amène également à considérer que la possibilité d'un traitement central parallèle ne dépend pas de la spécificité des tâches expérimentales ; des tâches classiques de laboratoire peuvent être traitées de manière automatique sans aucune pratique (étude 3), au même titre que des tâches plus spécifiques telles les tâches idéomotrices (étude 1) et les tâches sémantiques (étude 2). Puisqu'il est désormais clair que la limitation centrale dépend du niveau de préparation, la notion d'exception au goulet d'étranglement central n'a plus lieu d'être. Il n'y a par conséquent pas de tâches exceptionnelles ; seulement des tâches plus ou moins faciles à précharger et engendrant une plus ou moins grande interférence en situation de double tâche, comme le prouvent nos études 2 et 3. À l'issue de ce travail de thèse, il devient donc possible d'affirmer que les tâches idéomotrices ne sont pas une exception à la règle d'une limitation centrale structurale, contrairement à ce qui a longtemps été pensé (e.g., Greenwald & Shulman, 1973) : les tâches idéomotrices ne sont en réalité que des tâches faciles à préparer, permettant ainsi de s'affranchir des limitations attentionnelles centrales. L'hypothèse de la négligence préparatoire questionne aussi la définition même du concept d'automatisme. L'automatisme est souvent associée à une grande rapidité de traitement dans la littérature (e.g., James, 1890 ; Posner & Snyder, 1975 ; Schneider & Shiffrin, 1977). Cependant, la relative lenteur des tâches manipulées dans nos études 2 et 3 conteste ce postulat, car elles ont tout de même été traitées automatiquement, c'est-à-dire sans recourir aux ressources attentionnelles centrales. Enfin, nos résultats ne se conforment pas tout à fait à l'idée classique selon laquelle la pratique permet d'automatiser les tâches (James 1890 ; Shiffrin & Schneider, 1977). La pratique a certes un rôle dans l'automatisation des tâches (e.g., le raccourcissement de la durée des stades de traitement), mais ce dernier ne semble pas essentiel car la pratique préalable de la tâche 2 dans notre troisième étude n'a pas permis de traiter la tâche 2 en parallèle, comparativement à l'introduction d'essais de simple tâche 2 entremêlée (expérience 3 vs. expérience 4). La préparation nécessaire à

l'élimination de l'interférence centrale n'est donc pas permise par la pratique préalable des tâches. L'hypothèse de la négligence préparatoire se pose donc comme une explication contre-intuitive de la manière dont l'attention centrale est allouée à des traitements concurrents.

3. Travaux exploratoires intermédiaires

Les travaux expérimentaux rapportés dans cette thèse constituent les étapes essentielles du cheminement qui nous a conduits de l'observation d'une impasse théorique à la proposition d'une nouvelle hypothèse de l'interférence en double tâche. Par souci de clarté, nous avons fait le choix de ne présenter que ces études. Cependant, de nombreuses autres études menées en parallèle sont venues nourrir nos réflexions et constituent des pistes pour de futures recherches. Deux séries d'expériences sont venues explorer deux mécanismes différents. Dans une première série d'expériences, nous nous sommes intéressés à l'implication de la mémoire de travail dans la performance en double tâche, et plus spécifiquement au rôle modérateur de la séparabilité des représentations des tâches en mémoire de travail (e.g., Halvorson & Hazeltine, 2015 ; 2019). Dans une deuxième série d'expériences, nous avons tenté de déterminer si une procédure de double tâche optimisée (i.e., telle que dans l'étude 3) employant les tâches de Pashler et Johnston (1989) permettrait aux deux tâches d'être traitées en parallèle et ainsi aller à l'encontre du traitement central sériel observé par les auteurs.

3. 1. Rôle de la mémoire de travail et hypothèse de la séparabilité

Quelle est l'implication de la mémoire de travail dans la performance en double tâche ? Dans la littérature, attention et mémoire de travail vont souvent de pair. Baddeley considère par exemple que, dans son modèle à composantes multiples (Baddeley & Hitch, 1974), l'attention est essentielle au rôle de l'administrateur central et du buffer épisodique (Baddeley, 2000). Barrouillet et Camos (2012) notent un parallèle intéressant entre la mémoire de travail et la performance en double tâche, en expliquant que la mémoire de travail est également sujette à un goulet d'étranglement central puisque ses deux fonctions principales, à savoir le maintien et le traitement des représentations, ne peuvent avoir lieu simultanément (e.g., le maintien des représentations suppose qu'elles ne peuvent être traitées, et le traitement de représentations implique le déclin des autres représentations). Cowan (1995, 1999, 2005) accorde dans son modèle des processus emboîtés une place centrale au focus attentionnel. De nombreux autres modèles pourraient être cités pour prouver ce lien que les auteurs considèrent entre la mémoire

de travail et l'attention. Cela constitue un questionnement intéressant auquel nos travaux nous ramènent fréquemment, notamment les travaux présentés dans cette thèse.

L'automatisme des tâches idéomotrices, démontrée par notre étude 1, permet d'infirmer la théorie du goulet d'étranglement central (Pashler, 1984 ; 1994 ; Pashler & Johnston, 1989). La capacité de traiter une tâche 2 idéomotrice en parallèle d'une tâche 1 arbitraire prouve en effet que la limitation centrale n'est pas omniprésente. À l'issue de cette première étude, cette observation semblait supposer que les tâches idéomotrices possèdent quelque caractéristique spéciale qui leur permet de contourner la limitation rencontrée par la majorité des tâches employées dans la littérature³⁵. Nous avons alors, en parallèle de l'étude 2, considéré l'hypothèse avancée par Halvorson et Hazeltine (2015, 2019), basée sur la notion de *crosstalk* (e.g., Navon & Miller, 1987) et selon laquelle l'automatisme observée dans notre étude ne serait pas tant due à l'automatisme des tâches idéomotrices, mais plutôt au fait que nous ayons employé une tâche 1 auditivo-vocale et une tâche 2 visuo-manuelle. En d'autres termes, l'absence d'interférence entre nos deux tâches proviendrait selon ces auteurs d'une absence d'interférence entre les représentations respectives de ces tâches en mémoire de travail, car elles résideraient dans des sous-systèmes distincts (i.e., boucle phonologique d'un côté, calepin visuo-spatial de l'autre). La même remarque peut être formulée au sujet de l'étude 2, pour laquelle nous avons utilisé une tâche 1 visuo-manuelle et des tâches 2 auditivo-vocales. Deux réponses peuvent être adressées à ce questionnement. Premièrement, la littérature sur l'interférence en double tâche regorge d'exemples de traitement central sériel obtenu avec des tâches pourtant compatibles sur le plan sensorimoteur. Par exemple, Pashler et Johnston (1989) ont utilisé une tâche 1 auditivo-vocale et une tâche 2 visuo-manuelle, et cette étude est la base même du modèle du goulet d'étranglement central. Deuxièmement, il est difficile de déterminer la manière dont les sous-systèmes de la mémoire de travail sont sollicités. L'emploi d'une tâche visuo-manuelle n'exclut aucunement un éventuel recours au registre auditif ; si un individu doit identifier des couleurs et presser les touches d'un clavier, peut-on vraiment savoir s'il n'a pas verbalement nommé les couleurs avant de sélectionner une réponse ?

Vient alors l'étude 3 de la thèse, dans laquelle nous présentons l'hypothèse de la négligence préparatoire. Cette hypothèse suppose un rôle essentiel de la mémoire de travail, puisque nous proposons de définir la préparation comme le préchargement des tâches en mémoire de travail. Dans la continuité des réflexions précédemment abordées concernant les études 1 et 2, il convient de se demander si toutes les tâches peuvent être préparées de la même

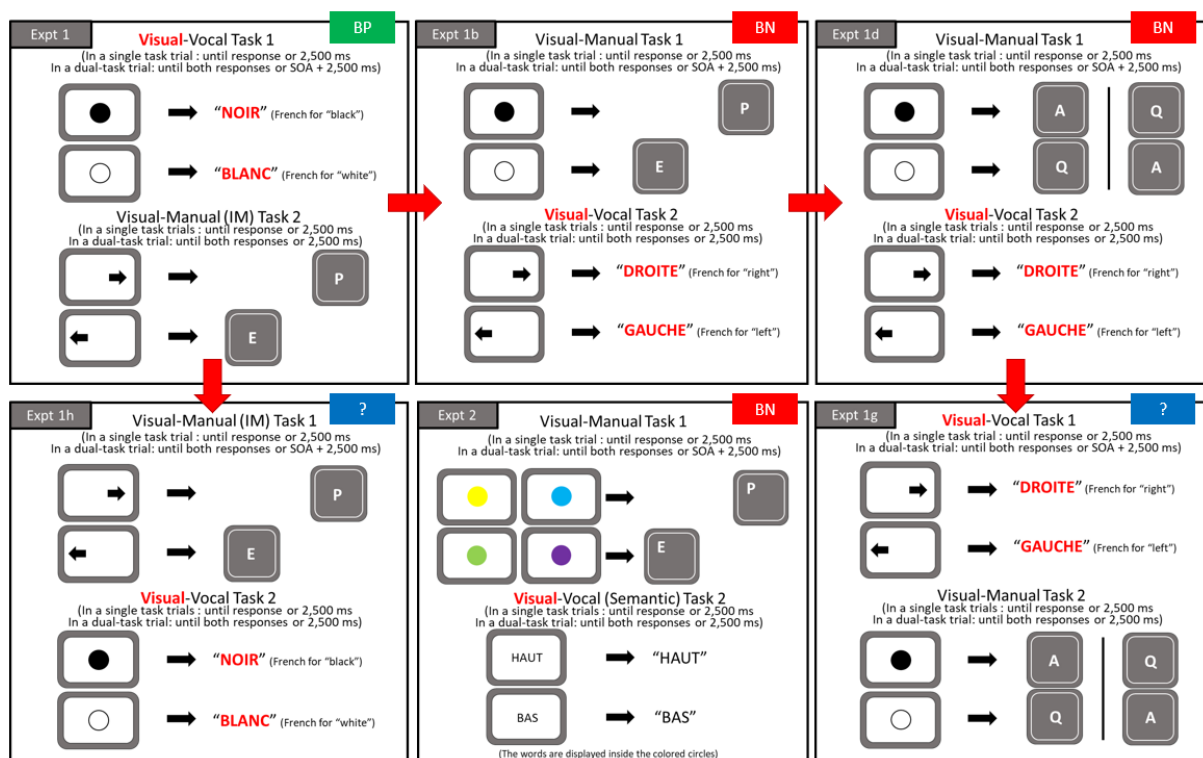
³⁵ Depuis, l'étude 2 a apporté une réponse à ce questionnement.

façon. En effet, une tâche visuo-vocale peut-elle être préparée, dans le sens d'un préchargement de ses représentations en mémoire de travail, aussi efficacement qu'une tâche visuo-manuelle ?

Au cours de cette thèse, nous nous sommes donc intéressés à l'hypothèse de la séparabilité des tâches (Halvorson & Hazeltine, 2015), selon laquelle les représentations de deux tâches doivent être exclusivement distinctes en mémoire de travail (i.e., dépendre chacune d'un sous-système, sans « croisement » par exemple lorsque les représentations d'une tâche résident dans les deux sous-systèmes comme cela est supposé être le cas d'une tâche visuo-vocale ou d'une tâche auditivo-manuelle) afin de permettre le déploiement d'un traitement central parallèle. Dans un projet de recherche toujours en cours, nous avons testé 80 étudiants de l'Université de Franche-Comté au travers de 9 conditions expérimentales (les 6 études principales sont présentées dans la figure 12), visant à étudier le rôle modérateur de la séparabilité des tâches en mémoire de travail.

Figure 12

Récapitulatif des conditions expérimentales du projet d'étude du rôle de la séparabilité



Note. BP : (*Bottleneck*) *Bypassing*, soit le traitement central parallèle des tâches. BN : *Bottlenecking*, correspondant au traitement central sériel des tâches. Les points d'interrogation correspondent à des études pour lesquelles l'échantillon n'est pas encore suffisant pour trancher.

Dans une première étude (Expt 1, $N = 24$), nous sommes partis des tâches de l'étude 1 : la tâche 1 était auditivo-vocale mais non-idéomotrice, et la tâche 2 visuo-manuelle et idéomotrice. Pour traiter la question de la séparabilité, nous avons rendu les représentations de la tâche 1 incompatibles sur le plan sensorimoteur en rendant la tâche visuo-vocale. En d'autres termes, les participants ont dû réaliser deux tâches visuelles simultanément, et produire des réponses vocales à la tâche 1 et des réponses manuelles à la tâche 2. L'hypothèse de la séparabilité prédit de l'interférence car les tâches dépendent toutes deux du calepin visuo-spatial pour l'identification et le maintien des stimuli visuels. Curieusement, cette combinaison de tâches incompatibles a conduit à des résultats en faveur de l'élimination du goulet d'étranglement central : des coûts de double tâche inférieurs à 100 ms (20 ms pour la tâche 1, 86 ms pour la tâche 2), un faible effet PRP de 159 ms, des inversions fréquentes des réponses au SOA le plus court (57%) comparativement au SOA le plus long (0%), et des corrélations TR1:TR2 plus faibles que ce que nous avons observé pour le groupe non-idéomoteur de l'étude 1 (.42 vs .48), probablement sous-tendues par une tendance à grouper les réponses. En d'autres termes, la préparation des tâches ne semble pas nécessairement impliquer que les représentations des tâches résident dans des sous-systèmes distincts de la mémoire de travail, car deux tâches visuelles peuvent être préparées efficacement et traitées simultanément sans interférence.

Dans une deuxième étude (Expt 2, $N = 12$), nous avons repris les tâches de l'étude 2 : la tâche 1 était visuo-manuelle, et la tâche 2 était auditivo-vocale et sémantique. Une fois de plus, nous avons rendu incompatibles les associations S-R d'une tâche au niveau des modalités sensorielle d'entrée et de sortie, afin de pouvoir éprouver l'hypothèse de la séparabilité. Nous avons donc rendu la tâche 2 incompatible au niveau sensorimoteur, en remplaçant le stimulus sonore par un stimulus visuel : au lieu d'entendre les mots HAUT et BAS et y répondre respectivement BAS et HAUT, les participants ont vu ces mots à l'écran et il leur a été demandé de les lire à haute voix. Autrement dit, cette étude utilise également deux tâches visuelles, mais la tâche incompatible est ici présentée en deuxième position. Curieusement, malgré l'emploi de la même procédure, cette étude ne permet pas d'éliminer le goulet d'étranglement central. Les coûts de double tâche restent relativement faibles (8 ms pour la tâche 1, et 136 ms pour la tâche 2), mais un effet PRP conséquent (257 ms), couplé à de rares inversions des réponses aux SOA les plus courts (environ 10%) et de fortes corrélations de TR1 et TR2 (.65) vont à l'encontre d'un traitement central parallèle.

Dans les études suivantes, il s'est agi de comprendre ces résultats contradictoires. Proviennent-ils de l'ordre des tâches ? En d'autres termes, n'est-il possible d'obtenir du

traitement central parallèle uniquement lorsque la tâche incompatible est présentée en tâche 1 ? Est-il nécessaire que la tâche 2 soit optimale ? Cela rejoindrait des travaux sur le recrutement avide des ressources attentionnelles (Maquestiaux et al., 2008 ; Ruthruff et al., 2006), selon lesquels l'attention serait automatiquement sollicitée par les tâches. Hypothétiquement, même si la tâche 1 n'est pas incompatible, elle requerrait automatiquement les ressources attentionnelles en n'en laissant que trop peu pour la tâche 2. Si cette tâche 2 est optimale (e.g., idéomotrice ou sémantique), son traitement central peut avoir lieu sans interférence, comme le suppose la première étude de ce projet. En revanche, si cette dernière est incompatible sur le plan sensorimoteur, il est possible que le coût attentionnel de son traitement soit trop élevé et donc que le goulet d'étranglement ne puisse être éliminé. Une autre explication à ces résultats contradictoires est l'existence d'un registre sémantique en mémoire de travail. Si au-delà du registre visuel, les tâches de cette deuxième étude ont toutes les deux eu recours au verbal pour traiter les tâches (i.e., peut-être que les participants ont verbalement nommé les couleurs en vue d'y répondre, tout en essayant de lire le mot présenté à l'écran), il est possible que cette double dépendance au verbal soit à l'origine de l'interférence observée dans la seconde étude exploratoire.

Ces considérations restent pour le moment spéculatives et l'importance de l'ordre des tâches est actuellement interrogé dans les expériences 1g et 1h. Nous supposons que les réponses aux questions soulevées par ce projet de recherche permettront de mieux définir la préparation et ainsi d'affiner notre hypothèse de la négligence préparatoire.

3. 2. Réplication de Pashler et Johnston (1989)

Cette seconde série d'études ($N = 50$) visait à reprendre les tâches utilisées par Pashler et Johnston (1989) dans leur célèbre étude³⁶ ayant conduit à la théorisation du goulet d'étranglement central. La tâche 1 consistait à répondre à des sons aigus (900 Hz) en pressant la lettre X ou à des sons graves (300 Hz) en pressant la lettre Z sur le clavier. La tâche 2 consistait quant à elle à presser la touche, « m », « , », ou « . » (sur un clavier Qwerty) en réponse à la lettre apparaissant au milieu de l'écran (A, B, ou C)³⁷. Afin de minimiser les conflits périphériques liés à l'emploi de deux tâches manuelles (e.g., Heuer, 1995), nous avons rendu la tâche 1 vocale : au lieu de presser des touches, nous avons demandé à nos participants de répondre HAUT au son aigu et BAS au son grave. Notre seconde modification a été d'utiliser

³⁶ Cette étude, citée 664 fois, est à la base de la théorie du goulet d'étranglement central que Pashler a formalisée en 1994 dans un article cité 3798 fois (nombre de citations disponible sur Google Scholar le 11 octobre 2023).

³⁷ Les touches « m », « , », et « . » se suivent sur un clavier Qwerty. Dans notre répliation, nous avons conservé cet aspect en utilisant les touches « j », « k » et « l » du clavier Azerty de notre ordinateur.

la procédure visant à booster la préparation et utilisée dans l'étude 3 (cf. expérience 2) ; celle ayant permis à 9 des 24 participants de cette condition de mieux préparer la tâche 2 habituellement négligée dans le cadre du protocole PRP, et ainsi d'éliminer le goulet d'étranglement central. Curieusement, les participants de notre première expérience ne sont pas parvenus à traiter les tâches en parallèle malgré l'utilisation de notre procédure facilitatrice. Nous avons tenté de déterminer les raisons du traitement central sériel observé au travers de quatre autres études. Nous avons notamment interrogé l'effet du nombre d'associations S-R (les stimuli A, B, et C et leurs réponses associées) à maintenir en mémoire de travail, car la tâche 2 de Pashler et Johnston comprend trois associations, comparativement à notre tâche 2 de l'étude 3 qui n'en comprenait que deux (rond, triangle, et les touches P et E). Est-il possible que le maintien d'un plus grand nombre d'associations nécessite un plus grand degré de préparation ? Ce projet étant toujours en cours, nous n'avons pas encore de réponse vérifiée à fournir. Cependant, comprendre ce qui empêche les tâches de Pashler et Johnston d'être traitées en parallèle en dépit de notre procédure boostant la préparation ne pourra qu'enrichir notre compréhension du rôle de la préparation dans l'allocation de l'attention centrale.

4. Limites et considérations méthodologiques

Au fil des études rapportées dans cette thèse, nous nous sommes heurtés à quelques obstacles. Notre volonté d'aller au-delà de l'impasse théorique qui s'est installée dans la littérature sur l'interférence en double tâche nous a amenés à développer de nouvelles procédures et de nouveaux indicateurs, afin de permettre l'identification et la neutralisation du goulet d'étranglement latent (Ruthruff et al., 2003) qui empêchait la réelle identification des exceptions à la limitation centrale. Grâce à notre analyse de la littérature et au moyen des outils méthodologiques que nous avons développés, nous sommes parvenus à formuler et valider empiriquement une nouvelle hypothèse de l'interférence en double tâche, basée sur le préchargement des représentations des tâches en mémoire de travail : l'hypothèse de la négligence préparatoire (cf. étude 3). Nos nouveaux outils ont cependant conduit à de nouveaux problèmes théoriques. S'est en premier lieu posée la question de la prise en compte ou non des différences individuelles. Puis, nous nous sommes interrogés sur les nombreux autres modes de traitement central que nos simulations cognitives auraient pu représenter.

Différences inter-individuelles. Tout le monde est-il capable de traitement central parallèle ? La notion d'une limitation centrale stratégique élaborée dans cette thèse suppose que oui. Les résultats de l'étude 3 viennent cependant nuancer notre réponse. Dans les conditions

de l'étude 3 pour lesquelles la préparation de la tâche 2 a été boostée via l'introduction d'essais de simple tâche entremêlée (cf. expériences 2 et 4), 18 participants sur 48 sont parvenus à traiter les deux tâches arbitraires et non pratiquées simultanément. Ces résultats sont inédits pour la littérature sur la double tâche, essentiellement composée d'articles rapportant la présence d'un goulet d'étranglement central pour de telles combinaisons de tâches. L'hétérogénéité de nos résultats pose toutefois question. Comment se fait-il qu'une partie de nos participants ($n = 30$) ait majoritairement traité les tâches de façon sérielle ? Certains individus ont-ils besoin de plus de préparation que d'autres ? Dans notre étude, nous avons reconnu l'existence de variables inter-individuelles pour justifier l'existence de sous-groupes de traitement (i.e., les participants qui ont traité les tâches en parallèle vs. sériellement), mais nous n'avons pas mis en œuvre des recherches visant à identifier ces variables. La principale raison est que notre but premier était d'attester de la possibilité de traiter deux tâches arbitraires et non pratiquées à la fois, sans interférence au niveau central du traitement de l'information. Les quelques travaux ayant testé l'automatisme de telles tâches ont rapporté la présence d'une limitation centrale généralisée à tous leurs participants ; prouver que des conditions vont à l'encontre de cette notion d'une limitation centrale omniprésente était notre objectif plutôt que de chercher à comprendre les différences inter-individuelles rarement étudiées en double tâche (mais voir Brüning et al., 2022). Cependant, maintenant que le traitement central sériel n'est plus le mode de traitement par défaut dans les études, il peut être intéressant de comprendre ce qui a causé ces différences dans notre échantillon expérimental. De cette façon, dans la continuité de notre démarche qui est d'éprouver le fonctionnement attentionnel et ses limites, nous pourrions peut-être mieux identifier les conditions à réunir afin que tous les participants de nos échantillons traitent deux tâches à la fois sans interférence centrale.

Simulations cognitives. Les méthodes de simulations cognitives d'IRI que nous avons progressivement développées nous ont permis de rendre compte de la nature du traitement central de chaque participant. Pour autant, des analyses de la performance en double tâche par essai ou par bloc d'essais démontrent que la performance est variable. Un participant ayant traité les deux tâches en parallèle sur un essai ne traitera peut-être pas ces tâches de la même façon sur l'essai $n+1$. C'est la raison pour laquelle nous avons nommé nos participants « *bypassers* » de l'étude 3 « *primarily bypassers* », afin d'indiquer une stratégie dominante car notre objectif était le diagnostic du traitement central parallèle vs. sériel. Il était essentiel pour nous de démontrer la possibilité d'un traitement parallèle central avec deux tâches pour lesquelles la littérature prédit massivement de l'interférence. L'emploi de nos simulations d'IRI comme outil diagnostic était donc adapté. Mais ces simulations permettent d'autres choses.

Concrètement, les simulations cognitives sont un outil offrant la possibilité de confronter les données observées aux données prédites par tel ou tel modèle de l'interférence en double tâche. Ainsi, maintenant que nous savons que la limitation centrale n'est pas une cause structurale de l'interférence en double tâche mais plutôt la résultante d'une préparation insuffisante des tâches, il pourrait être intéressant d'utiliser les simulations pour examiner de plus près les différentes stratégies de traitement déployées par les participants. L'élimination de l'interférence cache-t-elle un goulet d'étranglement sur la tâche 1, ou encore un groupement des réponses ? Les participants retournent-ils à un traitement sériel des tâches lorsqu'ils commettent des erreurs ? Les effets des procédures de double tâche perdurent-ils sur plusieurs sessions ? Une pléthore de questions peuvent être traitées grâce aux simulations cognitives, chacune d'entre elles menant à de nouvelles perspectives de recherche et une meilleure compréhension de la manière dont l'attention centrale est allouée.

Conclusions

Les personnes éprouvent régulièrement des difficultés lorsqu'ils tentent de réaliser plusieurs tâches simultanément. Ces difficultés se manifestent sous la forme d'une augmentation du nombre d'erreurs commises, ou encore d'une lenteur accrue des réponses. Les théories cognitives qui ont été proposées pour expliquer ce phénomène convergent vers la conclusion que le stade central du traitement de l'information serait sujet à de sévères limitations attentionnelles (e.g., Meyer & Kieras, 1997a, 1997b ; Navon & Miller, 1987 ; Pashler, 1994 ; Tombu & Jolicoeur, 2003). Des exceptions viennent cependant questionner la validité de ces théories (e.g., Greenwald & Shulman, 1973 ; Van Selst et al., 1999) sans pour autant pouvoir être vérifiées, faute de moyens méthodologiques permettant d'isoler l'éventualité d'une limitation centrale latente (Ruthruff et al., 2003). Dans cette thèse, nous avons tenté de résoudre cet écart entre la théorie et les faits. Dans une première étude, nous avons testé l'automatisme longuement débattue de tâches dites idéomotrices, pour lesquelles il faut faire exactement ce que l'on perçoit (e.g., répéter des mots entendus). En employant un protocole de double tâche amélioré ainsi qu'un ensemble d'indicateurs comportementaux, nous avons démontré que les tâches idéomotrices sont bien automatiques dans le sens où elles permettent l'élimination de la limitation centrale. Dans notre deuxième étude, nous avons questionné le caractère exceptionnel des tâches idéomotrices en testant l'automatisme d'une autre catégorie de tâches toutes aussi aisées, à savoir les tâches sémantiques. Ces tâches sémantiques ayant également permis l'élimination de la limitation centrale, nous avons émis l'hypothèse que la source de l'interférence en double tâche se situe en amont de l'essai, dans la préparation des tâches. Cette hypothèse dite de la négligence préparatoire suppose que l'interférence provient d'un préchargement insuffisant des représentations des tâches en mémoire de travail. L'hypothèse de la négligence préparatoire prédit aussi que, pour peu que les tâches reçoivent un niveau de préparation suffisant, il est possible d'éliminer la limitation centrale. Dans une troisième étude, nous avons optimisé la préparation de la tâche habituellement négligée en condition de double tâche, à savoir la tâche 2, et observé l'élimination de la limitation centrale chez une grande partie des personnes de notre échantillon. Le travail de recherche présenté dans cette thèse débouche donc sur la validation d'une hypothèse novatrice de l'interférence en double tâche. Cette dernière vient prouver que la limitation centrale n'est pas la cause de l'interférence en double tâche, mais plutôt la conséquence d'un manque de préparation. Ainsi, les individus ne sont pas structurellement

contraints au traitement central sériel comme il a longtemps été pensé (e.g., Pashler, 1994 ; Telford, 1931 ; Welford, 1952) et la « simultanété des actes psychiques » (Paulhan, 1887) fait à nouveau surface.

Bibliographie

- Allport, D. A., Antonis, B., & Reynolds, P. (1972). On the division of attention: A disproof of the single channel hypothesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24, 225-235.
- Anderson, J. R. (1992). Automaticity and the ACT* theory. *American Journal of Psychology*, 105, 165-180.
- Anderson, J. R., Taatgen, N. A., & Byrne, M. D. (2005). Learning to achieve perfect timesharing: Architectural implications of Hazeltine, Teague, and Ivry (2002). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 749-761.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : VRIN.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A, 5-28.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Science*, 4, 417-423.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation Vol. 8* (pp. 47-89). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). Working memory: the multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory – mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28-61). Cambridge: University Press.
- Badets, A., Koch, I., Philipp, A. (2016). A review of ideomotor approaches to perception, cognition, action, and language: advancing a cultural recycling hypothesis. *Psychological Research*, 80, 1-15.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2012). As time goes by: temporal constraints in working memory. *Current Directions in Psychological Science*, 21, 413-419.
- Bertelson, P. (1966). Central intermittency twenty years later. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28, 153-163.
- Brebner, J. (1977). The search for exceptions to the psychological refractory period. In S. Dornic (Ed.), *Attention and performance VI: Proceedings of the 6th international symposium on attention and performance* (pp. 63-78). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. New York: Oxford University Press.

- Brüning, J., Koob, V., Manzey, D., & Janczyk, M. (2022). Serial and parallel processing in multitasking: Concepts and the impact of interindividual differences on task and stage levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *48*, 724-742.
- Carlson, R. A., & Lundy, D. G. (1992). Consistency and restructuring in cognitive procedural sequences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *18*, 127-141.
- Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, *82*, 407-428.
- Corallo, G., Sackur, J., Dehaene, S., & Sigman, M. (2008). Limits on introspection – Distorted subjective time during the dual-task bottleneck. *Psychological Science*, *19*, 1111-1117.
- Corbin, L., Moissenet, A., & Camos, V. (2012). Fonctionnement de la mémoire de travail chez des enfants présentant des difficultés scolaires. *Développements*, *11*, 5-12.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (p. 62-101). Cambridge: University Press.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87-114.
- Cowan, N. (2010). The magical mystery four: How is working memory capacity limited, and why? *Current Directions in Psychological Science*, *19*, 51-57.
- Cowan, N. (2017). The many faces of working memory and short-term storage. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*, 1158-1170.
- Craik, K. J. W. (1948). Theory of the human operator in control systems, II. *British Journal of Psychology*, *XXXVIII*, 142-148.
- Czyz, S. H. (2021). Variability of practice, information processing, and decision making – How much do we know? *Frontiers in Psychology*, *12*, 1-14.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory during reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal behavior*, *19*, 450-466.
- De Jong, R. (1993). Multiple bottlenecks in overlapping task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *19*, 965-980.
- De Jong, R. (1995). The role of preparation in overlapping-task performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *48A*, 2-25.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, *70*, 80-90.

- Donders, F. C. (1868). La vitesse des actes psychiques. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 3, 296-317.
- Downey, J. E., & Anderson, J. E. (1915). Automatic writing. *American Journal of Psychology*, 26, 161-195.
- Dux, P. E., Ivanoff, J., Asplund, C. L., & Marois, R. (2006). Isolation of a central bottleneck of information processing with time-resolved fMRI. *Neuron*, 52, 1109-1120.
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11, 19-23.
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102, 211-245.
- Fagot, C., & Pashler, H. (1992). Making two responses to a single object: Implications for the central attentional bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 1058-1079.
- Fischer, R., & Plessow, F. (2015). Efficient multitasking: parallel versus serial processing of multiple tasks. *Frontiers in Psychology*, 6, 1-11.
- Fischler, I. (1977). Semantic facilitation without association in a lexical decision task. *Memory & Cognition*, 5, 335-339.
- Fitts, P. M., & Deininger, R. L. (1954). S-R compatibility: Correspondence among paired elements within stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 48, 483-492.
- Fitts, P. M., & Seeger, C. M. (1953). S-R compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46 199-210.
- Folk, C. L., Remington, R., & Johnston, J. C. (1992). Involuntary covert orienting is contingent on attentional control settings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 1030–1044.
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideomotor mechanism. *Psychological Review*, 77, 73-99.
- Greenwald, A. G. (1972). On doing two things at once: Time sharing as a function of ideomotor compatibility. *Journal of Experimental Psychology*, 94, 52-57.
- Greenwald, A. G. (1979). Timesharing, ideomotor compatibility, and automaticity. Proceedings of the human factors society – 23rd annual meeting.
- Greenwald, A. G. (2003). On doing two things at once: III. Confirmation of perfect timesharing when simultaneous tasks are ideomotor-compatible. *Journal of Experimental Psychology*, 29, 859-868.

- Greenwald, A. G. (2004). On doing two things at once: IV. Necessary and sufficient conditions: Rejoinder to Lien, Proctor, and Ruthruff (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *3*, 632-636.
- Greenwald, A. G., & Shulman, H. G. (1973). On doing two things at once: II. Elimination of the psychological refractory period effect. *Journal of Experimental Psychology*, *101*, 70-76.
- Gottsdanker, R. (1980). The ubiquitous role of preparation. In G. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in minor behavior* (pp. 315-371). Amsterdam: North-Holland.
- Halvorson, K. M., Ebner, H., & Hazeltine, E. (2013). Investigating perfect timesharing: The relationship between IM-compatible tasks and dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*, 413-432.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2015). Do small dual-task costs reflect ideomotor compatibility or the absence of crosstalk? *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*, 1403-1409.
- Halvorson, K. M., & Hazeltine, E. (2019). Separation of tasks into distinct domains, not set-level compatibility, minimizes dual-task interference. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1-10.
- Hartley, A. A., & Maquestiaux, F. (2007). Success and failure at dual-task coordination by younger and older adults. *Psychology and Aging*, *22*, 215-222.
- Hartley, A. A., Maquestiaux, F., Festini, S. B., Frazier, K., & Krimmer, P. J. (2016). Backward compatibility effects in younger and older adults. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *78*, 1337-1350.
- Hartley, A. A., Seaman, B., & Maquestiaux, F. (2015). Ideomotor-compatible tasks partially escape dual-task interference in both young and elderly adults. *Psychology and Aging*, *30*, 36-45.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1979). Automatic and effortful processes in memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *108*, 356-388.
- Hawkins, H. L., Rodriguez, E., & Reicher, G. M. (1979). *Is time-sharing a general ability?* (Tech. Rep. 3). Eugene : University of Oregon.
- Hazeltine, E., & Ruthruff, E. (2006). Modality pairing effects and the response selection bottleneck. *Psychological Research*, *70*, 504-513.
- Hazeltine, E., Ruthruff, E., & Remington, R. W. (2006). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*, *52*, 291-345.

- Hazeltine, E., Teague, D., & Ivry, R. B. (2002). Simultaneous dual-task performance reveals parallel response selection after practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 527-545.
- Hazeltine, E., Weinstein, A., & Ivry, R. B. (2008). Parallel response selection after callosotomy. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*, 526-540.
- Hesselmann, G., Naccache, L., Cohen, L., & Dehaene, S. (2013). Splitting of the P3 component during dual-task processing in a patient with posterior callosal section. *Cortex*, *49*, 730-747.
- Heuer, H. (1995). Models for response-response compatibility: The effects of the relation between responses in a choice task. *Acta Psychologica*, *90*, 315-332.
- Heuer, H. (1996). Dual-task performance. In O. Neumann and A. F. Sanders (Eds.), *Handbook of perception and action* (Vol. 3, pp. 113-153). Academic Press.
- Hick, W. E. (1948). Discontinuous functioning for the amendment of a response. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *1*, 36-51.
- Hoareau, V. (2017). Modélisation et simulation des mécanismes de maintien en mémoire de travail : étude chez les personnes jeunes et âgées. [Thèse de doctorat : Université Grenoble Alpes]. <https://theses.hal.science/tel-01746120>
- Hommel, B. (1998). Automatic stimulus-response translation in dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*, 1368-1384.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event-coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 849-937.
- Huestegge, L., & Hazeltine, E. (2011). Crossmodal action: modality matters. *Psychological Research*, *75*, 445-451.
- Huestegge, L., & Koch, I. (2009). Dual-task crosstalk between saccades and manual responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*, 352-362.
- Hull, C. L. (1931). Goal attraction and directing ideas conceived as habit phenomena. *Psychological Review*, *38*, 487-506.
- Hutchison, K. A. (2003). Is semantic priming due to association strength or feature overlap? A microanalytic review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *10*, 785-813.
- Inserm, & Iffsttar. (2011). *Téléphone et sécurité routière (expertise collective)* (Rapport technique). Villejuif (France) : Institut national de la santé et de la recherche médicale ;

- Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.
- Israel, M., & Cohen, A. (2011). Involuntary strategy-dependent dual-task performance. *Psychological Research, 75*, 513-524.
- Ivry, R. B., Franz, E. A., Kingston, A., & Johnston, J. C. (1998). The psychological refractory period effect following callosotomy: Uncoupling of lateralized response codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24*, 463-480.
- James, W. (2013). *The principles of psychology (volume 2)*. New York: Cosimo Publishers. (Ouvrage original paru en 1890).
- Janczyk, M. (2016). Sequential modulation of backward crosstalk and task-shielding in dual-tasking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 42*, 631-647.
- Janczyk, M., & Kunde, W. (2020). Dual tasking from a goal perspective. *Psychological Review, 127*, 1079-1096.
- Janczyk, M., Renas, S., & Durst, M. (2018). Identifying the locus of compatibility-based backward crosstalk: Evidence from an extended PRP paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 44*, 261-276.
- Kahneman, D. (1973). Toward a theory of mental effort. In D. Kahneman (Ed.), *Attention and effort* (pp. 13-28). New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Kahneman, D., & Treisman, A. (1984). Changing views of attention and automaticity. In R. Parasuraman and D. A. Davies (Eds.), *Varieties of attention*. New York: Academic Press.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General, 132*, 47-70.
- Karlin, L., & Kestenbaum, R. (1968). Effects of number of alternatives on the psychological refractory period. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 20*, 167-178.
- Keele, S. W., & Boies, S. J. (1973). Processing demands of sequential information. *Memory & Cognition, 1*, 85-90.
- Kerr, B. (1973). Processing demands during mental operations. *Memory & Cognition, 1*, 401-412.
- Kinsbourne, M. (1981). Single channel theory. In D. Holding (Ed.), *Human skills* (pp. 65-89). New York: Wiley.

- Kleinman, D. (2013). Resolving semantic interference during word production requires central attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *39*, 1860-1877.
- Koch, I., Poljac, E., Müller, H., & Kiesel, A. (2018). Cognitive structure, flexibility, and plasticity in human multitasking—An integrative review of dual-task and task-switching research. *Psychological Bulletin*, *144*, 557-583.
- Kunde, W., Elsner, K., & Kiesel, A. (2007). No anticipation-no action: The role of anticipation in action and perception. *Cognitive Processing*, *8*, 71-78.
- Laird, J. (2012). *The SOAR cognitive architecture*. Cambridge: The MIT Press.
- Levy, J., & Pashler, H. (2007). Task prioritisation in multitasking during driving: Opportunity to abort a concurrent task does not insulate braking responses from dual-task slowing. *Applied Cognitive Psychology*, *22*, 507-525.
- Levy, J., Pashler, H., & Boer, E. (2006). Central interference in driving: Is there any stopping the psychological refractory period? *Psychological Science*, *17*, 228-235.
- Lewandowsky, S. (November 2016). <https://featuredcontent.psychonomic.org/whatwm-a-digital-event-celebrating-the-9-lives-of-working-memory/>
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., & Proctor, R. W. (2005). Confirming and disconfirming theories about ideomotor compatibility in dual-task performance: A reply to Greenwald (2005). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 226-229.
- Lien, M.-C., McCann, R. S., Ruthruff, E., & Proctor, R. W. (2005). Dual-task performance with ideomotor-compatible tasks: Is the central processing bottleneck intact, bypassed, or shifted in locus? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 122-144.
- Lien, M.-C., & Proctor, R. W. (2002). Stimulus-response compatibility and psychological refractory period effects: Implications for response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*, 212-238.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W., & Allen, P. A. (2002). Ideomotor compatibility in the psychological refractory period effect: 29 years of oversimplification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 396-409.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W., & Ruthruff, E. (2003). Still no evidence for perfect timesharing with two ideomotor-compatible tasks: A reply to Greenwald (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 1267-1272.

- Lien, M.-C., Ruthruff, E., & Johnston, J. C. (2006). Attentional limitations in doing two tasks at once: The search for exceptions. *Current Directions in Psychological Science*, *15*, 89-93.
- Logan, G. D. (1978). Attention in character-classification tasks: Evidence for the automaticity of component stages. *Journal of Experimental Psychology: General*, *107*, 32-63.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, *95*, 492-527.
- Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, *109*, 376-400.
- Logan, G. D., & Schulkind, M. D. (2000). Parallel memory retrieval in dual-task situations. I. Semantic memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*, 1072-1090.
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.
- Lucas, M. (2000). Semantic priming without association: A meta-analytic review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *7*, 618-630.
- Lyphout-Spitz, M., Maquestiaux, F., & Ruthruff, E. (2022). Bypassing the central bottleneck with easy tasks: Beyond ideomotor compatibility. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*, 501-511.
- Lyphout-Spitz, M., Maquestiaux, F., Ruthruff, E., & Chaloyard, S. (in press). Uncorking the central bottleneck : Even novel tasks can be performed automatically. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*.
- Magen, H., & Cohen, A. (2010). Modularity beyond perception: Evidence from the PRP paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*, 395-414.
- Maquestiaux, F. (2012). La simultanéité des actes psychiques : apports du protocole PRP. *L'Année Psychologique*, *112*, 631-663.
- Maquestiaux, F. (2016). Qualitative attentional changes with age in doing two tasks at once. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*, 54-61.
- Maquestiaux, F., Didierjean, A., Ruthruff, E., Chauvel, G., & Hartley, A. A. (2013). Lost ability to automatize task performance in old age. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*, 1206-1212.

- Maquestiaux, F., Hartley, A. A., & Bertsch, J. (2004). Can practice overcome age-related differences in the psychological refractory period effect? *Psychology and Aging, 19*, 649-667.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., & Bherer, L. (2008). Bypassing the central bottleneck after single-task practice in the psychological refractory period paradigm: Evidence for task automatization and greedy resource recruitment. *Memory & Cognition, 36*, 1262-1282.
- Maquestiaux, F., Laguë-Beauvais, M., Ruthruff, E., Hartley, A. A., & Bherer, L. (2010). Learning to bypass the central bottleneck: Declining automaticity with advancing age. *Psychology and Aging, 25*, 177-192.
- Maquestiaux, F., Lyphout-Spitz, M., Ruthruff, E., & Arexis, M. (2020). Bottleneck bypassing and ideomotor compatibility: Ideomotor compatibility enables automatic response selection. *Psychonomic Bulletin & Review, 27*, 742-750.
- Maquestiaux, F., & Ruthruff, E. (2021). Testing the over-reliance on central attention (ORCA) hypothesis: Do older adults have difficulty automatizing especially easy tasks? *Journal of Experimental Psychology: General, 150*, 1722-1740.
- Maquestiaux, F., Ruthruff, E., Defer, A., & Ibrahime, S. (2018). Dual-task automatization: The key role of sensory-motor modality compatibility. *Attention, Perception, & Psychophysics, 80*, 752-772.
- McCann, R. S., & Johnston, J. C. (1992). Locus of the single-channel bottleneck in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18*, 471-484.
- McLeod, P. (1977). Parallel processing and the psychological refractory period. *Acta Psychologica, 41*, 381-391.
- McNamara, T. P. & Holbrook, J. B. (2003). Semantic memory and priming. In A. F. Healy & R. W. Proctor (Eds.), *Handbook of psychology: Experimental psychology, Vol. 4* (pp. 447-474). John Wiley & Sons, Inc.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997a). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms. *Psychological Review, 104*, 3-65.
- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997b). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 2. Accounts of psychological refractory-period phenomena. *Psychological Review, 104*, 749-791.

- Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1999). Precis to a practical unified theory of cognition and action: Some lessons from EPIC computational models of human multiple-task performance. In D. Gopher & A. Koriat (Eds.), *Attention and performance XVII: Cognitive regulation of performance: Interaction of theory and application* (pp. 17–88). Cambridge, MA: MIT Press.
- Meyer, D. E., & Schvaneveldt, R. W. (1971). Facilitation in recognizing pairs of words: Evidence of a dependence between retrieval operations. *Journal of Experimental Psychology*, *90*, 227-234.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*, 81-97.
- Miller, J. (2006). Backward crosstalk effects in psychological refractory period paradigms: effects of second-task response types on first-task response latencies. *Psychological Research*, *70*, 484-493.
- Mittelstädt, V., Mackenzie, I. G., & Miller, J. (2022, September 15). Evidence of Resource Sharing in the Psychological Refractory Period (PRP) Paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. Advance online publication. <http://dx.doi.org/10.1037/xhp0001052>
- Moors, A., & De Houwer, J. (2006). Automaticity: A theoretical and conceptual analysis. *Psychological Bulletin*, *132*, 297-326.
- Moors, A., & De Houwer, J. (2007). What is automaticity: An analysis of its component features and their interrelations. In J. A. Bargh (Ed.), *Social psychology and the unconscious: The automaticity of higher mental processes* (pp. 11-50). New York: Psychology Press.
- Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *11*, 56-60.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. *Acta Psychologica*, *27*, 84-92.
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human processing system. *Psychological Review*, *86*, 254-284.
- Navon, D., & Miller, J. (1987). Role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 435-448.
- Navon, D., & Miller, J. C. (2002). Queuing or sharing. A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, *44*, 193-251.

- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1976). On the analysis of performance operating characteristics. *Psychological Review*, 83, 508-510.
- Oberauer, K. (2009). Design for a working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 51, 45-100.
- Oberauer, K., Süß, H. M., Wilhelm, O., & Wittman, W. W. (2003). The multiple faces of working memory: storage, processing, supervision and coordination. *Intelligence*, 31, 167-193.
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks: Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 358-377.
- Pashler, H. (1990). Do response modality effects support multiprocessor models of divided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 826-842.
- Pashler, H. (1992). Attention limitations in doing two tasks at the same time. *Current Directions in Psychological Science*, 1, 44-48.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220-244.
- Pashler, H. (2000). Task-switching and multi-task performance. In S. Monsell & J. Driver (Eds.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (pp. 277-307). Cambridge, MA: MIT Press.
- Pashler, H., & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 19-45.
- Piai, V., Roelofs, A., & Schriefers, H. (2014). Locus of semantic interference in picture naming: Evidence from dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40, 147-165.
- Piai, V., Roelofs, A., & Schriefers, H. (2015). Task choice and semantic interference in picture naming. *Acta Psychologica*, 157, 13-22.
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Lawrence Erlbaum.
- Posner, M. I., (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.

- Posner, M. I., & Snyder, C. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. Solso (Ed.), *Information processing and cognition: The Loyola Symposium*. Hillsdale NJ.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Prinz, W. (1992). Why don't we perceive our brain states? *European Journal of Cognitive Psychology*, 4, 1-20.
- Prinz, W. (2002). Experimental approaches to imitation. In A. N. Meltzoff and W. Prinz (Eds.), *The imitative mind: Development, evolution and brain bases* (pp. 143-162). Cambridge: University Press.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Remington, R. W. (2009). How strategic is the central bottleneck: Can it be overcome by trying harder? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1368-1384.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Van Selst, M. (2001). Why practice reduces dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 3-21.
- Ruthruff, E., Johnston, J. C., Van Selst, M., Whitsell, S., & Remington, R. (2003). Vanishing dual-task interference after practice: Has the bottleneck been eliminated or is it merely latent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 280-289.
- Ruthruff, E., Pashler, H., & Klaassen, A. (2001). Processing bottlenecks in dual-task performance: Structural limitation or strategic postponement? *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 73-80.
- Ruthruff, E., Van Selst, M., Johnston, J. C., & Remington, R. (2006). How does practice reduce dual-task interference: Integration, automatization, or just stage-shortening? *Psychological Research*, 70, 125-142.
- Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C. J., Wulf, G. & Zelanic, H. N. (2018). *Motor control and learning: A behavioral emphasis, 6th edition*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schneider, W., Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Schubert, T., & Strobach, T. (2018). Practice-related optimization of dual-task performance: Efficient task instantiation during overlapping task processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44, 1884-1904.
- Schuch, S. & Koch, I. (2004). The costs of changing the representation of action: Response repetition and response-response compatibility in dual-tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 566-582.

- Schumacher, E. H., Lauber, E. J., Glass, J. M., Zurbriggen, E. L., Gmeindl, L., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1999). Concurrent response-selection processes in dual-task performance: Evidence for adaptive executive control of task scheduling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 791-814.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2001). Virtually perfect time sharing in dual-task performance: Uncorking the central cognitive bottleneck. *Psychological Science*, *12*, 101-108.
- Shaffer, L. H. (1975). Multiple attention in continuous verbal tasks. In P. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), *Attention and Performance V*. New York: Academic Press.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, *84*, 127-190.
- Shin, Y. K., Cho, Y. S., Lien, M.-C., & Proctor, R. W. (2007). Is the psychological refractory period effect for ideomotor compatible tasks eliminated by speed-stress instructions? *Psychological Research*, *71*, 553-567.
- Shin, Y. K., & Proctor, R. W. (2008). Are spatial responses to visuospatial stimuli and spoken responses to auditory letters ideomotor-compatible tasks? Examination of set-size effects on dual-task interference. *Acta Psychologica*, *129*, 352-364.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, *136*, 943-974.
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2006). Dynamics of the central bottleneck: Dual-task and task uncertainty. *PLoS Biology*, *4*, e220.
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2008). Brain mechanisms of serial and parallel processing during dual-task performance. *Journal of Neuroscience*, *28*, 7585-7598.
- Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception*, *28*, 1059-1074.
- Small, A. M. (1990). Foreword. In R. W. Proctor & T. G. Reeve (Eds.), *Stimulus-response compatibility: An integrated perspective* (pp. v-vi). Amsterdam: North Holland.
- Solomons, L., & Stein, G. (1896). Normal motor automatism. *Psychological Review*, *3*, 492-512.
- Spelke, E., Hirst, W., & Neisser, U. (1976). Skills of divided attention. *Cognition*, *4*, 215-230.
- Stephan, D. N., & Koch, I. (2011). The role of input-output modality in task switching. *Psychological Research*, *75*, 491-498.

- Stephan, D. N., & Koch, I. (2015). Tactile stimuli increase effects of modality compatibility in task switching. *Experimental Psychology*, *62*, 276-284.
- Stephan, D. N., & Koch, I. (2016). Modality-specific effects on crosstalk in task switching: Evidence from modality compatibility using bimodal stimulation. *Psychological Research*, *80*, 935-943.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, *30*, 276-315.
- Stothart, C., Mitchoum, A., & Yehnert, C. (2015). The attentional cost of receiving a cell phone notification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *41*, 893-897.
- Strayer, D. L., & Drews, F. A. (2007). Cell-phone-induced driver distraction. *Current Directions in Psychological Science*, *16*, 129-131.
- Strayer, D. L., Drews, F. A., & Johnston, W. A. (2003). Cell phone-induced failure in visual attention during simulated driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *9*, 23-32.
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: Dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular phone. *Psychological Science*, *12*, 462-466.
- Strobach, T. (2020). The dual-task practice advantage: Empirical evidence and cognitive mechanisms. *Psychonomic Bulletin & Review*, *27*, 3-14.
- Strobach, T., & Schubert, T. (2017). No evidence for task automatization after dual-task training in younger and older adults. *Psychology and Aging*, *32*, 28-41.
- Strobach, T., Wendt, M., & Janczyk, M. (2018). Editorial: Multitasking: Executive functioning in dual-task and task switching situations. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1-5.
- Swinnen, S., & Wenderoth, N. (2004). Two hands, one brain: Cognitive neuroscience of bimanual skill. *Trends in Cognitive Science*, *8*, 18-25.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, *14*, 1-36.
- Thorndike, E. L. (1913). Ideo-motor action. *Psychological Review*, *20*, 91-106.
- Tomasik, D., Ruthruff, E., Allen, P. A., & Lien, M.-C. (2009). Nonautomatic emotion perception in a dual-task situation. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*, 282-288.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 3-18.

- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2004). Virtually no evidence for virtually perfect time-sharing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*, 795-810.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2005). Testing the predictions of the central capacity sharing model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 790-802.
- Touron, D. R., & Hertzog, C. (2004). Distinguishing age differences in knowledge, strategy use, and confidence during strategic skill acquisition. *Psychology and Aging*, *19*, 452-466.
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *12*, 242-248.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In E. Tulving & W. Donaldson (Eds.), *Organization of memory* (pp. 381-403). New York: Academic Press.
- Ulrich, R., Fernández, S. R., Jentsch, I., Rolke, B., Schröter, H., & Leuthold, H. (2006). Motor limitations in dual-task processing under ballistic movement conditions. *Psychological Science*, *17*, 788-793.
- Ulrich, R., & Miller, J. (2008). Response grouping in the psychological refractory period (PRP) paradigm: Models and contamination effects. *Cognitive Psychology*, *57*, 75-121.
- Van Selst, M., & Jolicoeur, P. (1997). Decision and response. *Cognitive Psychology*, *33*, 266-307.
- Van Selst, M., Ruthruff, E., & Johnston, J. C. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 1268-1283.
- Vince, M. A. (1949). Rapid response sequences and the psychological refractory period. *British Journal of Psychology*, *XI*, 23.
- Walker, H. E. K., Eng, R. A., Trick, L. M. (2021). Dual-task decrements in driving performance: The impact of task type, working memory, and the frequency of task performance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, *79*, 185-204.
- Watson, J. B. *Behaviorism* (Rev. Ed.). Chicago: University of Chicago Press.
- Watson, J. M., & Strayer, D. L. (2010). Supertaskers: Profiles in extraordinary multitasking ability. *Psychonomic Bulletin & Review*, *17*, 479-485.
- Welford, A. T. (1952). The 'psychological refractory period' and the timing of high-speed performance – a review and a theory. *British Journal of Psychology*, *43*, 2-19.

- Welford, A. T. (1959). Evidence of a single-channel decision mechanism limit performance in a serial reaction task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *11*, 193-210.
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance VIII* (Vol. 8, pp. 239-257). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention, dual task performance, and workload assessment. Consulté sur <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a102719.pdf>
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varities of attention* (pp. 63-102). Orlando: Academic Press.
- Wickens, C. D., Sandry, D. L., & Vidulich, M. (1983). Compatibility and resource competition between modalities of input, central processing and output. *Human Factors*, *25*, 227-248.
- Wundt, W. (1897). *Outline of psychology*. New York: Wilhelm Engelmann.
- Yantis, S., & Jonides, J. (1984). Abrupt visual onsets and selective attention: Evidence from visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *10*, 601-621.