

Fondements cognitifs de l'arithmétique élémentaire

Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Second Cours

**Circuits cérébraux
de l'arithmétique élémentaire**

Plan du cours

- Les précurseurs de l'imagerie cérébrale du calcul
- La région intrapariétale et la représentation des quantités
 - Spécificité catégorielle
 - Effet de distance
 - Accès automatique au sens des nombres
- Plusieurs circuits parallèles selon les opérations
 - Approximation et calcul exact
 - Automatisation du calcul
- L'interprétation des différentes formes d'acalculie

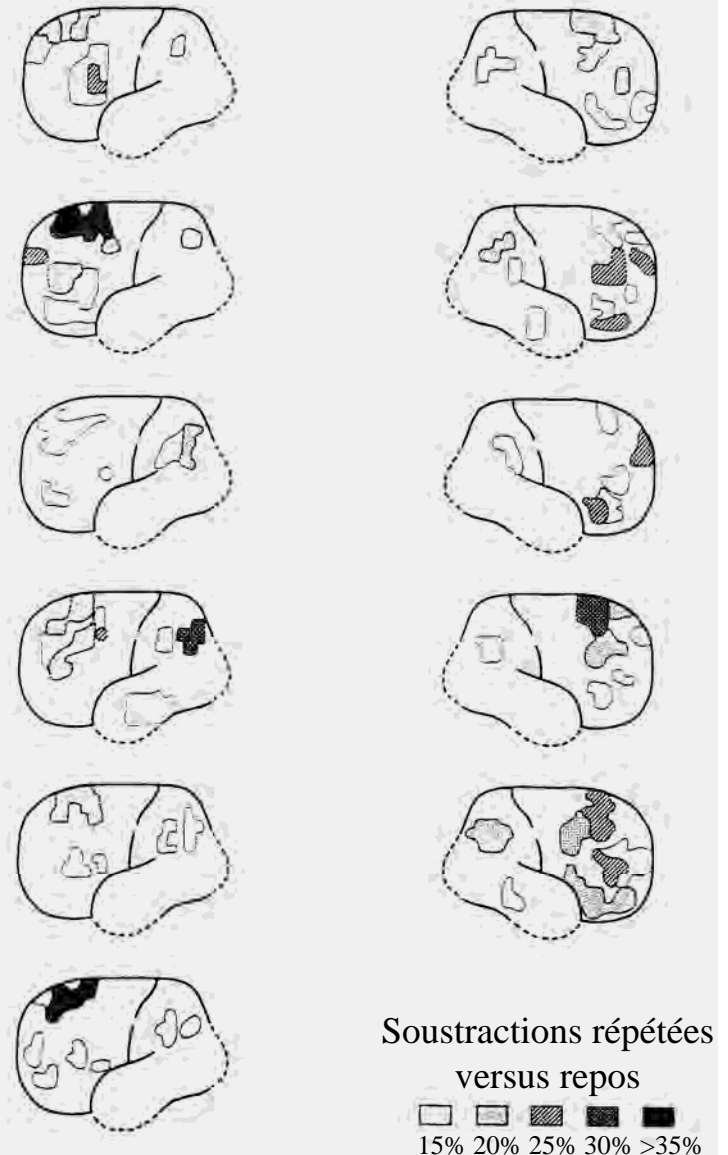
La première étude d'imagerie cérébrale du calcul mental

Roland et Friberg (1985)

Expériences visant à « démontrer qu'une activité purement mentale, la pensée, augmente le débit sanguin cérébral et que des formes de pensée différentes augmentent le débit sanguin cérébral local dans des aires corticales différentes. En première approche, nous avons défini la pensée comme *un travail cérébral effectué par un sujet éveillé et qui requiert des manipulations d'informations internes.* »

Méthode: injection de Xenon 133 et détection de l'émission de photons simples (un hémisphère à la fois)

Première démonstration de l'intense activation des régions pariétales et préfrontales lors du calcul.



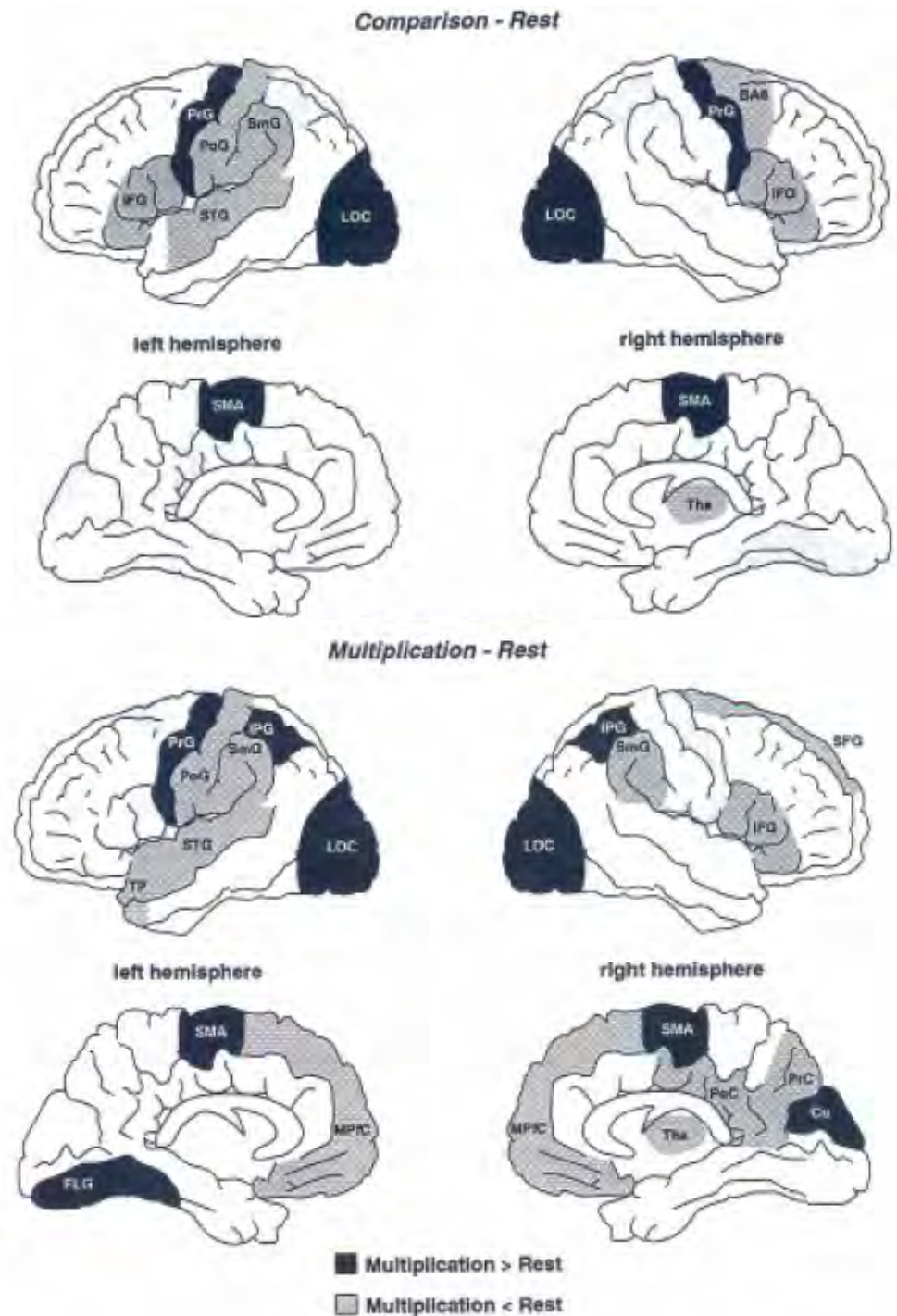
Première tentative de décomposition des opérations

Dehaene, Tzourio, Frak, Raynaud, Cohen, Mehler & Mazoyer (1996)

Deux tâches distinctes:

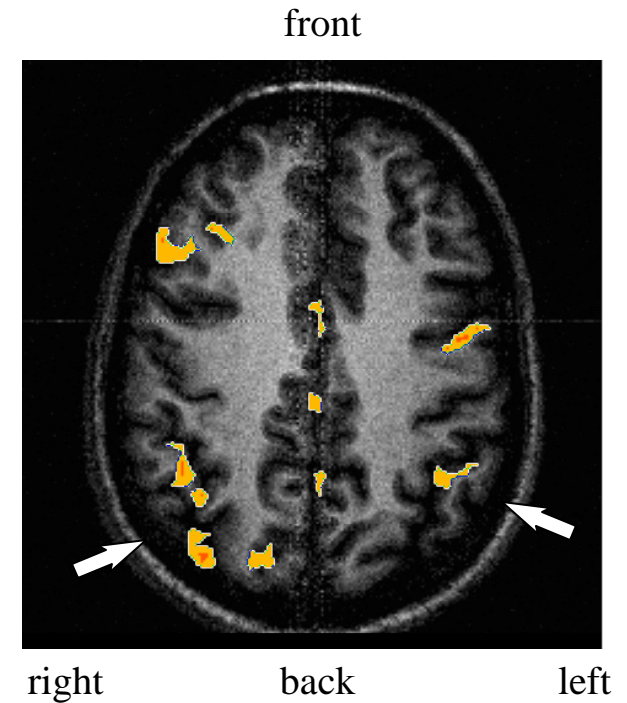
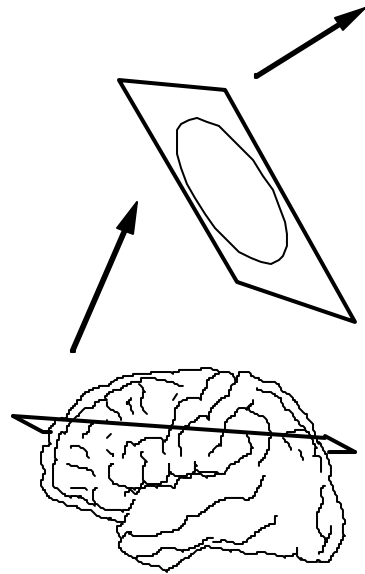
- Comparer deux chiffres arabes (nommer mentalement le plus grand)
- Multiplier deux chiffres arabes (nommer mentalement le résultat)

Première identification du rôle particulier du sillon intrapariétal

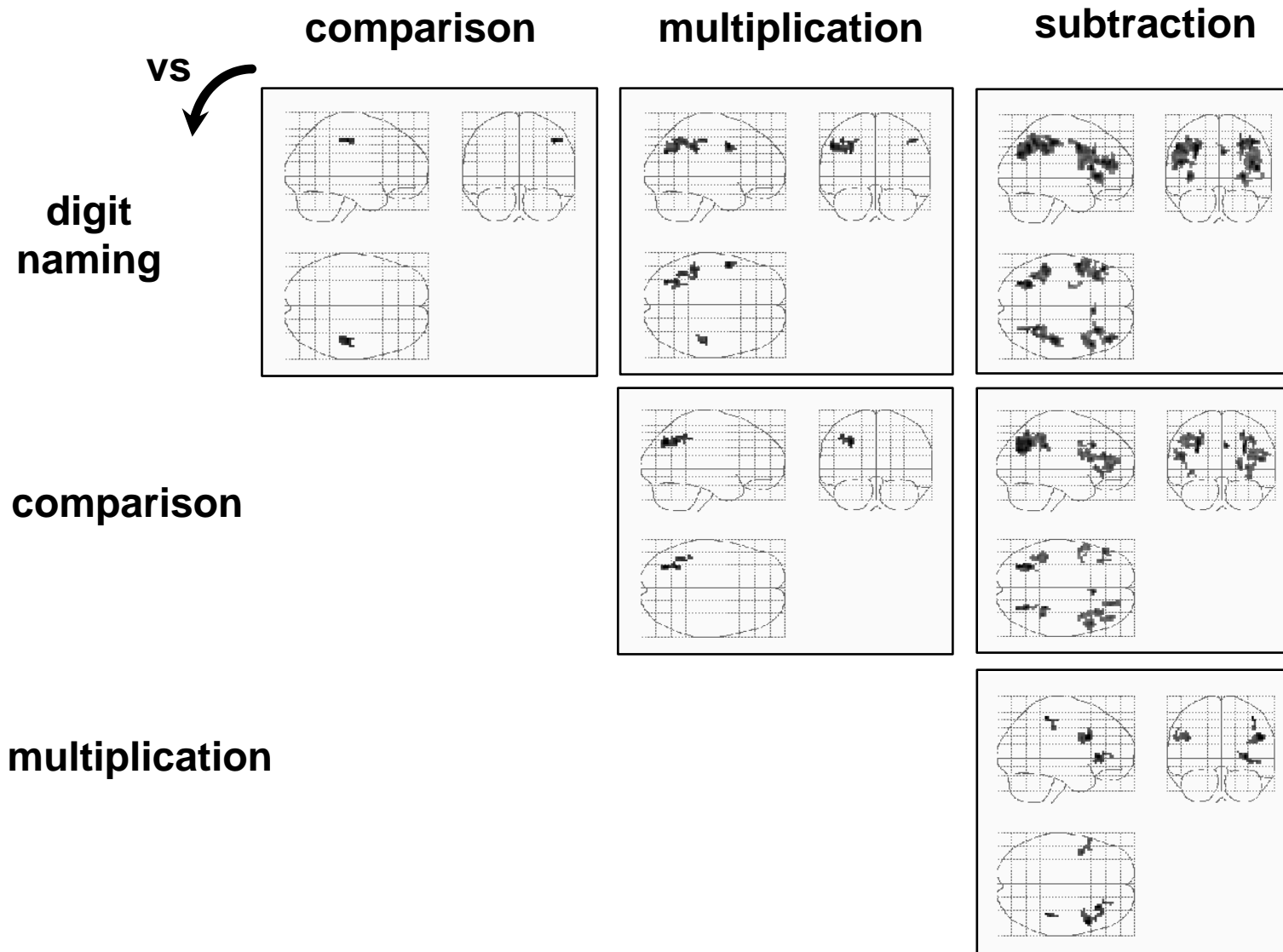


Apparition de l'IRM fonctionnelle

- Appolonio, Rueckert, Partiot, Litvan, Sorenson, Le Bihan, & Grafman (Abstract dans *Neurology*, 1994)
- Premières images du calcul sur l'aimant 3 Tesla d'Orsay (S. Dehaene, P.F. van de Moortele, D. Le Bihan, 1996)
- Chochon, Cohen, van de Moortele, & Dehaene (*J Cognitive Neuroscience*, 1999)
- Possibilité d'alterner rapidement une tâche de calcul et une tâche de contrôle



Contrastes hiérarchiques entre différents types d'opérations

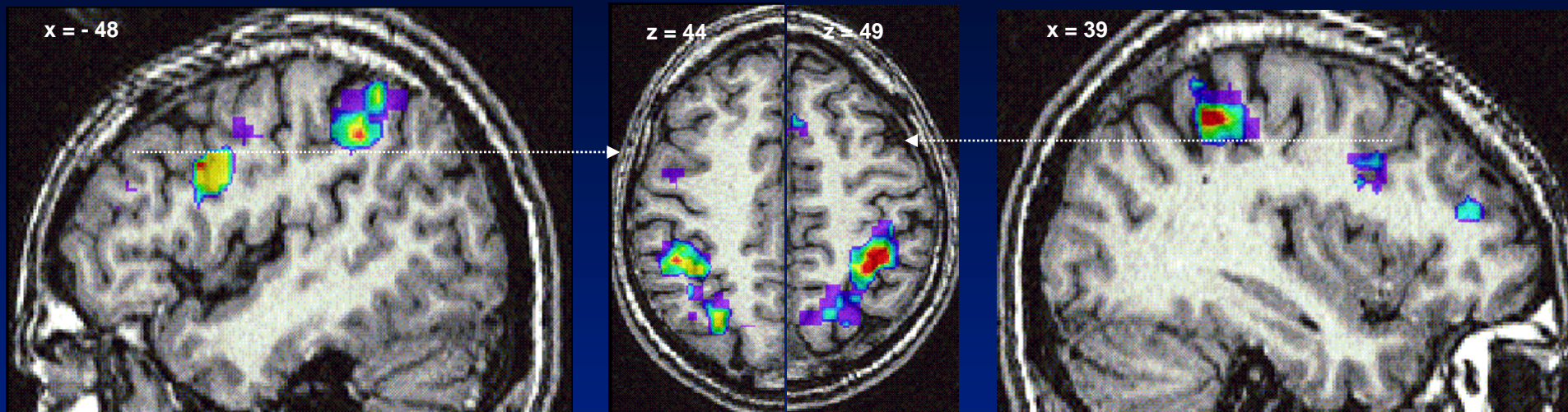


Le « sens des nombres » et le sillon intrapariétal: rôle du hIPS (*horizontal segment of intraparietal sulcus*)

Hémisphère gauche

Coupe horizontale

Hémisphère droit



Méta-analyse de Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). *Cognitive Neuropsychology*

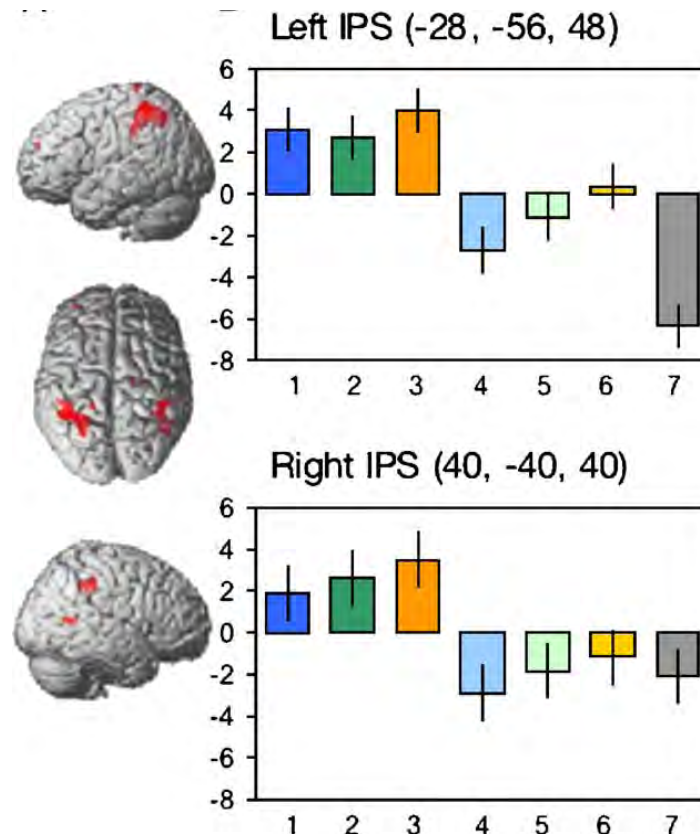
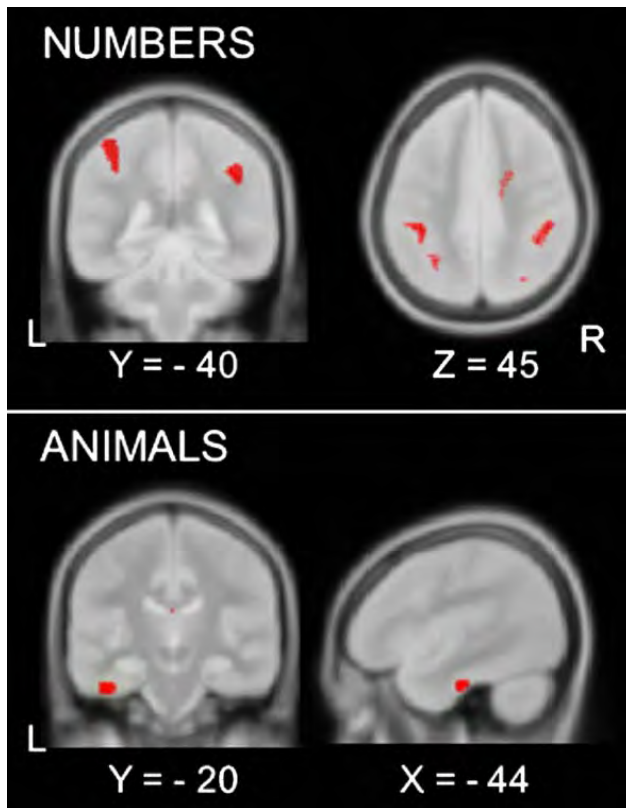
- Toutes les tâches numériques activent cette région
(addition, soustraction, comparaison, approximation, détection de chiffres...)
- Cette région remplit deux critères essentiels d'une représentation sémantique
 - Elle répond aux nombres présentés dans de nombreux formats (chiffres arabes, mots écrits ou parlés, numérosité d'ensembles d'objets) plus qu'à d'autres catégories d'objets (animaux, lettres)
 - Son degré d'activation varie selon une métrique sémantique (distance et quantité numérique)

Spécificité pour la catégorie sémantique des nombres

Thioux, Pesenti, Costes, De Volder &
Seron, 2005


Experimental design

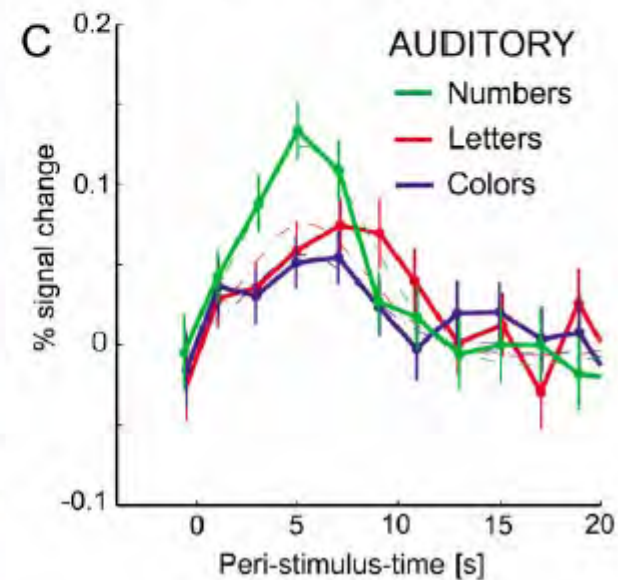
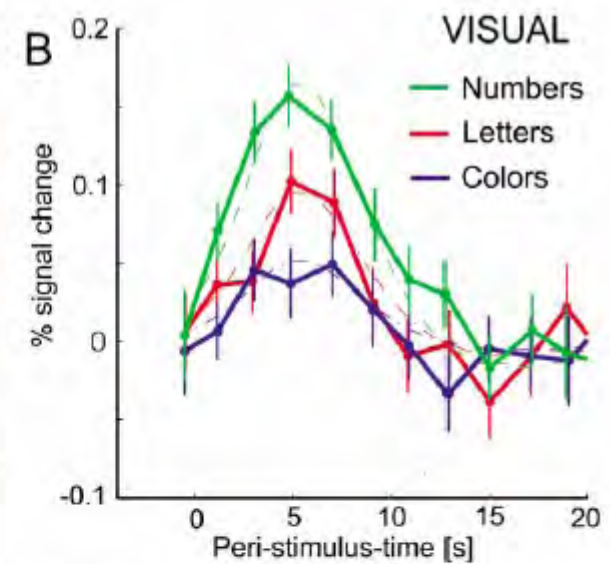
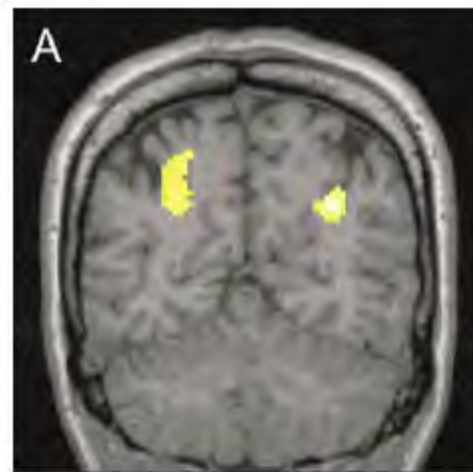
	Number words	Animal names
Comparison task	<i>Is it larger than five?</i> e.g. SIX (Yes)	<i>Is it more ferocious than a dog?</i> e.g. BEAR (Yes)
Classification task	<i>Is it an even number?</i> e.g. SIX (Yes)	<i>Is it a mammal?</i> e.g. BEAR (Yes)
Control task	<i>Is it written in plain characters?</i> e.g. SIX (Yes)	<i>Is it written in plain characters?</i> e.g. BEAR (Yes)



Spécificité catégorielle pour les nombres indépendamment de la modalité (Eger et al, *Neuron* 2003)

- Tâche: détecter des cibles rares (un chiffre, une lettre et une couleur sont désignées comme cibles)
- Les stimuli sont présentés dans les modalités visuelle ou auditive
- Seuls les essais où le stimulus n'est pas la cible sont analysés.

		CATEGORY		
		numbers	letters	colors
MODALITY	visual	2	B	
	auditory	"Two"	"Be"	"Red"



La spécificité de la région intrapariétale pour les nombres peut-elle s'expliquer par un artefact attentionnel, linguistique ou moteur?

Simon, O., Mangin, J. F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, 33(3), 475-487.

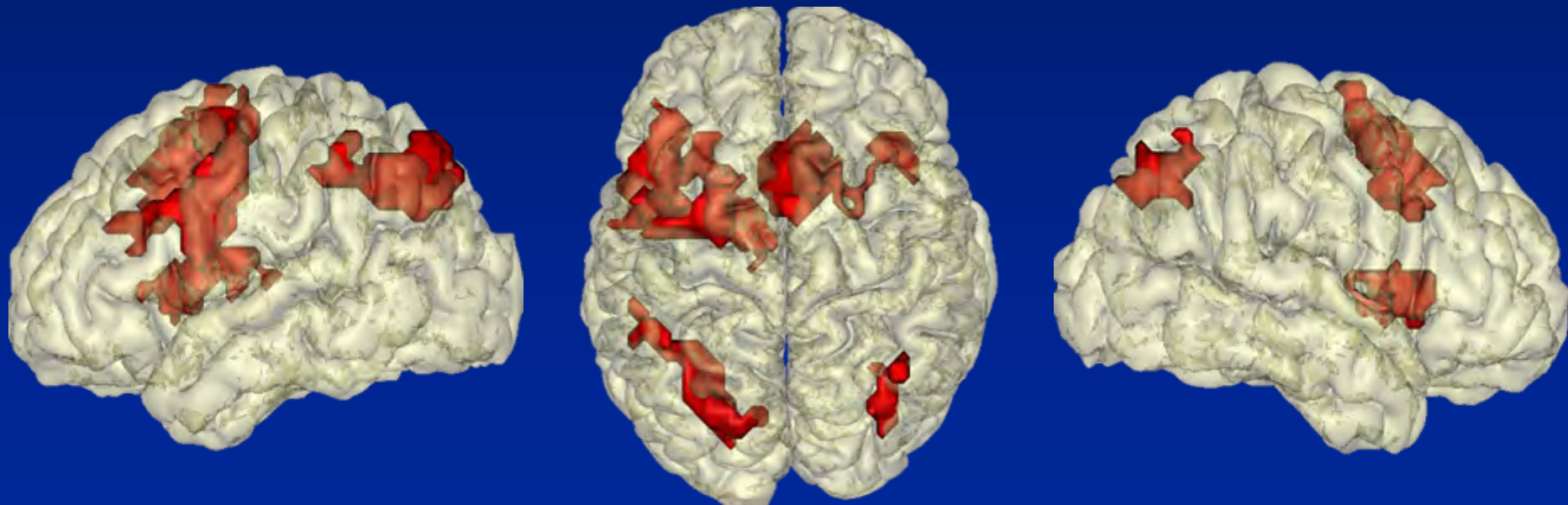
- La région pariétale est impliquée dans de très nombreux processus
 - Transformations sensori-motrices
 - Attention visuo-spatiale
 - Transcodage graphème-phonème
- Nous avons contrasté 6 tâches distinctes chez les mêmes sujets
 - Calcul
 - Saccades
 - Attention visuo-spatiale
 - *Grasping*
 - Pointage
 - Conversion graphème-phonème

Subtraction

Primary Task: Subtract a number
from 11 or from 15



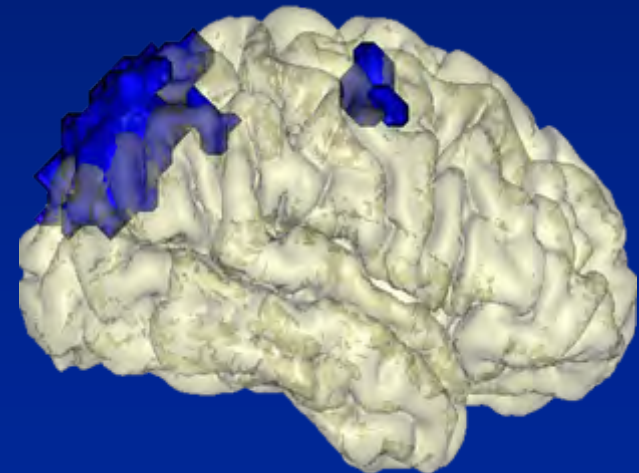
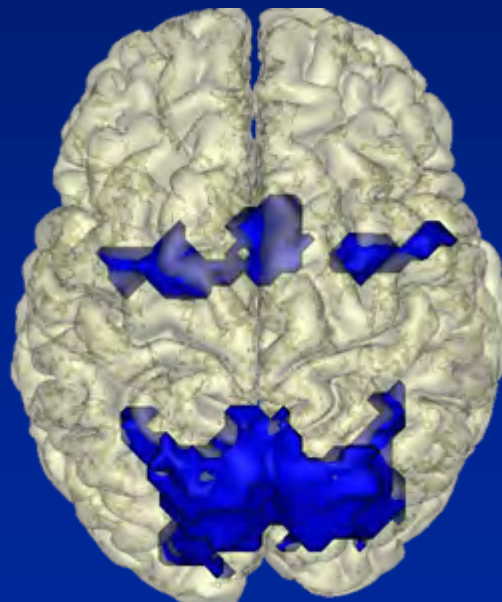
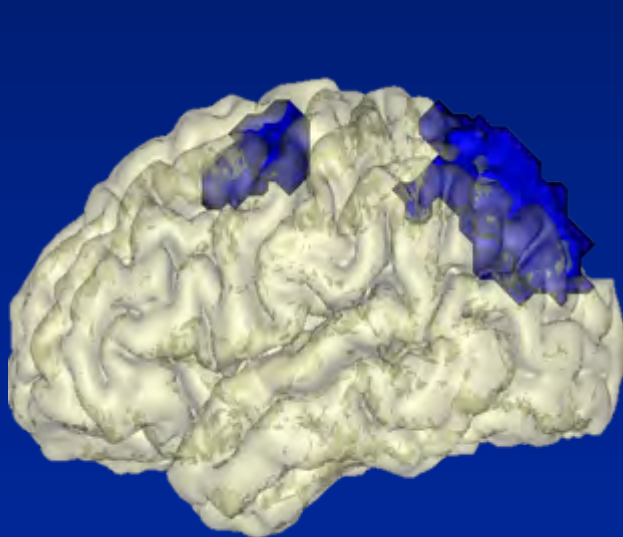
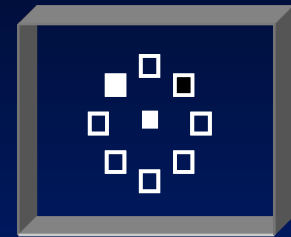
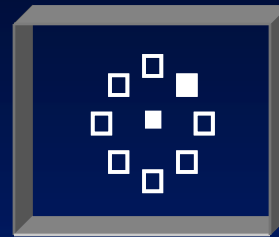
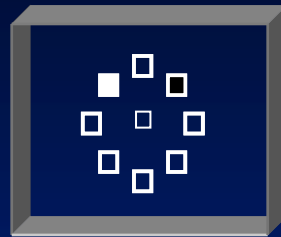
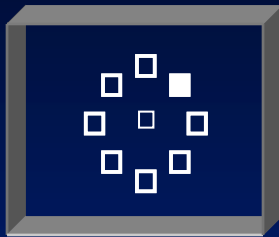
Control: Name a letter



Saccades

Primary Task: Move gaze to target

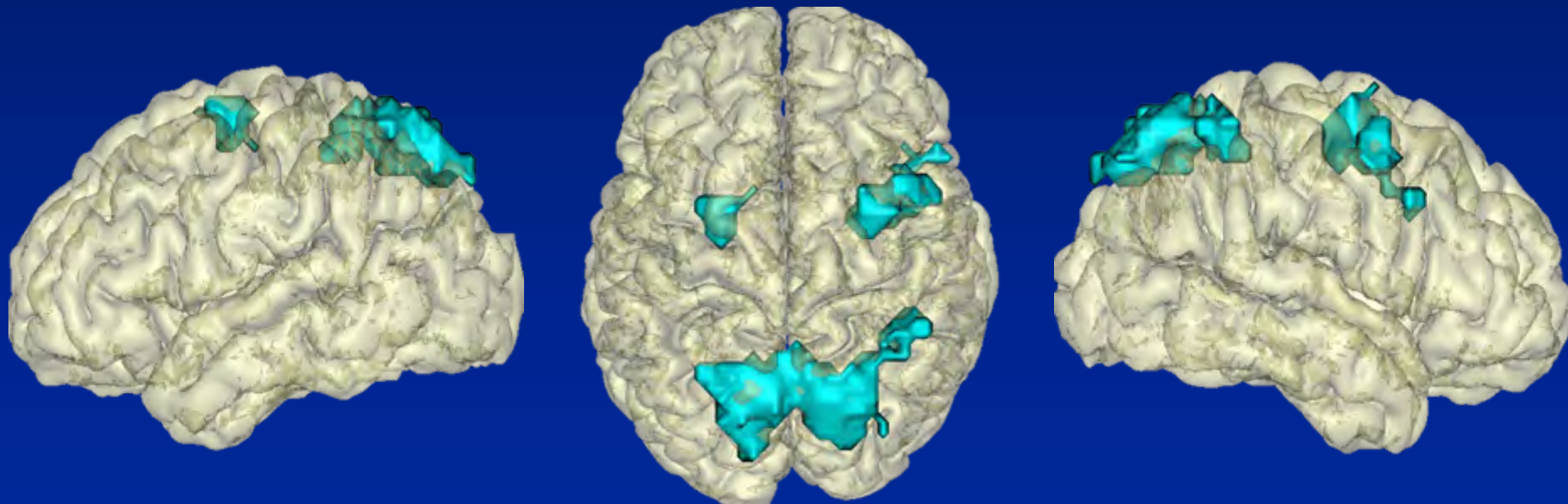
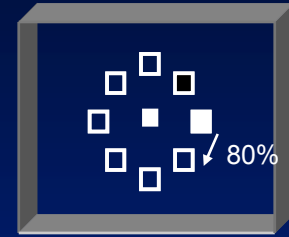
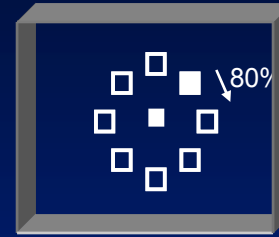
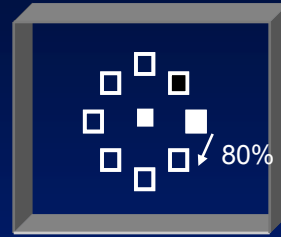
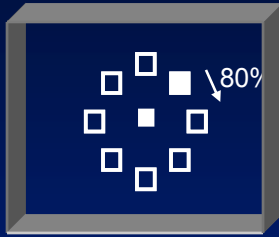
Control: Maintain central fixation



Movements of Visual Attention

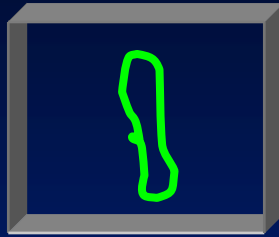
Primary Task: Detect peripheral flashes whose sequence is 80% predictable

Control: Detect central flashes

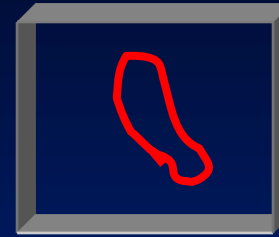


Grasping

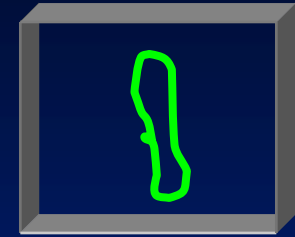
Primary Task: Mimic grasping
of an object



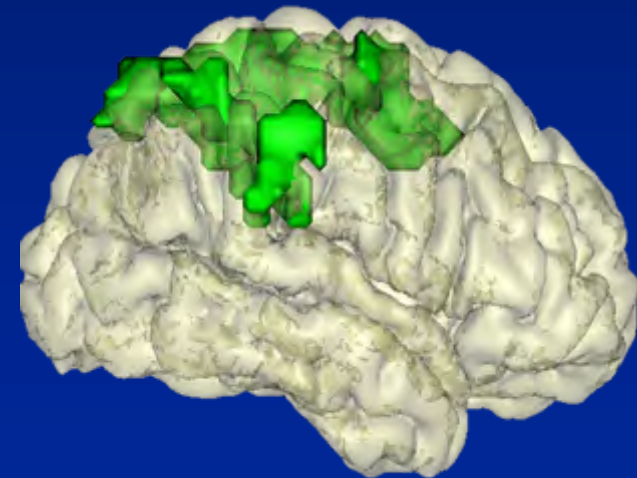
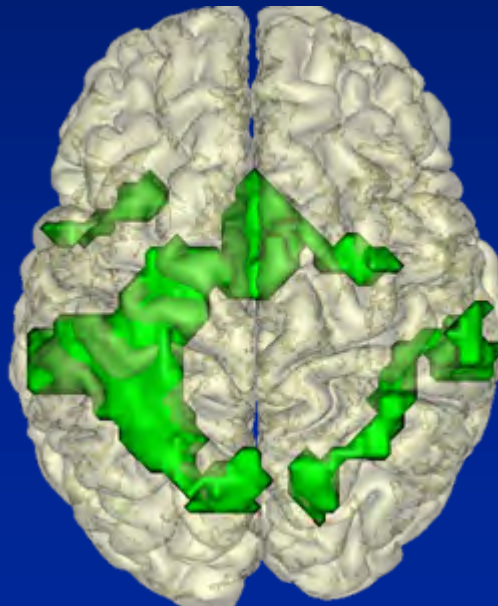
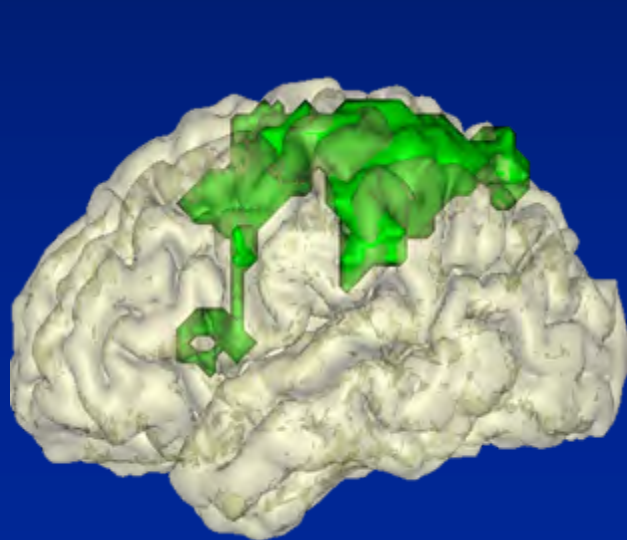
Control: Name object color



“red”



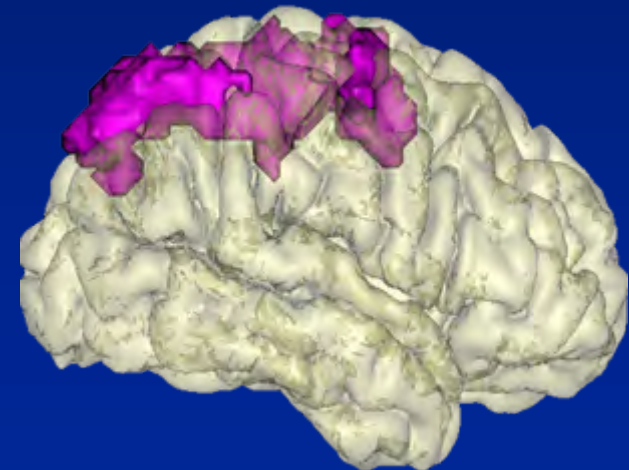
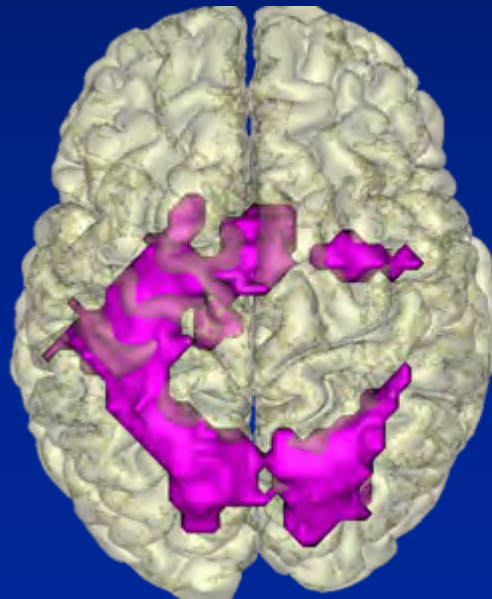
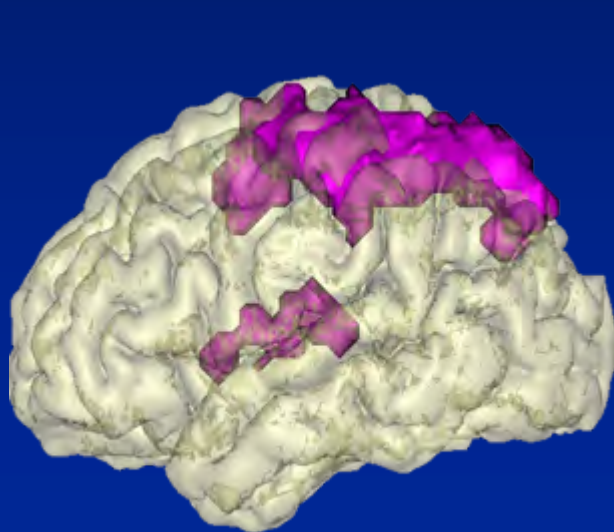
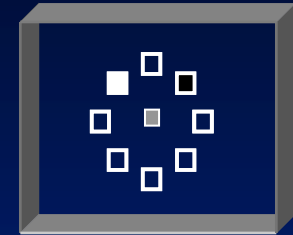
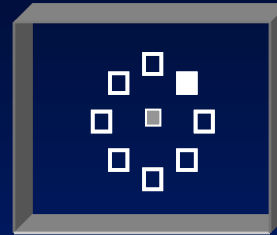
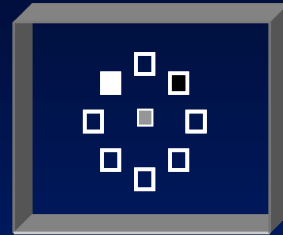
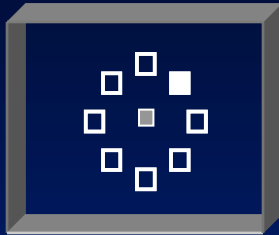
“green”



Finger Pointing

Primary Task: Point finger to target

Control: Maintain finger centrally



Converting Orthography To Phonology

Primary Task: Decide if a word contains the sound “ε”

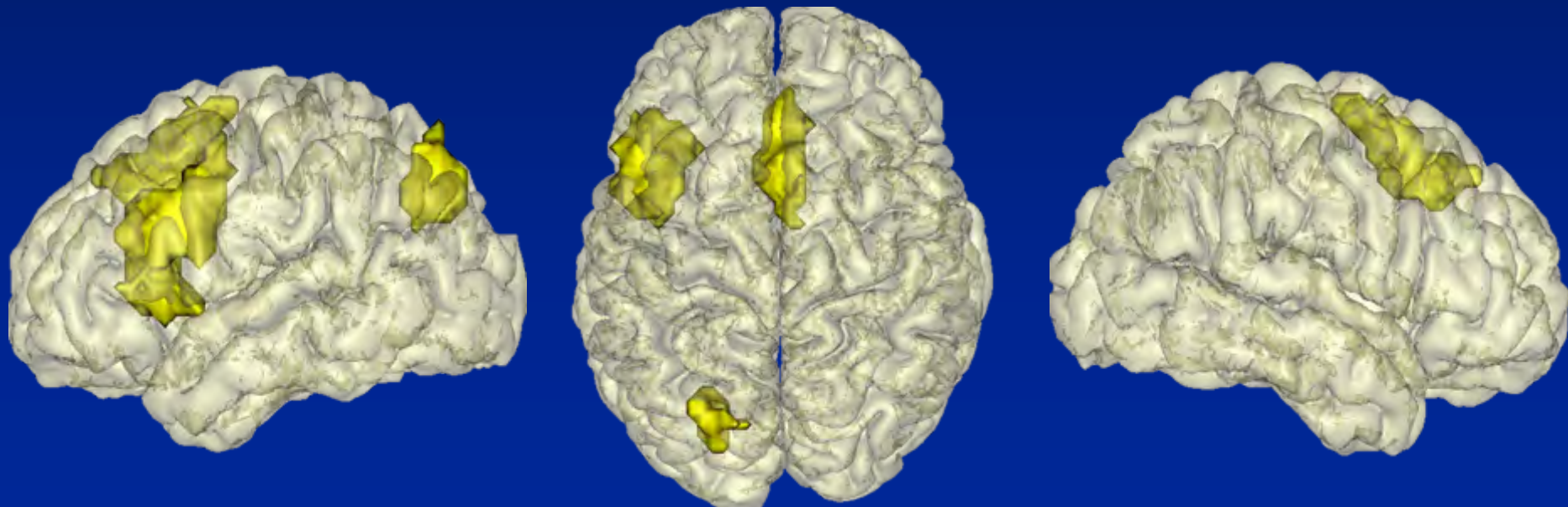
Control: Decide if a string is in upper or lower case

CONCERT

JOURNAL

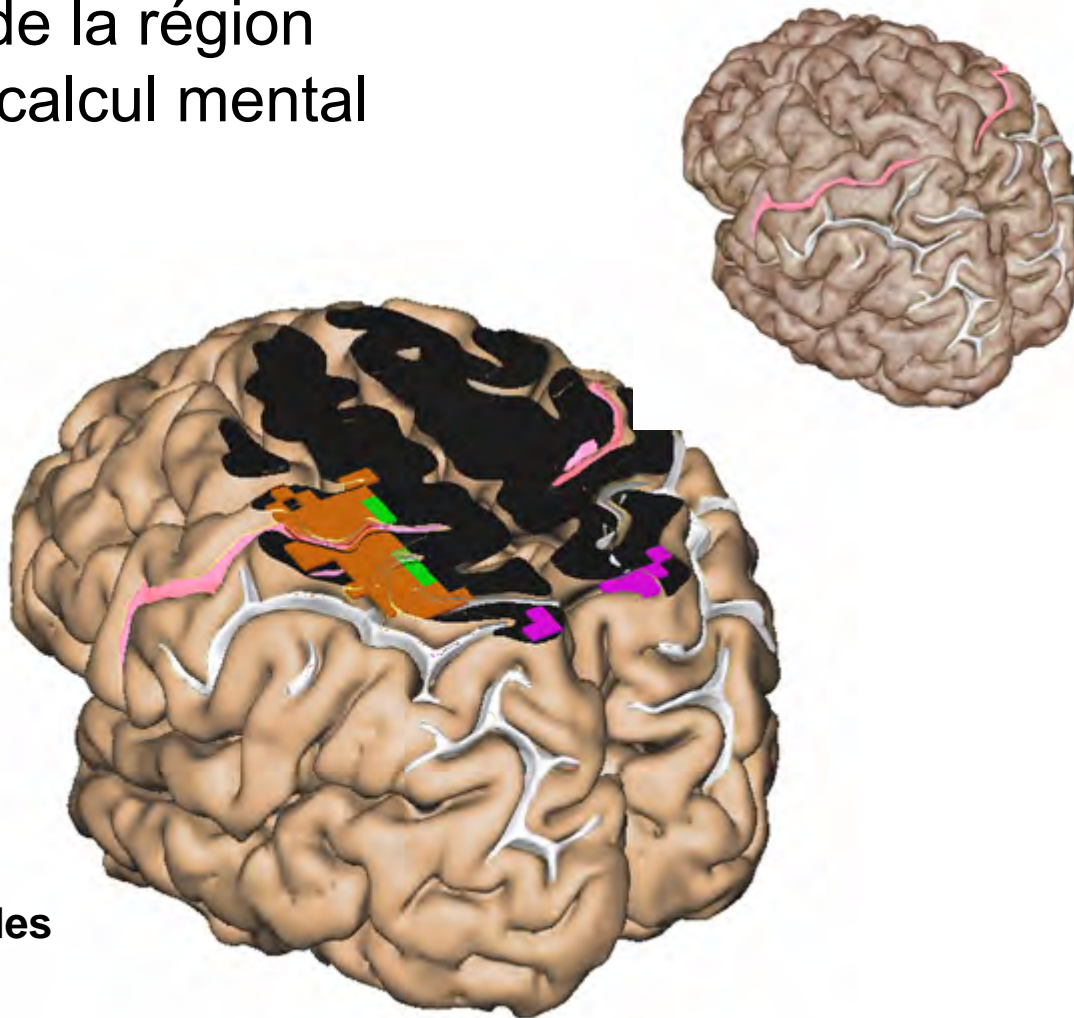
BCCJXFQ

tgdrfsx

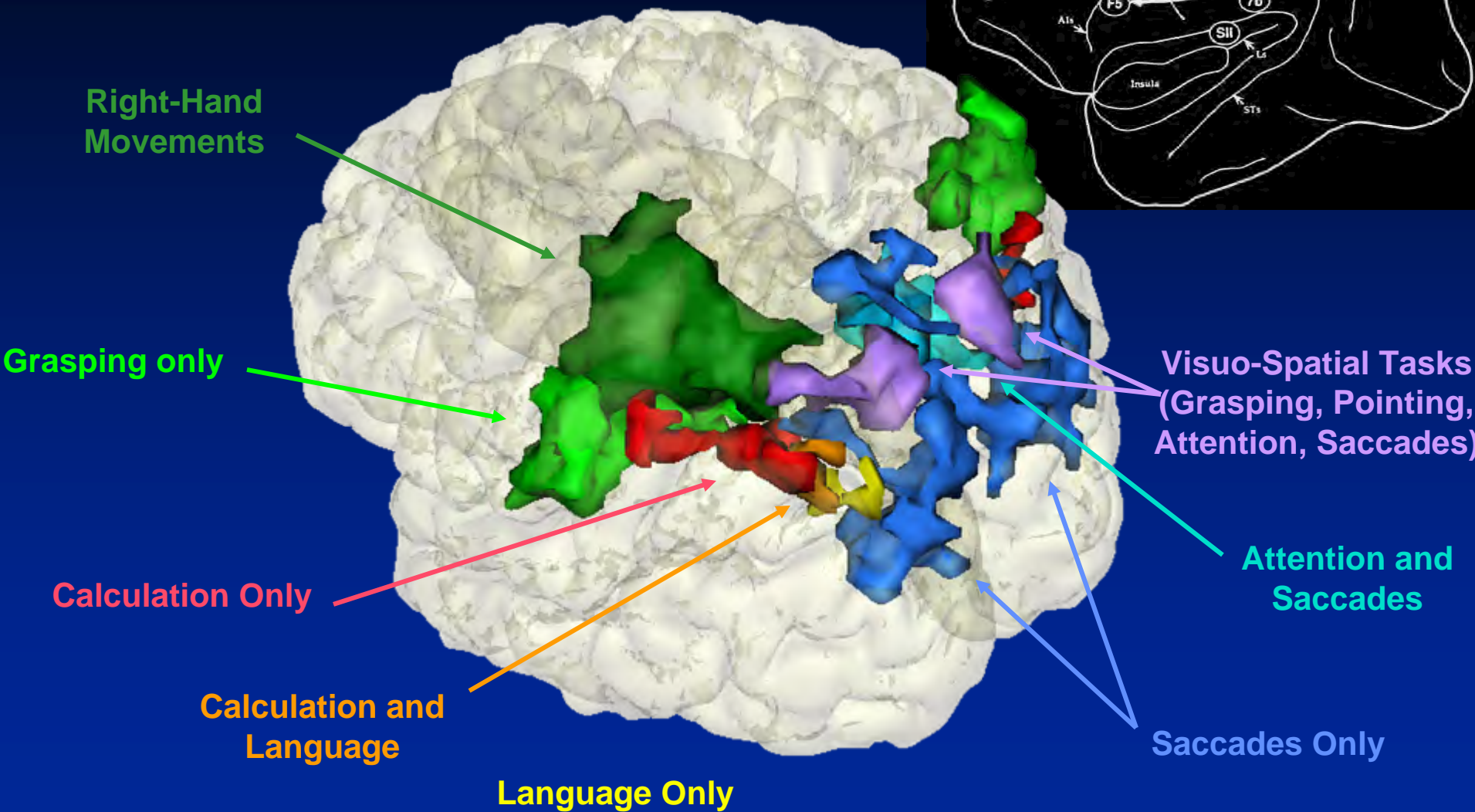
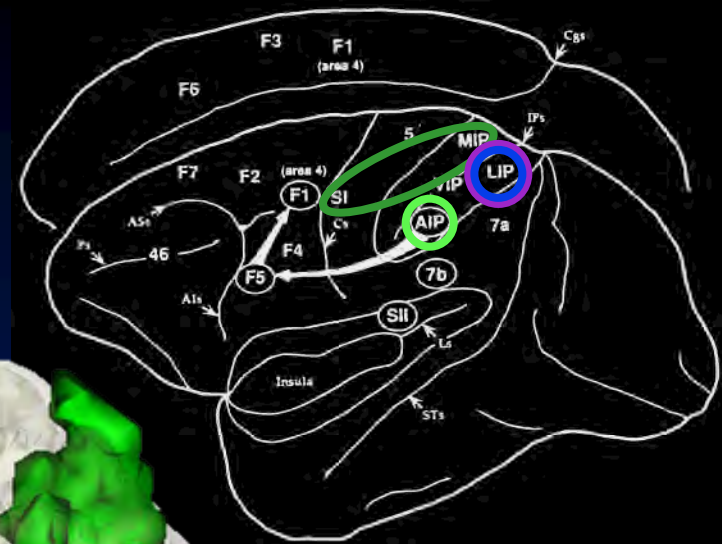


Spécificité relative de la région intrapariétale pour le calcul mental

- **Calculation only**
- **Calculation and Language**
- **Grasping only**
- **Manual tasks**
- **Visuo-spatial tasks**
- **Attention and saccades**
- **Saccades only**



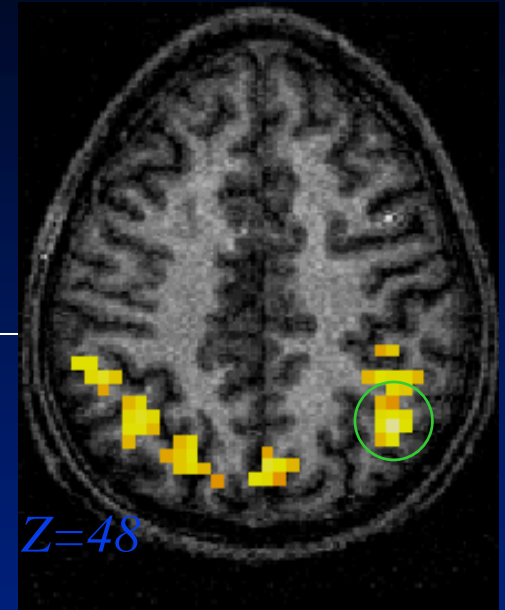
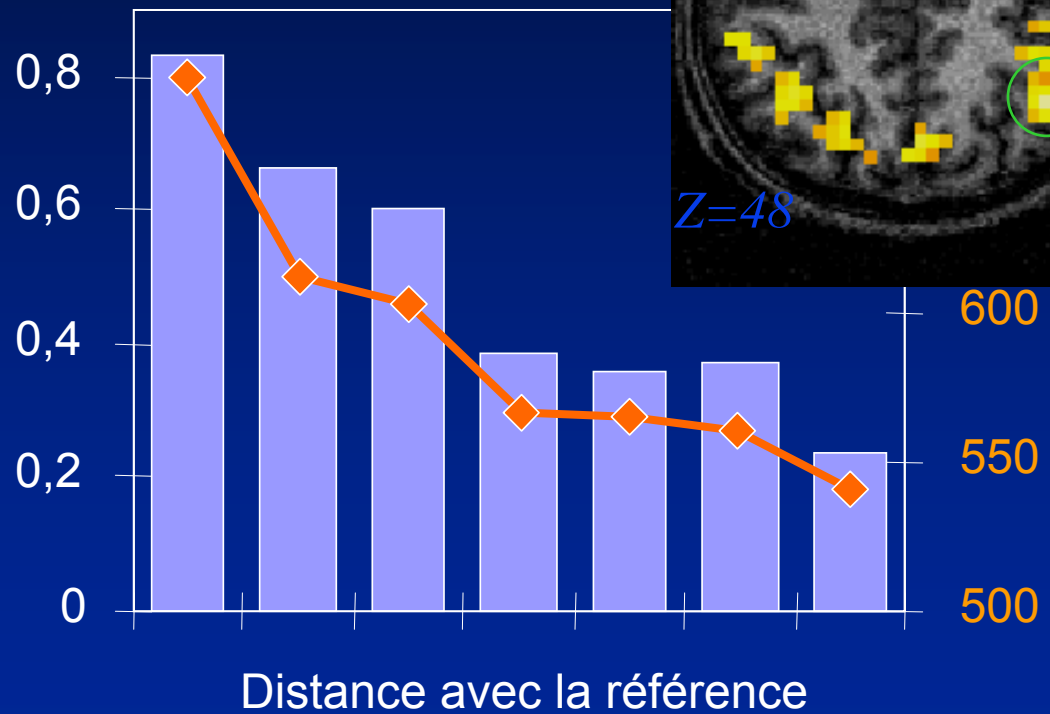
Spécificité relative de la région intrapariétale pour le calcul mental



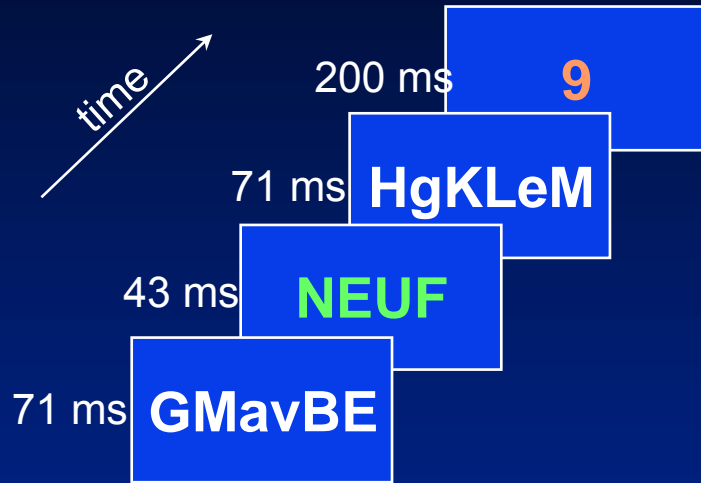
L'activation de la région intrapariétale obéit à une "métrique sémantique"



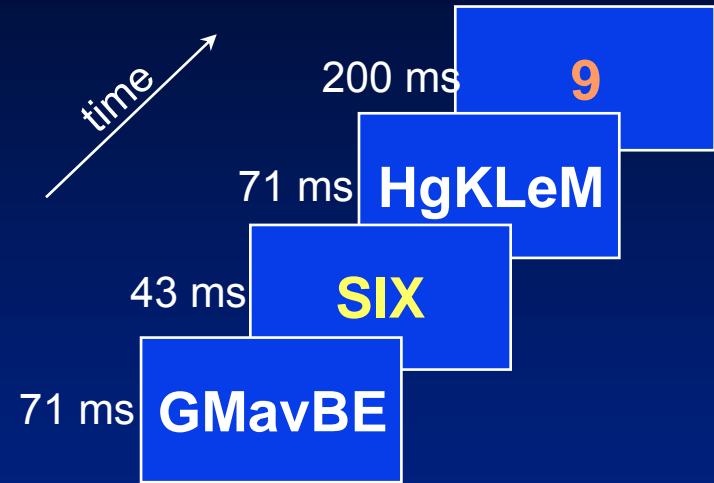
% activation



Le traitement inconscient des nombres



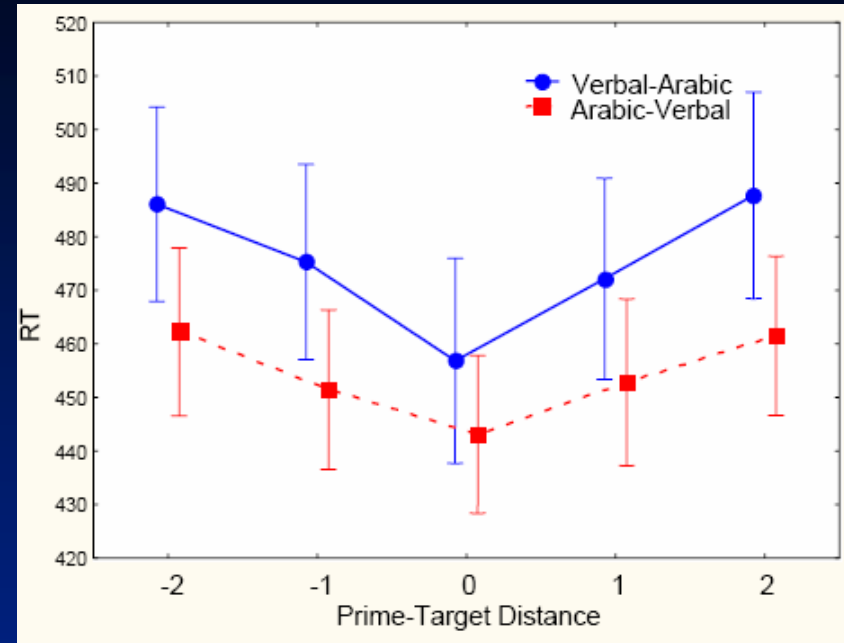
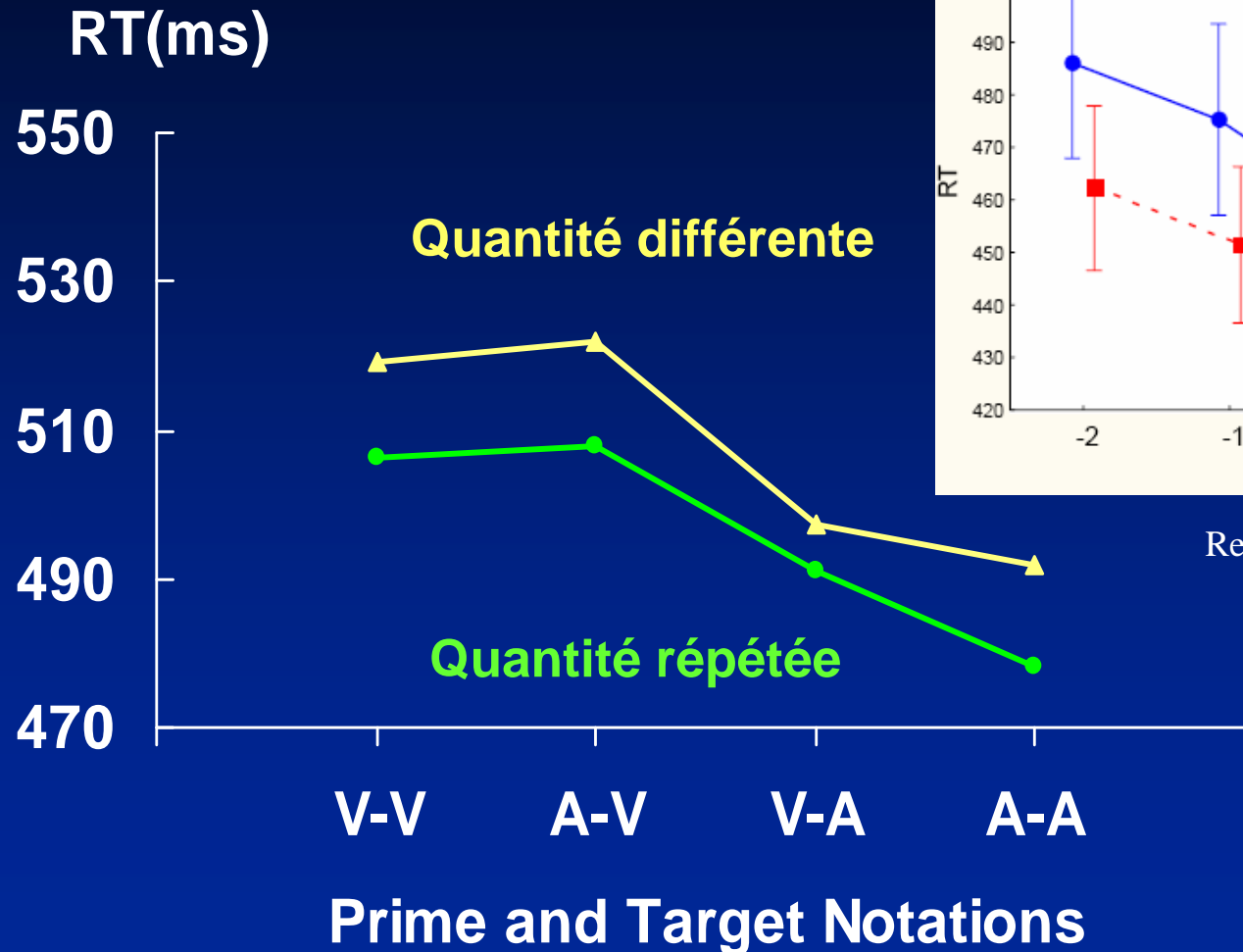
Même quantité



Deux quantités différentes

réponse de comparaison ralentie

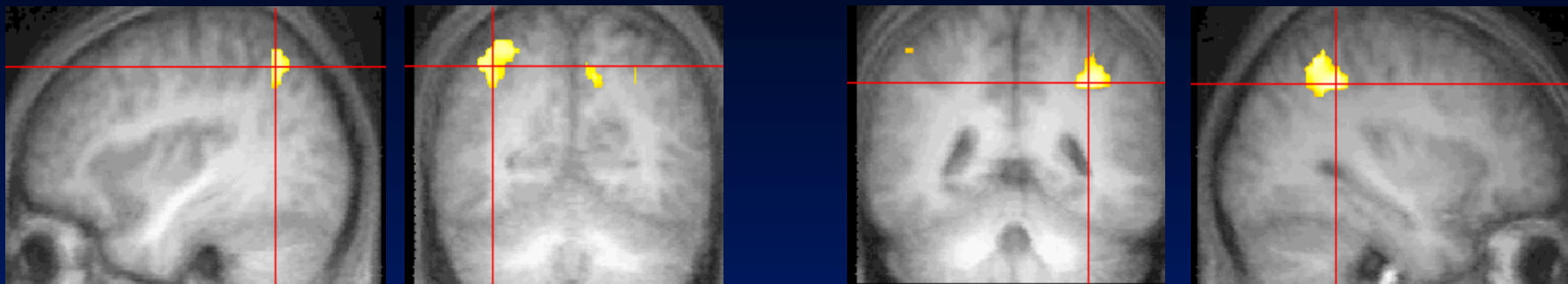
Amorçage comportemental indépendant de la notation



Reynvoet & Brysbaert (2004)

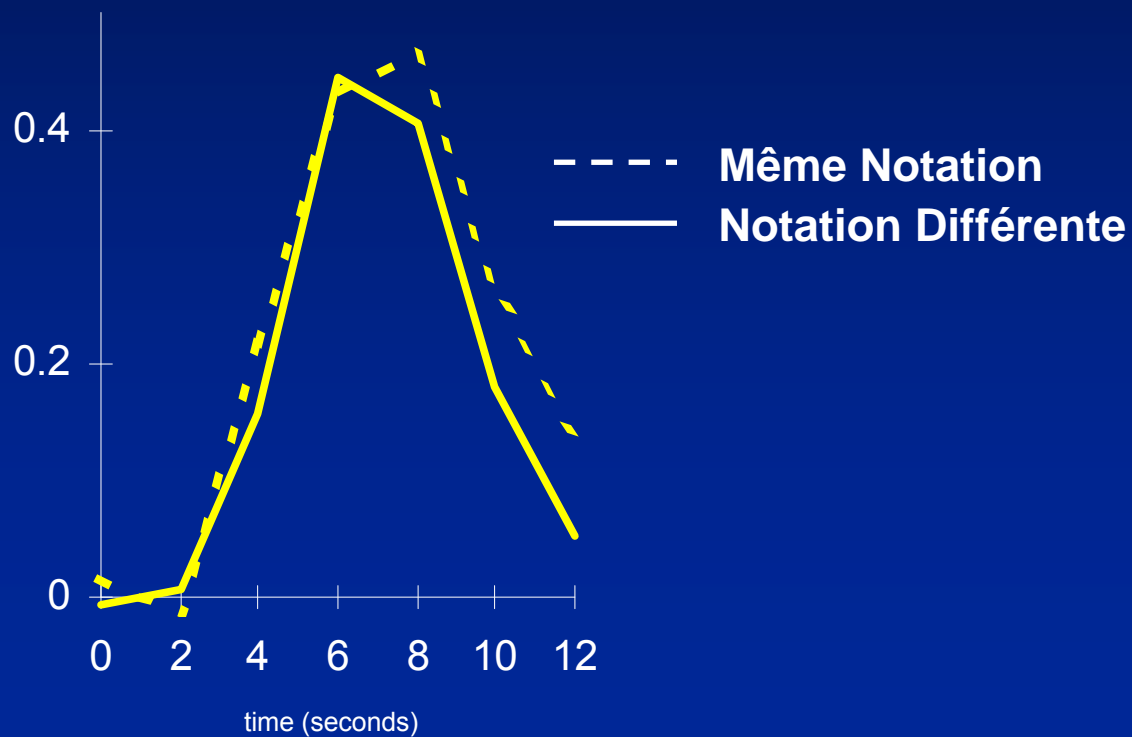
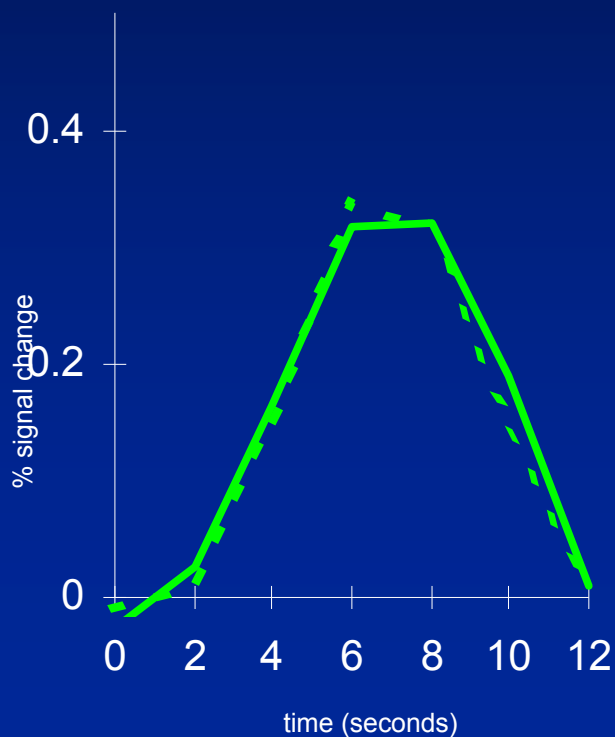
Traitement inconscient de la quantité

La région intrapariétale montre un effet d'amorçage inconscient



Même quantité

Deux quantités différentes



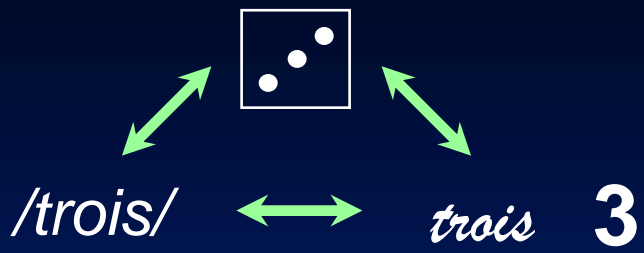
Plan du cours

- Les précurseurs de l'imagerie cérébrale du calcul
- La région intrapariétale et la représentation des quantités
 - Spécificité catégorielle
 - Effet de distance
 - Accès automatique au sens des nombres
- **Plusieurs circuits parallèles selon les opérations**
 - **Approximation et calcul exact**
 - **Automatisation du calcul**
- L'interprétation des différentes formes d'acalculie

Le modèle du "triple code"

(Dehaene & Cohen, 1995)

REPRESENTATION
des GRANDEURS

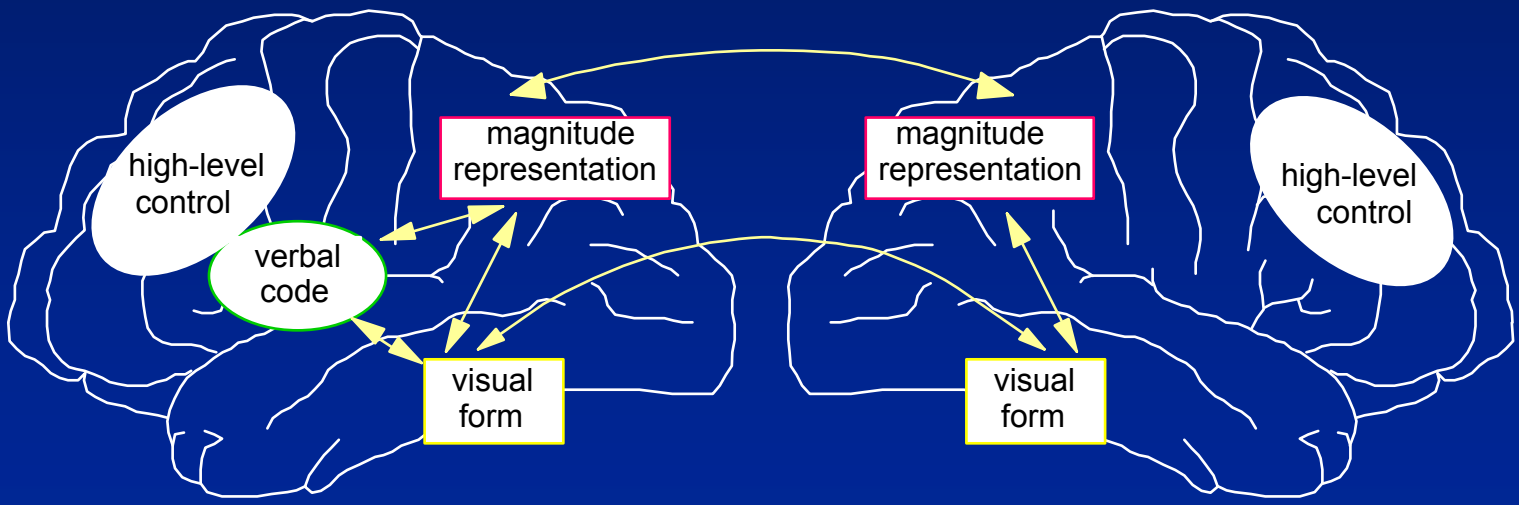


CODE VERBAL

FORME VISUELLE

Hémisphère gauche

Hémisphère droit



Dehaene, S. (1992). *Cognition*, 44, 1-42.
Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.

Liens entre calcul et langage chez les bilingues

Des sujets bilingues ont été exposés à des faits arithmétiques nouveaux dans l'une de leurs deux langues. Après apprentissage, on testait la généralisation à

- l'autre langue
- des faits voisins

• Test de calcul exact:

Combien font vingt-quatre plus trente-sept?

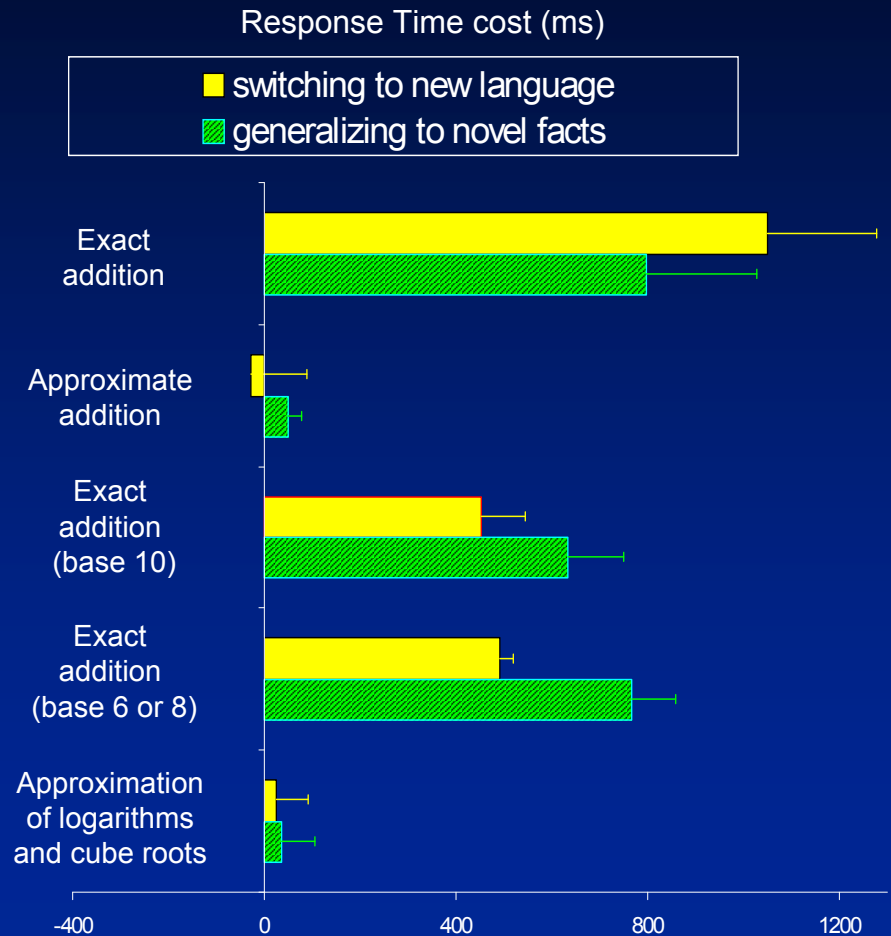
soixante-et-un ou cinquante-et-un

• Test de calcul approché:

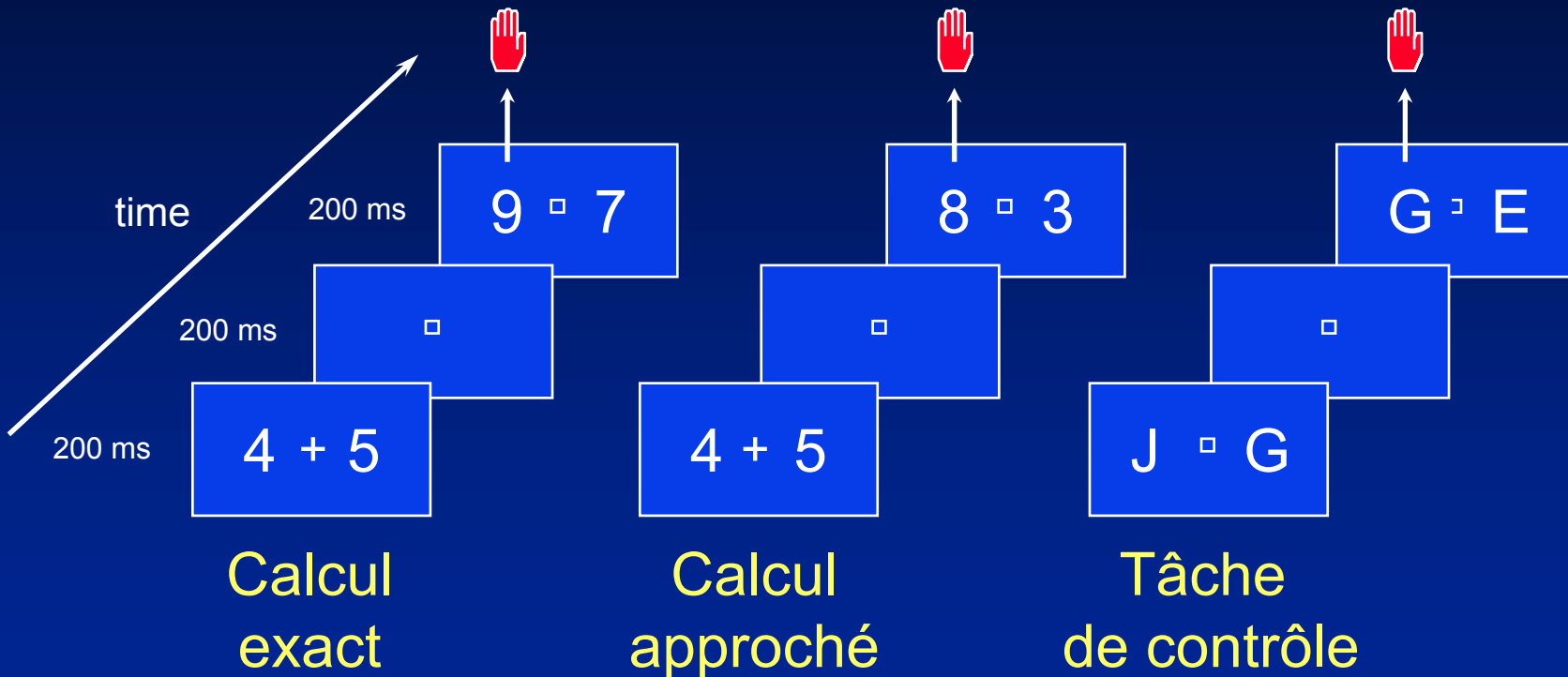
vingt-quatre plus trente-sept font environ...

soixante ou trente

Résultats



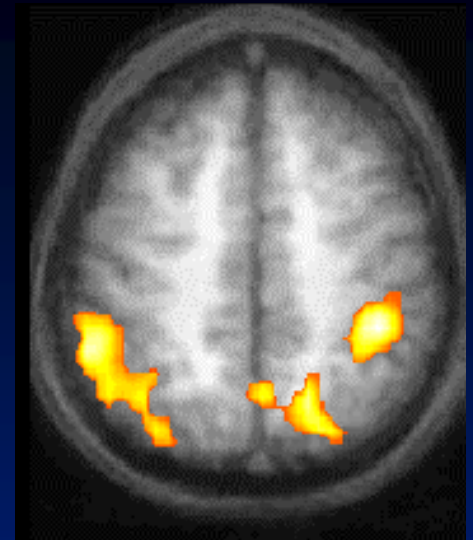
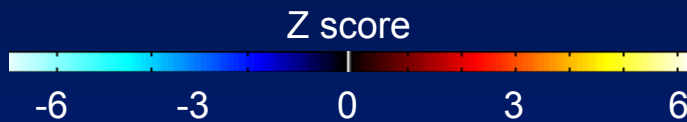
Approximation et calcul exact: Tâches utilisées pendant l'imagerie



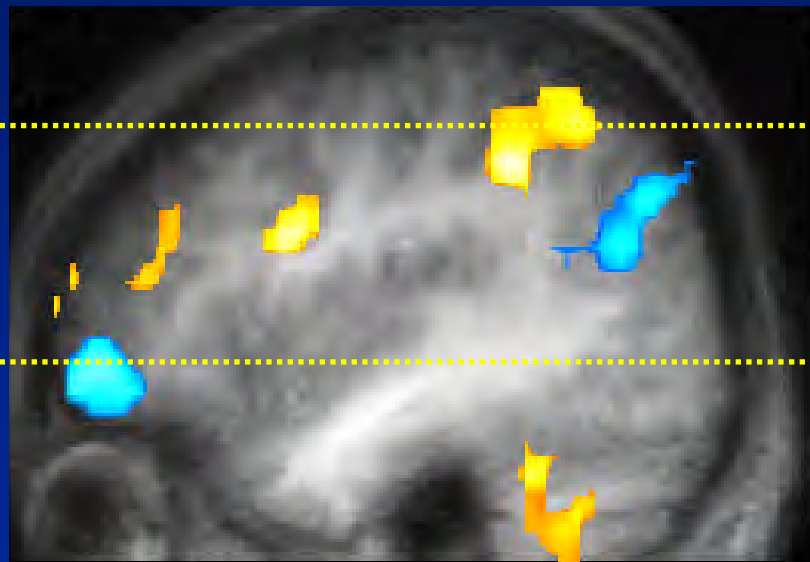
Dissociation du calcul exact et de l'approximation

Activation plus grande
pour le calcul exact

Activation plus grande
L'approximation



z=52



Hémisphère gauche (x=-44)

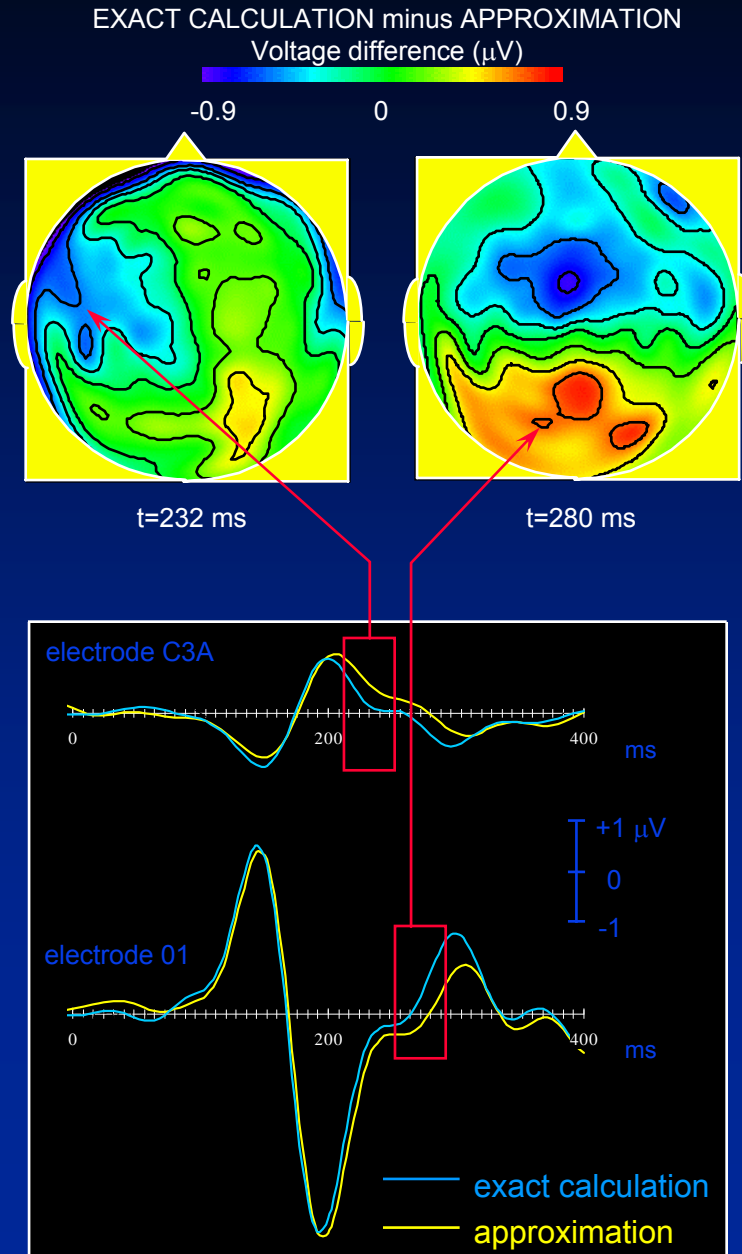
z=52

z=0

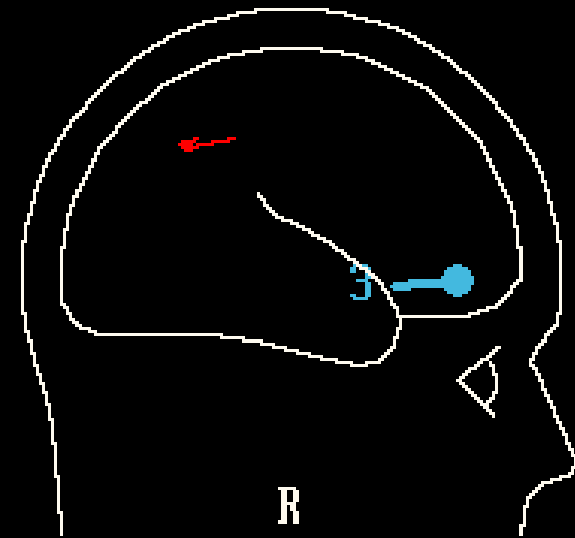
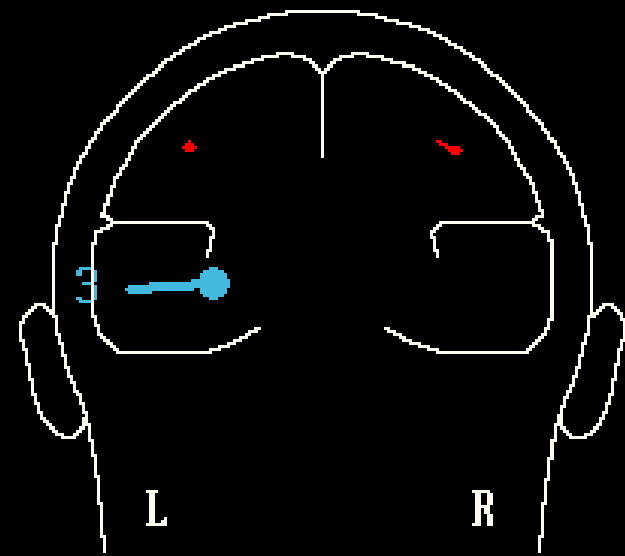
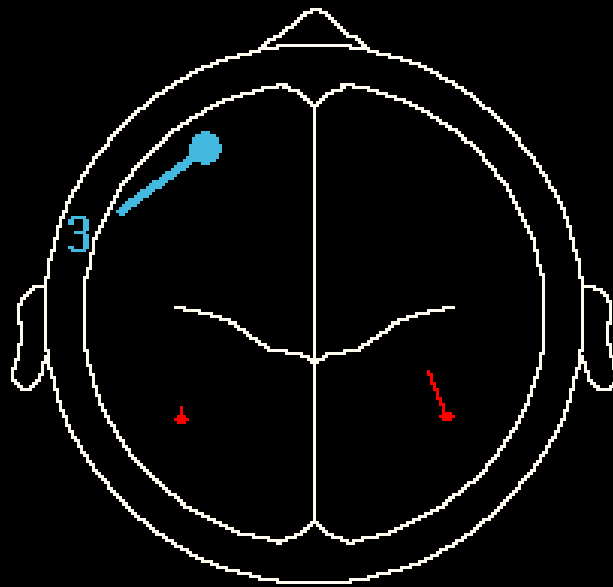
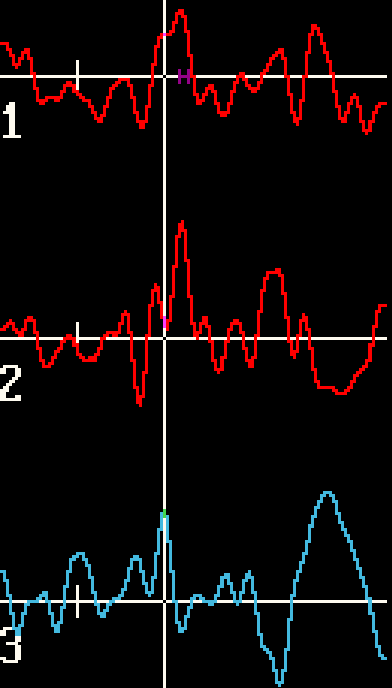


z=0

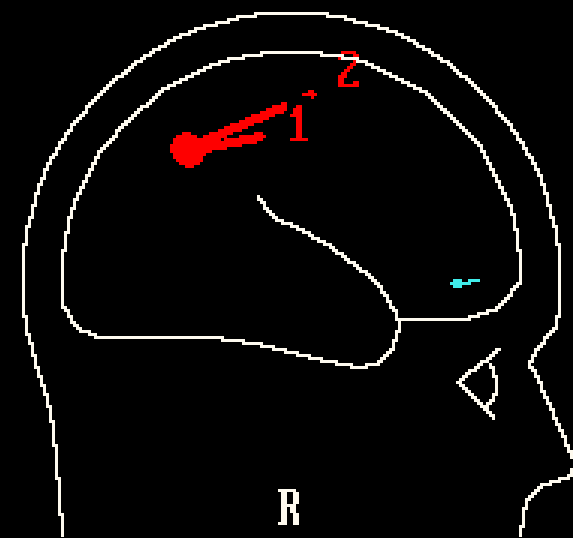
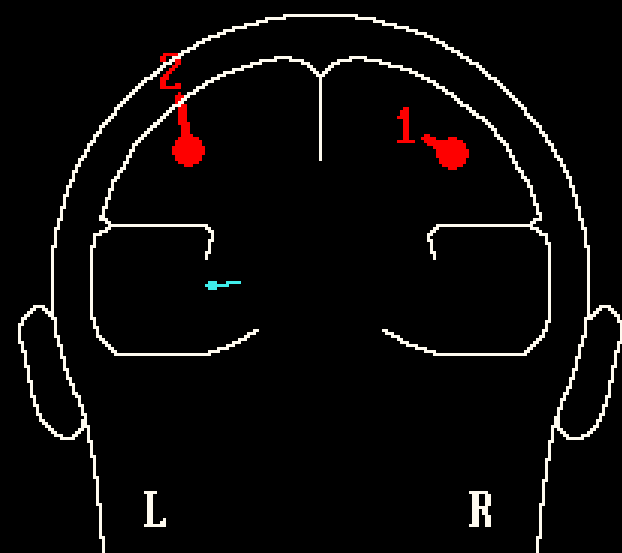
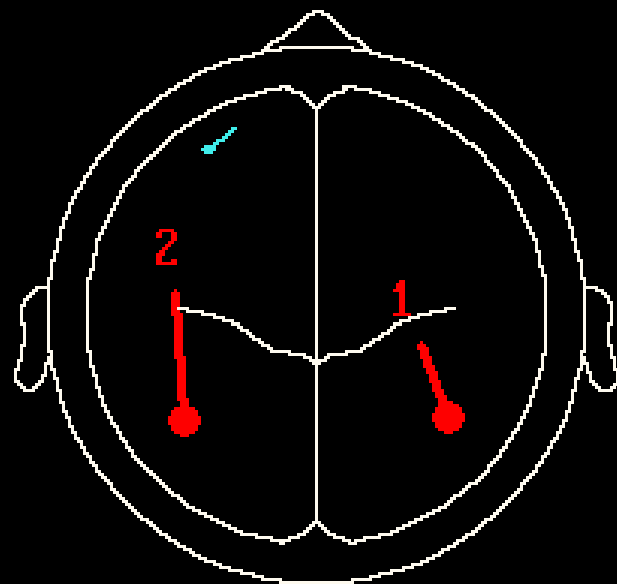
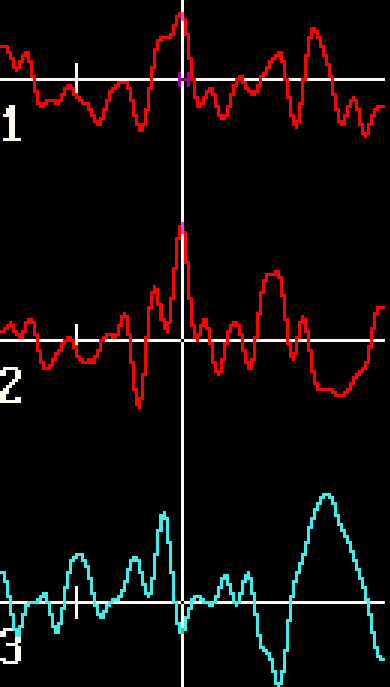
Chronométrie de la divergence entre calcul exact et approximation à l'aide des potentiels évoqués



230 ms - left inferior frontal



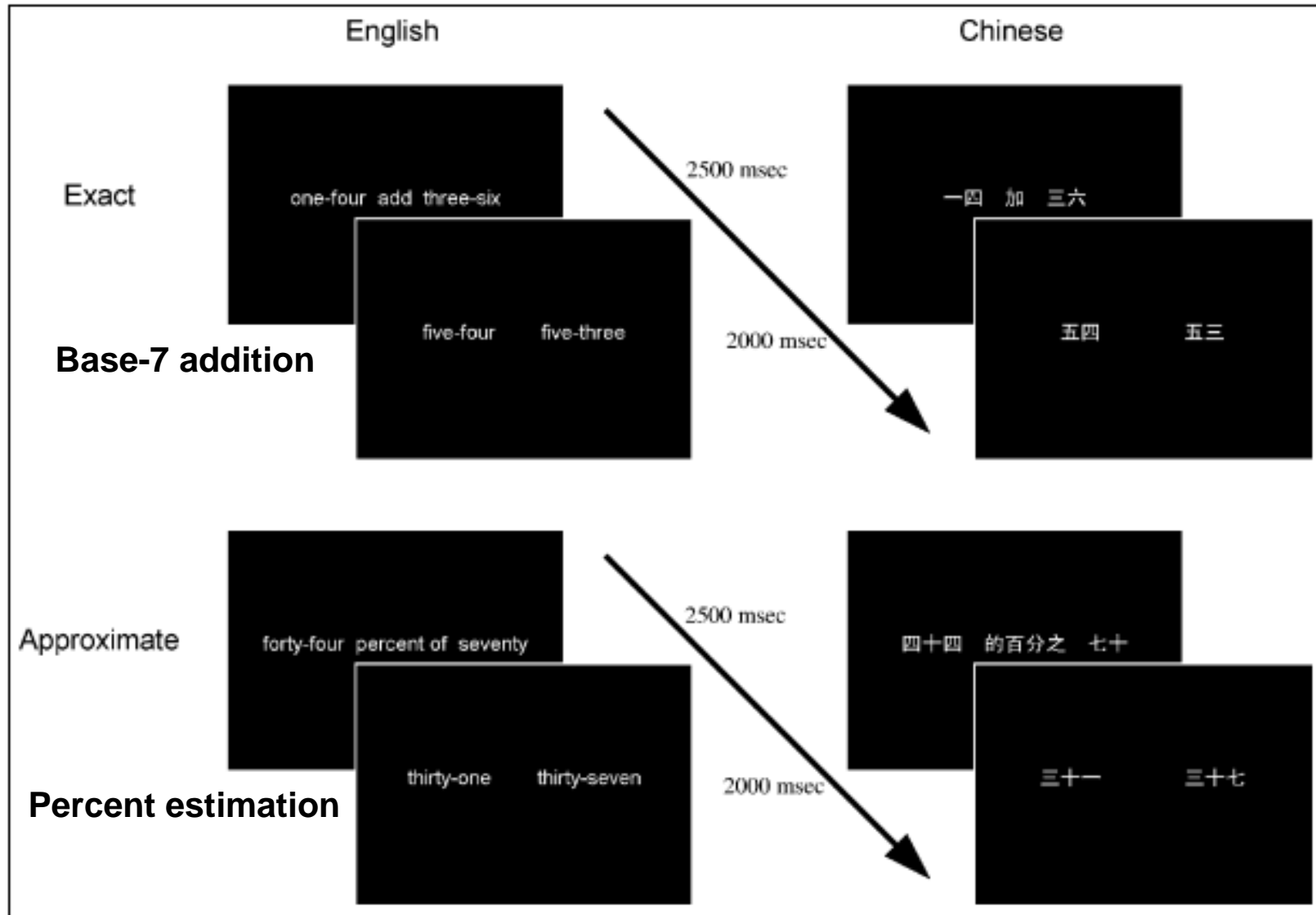
280 ms - bilateral parietal



Mesure de l'impact du changement de langue chez les bilingues

(Venkatraman et al., 2006)

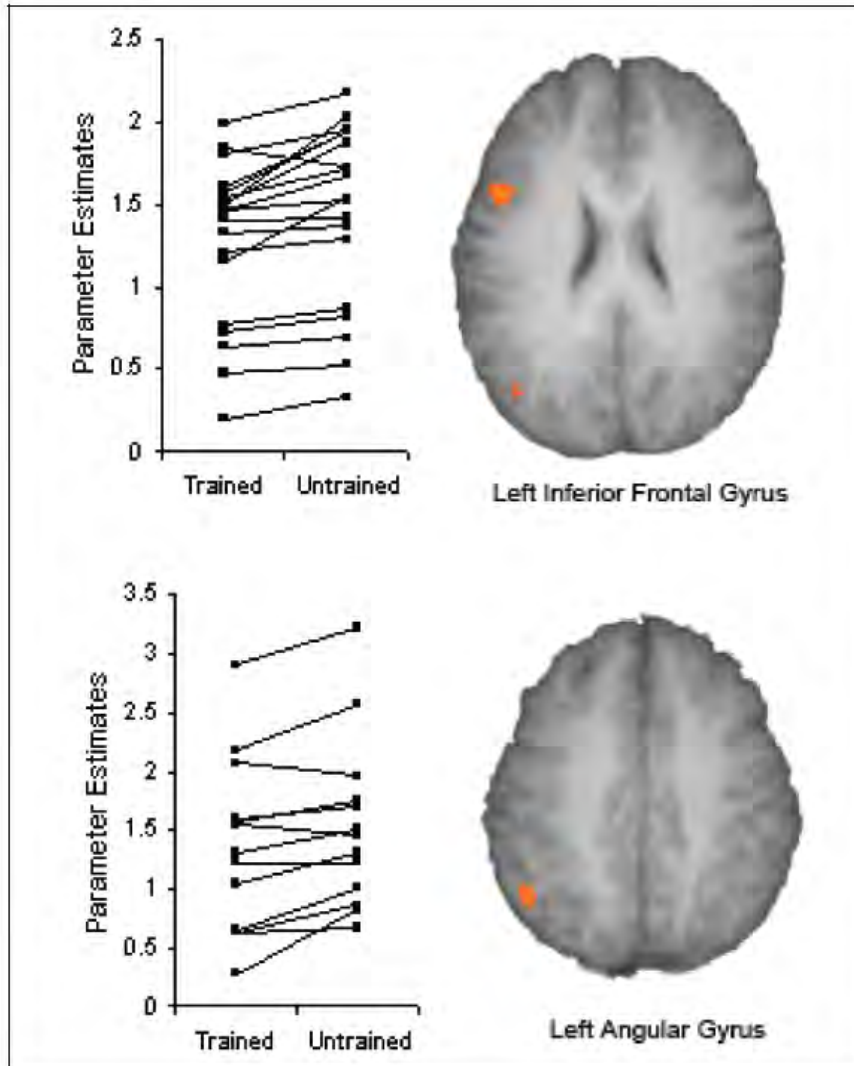
Des bilingues Anglais-Chinois ont été entraînés à des tâches d'arithmétique exacte ou approximative, puis testés dans la langue d'entraînement et dans la langue non entraînée.



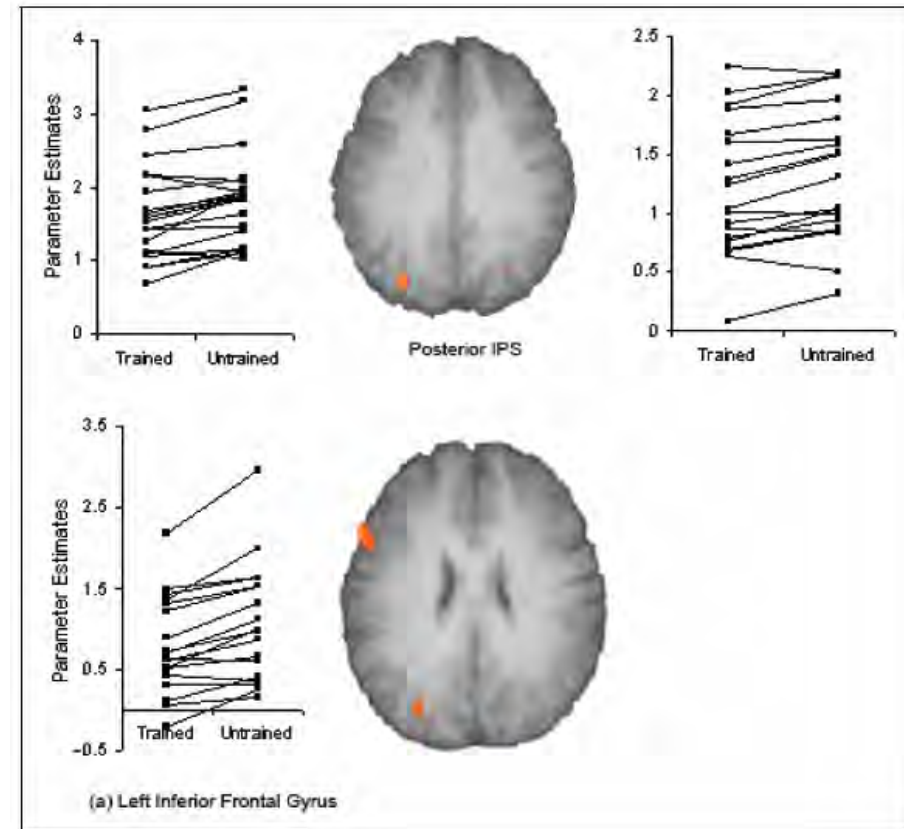
Mesure de l'impact du changement de langue chez les bilingues

(Venkatraman et al., 2006)

Un réseau latéralisé à gauche, impliquant le gyrus angulaire et la région frontale inférieure, montre un effet de changement de langue durant la tâche exacte.



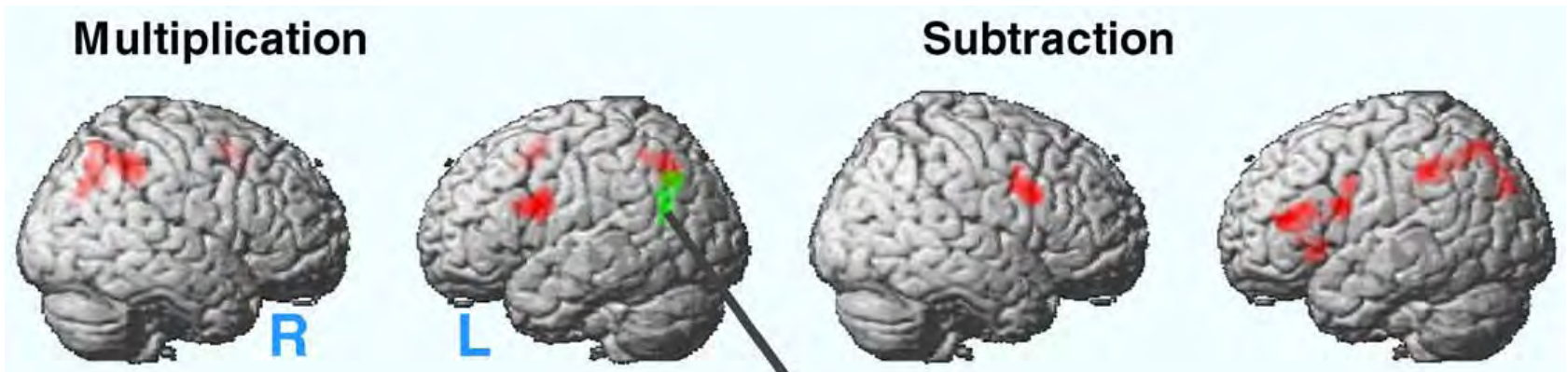
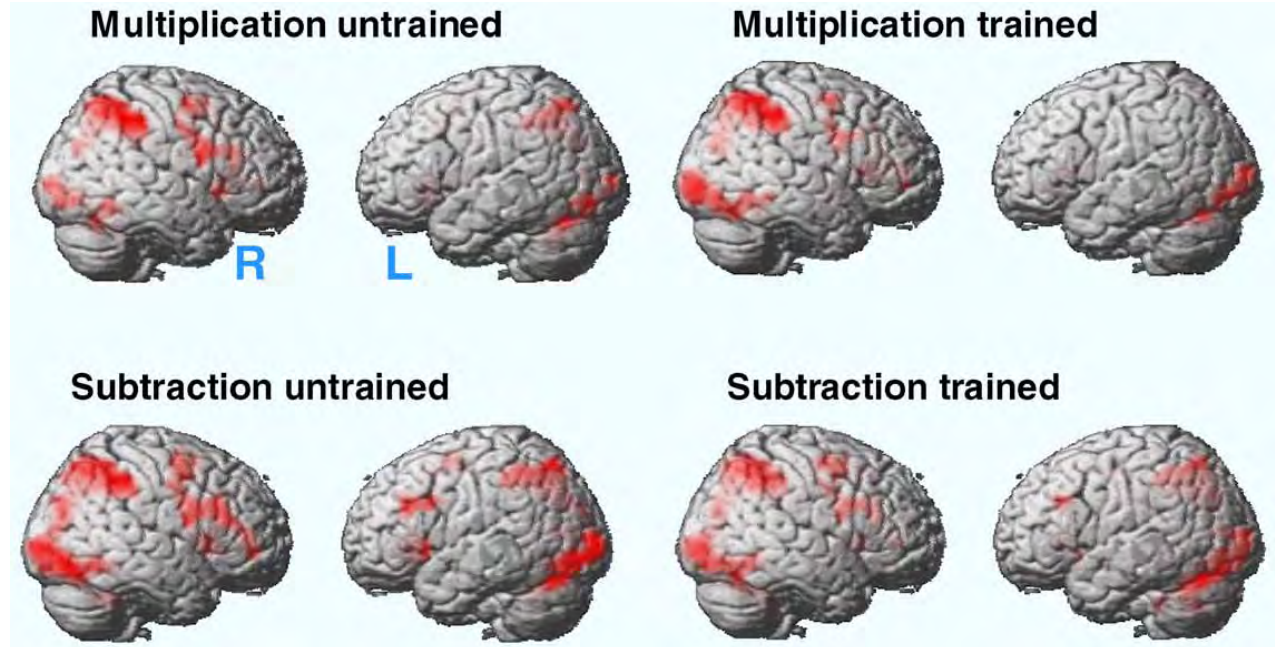
Durant la tâche approximative, pas d'effet de changement de langue dans la région hIPS, mais plus en arrière dans le sillon intrapariétal ainsi que dans la région frontale inférieure gauche.



L'entraînement aux faits arithmétiques modifie les réseaux cérébraux

(Delazer et al., 2003, 2004, 2005; Ischebeck et al, 2006, 2007)

L'entraînement suscite:
- une diminution de l'activité du réseau pariéto-frontal
- pour la multiplication mais pas pour la soustraction, un accroissement d'activité dans le gyrus angulaire gauche



L'impact de la culture sur les réseaux de l'arithmétique

(Tang et al, *PNAS* 2006)

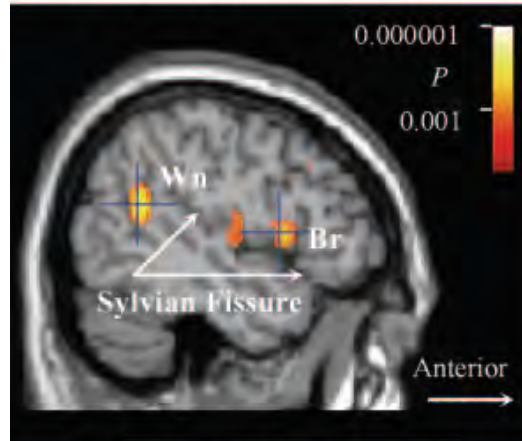
Comparaison de locuteurs Anglais et Chinois dans les mêmes tâches arithmétiques (addition, comparaison, ou jugement d'orientations de nombres et de symboles)

Les locuteurs anglais utilisent plus un réseau linguistique qui implique les régions périsylviennes de l'hémisphère gauche.

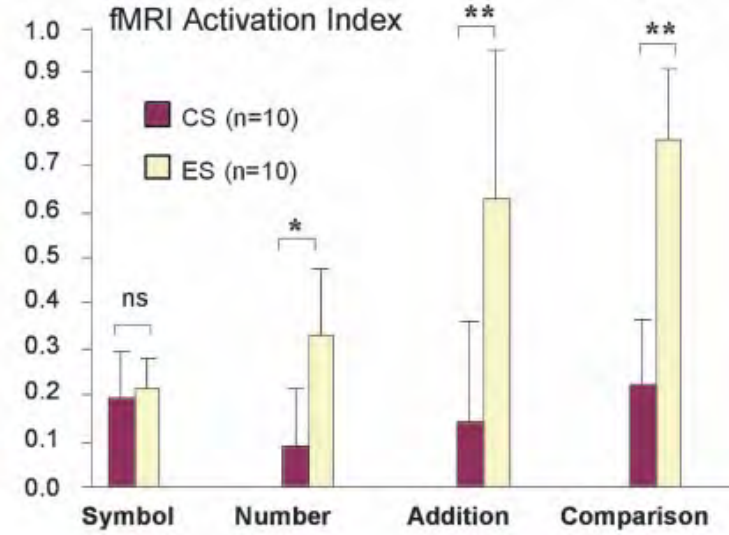
Les locuteurs chinois utilisent un réseau « associatif visuo-prémoteur »

Dans les deux groupes, le sillon intrapariétal est activé lors de la comparaison numérique

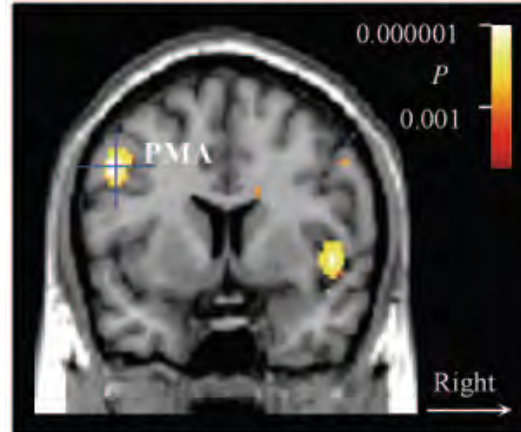
In the perisylvian language area



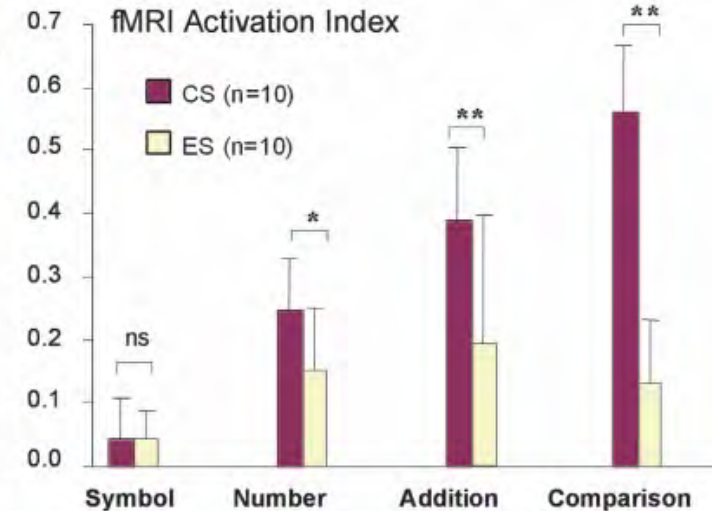
NES > NCS during Comparison



In the premotor association area



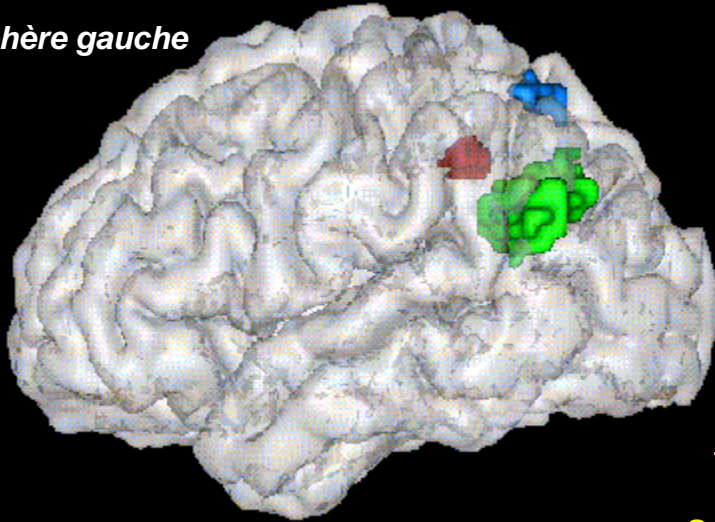
NCS > NES during Comparison



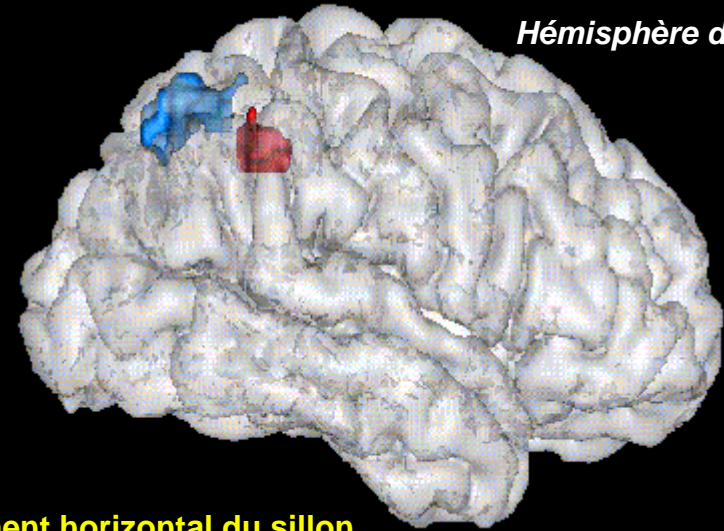
Trois régions pariétales impliquées dans l'arithmétique mentale

(Dehaene, Piazza, Pinel & Cohen 2003)

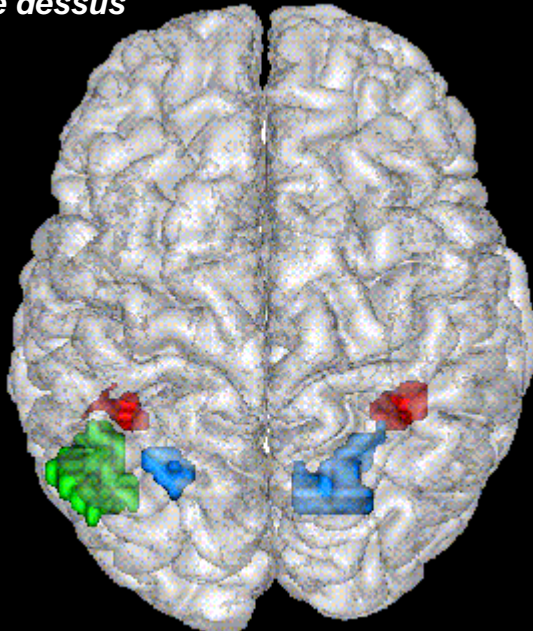
Hémisphère gauche




Hémisphère droit



Vue de dessus



 **Segment horizontal du sillon intrapariétal bilatéral (HIPS)**

- Activation dans toutes les tâches numériques
- Effets de distance, de taille, d'amorçage...
- Noyau de connaissances sur les quantités numériques?

 **Gyrus angulaire gauche (AG)**

- Calculs mémorisés et dépendants d'un codage linguistique (calcul exact, multiplication...)
- Egalement activé dans de nombreuses tâches verbales non-numériques
- Codage verbal des faits arithmétiques?

 **Région pariétale supéro-postérieure bilatérale (PSPL)**

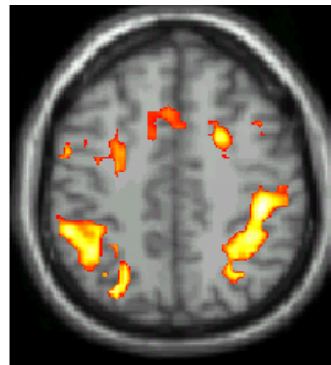
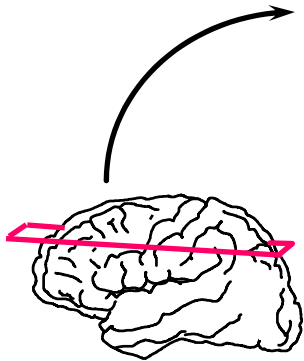
- Activation dans certaines tâches: soustraction, approximation, effet de distance
- Egalement activé lors de tâches d'attention visuo-spatiale
- Orientation de l'attention sur la "ligne numérique mentale"?

Plan du cours

- Les précurseurs de l'imagerie cérébrale du calcul
- La région intrapariétale et la représentation des quantités
 - Spécificité catégorielle
 - Effet de distance
 - Accès automatique au sens des nombres
- Plusieurs circuits parallèles selon les opérations
 - Approximation et calcul exact
 - Automatisation du calcul
- **L'interprétation des différentes formes d'acalculie**

Evidence for the involvement of the parietal lobe in calculation

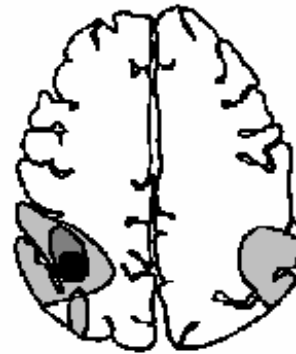
Activation during calculation



z=44

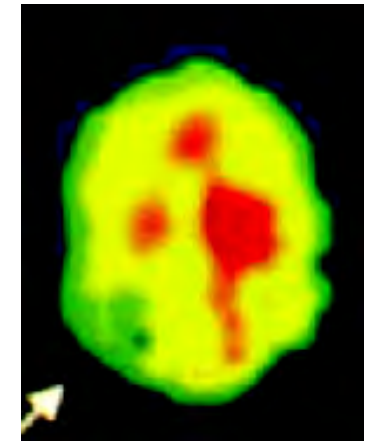
Chochon, Cohen, van de Moortele, & Dehaene (1999)
Journal of Cognitive Neuroscience
(also Roland & Friberg, 1985 [SPECT];
Appolonio et al, 1994 [fMRI]; Dehaene
et al., 1996 [PET])

Lesions in 5 acalculic patients



Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen (1998)
Trends in Neuroscience,
21, 355-361.

Metabolic abnormality in developmental dyscalculia



Levy, Reis, & Grafman (1999). *Neurology*, 53, 639-641.

Deux types d'Acalculie

Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33, 219-250.

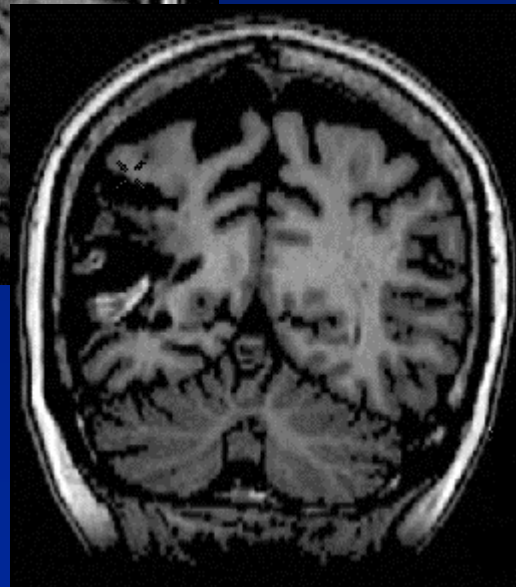
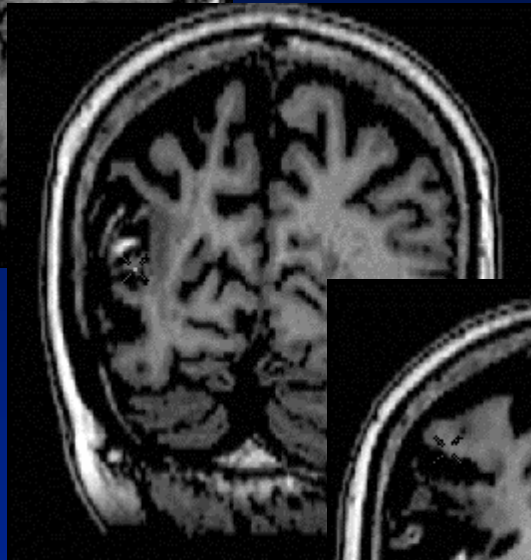
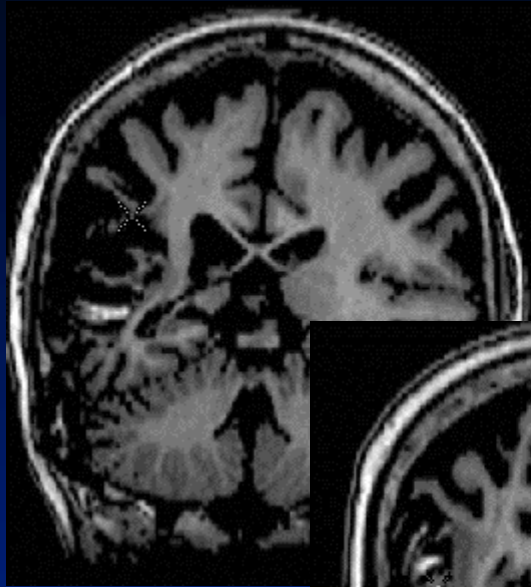
- Troubles du traitement verbal des nombres:

- non-spécificité: aphasie et acalculie
- perte des faits arithmétiques (table de multiplication)
- préservation des connaissances sémantiques

- Troubles de la représentation des quantités:

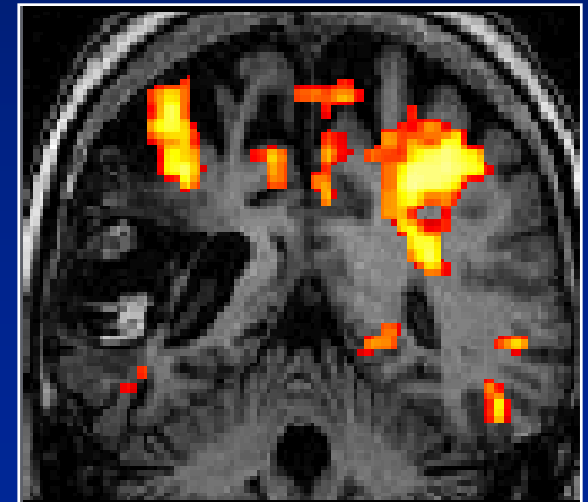
- déficit restreint aux quantités numériques
- préservation des faits arithmétiques (table de multiplication)
- déficit du calcul, mais aussi de la sémantique des nombres

Déficit lié au système verbal

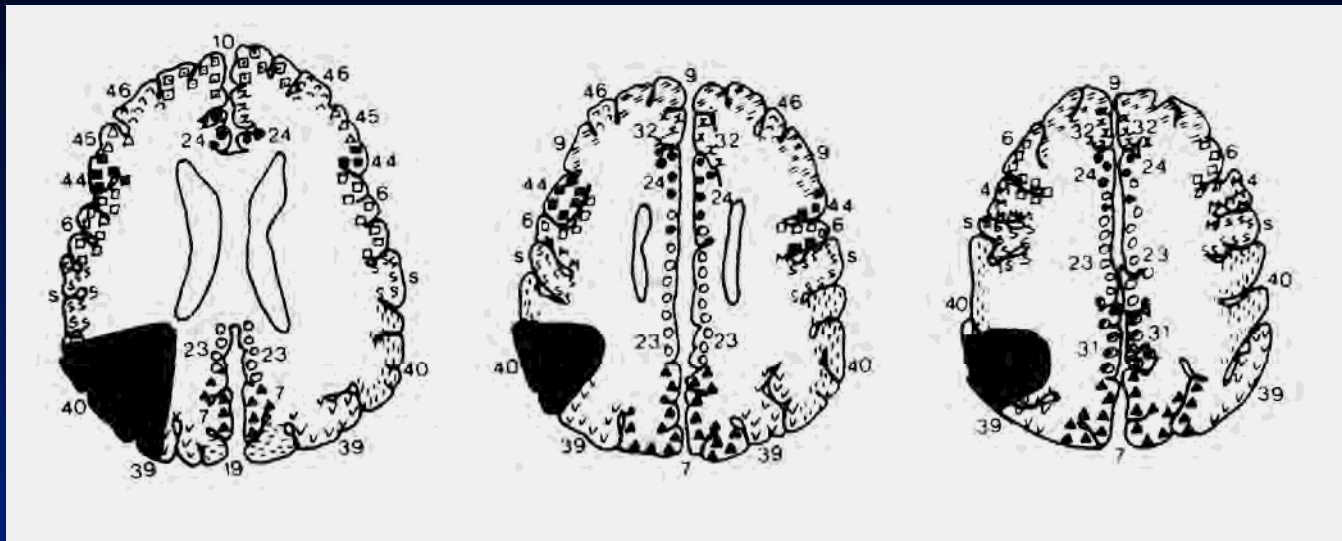


Patiente ATH:

- aphasie, dyslexie profonde
- pas de déficit de la sémantique des quantités (bisection, comparaison)
- la multiplication est plus atteinte que la soustraction



Déficit de la représentation des quantités

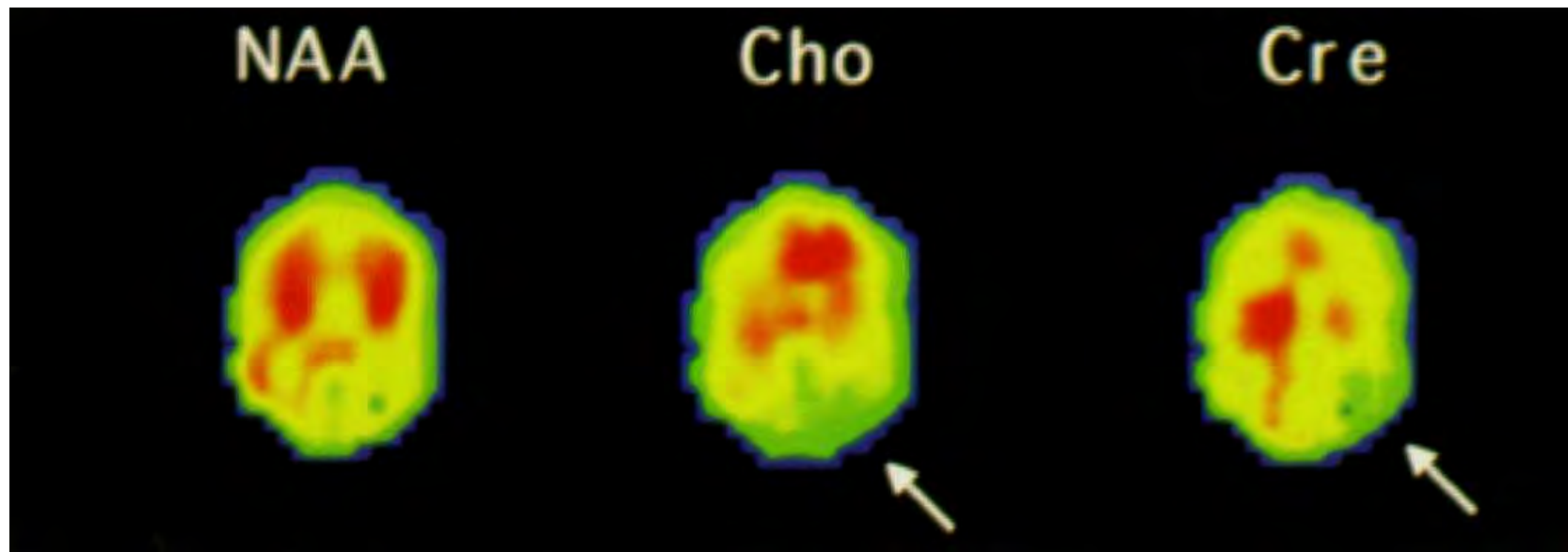
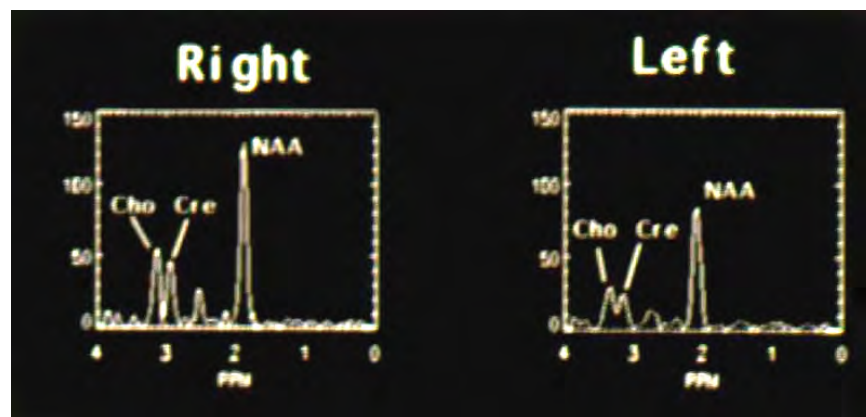
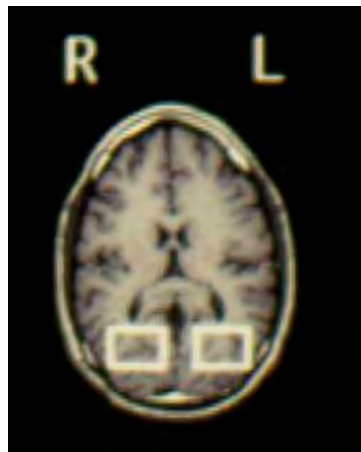
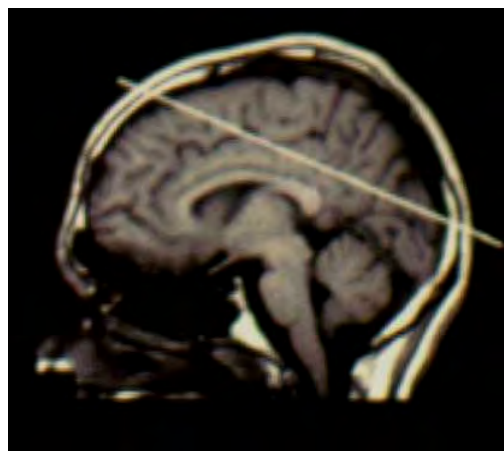


Patient MAR:

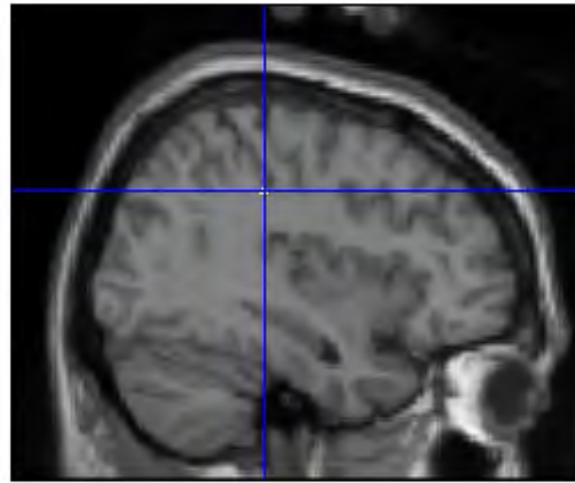
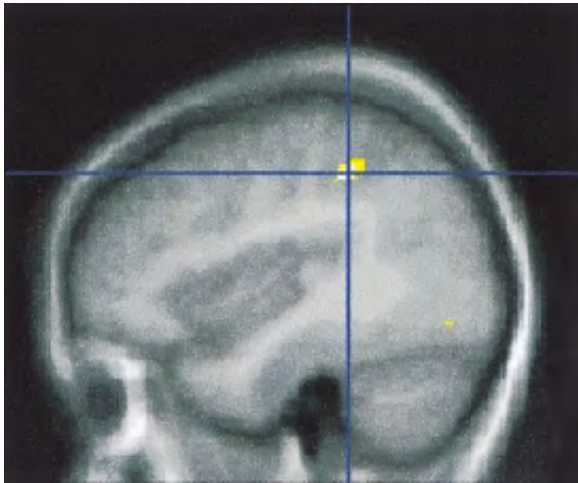
- acalculie sévère
- pas de troubles du langage
- déficit de la sémantique des nombres (bisection, comparaison)
- la soustraction est plus atteinte que la multiplication

Anomalies métaboliques dans le cortex pariétal inférieur gauche dans un cas de dyscalculie développementale

Levy, Reis and Grafman, Neurology, 1999



Certaines dyscalculies (troubles de l'arithmétique chez l'enfant) sont imputables à des anomalies des régions pariétales impliquées dans le traitement des quantités.



Réduction de matière grise dans la région pariétale gauche chez les anciens prématurés souffrant de dyscalculie
(Isaacs et al., 2001)

Anomalies de matière grise et d'activation cérébrale dans le syndrome de Turner
(monosomie 45-X), une maladie génétique fréquemment accompagnée de dyscalculie
(Molko et al., 2003)

Conclusions

- L'imagerie cérébrale démontre l'implication reproductible du sillon intrapariétal dans la représentation des nombres et l'arithmétique mentale
- D'autres circuits parallèles interviennent dans le codage des symboles numériques (mots, nombres en notation arabe), et dans la mémorisation des tables arithmétiques.
- Leur existence permet d'expliquer les nombreux cas de dissociation entre opérations numériques consécutifs à des lésions cérébrales.
- La question de la spécificité de ces circuits reste débattue. Il est probable que la région intrapariétale contienne de nombreux circuits entremêlés, dont seuls certains sont propres à l'arithmétique.
- La semaine prochaine: les neurones des nombres.