

Cécile BARBACHOUX

Cecile.barbachoux@unice.fr



UEL sciences cognitives,
apprentissage, éducation

Dates des séances

- 12 octobre
- 18 octobre
- **26 octobre: CC1 (1/2 QCM)**
- 16 novembre: DM à rendre
- 23 novembre
- **30 novembre: CC2**
- 7 décembre
- 14 décembre
- **21 décembre: examen**

Chapitres/ thématiques abordés

18h pour les chapitres suivants:

- Chapitre 1: Introduction aux sciences cognitives
- Chapitre 2: Cerveau fonctionnel
- **Chapitre 3: Apprentissage des mathématiques**
- Chapitre 4: Perception, l'exemple de la perception visuelle
- Chapitre 5: Apprentissage de la lecture
- Chapitre 6: La mémoire
- Chapitre 7: développement cérébral et apprentissage
- Chapitre 8: Enseignement et sciences cognitives

Les supports

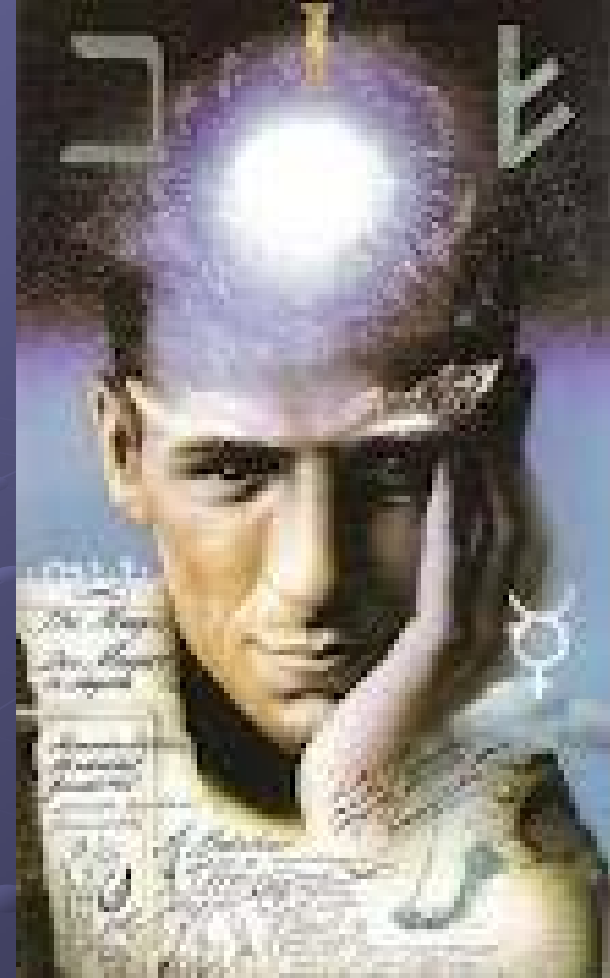
- Seront accessibles sur
<http://cst.unice.fr>

Chapitre 2: Le cerveau fonctionnel



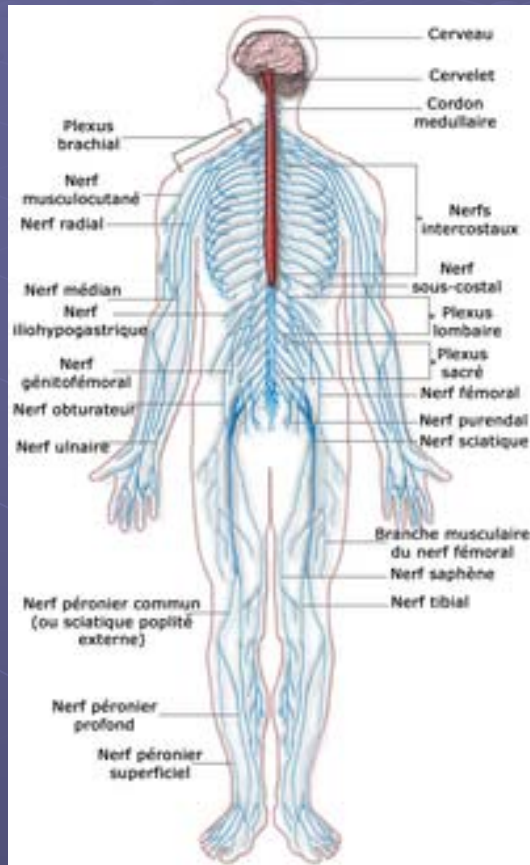
Carl Röhrig, looking for home

Le cerveau DU GLOBAL AU MICROSCOPIQUE

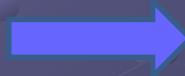


Carl Röhrig, Magician

Le système nerveux

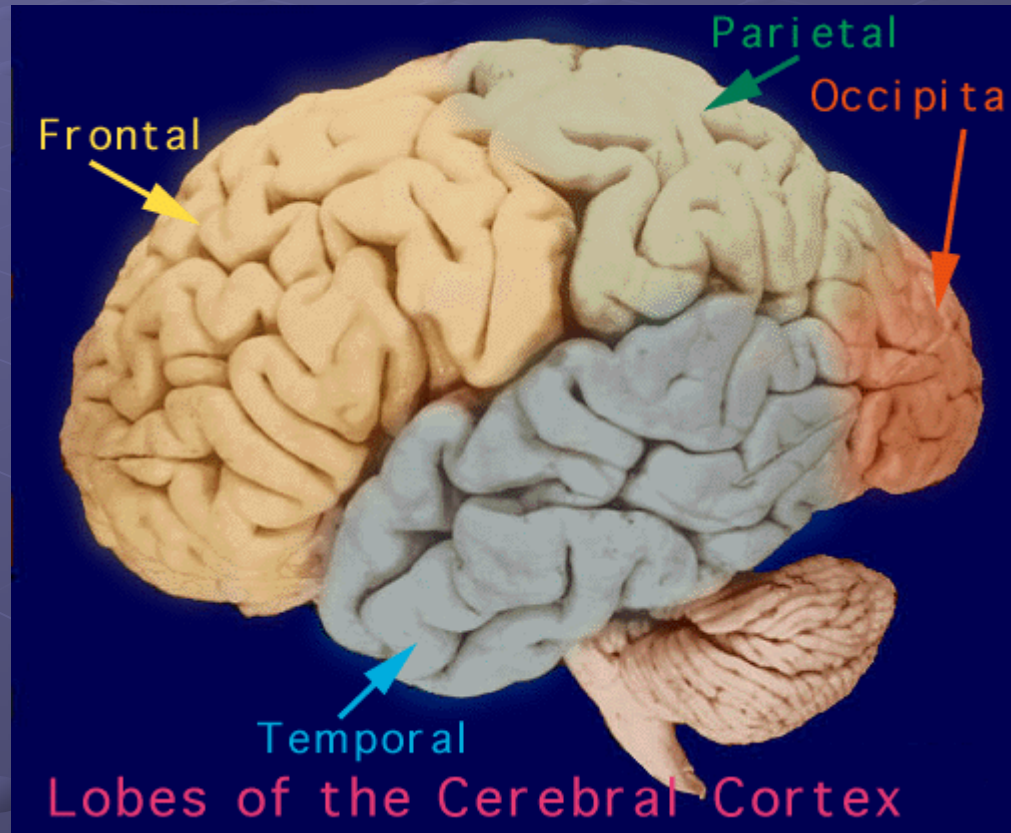


= sens, nerfs, **cerveau**,
moelle épinière, méninges



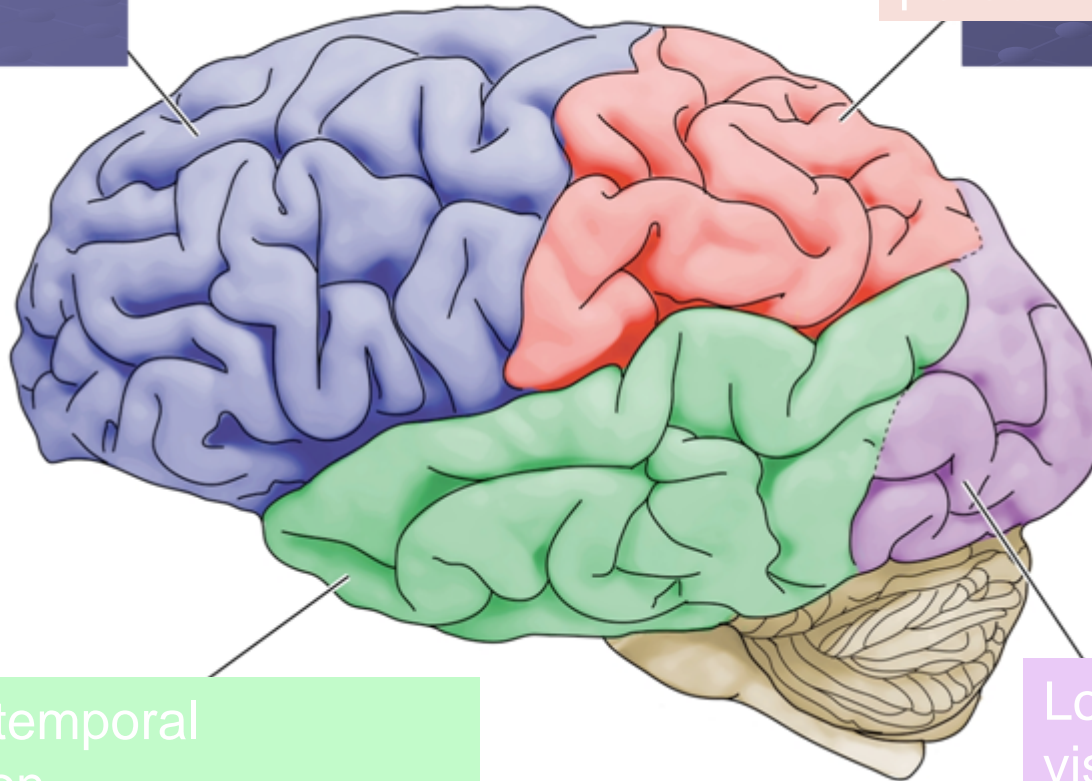
mouvements,
fonctionnmt des organes,
l'intellect, ...

Les lobes du cerveau



Lobe frontal
Planification des actions futures
+ contrôle des mouvements

Lobe pariétal
Sensibilité somatique
Image corporelle
Relation avec l'espace extra-
personnel



Lobe temporal
audition
Mémoire, apprentissage
émotion

Lobe occipital
vision

© 2001 Sinauer

Asymétrie des hémisphères: Biais de fonctionnement

Asymétries fonctionnelle et anatomique

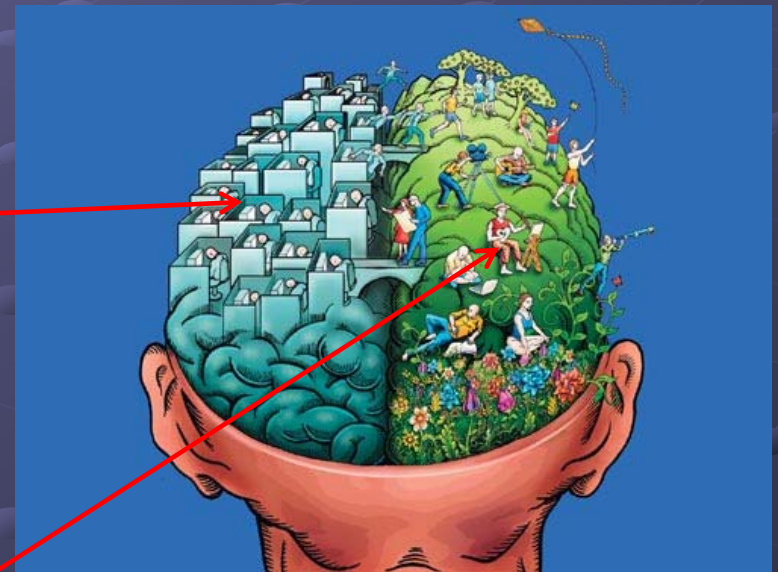
h. gauche= h. dominant:
traitement du langage, numération

Cortex auditif plus développé

Traitement local

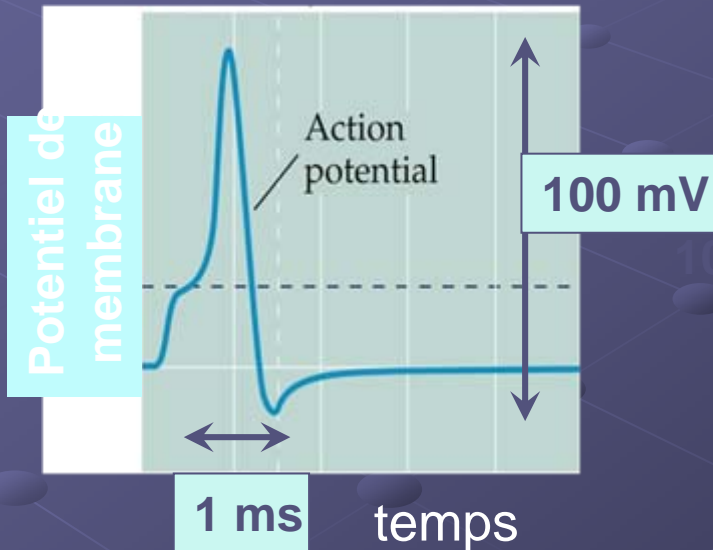
h. droit= h. non dominant:
spatialisation, perception des visages

Traitement visuo-spatial et émotions



Le neurone : unité fonctionnelle de base du Système Neuronal

PA véhiculent l'information
Stéréotypés (p ex tous les stimuli sensoriels)
Nature de l'information dépend de la nature du circuit

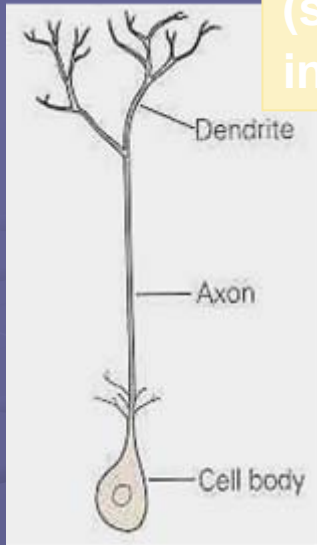


Segment initial

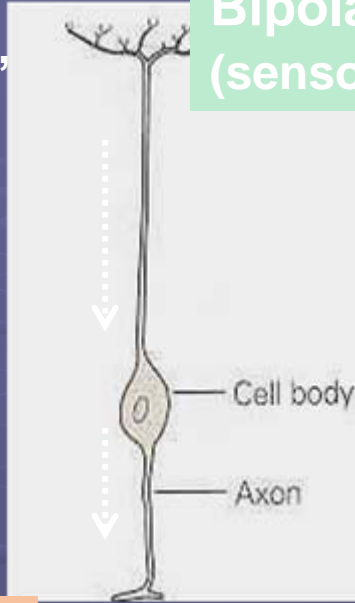
L'axone

0,1 mm à 1 m

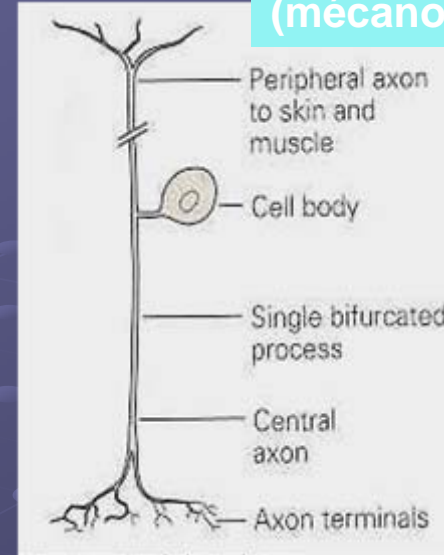
Unipolaire
(s. autonome,
invertébrés)



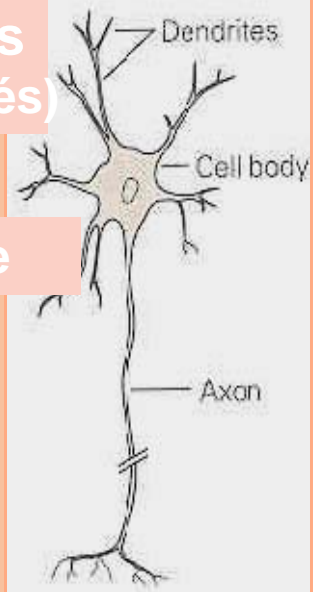
Bipolaires
(sensoriels)



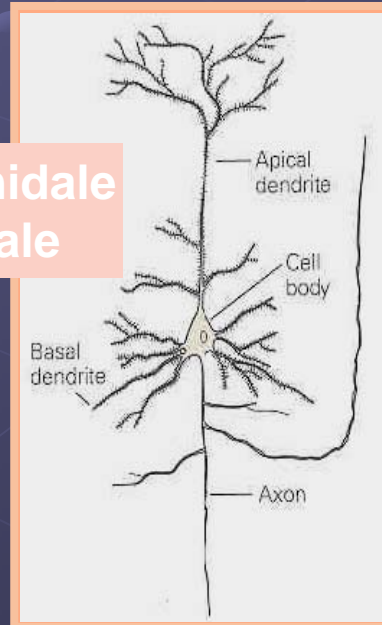
Pseudo-unipolaire
(mécanorécepteurs)



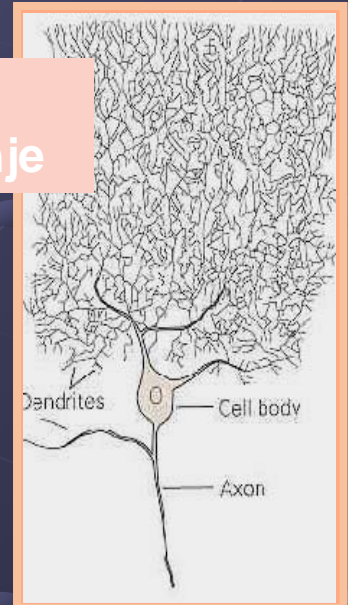
Multipolaires
(SNC vertébrés)



c. Pyramidale
corticale



c. Purkinje



Motoneurone

4 caractéristiques fondamentales du système nerveux lui permettent de produire des « comportements » :

- Les mécanismes par lesquels les neurones produisent des signaux: excitabilité du neurone
- L'agencement (**pattern**) des connexions entre les neurones.
- Les relations entre différents patterns d'interconnexions et différents types de comportements.
- La façon dont les neurones et leurs connexions sont modifiés par l'expérience.

Les neurones sont organisés en circuits responsables de comportements spécifiques.

Tous les comportements sont exécutés par des circuits de neurones interconnectés

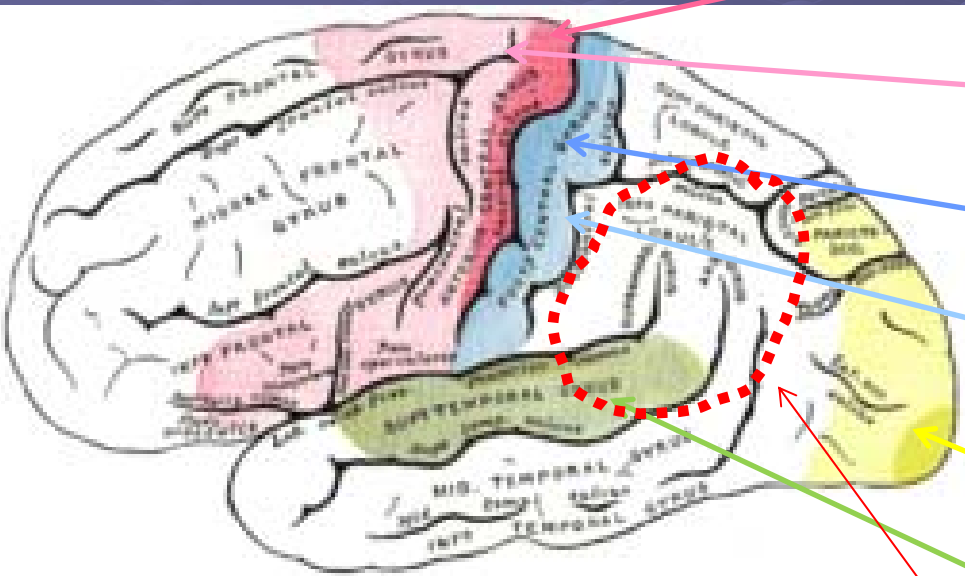
Comportement :

- traitement de l'information sensorielle
- programmation des réponses motrices ou émotionnelles
- mémorisation d'information
- etc ...

A 3D grid of spheres on a dark blue background. The spheres are arranged in a perspective view, receding into the distance. The text is centered in the lower half of the image.

**En résumé: les différentes aires
fonctionnelles du cerveau**

Localisation des aires fonctionnelles élémentaires



Aire motrice primaire (I. frontal)

Aire motrice supplémentaire préfrontale

Aire somatosensorielle primaire (I. pariétal)

Aire d'association sensorielle (I. pariétal)

Aire visuelle primaire (I. occipital)

Aire auditive primaire (I. temporal)

Aires d'association



Quelques exemples

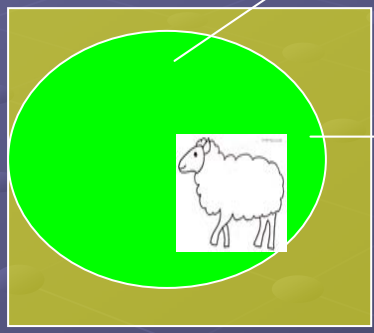
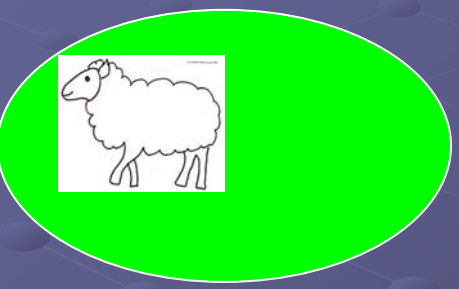
Exemple de modules cognitifs esprit

Monde réel

transducteur

Système périphérique

Système central



coordonnées



J'ai faim
et
il y a de la
viande en
x,y,z
> action



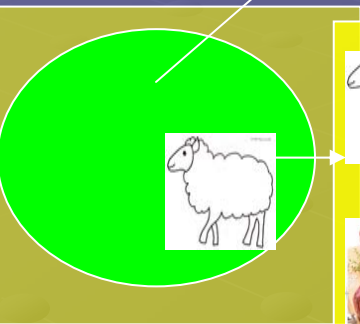
J'ai faim

transducteur

Système périphérique

Système central

coordonnées



viande



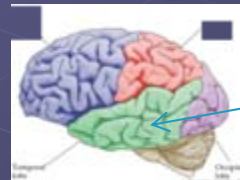
J'ai faim



Spatialisation:
lobe pariétal



Visuel p.et s.,
aired'association
lobe occipital



reconnaissance,
lobe temporal



Système limbique

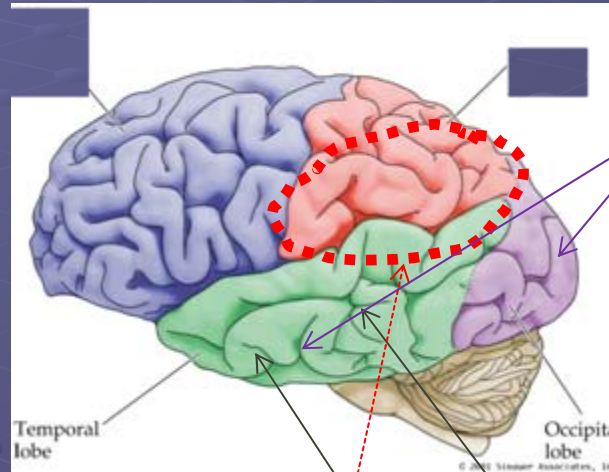


mouvement



Lobe frontal,
aire motrice

Exemple d'activation du cerveau



Aire visuelle: Primaire (lignes)
Secondaire (objet immobile)

Zone d'intégration visuelle:
(chat assis): lobe temporal

En parallèle

Aire auditive: Primaire (fréquences)
Secondaire (son, timbre, tessiture)

Zone d'intégration auditive
(miaulement): lobe temporal

Aire d'association pariétale:
(un chat qui miaule)

Apprentissage des mathématiques

Chapitre 3 – UEL sciences cognitives, apprentissage, éducation

supports

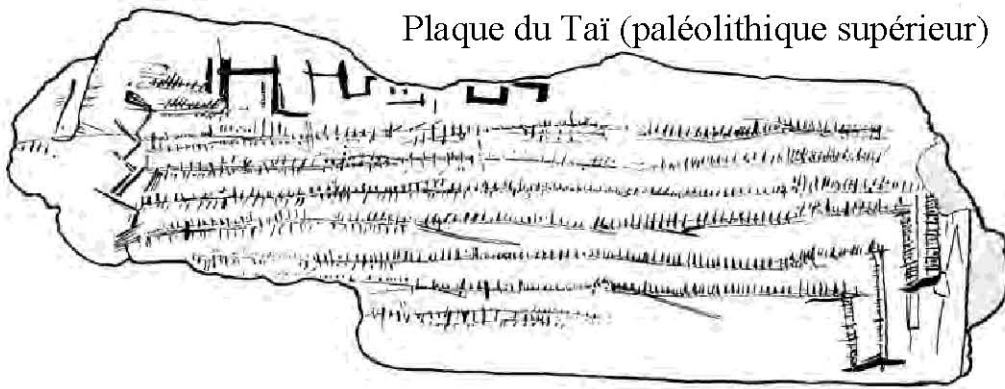
- « Les Fondements cognitifs de l'arithmétique élémentaire » Stanislas Dehaene, Chaire de psychologie cognitive, Collège de France, 2008
- Apprentissages et enseignement, Dunod, 2006

Les multiples facettes du concept de nombre

Le sens du nombre est-il propre à l'espèce humaine?

- <http://www.youtube.com/watch?v=VCy7M6ueSpE&feature=related>
- Le chimpanzé Ai de T. Matsuzawa

Plaque du Taï (paléolithique supérieur)



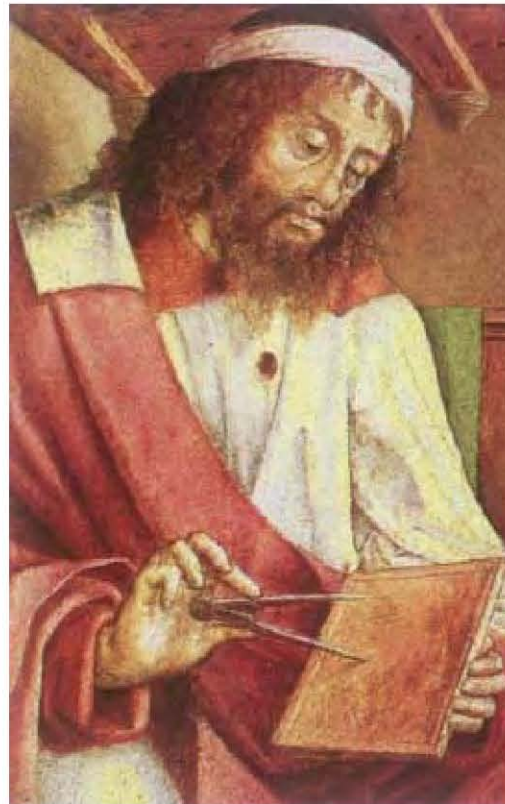
D'où proviennent le sens du nombre et les concepts mathématiques?



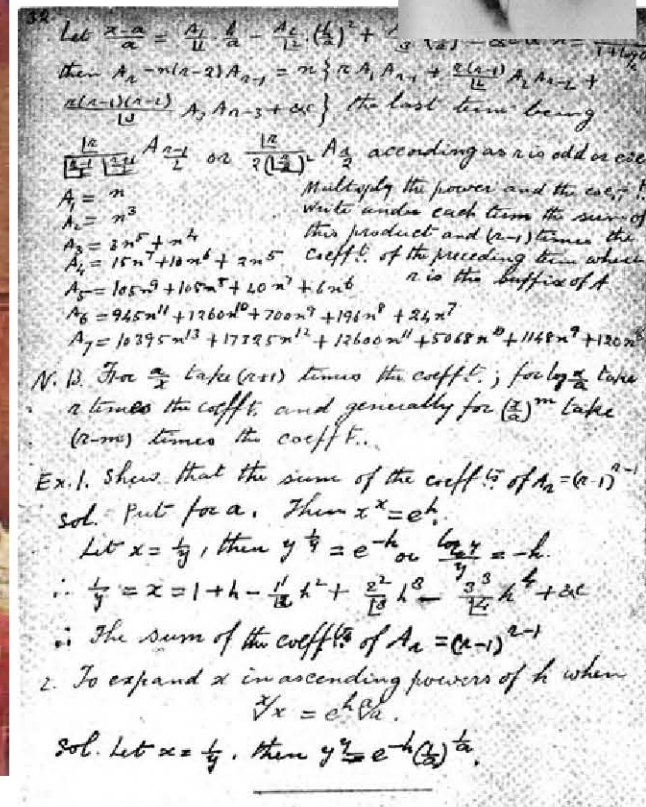
Papyrus Rhind



Elements d'Euclide



Carnets de Ramanujan



Le raisonnement mathématique chez l'homme?

- D'où vient-il?
- Peut-il être affilié au sens du nombre chez l'animal?

En débat: l'origine des concepts mathématiques

- **Un accès direct au monde Platonicien des Idées?** (Connes) “Lorsqu'il se déplace dans la géographie des mathématiques, le- mathématicien perçoit peu à peu les contours et la structure incroyablement riche du monde mathématique. Il développe progressivement une sensibilité à la notion de simplicité qui lui donne accès à de nouvelles régions du paysage mathématique.” (également Kepler et la plupart des mathématiciens)
- **Une construction logique?** (Piaget): “Le nombre entier peut ainsi être conçu comme une synthèse de la classe et de la relation asymétrique (ordre)” (également Russell)
- **Une pure manipulation de symboles linguistiques?** (Vygotsky): “Thought is not merely expressed in words; it comes into existence through them”. “The speech structures mastered by the child become the basic structures of his thinking.” (également Wittgenstein, Hilbert)
- **Un sens inné?** (Roger Bacon, ~1219-1294): “The knowledge of mathematical things is almost innate in us... This is the easiest of sciences, a fact which is obvious in that no one's brain rejects it; for laymen and people who are utterly illiterate know how to count and reckon.”
- **Des intuitions profondes inscrites dans nos structures cérébrales?** (Davis & Hersh): “In the realm of ideas, of mental objects, those ideas whose properties are reproducible are called mathematical objects, and the study of mental objects with reproducible properties is called mathematics. Intuition is the faculty by which we can consider or examine these (internal mental) objects.” (également Kant, Poincaré, Changeux...)

A 3D grid of spheres on a blue background. The spheres are arranged in a regular, repeating pattern that recedes into the distance, creating a sense of depth. The spheres are light blue and connected by thin, light blue lines. The background is a solid, darker blue color.

LE NOMBRE

Le vocabulaire de la psychologie du nombre

- Le mot « nombre » recouvre des nombreuses acceptions:
 - Le **concept** de nombre
 - La **propriété** de nombre: le **cardinal** d'un ensemble, la **quantité numérique**
 - terme technique: la **numérosité**
 - Implique l'**individuation** des éléments et la représentation d'un **ensemble**
 - Les **symboles** numériques ou **noms de nombres**:
 - Notation verbale:
 - numéral (*un, deux, trois...*)
 - ordinal (*premier, second, troisième...*)
 - Notation positionnelle: nombre arabe ou indo-arabe (*1, 2, 3... 20, 50, 813*), lui-même formé de **chiffres** arabes (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9)
 - Tout objet susceptible d'être manipulé selon certaines **opérations**
 - En mathématiques: entiers naturels, entiers relatifs, fractions, nombres réels, nombres complexes, quaternions, matrices...
 - En psychologie:
 - Échelle arbitraire: les numéros (*le bus numéro 62*)
 - Échelle ordinale: les adresses (*j'habite au numéro 62*)
 - Échelle additive (*il fait 20°... 10° de plus qu'hier... mais pas « deux fois plus chaud »*)
 - Échelle multiplicative, dotée d'un « vrai zéro » (*le bus fait 20 mètres de long*)

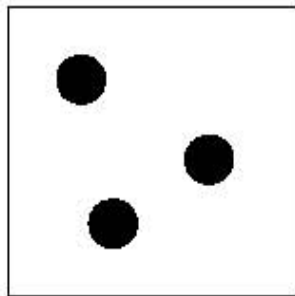
A 3D grid of spheres on a blue background. The spheres are arranged in a regular pattern, receding into the distance, creating a perspective effect. The background is a solid, dark blue color.

LES TROIS PROCESSUS DE PERCEPTION DU NOMBRE

La perception du nombre:

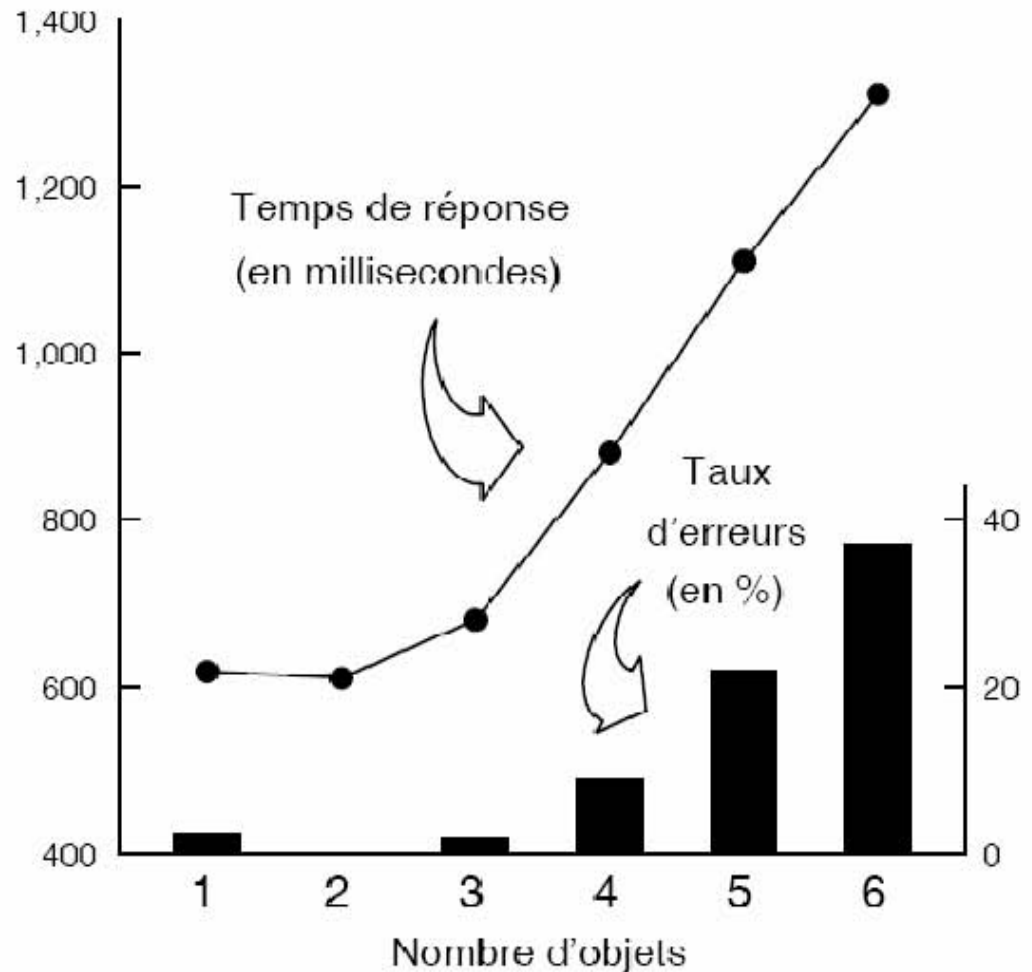
1. la « subitisation » (*subitizing*)

Combien d'objets?



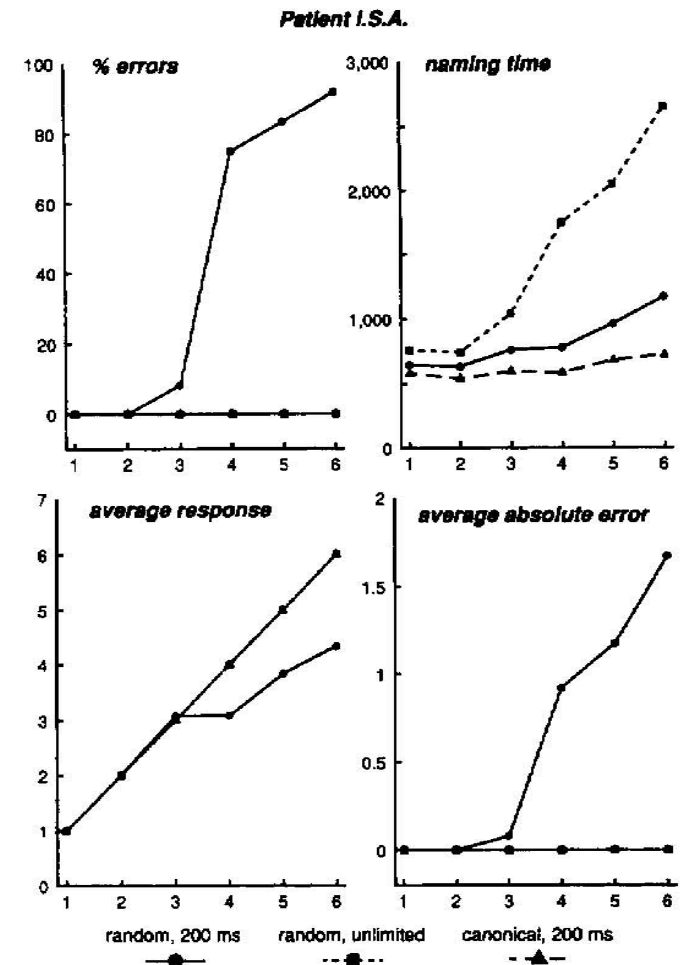
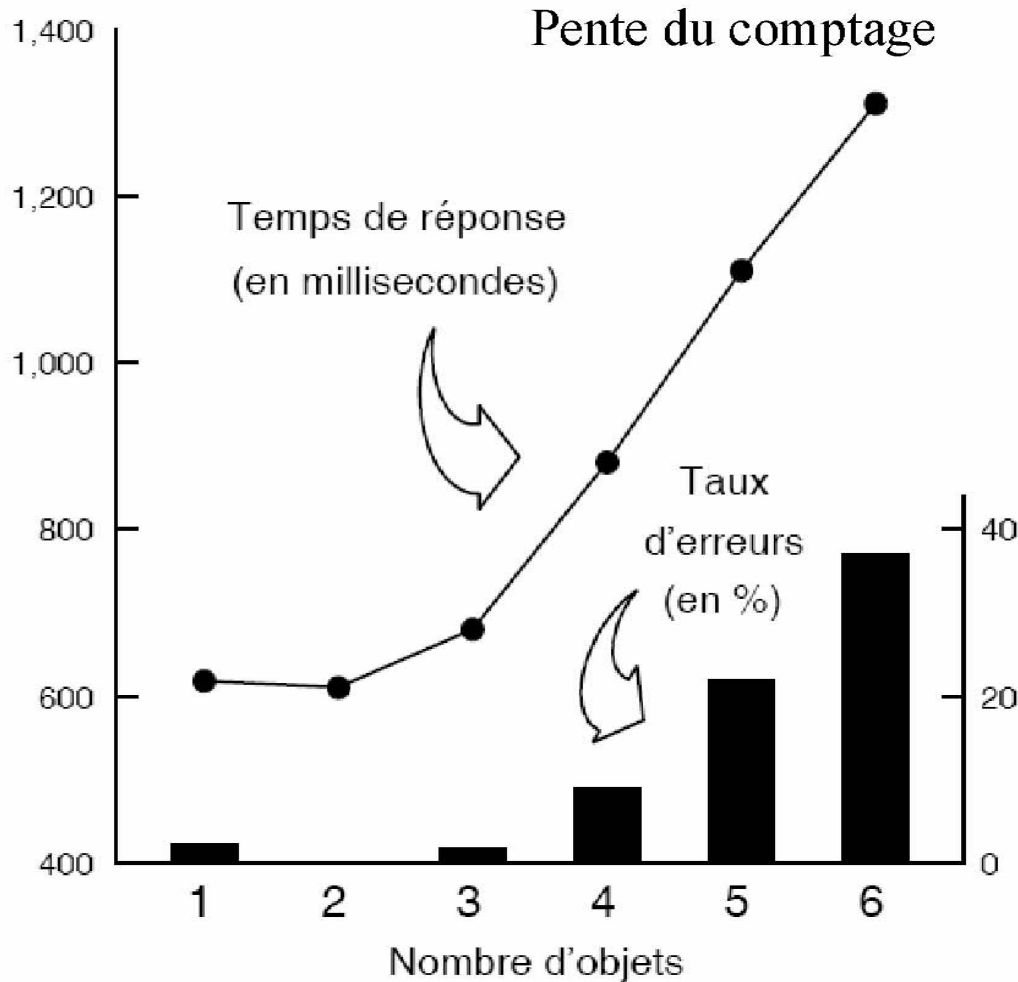
Mandler & Shebo, 1982; Trick & Pylyshyn, 1994

- La « subitisation » s'arrête aux environs de 3
- Elle ne dépend pas de l'arrangement spatial (objets alignés)
- Elle échoue si
 - Les objets sont superposés
 - Les objets ne peuvent pas être isolés par la vision « pré-attentive »



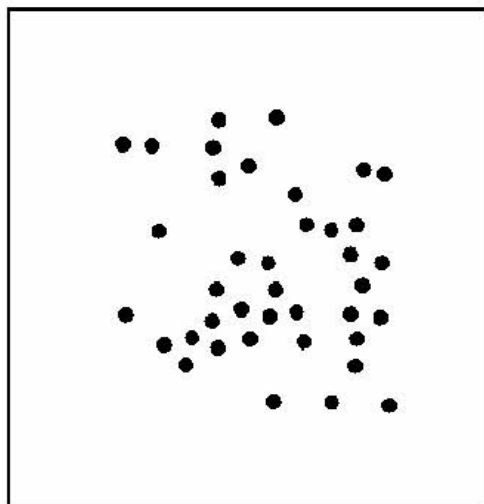
La perception du nombre: 2. Le comptage

Subitisation et comptage sont dissociables:
 Les patients simultanagnosiques peuvent encore « subitiser » mais pas compter
 (Cohen et Dehaene, JEP:HPP, 1994)



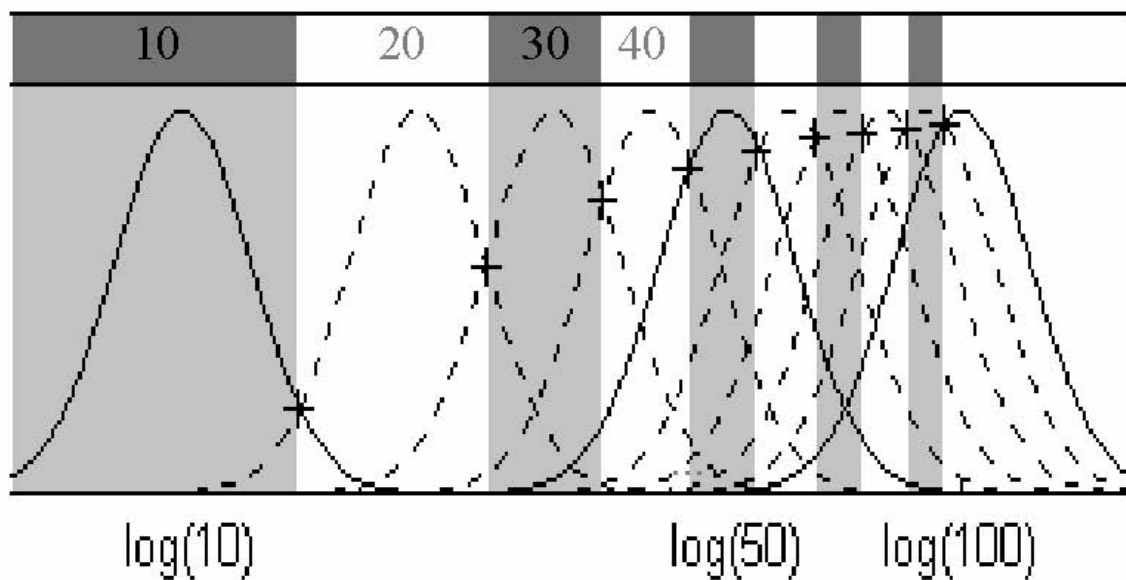
La perception du nombre: 3. l'estimation

Izard et Dehaene, *Cognition*, 2007

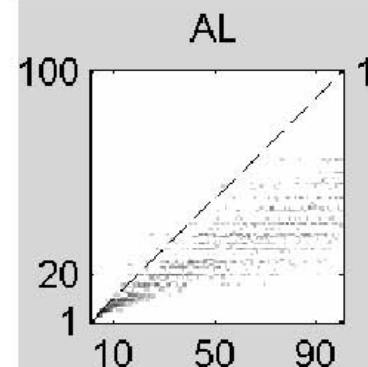


Combien de points?
Y a-t-il plus ou moins que 40?

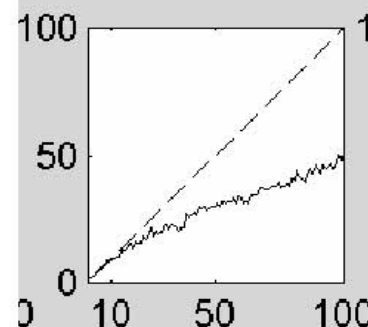
Conclusion: la numérosité serait représentée mentalement sous forme **analogique**, par une distribution d'activation sur une **ligne numérique mentale logarithmique**.



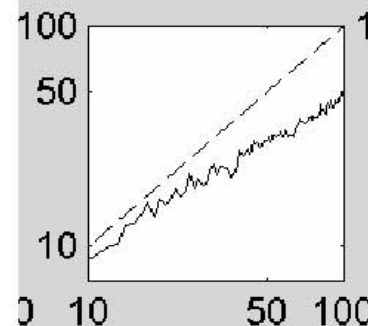
Distribution des réponses (échelle linéaire)



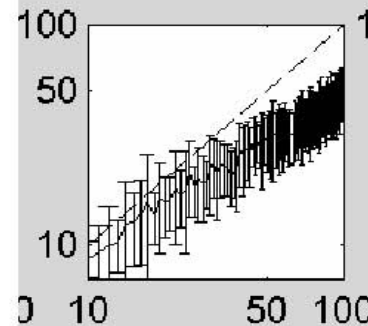
Réponse moyenne (échelle linéaire)




Réponse moyenne (double échelle logarithmique)



Ecart type des réponses (double échelle logarithmique)



A 3D grid of spheres on a blue background. The spheres are arranged in a regular, repeating pattern, creating a perspective effect that recedes into the distance. The background is a solid, dark blue color.

CES PROCESSUS DANS LE DÉVELOPPEMENT

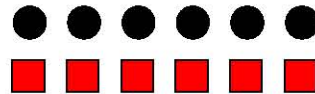
Le développement du concept de nombre:

La correspondance terme à terme

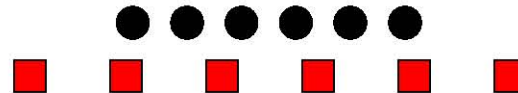
- Les tests Piagétiens

- Conservation du nombre

- Voici des verres et des bouteilles. Est-ce qu'il y a la même chose de ronds et de carrés?



- Et maintenant, est-ce qu'il y a la même chose?



- Inclusion des classes

- J'ai des fleurs: deux roses et huit marguerites. Est-ce que j'ai plus de marguerites ou plus de fleurs?

- Hypothèse d'une lente construction mentale du nombre et de la logique (Papert, 1960)

« Pour le nourrisson, il n'existe même pas d'objets ; une première structuration est nécessaire pour que l'expérience s'organise en *choses*. Nous insistons sur le fait que le bébé ne *découvre* pas l'existence des objets comme un explorateur découvre une montagne, mais plutôt comme un homme découvre la musique: il en a entendu depuis des années, mais ce n'était, jusque là, que du bruit. Ayant « acquis les objets », l'enfant a un long chemin à parcourir avant d'arriver à l'étape des classes, des sériations, des emboîtements et, enfin, du nombre. »

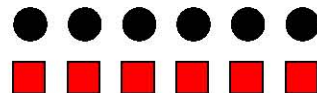
Deux réfutations expérimentales de l'importance de la tâche de conservation du nombre

- Mehler & Bever, *Science* (1967): les enfants de trois ans réussissent le test lorsqu'on sollicite leur motivation de façon non-verbale (avec des *M&M*'s!)

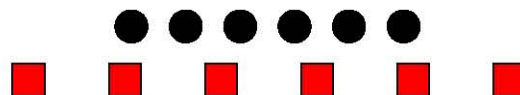


- McGarrigle & Donaldson, *Cognition* (1974): les enfants réussissent lorsqu'il y a une bonne raison de leur poser deux fois la même question (par exemple parce qu'une tierce personne bouscule l'arrangement des objets)

- Voici des verres et des bouteilles. Est-ce qu'il y a la même chose de ronds et de carrés?



- L'expérimentateur se détourne. Un complice bouscule l'arrangement des points. L'expérimentateur se retourne et demande « Et maintenant, est-ce qu'il y a la même chose? »



Le développement du concept de nombre: Les principes du comptage sont-ils « innés »?





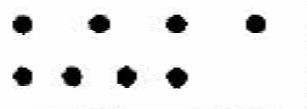

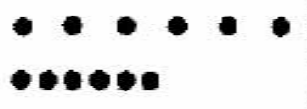

(Gelman & Gallistel, *The child's understanding of number*, 1978)

- Principe d'ordre stable
 - Récitation des mots dans un ordre fixe
- Principe de correspondance terme à terme
 - On avance d'un mot pour chaque objet compté
- Principe du cardinal
 - Le dernier mot donne le cardinal de l'ensemble compté
- Principe d'abstraction
 - Toute collection d'objets peut être comptée
- Principe de non-pertinence de l'ordre
 - Les objets peuvent être comptés dans n'importe quel ordre

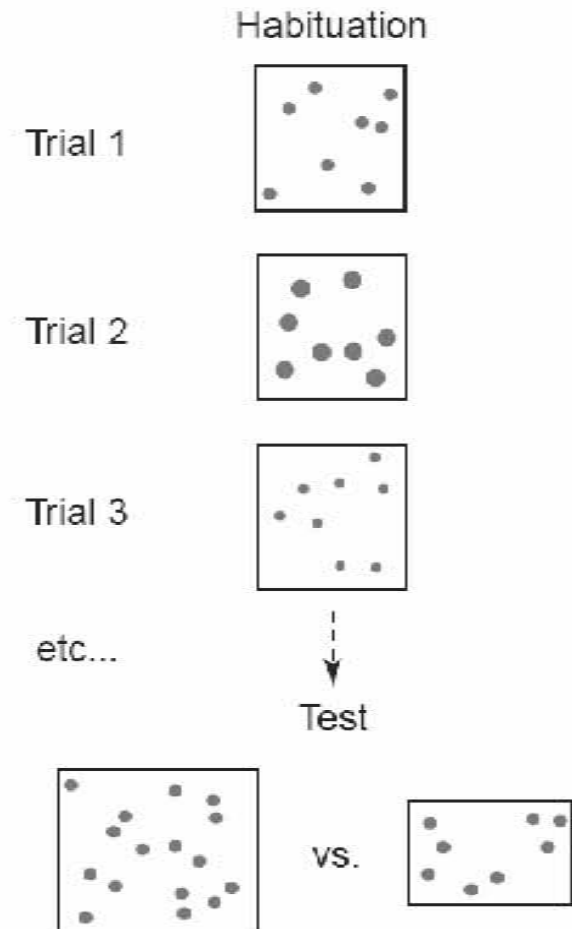
- Les enfants repèrent très précocément les violations de ces principes (*know how*)
- Toutefois, ils n'ont pas nécessairement une réelle connaissance « conceptuelle » (*know why*), particulièrement du principe le plus important, celui du cardinal (Fuson, *Children's counting and concepts of number*, 1988). Le comptage est une acquisition culturelle tardive.

La subitisation et l'estimation sont présents chez le très jeune enfant

Même des nouveaux-nés âgés de 48 heures peuvent discriminer de petits nombres d'objets (Starkey & Cooper, 1980; Antell & Keating, 1983)

CONDITION	HABITUATION TRIALS	POSTHABITUATION TRIALS
A 2 to 3		
B 3 to 2		
C 4 to 6		
D 6 to 4		

Cette compétence s'étend à des grands nombres, par exemple 8 versus 16 (Xu & Spelke, 2000)



Starkey, Spelke & Gelman (1983, 1990): codage amodal des correspondances entre 2 ou 3 sons et 2 ou 3 objets.

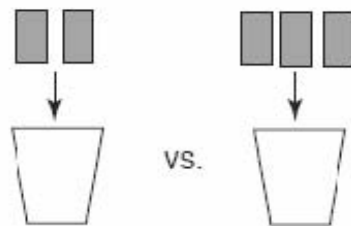
Résultats contestés par Mix et al. (1997) mais confirmés par Kobayashi et al. (2005) et Jordan et Brannon (2006)

La « signature » de la subitisation: une limite stricte à un, deux ou trois objets

Dans certaines expériences qui nécessitent de suivre la trajectoire des objets (« tracking »), les performances des enfants sont strictement limitées à 1, 2 ou 3 objets (« set size signature »).

De plus, l'enfant s'intéresse fréquemment à la quantité totale plutôt qu'au nombre.

(c) Cracker choice experiments
Les gâteaux sont insérés l'un après l'autre.



Core system engaged	Computation performed
Distinct individuals [20]	Continuous quantity [20]

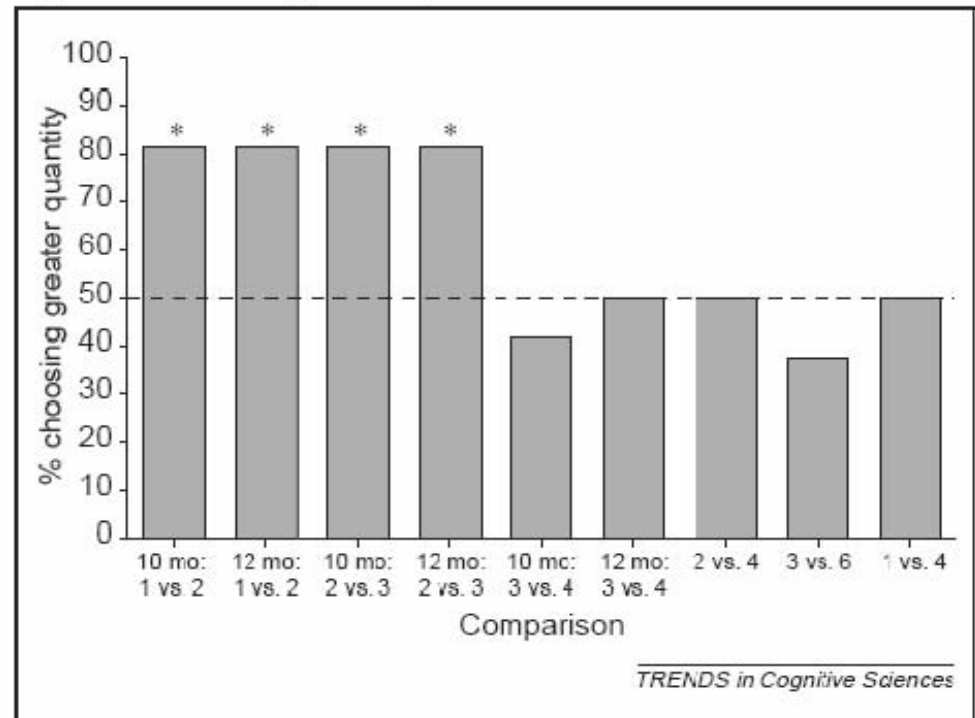
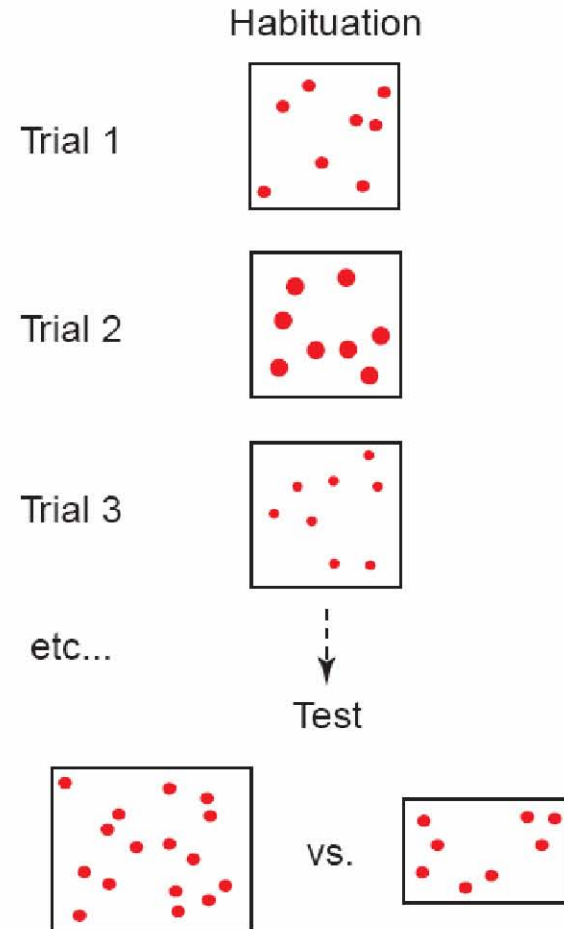


Figure 3. Infants' choices in the experiment by Feigenson *et al.* [20]. Bars represent the percentage of infants in each comparison group (at two different ages, 10 and 12 months, for the smaller quantities) choosing the greater quantity of crackers. Infants' choices demonstrate the set-size signature of the system for representing small numbers of numerically distinct individuals (Core system 2), in that infants performed randomly (dotted line at 50%) when either array contained more than 3 objects, even with highly discriminable ratios between the quantities. Asterisks denote significance levels of $P < 0.05$. Adapted with permission from [20].

La « signature de l'estimation: pas de limite stricte, mais les performances dépendent du rapport des deux nombres

Pour la discrimination de grands nombres, ce n'est pas le nombre absolu qui compte, mais le rapport des deux nombres (« Weber fraction signature »).

- Cette compétence résiste à de nombreux contrôles pour les paramètres non-numériques (taille, surface, densité)
- La discrimination s'étend à des séquences de sons.
- La fraction de Weber s'améliore au cours du développement (1:2 à six mois, 2:3 à 10 mois)

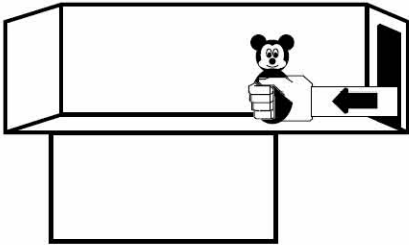


Opérations numériques chez le très jeune enfant

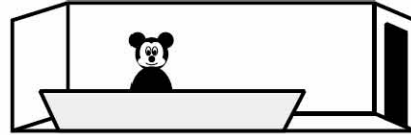
- Wynn (*Nature*, 1992):
 - Enfants de 4 mois $\frac{1}{2}$

Séquence initiale: $1+1$

1. On amène le premier objet



2. L'écran se lève



3. On amène le second objet

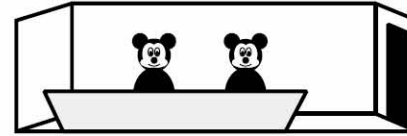


4. La main repart vide

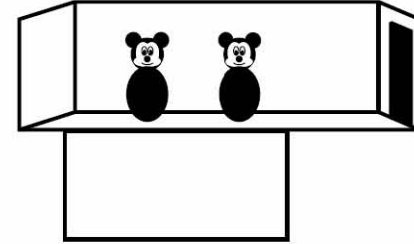


Résultat possible: $1+1=2$

5. L'écran s'abaisse...

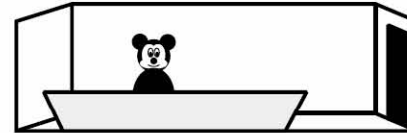


et dévoile 2 objets

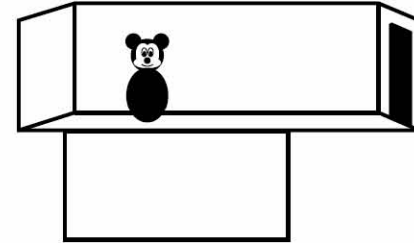


Résultat impossible: $1+1=1$

5. L'écran s'abaisse...



et dévoile 1 objet

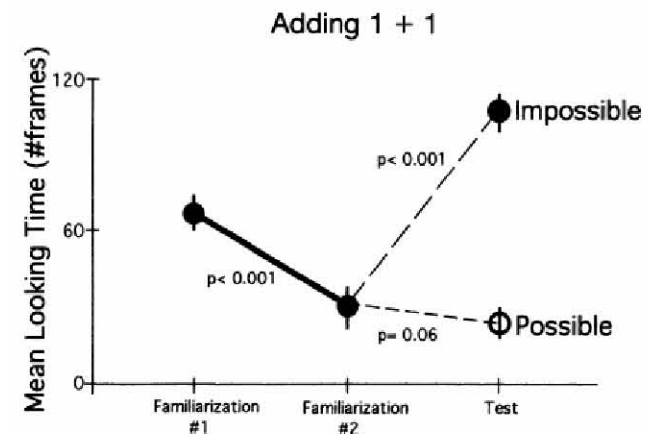


Opérations numériques chez le très jeune enfant

- Wynn (*Nature*, 1992) et ses répliques:
 - Koechlin et coll. (*Math Cognition*, 1997): plateau tournant, empêchant l'enfant de fonder ses jugements sur la position précise des objets
 - McCrink et Wynn (*Psych Science*, 2004): $5+5 = 5$ ou 10 , $10-5 = 5$ ou 10Excellents contrôles pour la densité, la surface et le contour des objets

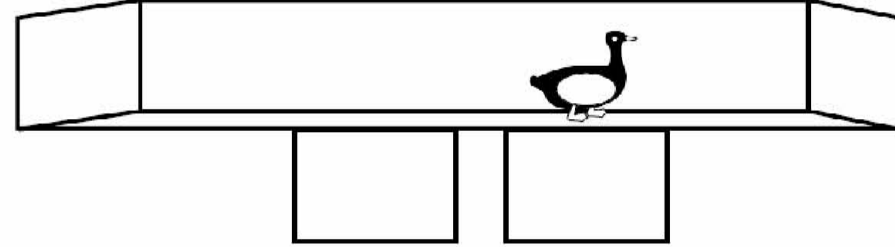
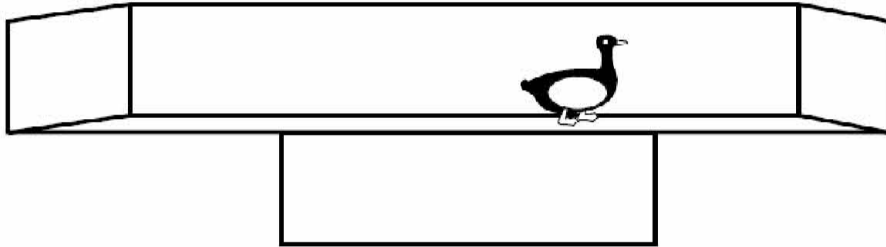
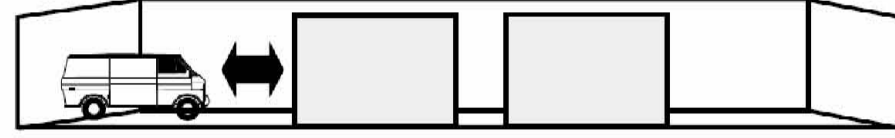
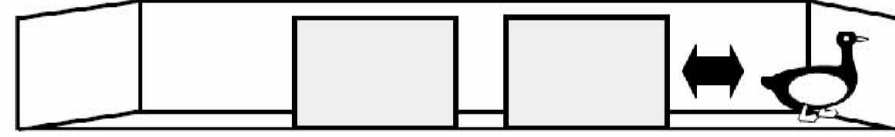
- Hauser et al. (*PNAS*, 1996):

Réplication chez des singes macaques en semi-liberté: 1 aubergine + 1 aubergine



L'importance de l'individuation

Expérience de Xu et Carey (*Cognitive Psychology*, 1996)



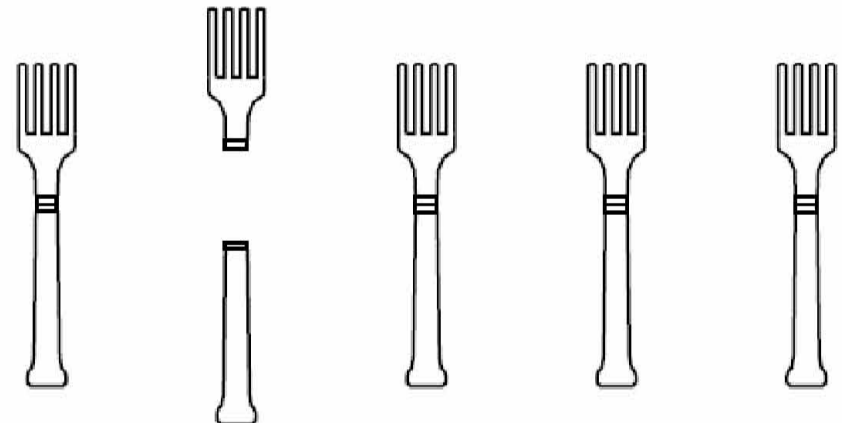
Pas de surprise de l'enfant

Surprise de l'enfant

- L'enfant de 10 mois individue les objets qui entrent dans des opérations arithmétiques simples sur la base de leur **continuité spatio-temporelle**, plus que sur la base de leur identité.

- L'enfant de 12 mois réussit le test.

- Même chez un enfant de 3-4 ans, l'individuation peut conduire à des erreurs (Shipley & Shepperson, *Cognition*, 1990)



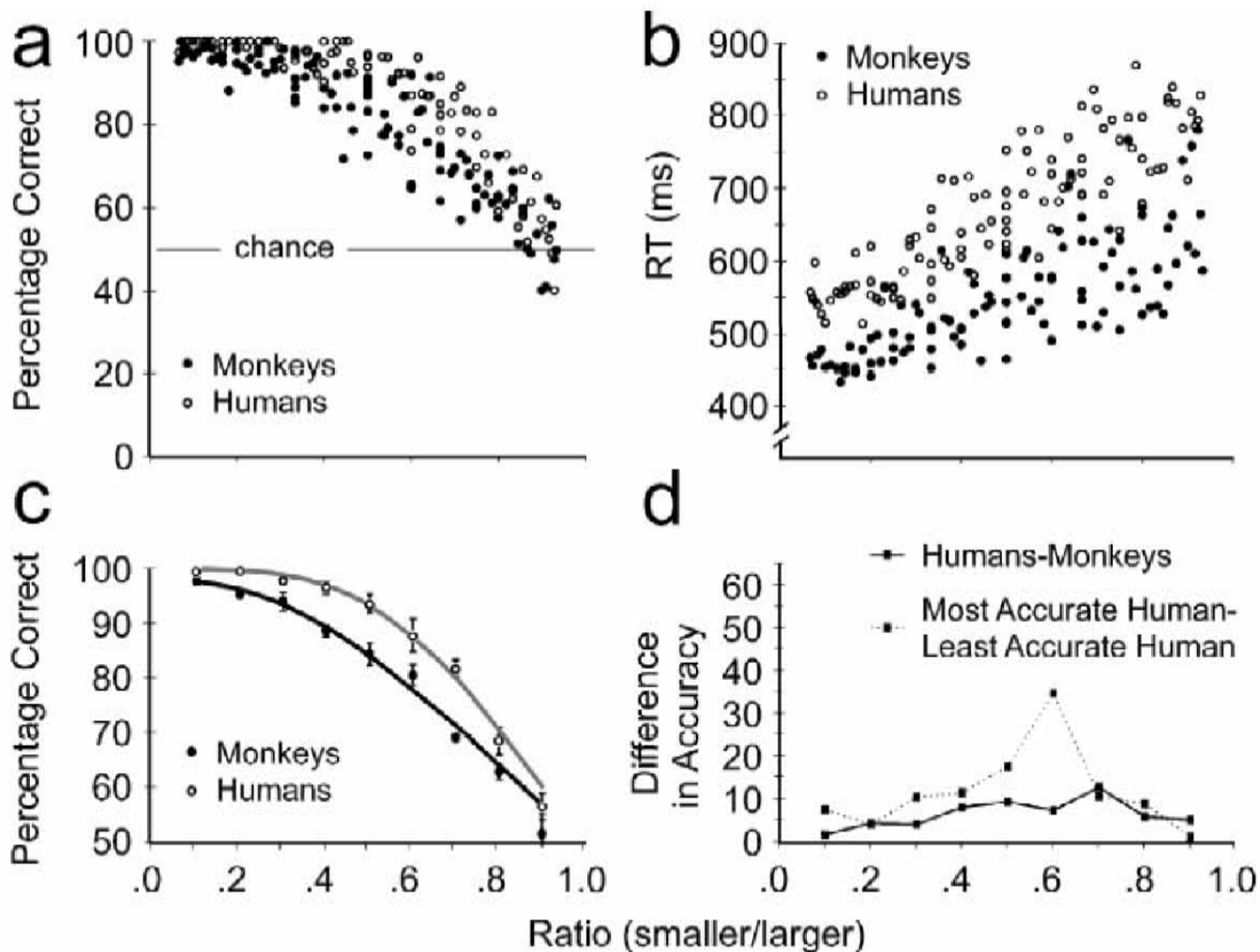
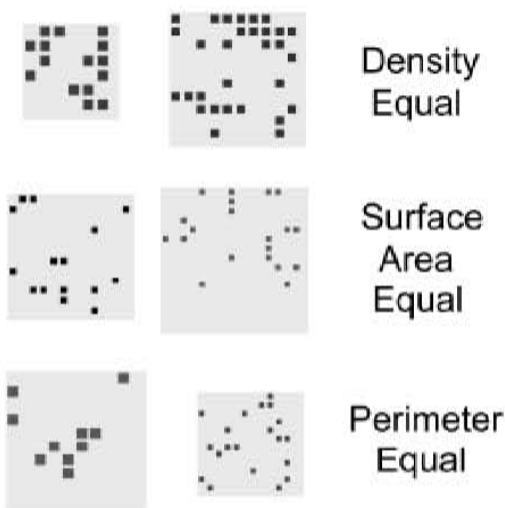
A 3D grid of spheres on a blue background. The spheres are arranged in a regular pattern, receding into the distance, creating a sense of depth. The background is a solid, dark blue color.

LE SENS DU NOMBRE

Continuité phylogénétique et épigénétique de la représentation analogique des nombres

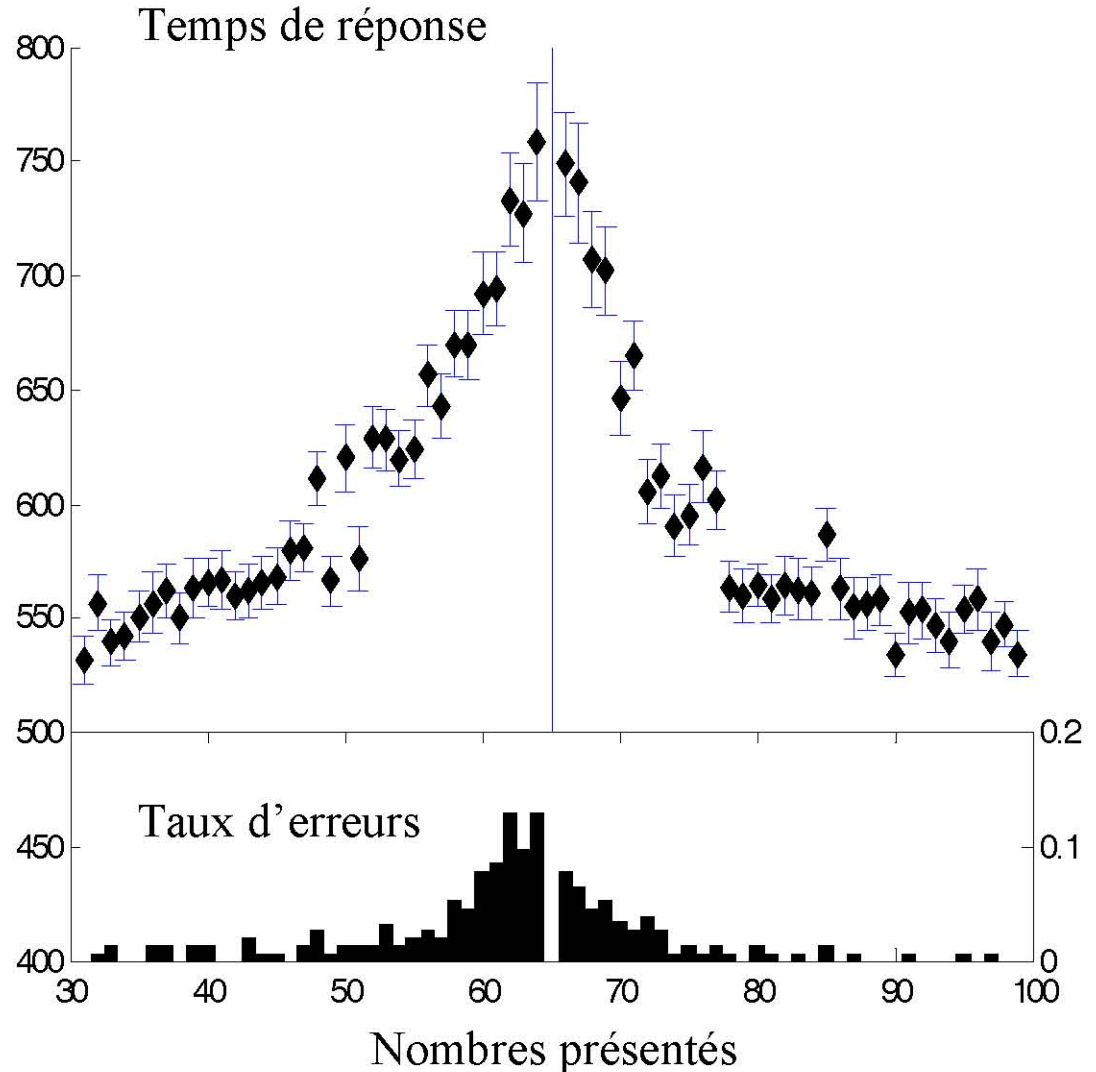
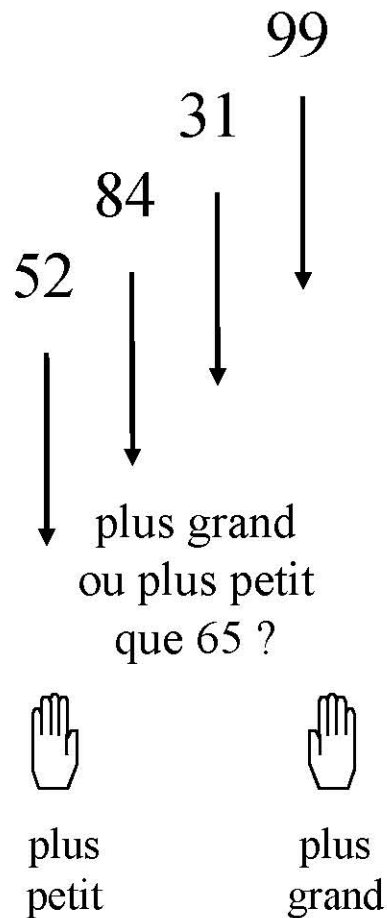
La tâche de comparaison de deux numérosités

Cantlon & Brannon, Psychological Science 2006



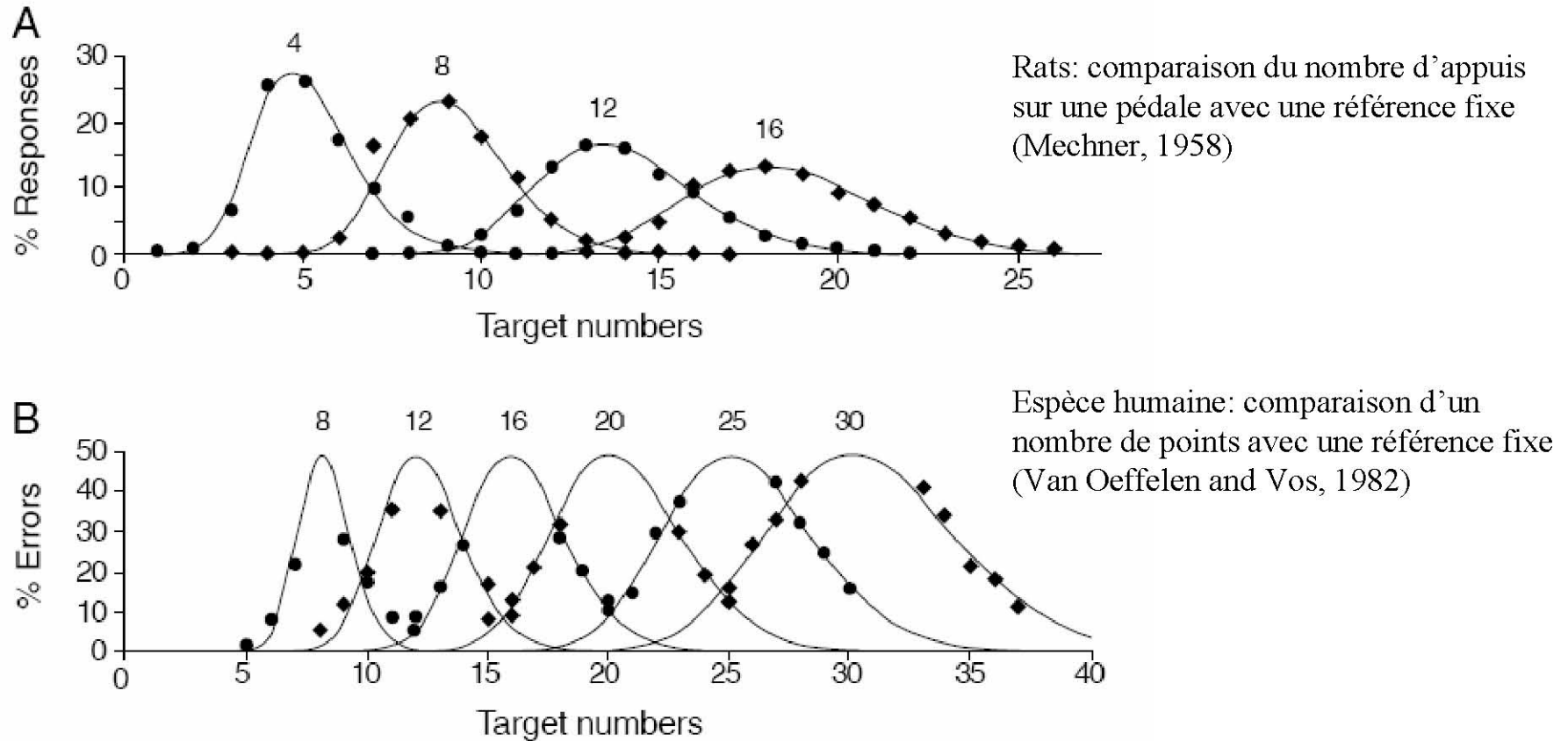
Même la compréhension des **symboles** numériques fait appel au sens des quantités

L'effet de distance en comparaison de nombres
découvert par Moyer et Landauer en 1967



Continuité phylogénétique et épigénétique de la représentation analogique des nombres

La tâche de jugement pareil/différent

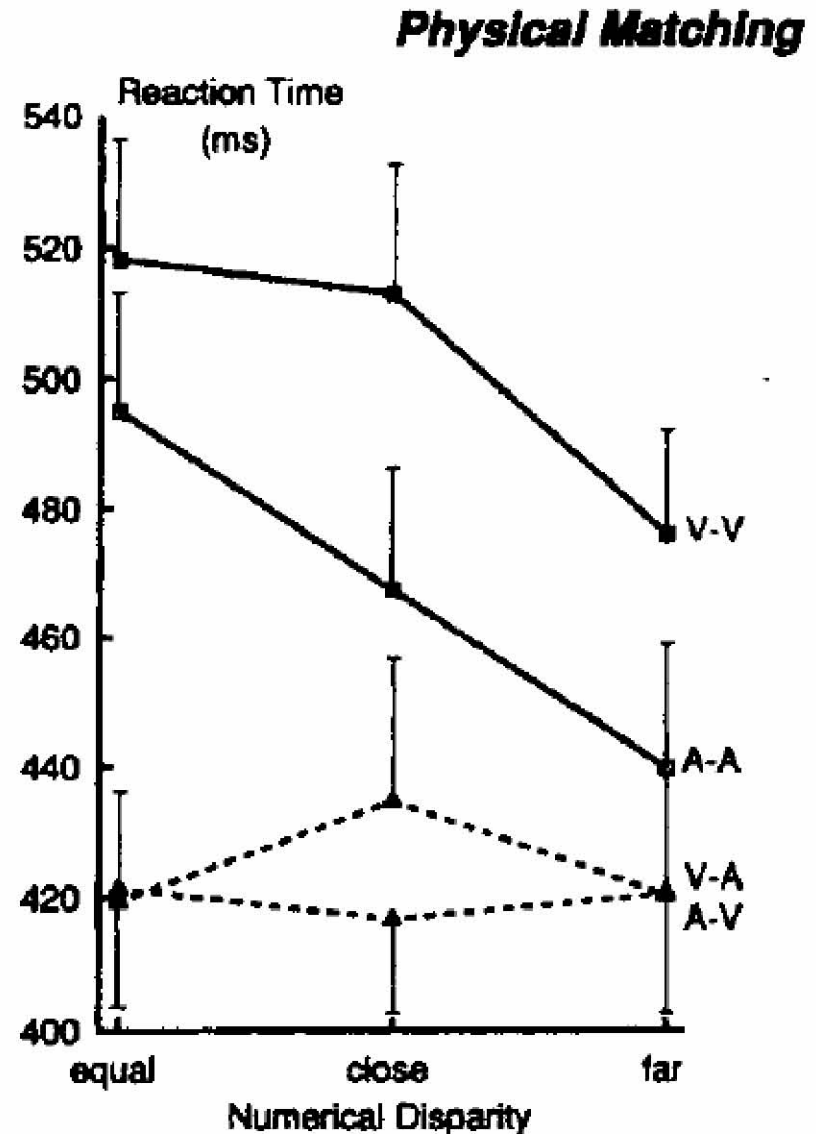


L'intuition numérique chez l'adulte humain

- Le jugement pareil-différent avec des symboles montre un effet de distance numérique (Duncan & McFarland, 1980; Dehaene & Akhavein, 1994):

$8 \neq 9$ versus $2 \neq 9$

Conclusion: Même lorsque les nombres sont présentés sous forme de symboles, l'accès au sens des quantités numériques est automatique et rapide.

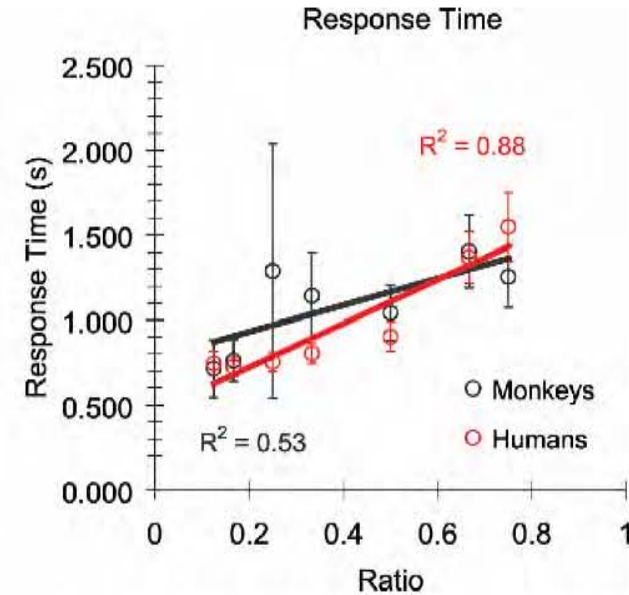
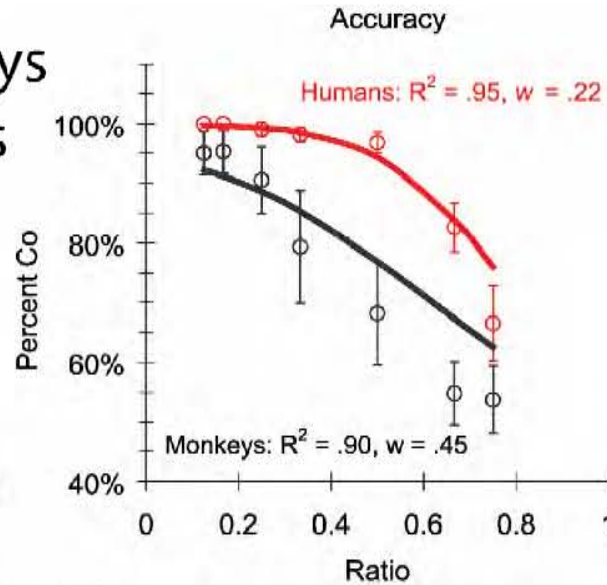
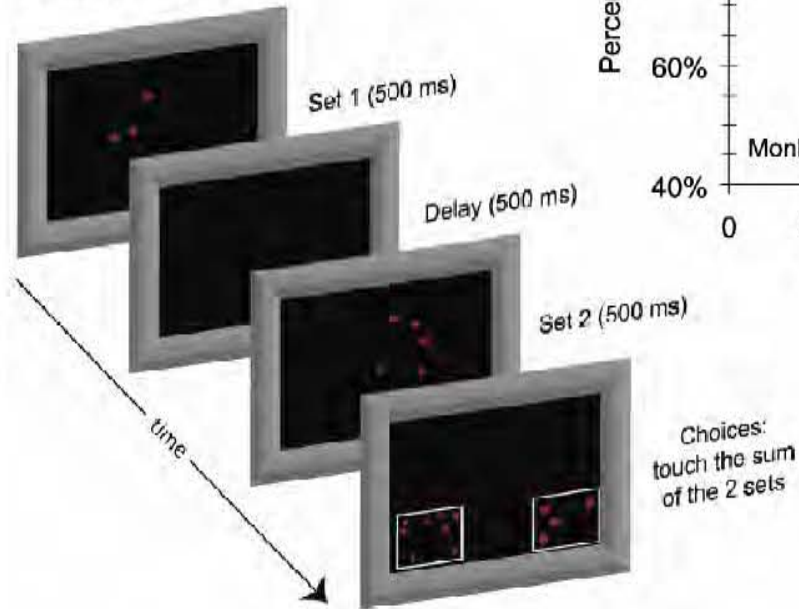


Le calcul numérique approximatif

Basic Math in Monkeys and College Students

Jessica F. Cantlon*, Elizabeth M. Brannon

Addition Task



La vérification des opérations **symboliques** montre également un effet de distance numérique (Ashcraft et al., 1981):

21+34=55, 65 ou 95

Symbolic arithmetic knowledge without instruction

Gilmore, McCarthy & Spelke, *Nature* 2007

- Enfants de maternelle (5 ou 6 ans)
- de niveau socio-économique favorisé ou défavorisé
- Tests d'approximation sur des grands nombres et des opérations jamais enseignées explicitement
- Performances supérieures au hasard (60-75%)
- Performances corrélées avec la réussite en mathématiques à l'école

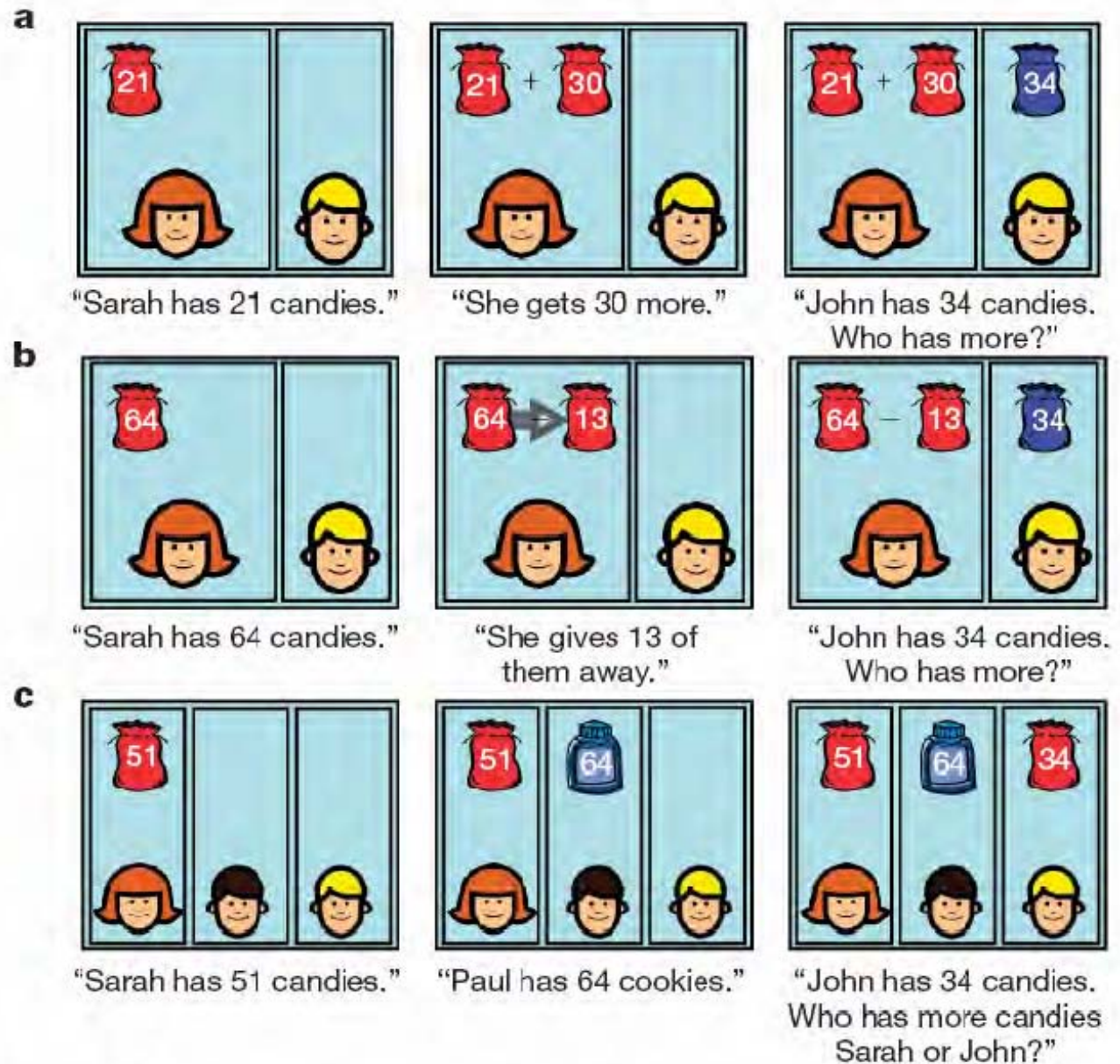


Figure 1 | Example problems of symbolic, approximate arithmetic.
a, Addition; **b**, subtraction; and **c**, comparison.

Récapitulatifs

- Au moins trois systèmes distincts contribuent au « sens du nombre »:
 1. La subitisation pour les ensembles de 1, 2 ou 3 objets
 2. L'estimation de la numérosité, bien au-delà de 3 objets
 3. Le comptage, fondé sur la correspondance terme-à-terme, pour parvenir à la cardinalité exacte
- La subitisation et l'estimation sont présents très précocement chez l'enfant, et existent également chez de nombreuses espèces animales
- Ces processus numériques confèrent à l'enfant, très précocement, le « sens du nombre » et une capacité de calcul approximatif
- A l'âge adulte, nous continuons à accéder rapidement à la représentation analogique des nombres, même lorsque ceux-ci nous sont présentés sous forme de symboles

Capacités d'estimation et de comparaison sans approximation

- Présente chez les animaux et les nouveau-nés
- Pas de recours au langage
- Effet de distance (estimation meilleure quand l'écart est plus grand) (6 vs 9)
- Estimation meilleure quand l'écart augmente avec les nombres (156 vs 159 et 156 vs 160)

L'estimation

- Représentation mentale de type *analogique*
- Assimilable à une ligne droite mais compressée à droite pour rendre compte du fait que le même écart deviennent de moins en moins perceptible quand les quantités augmentent.



Estimation chez l'adulte

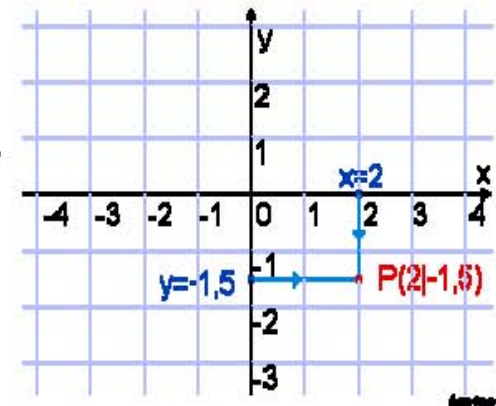
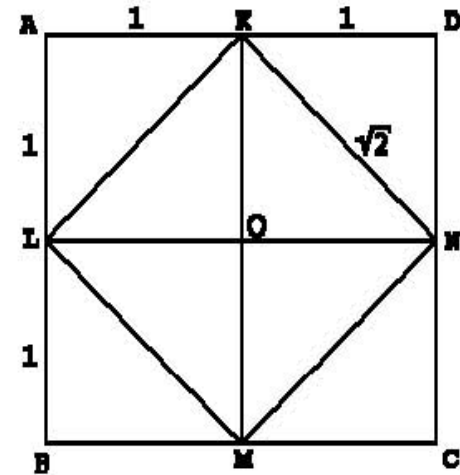
- Toujours présente quand il n'y a pas comptage
- Indépendante de la représentation symbolique (forme verbal, indo-arabe, ...)
- L'estimation se fait sur la représentation analogique
- Base biologique primitive sur laquelle se « greffent » les représentations symboliques culturelles



REPRÉSENTATION SPATIALE DES NOMBRES

La métaphore nombre-espace joue un rôle essentiel en mathématiques

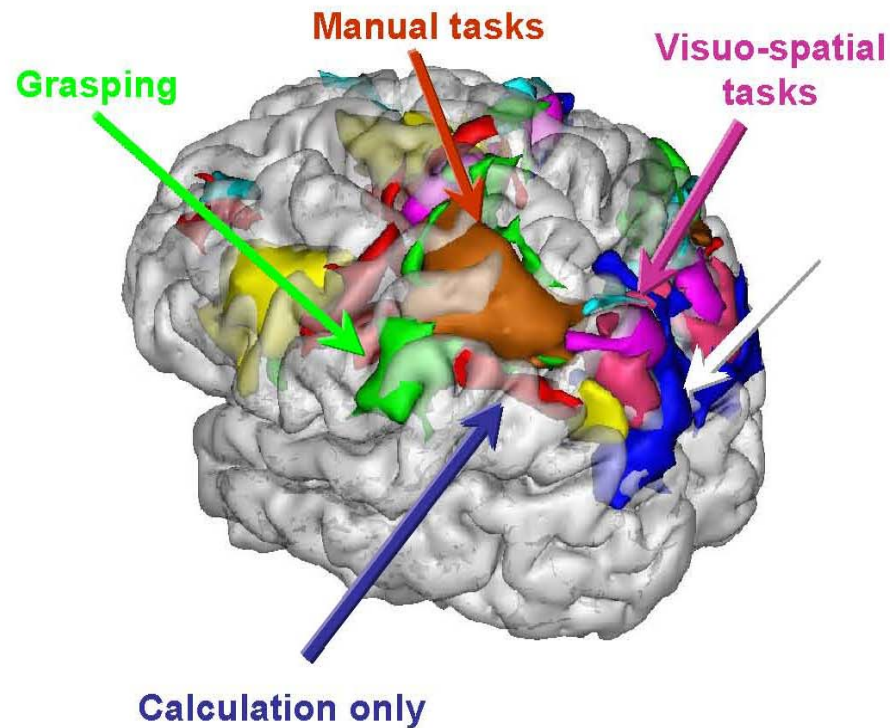
- Le concept de mesure
- L'idée Pythagoricienne que les longueurs *sont* des nombres
- Hippase de Métaponte (ca. 500 B.C.)
 - Première démonstration que le côté et la diagonale du carré ne sont pas commensurables (leur rapport n'est ni un entier, ni une fraction rationnelle)
 - Concept de « nombre irrationnel », puis de continuum et de « nombre réel »
- René Descartes (1596-1650)
 - Invention des coordonnées Cartésiennes
 - Géométrie algébrique: démonstration de théorèmes de géométrie à l'aide des outils de l'algèbre et de l'arithmétique
- Plan complexe
- Etc...



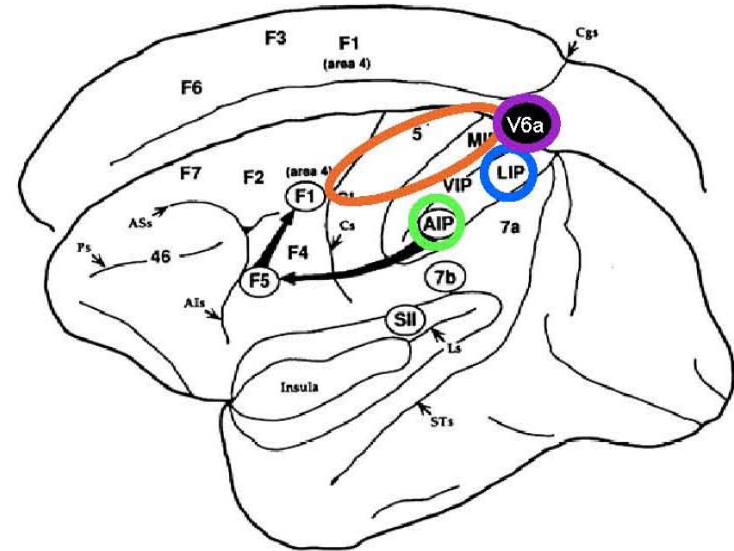
Rôle de la région intrapariétale dans le calcul mental

L'activation évoquée par l'arithmétique mentale est entourée d'un vaste ensemble de régions pariétales spécialisées pour différentes transformations visuo-spatiales.

Cerveau humain



Singe macaque





**EFFET « SNARC »:
ASSOCIATION NB ET ESPACE**

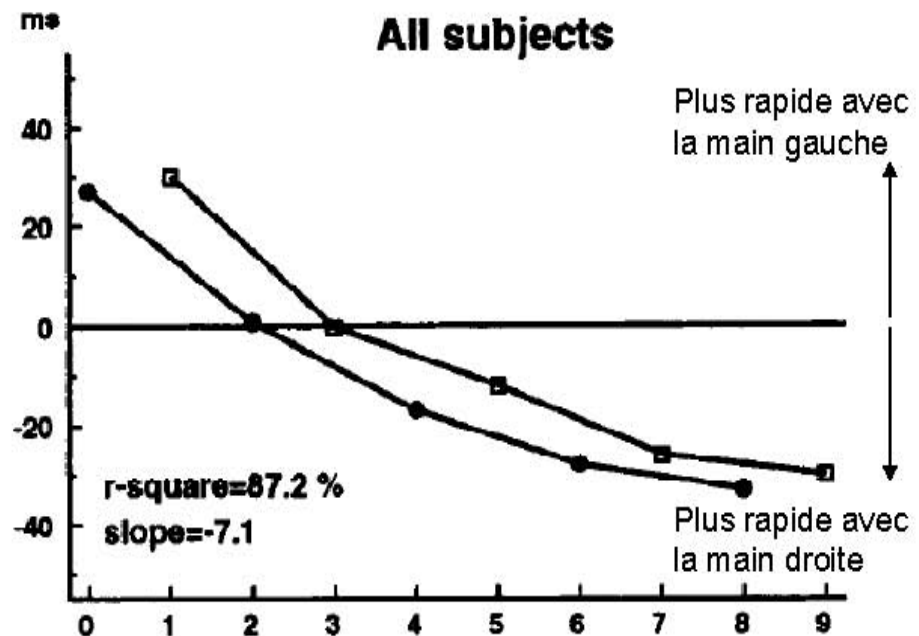
L'effet « SNARC »

(Spatial Numerical Association of Response Codes)

(Dehaene, Bossini & Giraux 1993)

- Jugement de parité sur des chiffres de 0 à 9
- Dans certains blocs, la réponse « pair » est à main droite et la réponse « impair » à main gauche, dans d'autres blocs c'est le contraire.
- En conséquence, on obtient pour chaque nombre un temps de réaction à main droite et un temps de réaction à main gauche.
- Découverte fortuite: quelle que soit leur parité, on répond plus vite aux petits nombres avec la main gauche et aux grands nombres avec la main droite.

RT(right key) minus RT(left key)

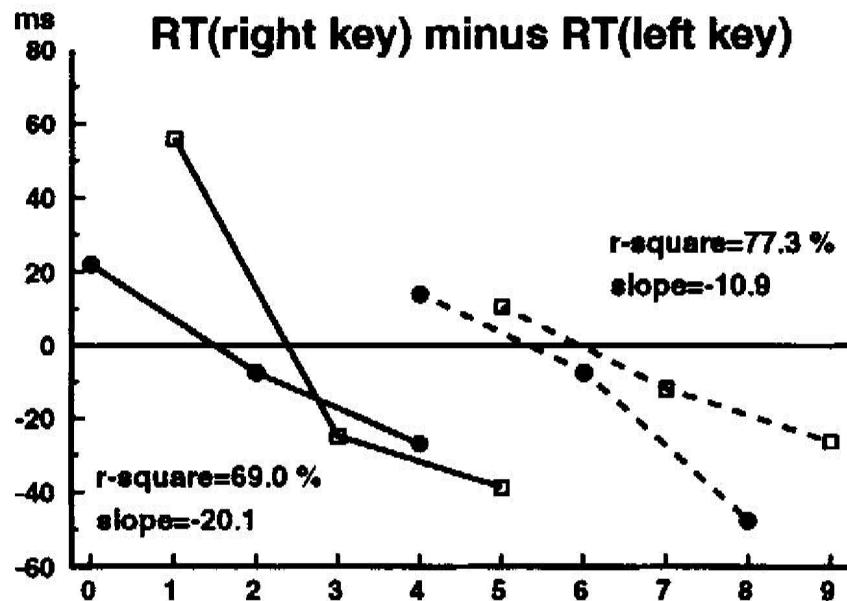


Quelques résultats expérimentaux sur l'effet SNARC

Chez l'enfant, l'effet apparaît *vers le CE2* (3rd grade) (Berch et al., 1999), à peu près au même moment où apparaissent les premiers effets de l'automatisation du lien entre chiffres et quantités (Girelli, JECP 2000).

Les *lettres* et autres séquences ordinales ne suscitent pas d'association automatique avec l'espace (Dehaene, Bossini & Giraux 1993; Fischer, 2003; Zorzi, 2006; Casarotti, 2007), à de rares exceptions près (Gevers et al., 2003)

C'est la taille *relative* des nombres qui compte (par rapport à l'intervalle testé), pas la taille absolue (Dehaene, Bossini & Giraux 1993)

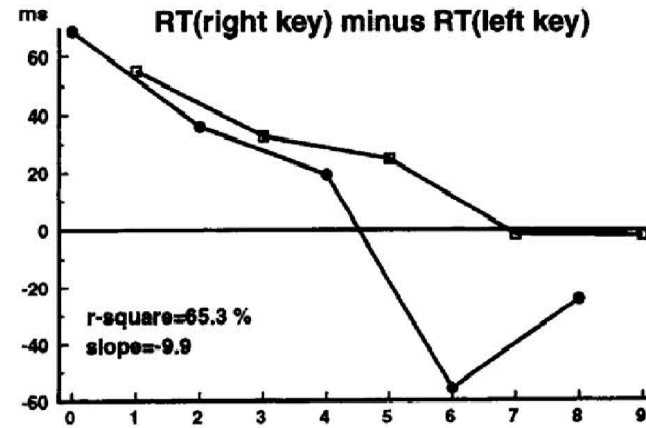
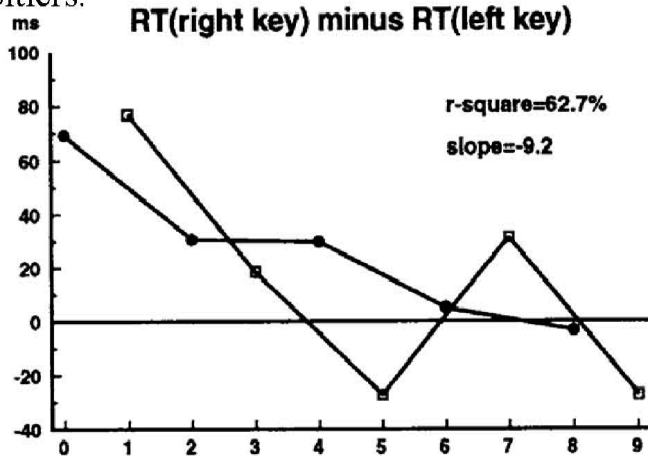


Les déterminants de la direction de l'effet SNARC

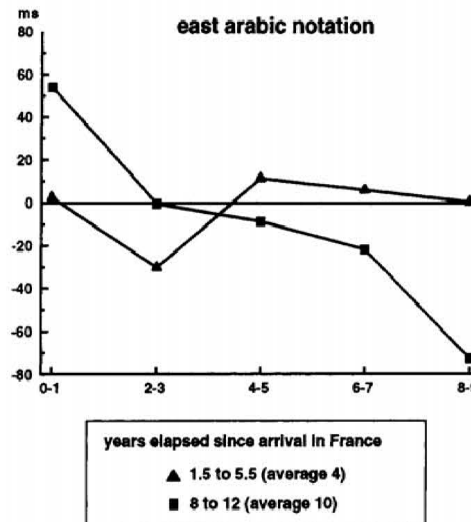
(Dehaene, Bossini & Giraux 1993)

L'effet est identique chez les gauchers et chez les droitiers.

Il ne change pas quand on croise les mains (c'est l'espace qui compte, pas la main de réponse)



L'effet a tendance à s'inverser chez des sujets qui lisent de droite à gauche.



L'inversion de l'effet chez les lecteurs de droite à gauche est confirmée par les études de Zebian (2005) et de Fischer et coll. (soumis).

Cependant, le sens de la lecture n'est probablement qu'un des aspects d'un biais culturel plus vaste qui impose une direction préférentielle au sens du temps, du nombre, et de l'espace.



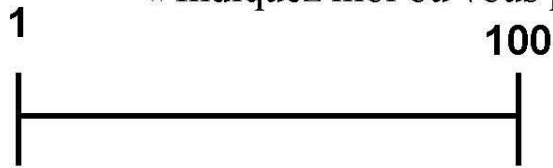
**MODIFICATIONS DU LIEN
NOMBRE-ESPACE AU COURS
DU DÉVELOPPEMENT**

La nature des liens entre nombre et espace change au cours du développement

(Siegler & Opfer, 2003; Siegler & Booth, 2004)

Tâche de mise en relation d'un nombre avec une position:

« Indiquez moi où vous placeriez le nombre n »



Un changement radical survient au cours de l'éducation: passage d'une représentation logarithmique à une représentation linéaire

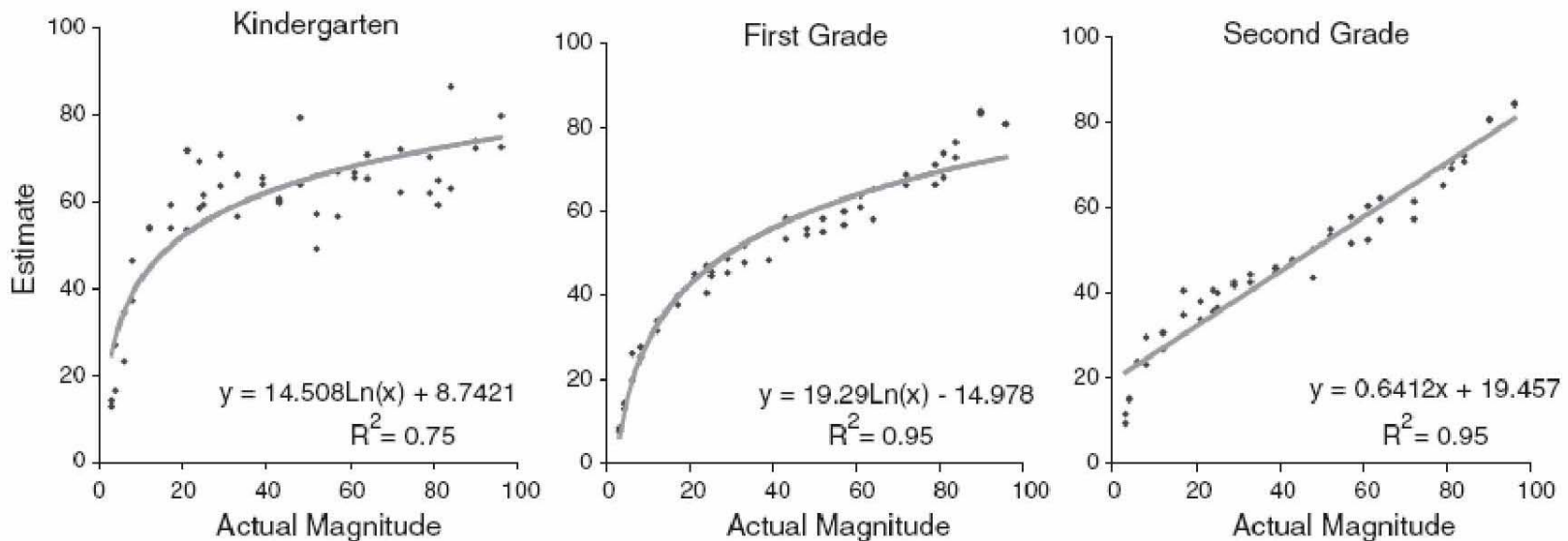
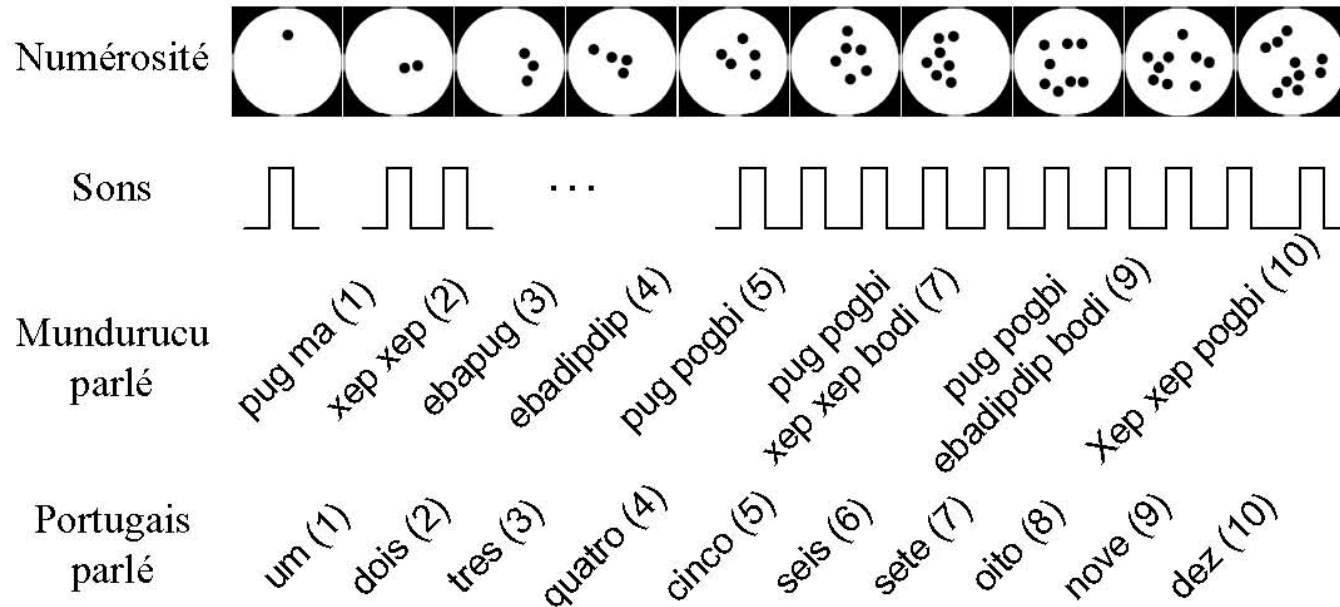
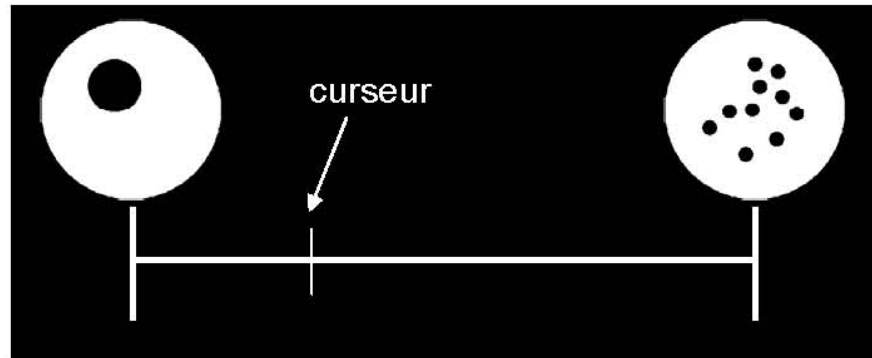


Figure 2. Progression from logarithmic pattern of median estimates among kindergartners (left panel) to linear pattern of estimates among second graders (right panel) in Experiment.

Relations nombre-espace chez les Mundurucus

La tâche de mise en relation nombre-espace a été adaptée aux nombres entre 1 et 10, en évitant l'emploi de symboles écrits.



Relations nombre-espace chez les Mundurucus

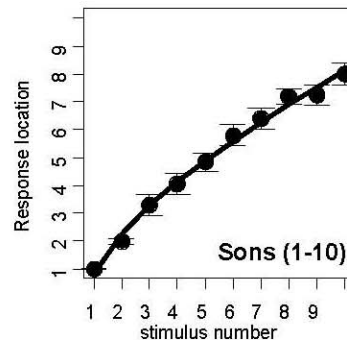
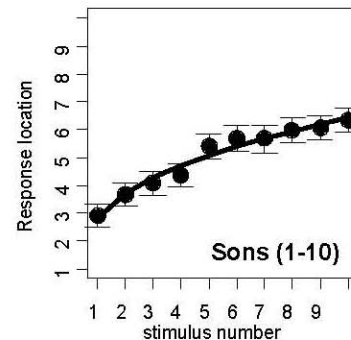
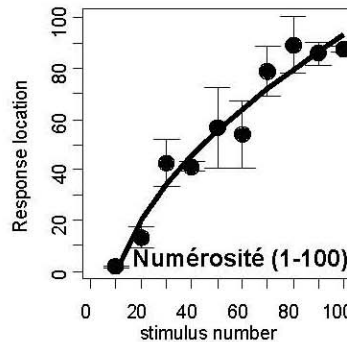
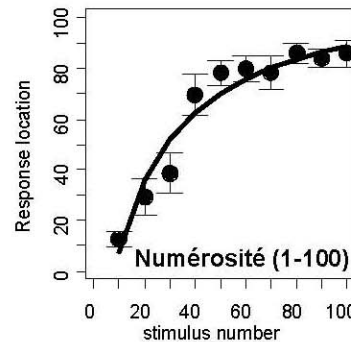
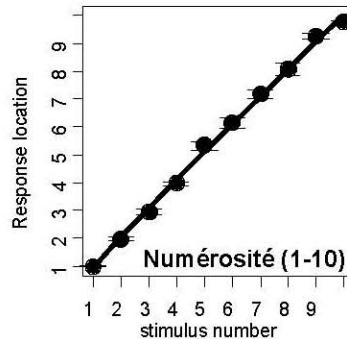
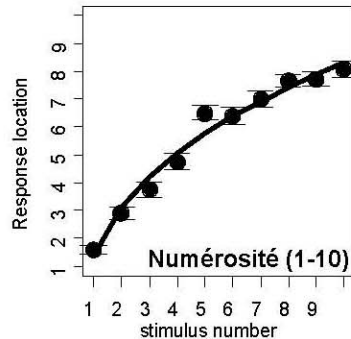
Même les adultes Mundurucus se comportent de façon logarithmique

-Pour les numérosités visuelles et auditives entre 1 et 10

-Et même pour les nombres présentés en Mundurucu et en Portugais

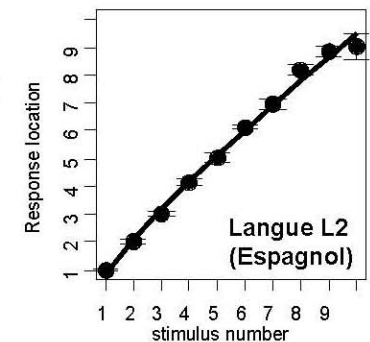
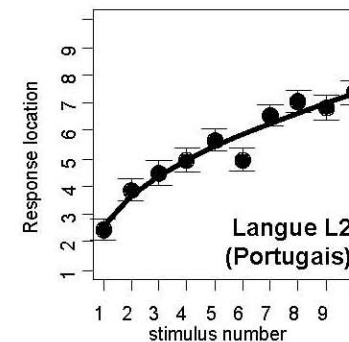
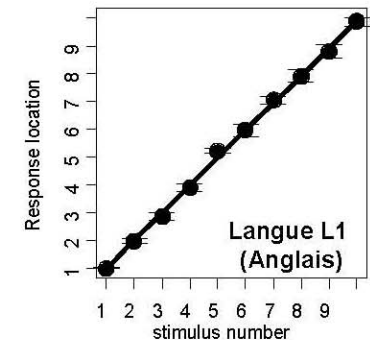
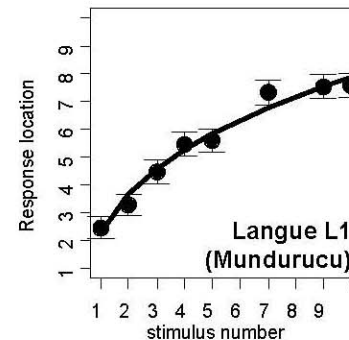
Mundurucus

Sujets contrôles américains



Mundurucus

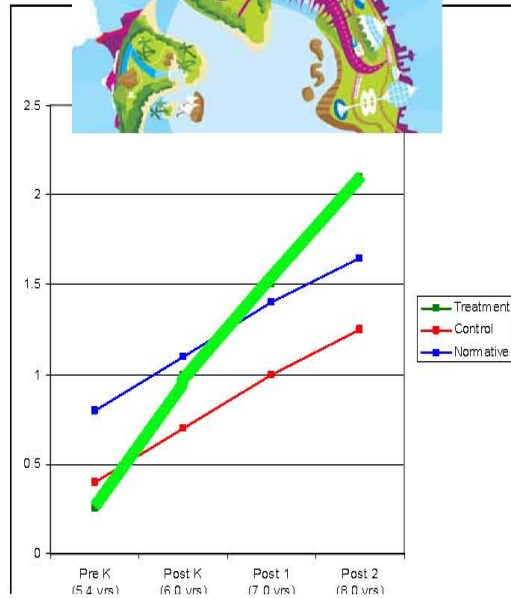
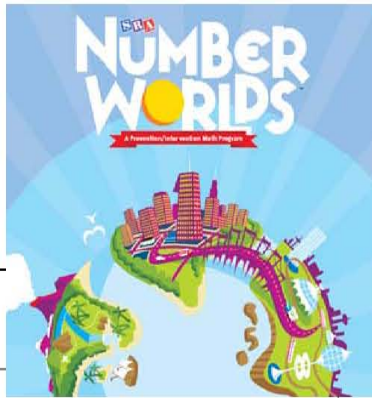
Sujets contrôles américains



Les jeux de plateau aident les enfants « à risque » en arithmétique, peut-être parce qu'ils favorisent l'apprentissage de la « ligne numérique »

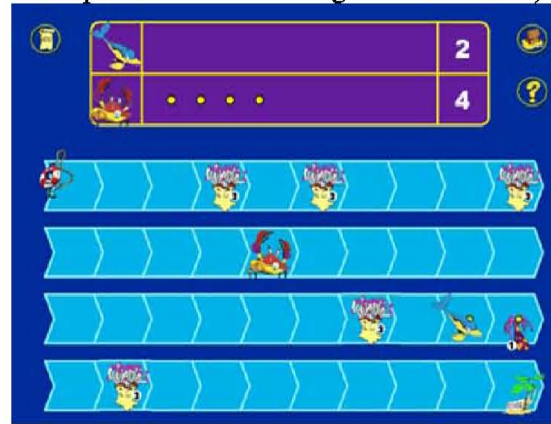
Griffin & Case (1994, 2004)

Un cursus progressif, comprenant de nombreux jeux mathématiques renforçant les liens entre nombre et espace, fait progresser les enfants « à risque » de faible niveau socio-économique

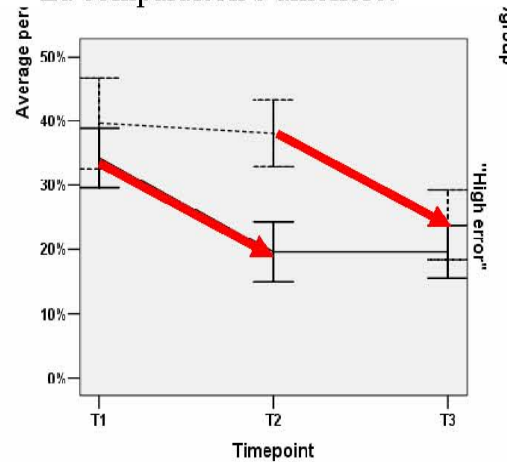


**Wilson & Dehaene (2007),
Wilson, Dehaene, Dubois & Fayol (soumis)**

Le logiciel « Course aux nombres » améliore la subitisation, la comparaison et l'identification des nombres (par comparaison avec un logiciel de lecture).

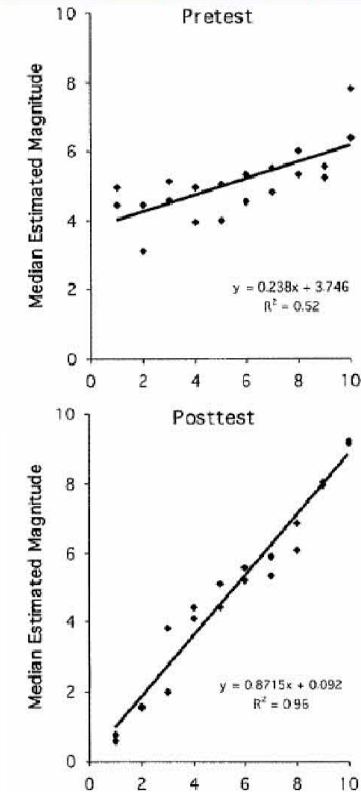
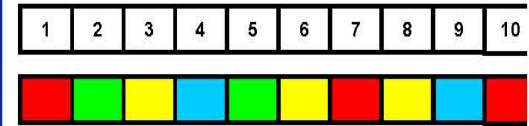


La comparaison s'améliore:



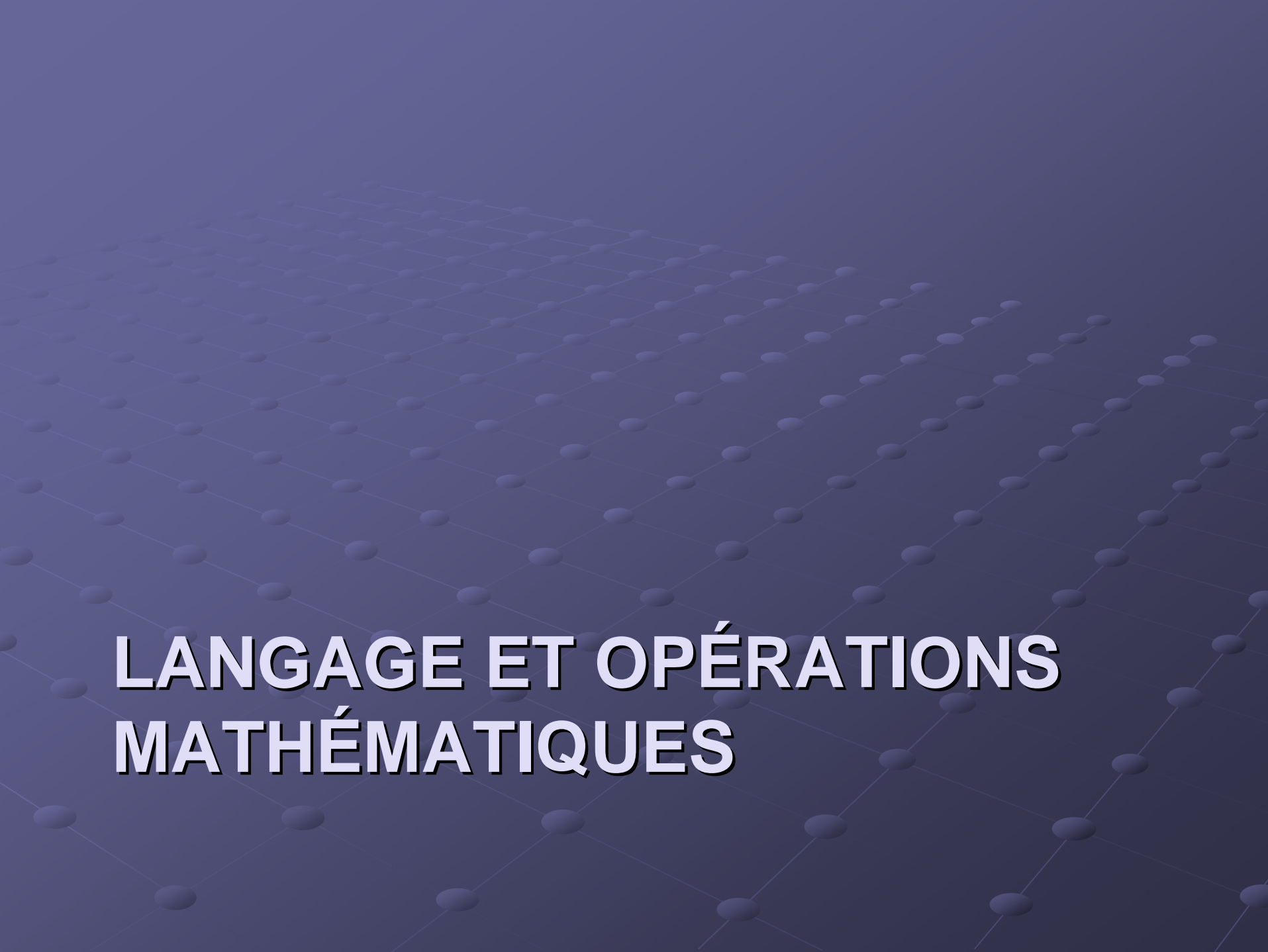
Ramani & Siegler (2008)

Un court entraînement à la ligne numérique améliore l'appariement nombre espace, la comparaison, l'identification, le comptage (par rapport à un jeu fondé sur la couleur)



Récapitulatifs

- L'association entre nombre et espace est l'un des aspects essentiels de la cognition numérique: penser à un nombre ou effectuer un calcul évoque automatiquement un biais spatial.
- Cet effet trouve son origine dans les liens qu'entretiennent les représentations numériques et spatiales dans le lobe pariétal.
- La direction et la forme de l'effet sont influencés par l'éducation et la culture.
- Les mathématiques tirent avantage de ce lien naturel entre nombre et espace.
- Il semble essentiel de l'entraîner – cela confère aux enfants une compréhension plus profonde de l'arithmétique.



LANGAGE ET OPÉRATIONS MATHÉMATIQUES

Connaissances arithmétiques, pourquoi?

- Permet de quantifier de manière précise certaines dimensions (longueur, nombre, ...) en utilisant des représentations symboliques
- Manipulations de quantités symboliques (addition, soustraction, ...)
- Le langage intervient-il dans l'arithmétique? Quand et comment?

Lésion pariétale

→ acalculie mai aucun trouble du langage



**LANGAGE: UN DES
SYSTÈMES SÉMIOTIQUES**

5 différents systèmes de codages des quantités

- Système verbal
- Système écrit indo-arabe
- Abaque
- Doigts, parties du corps
- Marques (encoches, ...)

Le système verbal

● Système verbal comporte

- un lexique fini (un, deux , .. Vingt, trente...)
- Variable d'une langue à l'autre
- Dont les itmes se suivent dans un ordre strict
- Les items correspondent à une ou plusieurs bases (en français: dix, vingt, soixante)

● Lexique se combine pour dénommer une infinité de quantités

- suivant un ordre donné (vingt trois: français vs allemand: dreiundzwanzig)
- Système économique (ne surcharge pas la MDT)

Particularité du français

- Base 10 pas clairement apparente (onze, douze, .., jusqu'à dix-sept)
- Vs chinois onze=dix - un; douze=dix - deux, ...
- Trace d'une base 60 et d'une base 20
 - Soixante neuf, soixante -dix
 - Quatre-vingt

Codage indo-arabe

- Lexique plus réduit de 0 à 9
- Syntaxe simple
- Unicité de la base
- Mais manipulation de la combinatoire → charge de la MCT
 - Risques d'erreurs
 - Pas de base phonologique (indépendant de la langue utilisée)

Codage et manipulations des quantités

● Verbal et indo-arabe:

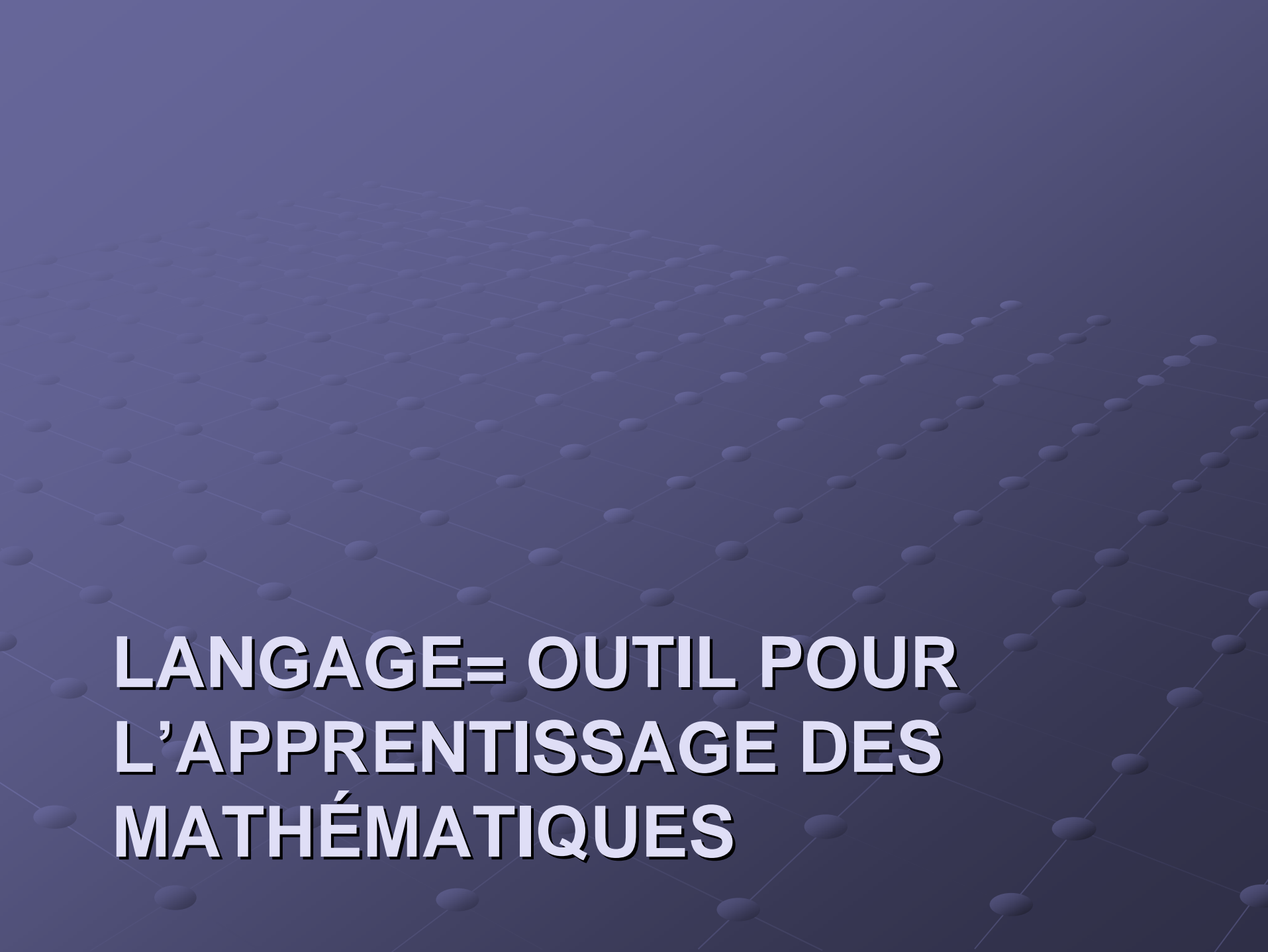
- signes arbitraires
 - Phonologiques et visuels resp.
 - Pas de relation analogique entre ces représentations et la quantité par exemple trois, 3 et ...
- Plus abstraits,
 - manipulation d'une infinité de quantités

● Les trois autres (bouliers, corps, marques)

- représentations analogiques (spatiales)
- Acquisition plus aisée
 - Pas facile pour les grandes quantités

Codage et précision

- Les représentations précises de quantités ont un format verbal
- Alors que les représentations approximatives sont indépendantes de tout format.



**LANGAGE= OUTIL POUR
L'APPRENTISSAGE DES
MATHÉMATIQUES**

Langage et apprentissage mathématique

- Jusqu'à 5 ans, performances meilleures pour calculs élémentaires (addition, soustraction) présentées sous forme non verbale (jetons manipulables) que sous forme verbale (histoire)
 - À partir de 5 ans les performances sont comparables sauf pour les classes défavorisées
- initialement, le langage est plus un obstacle qu'une aide

Importance du codage verbal

- Meilleure performance des asiatiques (chinois, coréens) // occidentaux entre 3 et 5 ans.
- → système de numération verbale
 - la base dix est très visible dans le langage
 - dix-un pour onze
 - Trois-dix-huit pour trente huit
 - Meilleur système pour mémoriser (empan mnésique), évoquer, combiner, transformer les quantités

Langage comme aide procédurale

Transparence de la base 10 dans le langage asiatique vs occidental

- >Facilite correspondance codage indo-arabe et verbal
- >Facilite la compréhension de l'utilisation des nb pour la cardinalité
- >Facilite le calcul et la mémorisation des faits additifs du type $10+x$
- >Soulage la MDT pour la réalisation d'opérations

Le langage comme outil procédural

le langage peut être vu

-> comme instrument de la cognition
arithmétique

et facilite la mise en place et l'exécution de
procédures.

Le langage comme aide à l'installation de connaissances déclaratives

- Les tables de multiplication sont stockées sous forme verbales
 - Ex: les polyglottes résolvent plus rapidement les opérations dans la langue où ils ont appris le nom des nombres
 - Troubles du langage associés à des atteintes de la multiplication

A 3D grid of spheres on a blue background. The spheres are arranged in a regular, repeating pattern that recedes into the distance, creating a sense of depth. The spheres are light blue and connected by thin, light blue lines. The background is a solid, medium blue color.

CONCLUSIONS

Conclusions

- Subitisation, estimation, calcul présent par les animaux, les enfants et les adultes
- Relation spatiale \leftrightarrow zone du cerveau
- Comptage: Langage et mathématiques

Mais encore

- le neurone du nombre chez les macaques



**CIRCUITS CÉRÉBRAUX DE
L'ARITHMÉTIQUE
ÉLÉMENTAIRE**

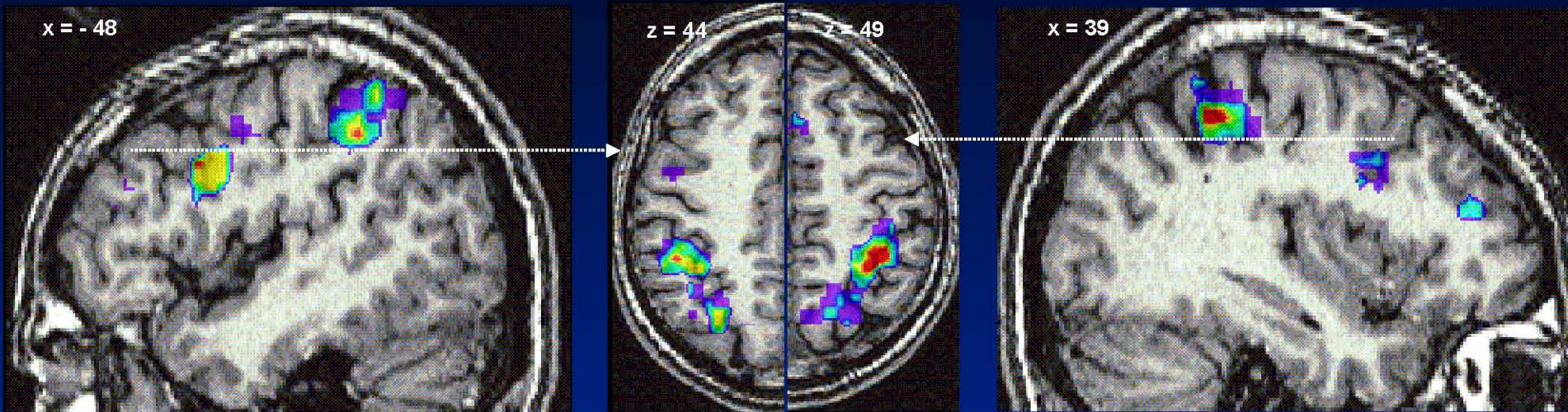
**TÂCHE NUMÉRIQUE= LOBE
PARIÉTAL (SILLON
INTRAPARIÉTAL)**

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

Hémisphère gauche

Coupe horizontale

Hémisphère droit

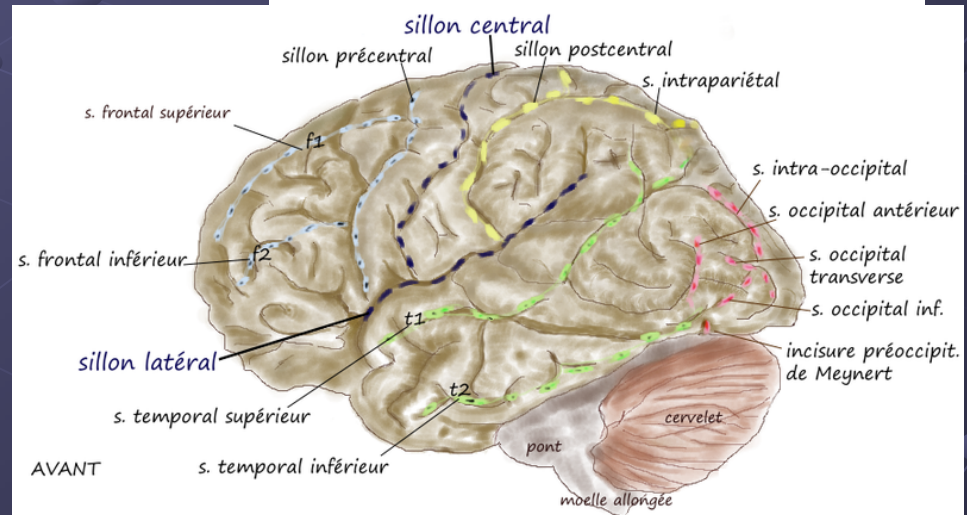
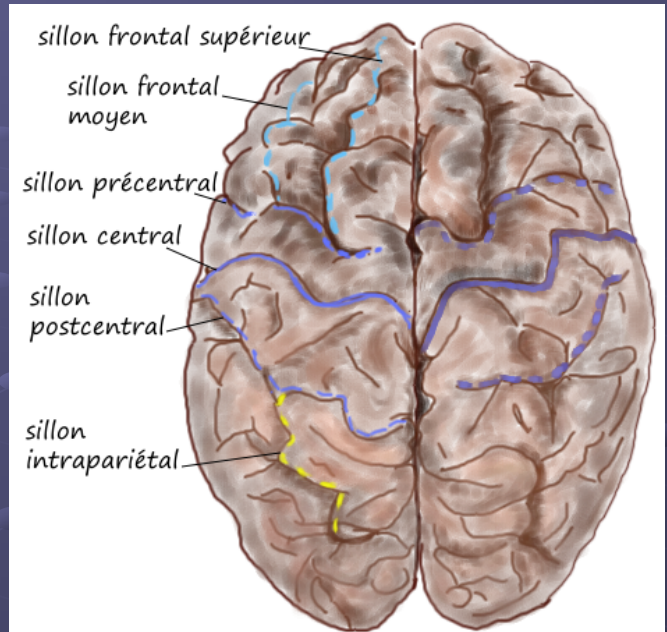


Méta-analyse de Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). *Cognitive Neuropsychology*

- 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)

Sillon intrapariétal

- sillon de la face latérale supérieure du lobe pariétal du cortex. Il débute au niveau du sillon postcentral, avec lequel il s'anastomose, et se dirige vers l'arrière jusque dans le lobe occipital où il prend le nom de sillon intra-occipital.

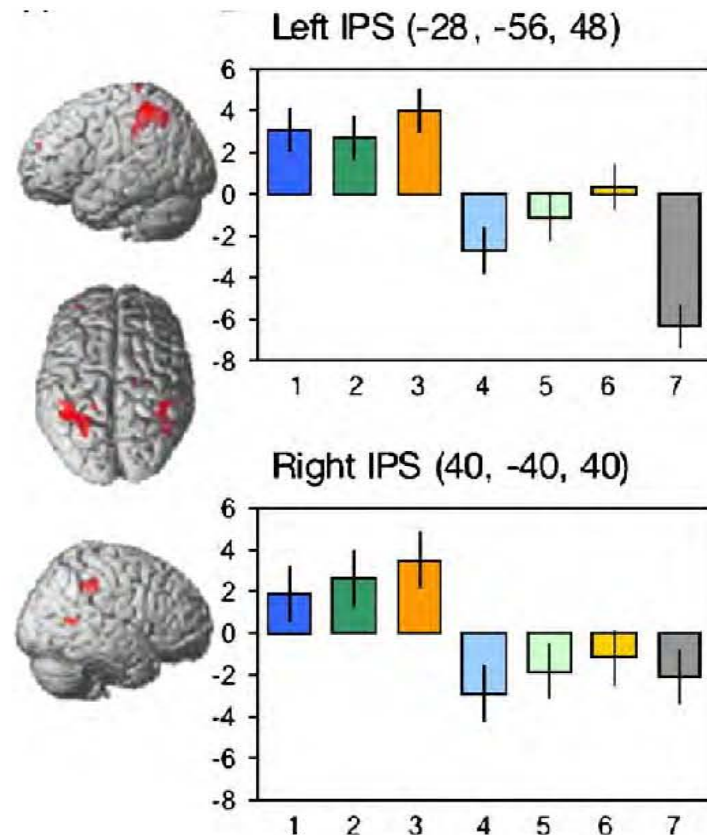
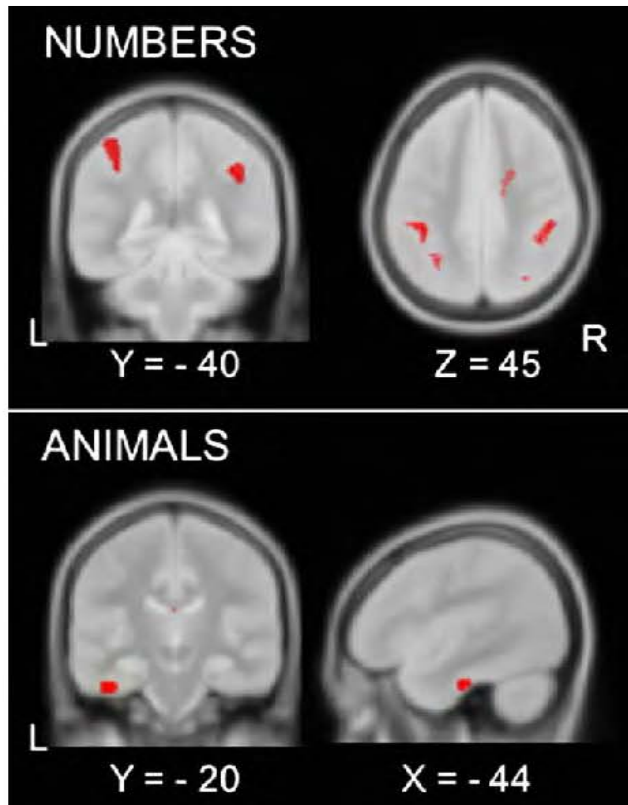


Spécificité pour la catégorie sémantique des nombres

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


Experimental design

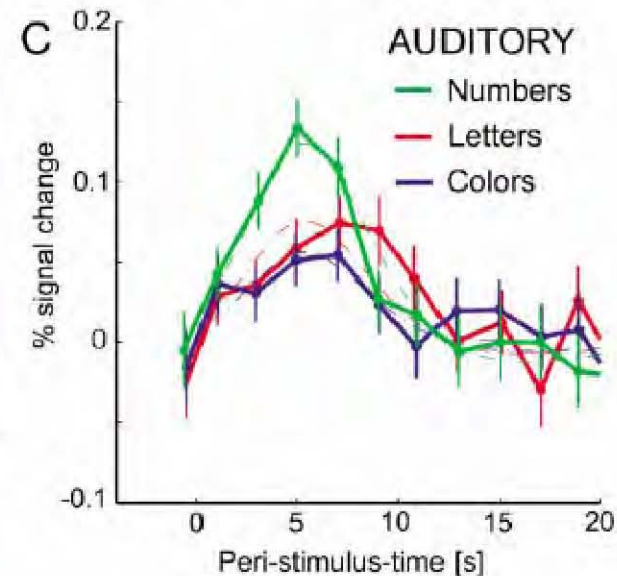
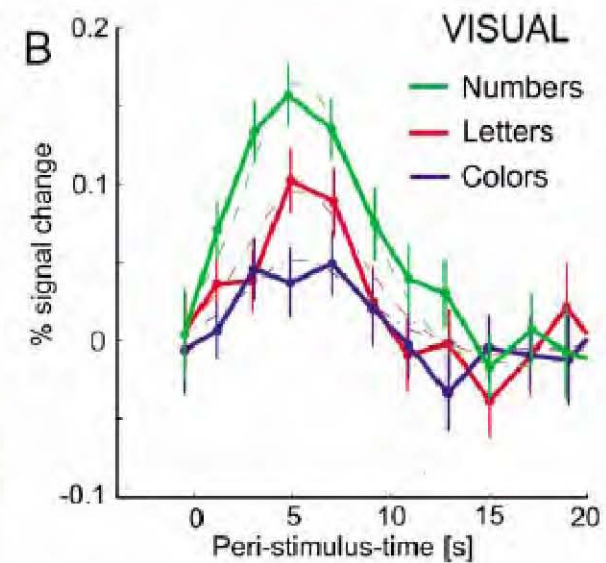
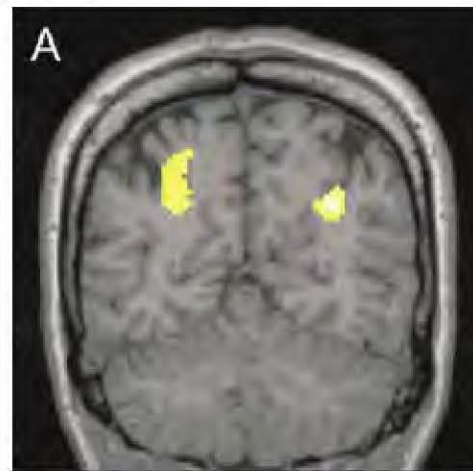
	Number words	Animal names
Comparison task	<i>Is it larger than five?</i> e.g. SIX (Yes)	<i>Is it more ferocious than a dog?</i> e.g. BEAR (Yes)
Classification task	<i>Is it an even number?</i> e.g. SIX (Yes)	<i>Is it a mammal?</i> e.g. BEAR (Yes)
Control task	<i>Is it written in plain characters?</i>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

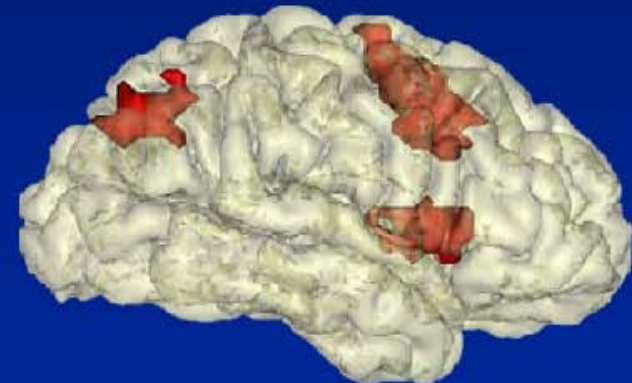
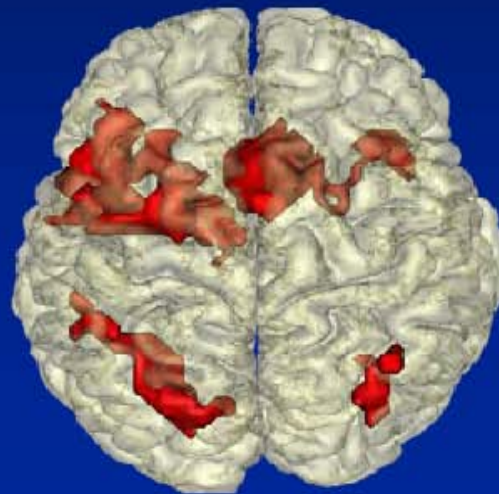
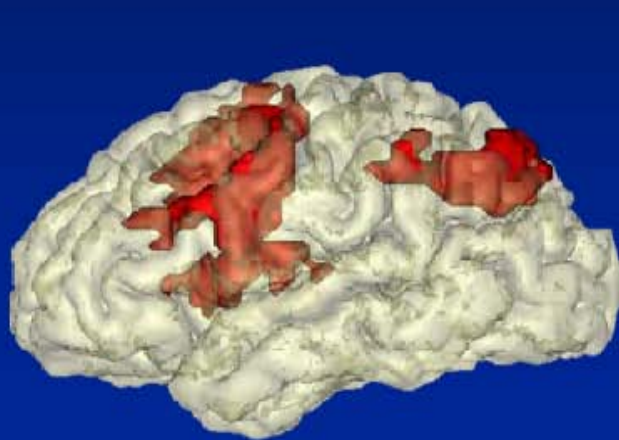
- La région pariétale est impliquée dans de très nombreux processus
 - Transformations sensori-motrices
 - Attention visuo-spatiale
 - Transcodage graphème-phonème
- Nous avons contrasté 6 tâches distinctes chez les mêmes sujets
 - Calcul
 - Saccades
 - Attention visuo-spatiale
 - *Grasping*
 - Pointage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

Subtraction

Primary Task: Subtract a number
from 11 or from 15



Control: Name a letter

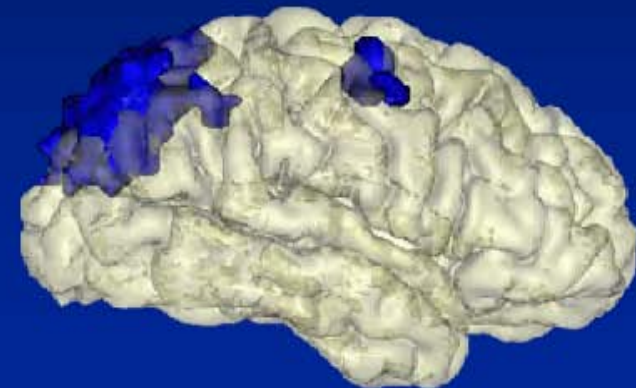
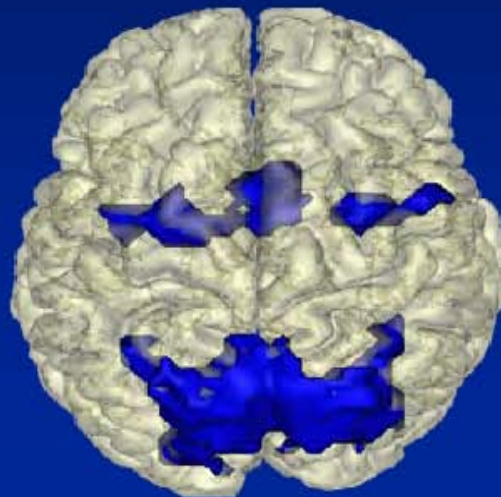
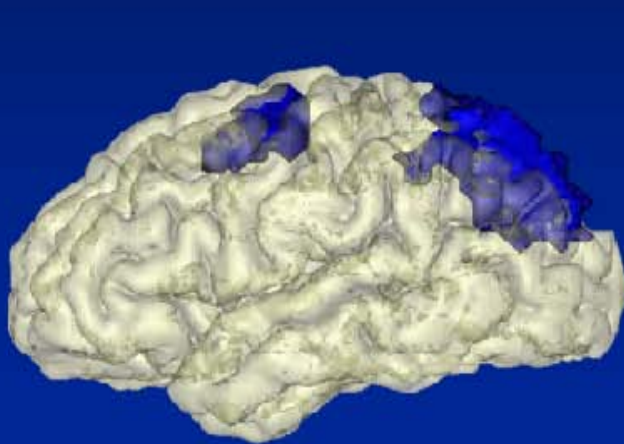


Florence Chochon, Olivier Simon

Saccades

Primary Task: Move gaze to target

Control: Maintain central fixation

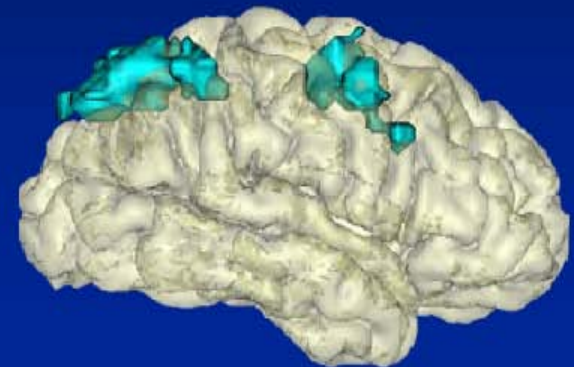
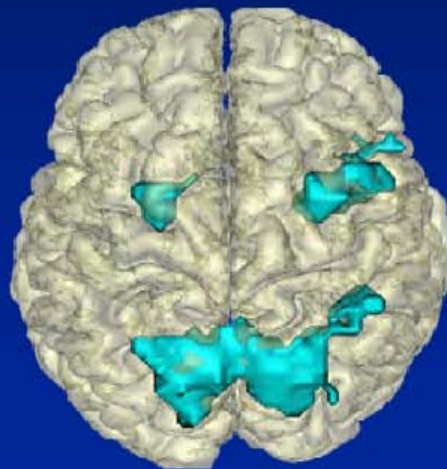
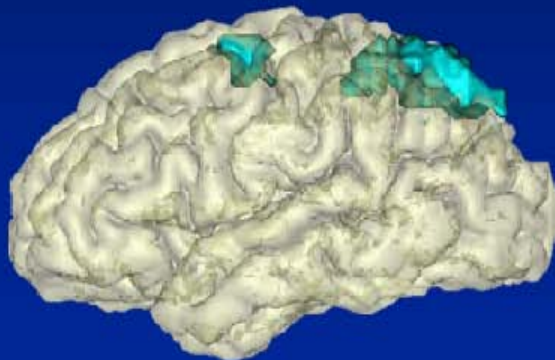


Olivier Simon

Movements of Visual Attention

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

Control: Detect central flashes



Olivier Simon

Grasping

Primary Task: Mimic grasping
of an object

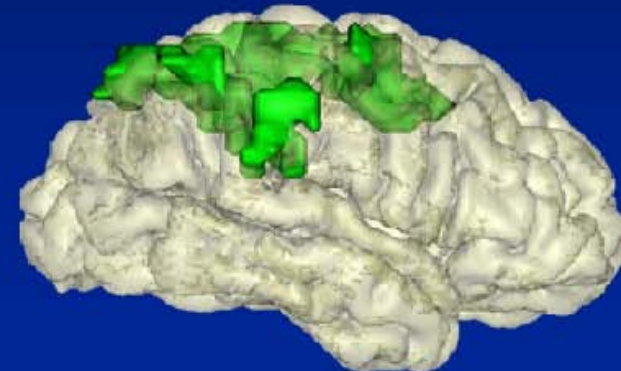
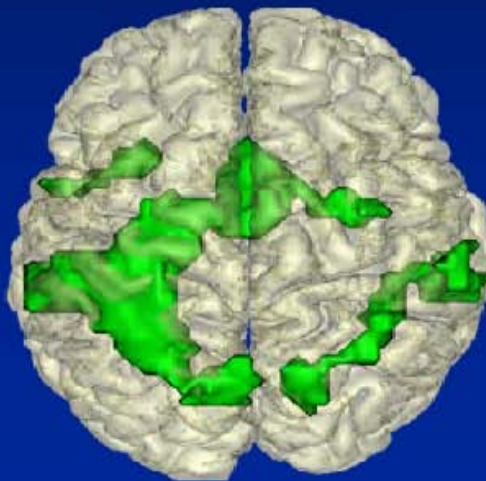
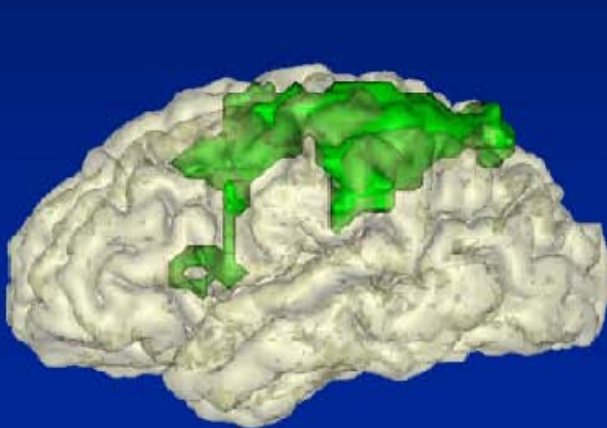


Control: Name object color



"red"

"green"

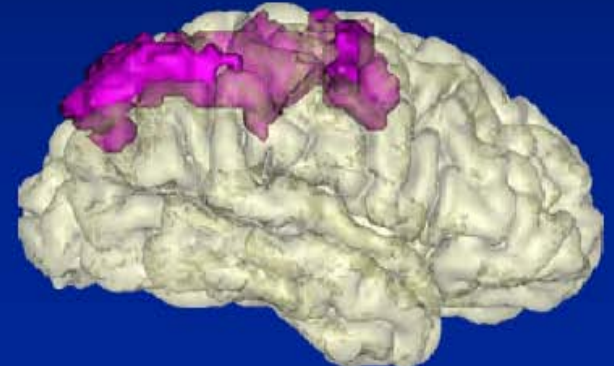
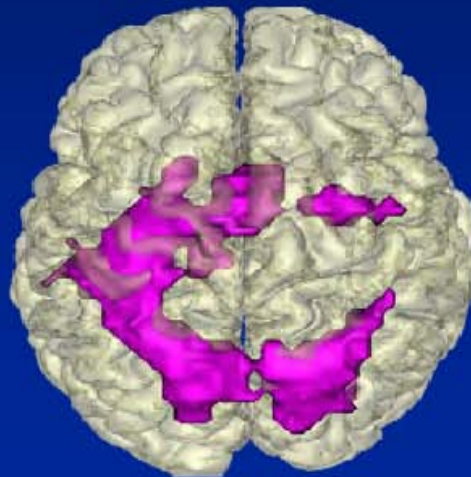
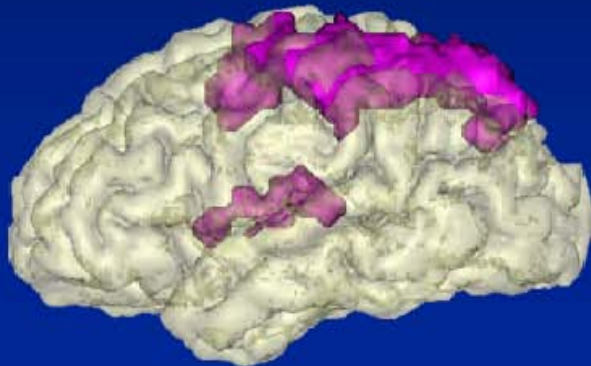


Olivier Simon

Finger Pointing

Primary Task: Point finger to target

Control: Maintain finger centrally



Olivier Simon

Converting Orthography To Phonology

Primary Task: Decide if a word contains the sound "ε"

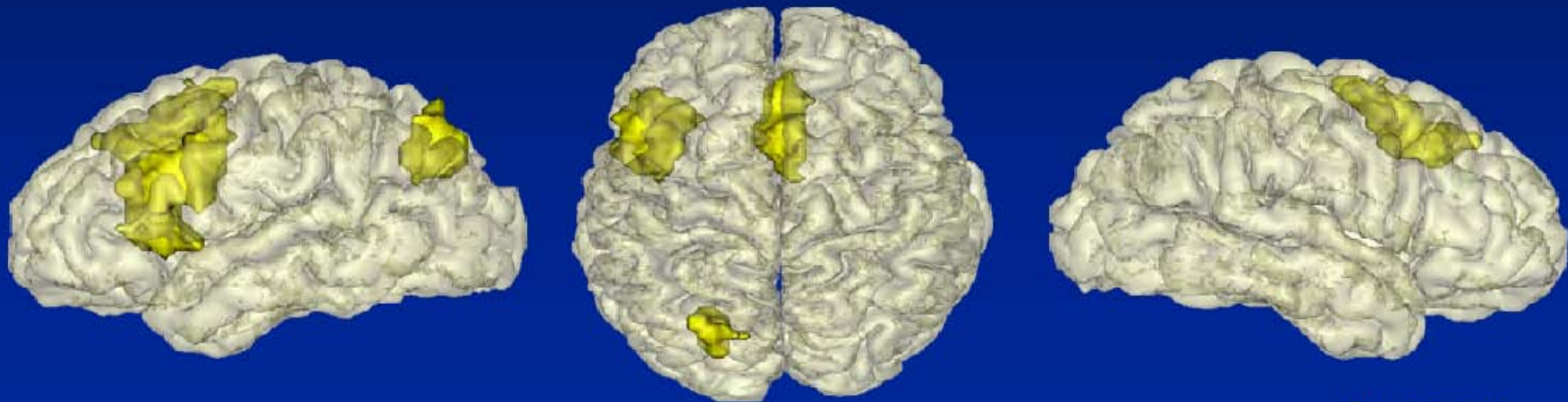
CONCERT

JOURNAL

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

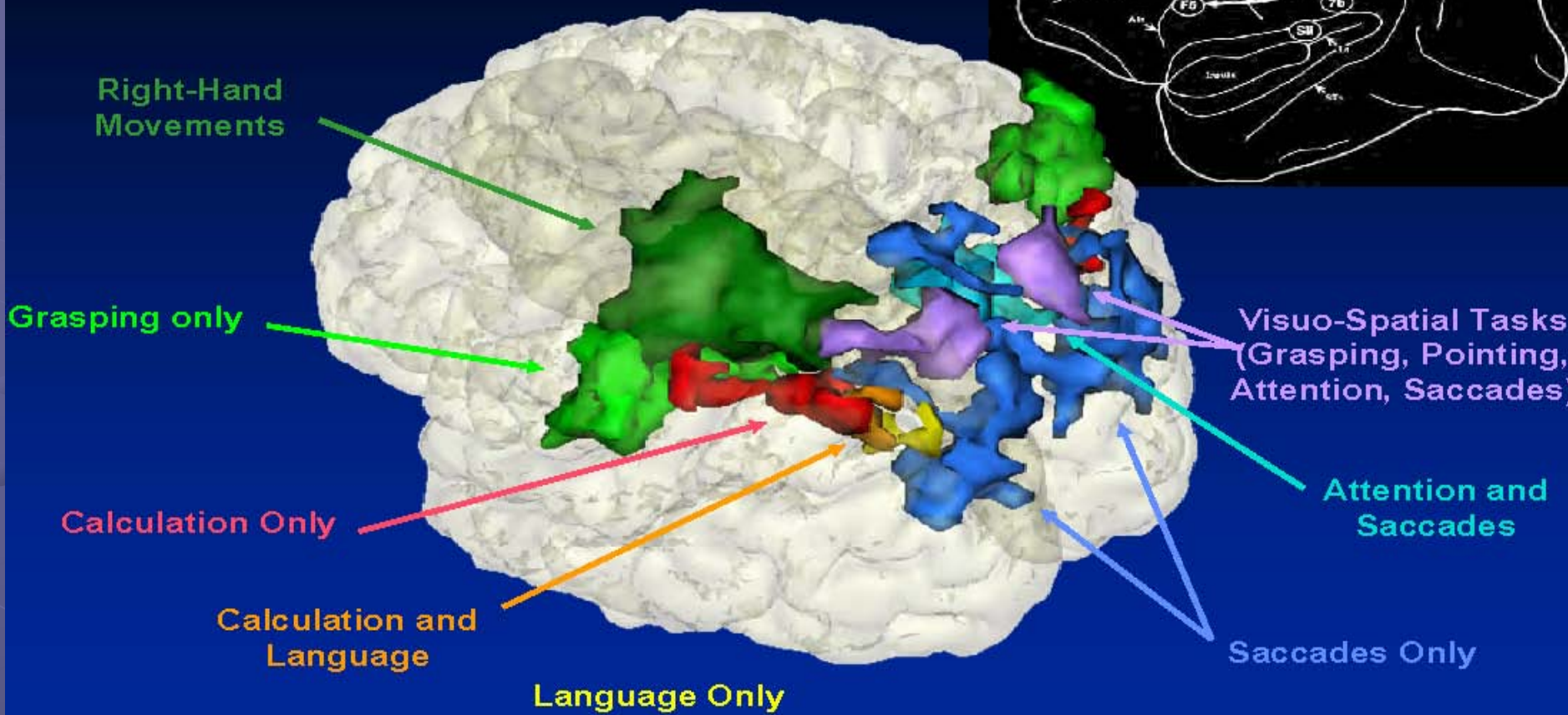
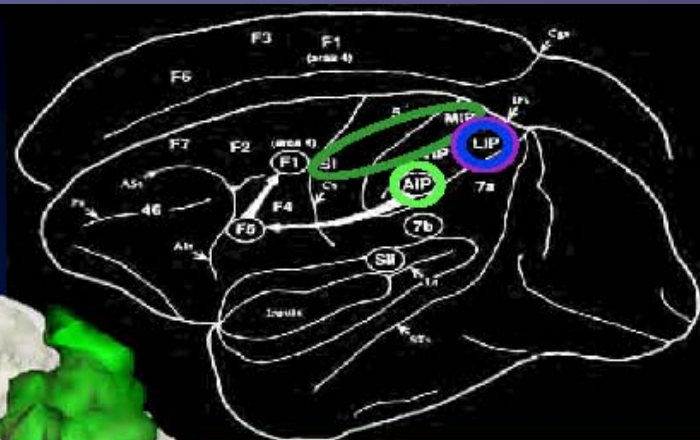
BCCJXFQ

tgdrfsx



Olivier Simon

Spécificité relative de la région intrapariétale pour le calcul mental

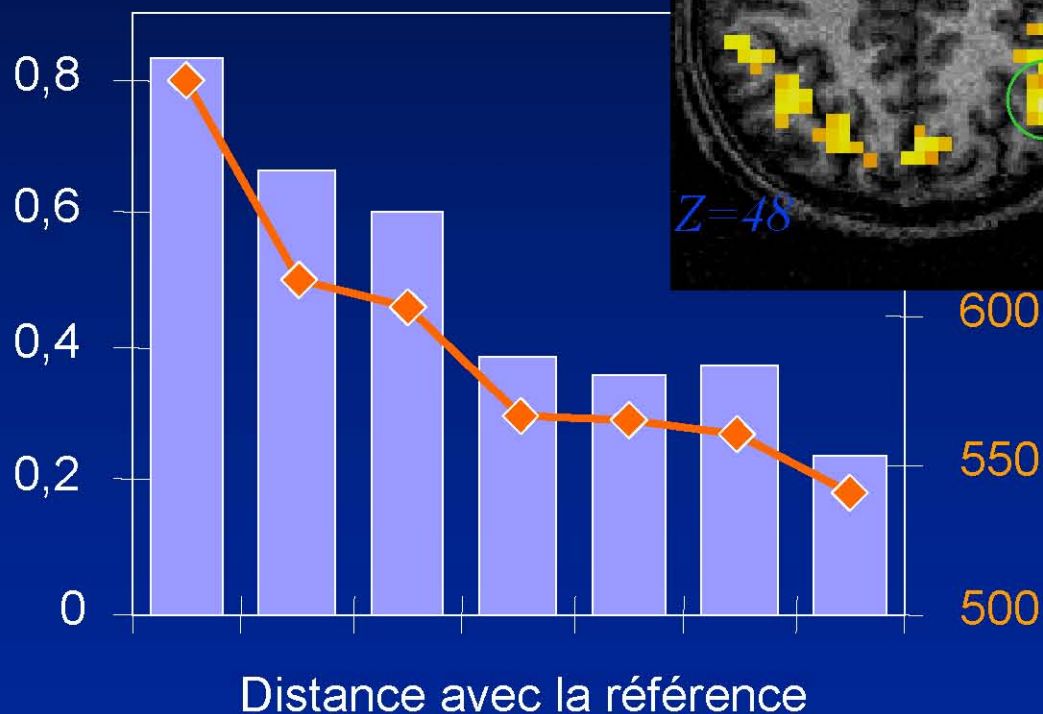


Olivier Simon

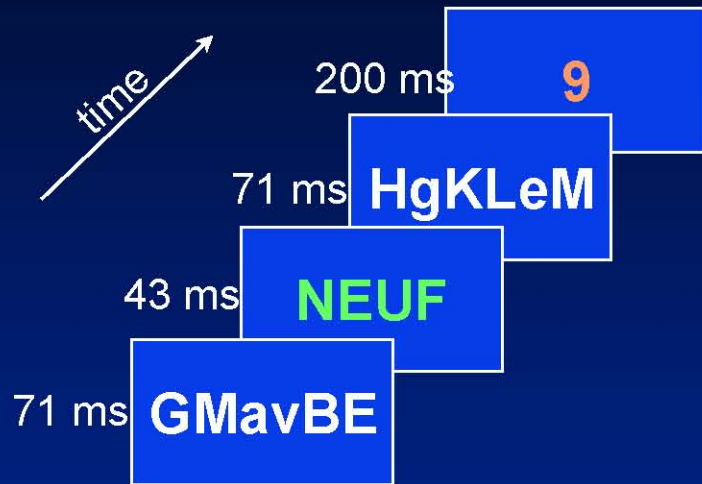
L'activation de la région intrapariétale obéit à une "métrique sémantique"



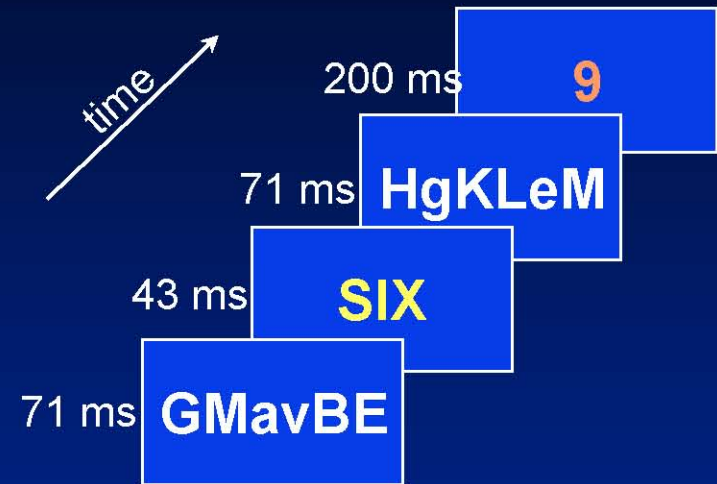
% activation



Le traitement inconscient des nombres



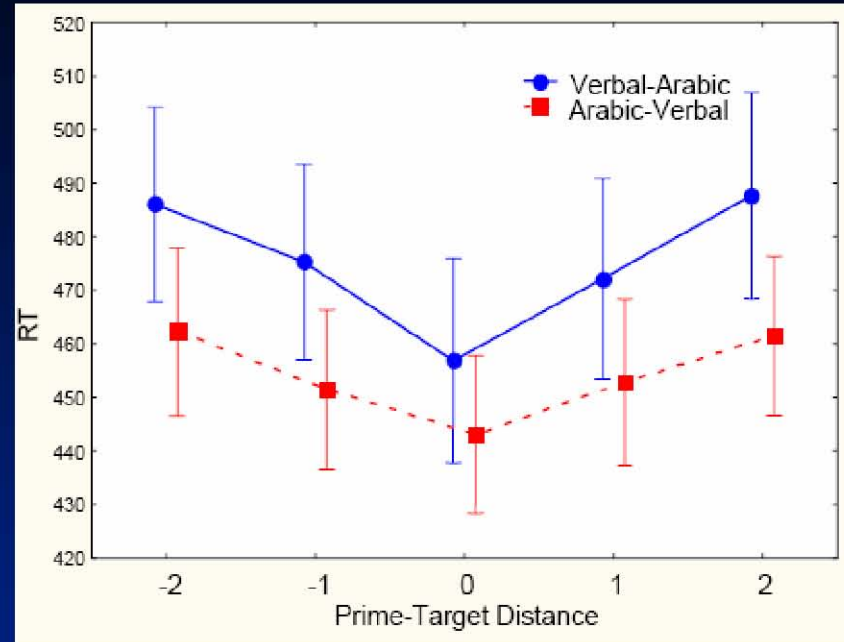
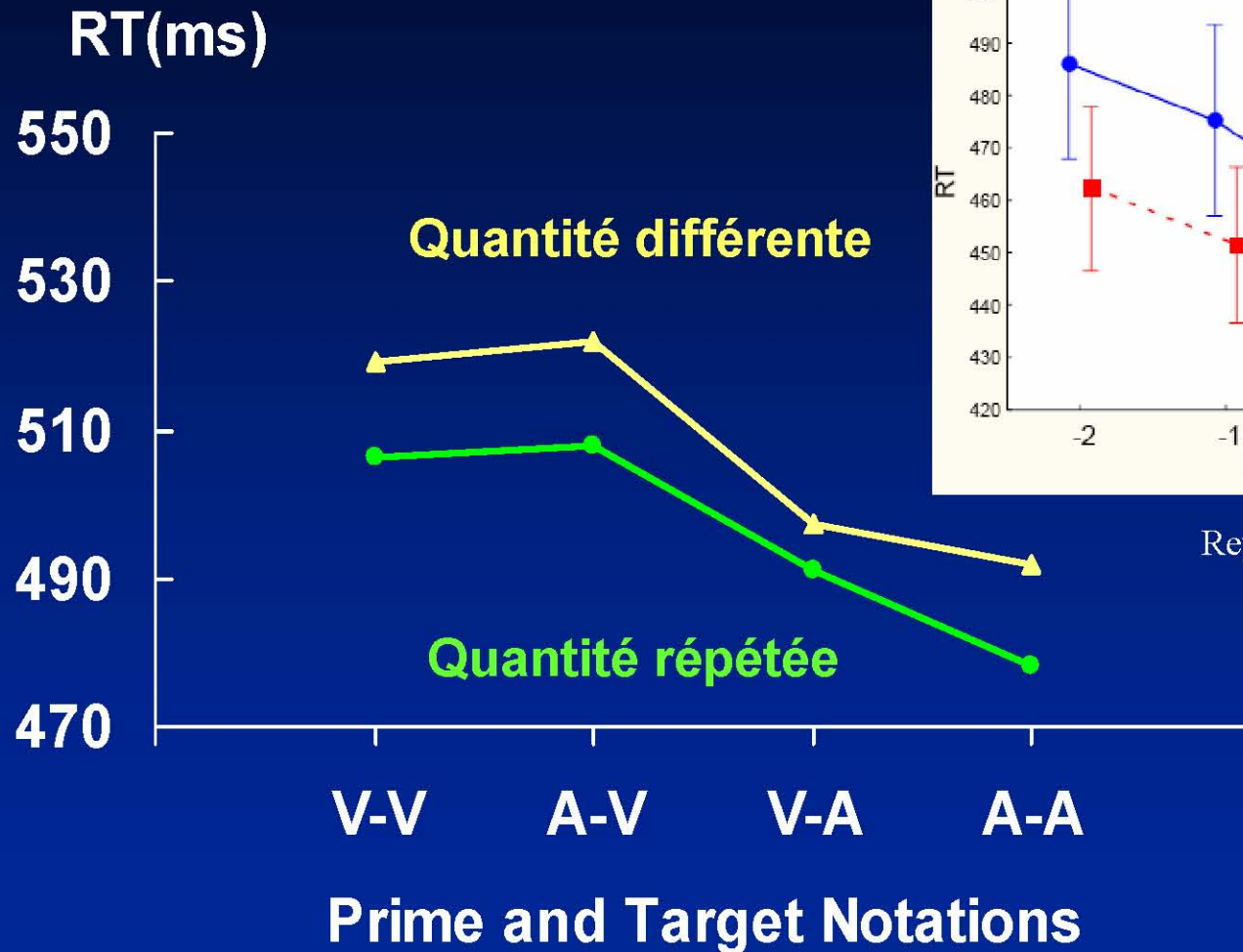
Même quantité



Deux quantités différentes

réponse de comparaison ralentie

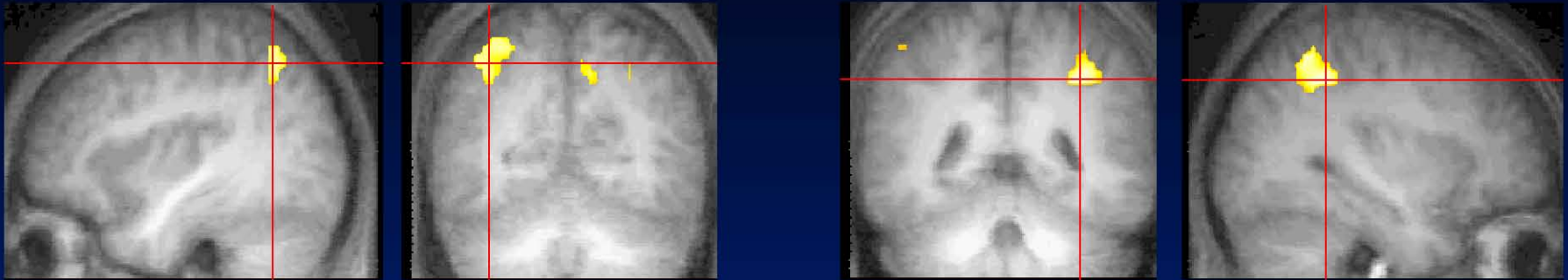
Amorçage comportemental indépendant de la notation



Reynvoet & Brysbaert (2004)

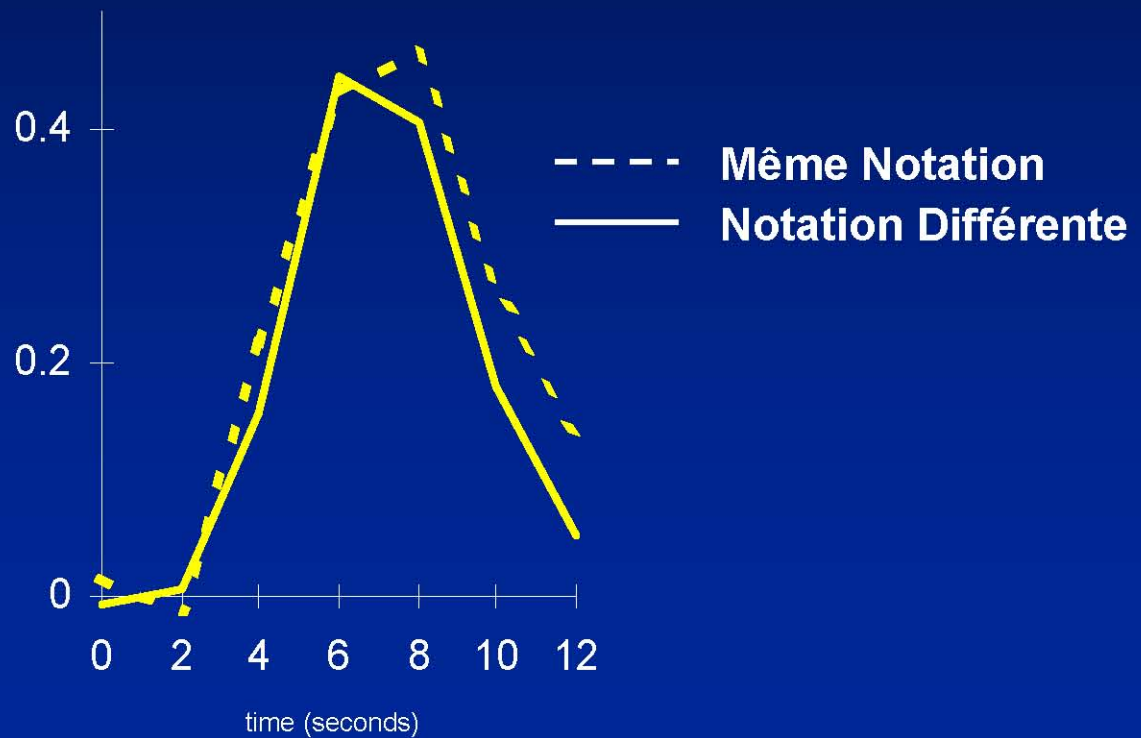
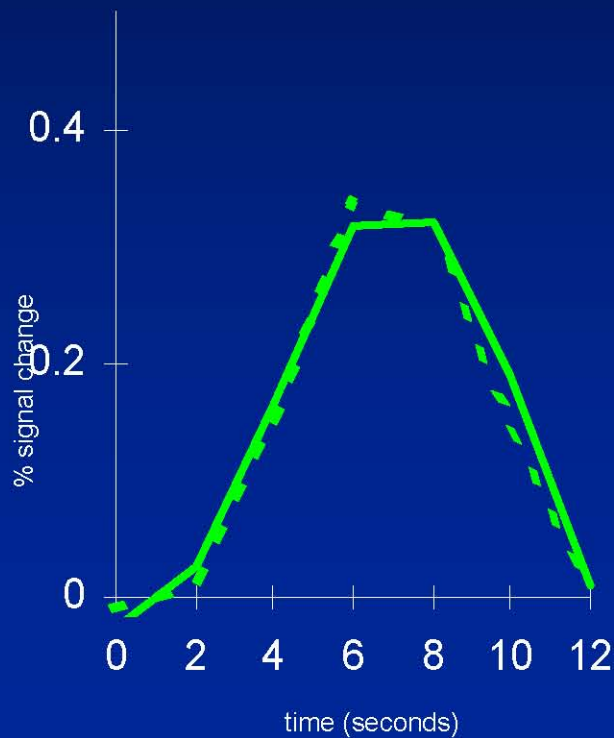
Traitement inconscient de la quantité

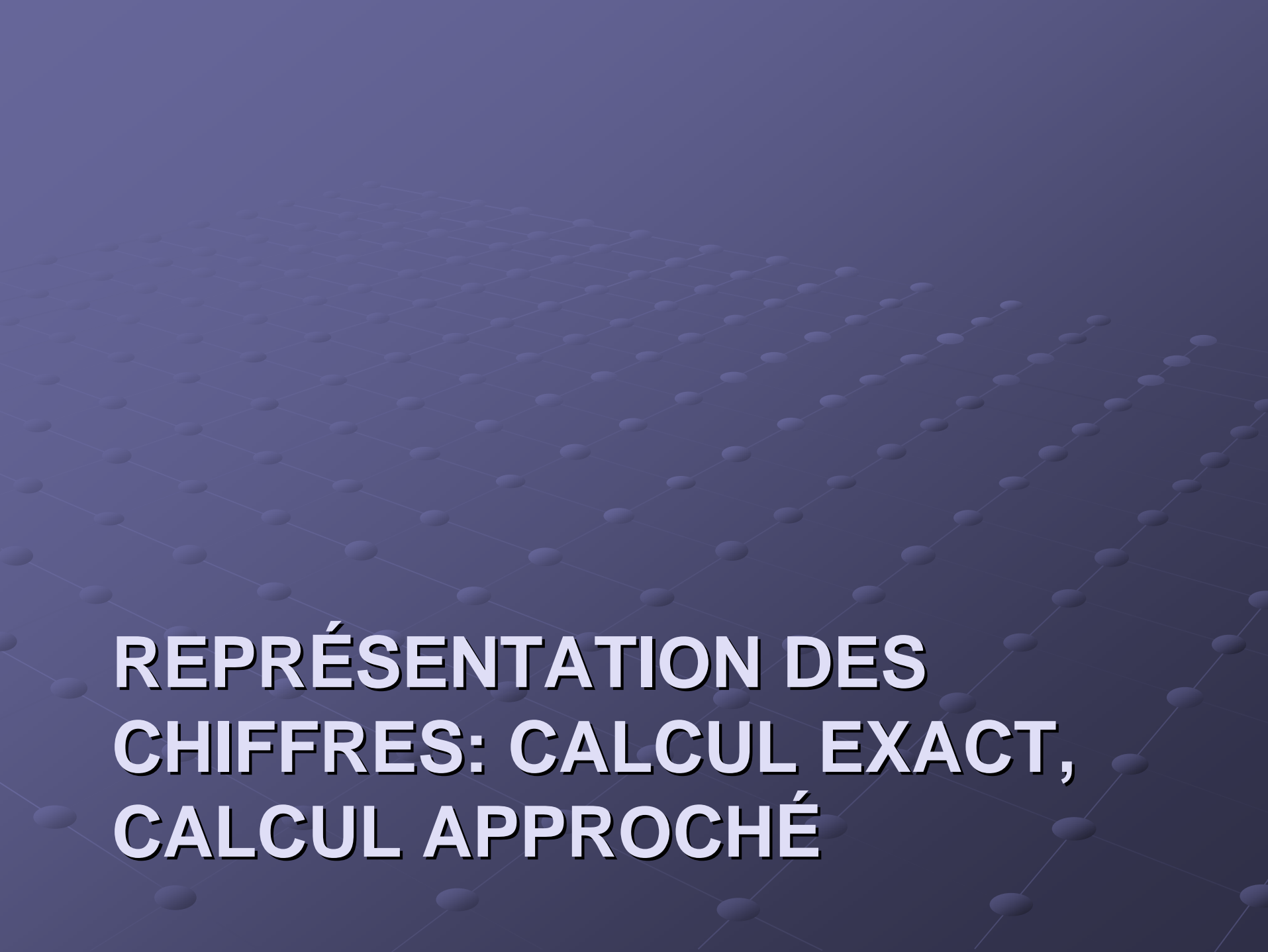
La région intrapariétale montre un effet d'amorçage inconscient



Même quantité

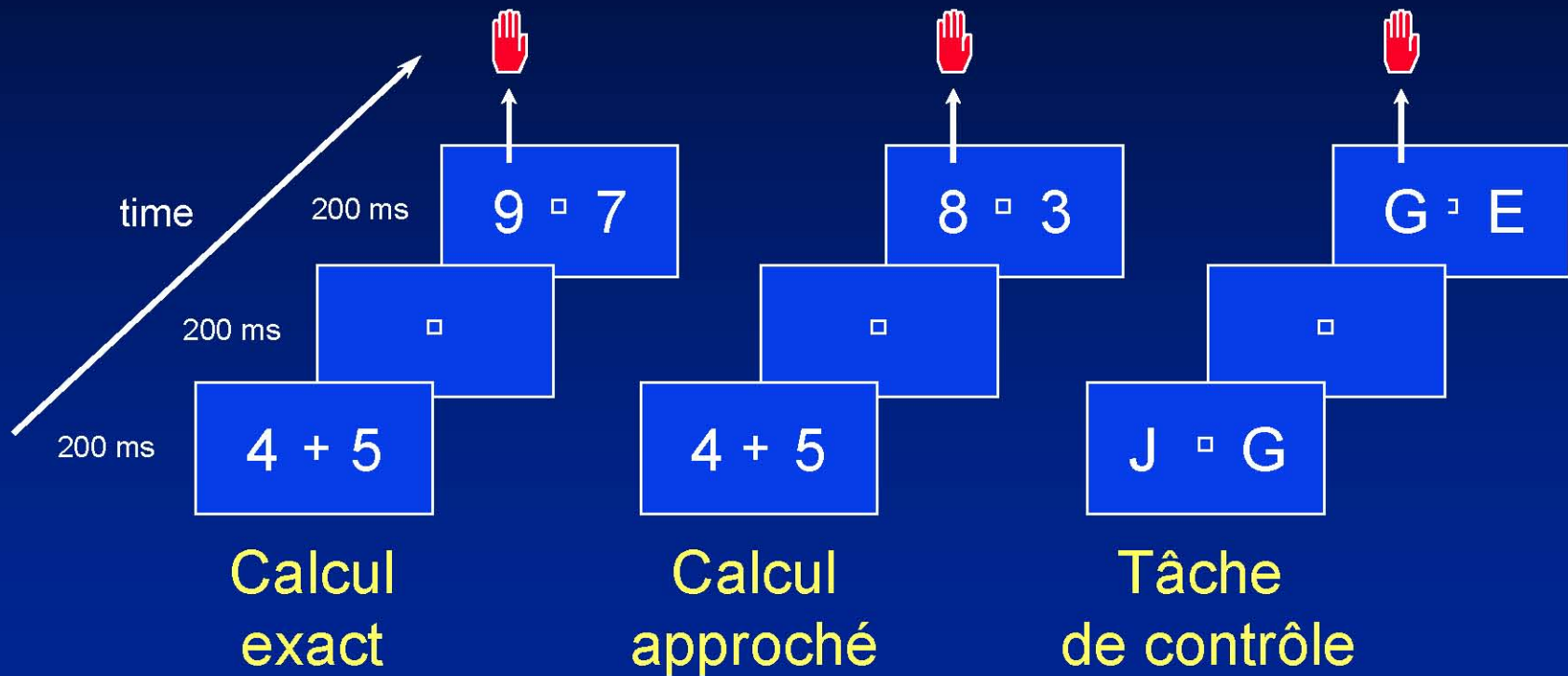
Deux quantités différentes





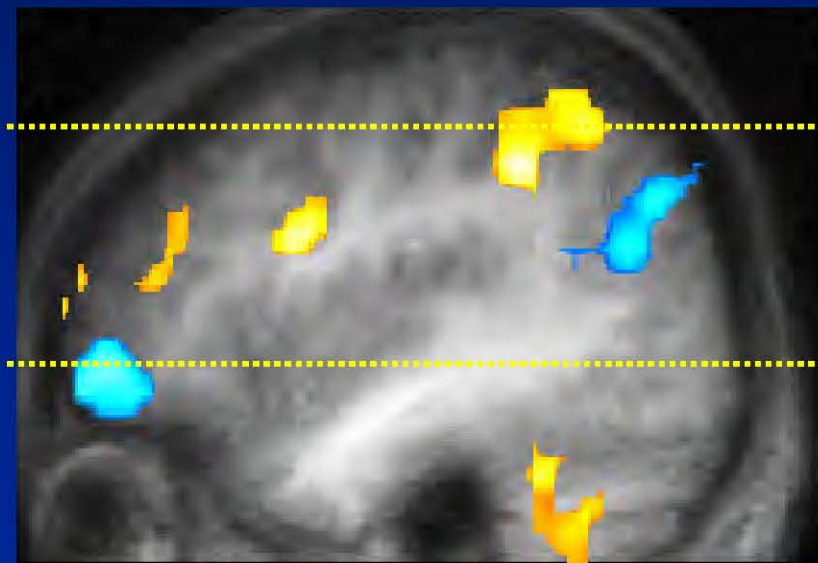
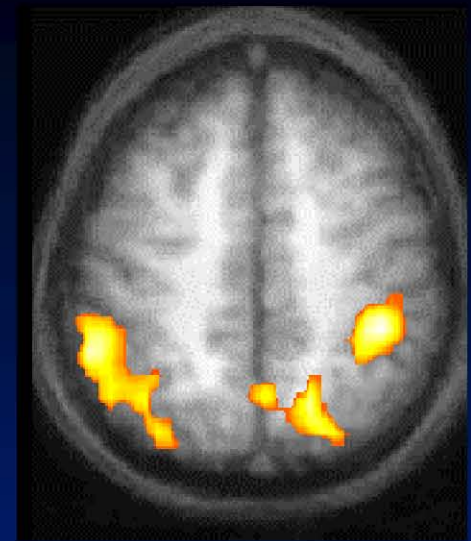
**REPRÉSENTATION DES
CHIFFRES: CALCUL EXACT,
CALCUL APPROCHÉ**

Approximation et calcul exact: Tâches utilisées pendant l'imagerie

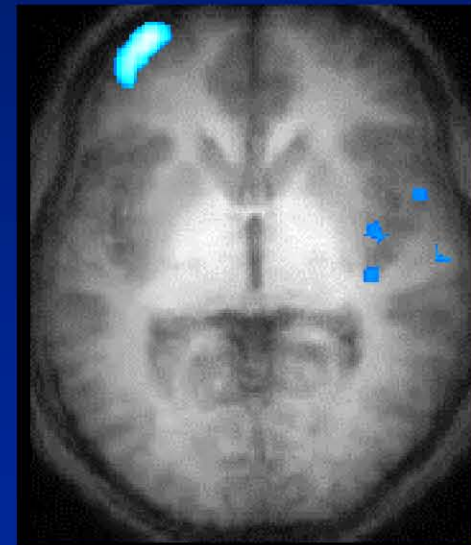


Dissociation du calcul exact et de l'approximation

Activation plus grande pour le calcul exact ← | → Activation plus grande pour l'approximation



Hémisphère gauche (x=-44)



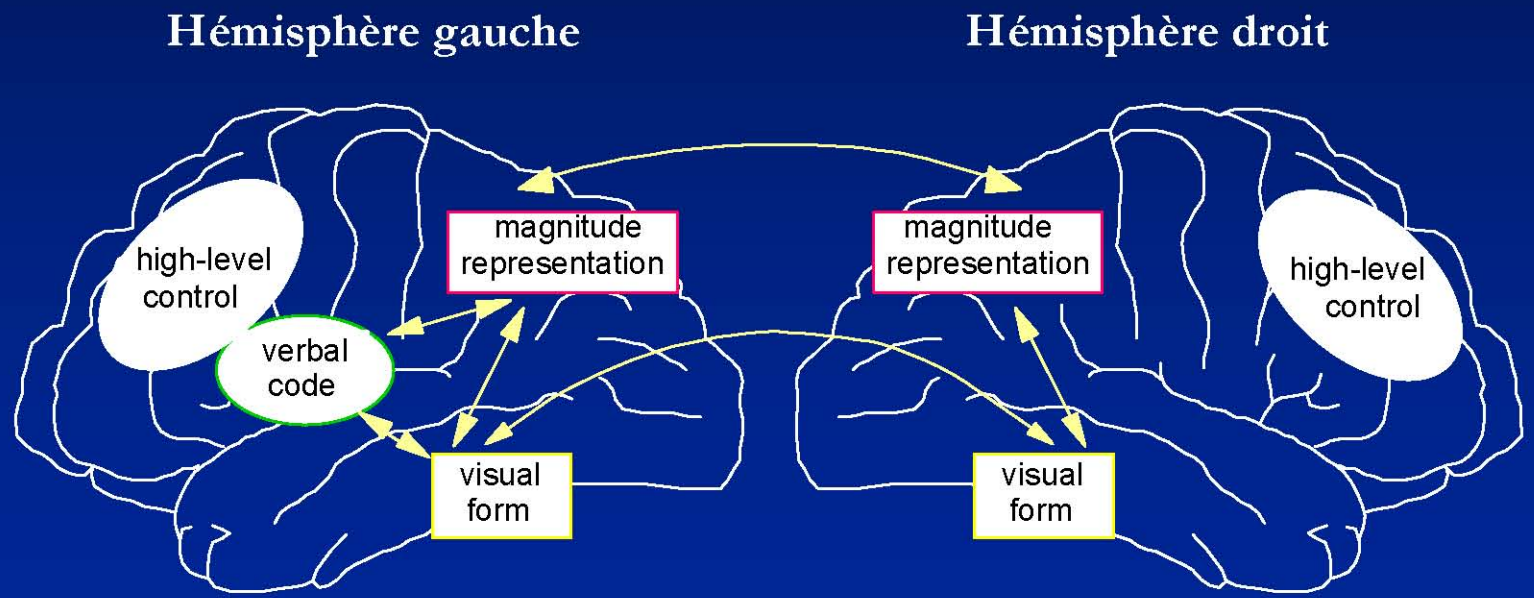
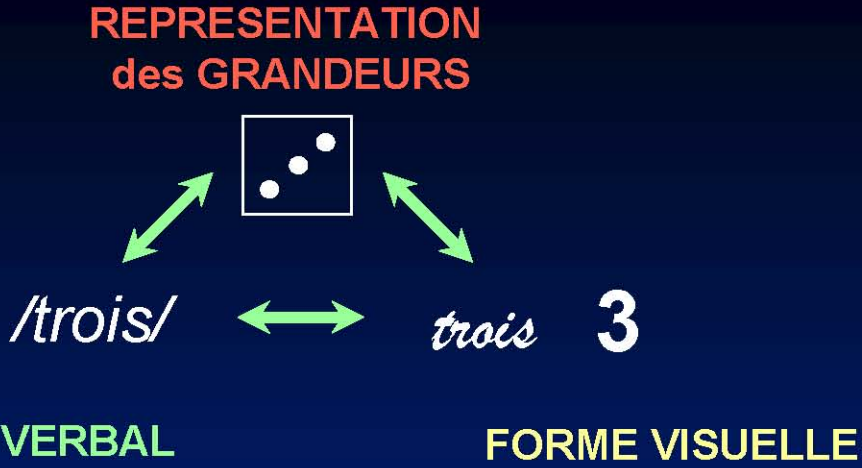
z=0

A 3D grid of spheres on a blue background. The spheres are arranged in a regular, repeating pattern that recedes into the distance, creating a sense of depth. The spheres are light blue and connected by thin, light blue lines. The background is a solid, medium blue color.

LE CODAGE DES NOMBRES

Le modèle du "triple code"

(Dehaene & Cohen, 1995)



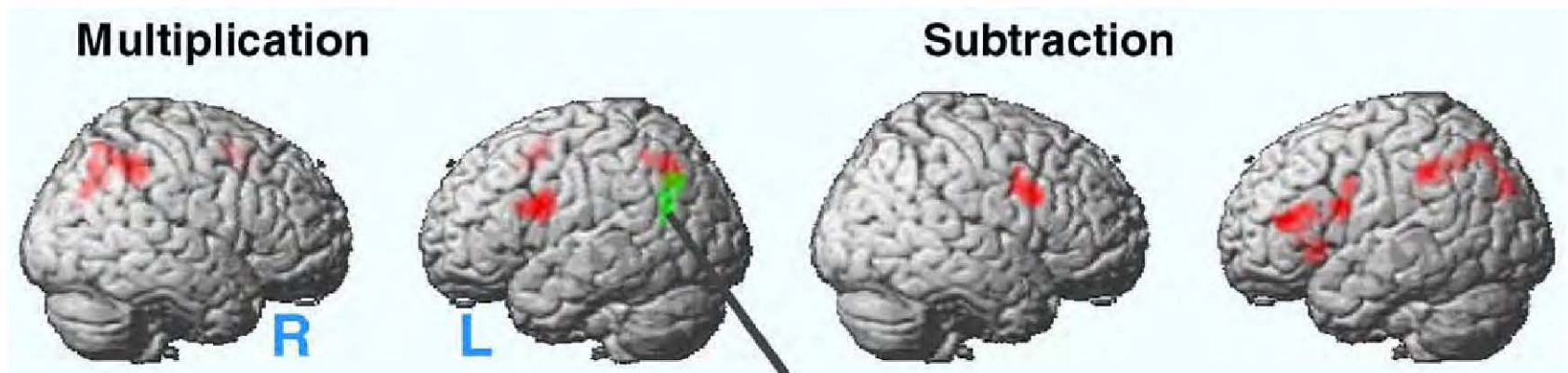
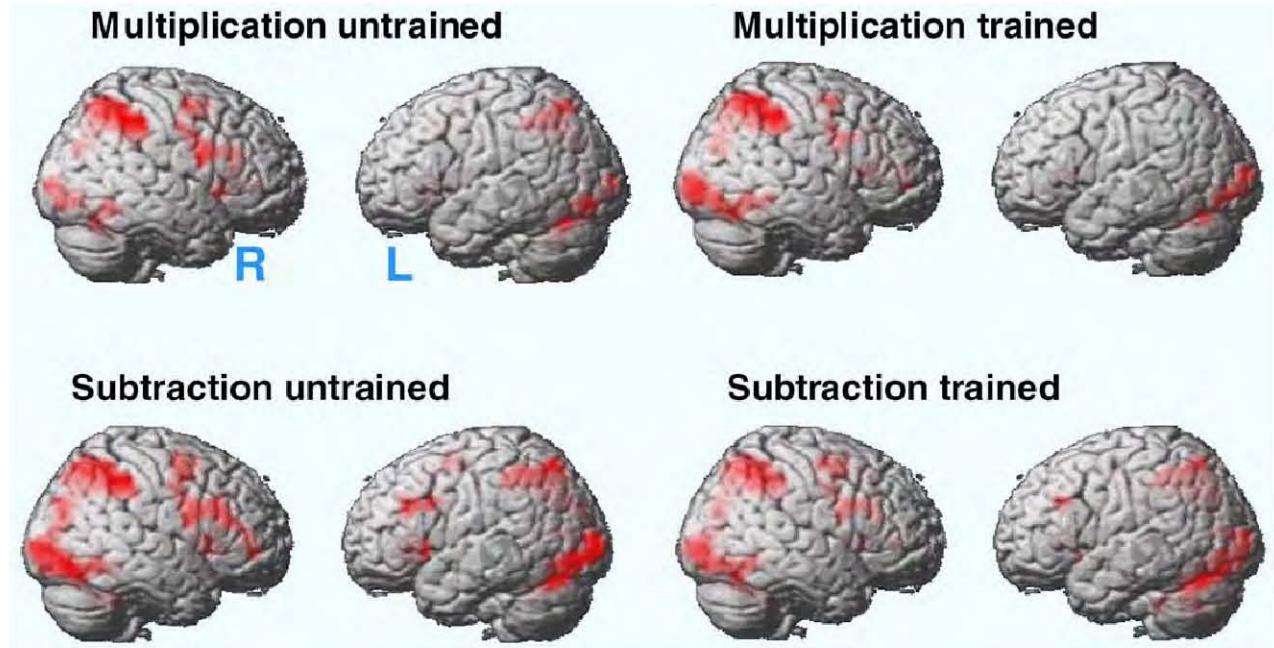
Dehaene, S. (1992). *Cognition*, 44, 1-42.
Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.

L'entraînement aux faits arithmétiques modifie les réseaux cérébraux

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

L'entraînement suscite:

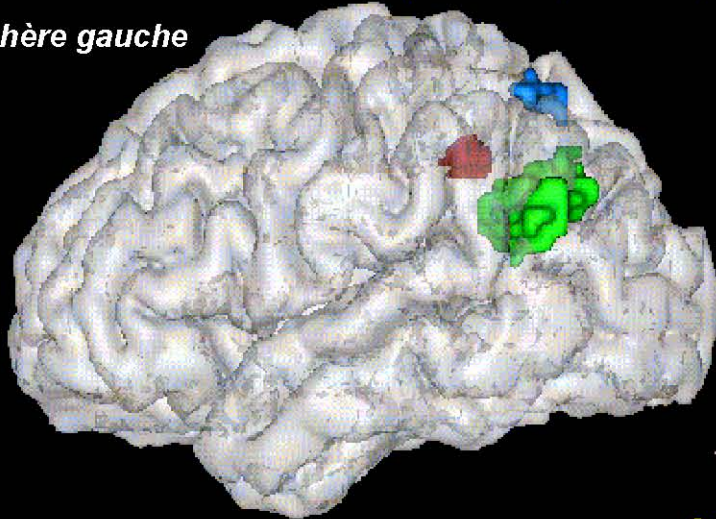
- une diminution de l'activité du réseau pariéto-frontal
- pour la multiplication mais pas pour la soustraction, un accroissement d'activité dans le gyrus angulaire gauche



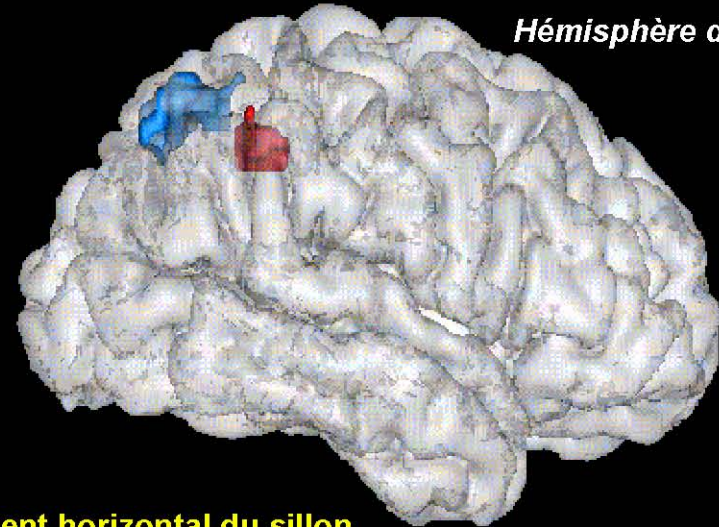
Trois régions pariétales impliquées dans l'arithmétique mentale

(Dehaene, Piazza, Pinel & Cohen 2003)

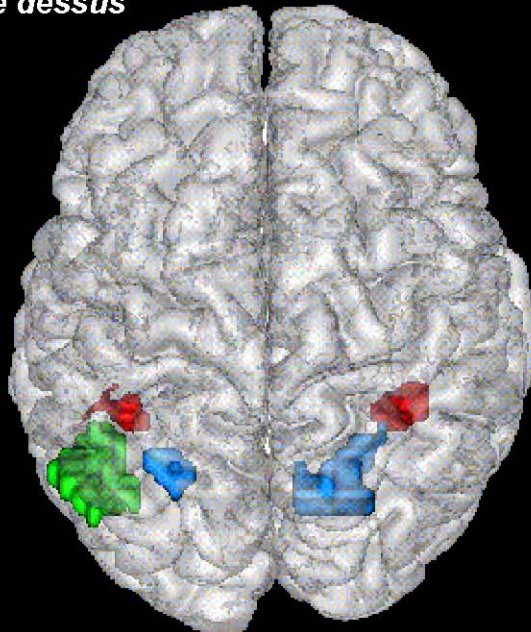
Hémisphère gauche



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)

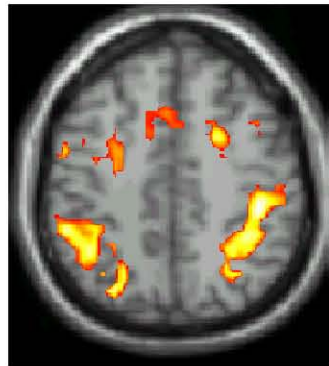
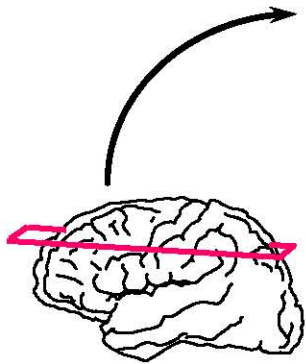
- Activation dans certaines tâches: soustraction, approximation, effet de distance
- Egalement activé lors de tâches d'attention visuo-spatiale
- Orientation de l'attention sur la "ligne numérique mentale"?



INTERPRÉTATION DE FORMES D'ACALCULIE

Evidence for the involvement of the parietal lobe in calculation

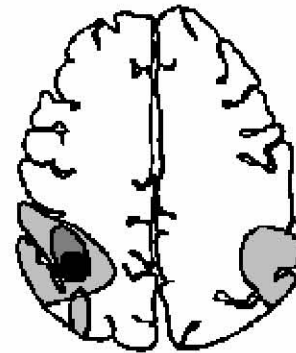
Activation during calculation



z=44

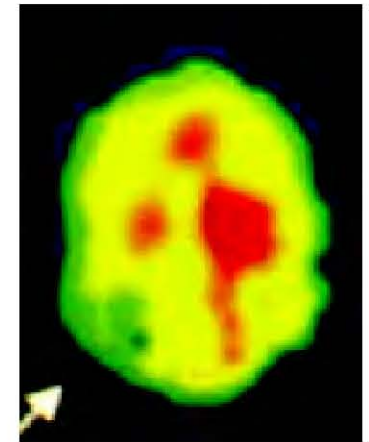
Chochon, Cohen, van de Moortele, & Dehaene (1999)
Journal of Cognitive Neuroscience
(also Roland & Friberg, 1985 [SPECT];
Appolonio et al., 1994 [fMRI]; Dehaene
et al., 1996 [PET])

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.

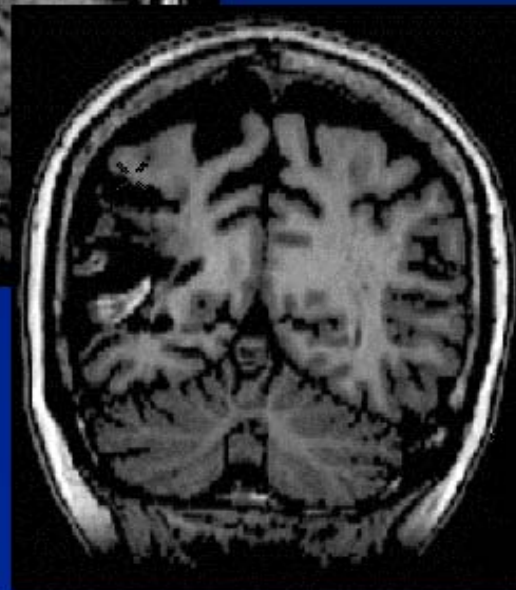
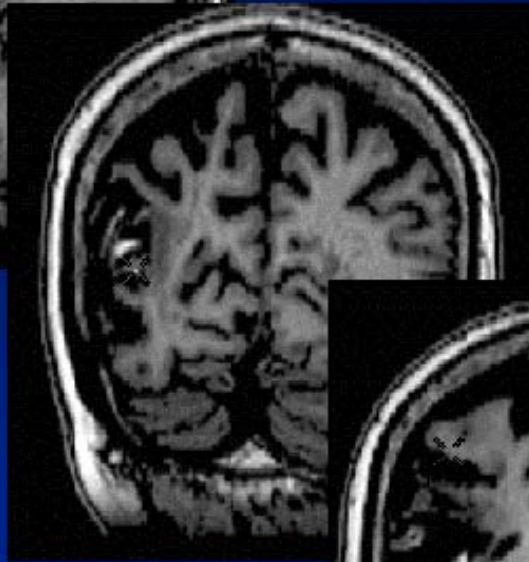
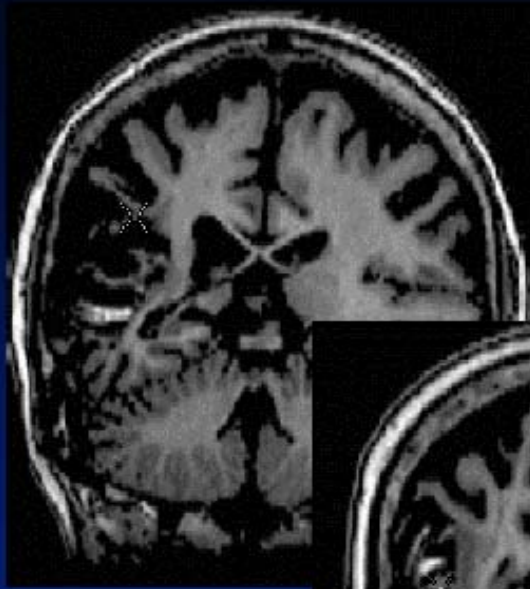
- Troubles du traitement verbal des nombres:

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

- Troubles de la représentation des quantités:

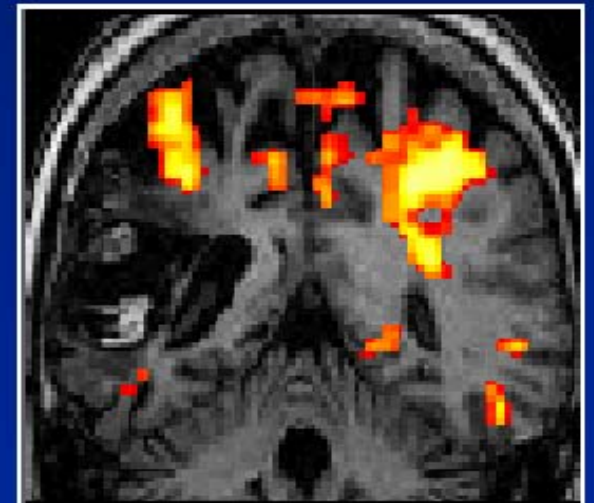
- déficit restreint aux quantités numériques
- préservation des faits arithmétiques (table de multiplication)
- déficit du calcul, mais aussi de la sémantique des nombres

Déficit lié au système verbal



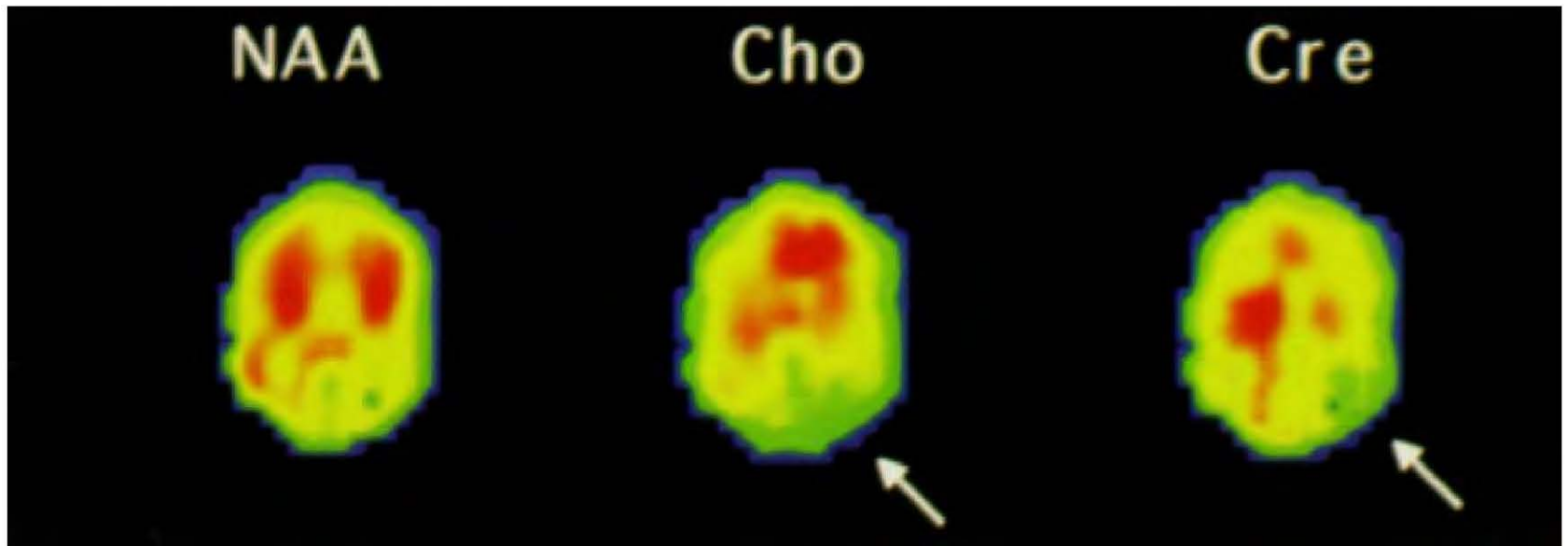
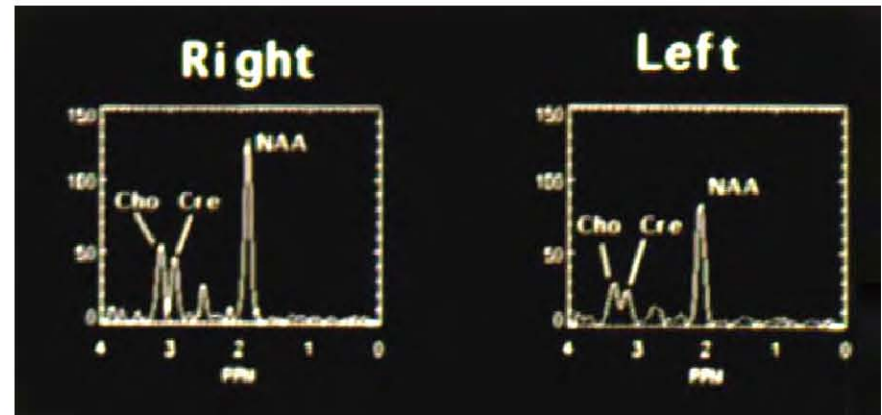
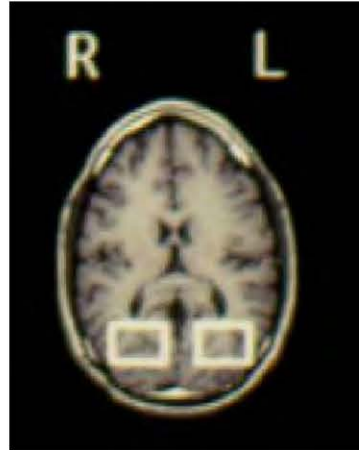
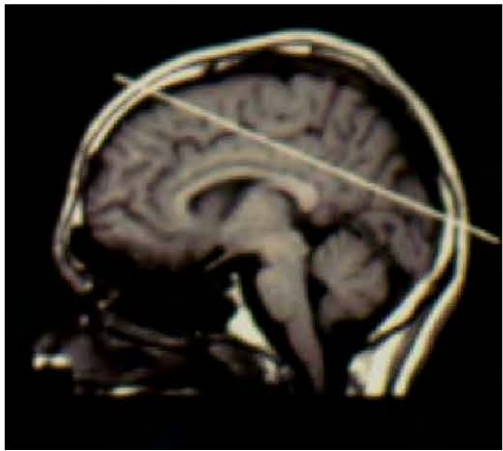
Patiente ATH:

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

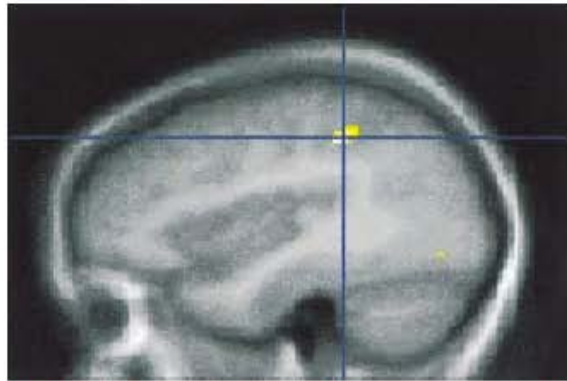


Anomalies métaboliques dans le cortex pariétal inférieur gauche dans un cas de dyscalculie développementale

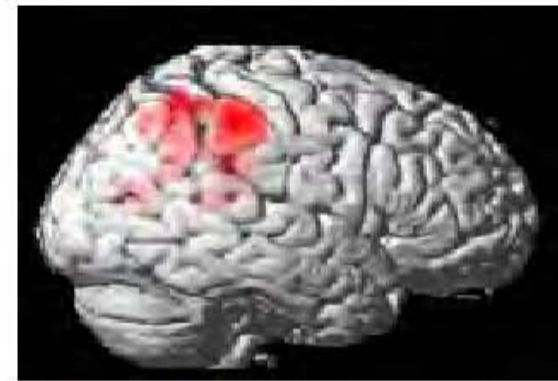
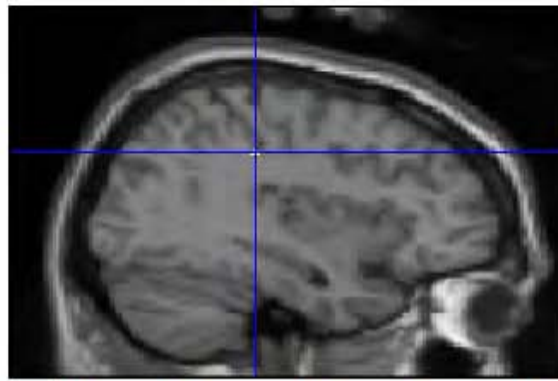
Levy, Reis and Grafman, Neurology, 1999



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.



LES NEURONES DE NOMBRE

A la recherche de lois universelles en psychologie

« Multiples niveaux de mise en relation « neuro - psychologique » »

~~Psychologie =
« Software »~~

~~Neurobiologie =
« Hardware »~~

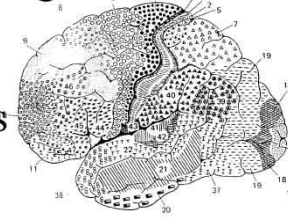
Culture et
éducation



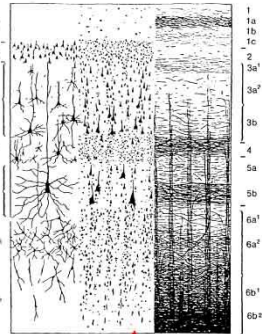
Comportements



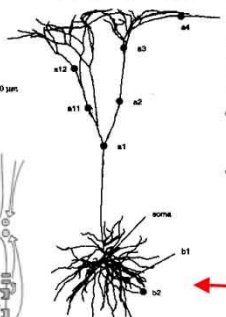
Régions et circuits



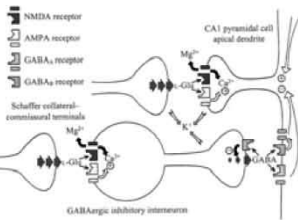
Colonnes corticales



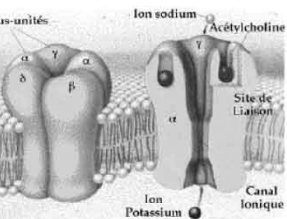
Neurones



Synapses



Récepteurs



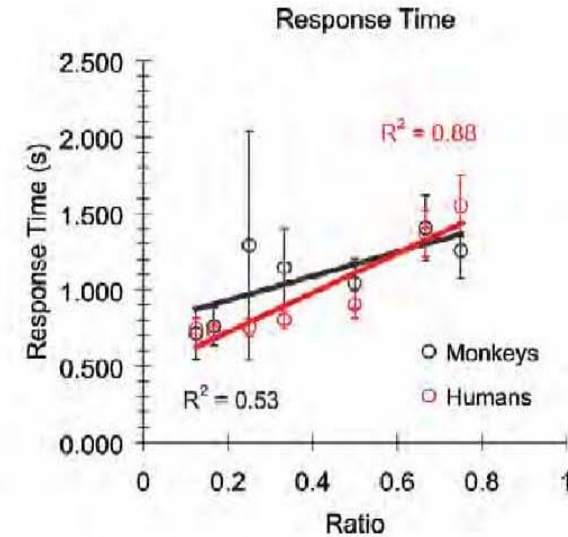
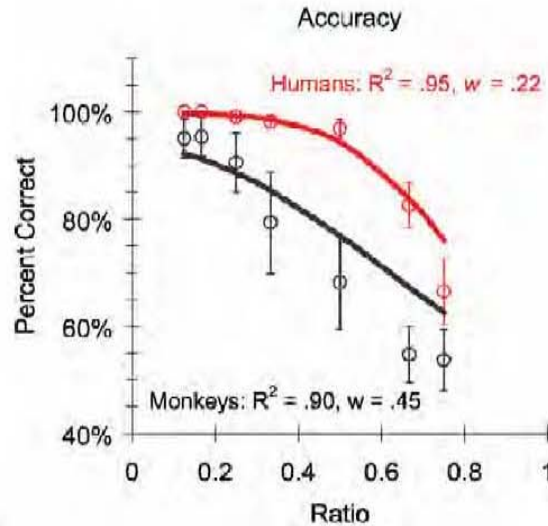
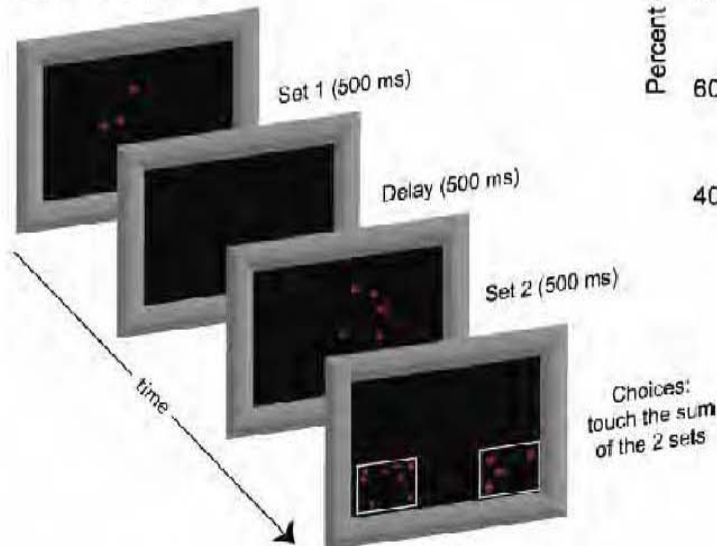
Recherche de
lois de transition
entre niveaux enchâssés

Parallèles étroits entre les compétences numériques de l'espèce humaine et de nombreuses autres espèces animales

Basic Math in Monkeys and College Students

Jessica F. Cantlon*, Elizabeth M. Brannon

Addition Task

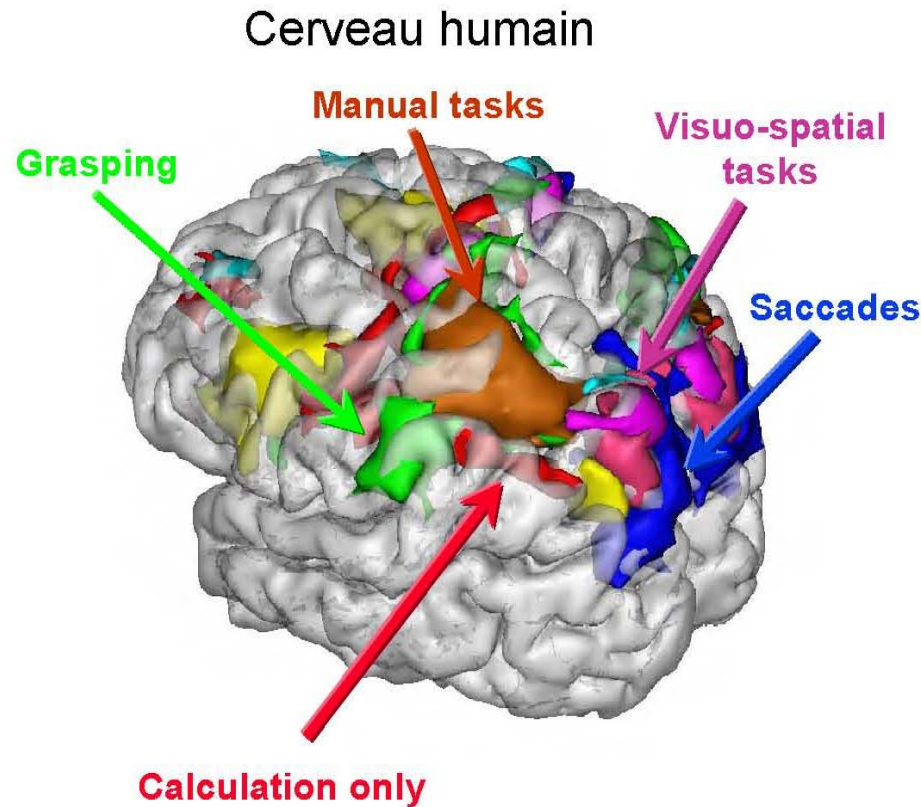


La vérification des opérations **symboliques** montre également un effet de distance numérique (Ashcraft et al., 1981):

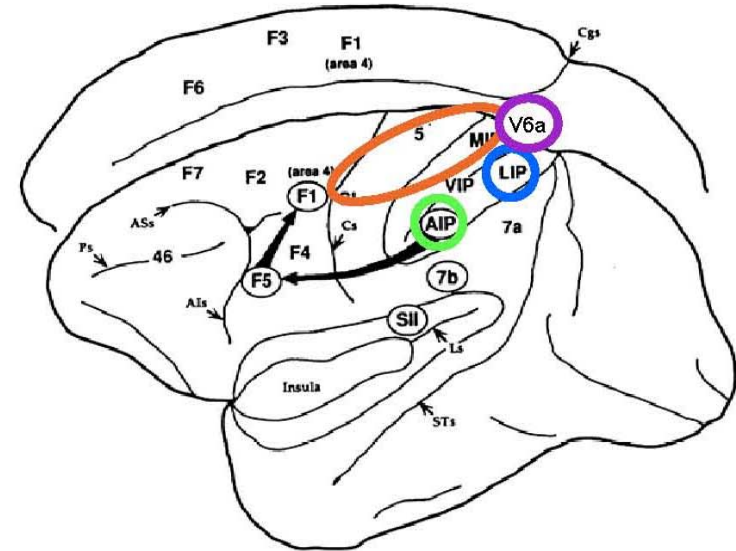
21+34=55, 65 ou 95

Rôle de la région intrapariétale dans le calcul mental

Il existe une homologie dans l'organisation fonctionnelle du lobe pariétal chez l'homme et chez les autres primates.



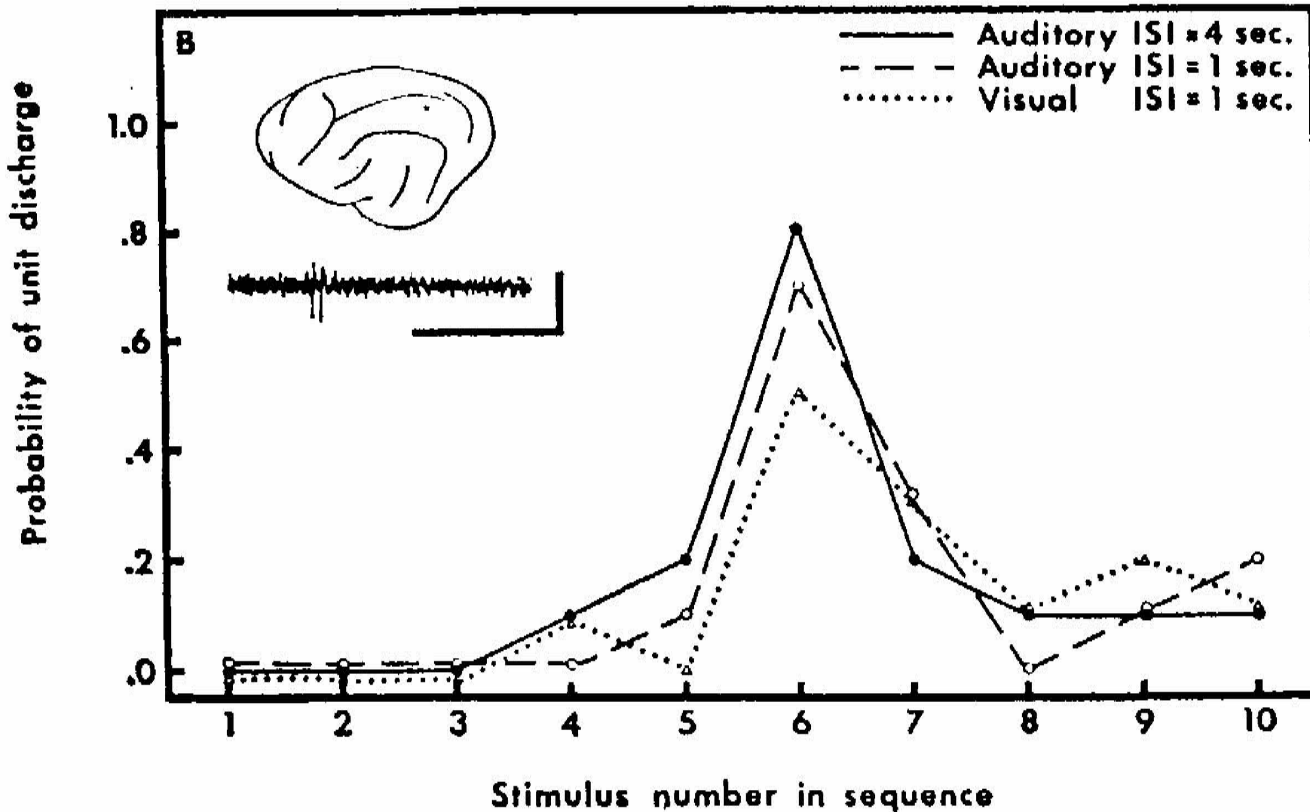
Singe macaque



Cette homologie prédirait que la compétence numérique des animaux est liée à des populations de neurones situées dans la profondeur du sillon intrapariétal (aire VIP?)

Données anciennes chez le chat anesthésié

Quelques neurones répondent au nombre séquentiel de sons ou de flashes lumineux.

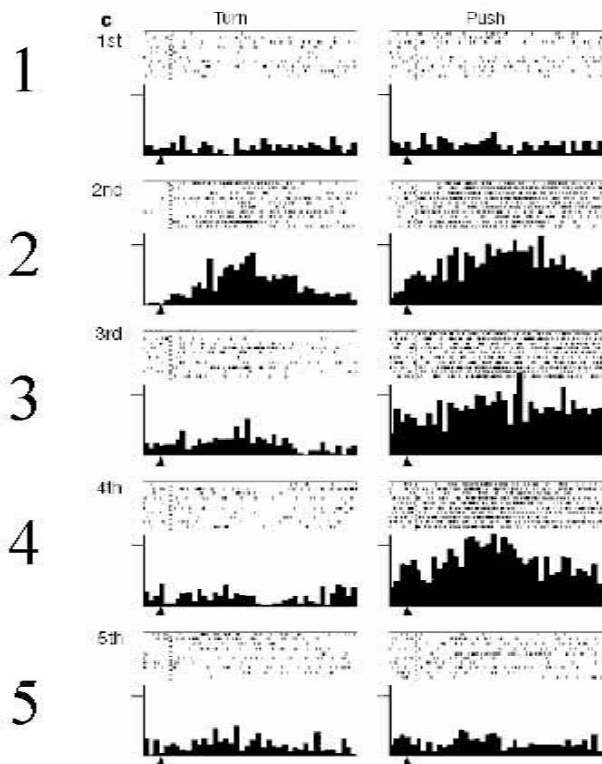
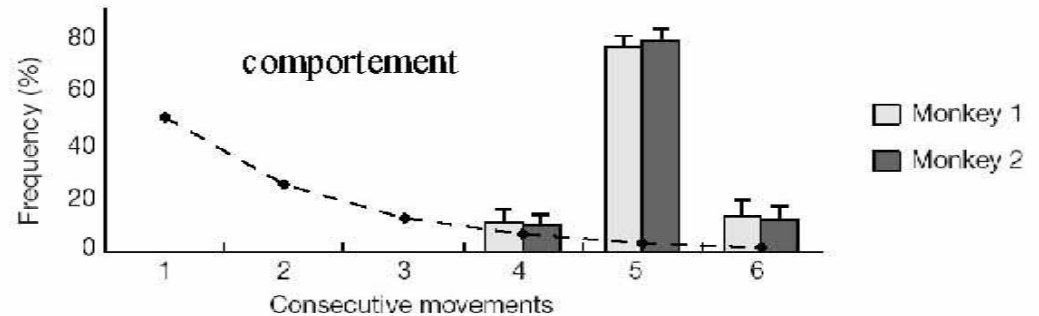


Thompson, R. F., Mayers, K. S., Robertson, R. T., & Patterson, C. J. (1970). Number coding in association cortex of the cat. *Science*, 168, 271-273.

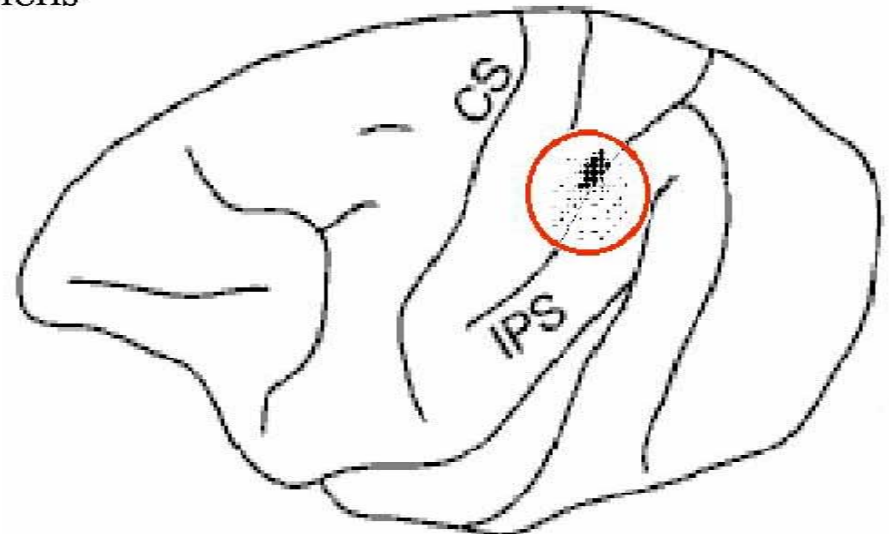
Codage du nombre d'actions dans le cortex pariétal du singe

Sawamura, H., Shima, K., & Tanji, J. (2002). Numerical representation for action in the parietal cortex of the monkey. *Nature*, 415(6874), 918-922.

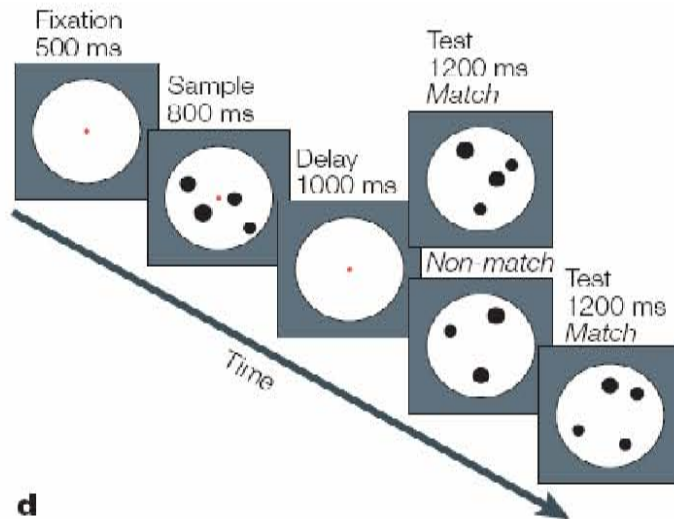
- Les singes apprennent à pousser un bouton 5 fois, puis à le tourner 5 fois
- La durée et le nombre sont décorrélés.



- Des neurones sensibles au nombre d'actions sont observés dans la partie antéro-latérale du sillon intrapariétale
- Cependant, ils répondent souvent différemment aux deux actions



Les travaux d'Andreas Nieder et Earl Miller

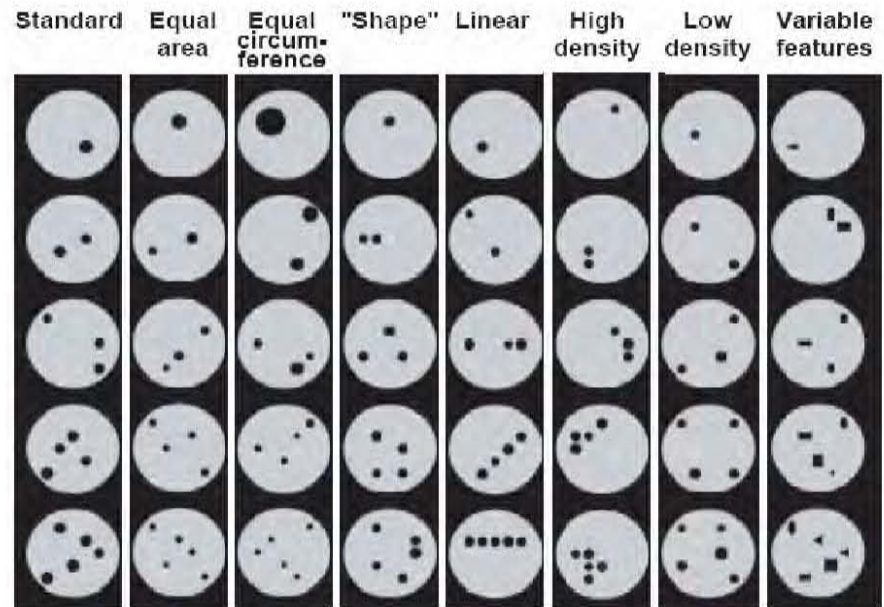


d

- les paramètres non-numériques sont bien contrôlés.
- Initialement, les nombres étaient compris entre 1 et 5 (1 et 10 pour les études de psychophysique), mais récemment Nieder et Merten (*J. Neuroscience*, 2008) ont étendu ce travail aux nombres jusqu'à 30.

Tâche d'appariement différé des nombres
(*numerical delayed match to sample*):

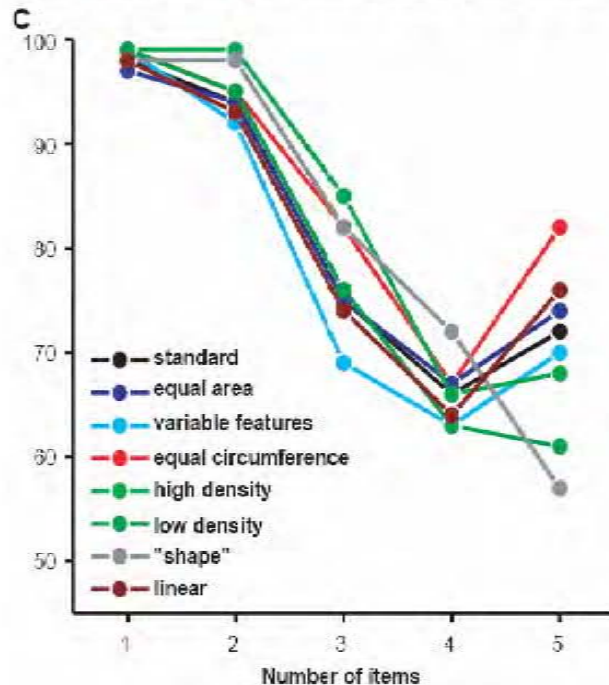
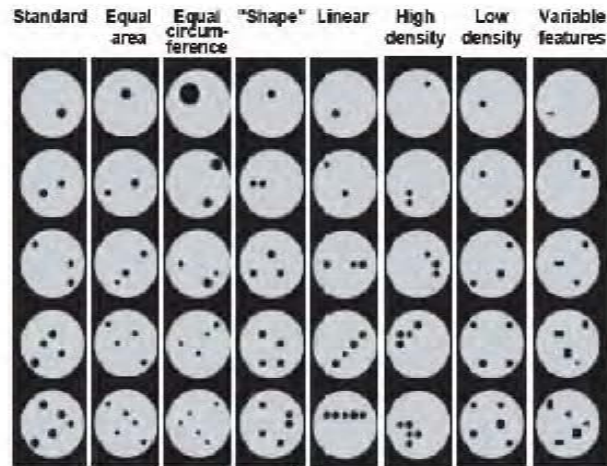
- l'animal voit une première quantité de points (n_1 , 800 ms)
- il doit mémoriser cette quantité pendant un court délai (1 seconde)
- il doit ensuite décider si un autre nuage de points comprend ou non le même nombre d'objets (n_2).



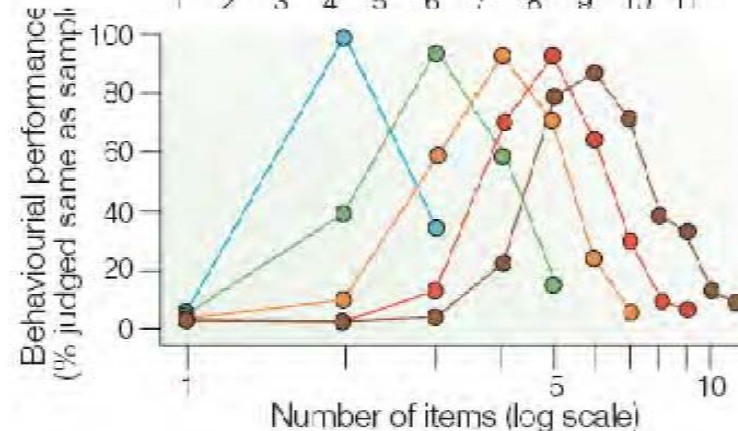
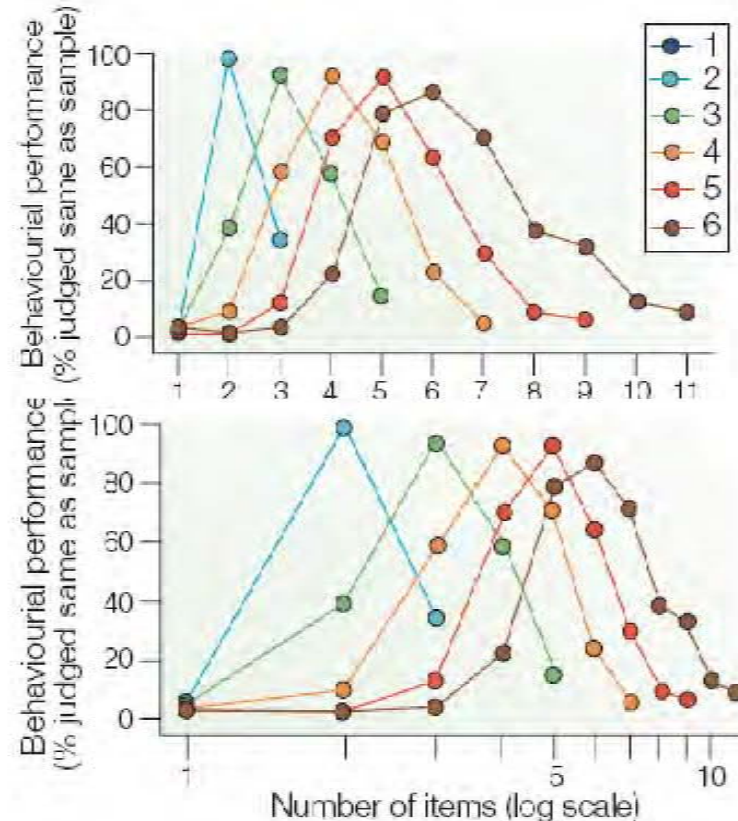
Nieder, A., Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 297(5587), 1708-1711.

Nieder, A., & Miller, E. K. (2003). Coding of cognitive magnitude. Compressed scaling of numerical information in the primate prefrontal cortex. *Neuron*, 37(1), 149-157.

Comportement numérique des animaux

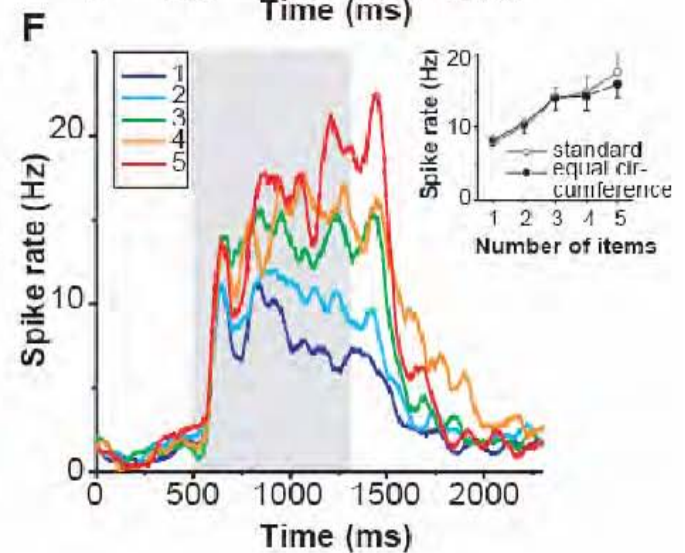
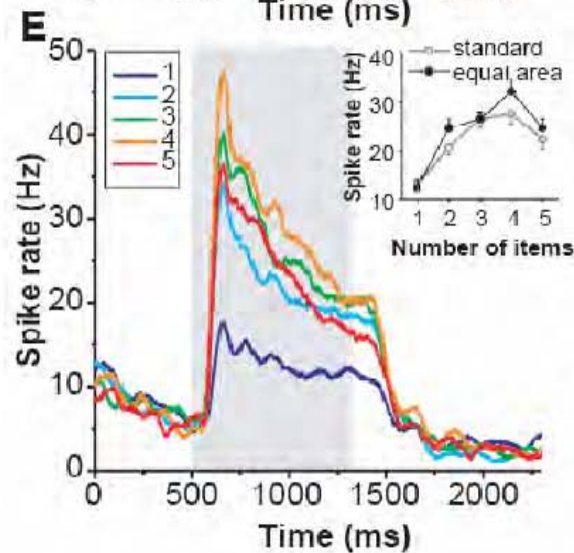
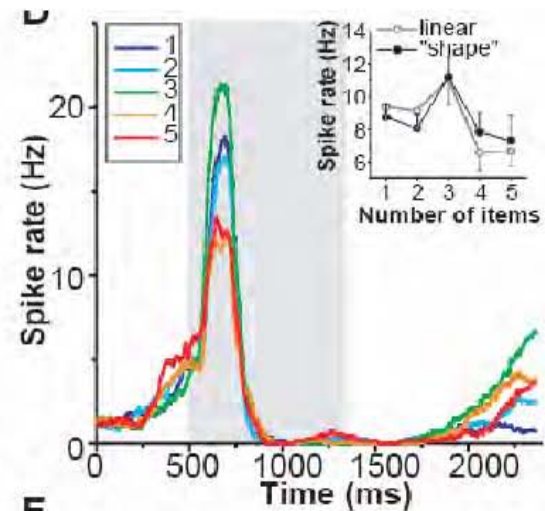
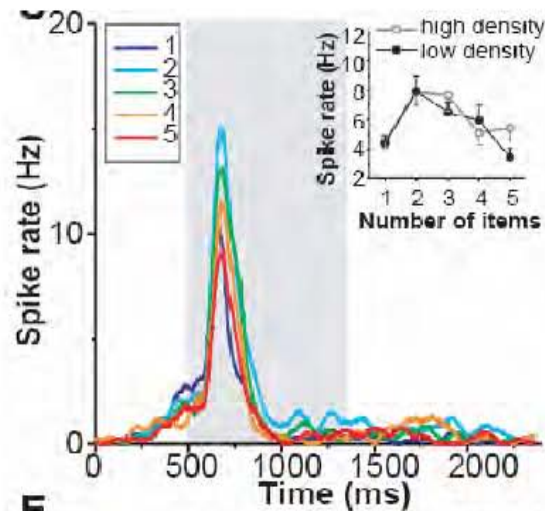


- Le taux de réussite dépend du nombre et non des autres paramètres
- Variabilité « scalaire » (proportionnelle à la moyenne) sur une échelle linéaire, constante sur une échelle logarithmique.
- La performance est entièrement déterminée par le rapport des deux nombres $n1$ et $n2$.



Réponse « numérique » des neurones préfrontaux

- Près d'un tiers des neurones du cortex préfrontal dorsolatéral sont sensibles au nombre d'objets durant la période de délai



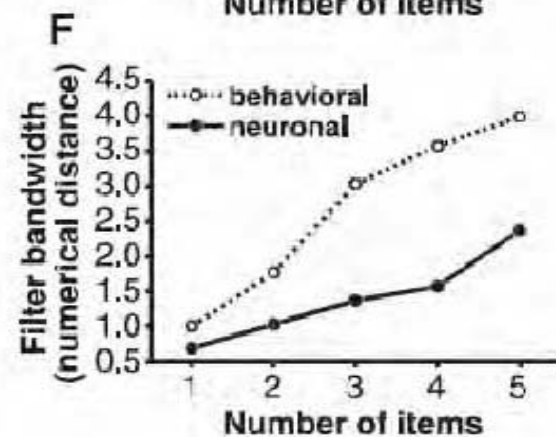
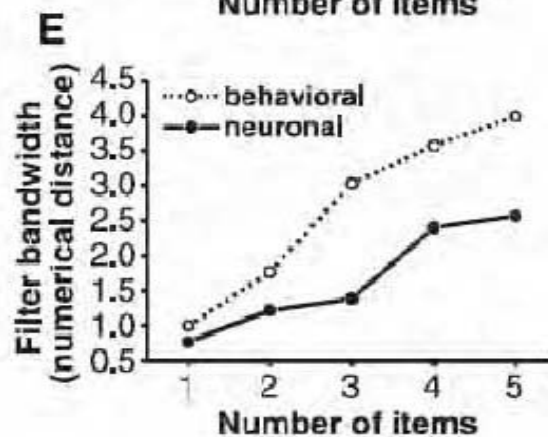
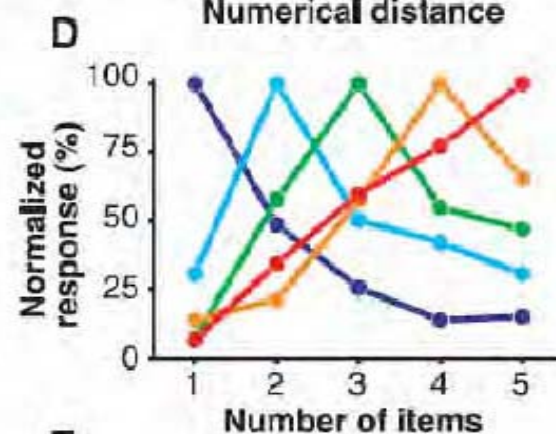
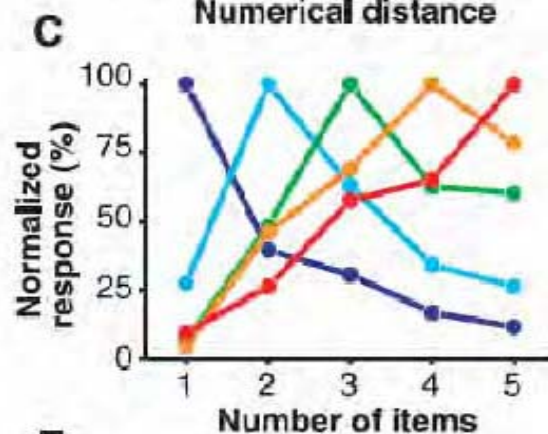
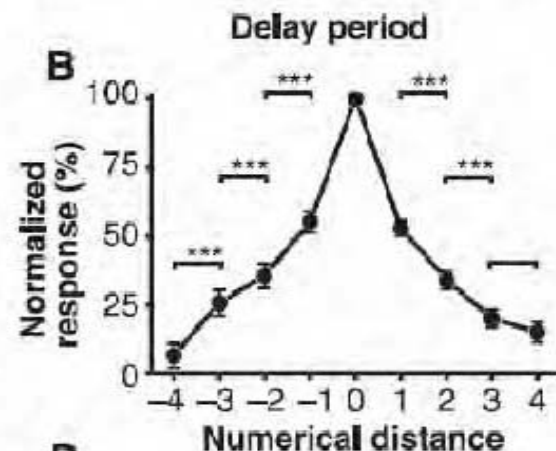
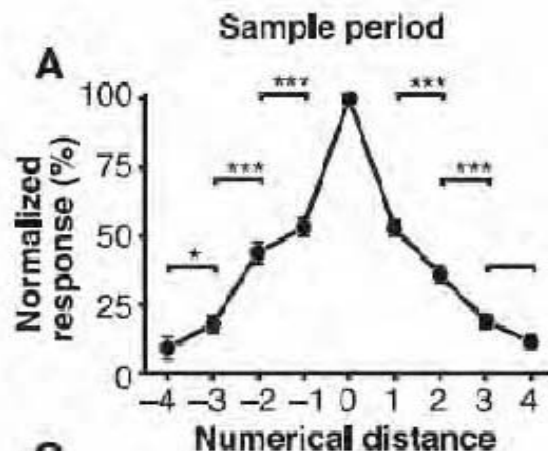
Réponse « numérique » des neurones préfrontaux

Propriétés essentielles des neurones décrits par Nieder et Miller:

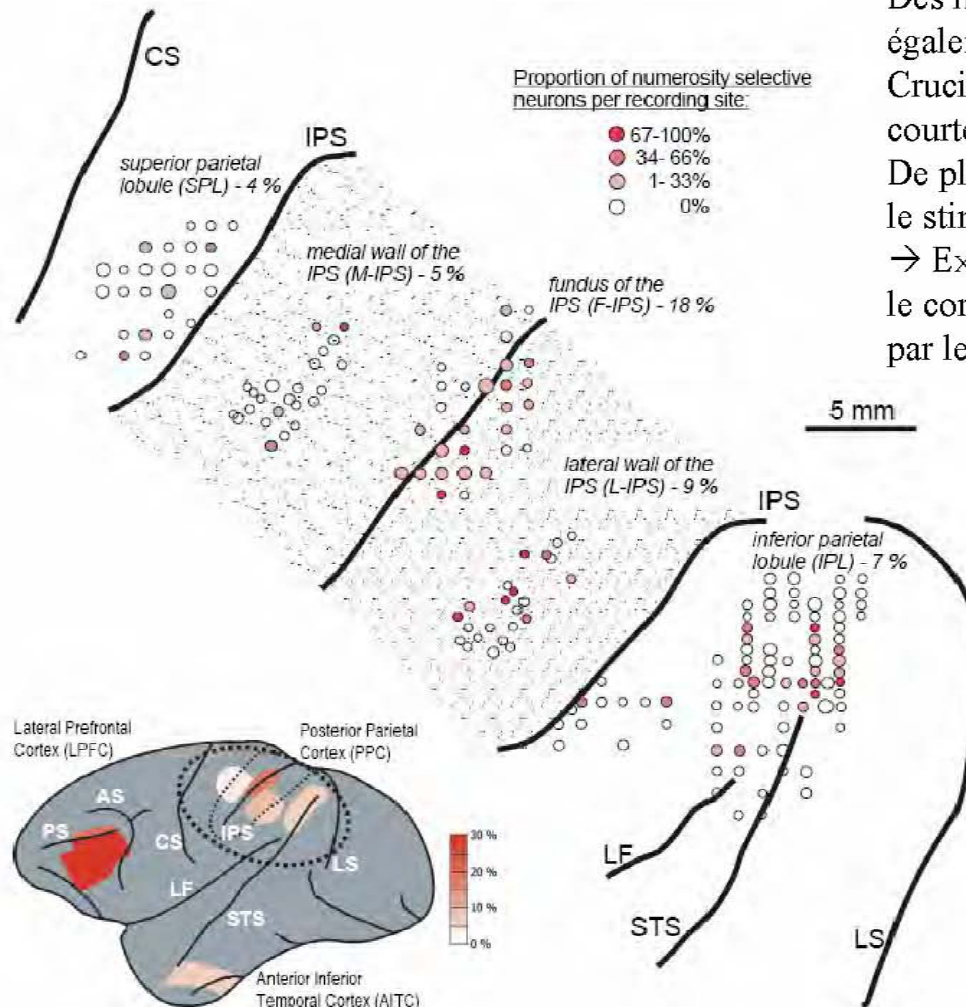
1. Différents neurones préfèrent des nombres différents
→ Ensemble de « filtres » accordées à différents nombres

2. Les courbes d'accord des neurones présentent un effet de distance

3. La largeur du filtre est d'autant plus grande que le nombre est grand (loi de Weber)

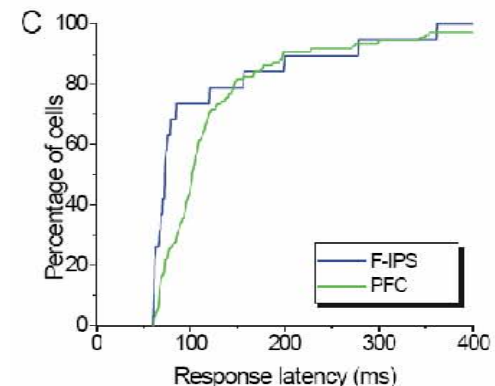
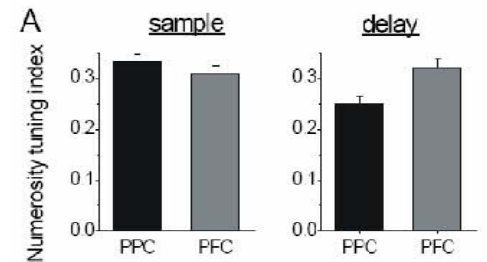


Un réseau pariéto-frontal pour la représentation des nombres



Des neurones accordés à la numérosité sont également présents dans la région pariétale. Crucialement, leur latence de réponse est plus courte que celle des neurones préfrontaux. De plus leur sélectivité est plus élevée durant le stimulus que durant le délai.

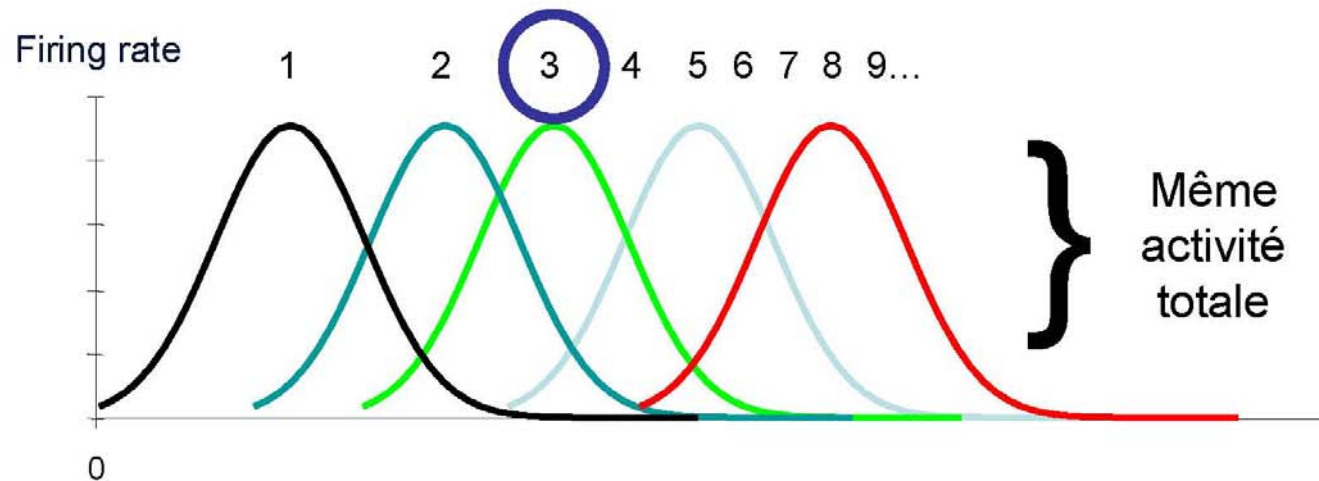
→ Extraction de l'information numérique par le cortex pariétal, représentation en mémoire par le cortex préfrontal





MÉTHODE D'ADAPTATION

Les neurones des nombres existent-ils chez l'homme?

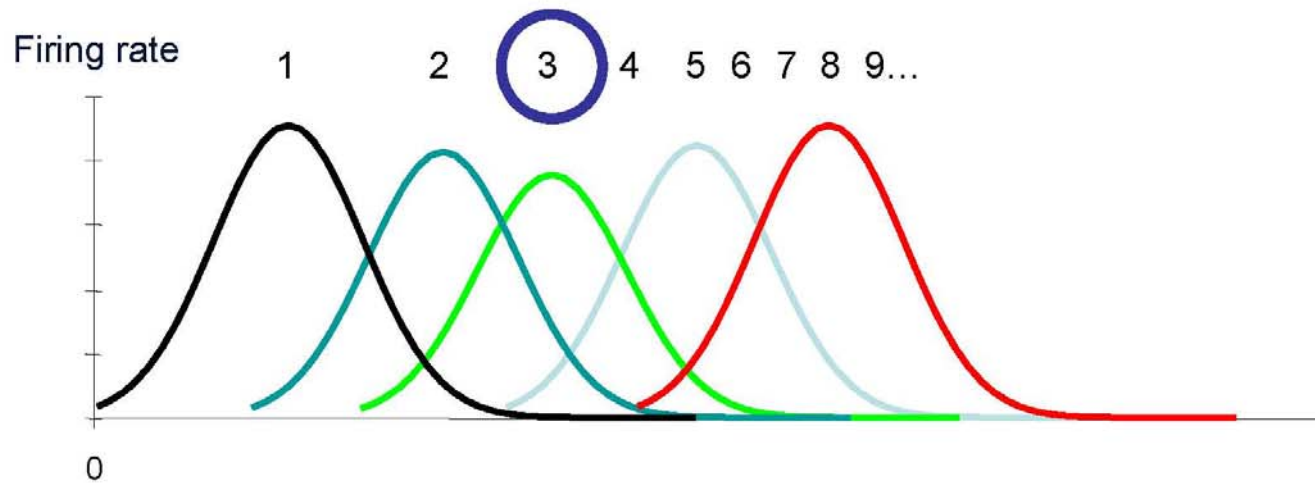


La résolution des méthodes actuelles d'imagerie ne permet pas de voir directement les neurones individuels.

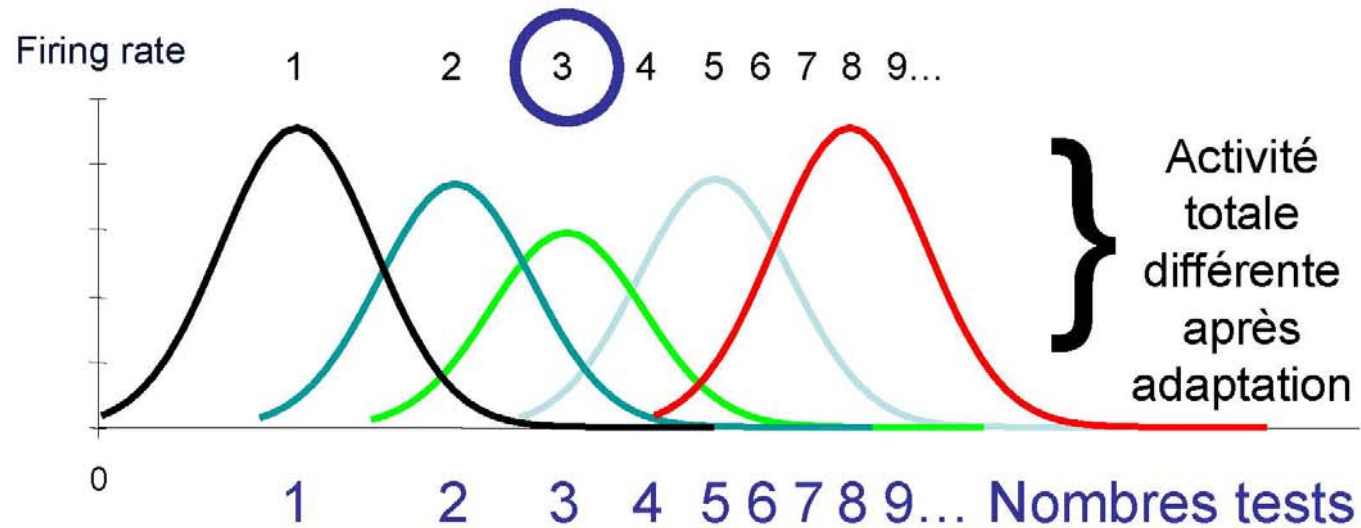
-A l'échelle où nous visualisons le cortex humain (quelques millimètres), on ne voit pas (pour l'instant) de « carte numérotopique ».

- Chez l'animal, les neurones sensibles à différents nombres sont mélangés dans les mêmes secteurs du cortex.

La méthode d'adaptation peut permettre de mesurer indirectement la courbe d'accord des neurones

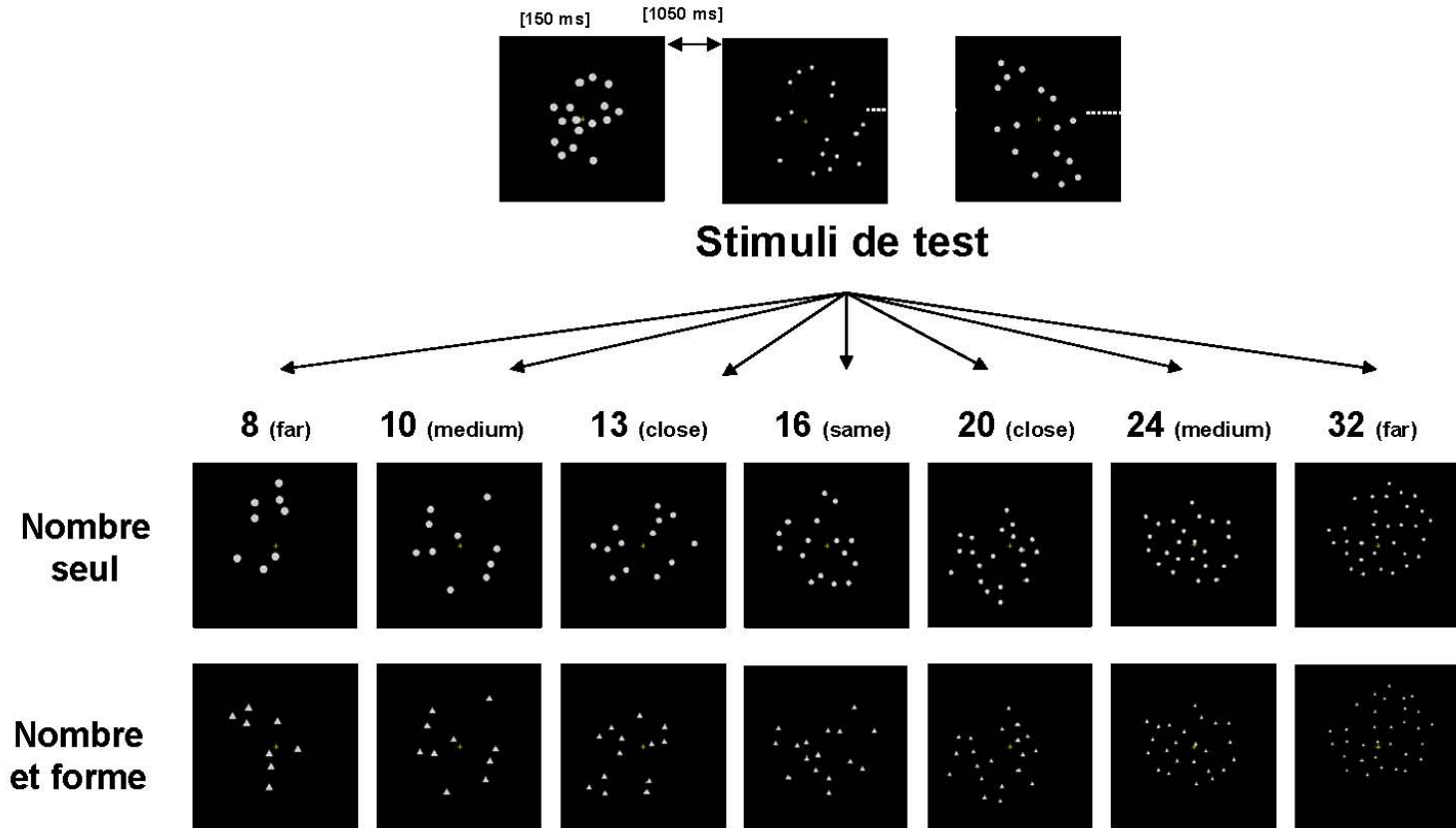


La méthode d'adaptation peut permettre de mesurer indirectement la courbe d'accord des neurones

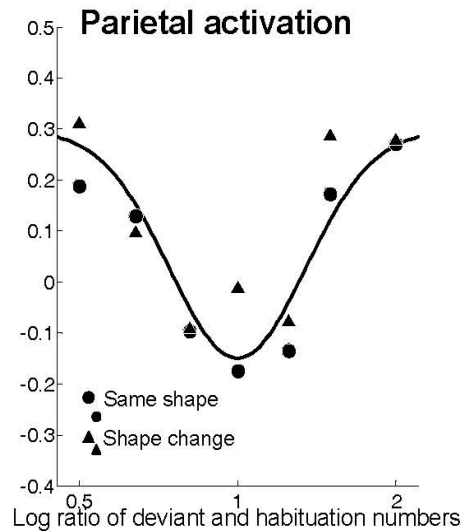


L'expérience d'adaptation numérique de Piazza et al.

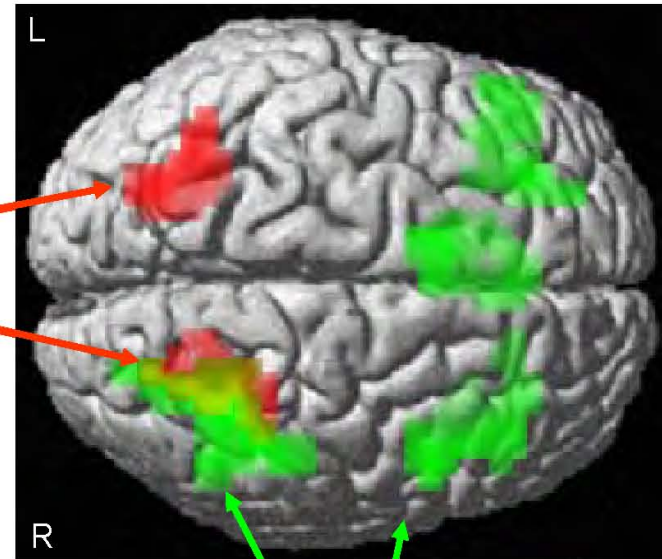
Adaptation à un nombre fixe (par exemple 16 points)



Adaptation numérique dans le segment horizontal du sillon intrapariétal (hIPS)



Régions qui répondent à un changement de nombre

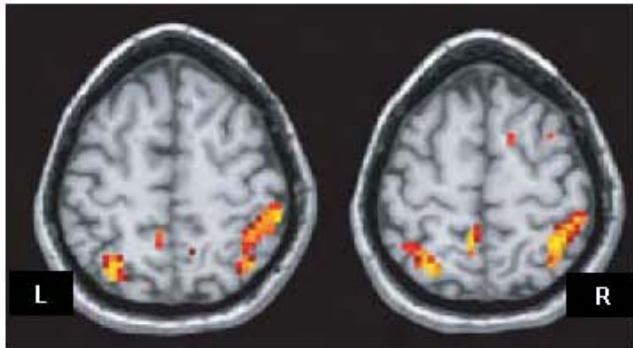


Régions qui répondent à un changement de forme

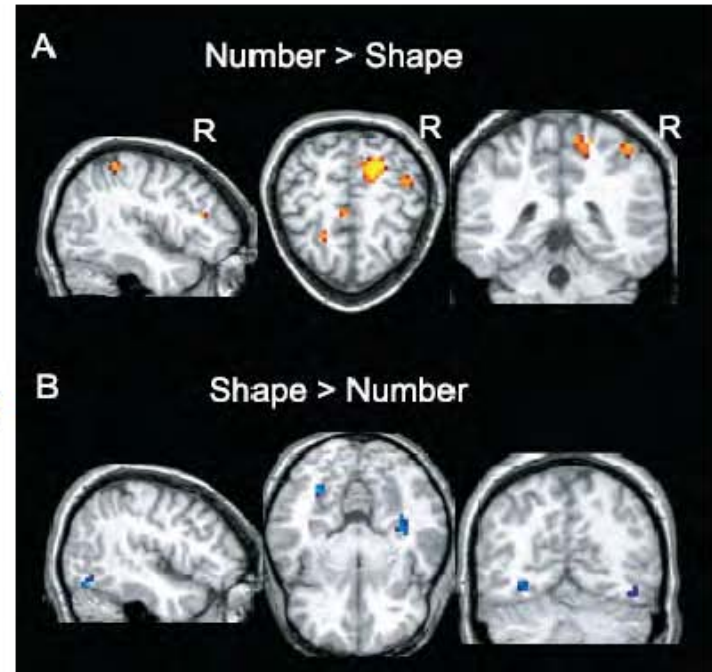
Réplifications de l'effet d'adaptation numérique

Cantlon, Brannon et al. (PLOS, 2006)

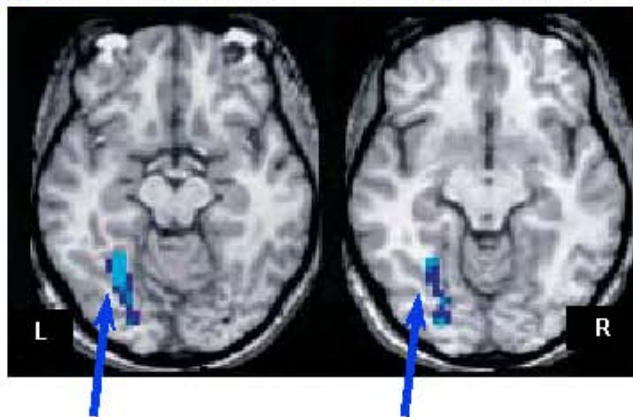
Changement de nombre > changement de forme



Cette opposition ventral/dorsal est déjà présente chez l'enfant de 4 ans

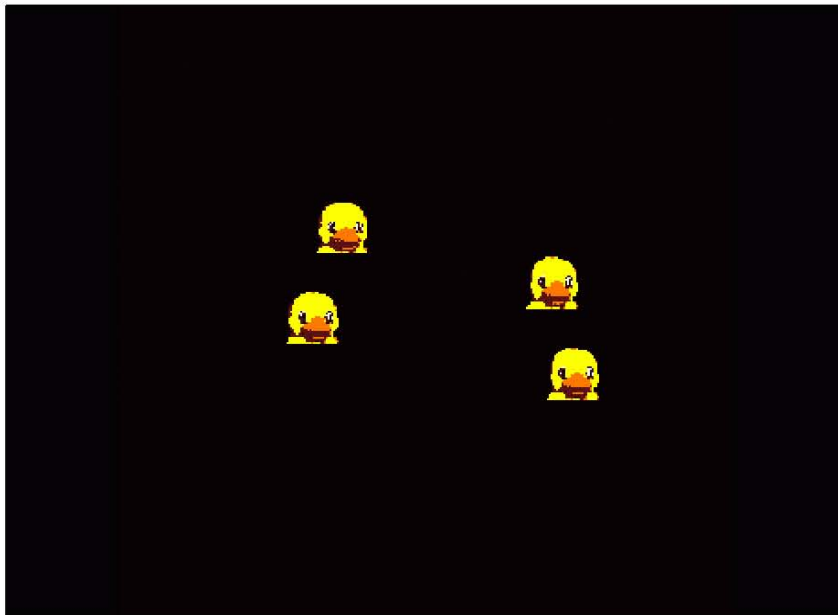


Changement de forme > changement de nombre



Adaptation numérique chez le bébé de trois mois

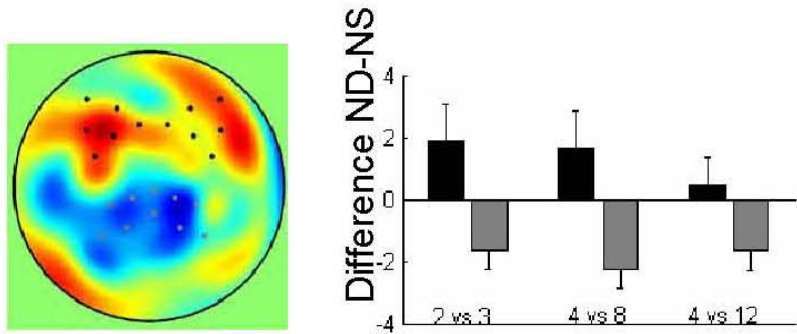
Izard, Dehaene-Lambertz & Dehaene, PLOS:Biologie, 2008



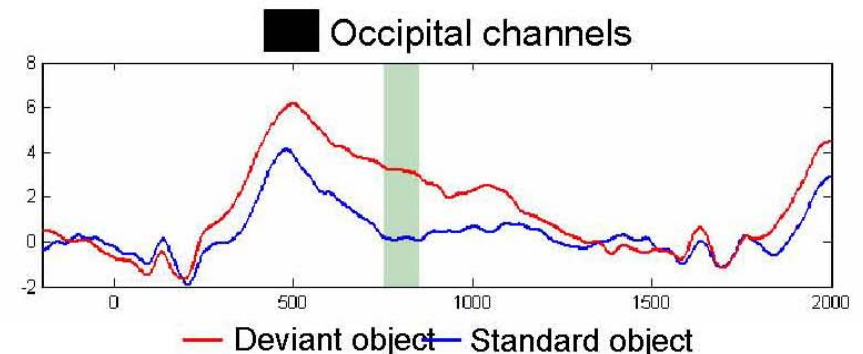
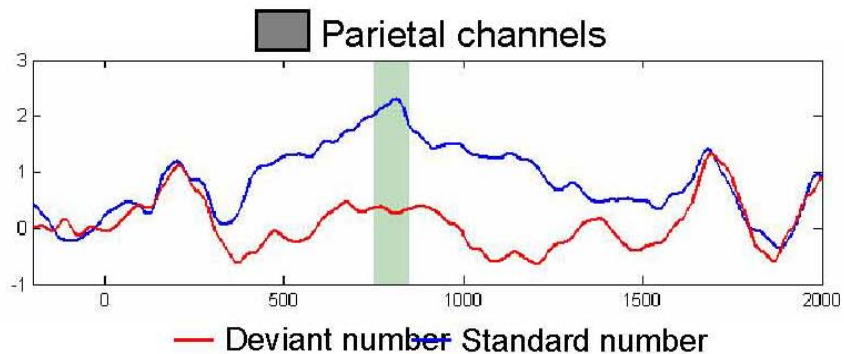
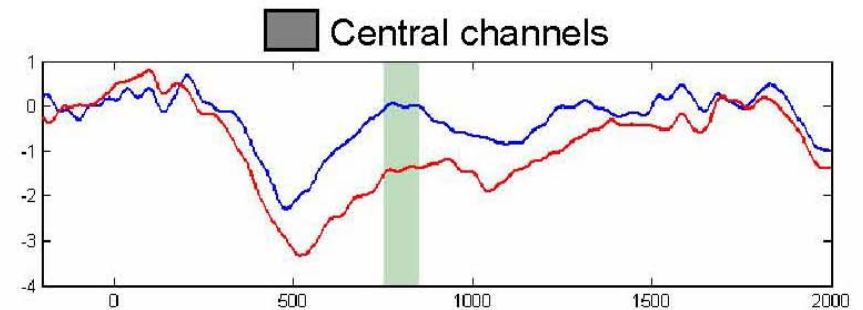
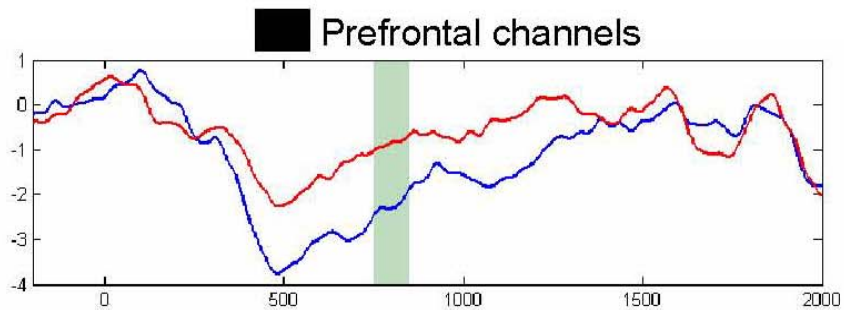
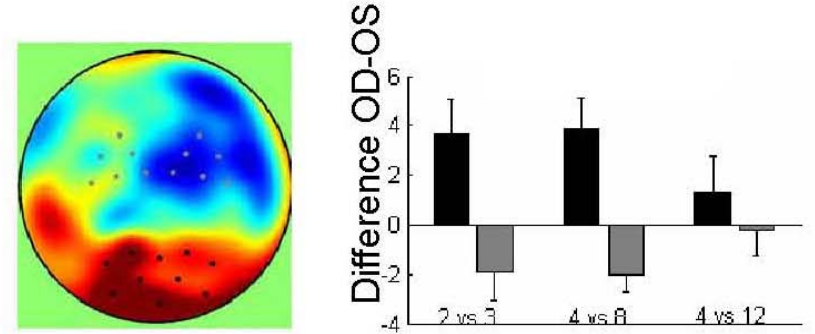
Trois paires de numéros testées dans des groupes différents:
4 vs 8 ; 4 vs 12 ; 2 vs 3

12 enfants par groupe

Changement de nombre



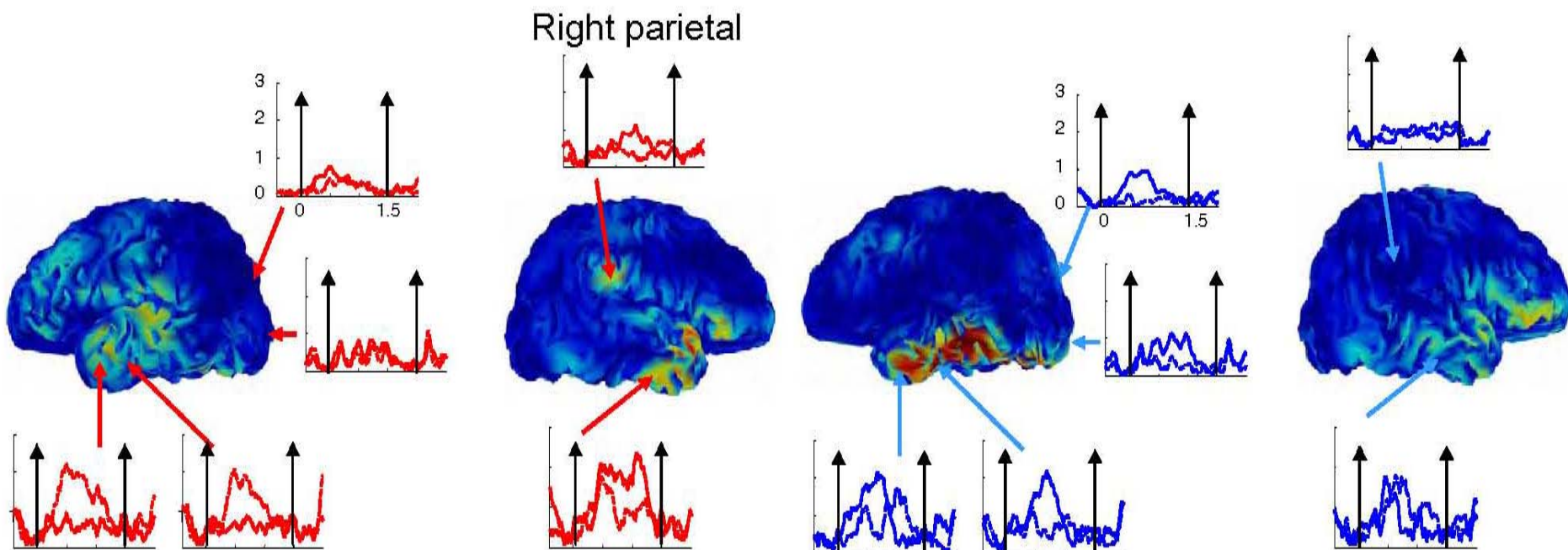
Changement d'objet



L'opposition ventral/dorsal est déjà présente à trois mois de vie

Changement de nombre

Changement d'objet



— Deviant number (DN)
- - - Standard number (SN)

— Deviant object (DO)
- - - Standard object (SO)

Les recherches actuelles

- Nombreux aller-retours
 - entre la théorie et les enregistrements électrophysiologiques
 - entre la recherche chez l'homme et chez l'animal
 - Le cortex pariétal est-il spécifique au nombre?
 - Existe-t-il plusieurs codes neuraux pour la numérosité?
 - Comment sont codés les grands nombres?
 - Quel est le degré d'abstraction du code neural?

1. Le cortex intrapariétal est-il « spécifique » au nombre: Codage de la taille, de la luminance et du nombre

Les stimuli sont construits en variant indépendamment les trois paramètres

... numerical size	1	2	3	7	8	9
... physical size	8	8	8	8	8	8
... luminance	2	2	2	2	2	2

Dans trois blocs distincts, le sujet se focalise sur le nombre, la taille ou la luminance.

Number comparison



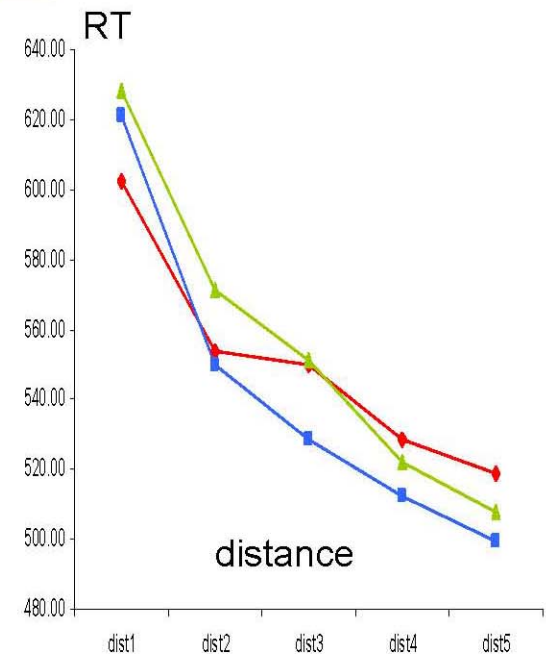
Size comparison



Luminance comparison

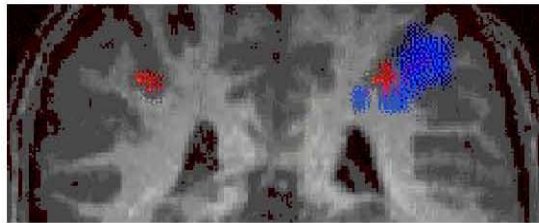
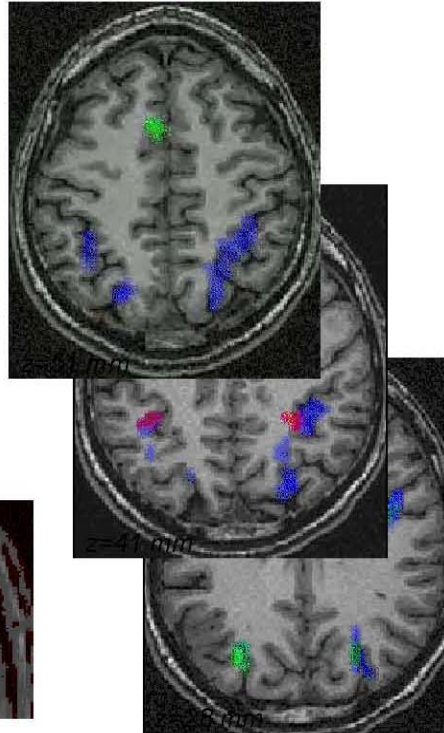


— number comparison
— size comparison
— luminance comparison

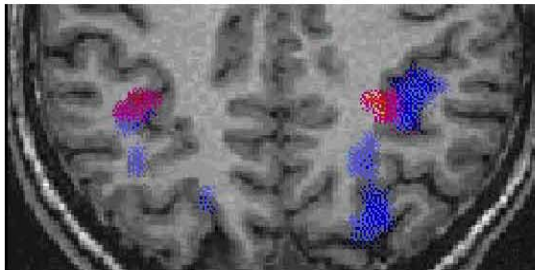


Localisation des trois effets de distance: des codes neuraux distribués et qui se recouvrent partiellement

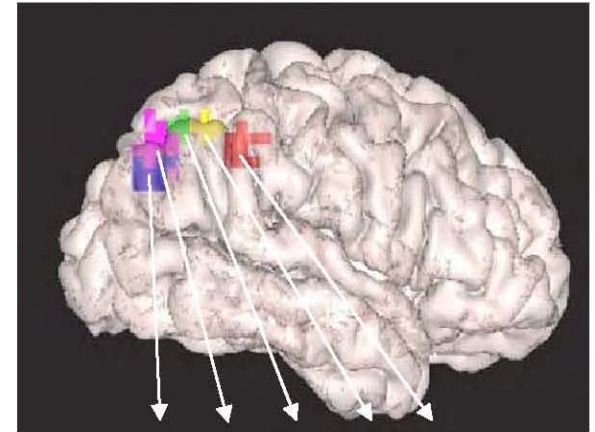
- Number distance effect
- Size distance effect
- Luminance distance effect



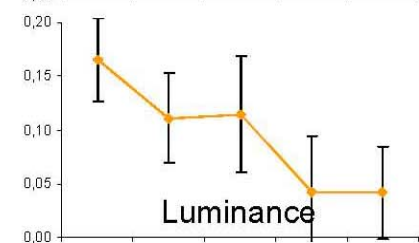
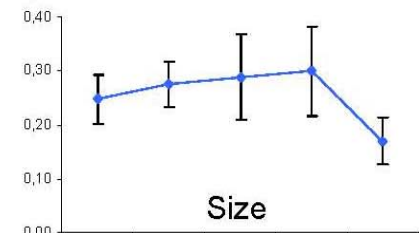
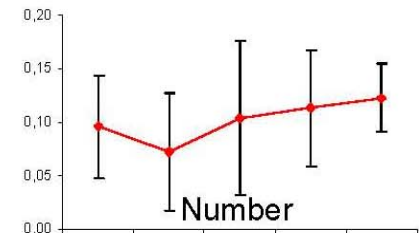
Frontal view of IPS



Axial view of IPS



Taille de l'effet de distance

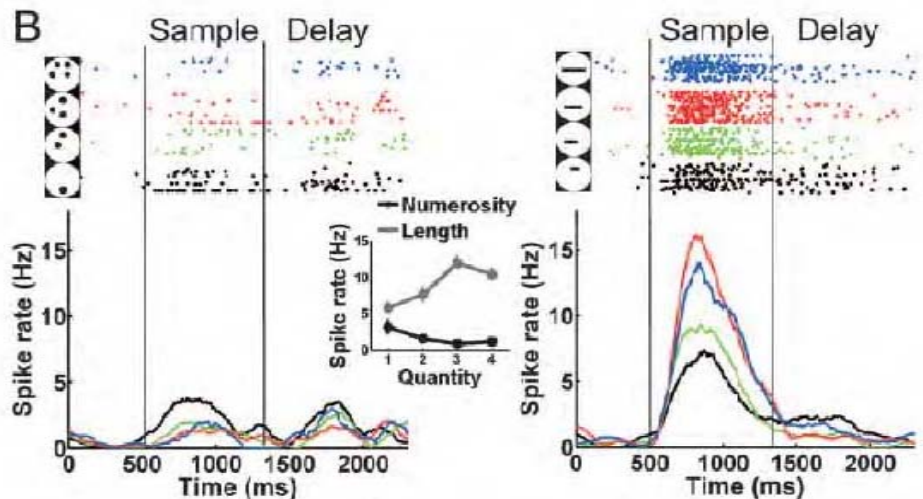
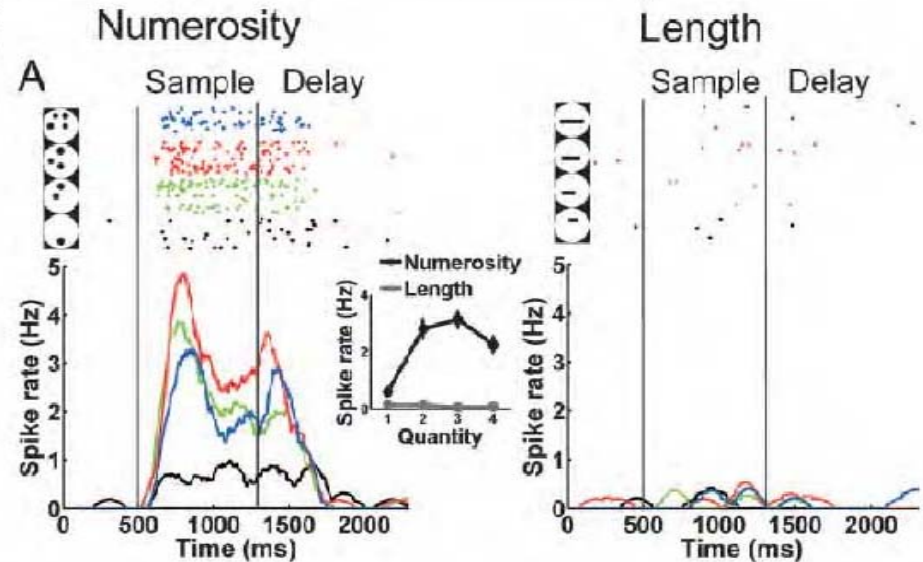
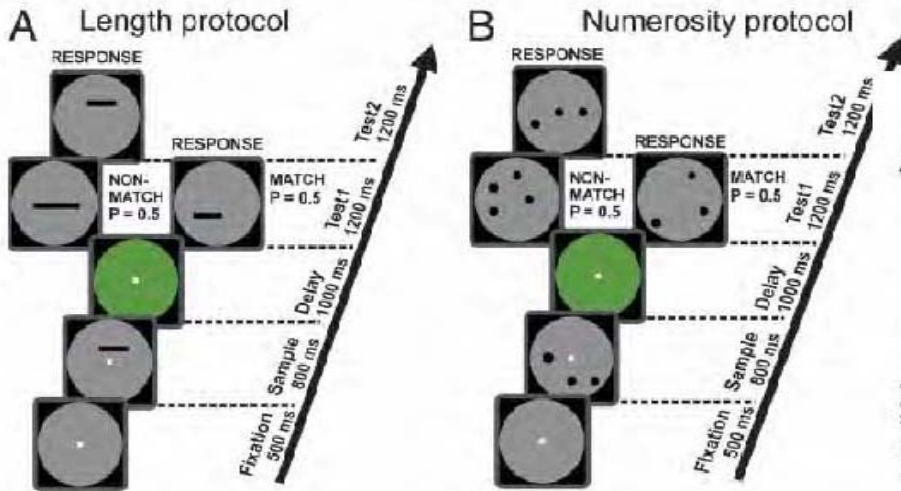


Posterior \leftrightarrow Anterior

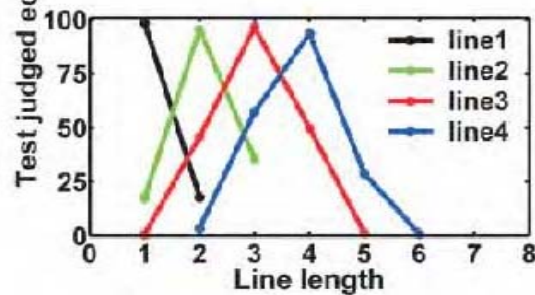
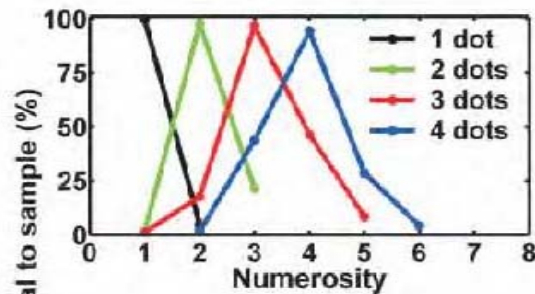
Le réseau pariéto-frontal du singe macaque est-il « spécifique » au nombre?

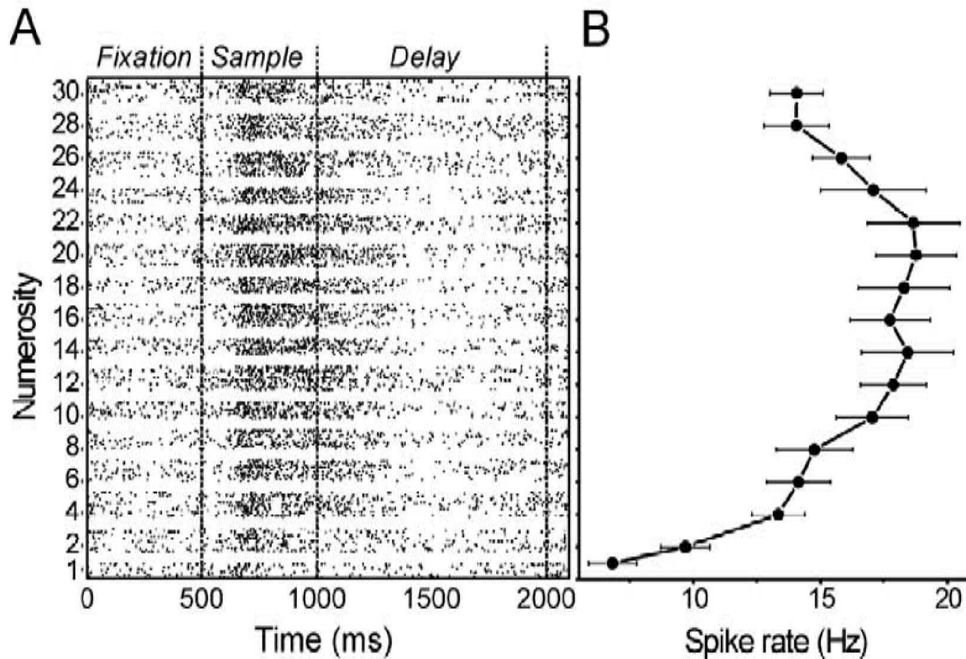
Tudusciuc, O., & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104(36), 14513-14518.

Des neurones distincts codent pour le nombre et la longueur



Comportement

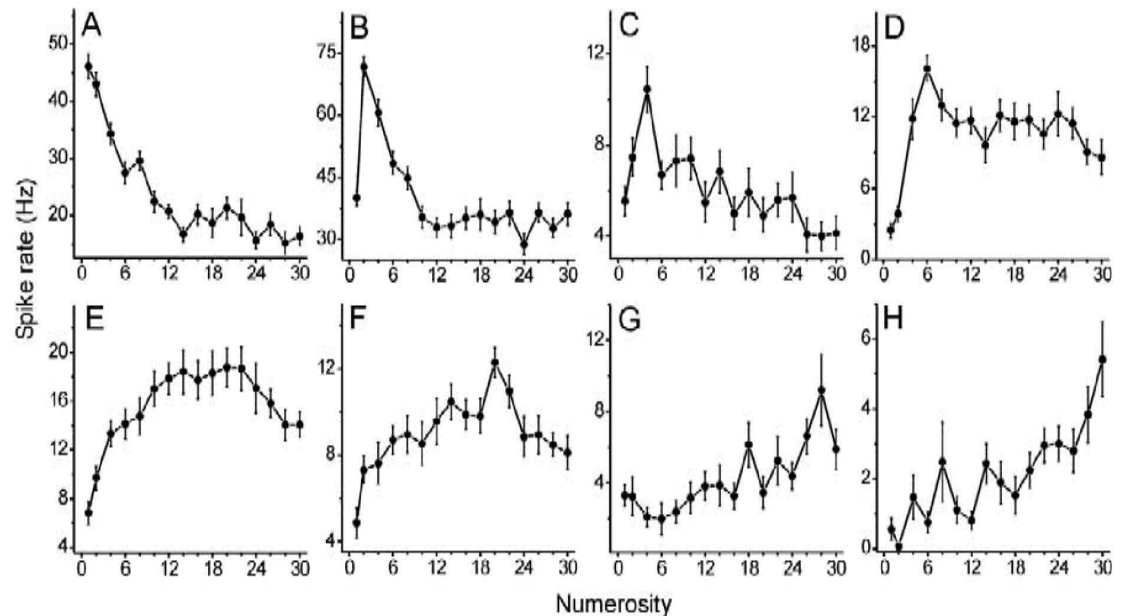




3. Le codage des grands nombres dans l'aire VIP

Nieder, A., & Merten, K. (2007). A labeled-line code for small and large numerosities in the monkey prefrontal cortex. *J Neurosci*, 27(22), 5986-5993.

On retrouve des préférences numériques même pour des numérosités entre 1 et 30.



Conclusions

- Le cortex pariétal du singe macaque comprend plusieurs populations de neurones sensibles au nombre d'objets, entremêlées avec d'autres neurones codant pour la taille, le mouvement...
- Leur localisation et leurs propriétés fonctionnelles semblent largement homologues à celles de l'espèce humaine