

# L'imagerie cérébrale en psychologie cognitive

Stanislas Dehaene

Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

## Quatrième Cours

L'imagerie cérébrale peut-elle  
décoder le contenu de la pensée?

## Introduction: logique et intérêt du décodage cérébral

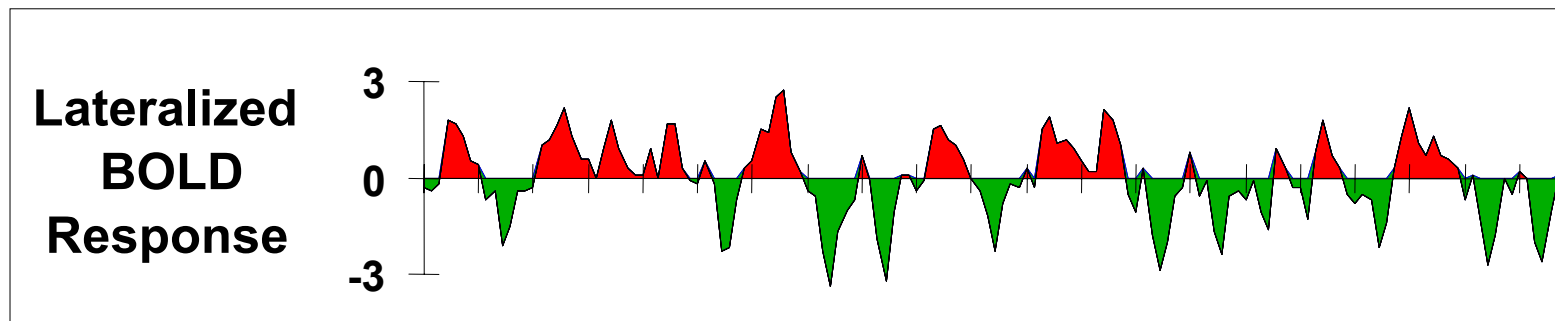
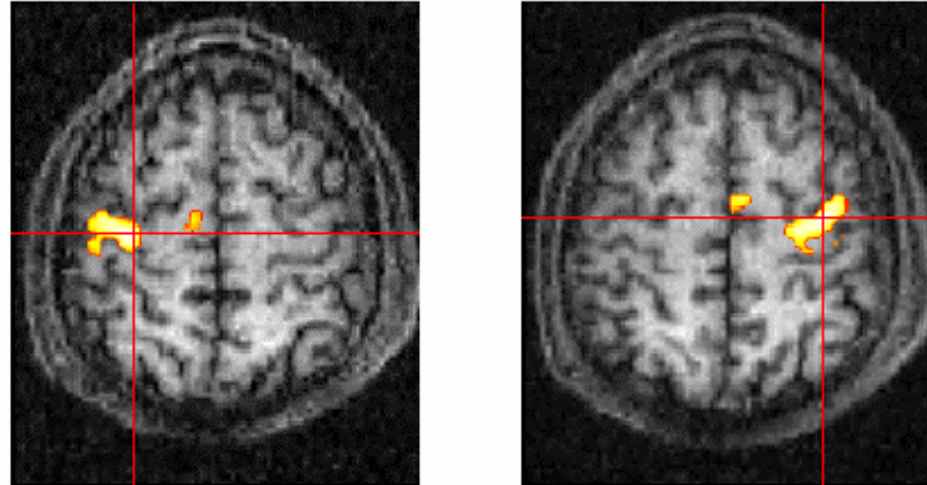
- L'imagerie cérébrale montre des corrélations entre l'état mental du sujet et l'activité cérébrale
- Les corrélations étant symétriques, il doit être possible d'inverser le processus et d'inférer l'état mental à partir de l'activité cérébrale
- Intérêts potentiels:
  - La capacité de décoder l'information fournit une démonstration ultime de la bonne compréhension du codage cérébral des informations.
  - La généralisation à de nouveaux stimuli nous informe sur le niveau d'abstraction du code neural concerné.
  - Le décodage cérébral apporte des informations supplémentaires, invisibles dans le comportement. L'imagerie cérébrale, par son caractère multi-dimensionnel (typiquement 40,000 voxels) peut désambiguïser les réponses comportementales.
  - Un décodeur efficace permettrait de se passer de toute réponse comportementale...
  - Le décodage pourrait présenter une utilité pratique: interfaces neuro-informatiques, « bio-feedback », détecteur de mensonges...

## Plan du cours

- Nous examinerons successivement quelques **exemples de décodage**:
  - Des actions motrices
  - Des stratégies cognitives
  - Des images que le sujet perçoit
  - Des images que le sujet visualise mentalement
- Nous étudierons ensuite les **méthodes multivariées**, qui permettent un décodage du « méso-code » cortical
- Nous débattons ensuite de possibles **applications pratiques** de ces travaux:
  - Interfaces homme-machine
  - Contrôle de la douleur
  - Détecteur de mensonges

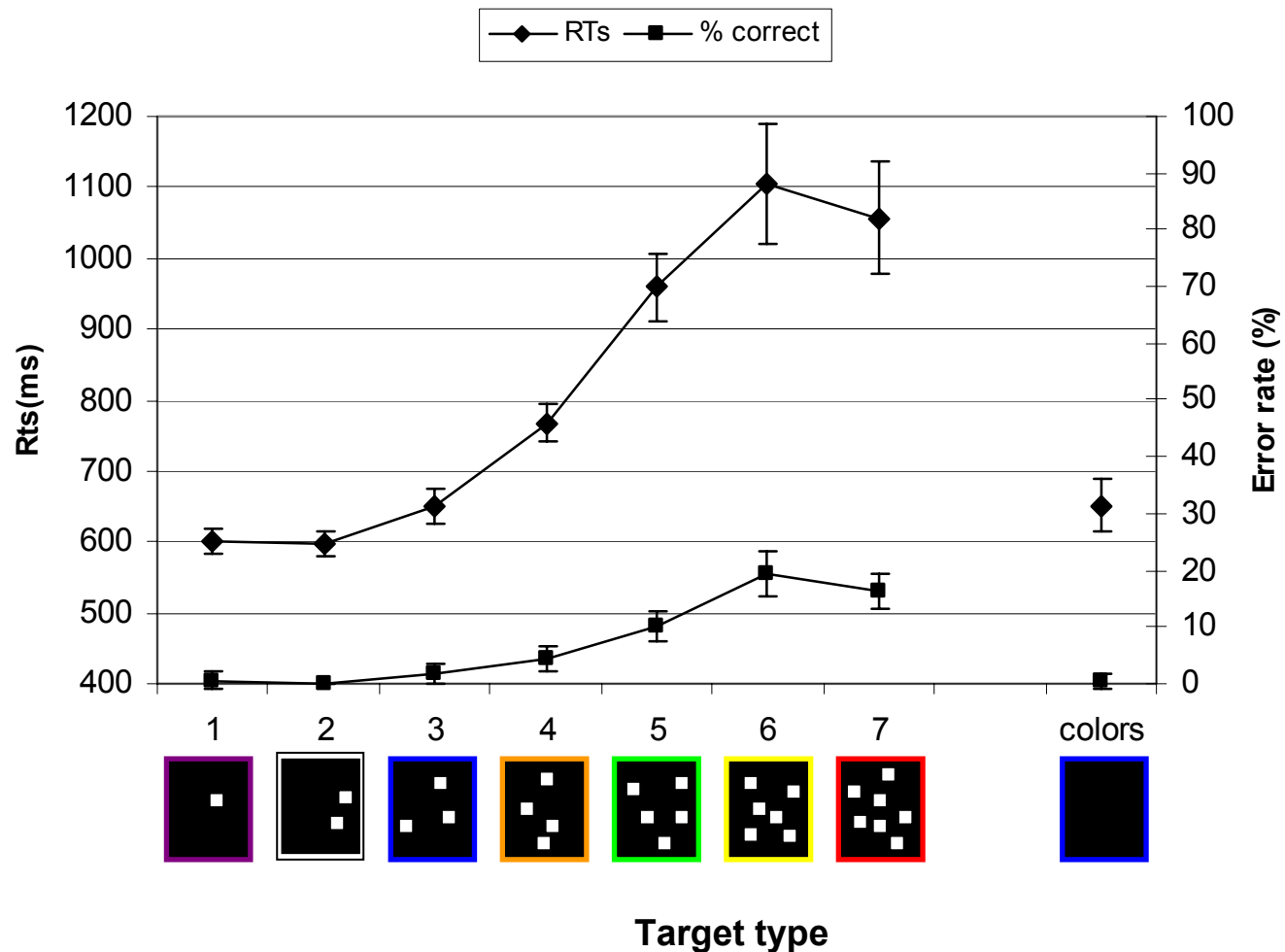
# Inférence du côté d'une réponse motrice à partir de l'IRM fonctionnelle

- A chaque essai, le sujet clique à droite ou à gauche (mouvement du pouce de 2-3 millimètres)
- Identification des cortex moteurs droits et gauche
- Calcul d'un index de préparation motrice latéralisé: différence entre les activations normalisées droite et gauche
- >95% de succès dans l'inférence du côté de la réponse motrice



Réponse motrice **L R L L L R L R R L R L L R R R L R L R R**

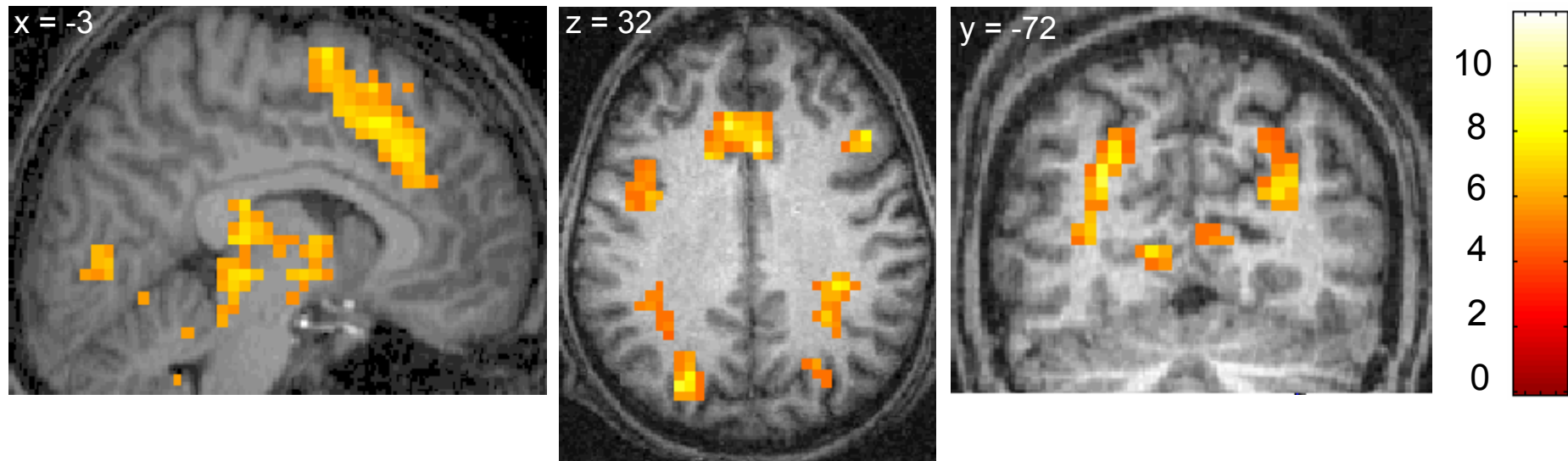
# Identification de la stratégie cognitive employée: Le sujet compte-t-il ou estime-t-il le nombre?



- Tâche = nommer le nombre de points, le plus vite possible
- Temps de réponse mesurés dans l'aimant à 3 Tesla
- Pour 4, 5 ou 6 points, le sujet compte
- Pour 1, 2, ou 3 points, le sujet ne compte pas, mais estime (« subitise ») le nombre de points.

# Identification de la numérosité d'un ensemble de points

Un vaste réseau pariétal-frontal est activé par le comptage plus que par la « subitisation »

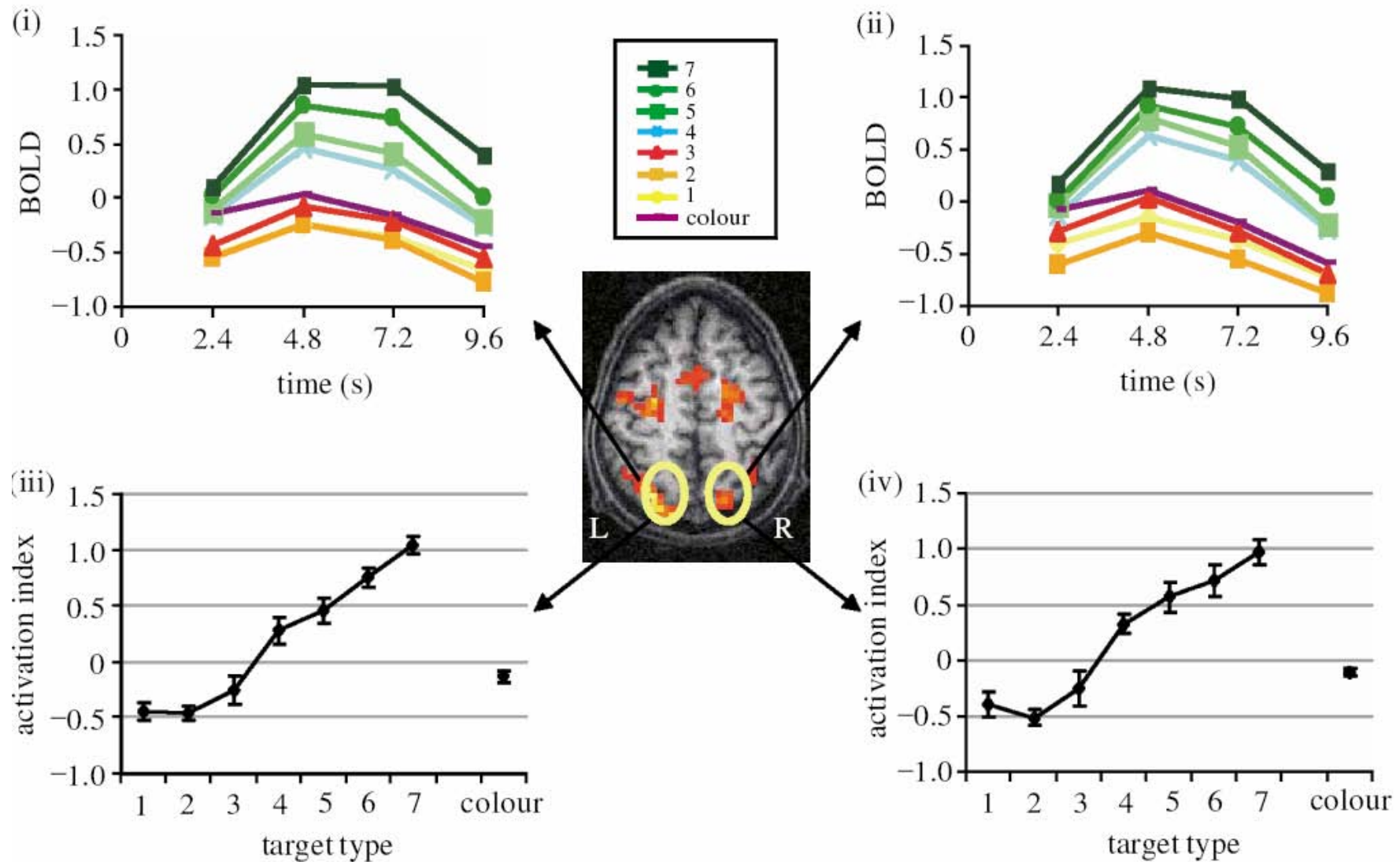


Ce réseau permet-il d'inférer quel nombre a été présenté au volontaire?

Piazza, M., Giacomini, E., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2003). Single-trial classification of parallel pre-attentive and serial attentive processes using functional magnetic resonance imaging. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 270(1521), 1237-1245.

# Identification de la numérosité d'un ensemble de points

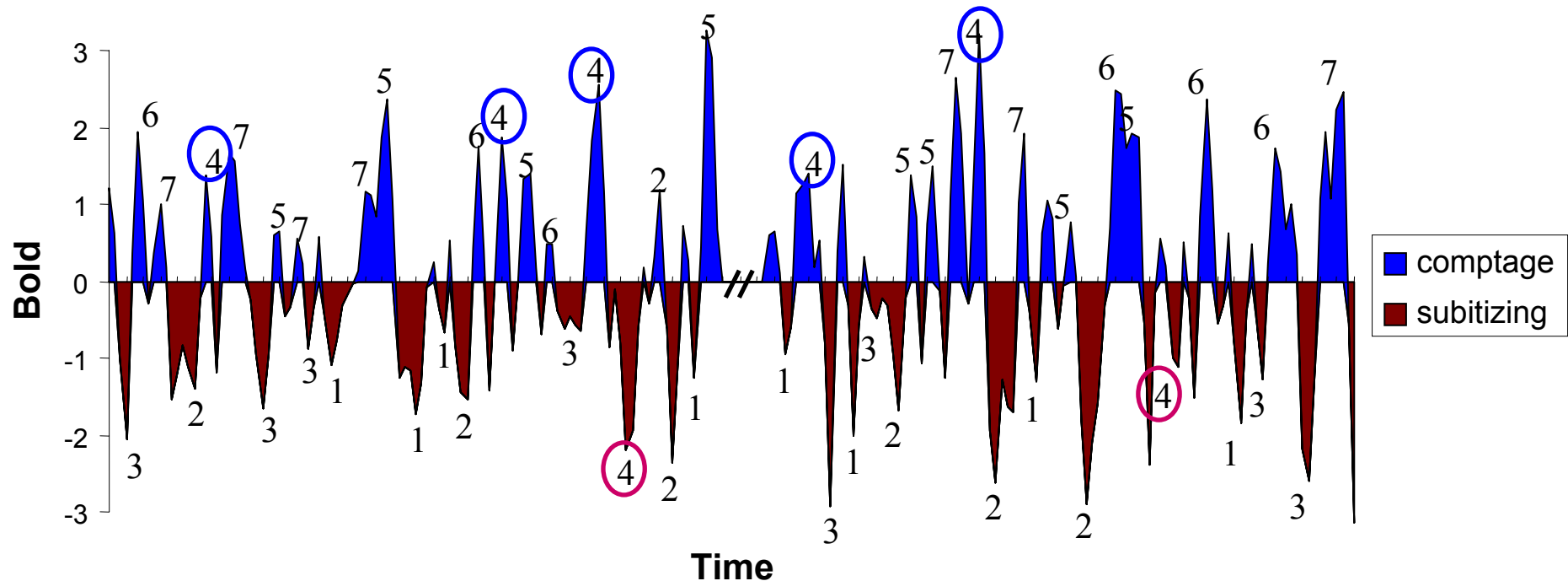
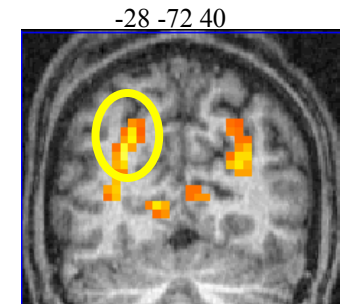
Le nombre de points prédit bien l'activité pariétale.



Piazza, M., Giacomini, E., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2003). Single-trial classification of parallel pre-attentive and serial attentive processes using functional magnetic resonance imaging. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 270(1521), 1237-1245.

# Identification de la numérosité d'un ensemble de points

- Le signal de la région intra-pariétale postérieure prédit si le nombre présenté est petit ou grand.
- Apprentissage d'un classificateur linéaire sur le premier bloc; Généralisation sur les blocs suivants: 76% correct

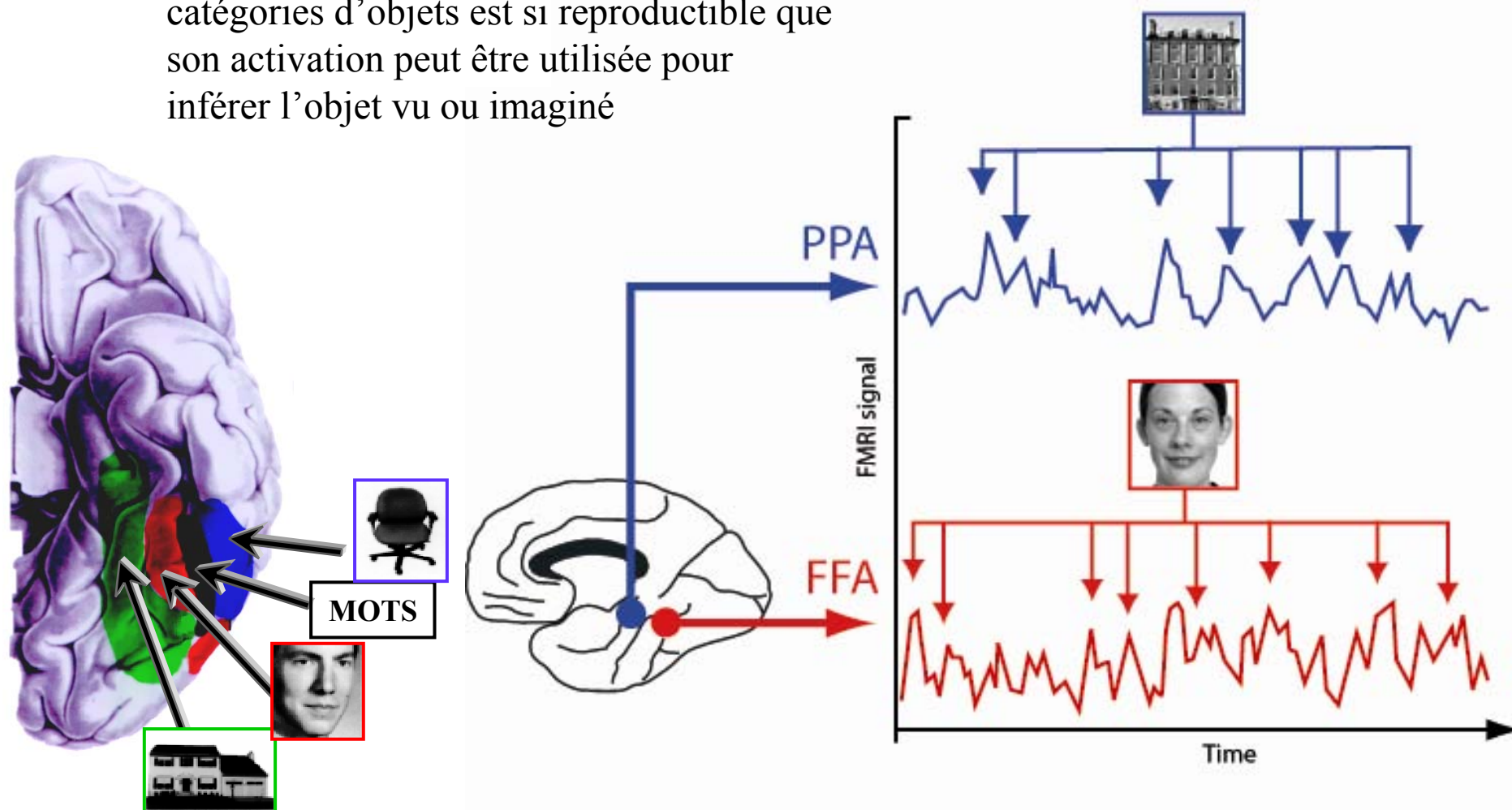


- Pour le nombre 4, l'activité pariétale est parfois présente. Sa présence prédit:
  - (inter-sujets): si un sujet donné compte à partir de 4 points ou à partir de 5 points
  - (intra-sujet): si, à un *essai* donné, le sujet a compté ou « subitisé » (ralentissement du temps de réponse).



# Classification des images réelles ou mentales

- La mosaïque ventrale activée par les catégories d'objets est si reproductible que son activation peut être utilisée pour inférer l'objet vu ou imaginé



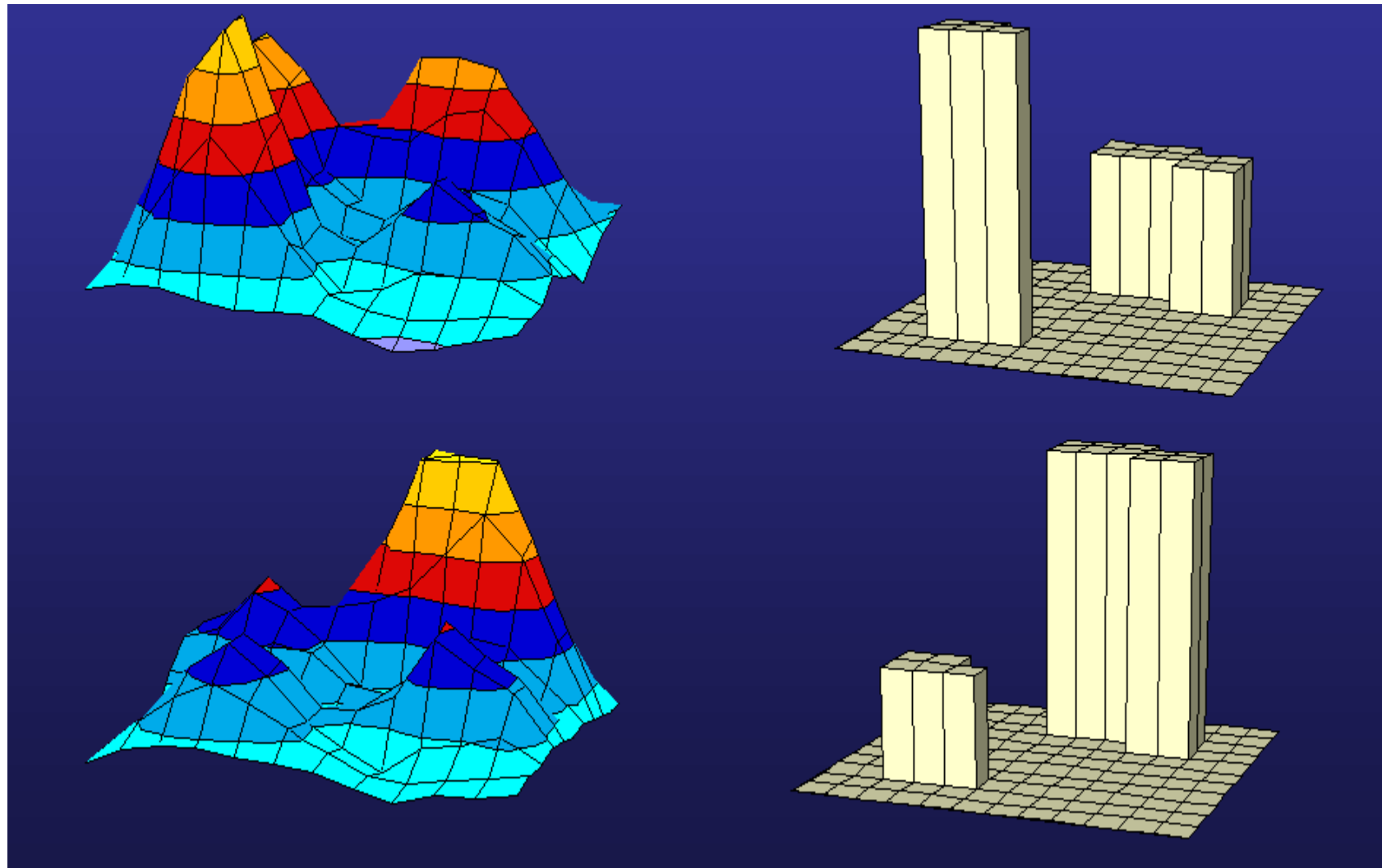
O'Craven, K. M., & Kanwisher, N. (2000). Mental imagery of faces and places activates corresponding stimulus-specific brain regions. *J Cogn Neurosci*, 12(6), 1013-1023.

# Deux interprétations possibles (remerciements à Jim Haxby)

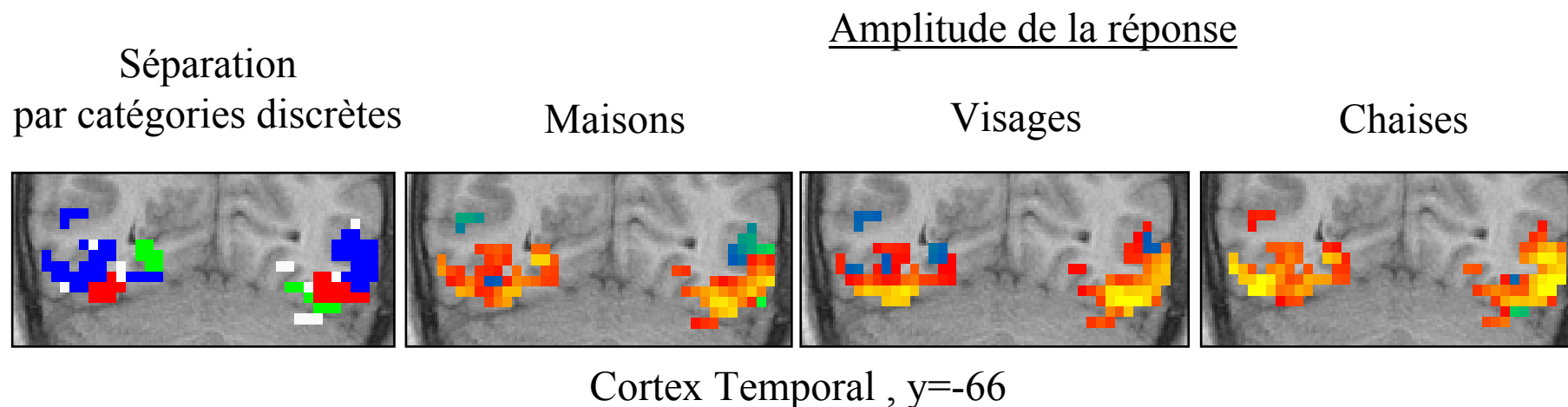
Représentation distribuée:  
“object form” topography

Ou bien

Régions sélectives à une  
catégorie



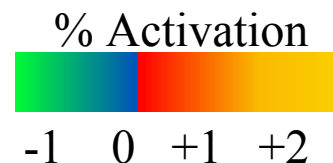
# Réponses distribuées aux visages, maisons, et chaises dans la région temporale ventrale



Réponse maximale aux

■ Maisons ■ Visages ■ Chaises

□ Pas de différence



Ishai, A., Ungerleider, L. G., Martin, A., Schouten, J. L., & Haxby, J. V. (1999). Distributed representation of objects in the human ventral visual pathway. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 96(16), 9379-9384.

# Etude de huit catégories distinctes d'objets



Visages



Maisons



Chats



Bouteilles



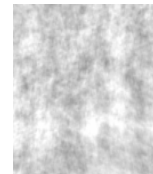
Ciseaux



Chaussures



Chaises



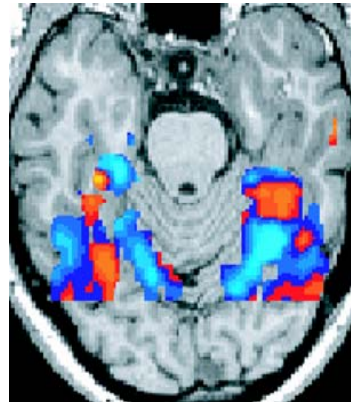
Mélanges

Haxby, J. V., Gobbini, M. I., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, 293(5539), 2425-2430.

Identification de la catégorie sur la base de la configuration spatiale de l'activation  
(moyennée à travers plusieurs présentations)

Category X?

**Faces**

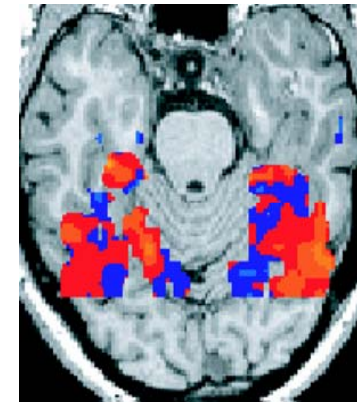
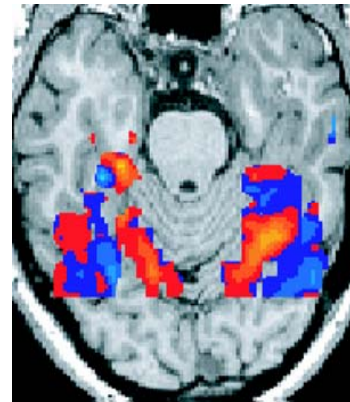
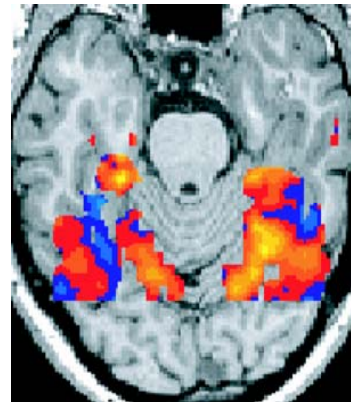
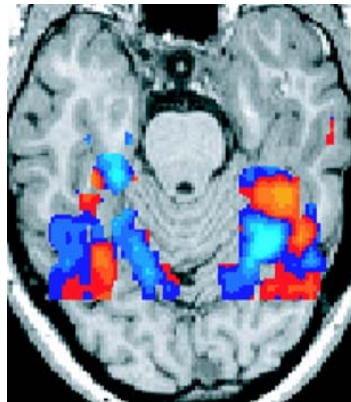


**0.81**

-0.40

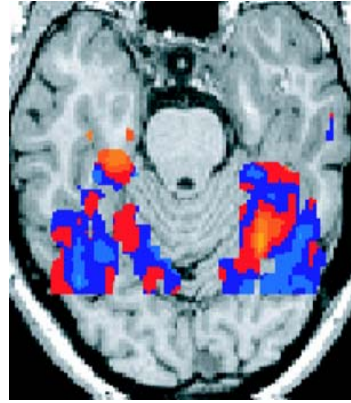
-0.43

-0.17

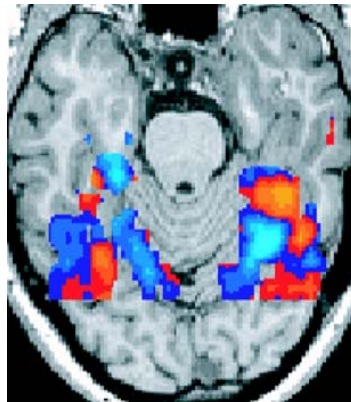


Category Q?

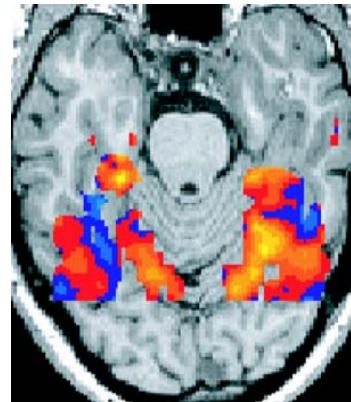
**Chairs**



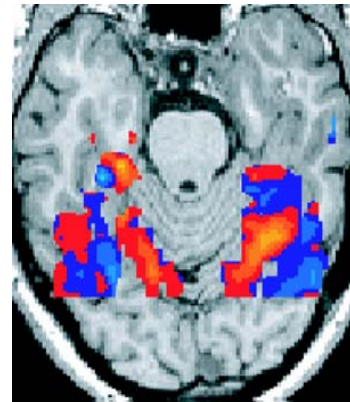
-0.67



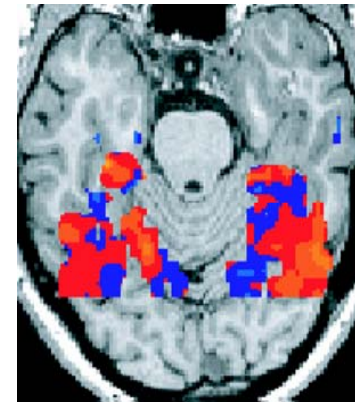
0.29



**0.45**

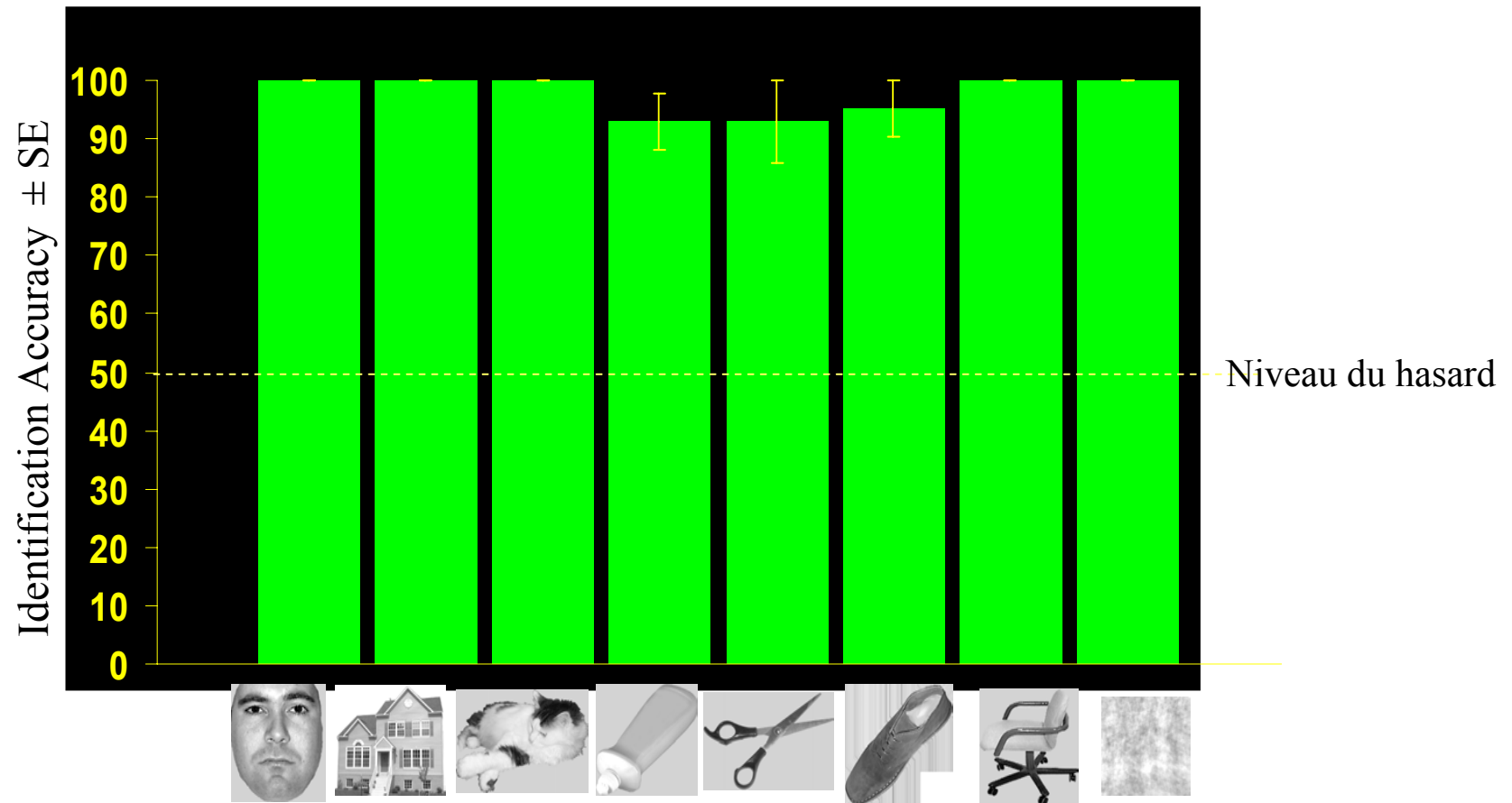


-0.10





# Taux de réussite en classification



Taux de succès global = 96%

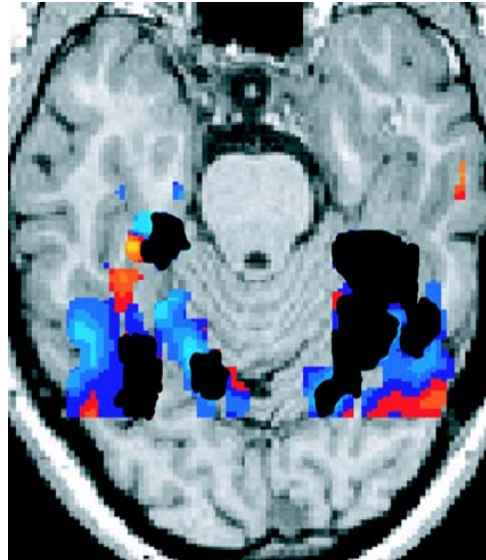
Haxby, J. V., Gobbini, M. I., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, 293(5539), 2425-2430.

La classification reste possible même en excluant les pics d'activation maximale à chaque catégorie.

Category A?

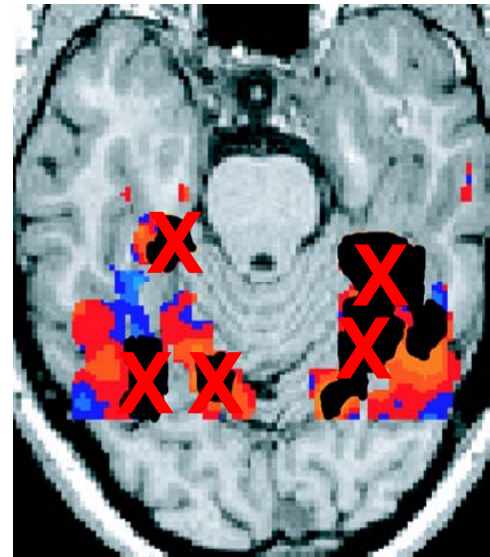
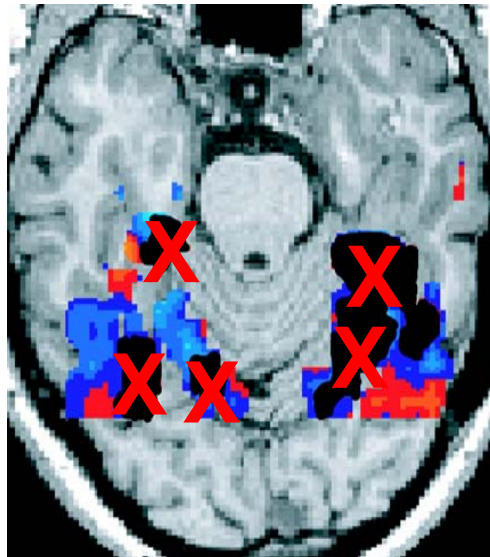
**Faces**

**0.67**



Selon Haxby et al., ces données indiquent une représentation distribuée: "object form" topography

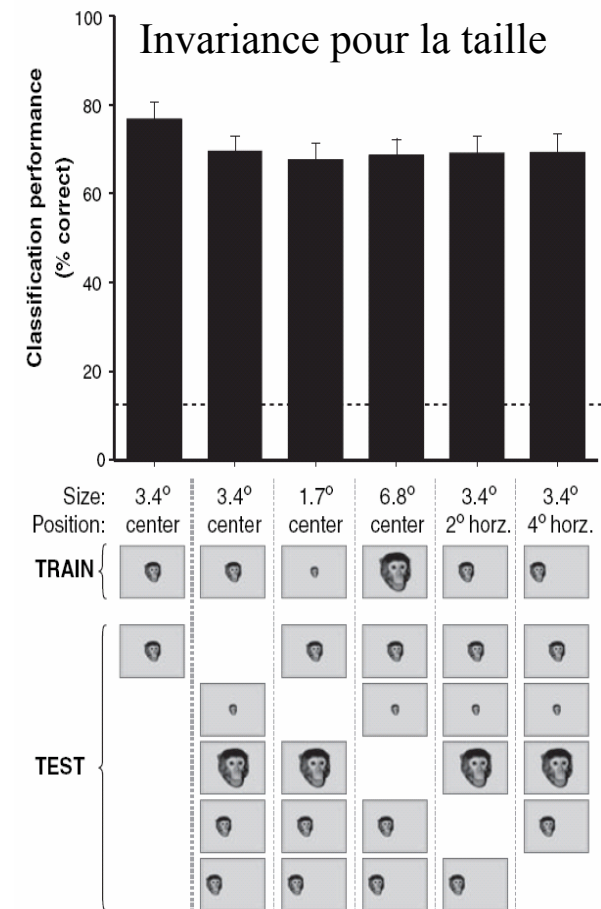
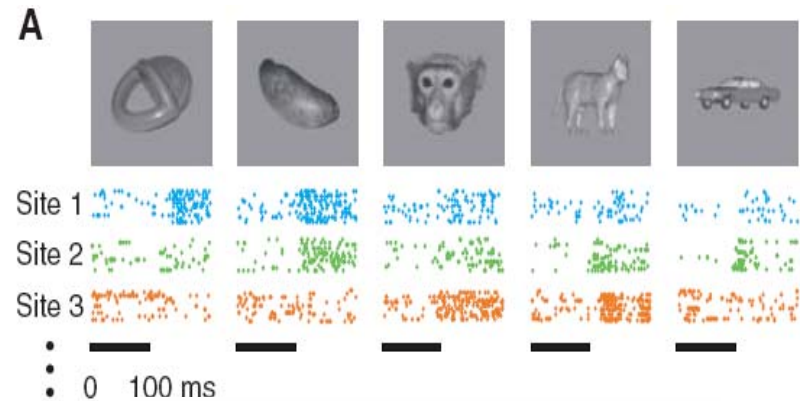
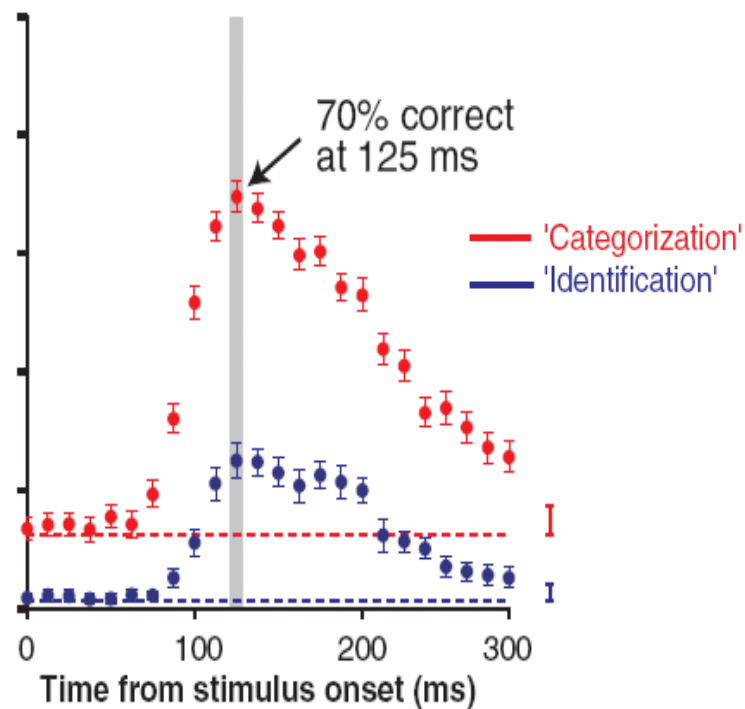
**-0.16**





# Identification des objets sur la base des réponses locales du cortex inféro-temporal

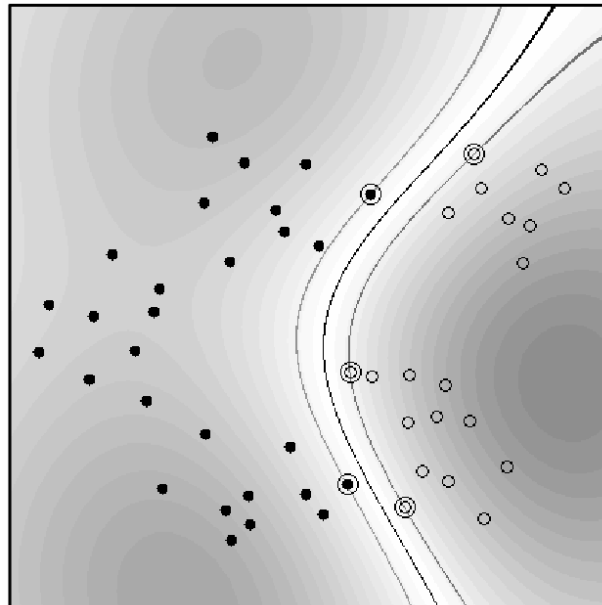
- Enregistrements multi-unitaires dans le cortex inféro-temporal du singe macaque, en réponse à 77 images appartenant à 8 catégories d'objets, durant leur visualisation passive.
- Classification (une catégorie parmi 8) ou Identification (une image parmi 77) à l'aide d'une méthode non-linéaire.



## L'intérêt d'une approche multivariée

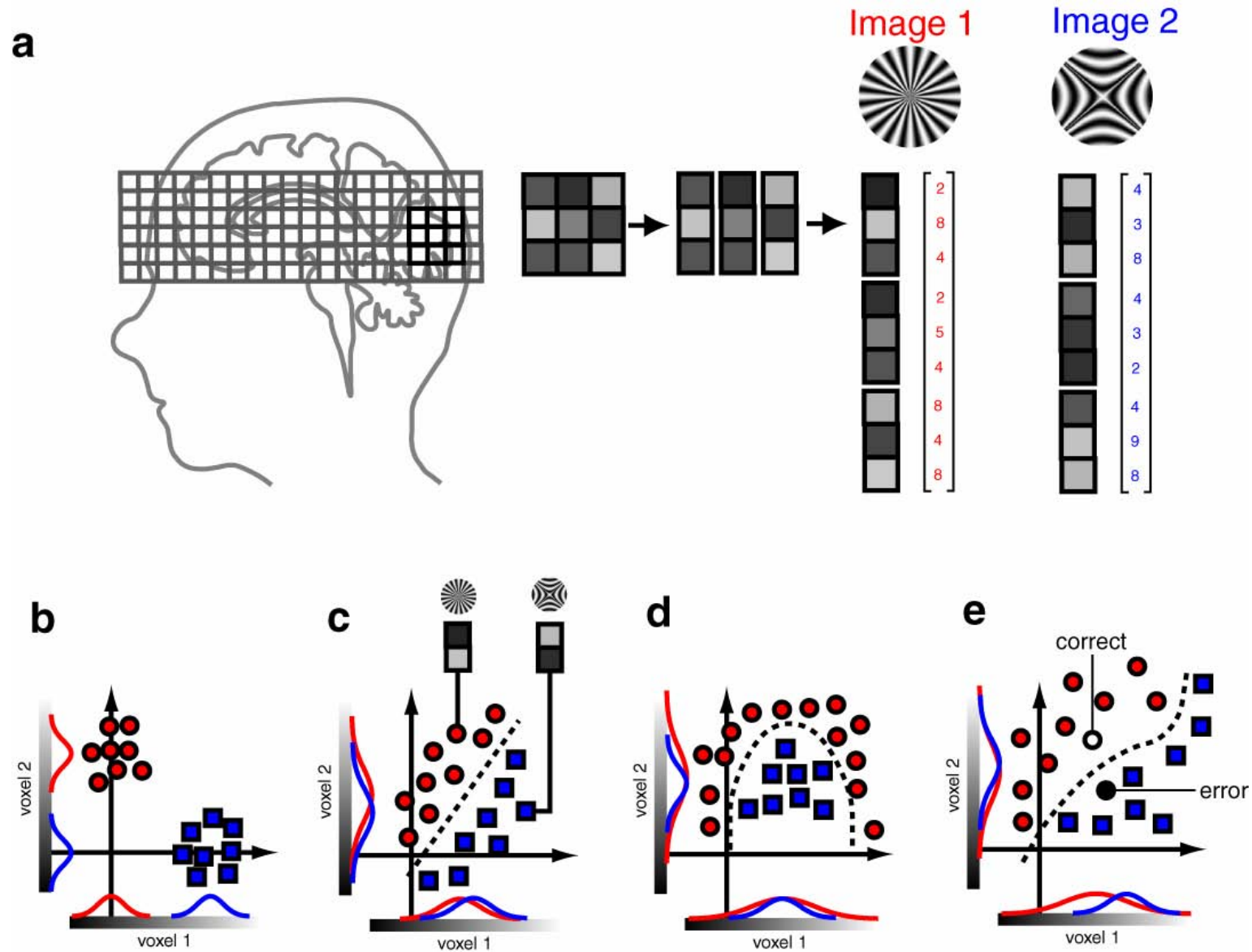
- L'analyse des données d'IRM fonctionnelle est typiquement faite voxel par voxel: on compare, dans chaque voxel, l'activation évoquée par deux conditions.
- Dans les cas difficiles, il n'y a pas de grande différence d'activation entre deux conditions expérimentales. Par contre il se peut qu'il y ait de minuscules différences, indépendantes les unes des autres, dont la configuration globale corrèle avec les conditions expérimentales.
- De nouvelles méthodes multivariées permettent d'extraire l'information de façon non-linéaire et très efficace, même lorsqu'elle est enfouie dans un espace de grande dimensionnalité (machines à vecteurs de support)

Activation du voxel 1



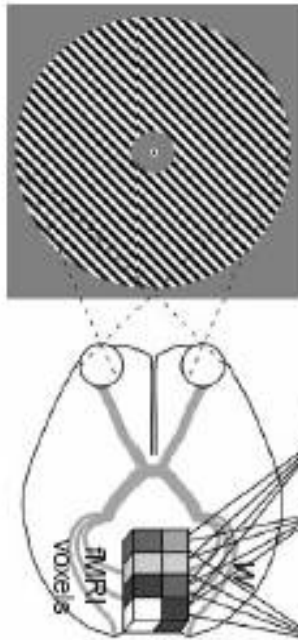
Activation du voxel 2

# Logique de l'approche multivariée



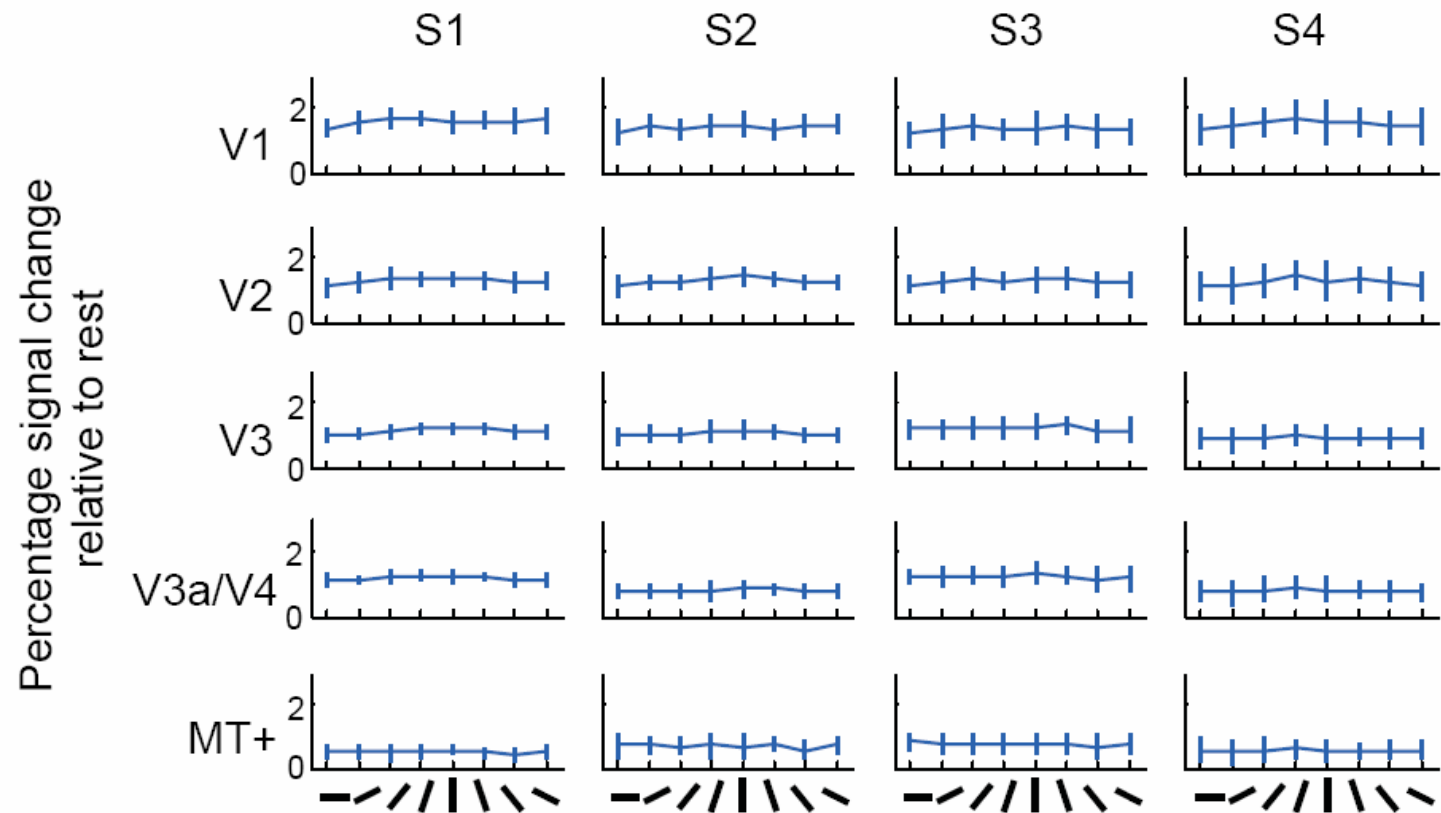
# Décodage de signaux IRM microscopiques (« sub-voxel »): Exemple de l'orientation dans les aires visuelles primaires

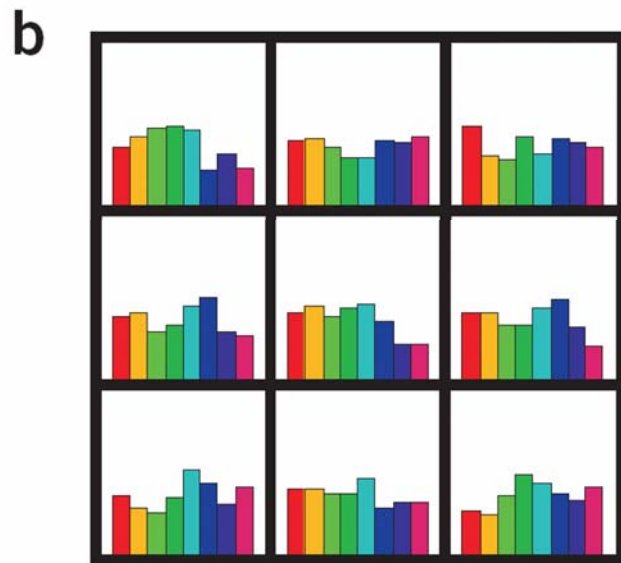
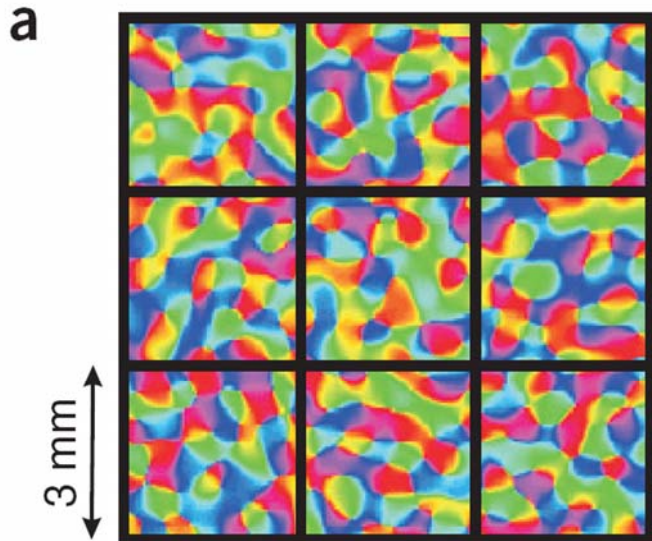
Stimulus = grille de barres  
orientées  
(présentée pendant 16  
secondes)



• Le problème:

L'activité **moyenne** évoquée par huit orientations différentes, dans les aires visuelles, est indistinguable.





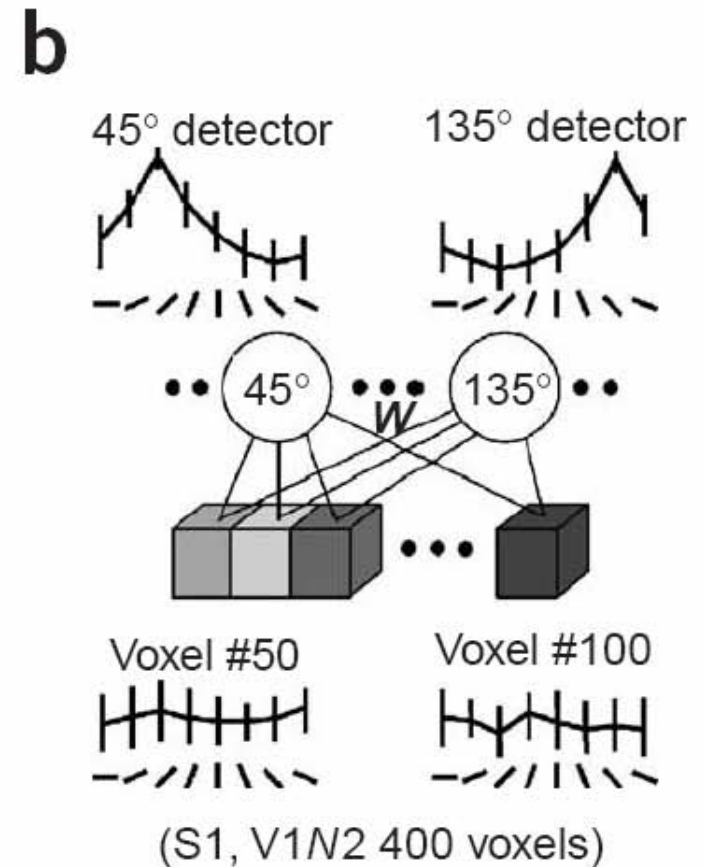
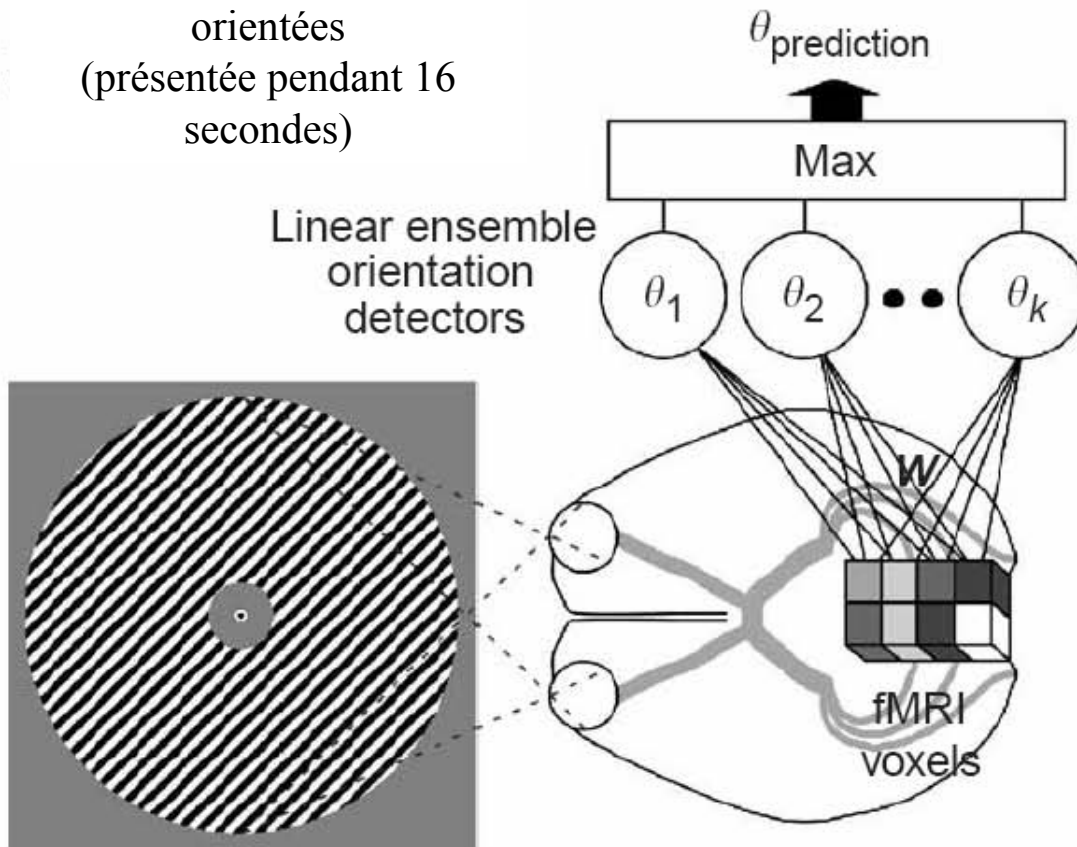
Boynton, 2005

- L'idée:
  - Il existe des colonnes de neurones sélectifs à l'orientation
  - Ces colonnes sont bien trop petites pour être visualisées à la résolution spatiale actuelle de l'IRM
  - Cependant, par hasard, il doit y avoir de petites fluctuations dans la répartition de ces colonnes dans les voxels.
  - Chaque voxel apporte donc un peu d'information sur l'orientation de la grille
  - Un algorithme informatisé d'analyse multi-variée (SVM) peut retrouver cette information distribuée et l'accumuler à travers plusieurs dizaines de voxels.



# Le mécanisme de décodage employé par Kamitani et Tong

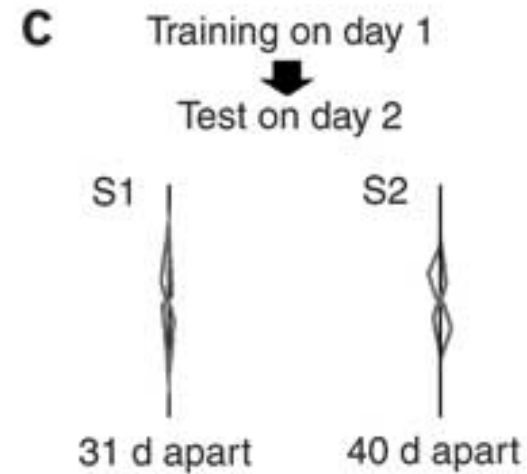
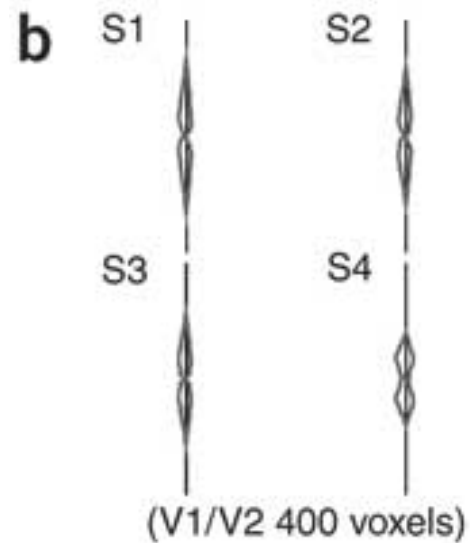
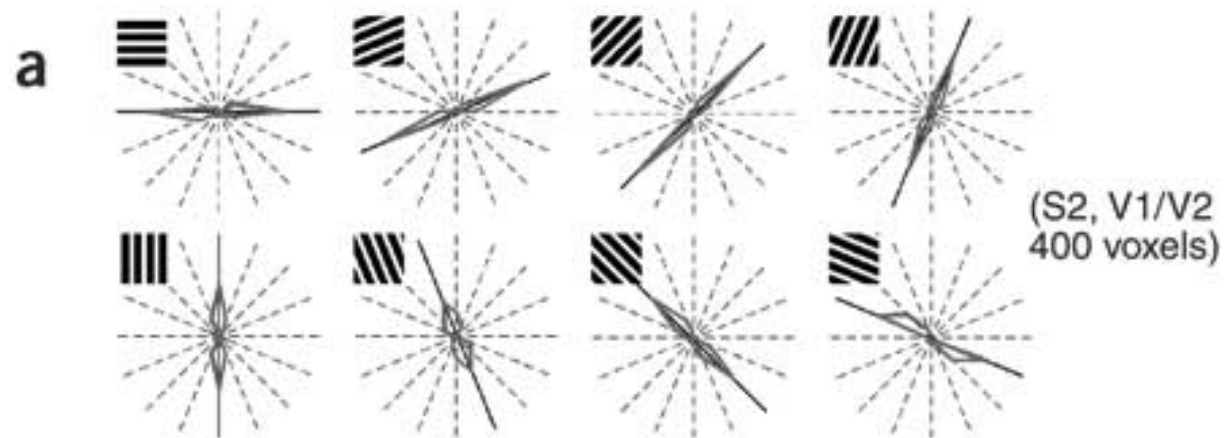
Stimulus = grille de barres orientées  
(présentée pendant 16 secondes)



Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nat Neurosci*, 8(5), 679-685.

## Résultats:

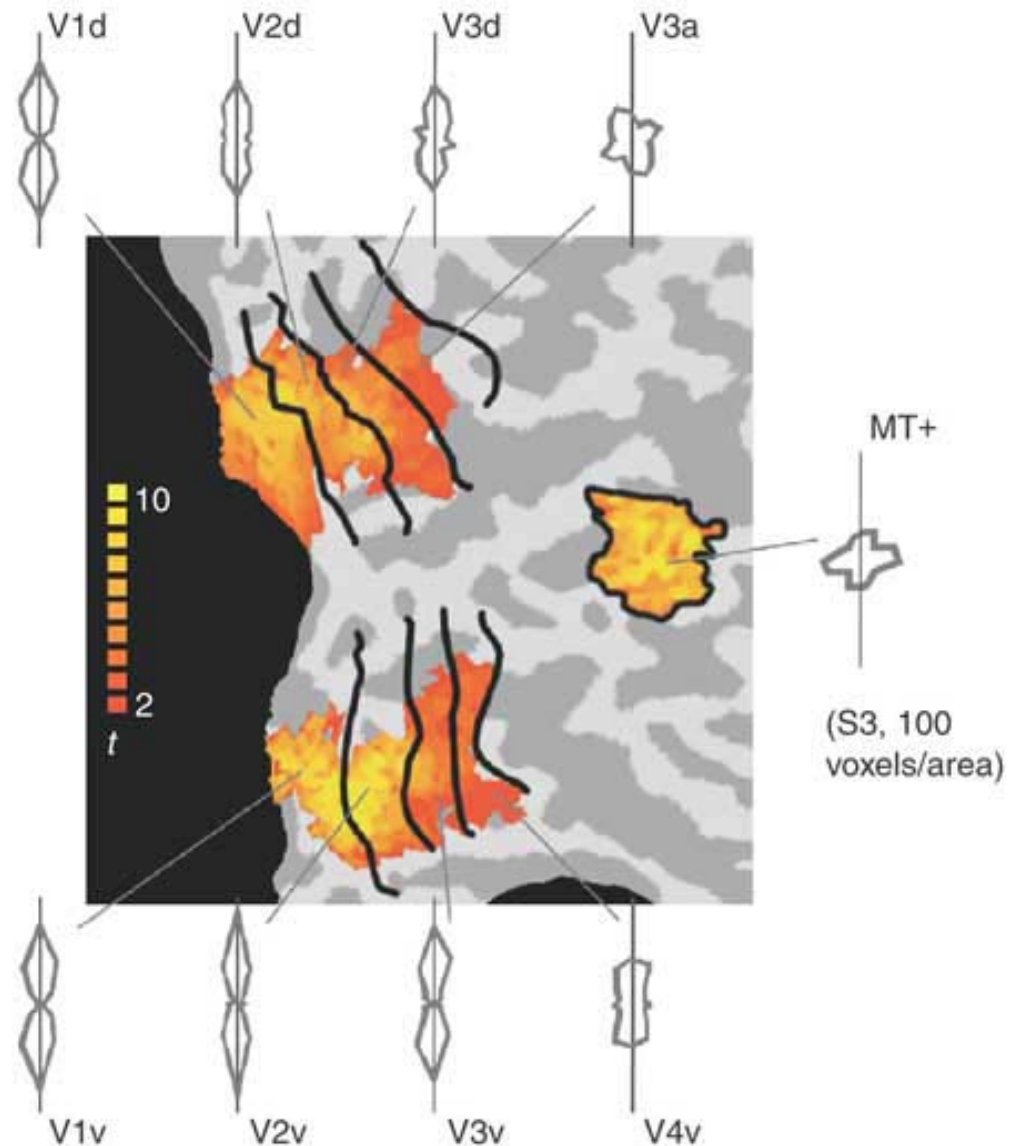
- L'orientation du stimulus peut être inférée avec une grande précision
- Même à plusieurs jours d'intervalle



Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nat Neurosci*, 8(5), 679-685.

## Résultats:

- La performance varie selon la région utilisée pour prédire l'orientation

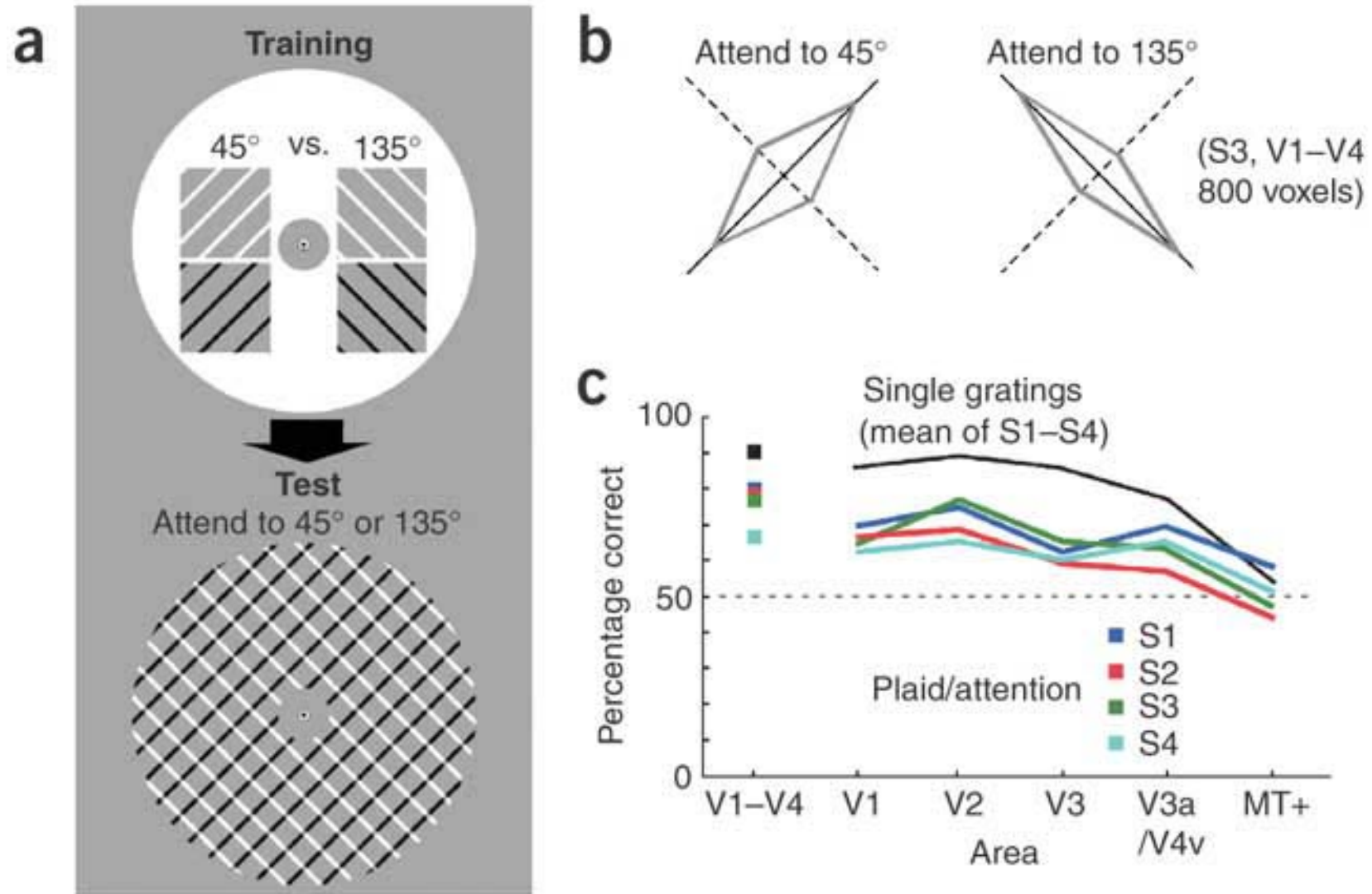


Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nat Neurosci*, 8(5), 679-685.



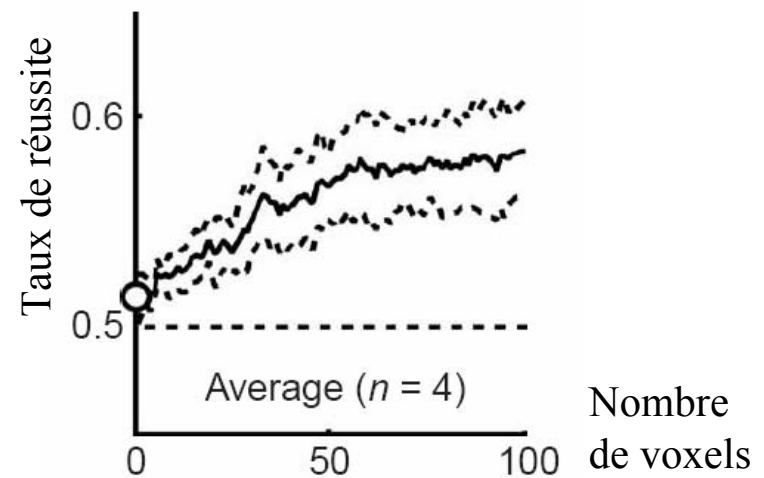
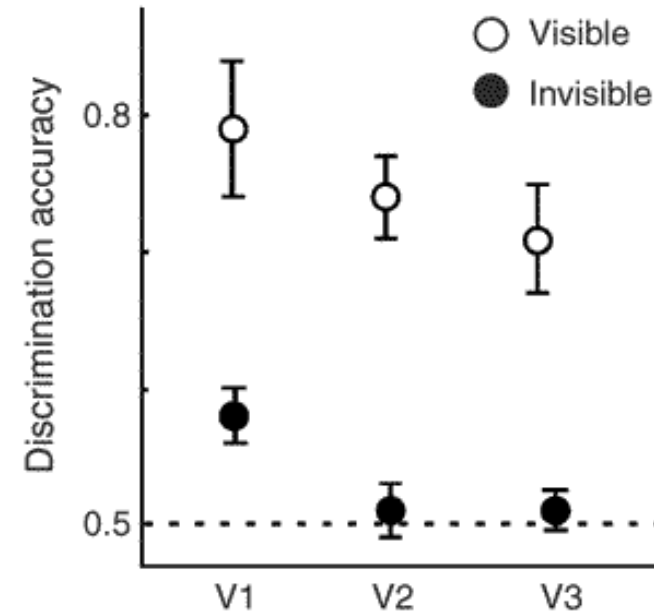
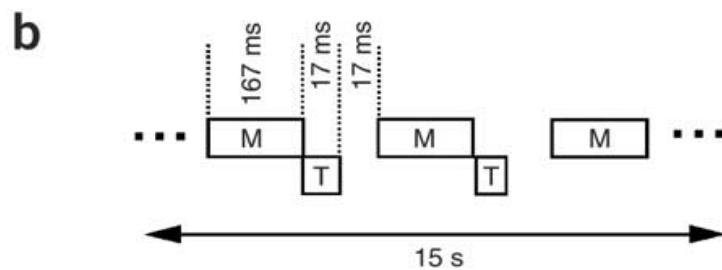
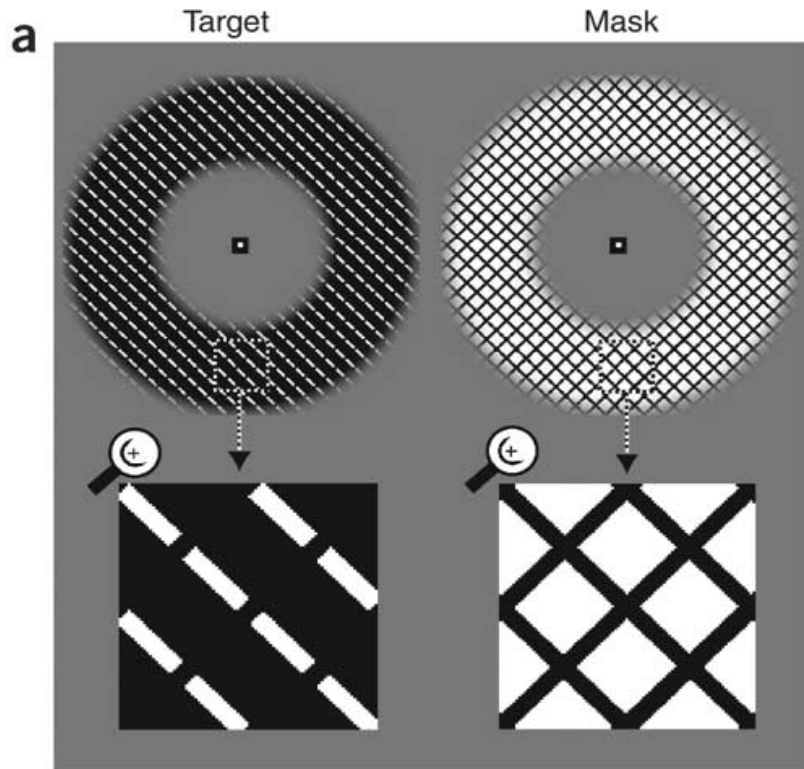
## Résultats:

- Le décodage permet de prédire à quelle orientation le sujet fait attention



Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nat Neurosci*, 8(5), 679-685.

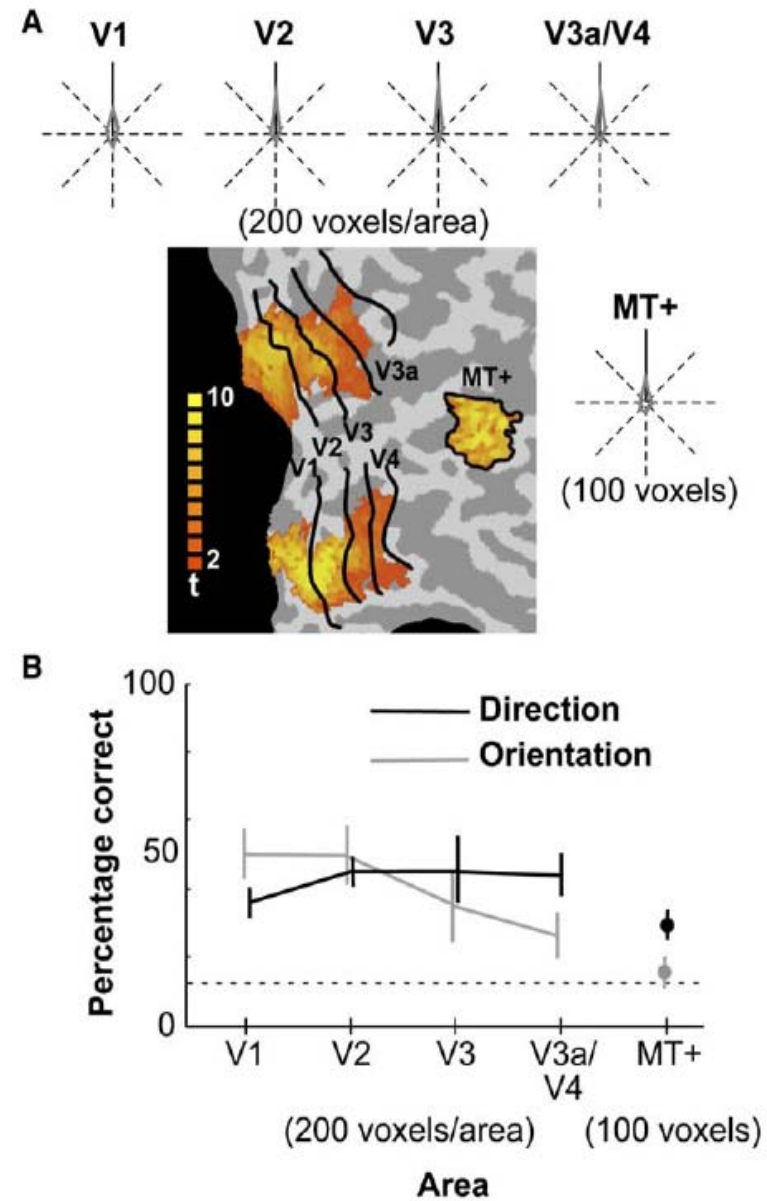
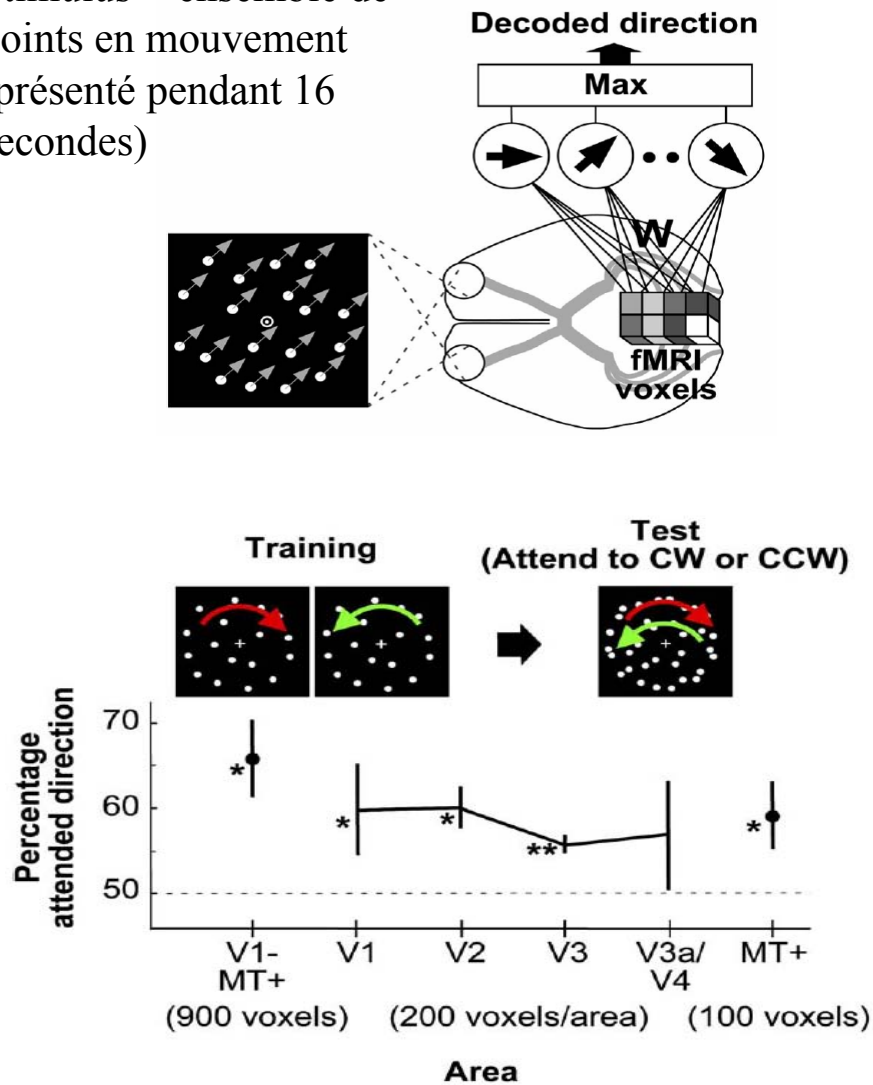
# L'activité de l'aire visuelle primaire permet de décoder l'orientation de stimuli invisibles



Haynes, J. D., & Rees, G. (2005). Predicting the orientation of invisible stimuli from activity in human primary visual cortex. *Nat Neurosci*, 8(5), 686-691.

# La direction du mouvement peut également être décodée

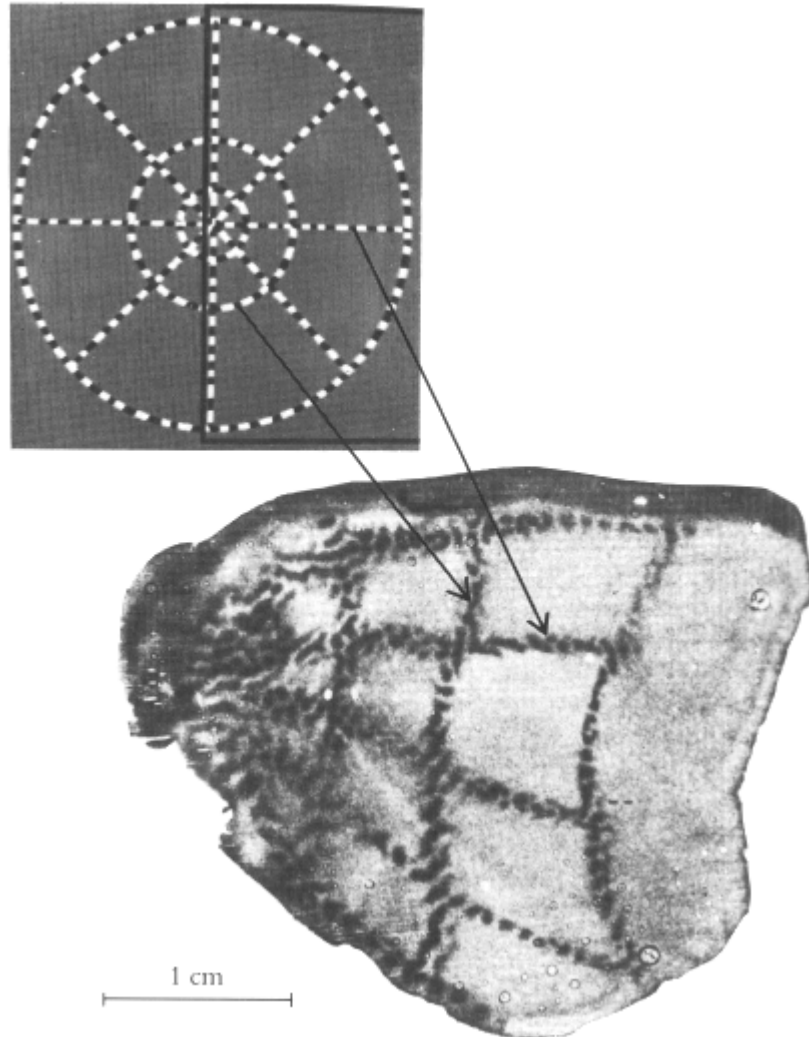
Stimulus = ensemble de points en mouvement (présenté pendant 16 secondes)



Kamitani, Y. and F. Tong (2006). "Decoding Seen and Attended Motion Directions from Activity in the Human Visual Cortex." *Curr Biol* **16**: 1096-1102.

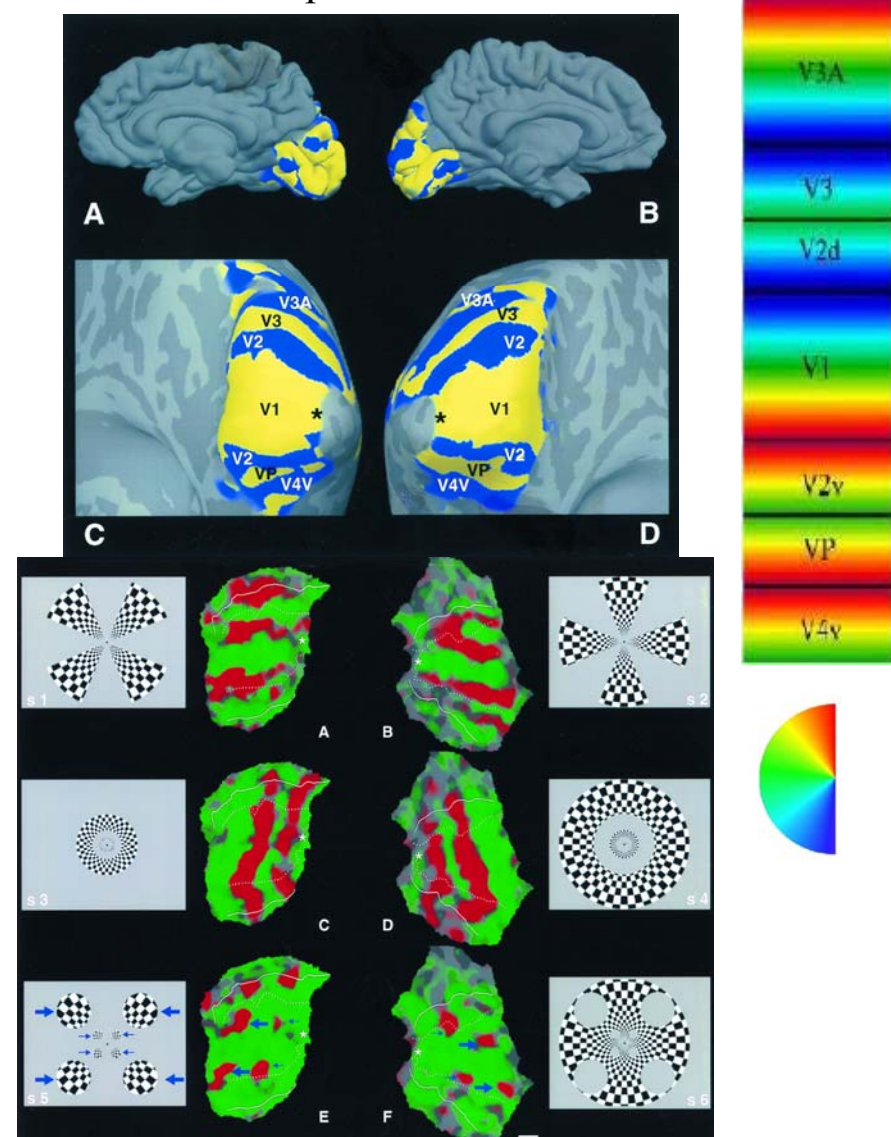
# Expérience de « rétinopie inverse »: peut-on décoder une image mentale? (Bertrand Thirion et al., travail en cours au SHFJ, Orsay)

Rétinotopie chez le singe macaque



Tootell, R. B., M. S. Silverman, et al. (1982). "Deoxyglucose analysis of retinotopic organization in primate striate cortex." *Science* **218**(4575): 902-4.

Rétinotopie chez l'homme

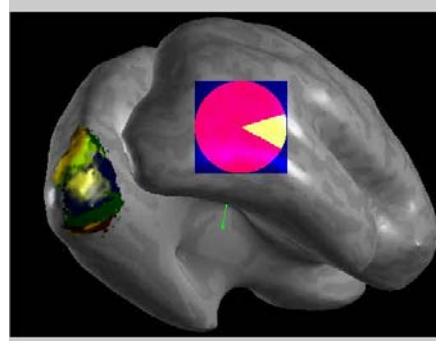


Sereno, Tootell, Wandell, Segebarth...

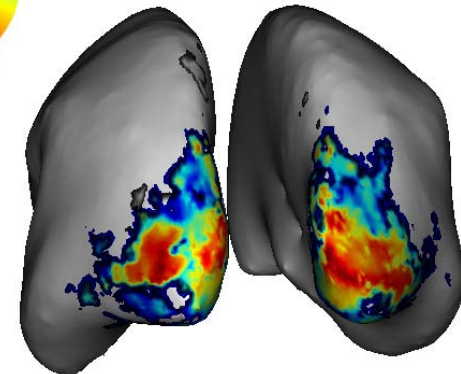
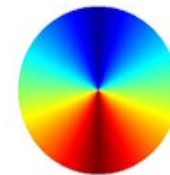
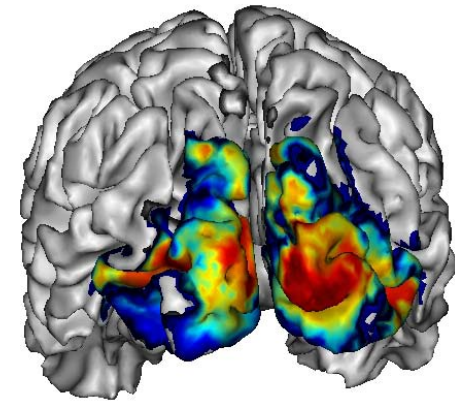
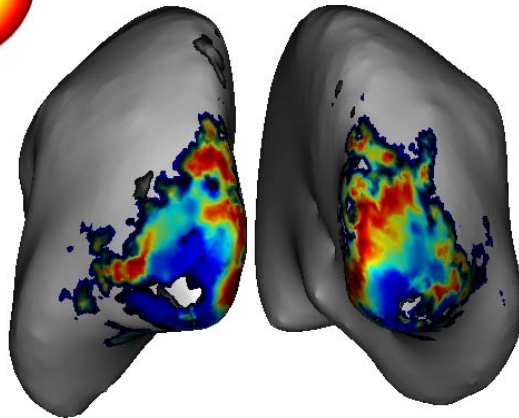
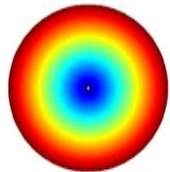
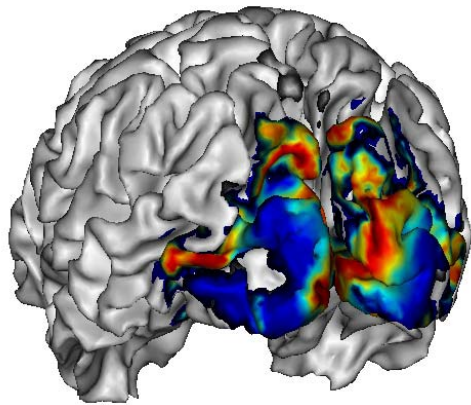


# Identification des aires rétinitopiques chez l'homme

Sereno, M. I., Dale, A. M., Reppas, J. B., Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Brady, T. J., et al. (1995). Borders of multiple visual areas in humans revealed by functional magnetic resonance imaging. *Science*, 268, 889-893.



G. Boynton

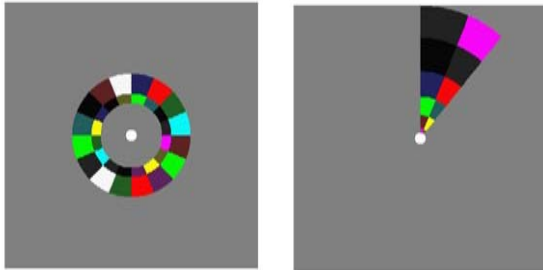


B. Thirion

# Principe de la « rétinotopie inverse »

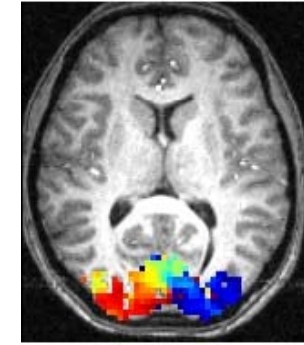
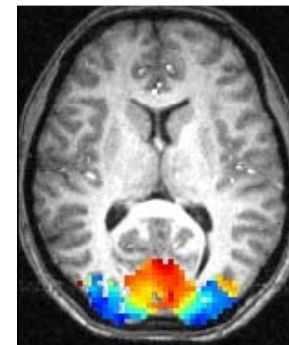
## Etape 1

Stimuli en mouvement présentés sur la rétine



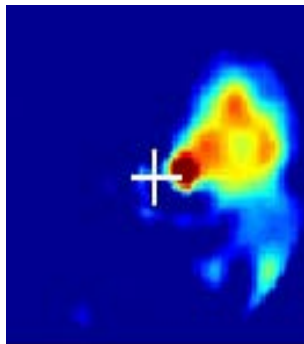
Correspondance entre stimuli et cortex

apprentissage

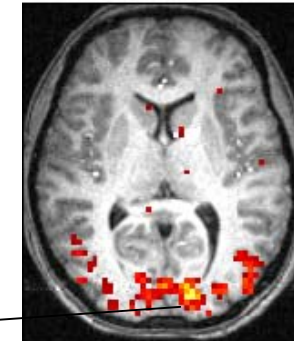


## Etape 2

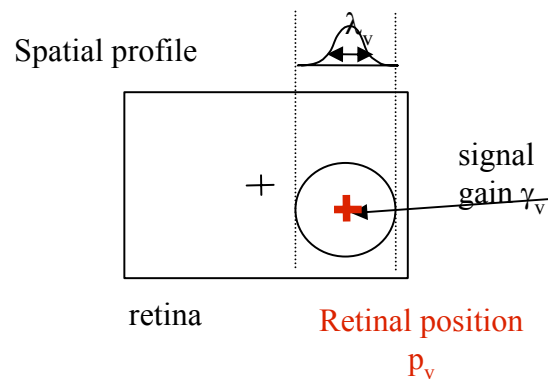
Stimulus reconstruit



Activation quelconque

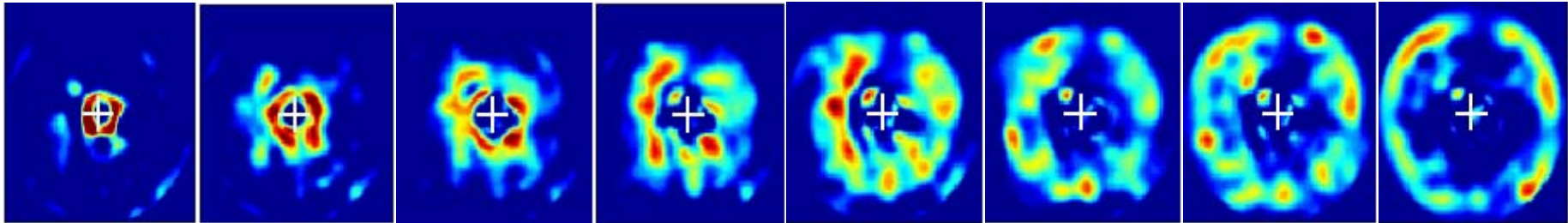


Inférence inverse

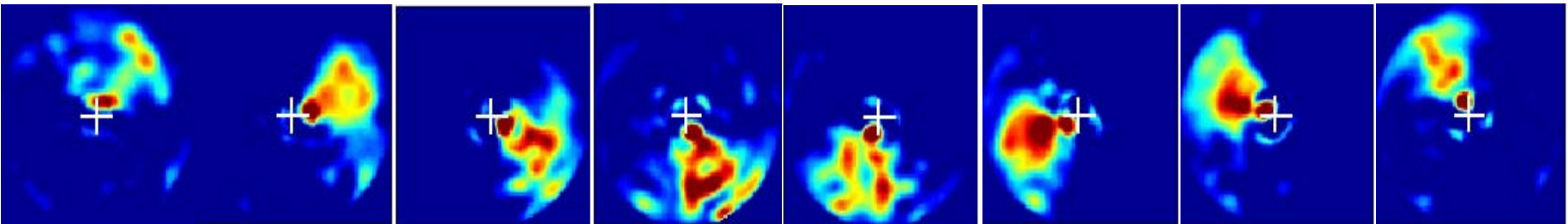


# Résultats obtenus sur les stimuli rétinotopiques

Anneau

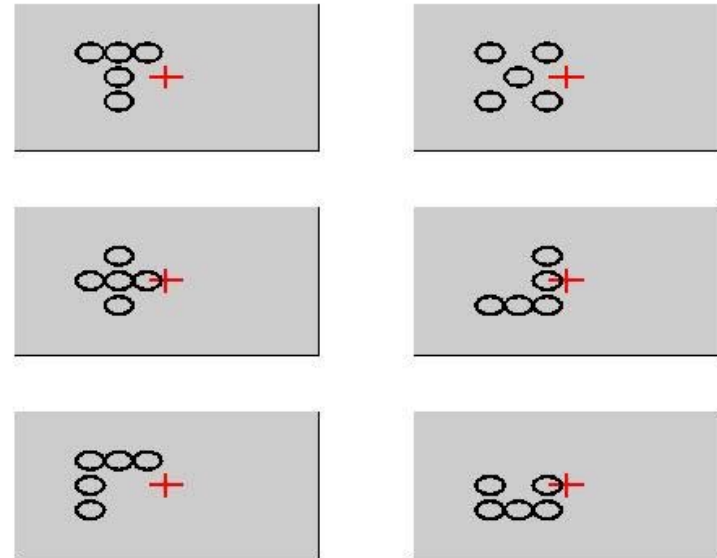
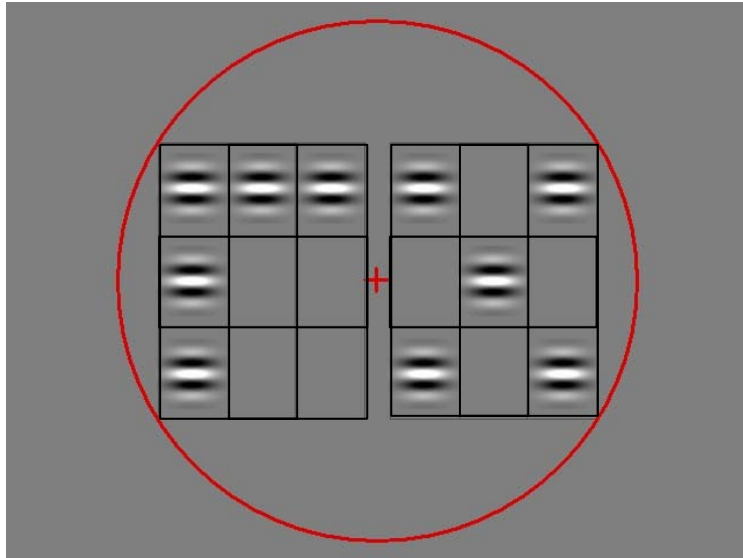


Secteur

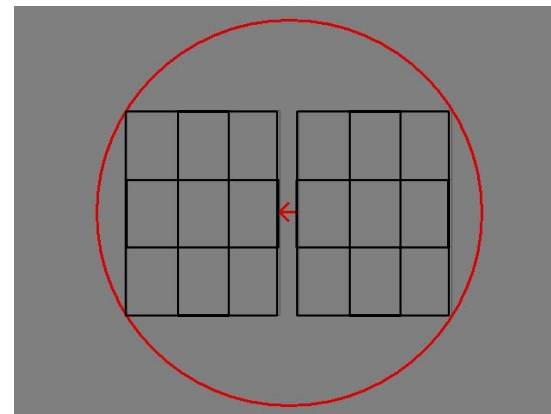
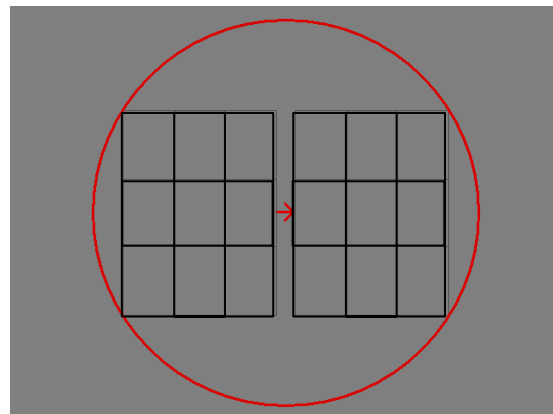


# Stimuli supplémentaires pour la « rétinopie inverse »

**1. Stimulation visuelle.** Stimuli en mouvement présentés sous forme de « dominos », indépendamment dans les hémichamps droit et gauche.

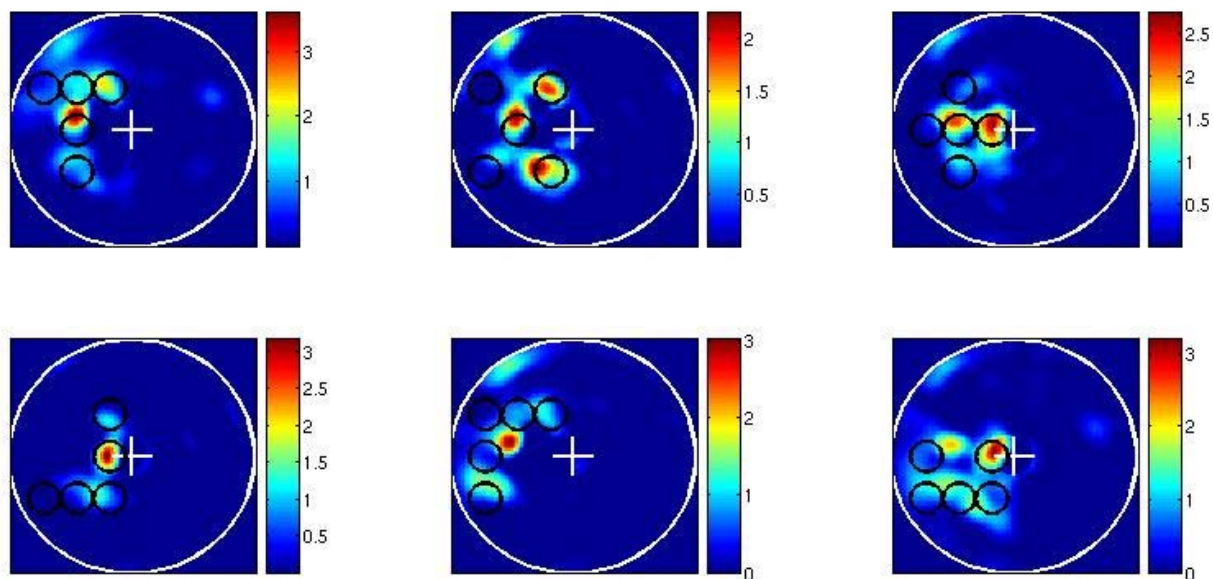


**2. Imagerie mentale.** Le sujet voit une grille vide et imagine, du côté indiqué par la flèche, un domino qu'il a choisi.

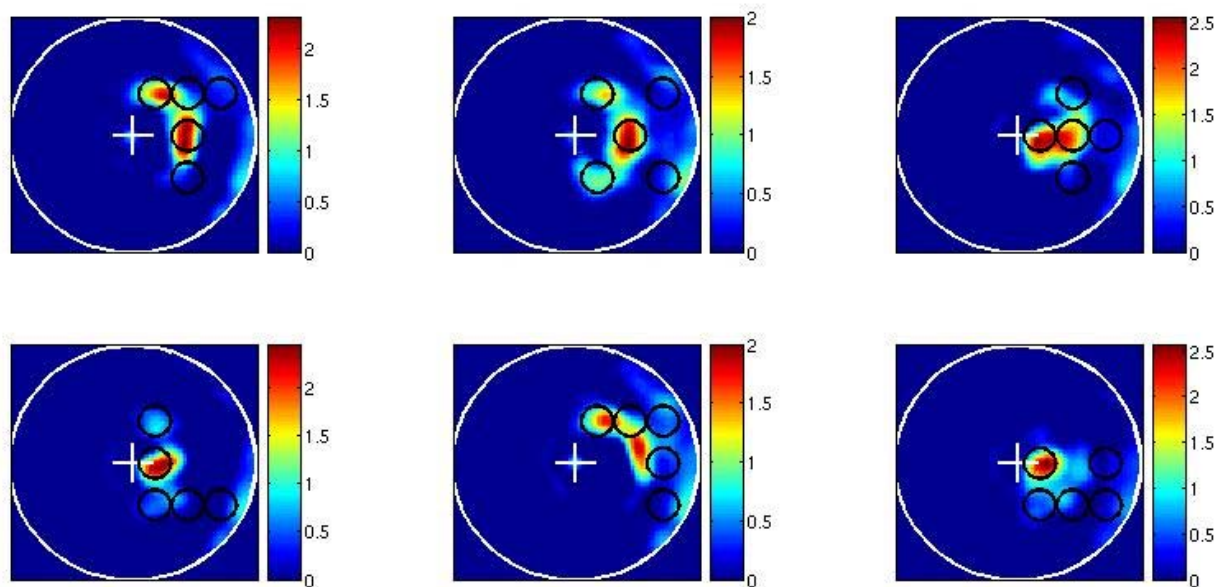




# Résultats obtenus sur les dominos vus



Sujet bru3070, côtés gauche et droit



# Classification des dominos vus

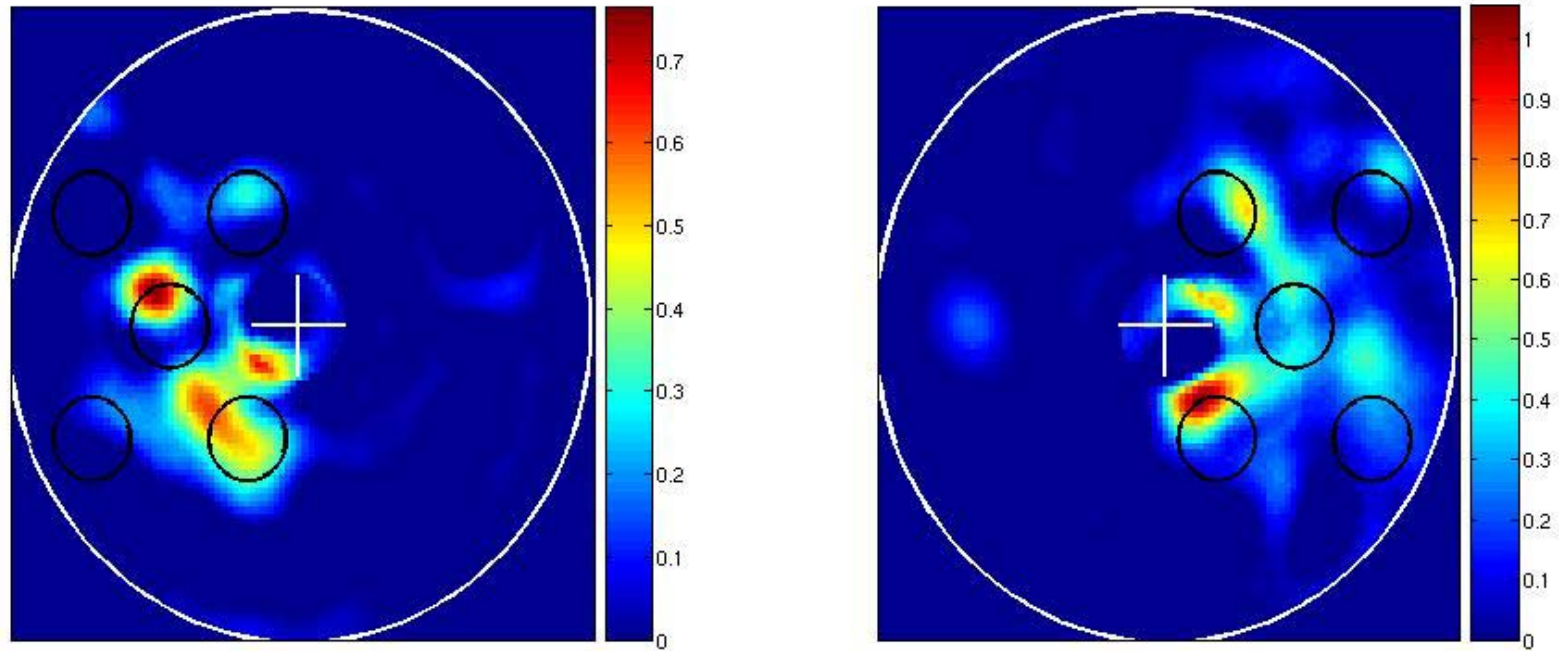
Taux de réussite en comparaison du stimulus reconstruit et du stimulus vu

Subject	L Hemisphere	R hemisphere	
2773	41%	65%	Niveau du hasard 17%
2774	69%	51%	
2782	69%	53%	
2783	60%	47%	P<0.001 à 27%
2784	30%	40%	
3070	63%	61%	
3071	65%	49%	
3072	49%	56%	

Taux de réussite en identification du stimulus vu par « support vector machine » (SVM)

Subject	4-Fold validation		Leave-one-out validation	
	L Hemi	R hemi	L Hemi	R hemi
2773	81%	81%	70%	74%
2774	77%	73%	85%	70%
2782	78%	80%	85%	86%
2783	92%	96%	91%	94%
2784	74%	60%	74%	60%
3070	81%	88%	86%	90%
3071	92%	83%	96%	83%
3072	72%	87%	75%	88%

## Résultats obtenus sur les dominos imaginés

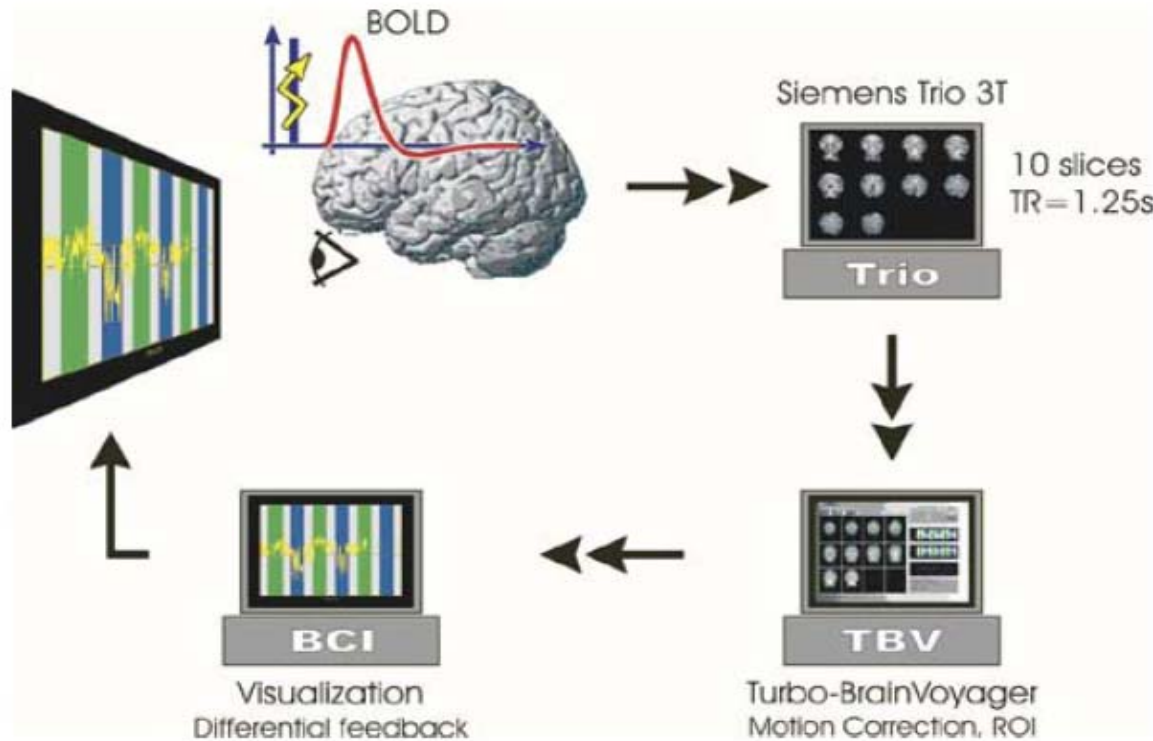


- Bonne classification du **côté** où le sujet imagine le domino
- Moins bonne reconstruction de l'identité de l'image (réussite meilleure que le hasard chez 5 hémisphères sur 16)

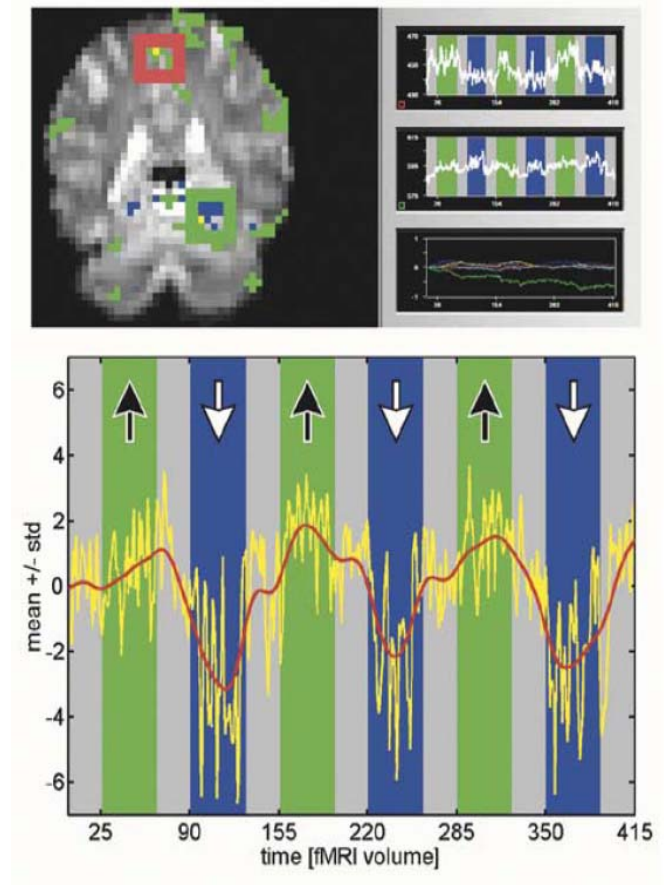
# Vers des applications pratiques?

## 1. Interfaces neuro-informatiques

Reconstruction et traitement des images en temps réel



Apprentissage par « bio-feedback »

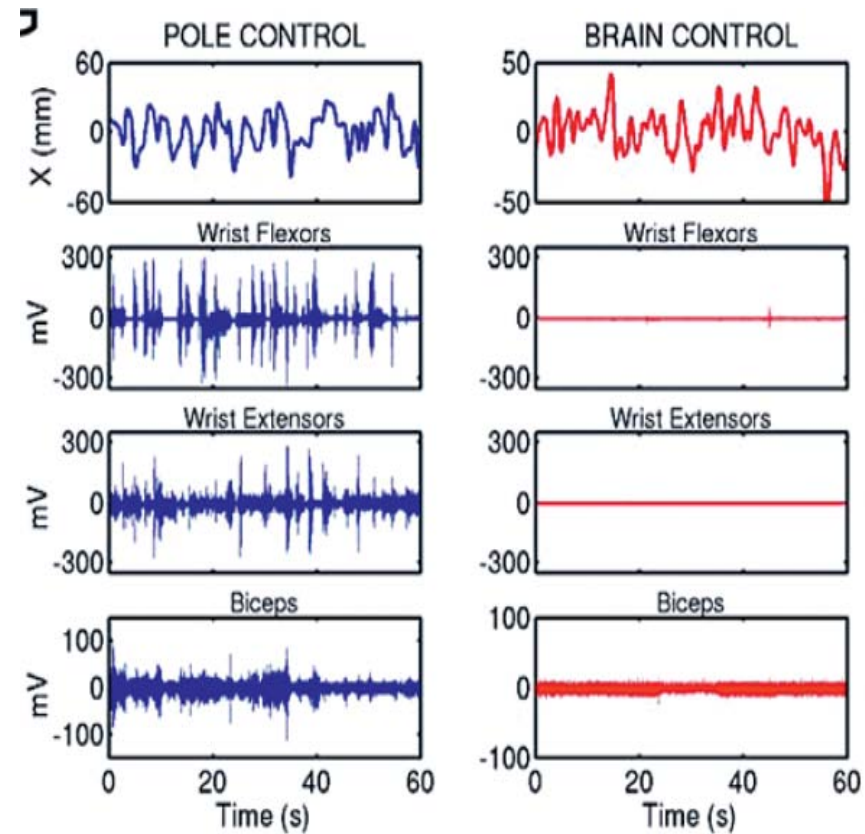
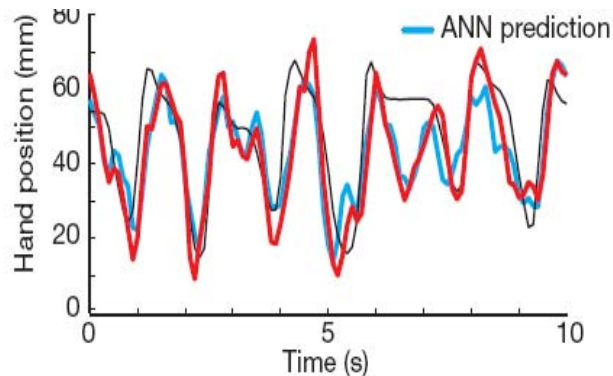
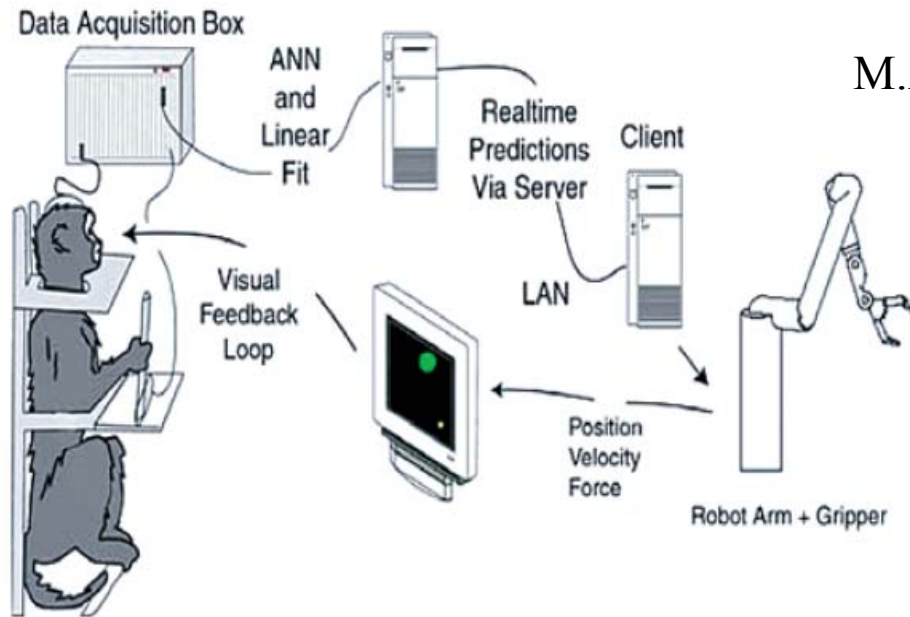


Weiskopf, N., Scharnowski, F., Veit, R., Goebel, R., Birbaumer, N., & Mathiak, K. (2004). Self-regulation of local brain activity using real-time functional magnetic resonance imaging (fMRI). *J Physiol Paris*, 98(4-6), 357-373.

# Vers des applications pratiques?

## 1. Interfaces neuro-informatiques

M.A Nicolelis



Carmena, J. M., Lebedev, M. A., Crist, R. E., O'Doherty, J. E., Santucci, D. M., Dimitrov, D. F., et al. (2003). Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates. *PLoS Biol*, 1(2), E42.

Wessberg, J., Stambaugh, C. R., Kralik, J. D., Beck, P. D., Laubach, M., Chapin, J. K., et al. (2000). Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates. *Nature*, 408(6810), 361-365.



# Vers des applications pratiques?

## 2. Apprentissage du contrôle de la douleur

- Les participants (volontaires sains et patients avec douleurs chroniques) apprennent à contrôler l'activité d'une région cingulaire rostrale associée au contrôle de la douleur.
- Après entraînement, les patients rapportent une diminution de la douleur perçue.

Régions où l'activation augmente avec l'apprentissage

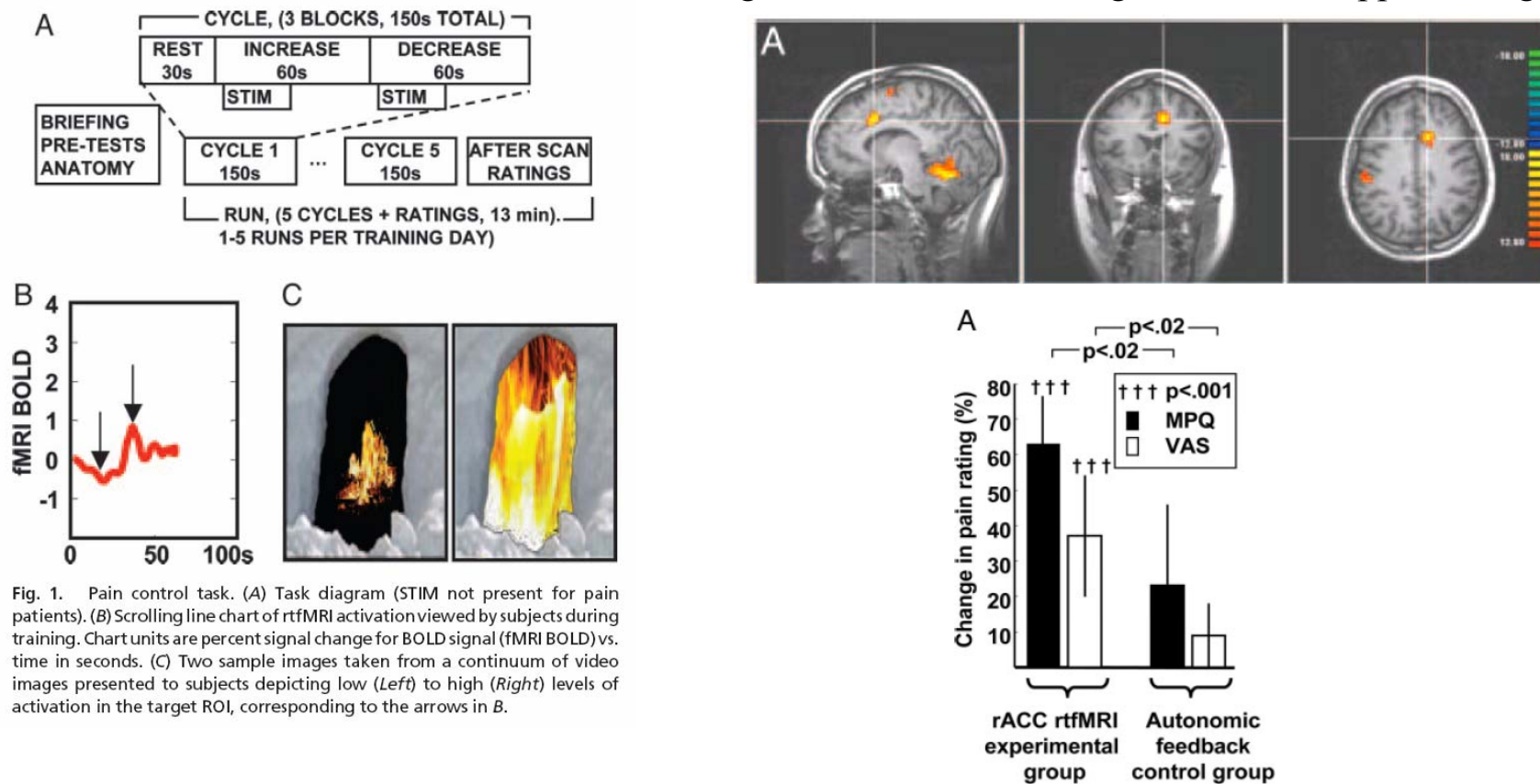


Fig. 1. Pain control task. (A) Task diagram (STIM not present for pain patients). (B) Scrolling line chart of rtfMRI activation viewed by subjects during training. Chart units are percent signal change for BOLD signal (fMRI BOLD) vs. time in seconds. (C) Two sample images taken from a continuum of video images presented to subjects depicting low (Left) to high (Right) levels of activation in the target ROI, corresponding to the arrows in B.

deCharms, R. C., Maeda, F., Glover, G. H., Ludlow, D., Pauly, J. M., Soneji, D., et al. (2005). Control over brain activation and pain learned by using real-time functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 102(51), 18626-18631.

### 3. Détection du mensonge par IRM fonctionnelle

- Les participants ont deux cartes à jouer en leur possession
- Pour chaque carte présentée visuellement, l'expérimentateur leur demande de dire si elle est en leur possession ou pas
- Un autre expérimentateur, auparavant, leur a demandé de nier posséder l'une des deux cartes (choisie volontairement)
- Analyse par contraste direct des essais « mensonge » et « vérité » (SPM), et par classificateur non-linéaire (SVM).

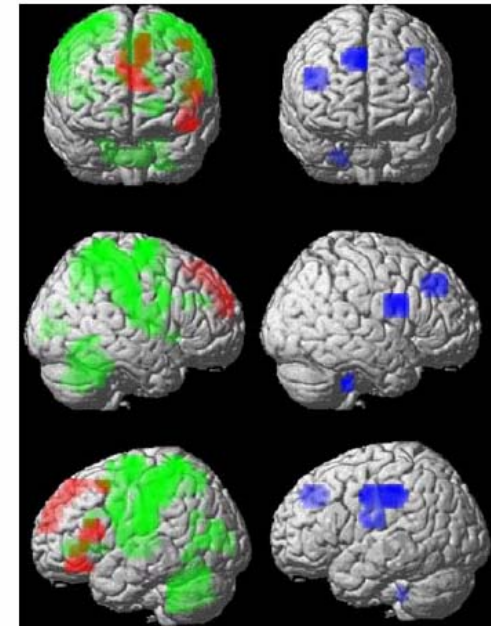
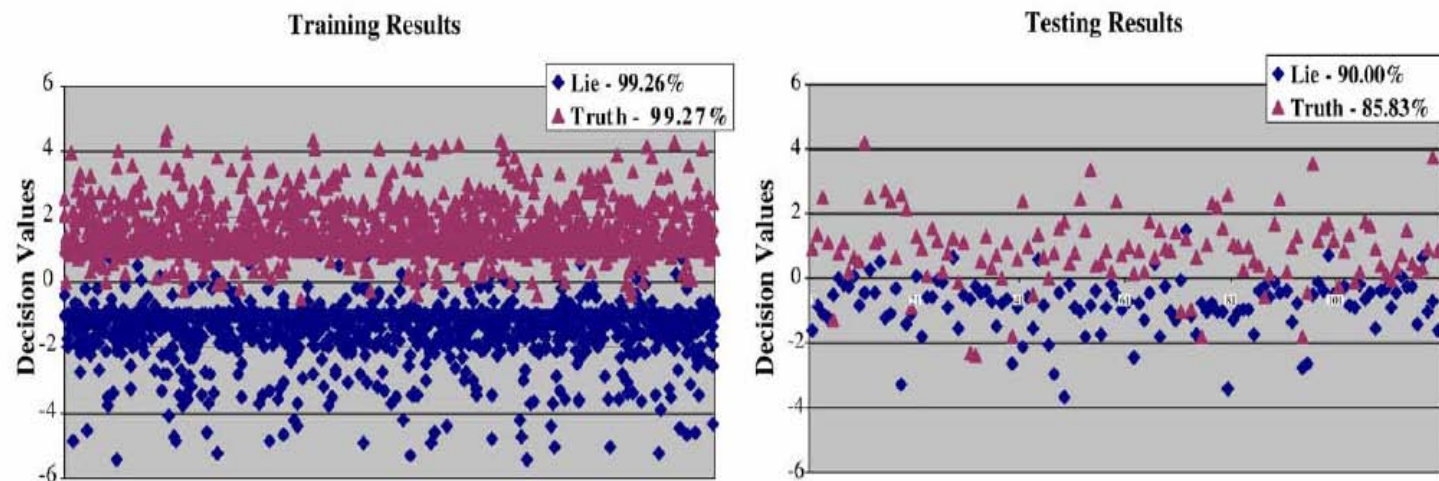


Fig. 3. Left: Different 3D views of regions of relatively higher activity during truth-telling (green) and lying (red). Right: Areas in which functional activity was found to be most informative in terms of pattern classification, in the sense that activities in primarily those regions were jointly used to classify an activity pattern. Some of the blue regions are relatively deeper and therefore appear fuzzed out in this rendition.



Davatzikos, C., Ruparel, K., Fan, Y., Shen, D. G., Acharyya, M., Loughead, J. W., et al. (2005). Classifying spatial patterns of brain activity with machine learning methods: application to lie detection. *Neuroimage*, 28(3), 663-668.

## Autres études du mensonge

- S. A. Spence *et al.*, *Neuroreport* **12**, 2849 (Sep 17, 2001): « Lying was associated with longer response times ( $p < 0.001$ ) and **greater activity in bilateral ventrolateral prefrontal cortices** ( $p < 0.05$ , corrected). »
- D. D. Langleben *et al.*, *Neuroimage* **15**, 727 (Mar, 2002): « Increased activity in the **anterior cingulate cortex (ACC)**, the **superior frontal gyrus (SFG)**, and the left premotor, motor, and anterior parietal cortex was specifically associated with deceptive responses. »
- F. B. Mohamed *et al.*, *Radiology* **238**, 679 (Feb, 2006): « During the deception process, specific areas of the frontal lobe (**left medial and left inferior frontal lobes**), temporal lobe (right hippocampus and right middle temporal gyrus), occipital lobe (left lingual gyrus), anterior cingulate, right fusiform gyrus, and right sublobar insula were significantly active. »
- D. D. Langleben *et al.*, *Hum Brain Mapp* **26**, 262 (Dec, 2005). « Lie was discriminated from truth on a single-event level with an accuracy of 78%, while the predictive ability expressed as the area under the curve (AUC) of the receiver operator characteristic curve (ROC) was 85%.» ... « The relative salience of the task cues affected the net activation associated with lie in the **superior medial and inferolateral prefrontal cortices**. Salience of the task cues is a **potential confounding factor** in the fMRI pattern attributed to deception in forced choice deception paradigms. »



# Conclusions

- **L'imagerie cérébrale permet de décoder certains états mentaux**
  - Le décodage est facile lorsque les changements d'activité sont macroscopiques
  - Le décodage du « méso-code » des colonnes corticales commence à être possible. Il présente un grand intérêt pour les neurosciences cognitives et devrait s'améliorer avec la résolution des images.
  - Le décodage du « micro-code » neural sera-t-il jamais possible de façon non-invasive? Problèmes de signal, de mouvement...
- **Le décodage présente un intérêt pratique en médecine** (communication homme-machine, ré-éducation, bio-feedback...)
- **Aspects éthiques: les méthodes de décodage peuvent-elles être mal utilisées?**
  - Il est certainement possible d'extraire du cerveau quelques informations que le volontaire ne souhaite pas révéler (mensonge; langues parlées...) ou même auxquelles il n'a pas accès (états subliminaux; vrais ou faux souvenirs)
  - Cependant, la **sensibilité** et la **spécificité** de ces méthodes reste très douteuse (existe-t-il une unique catégorie d'état cérébral du « mensonge »??)
  - Les examens d'imagerie demandent la collaboration du sujet. Il est facile de les perturber par l'action (mouvements corrélés) ou par la pensée!