

Cours 2018-2019:

**Progrès récents en imagerie cérébrale
et décodage des représentations mentales**

Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°6

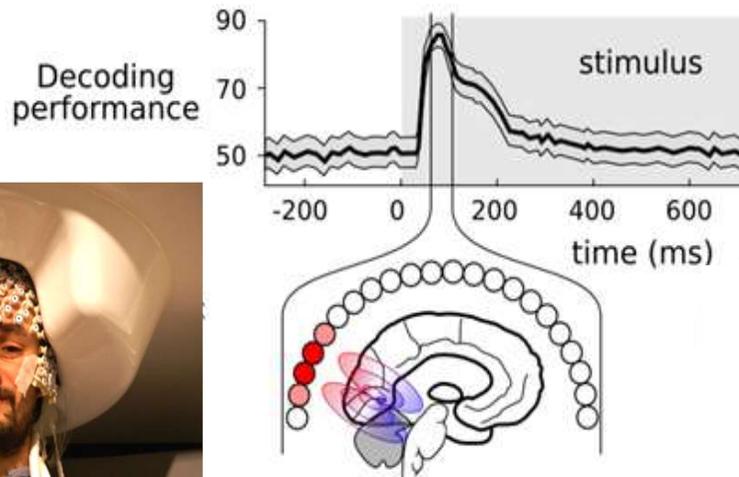
L'imagerie cérébrale permet-elle de décoder les pensées?



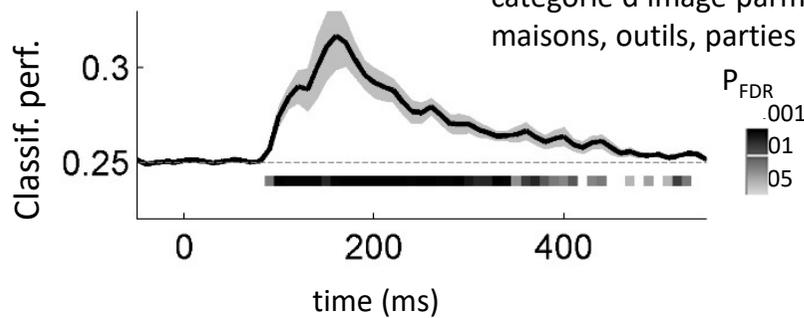
Le décodage multivarié des signaux MEG: une source remarquable d'informations sur le déroulement temporel des représentations mentales

King, J.-R., & Dehaene, S. (2014). Characterizing the dynamics of mental representations: the temporal generalization method. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.01.002>

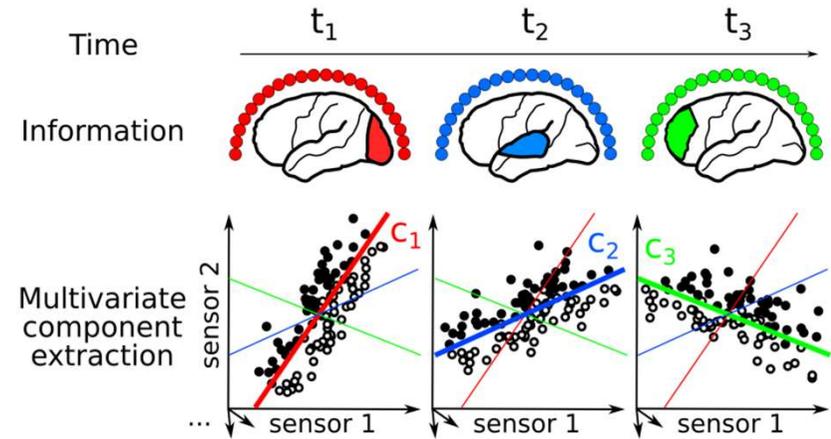
En chaque point de temps, nous pouvons entraîner un décodeur à identifier tel ou tel aspect du stimulus.



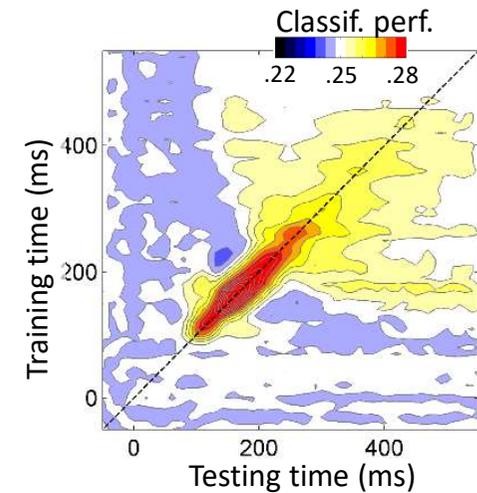
Exemple: le décodage d'une catégorie d'image parmi 4 (visages, maisons, outils, parties du corps)

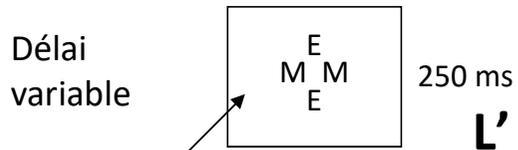


Des moments différents peuvent contenir des informations différentes sur le même aspect du stimulus.



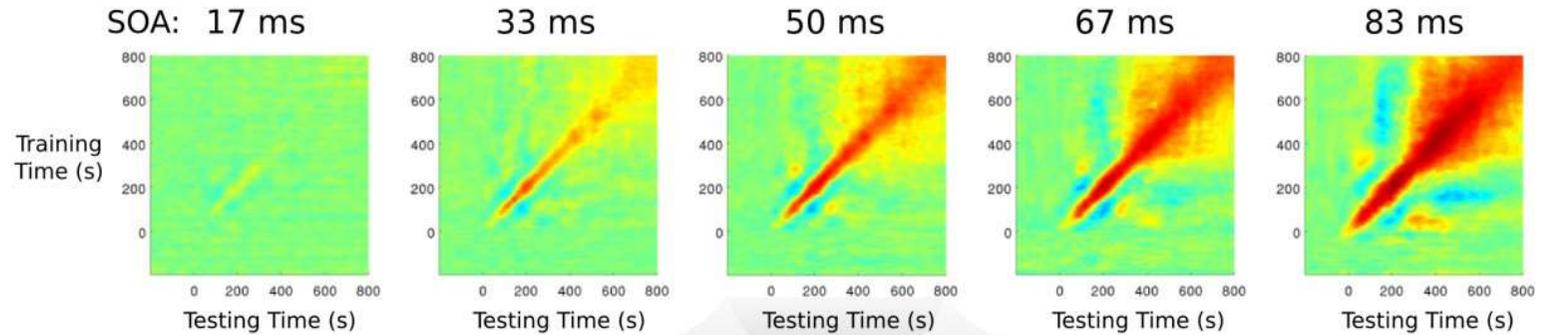
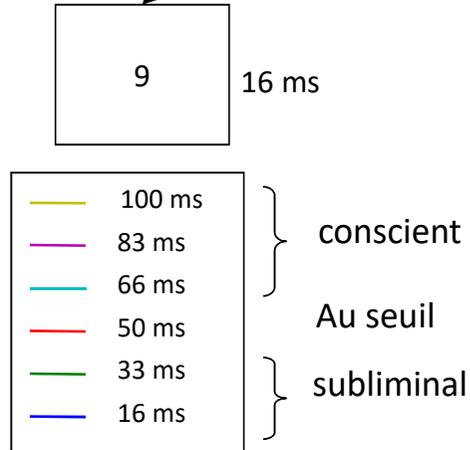
La manière dont le décodeur généralise à des temps différents peut nous fournir des informations extrêmement précieuses sur le déroulement temporel des représentations mentales.



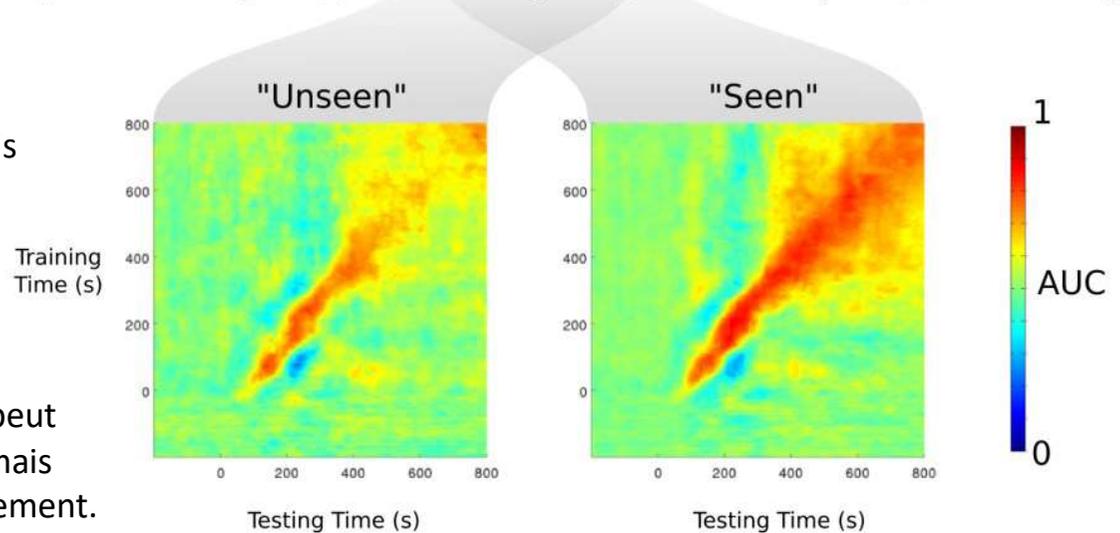


Un résultat commun à de nombreuses expériences: L'activité évoquée par un stimulus non-conscient est intense et durable

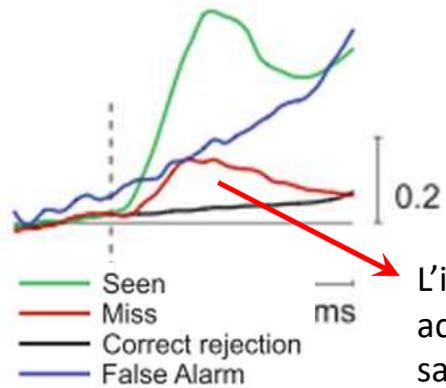
King, Charles & Dehaene



On entraîne un décodeur à distinguer les essais « présents » et « absents »



Décharges préfrontales



L'information non-consciente peut accéder au cortex préfrontal, mais sans franchir le seuil d'embrassement. Elle décroît ensuite lentement.

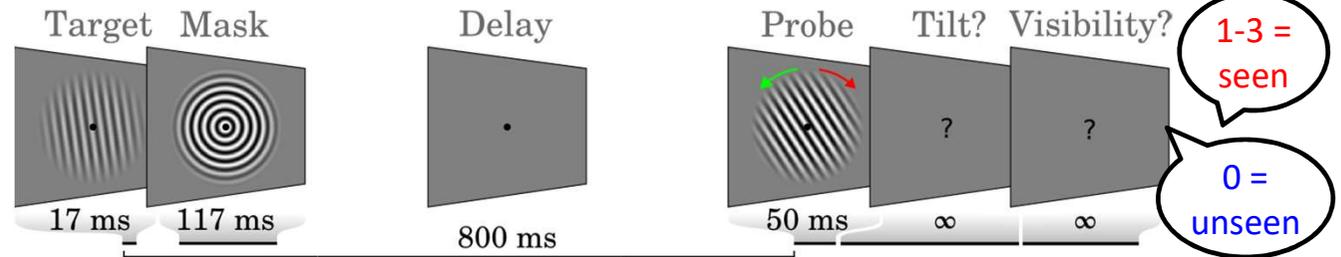


Jean-Rémi King

L'information non-consciente peut-elle persister à travers un long délai?

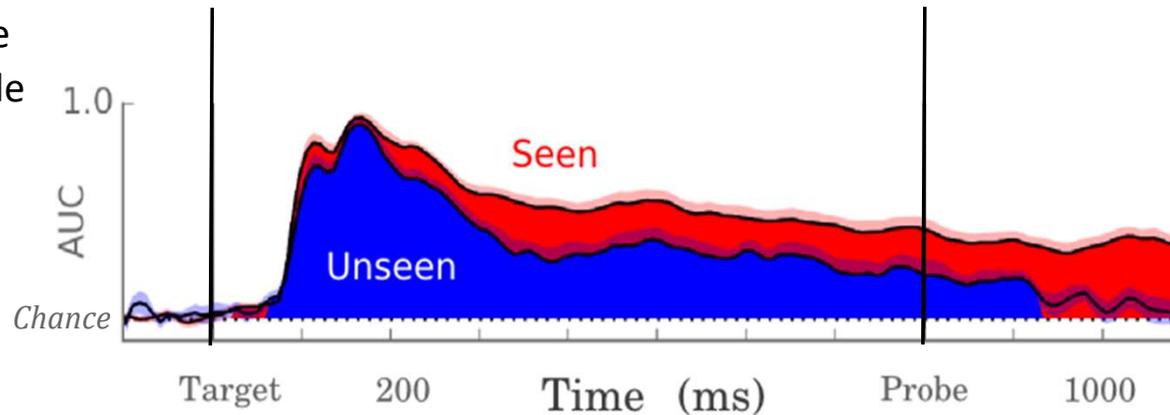
King, J.-R., Pescetelli, N., & Dehaene, S. (2016). Brain Mechanisms Underlying the Brief Maintenance of Seen and Unseen Sensory Information. *Neuron*, 92(5), 1122–1134. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.10.051>

Tâche de comparaison de deux orientations, à travers un délai



La performance des sujets reste supérieure au hasard, même après un tel délai (58% correct)

Décodage de la présence ou de l'absence de la cible



Le décodage est nettement meilleur lors des essais conscients que lors des essais non-conscients. Toutefois, le signal non-conscient se maintient pendant toute la durée du délai !



Jean-Rémi King

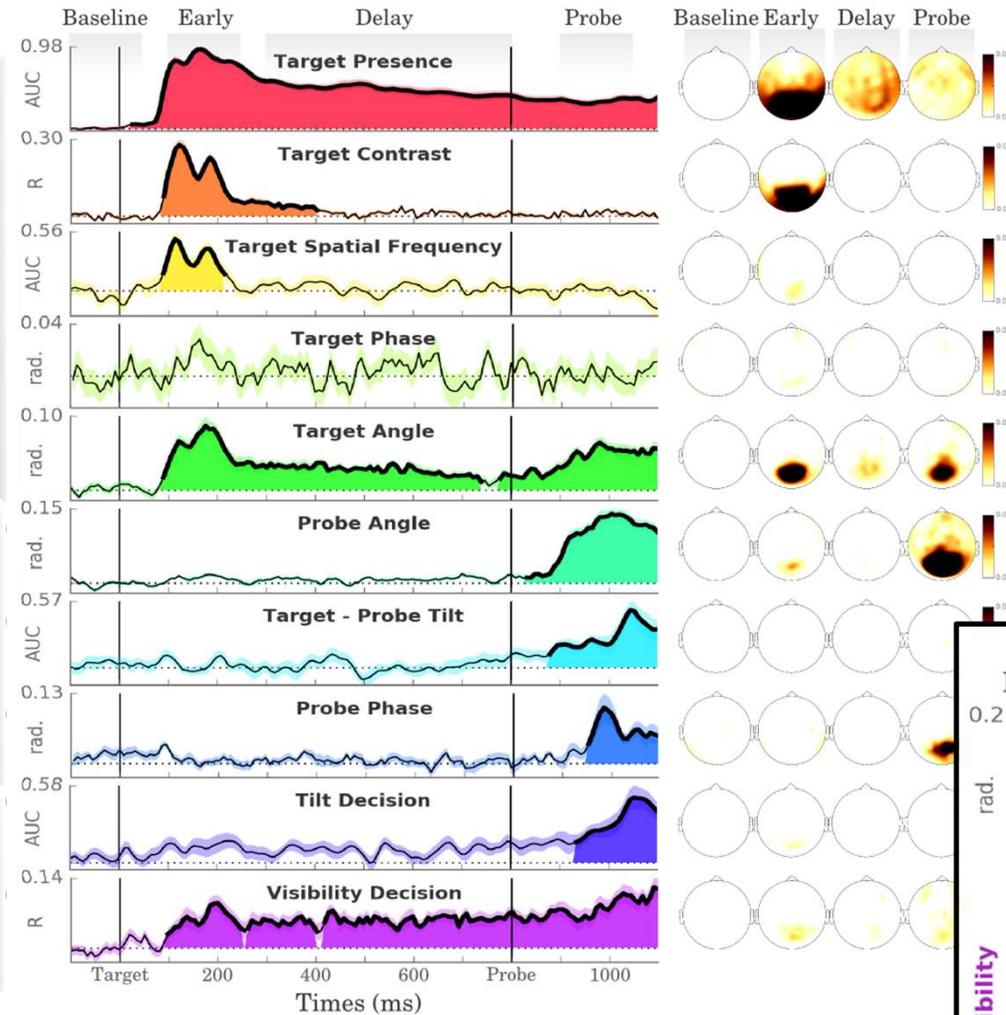
L'information pertinente est sélectivement maintenue à travers le délai

L'angle, qui est la seule dimension pertinente de la cible, est sélectivement maintenu à travers le temps.

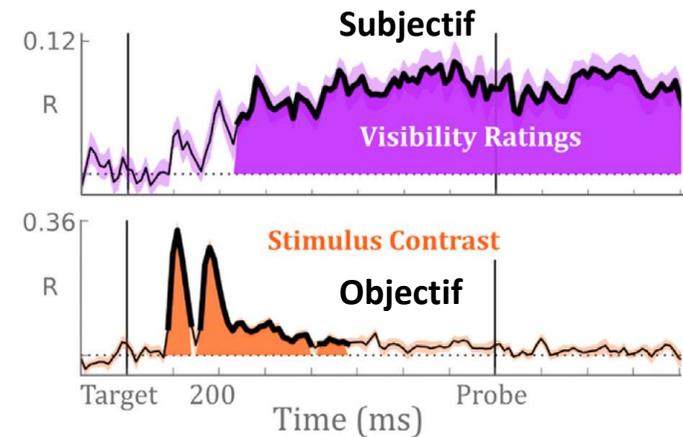
Target

Probe

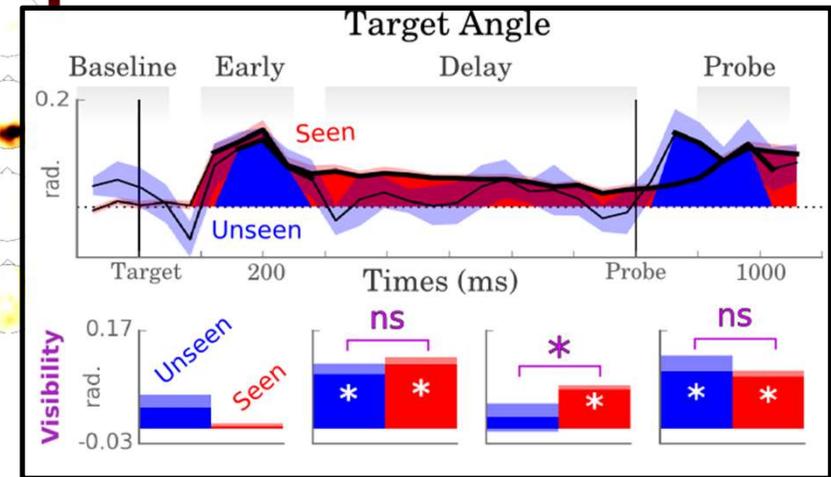
Decision



Le décodeur de présence est modulé par la visibilité et le contraste.



Lorsqu'on sépare les essais vus et pas vus, on constate que l'angle n'est décodable durant le délai que s'il est conscient – mais l'information non-consciente revient en fin d'essai !



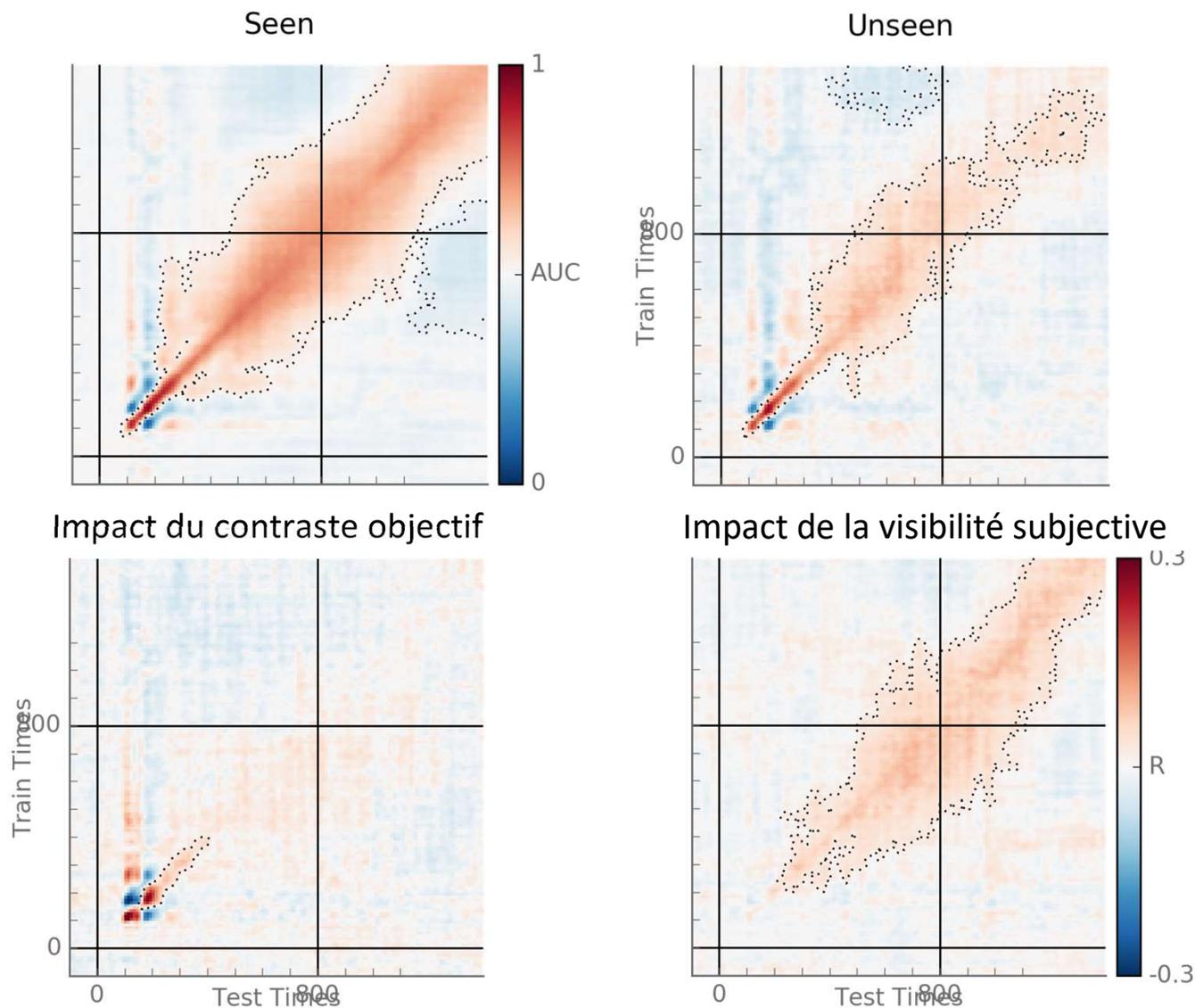


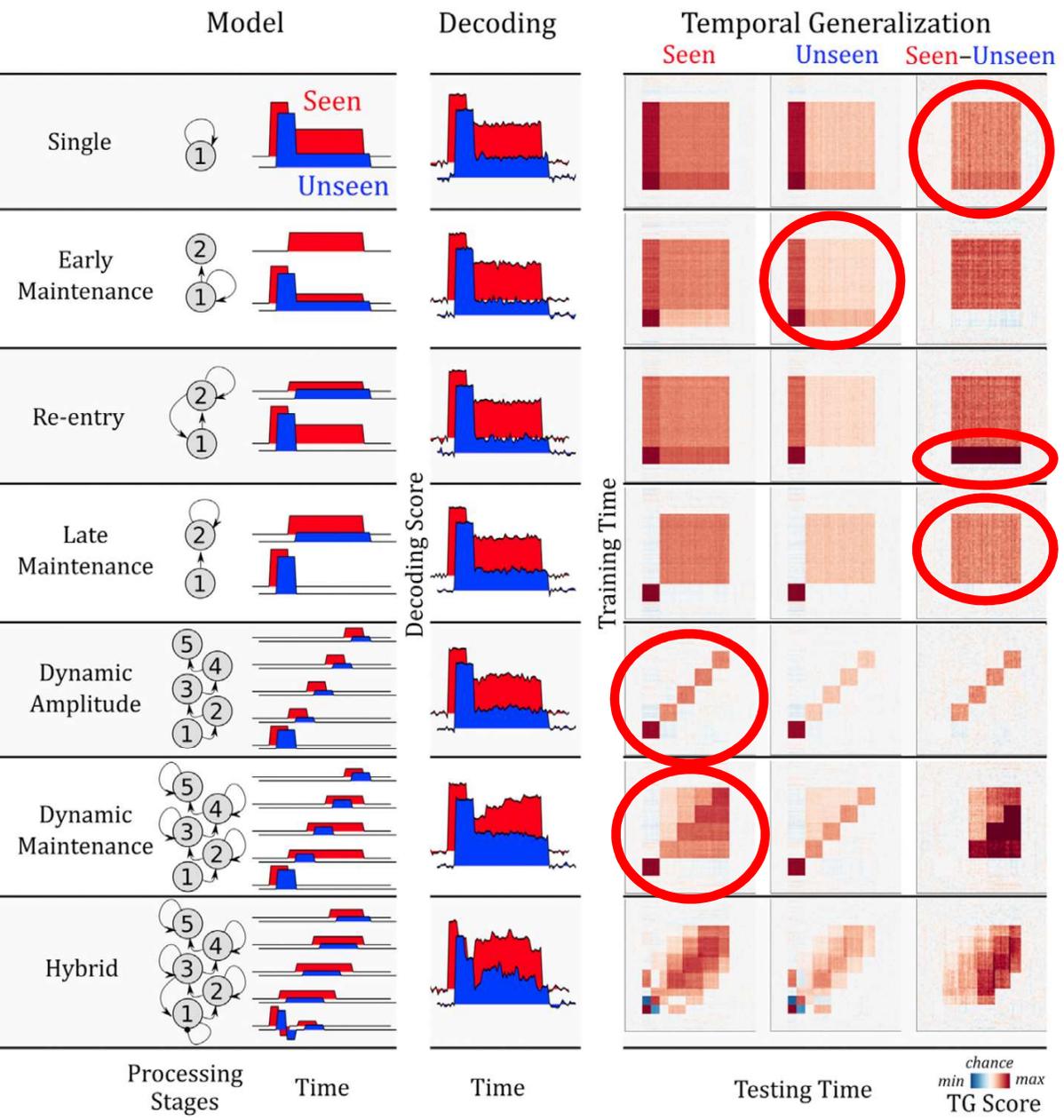
Jean-Rémi King

L'accès à la conscience se caractérise par une trajectoire dynamique

Tant les essais conscients que les essais non-conscients conduisent à une trajectoire dynamique de décodage.

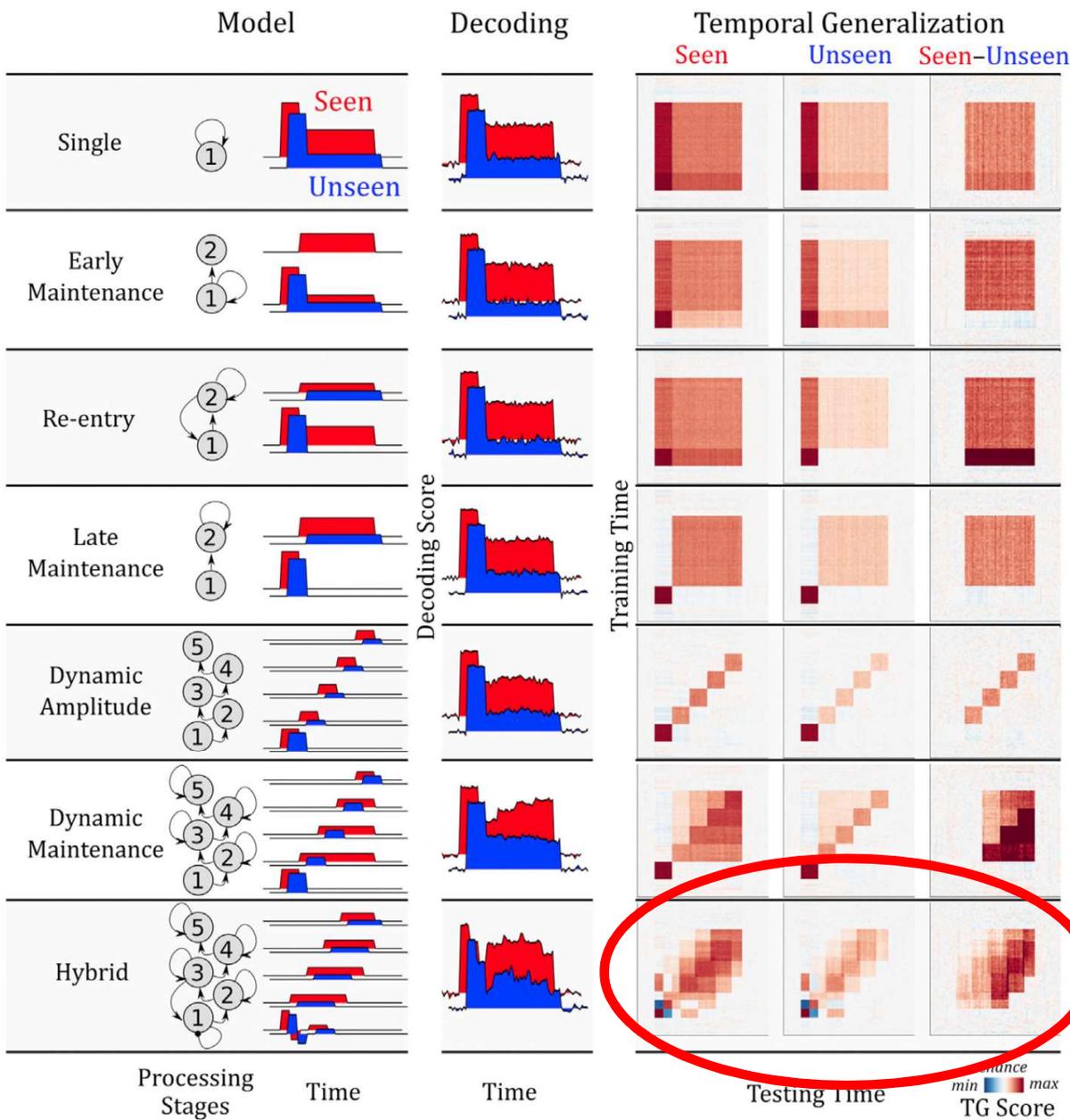
Cette trajectoire est simplement plus intense et plus durable lors des essais conscients.





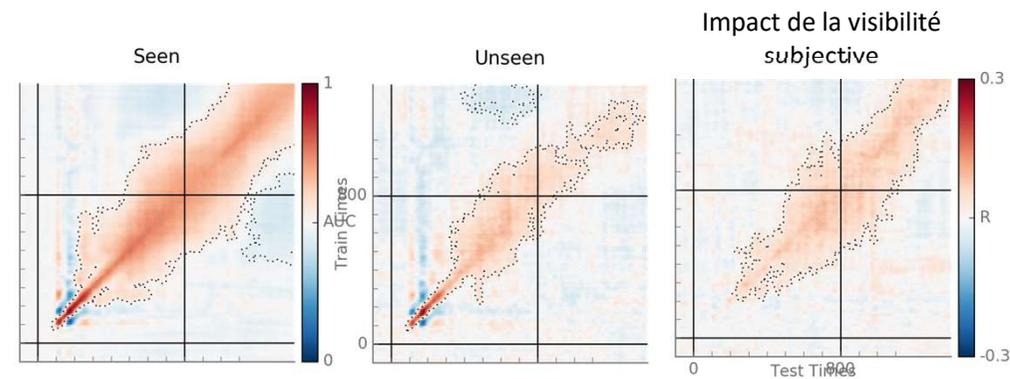
1. Un seul processeur, plus ou moins activé (ex. micro-conscience de Zeki)
→ Rejeté car la généralisation est meilleure sur la diagonale
2. Mémoire non-consciente confinée aux étapes précoces, accès à un second niveau de traitement uniquement pour les stimuli conscients.
→ Rejeté car décodage diagonal dans les essais non-conscients.
3. Réentrée (Edelman), boucles (Lamme): amplification descendante propre aux essais non-conscients.
→ Rejeté car pas de généralisation tardive des décodeurs précoces, propre aux essais conscients.
4. Maintenance tardive, moindre dans les essais non-conscients.
→ Mieux, mais rejeté, car ne rend pas compte de la diagonale. Traitements conscients et non-conscients sont des processus dynamiques.
5. Modèle dynamique, amplitude corrélée avec la prise de conscience.
→ Mieux, mais rejeté car la généralisation à travers le temps est plus étroite pour les processus précoces (50 ms) que tardifs (315 ms), et plus étroite dans les essais non-conscients (288 ms) que conscients (447 ms).
6. Modèle dynamique, **durée** corrélée avec la prise de conscience.
→ Rejeté également, car il prédit une asymétrie de généralisation dans le temps qui n'est pas observée.
7. Le meilleur modèle est hybride:
 - multiples étapes séquentielles
 - Activité initiale transitoire, suivie d'étapes métastables
 - Accroissement de l'amplitude de ces étapes tardives avec la visibilité subjective.

chance
min max
TG Score



L'accès à la conscience se caractérise par une trajectoire dynamique

Comparaison du modèle avec les données observées:



Conclusion :

- L'idée d'une distinction tout-ou-rien entre les essais conscients et non-conscients n'est vraie qu'en première approximation
- Un stimulus non-conscient peut passer par pratiquement les mêmes étapes de traitement qu'un stimulus conscient, mais avec une amplitude et une durée moindre.

7. Le meilleur modèle est hybride:

- multiples étapes séquentielles
- Activité initiale transitoire, suivie d'étapes métastables
- Accroissement de l'amplitude de ces étapes tardives avec la visibilité subjective.

La prise de conscience vue comme une trajectoire dynamique: Convergence avec les conclusions d'autres laboratoires

Salti, M., Harel, A., & Marti, S. (2018). Conscious Perception: Time for an Update? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(1), 1–7.

<https://doi.org/10.1162/jocn.a.01343>

Baria, A. T., Maniscalco, B., & He, B. J. (2017). Initial-state-dependent, robust, transient neural dynamics encode conscious visual perception. *PLoS Computational Biology*, 13(11), e1005806.

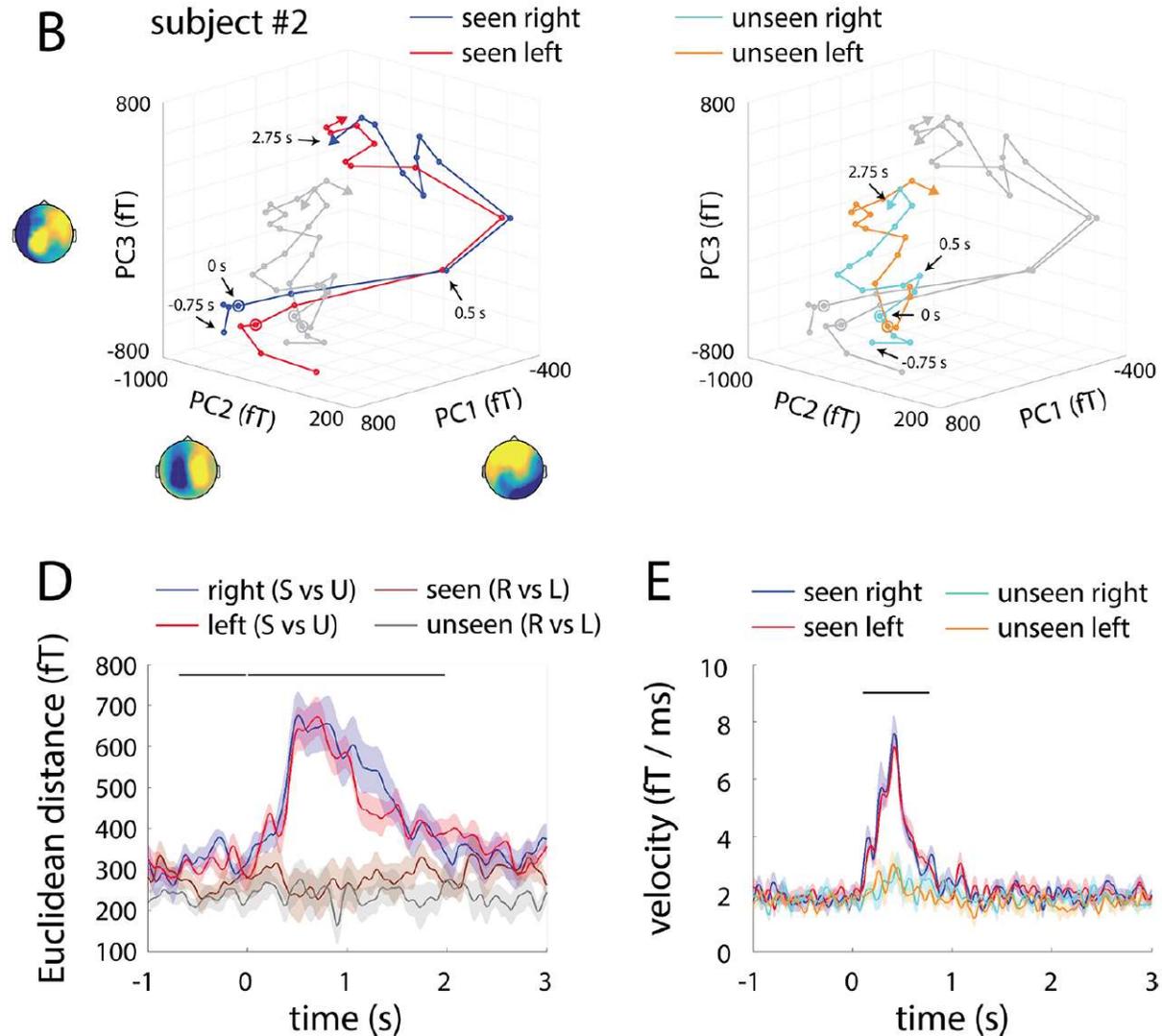
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005806>

“... Up to 1 second before stimulus onset, brain activity pattern across widespread cortices significantly predicted whether a threshold-level visual stimulus was later consciously perceived.

This initial state of brain activity interacts nonlinearly with stimulus input to shape the evolving cortical activity trajectory, with seen and unseen trials following well separated trajectories.

We observed that cortical activity trajectories during conscious perception are **fast evolving** and robust to small variations in the initial state. »

→ Embracement (*ignition*) conscient rapide, vers 300 ms



Peut-il y avoir une mémoire de travail durable sans conscience?

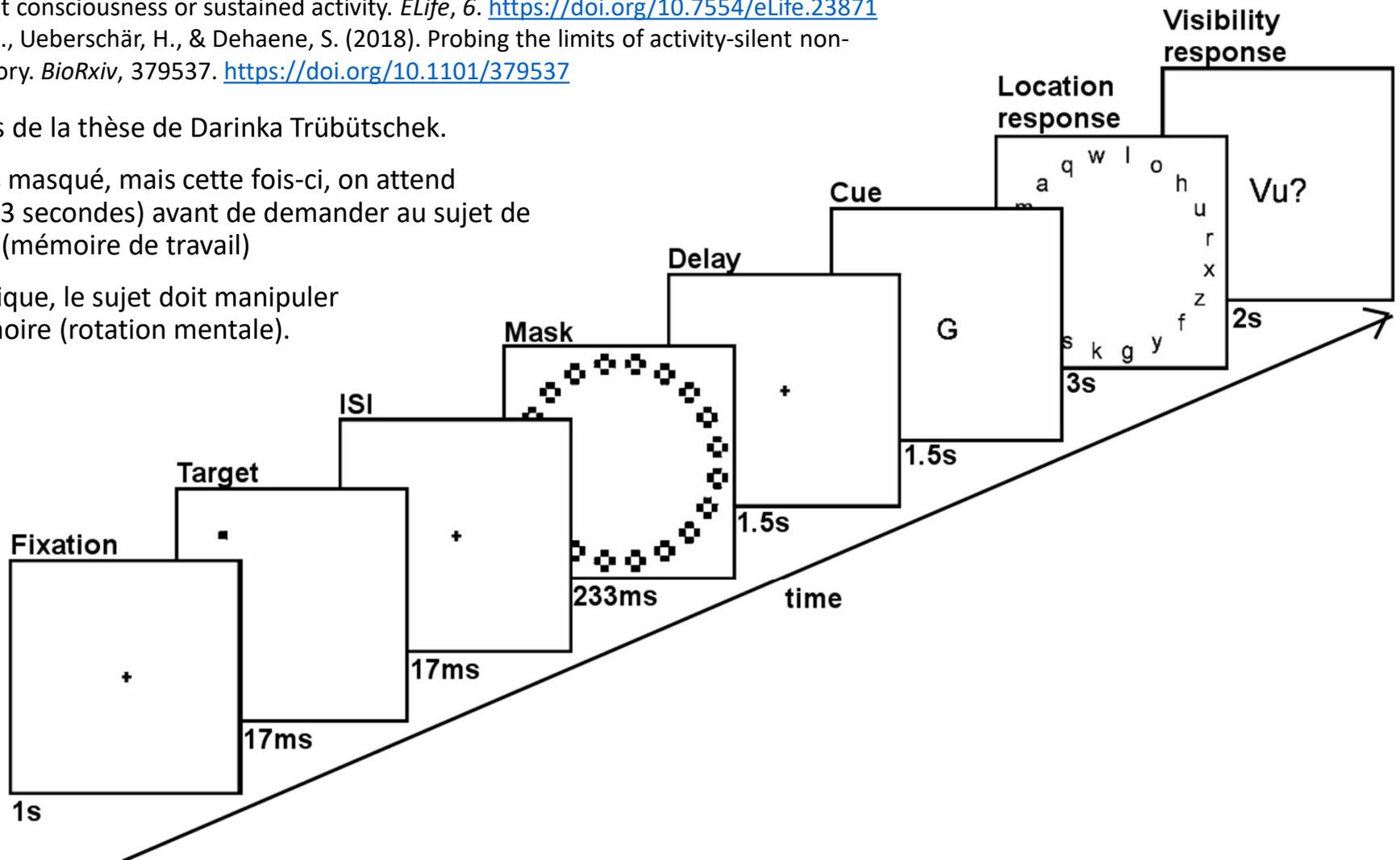
Trübutschek, D., Marti, S., Ojeda, A., King, J.-R., Mi, Y., Tsodyks, M., & Dehaene, S. (2017). A theory of working memory without consciousness or sustained activity. *ELife*, 6. <https://doi.org/10.7554/eLife.23871>

Trübutschek, D., Marti, S., Ueberschär, H., & Dehaene, S. (2018). Probing the limits of activity-silent non-conscious working memory. *BioRxiv*, 379537. <https://doi.org/10.1101/379537>

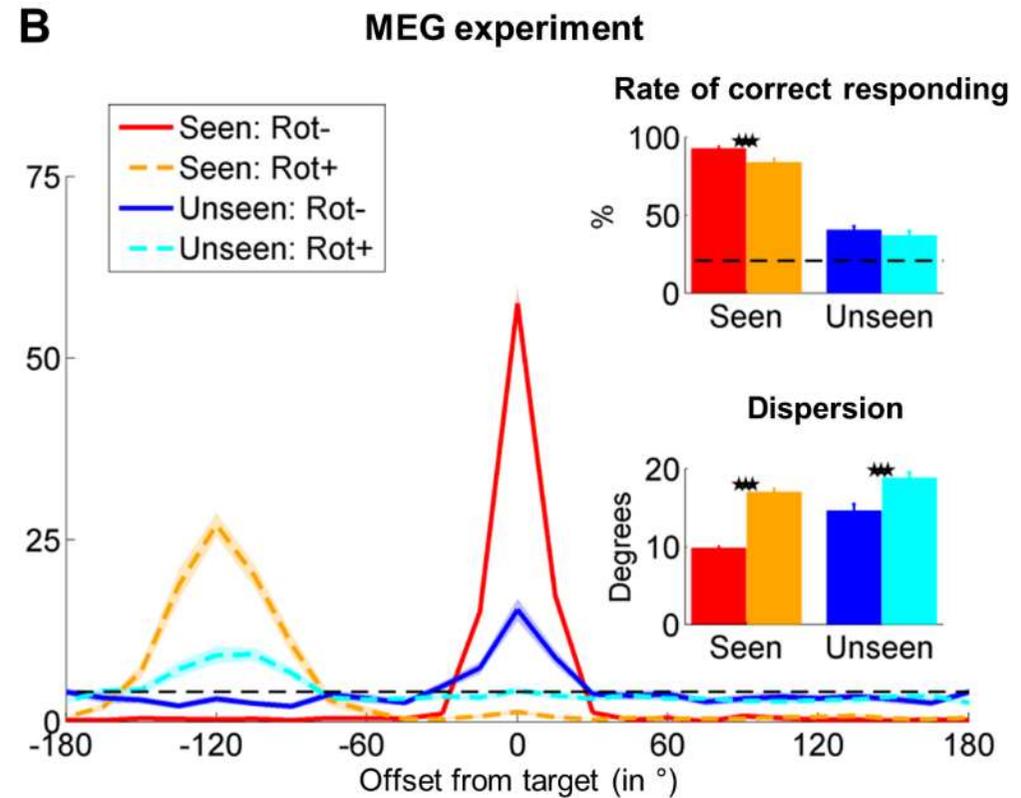
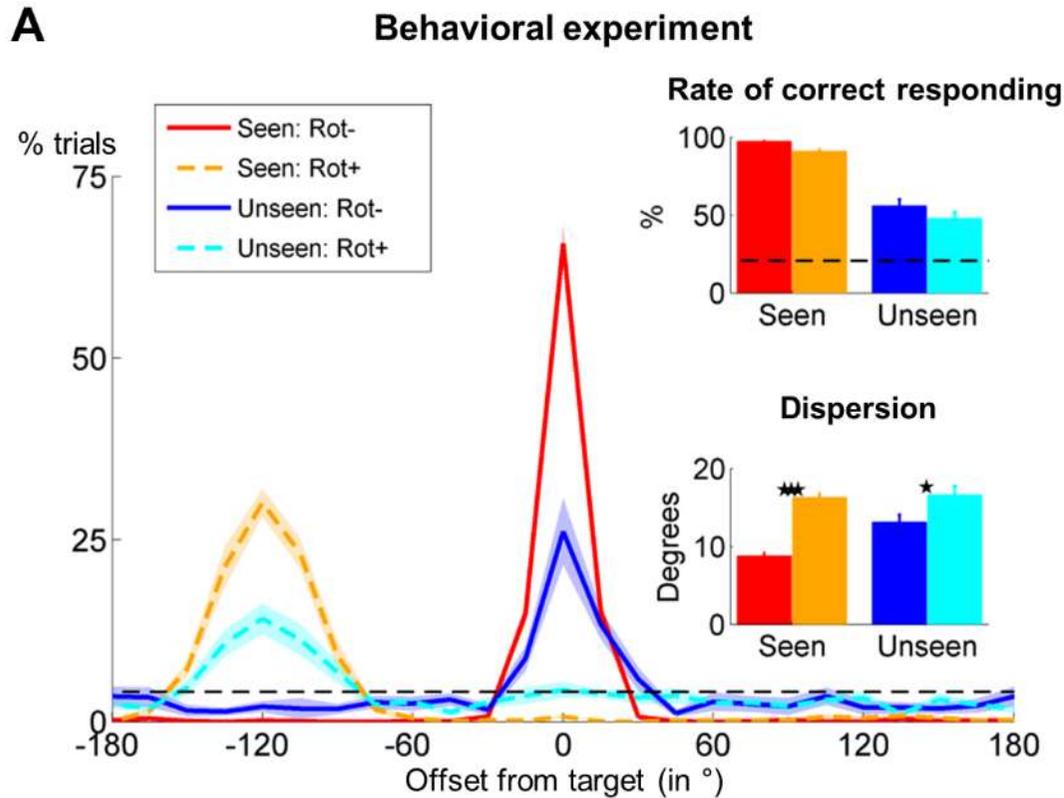
Multiples expériences de la thèse de Darinka Trübutschek.

On flashe un stimulus masqué, mais cette fois-ci, on attend longtemps (au moins 3 secondes) avant de demander au sujet de rapporter sa position (mémoire de travail)

Dans la condition critique, le sujet doit manipuler l'information en mémoire (rotation mentale).



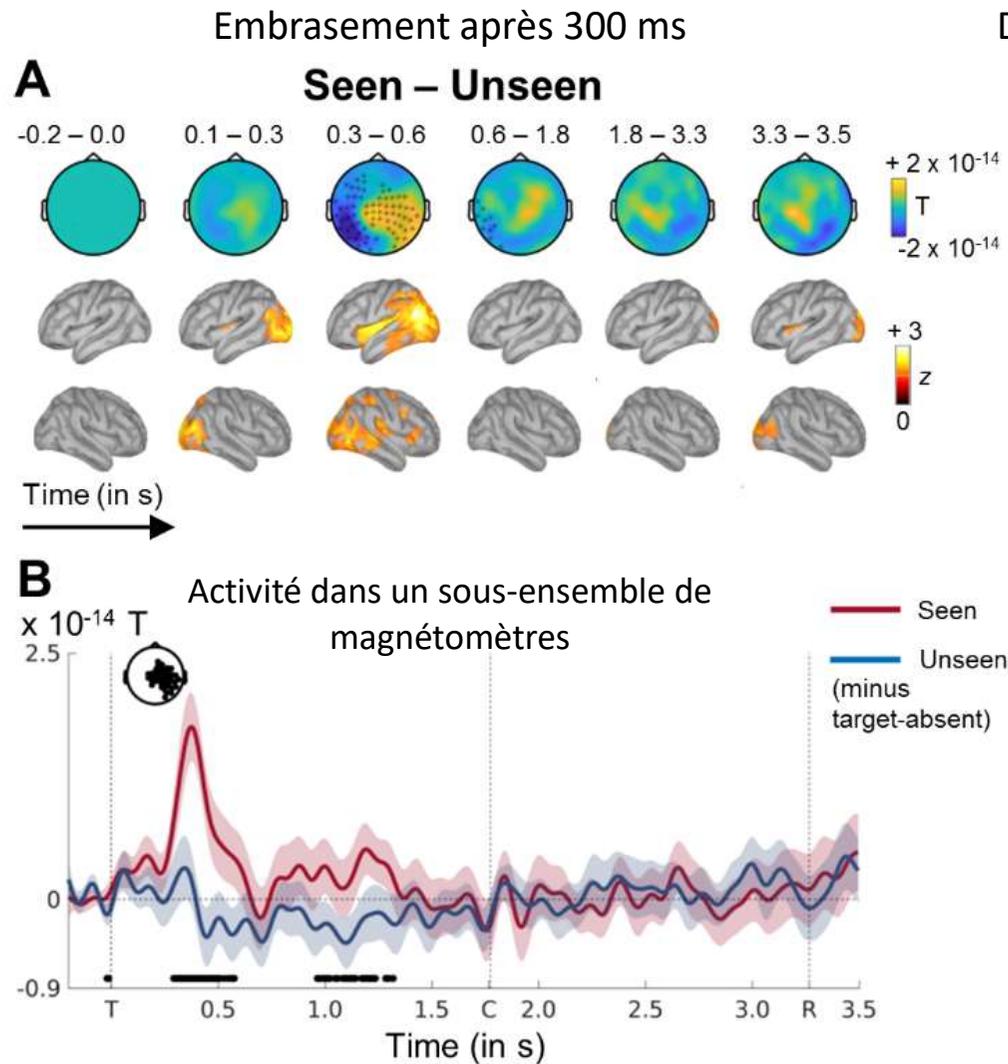
Comportement au dessus du niveau du hasard : Une mémoire non-consciente du stimulus persiste plusieurs secondes!



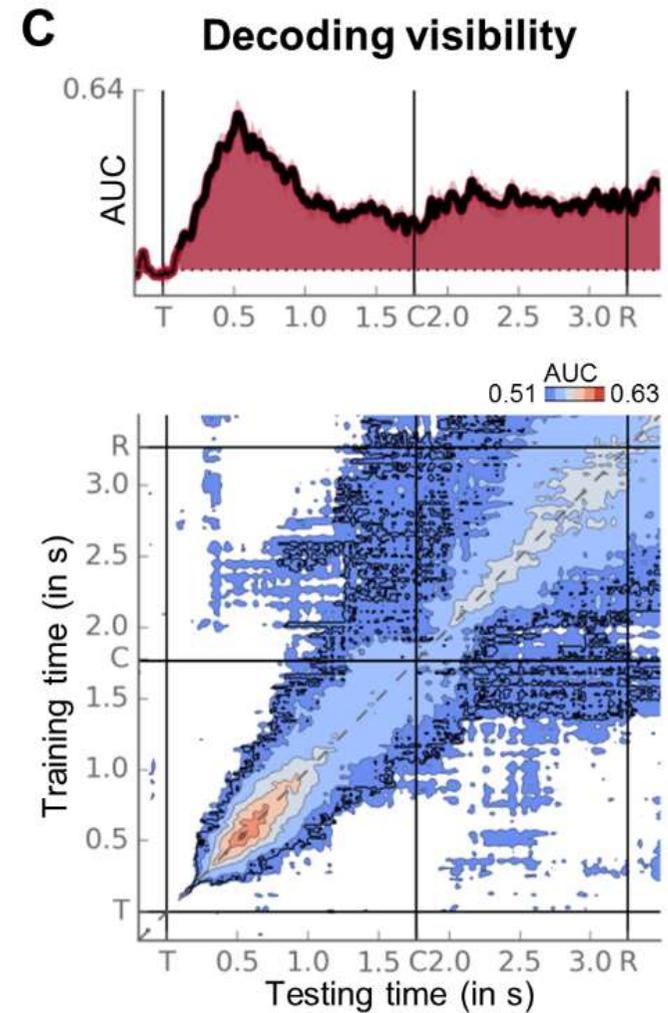
Des expériences supplémentaires montrent que

- Cette mémoire non-consciente résiste à la présentation d'un distracteur pendant le délai
- les sujets peuvent retenir deux positions et les rapporter dans l'ordre, même si les deux ne sont pas conscientes.

On observe les signatures classiques de la perception consciente

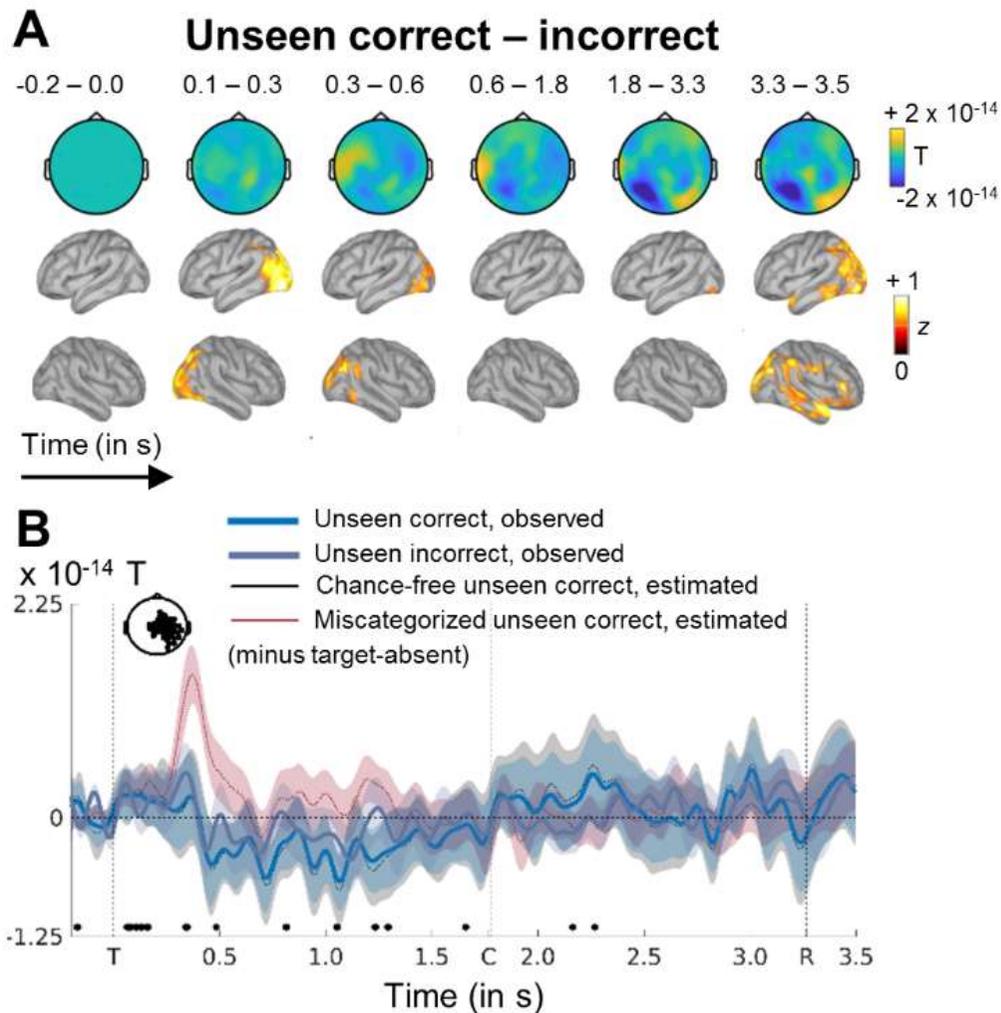


Décodage de la différence entre essais vus et pas vus

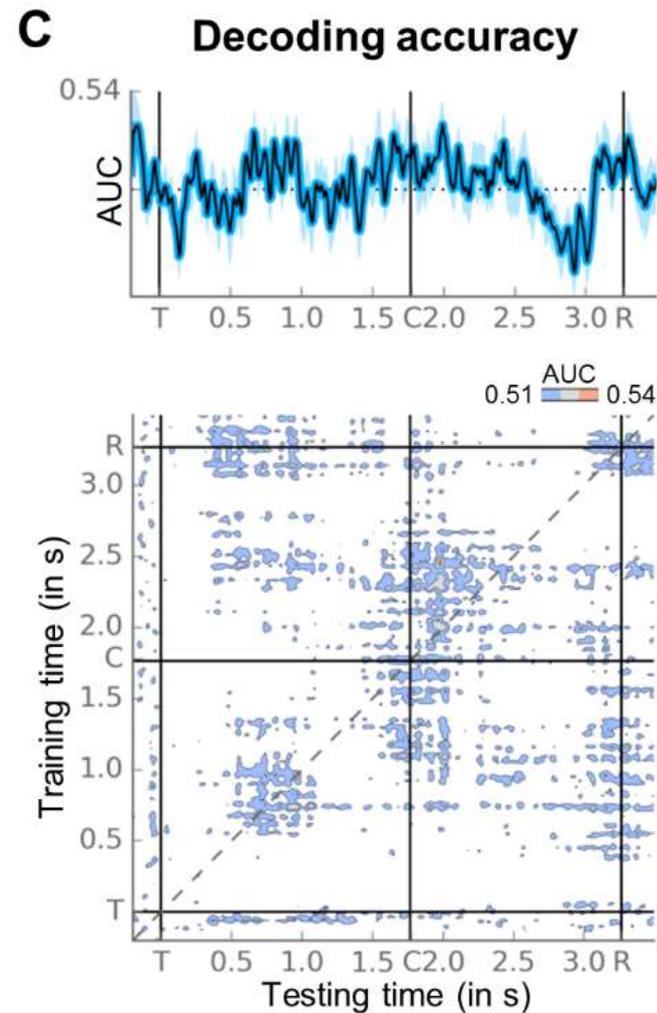


Ces signatures sont absentes des essais « pas vus, corrects »

Pas d'embrassement après 300 ms



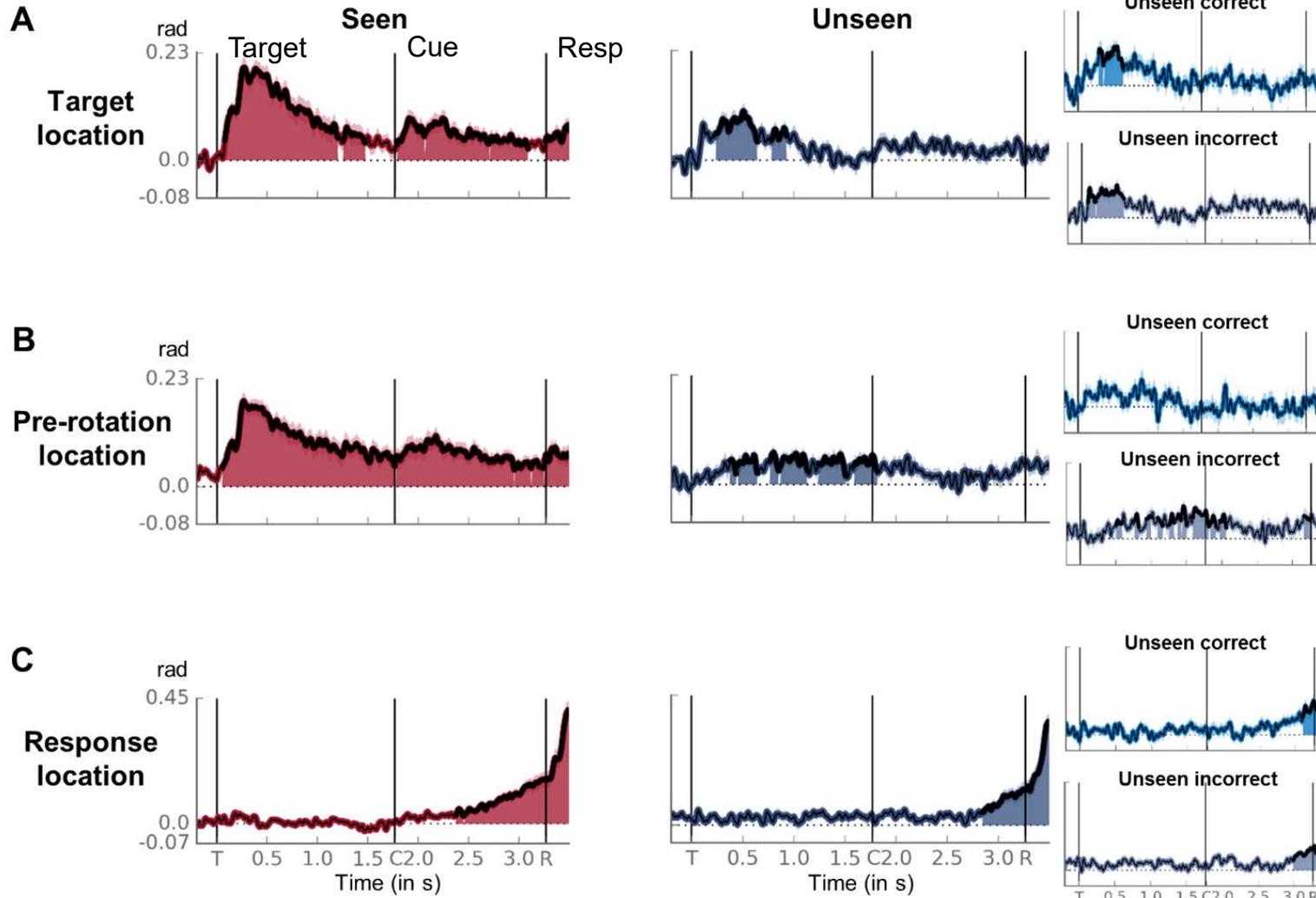
Pas de généralisation du décodeur précédent



C'est important car cela élimine plusieurs interprétations alternatives de la mémoire de travail non-consciente:

- l'hypothèse que les sujets avaient en réalité vu le stimulus, mais ont mal répondu
- L'hypothèse que les sujets se sont forcés à catégoriser le stimulus dès le début du délai, et ont conservé cet *early guess* en mémoire de travail consciente.

Le décodage révèle la transformation de l'information lors de la rotation mentale



Dans les essais conscients:

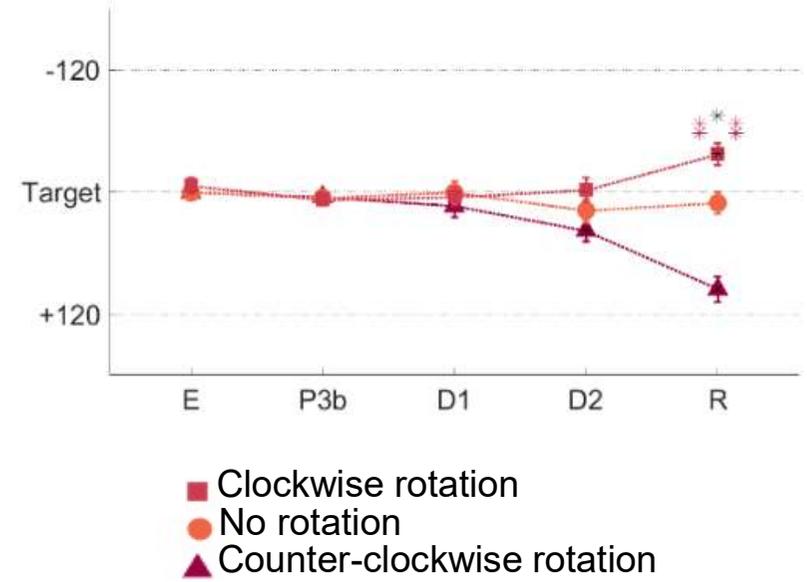
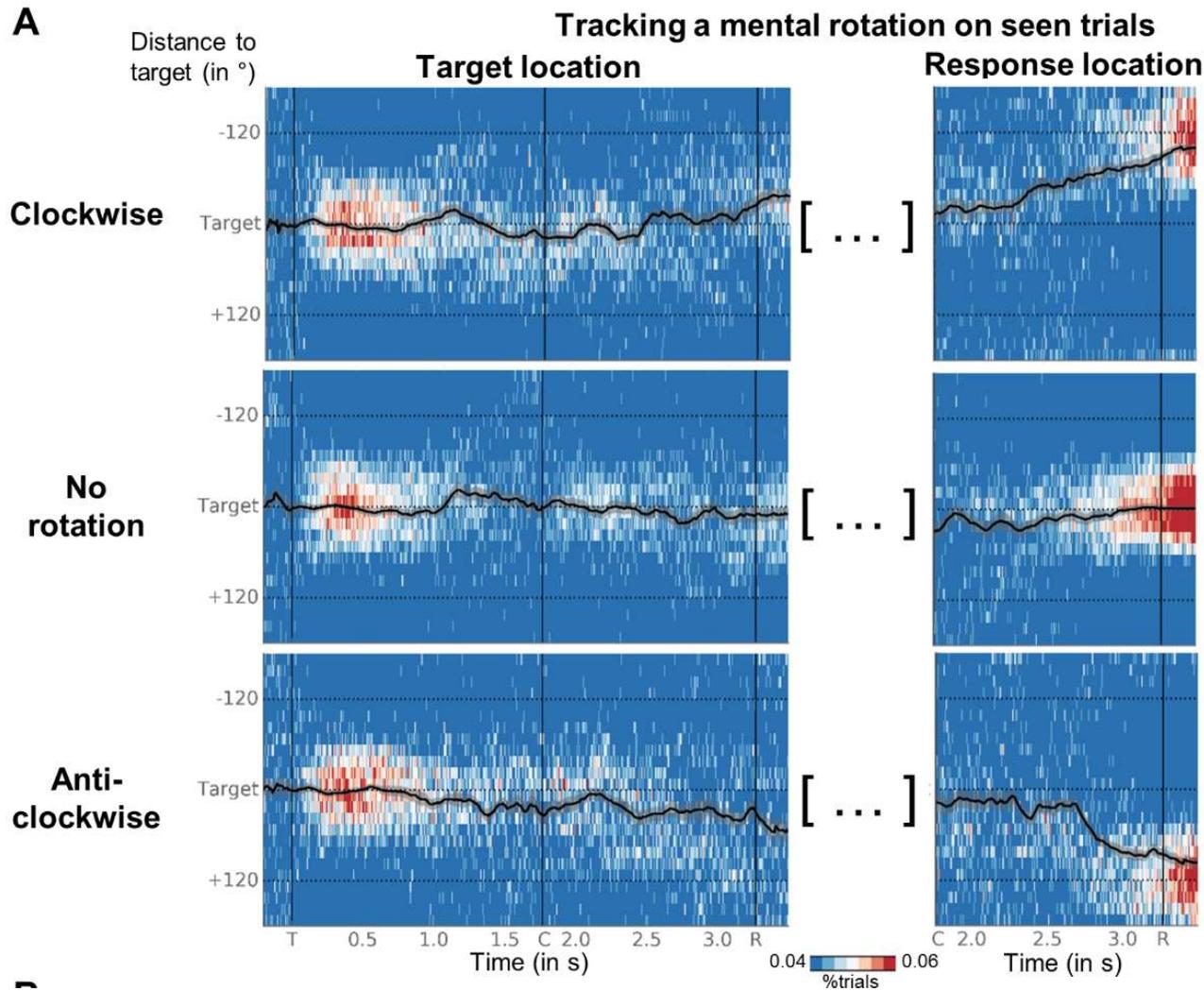
- Le signal sur la cible descend pratiquement à zéro! Mémoire de travail silencieuse ??
- Le signal remonte au moment de l'indice de rotation
- Et on voit apparaître le code de la réponse

Dans les essais non-conscients:

- Le signal est plus faible et descend vraiment à zéro.
- Mais on voit apparaître, durant le délai, un précurseur faible de la position que le sujet va ensuite tourner consciemment

Conclusion: un processus de rotation *consciente* est appliqué à un stimulus non-conscient.

Le décodage révèle la transformation de l'information lors de la rotation mentale

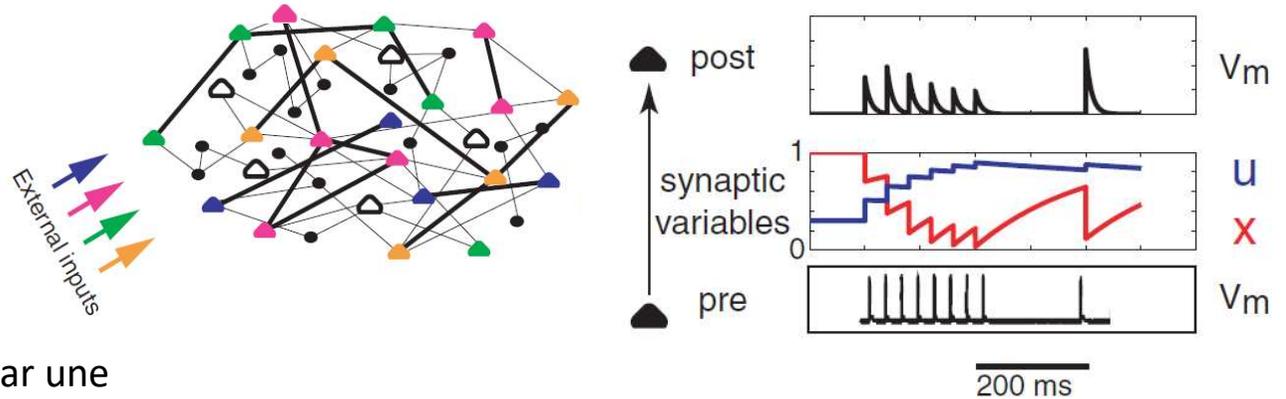


L'hypothèse de la mémoire de travail silencieuse (*Activity-silent working memory*)

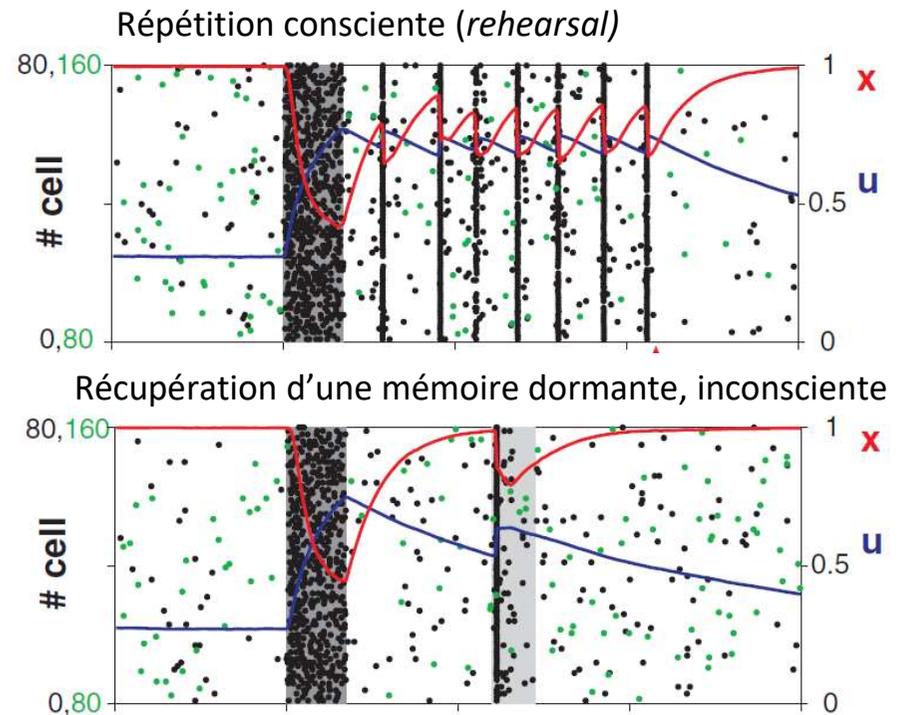
Mongillo, Barak & Tsodyks, Synaptic theory of working memory (Science, 2008)

Stokes, M. G. (2015). "Activity-silent" working memory in prefrontal cortex: a dynamic coding framework. Trends in Cognitive Sciences, 19(7), 394–405.

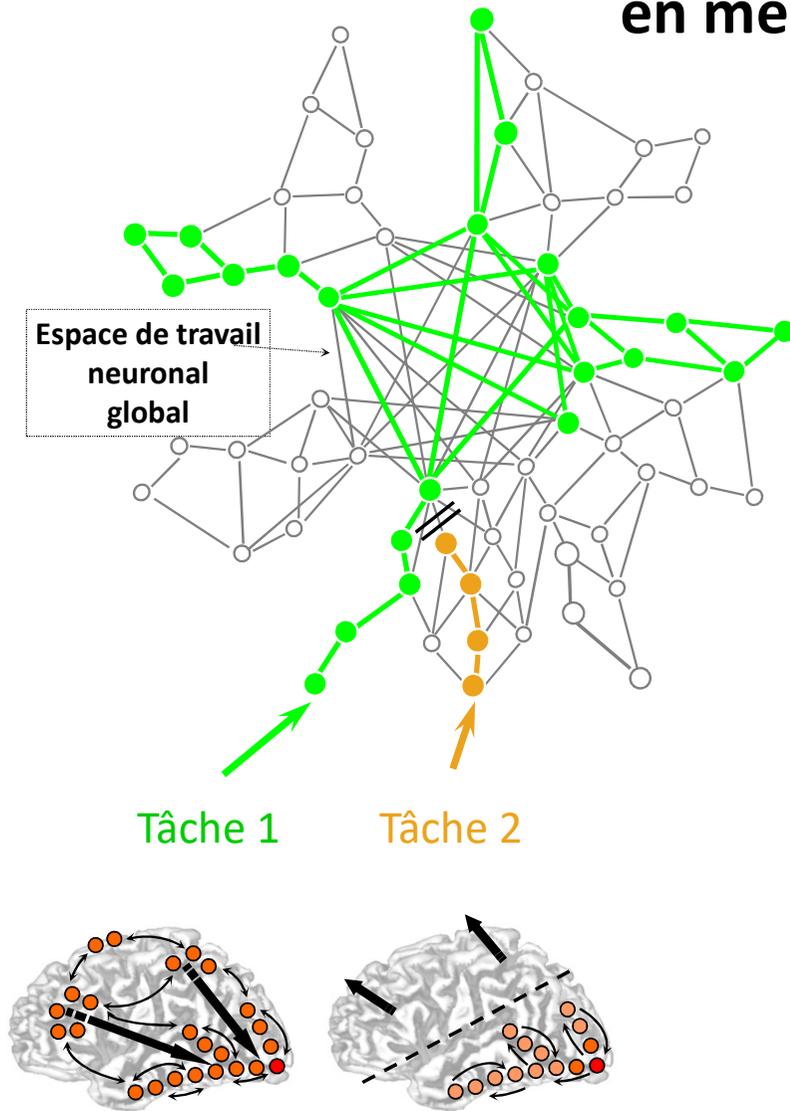
Trübtschek, D., Marti, S., Ojeda, A., King, J.-R., Mi, Y., Tsodyks, M., & Dehaene, S. (2017). A theory of working memory without consciousness or sustained activity. *ELife*, 6.



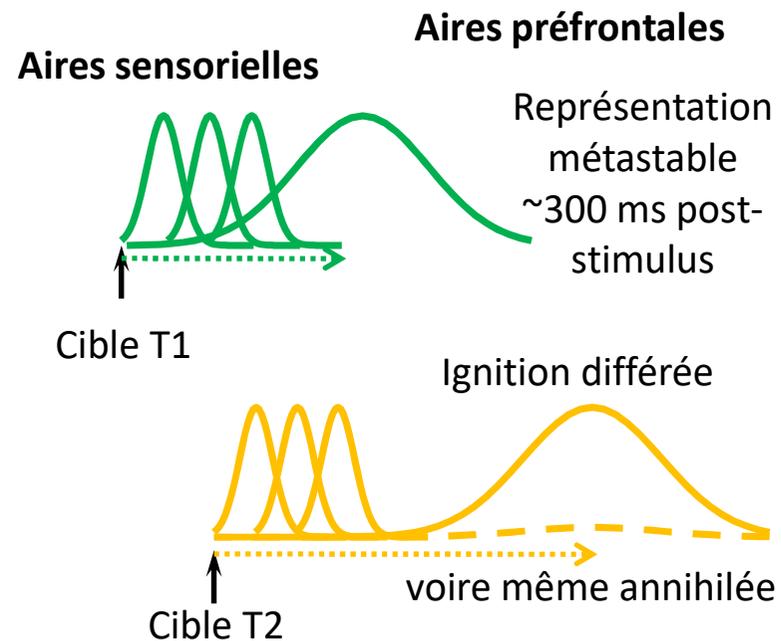
- Chaque contenu de mémoire est codé par une assemblée de neurones
- Ces assemblées n'ont pas besoin d'être activées pendant tout le délai. La mémoire peut se maintenir dans des changements d'efficacité synaptique à court terme (variable u).
- La mémoire peut se réactiver spontanément durant le délai, ce qui rafraîchit les poids synaptiques (répétition consciente)
- L'assemblée inactive, donc non-consciente, peut se réactiver en réponse à un signal non-spécifique.
- Hypothèse: c'est exactement ce qui survient pour les essais inconscients à la fin du délai, ou au moment de l'indice de rotation: le sujet se force à récupérer une assemblée en mémoire de travail.



Que se passe-t-il quand nous essayons de faire deux choses en même temps?



Au cours d'une tâche double, seule l'étape tardive de la seconde tâche doit être, soit **différée**, soit **annihilée** :



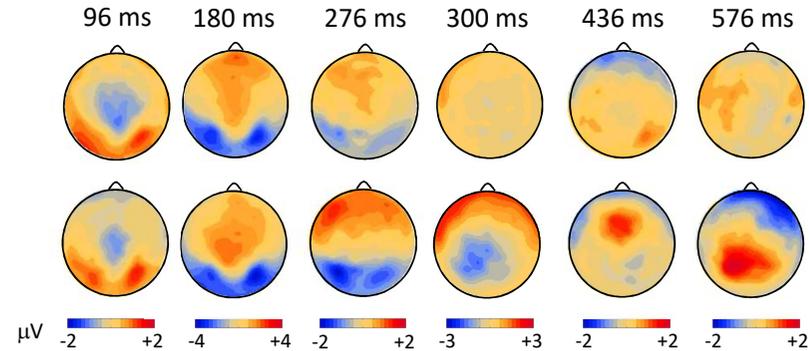
La dynamique de l'accès à la conscience: potentiels évoqués

Sergent, C., Baillet, S., & Dehaene, S. (2005).
Timing of the brain events underlying access to
consciousness during the attentional blink. *Nat
Neurosci*, 8(10), 1391–1400.

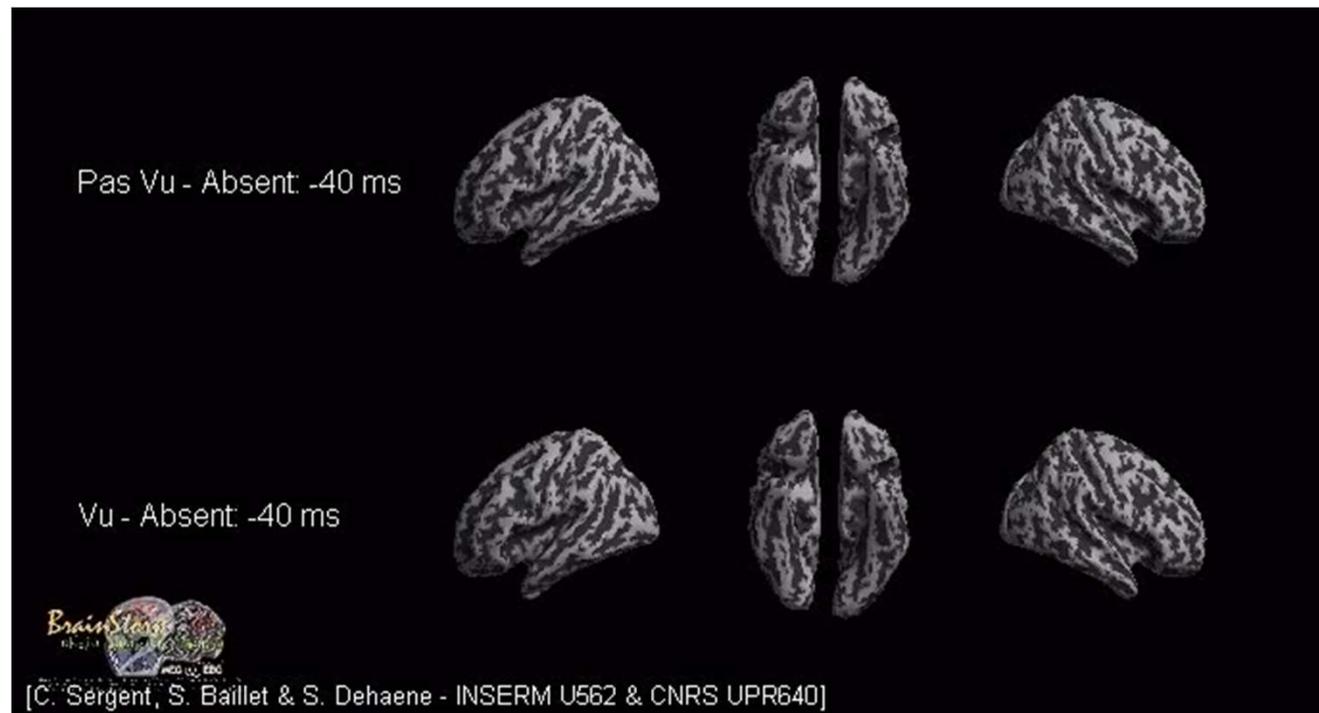
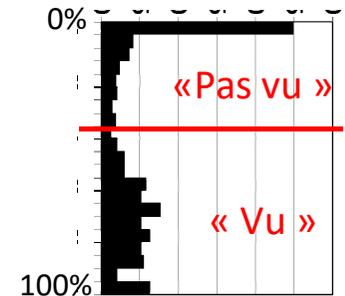
- On présente un mot légèrement masqué,
dont le sujet doit simplement rapporter la
présence avec un curseur
- On distrait le sujet avec une deuxième
tâche (discriminer une chaîne de lettres
xoox ou oxxo présentée juste avant).
- La distribution des essais est bimodale:
certains sont vus, d'autres pas vus.
- L'activité cérébrale est identique jusqu'à
~250 ms, puis diverge totalement.
- Les essais vus se caractérisent par un
embrasement de régions corticales
distribuées

Clignement attentionnel (*Attentional blink*)

FIVE



Jugement
de visibilité

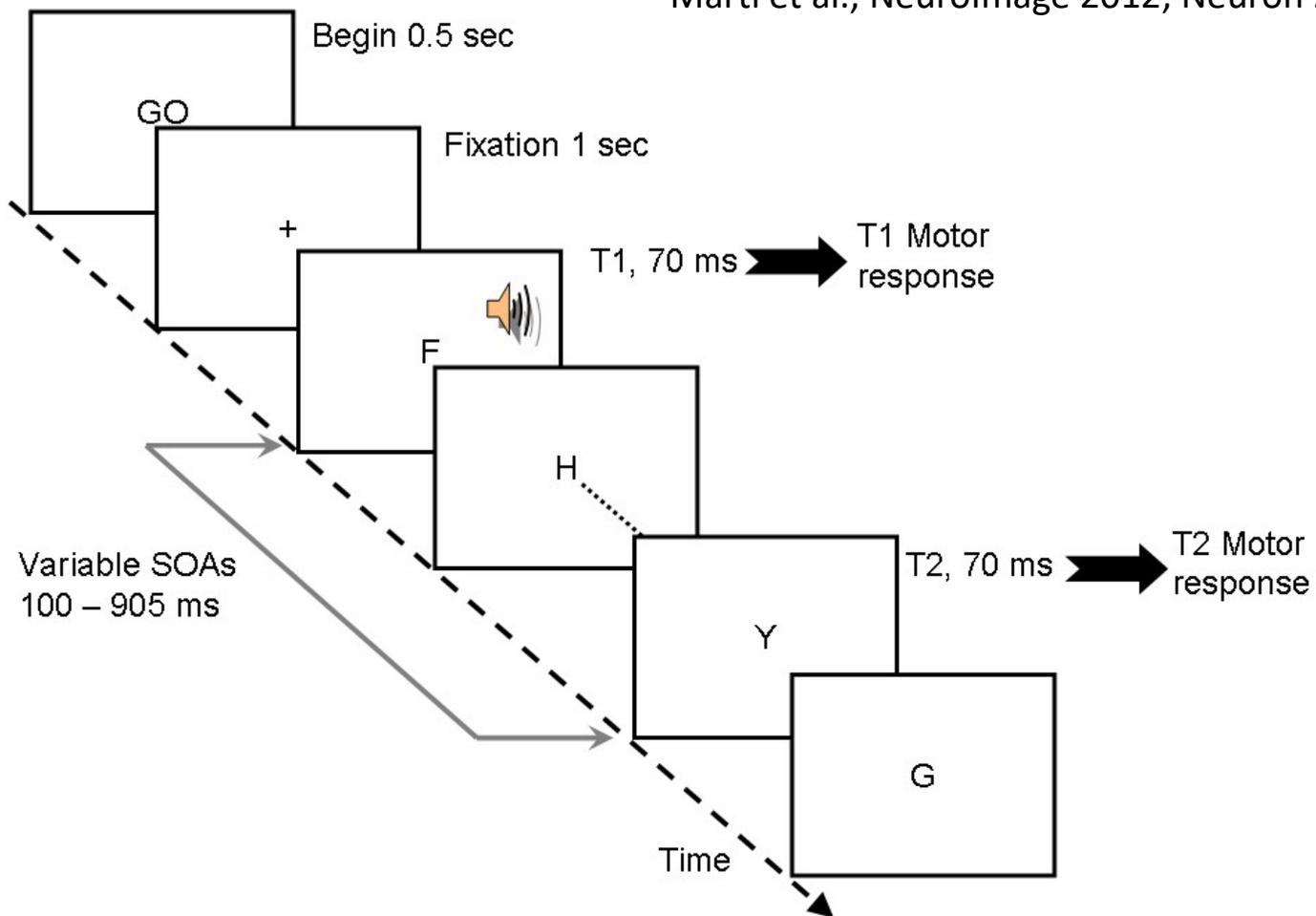


Le décodage peut-il révéler la dynamique des trajectoires corticales pendant les tâches doubles ?

Marti et al., NeuroImage 2012; Neuron 2015



Sébastien Marti



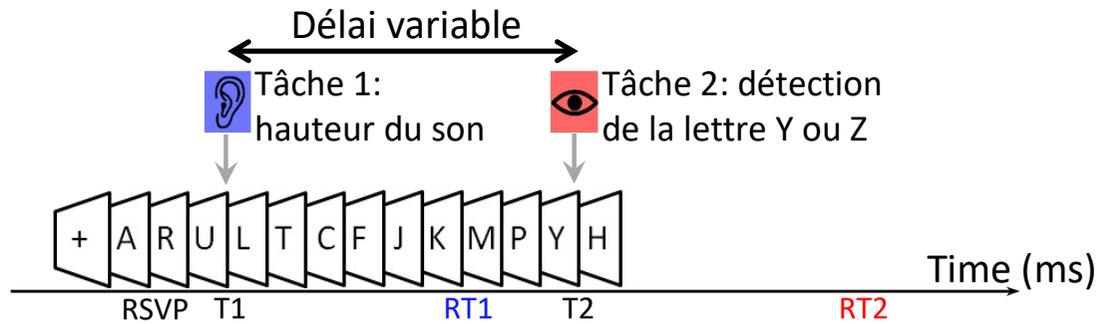
Tâche double cross-modale:

- D'abord juger la hauteur d'un ton (T1)
- Puis détecter une lettre cible (T2) au sein d'une série rapide de lettres

Nouveauté: le sujet doit répondre immédiatement à T1 et à T2.

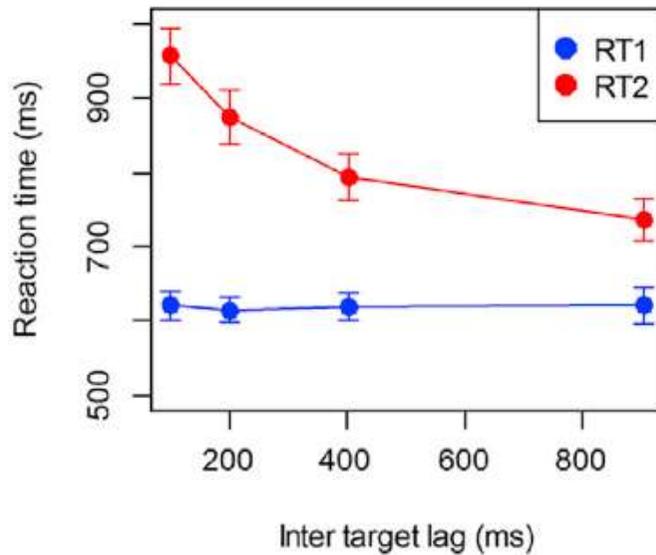
Tenter de faire deux choses en même temps perturbe l'accès à la conscience

Marti et al., NeuroImage 2012; Neuron 2015

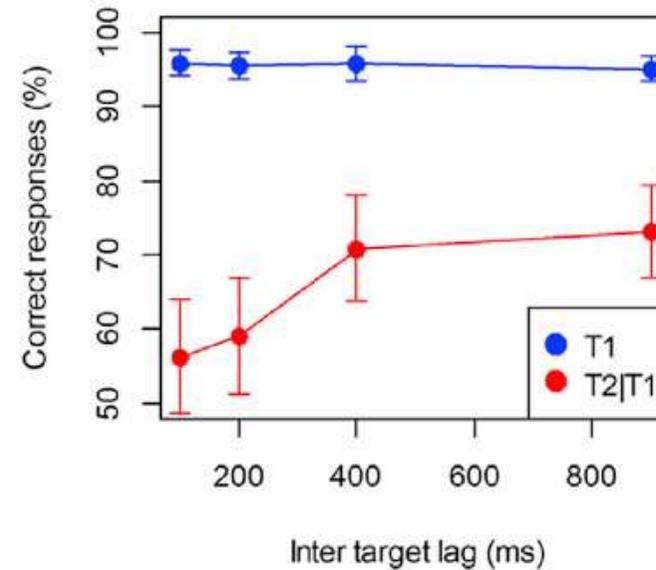


Sébastien Marti

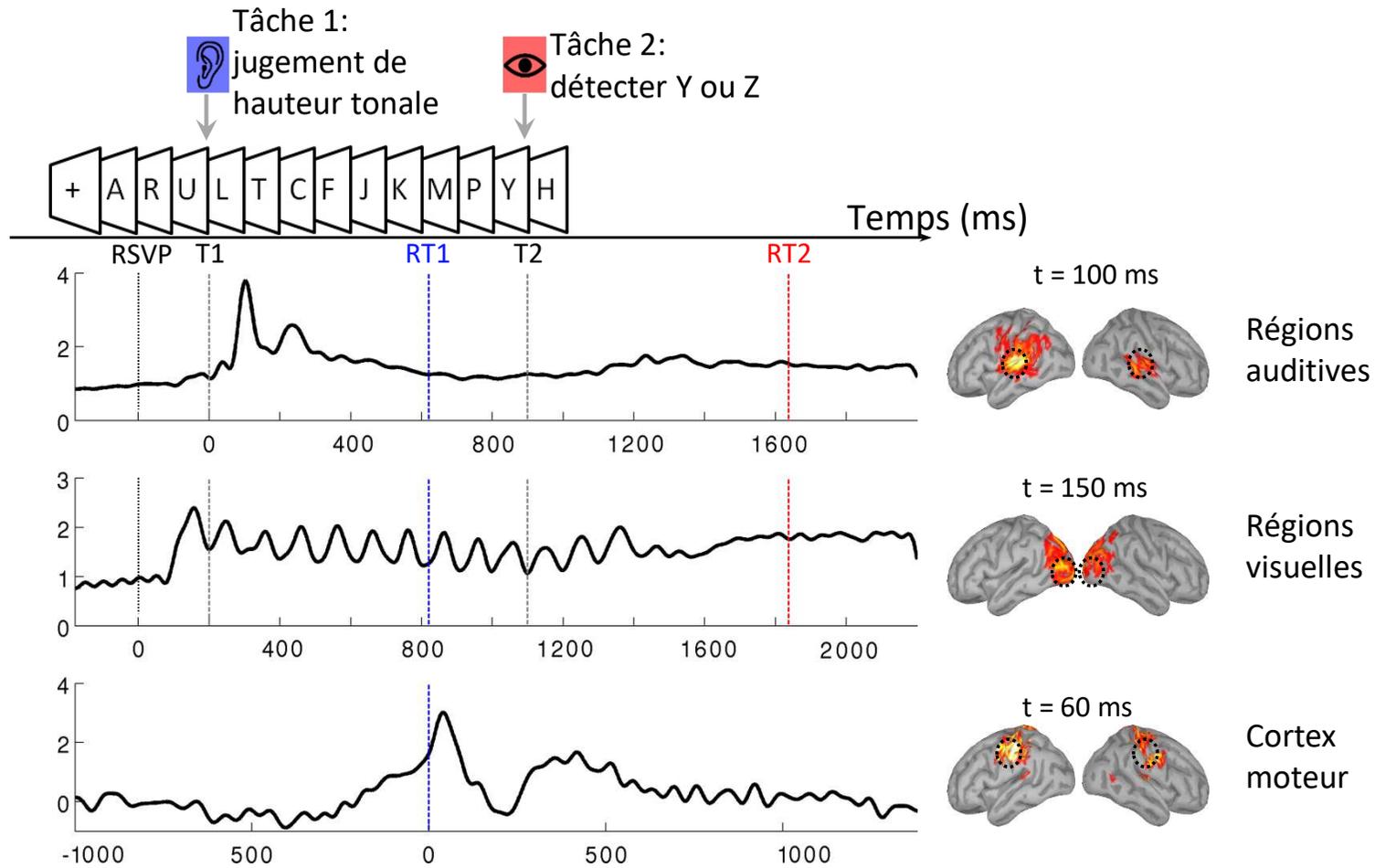
La période psychologique réfractaire



Le clignement de l'attention



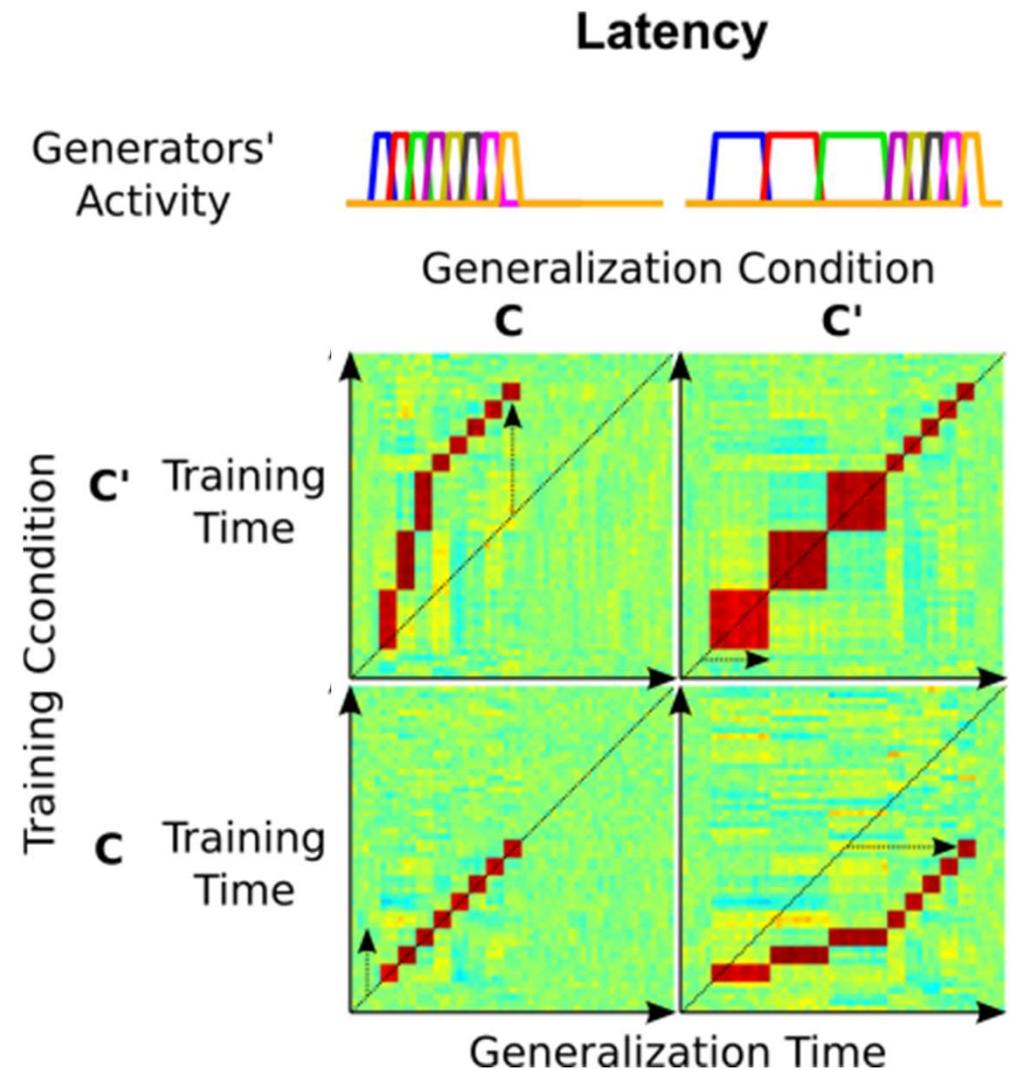
La reconstruction des sources met en évidence une séquence d'activations



Le décodage multivarié des signaux MEG: une source remarquable d'information sur le déroulement temporel des représentations mentales

King, J.-R., & Dehaene, S. (2014). Characterizing the dynamics of mental representations: the temporal generalization method. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.01.002>

La généralisation du décodage à travers plusieurs conditions expérimentales nous informe sur la manière dont les processus ont été réorganisés :

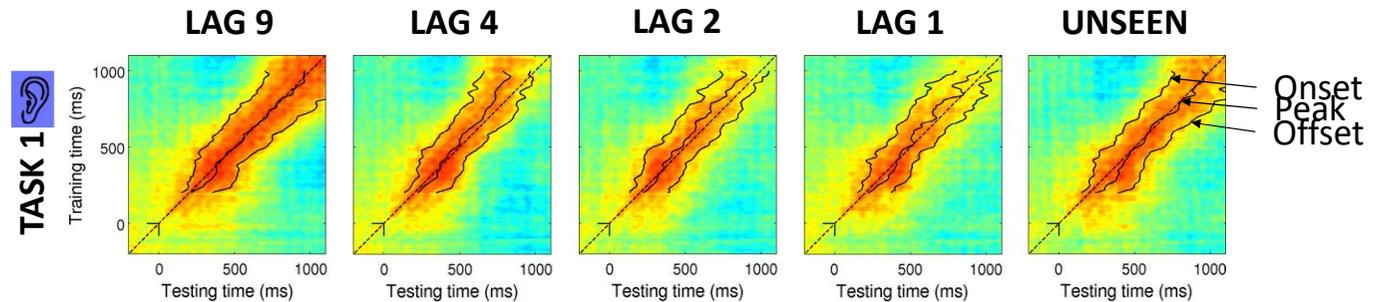


Le décodage et la généralisation à travers le temps révèlent le déroulement temporel des deux tâches

Deux décodeurs sont entraînés à décoder l'exécution de la tâche 1 et de la tâche 2, au délai 9, c'est-à-dire en l'absence d'interférence.

Tâche 1

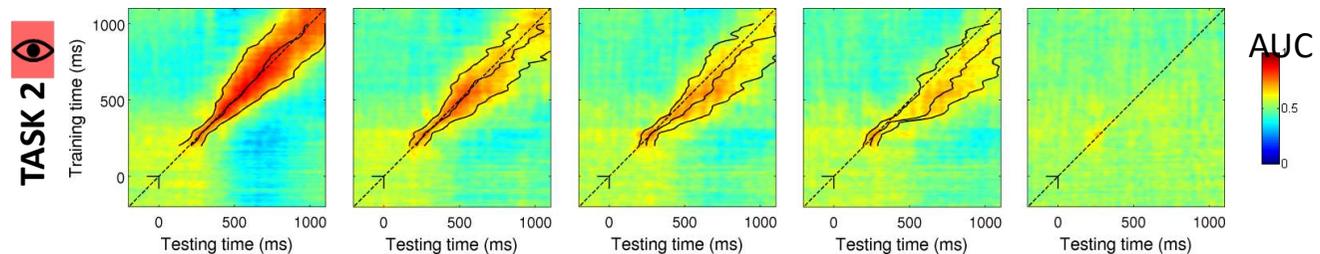
Décodeur entraîné à discriminer les essais où le sujet répond aux sons vs le sujet n'a pas besoin de répondre aux sons



La tâche 1 ne change pas: à tous les délais, le décodage reste sur la diagonale, voire s'accélère

Tâche 2

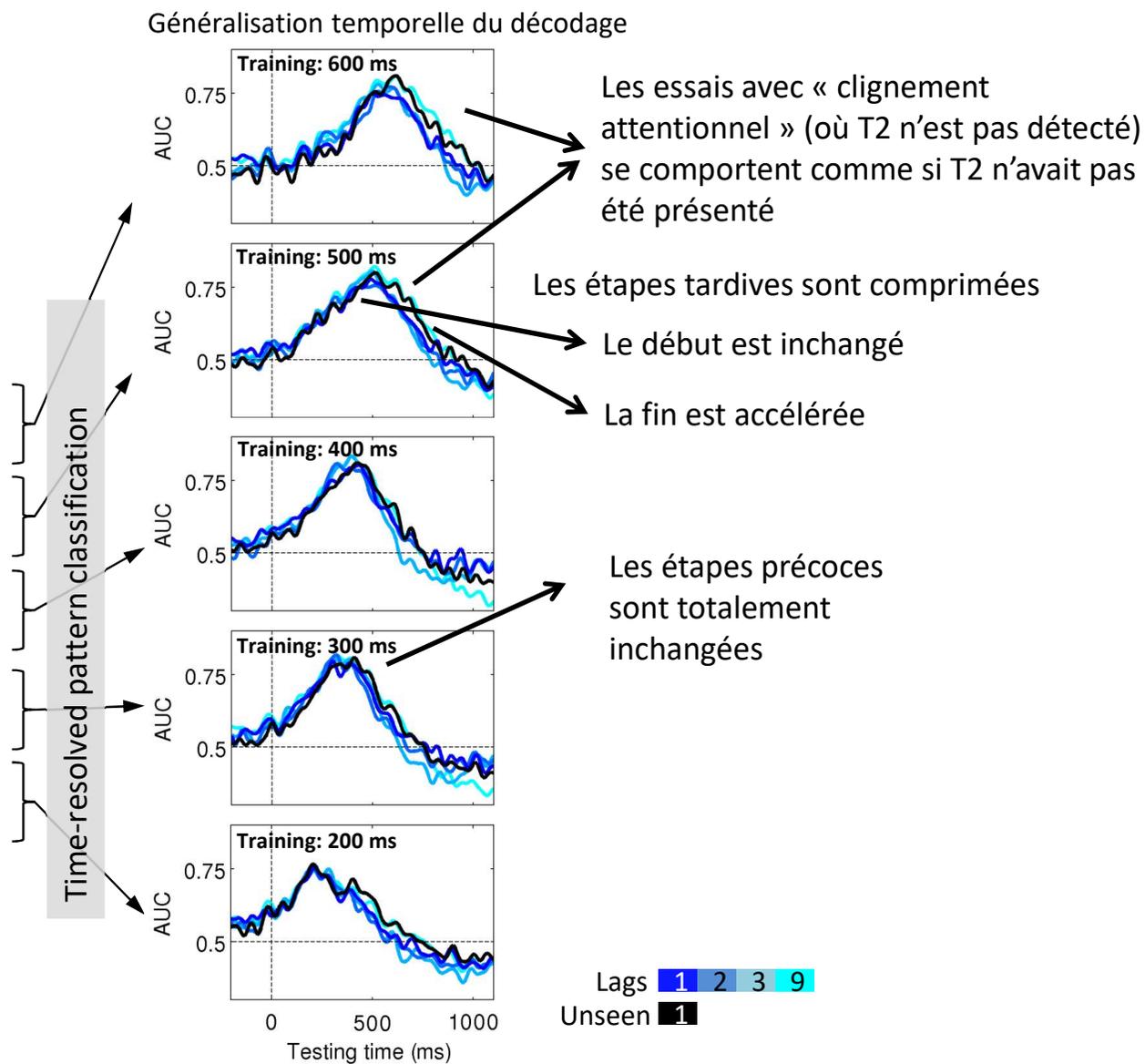
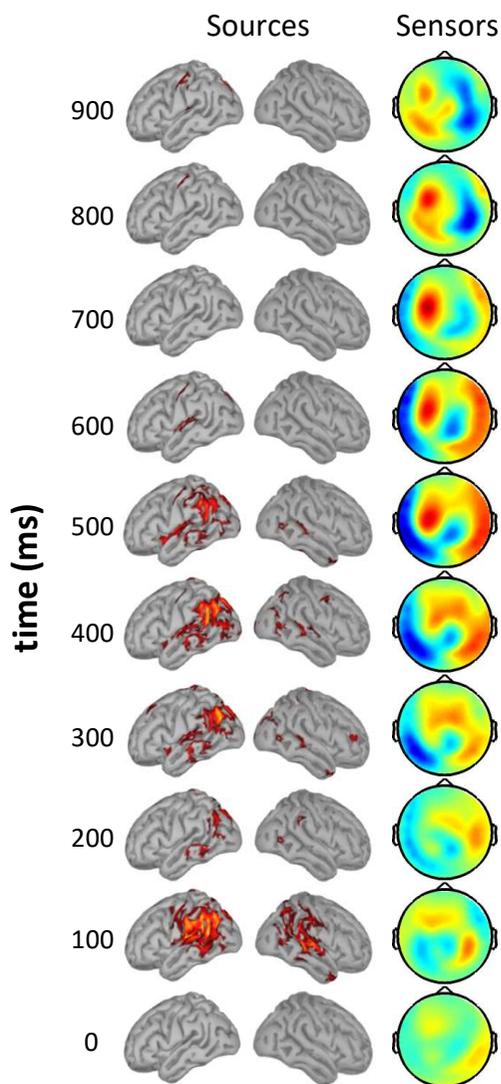
Décodeur entraîné à discriminer les moments où la lettre cible est présentée vs Une autre lettre est présentée



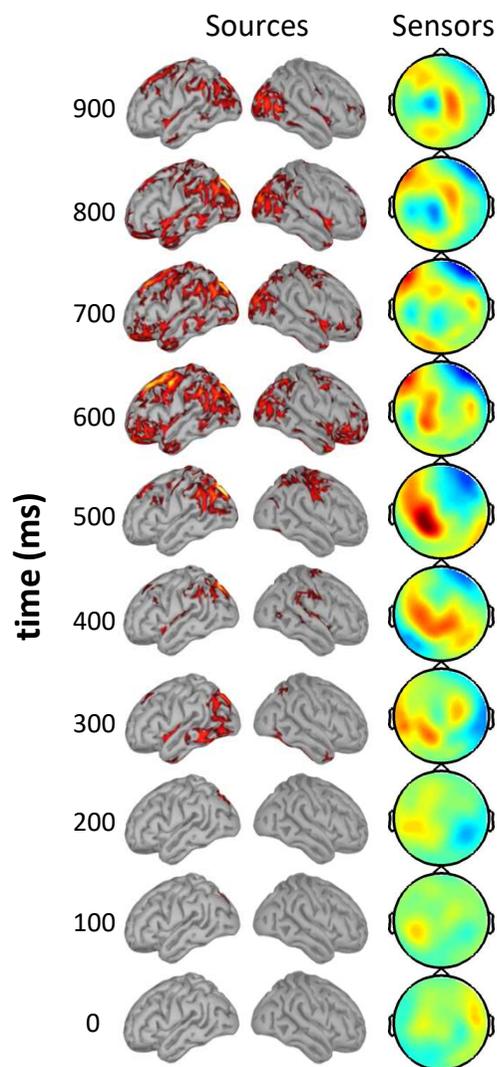
Le décodage de la tâche 2 est réduit et, vers ~300 ms, s'éloigne de la diagonale.

→ Les étapes tardives de la tâche 2 sont diluées et différées dans le temps

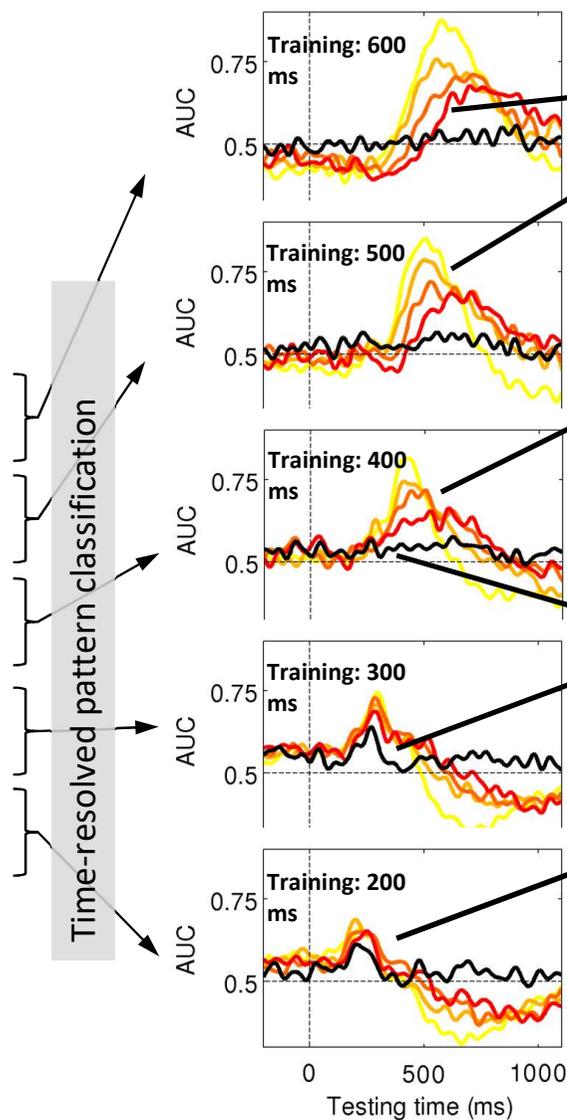
L'exécution de la tâche 1 n'est pratiquement pas affectée, juste légèrement comprimée



L'exécution de la tâche 2 est différée, diluée, voire annihilée



Généralisation temporelle du décodage



Les étapes tardives sont purement différées

Même quand la cible T2 est détectée, son traitement est dilué: le début est inchangé, mais l'amplitude est réduite tandis que la durée augmente.

Vers ~300 ms, lors des essais avec « clignement attentionnel », l'activation se réduit, voire disparaît totalement.

Les étapes précoces sont pratiquement inchangées.
→ L'amplification de la lettre cible se produit non-consciemment.

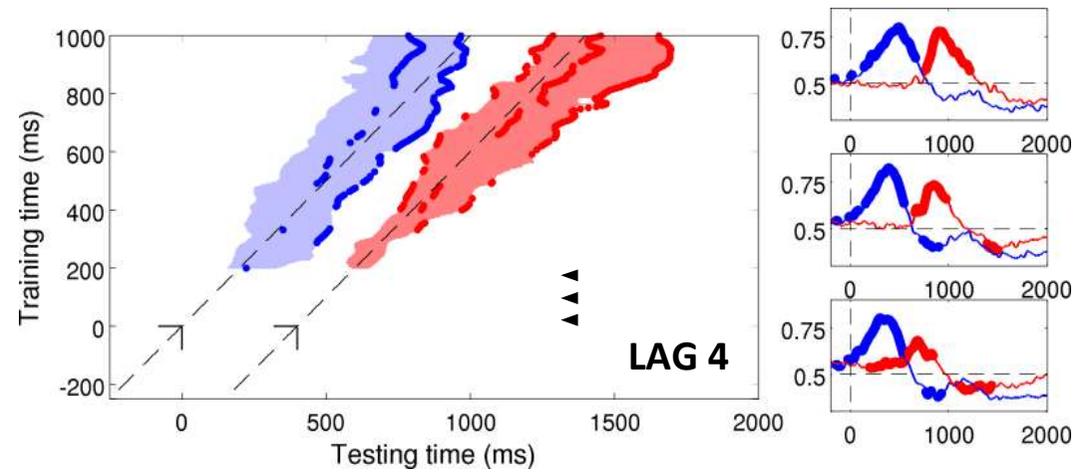
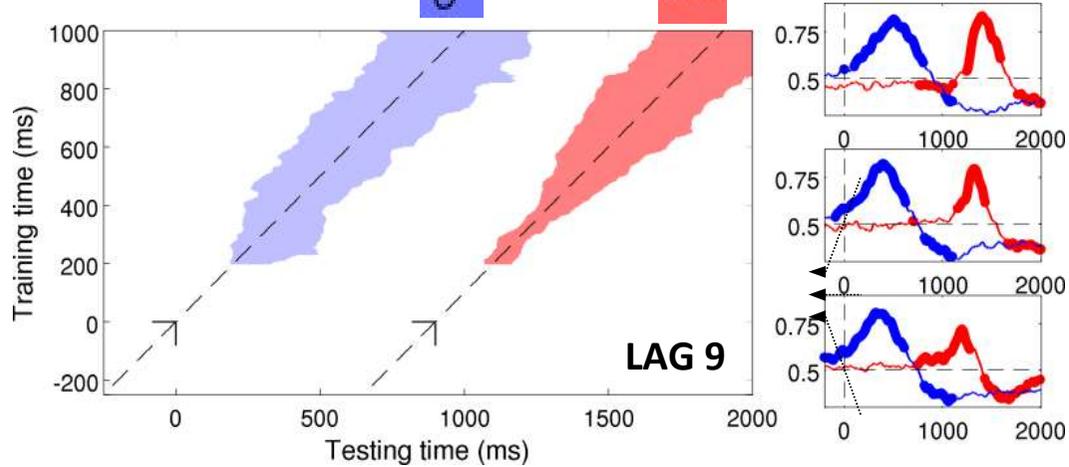
Lags 1 2 4 9
Unseen 1

Une radiographie complète du déroulement des tâches doubles

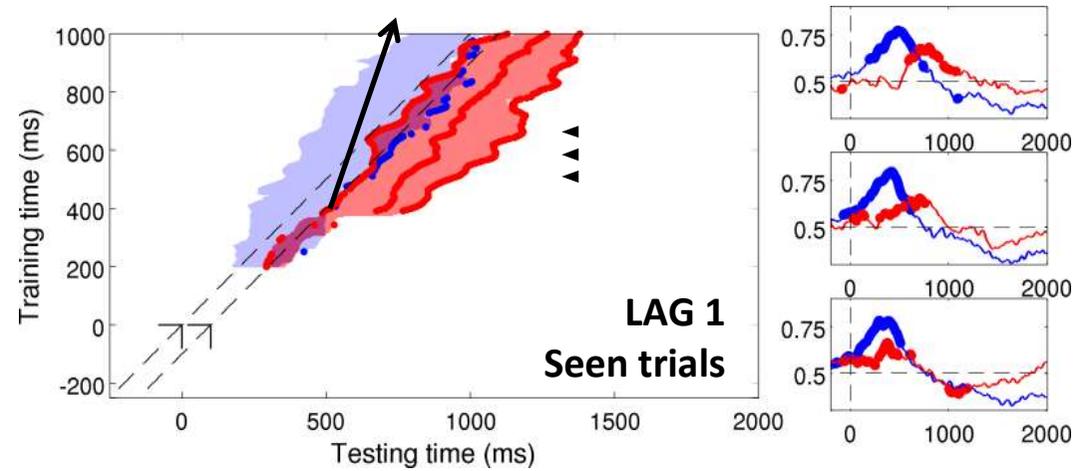
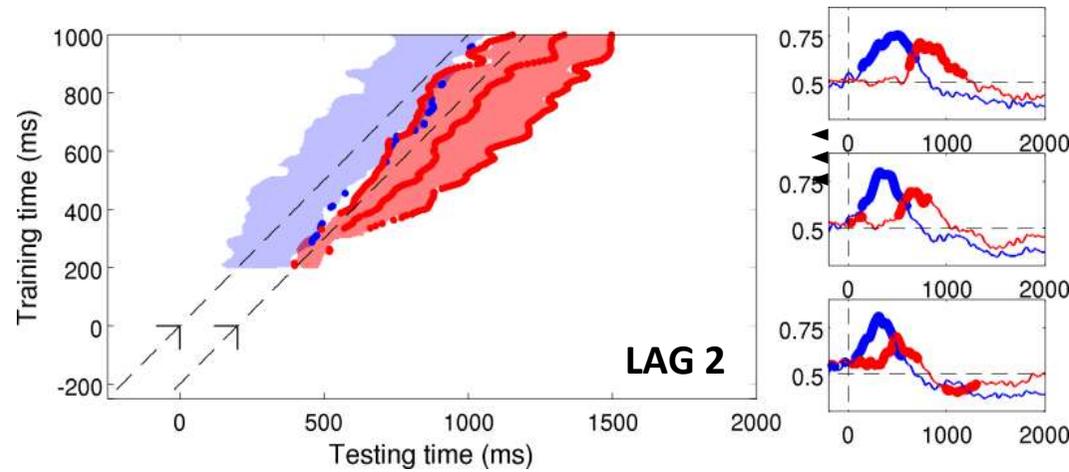
Tâche 1



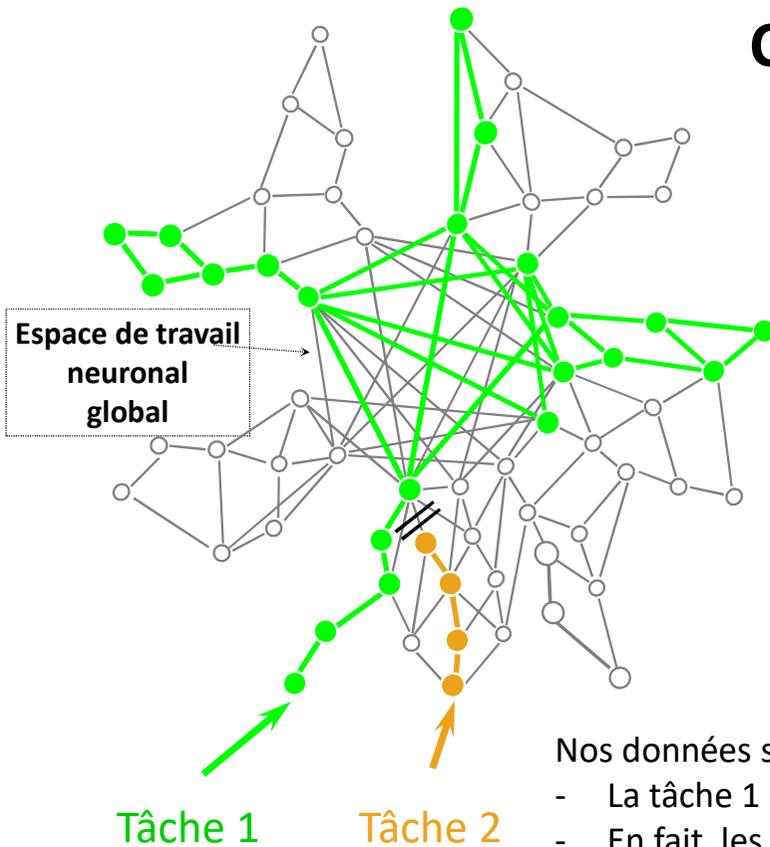
Tâche 2



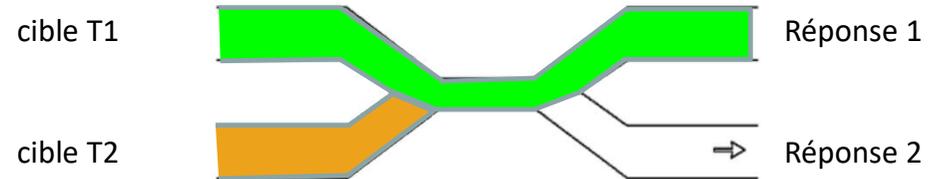
Préservations des premières étapes de la tâche 1.
Les étapes tardives sont différées.



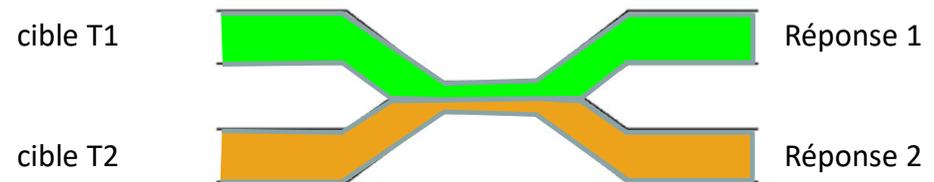
Conséquences théoriques



Goulot d'étranglement central (Modèle de Pashler)

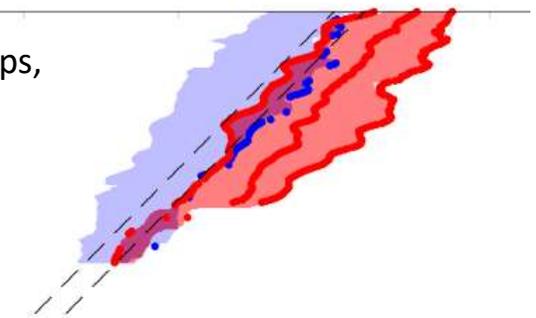
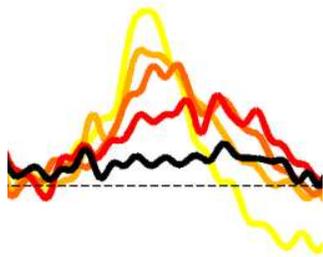


Partage des ressources centrales (Modèle de Tombu et Jolicoeur)



Nos données soutiennent plutôt le modèle du goulot d'étranglement, mais avec quelques divergences:

- La tâche 1 est pratiquement inchangée (incompatible avec le partage des ressources centrales)
- En fait, les étapes tardives de la tâche 1 sont accélérées (incompatible avec les deux modèles, mais pourrait suggérer une inhibition latérale en provenance de la cible T2 mise en attente)
- L'exécution de T2 n'est pas simplement différée:
 - Ses étapes centrales sont également diluées dans le temps, ce qui suggère un partage des ressources et un ralentissement de l'accumulation d'évidence
 - Chaque tâche comprend une cascade d'étapes sérielles qui se repoussent, et non un seul goulot d'étranglement





Sébastien Marti

Peut-on décoder l'image que le sujet voit et choisit ?

Marti, S., & Dehaene, S. (2017). Discrete and continuous mechanisms of temporal selection in rapid visual streams. *Nature Communications*, 8(1), 1955. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02079-x>

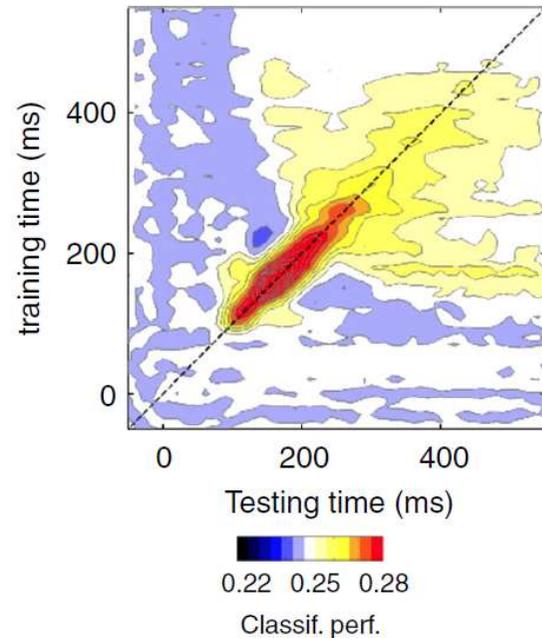
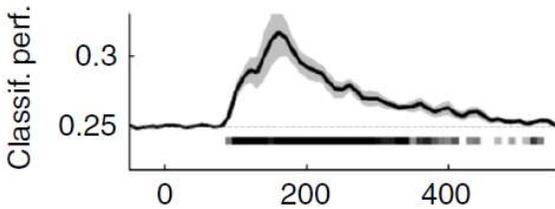
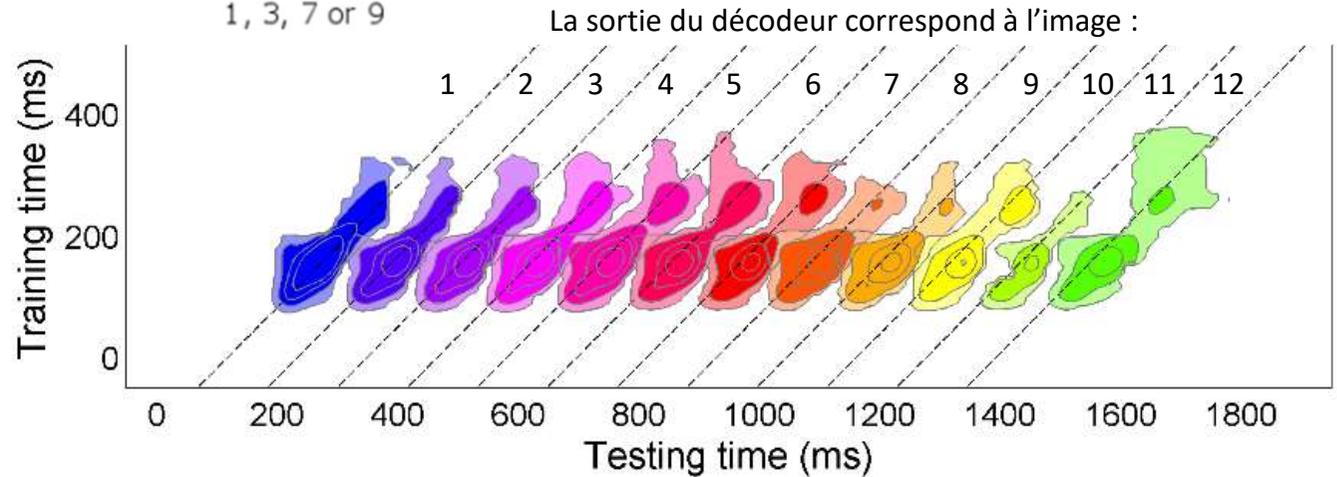
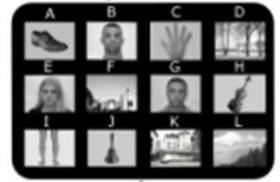
On bombarde un sujet avec 12 images à un rythme rapide (9 images/s).
Le sujet doit rapporter l'image entourée d'un cadre vert.
Il est temporairement distrait par une seconde tâche (couleur).

Un décodeur parvient à décoder le traitement visuel de *chaque* image.

Response to T1:



Response to T2:
3 guesses

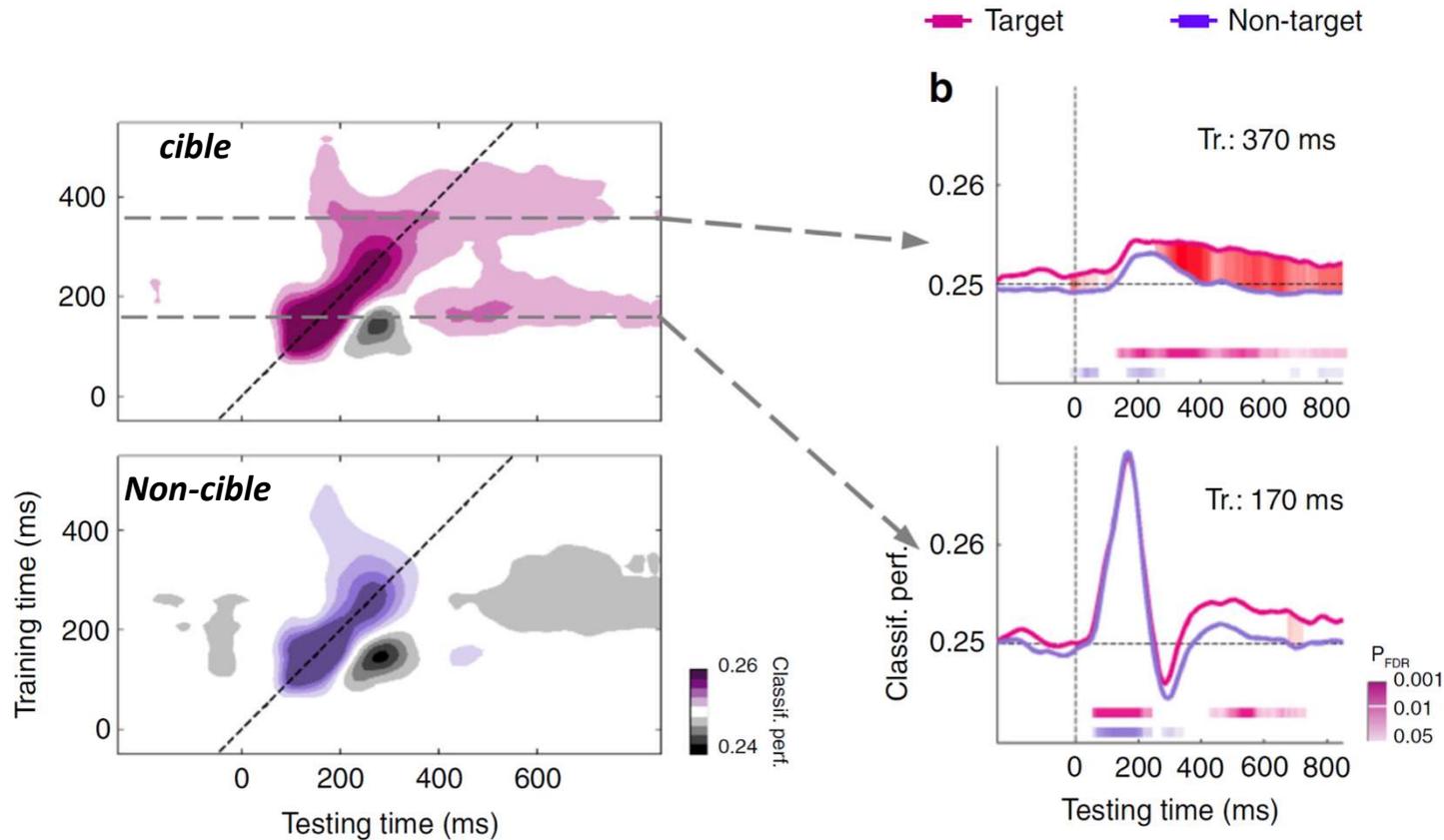


Les étapes de sélection attentionnelle d'une information

Marti, S., & Dehaene, S. (2017). Discrete and continuous mechanisms of temporal selection in rapid visual streams. *Nature Communications*, 8(1), 1955. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02079-x>

Pour l'image cible:

- Les étapes perceptives initiales sont identiques (inconscientes)
- Il existe une amplification tardive qui comprend deux composantes

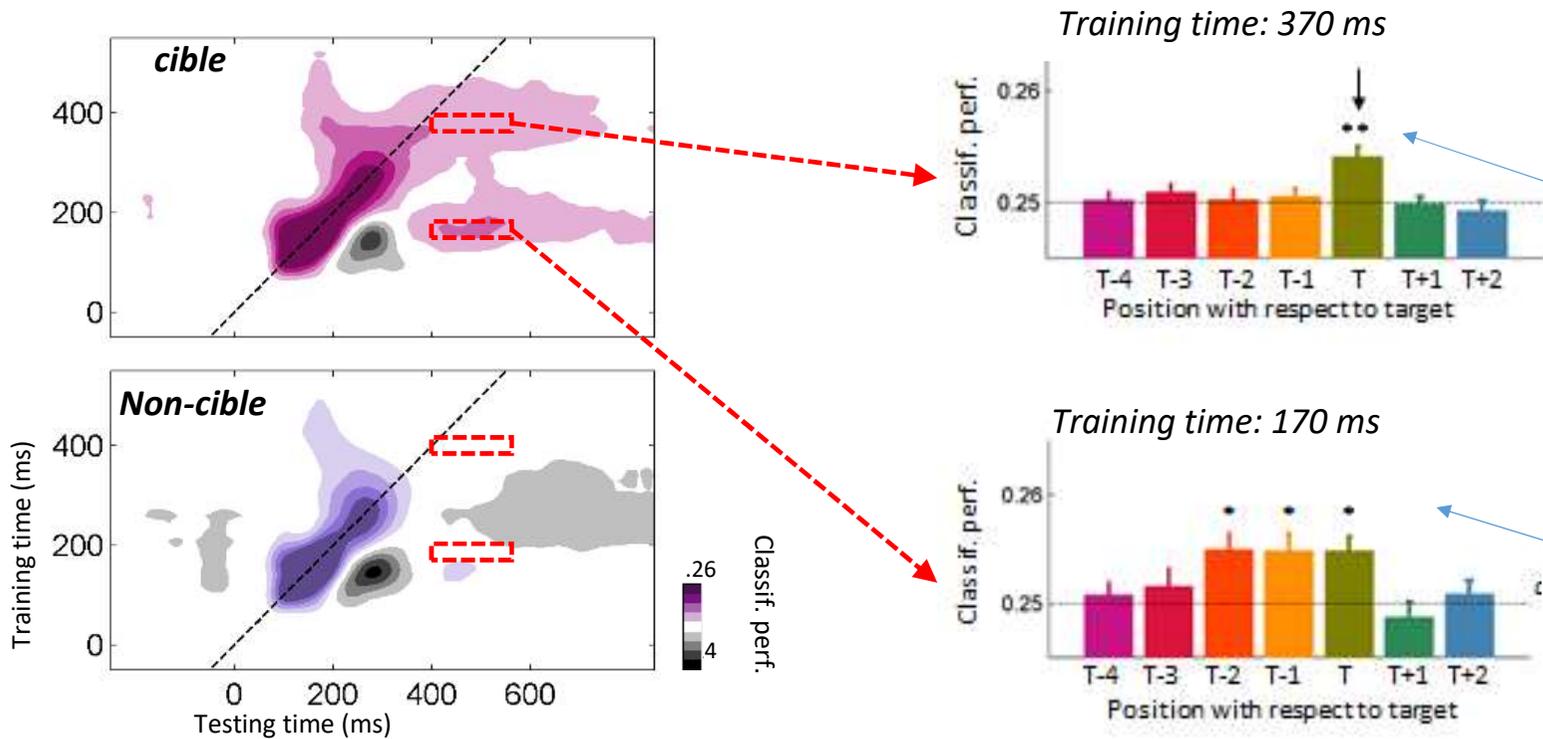


Les étapes de sélection attentionnelle d'une information

Marti, S., & Dehaene, S. (2017). Discrete and continuous mechanisms of temporal selection in rapid visual streams. *Nature Communications*, 8(1), 1955. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02079-x>

Pour l'image cible:

- Les étapes perceptives initiales sont identiques (inconscientes)
- Il existe une amplification tardive qui comprend deux composantes



Sélection discrète, tout-ou-rien, et corrélée aux rapports subjectifs et aux erreurs du sujet: Accès à l'espace de travail global

Sélection partielle, graduelle: amplification attentionnelle des candidats pertinents.

Pourrait-on décoder le contenu mental sans connaître à l'avance les choix possibles?

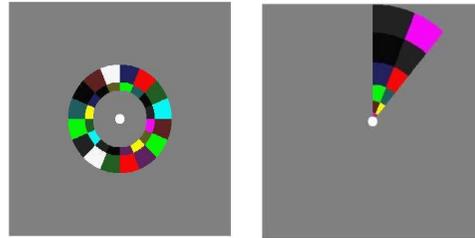
La rétinotopie inverse :

A partir de l'activité cérébrale, « peindre » une image de ce que le sujet voit ou imagine

Thirion, B., Duchesnay, E., Hubbard, E., Dubois, J., Poline, J. B., Lebihan, D., & Dehaene, S. (2006). Inverse retinotopy: inferring the visual content of images from brain activation patterns. *Neuroimage*, 33(4), 1104–1116.

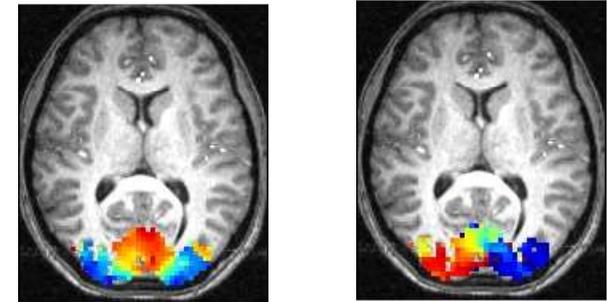
Etape 1

Stimuli en mouvement présentés sur la rétine



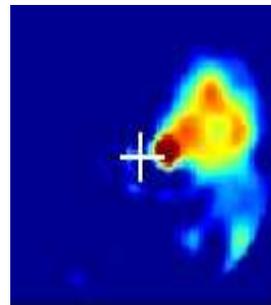
apprentissage

Correspondance entre stimuli et cortex



Etape 2

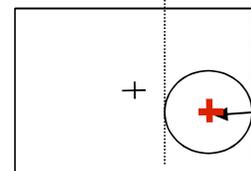
Stimulus reconstruit



Inférence inverse



Spatial profile



retina

Retinal position

p_v

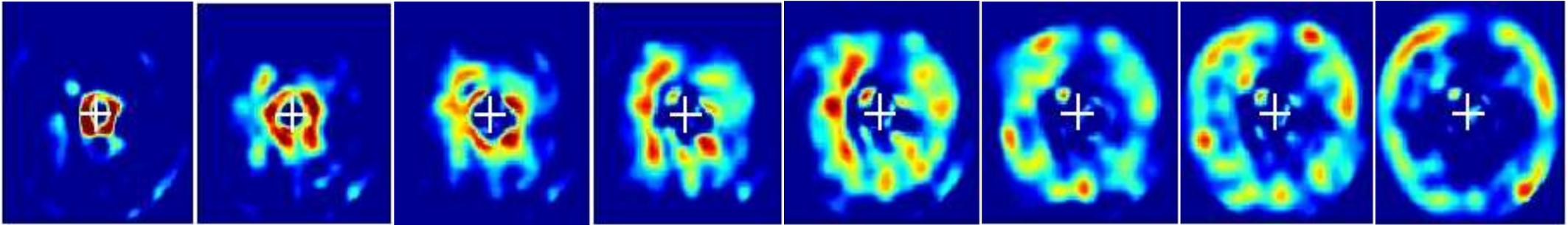
signal gain β

Activation quelconque

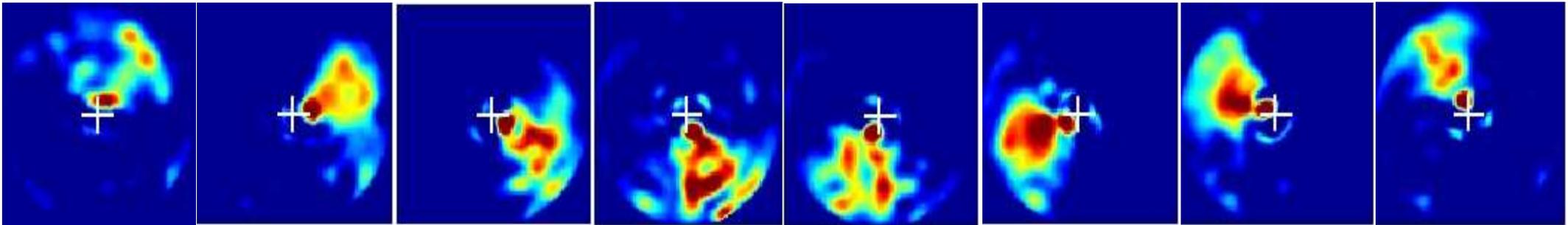


Résultats obtenus sur les stimuli rétinotopiques

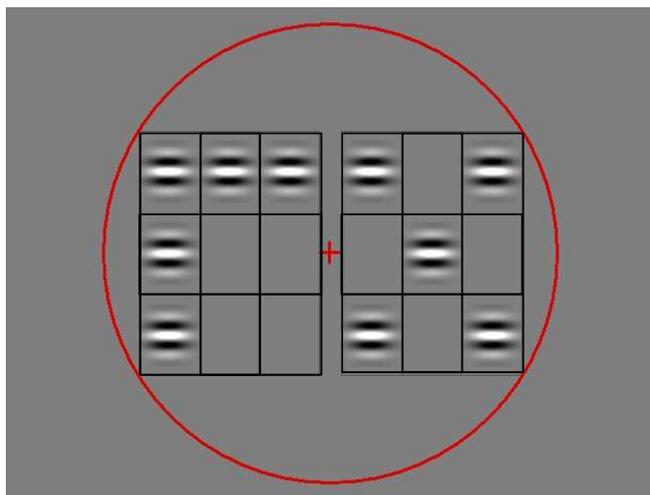
Anneau



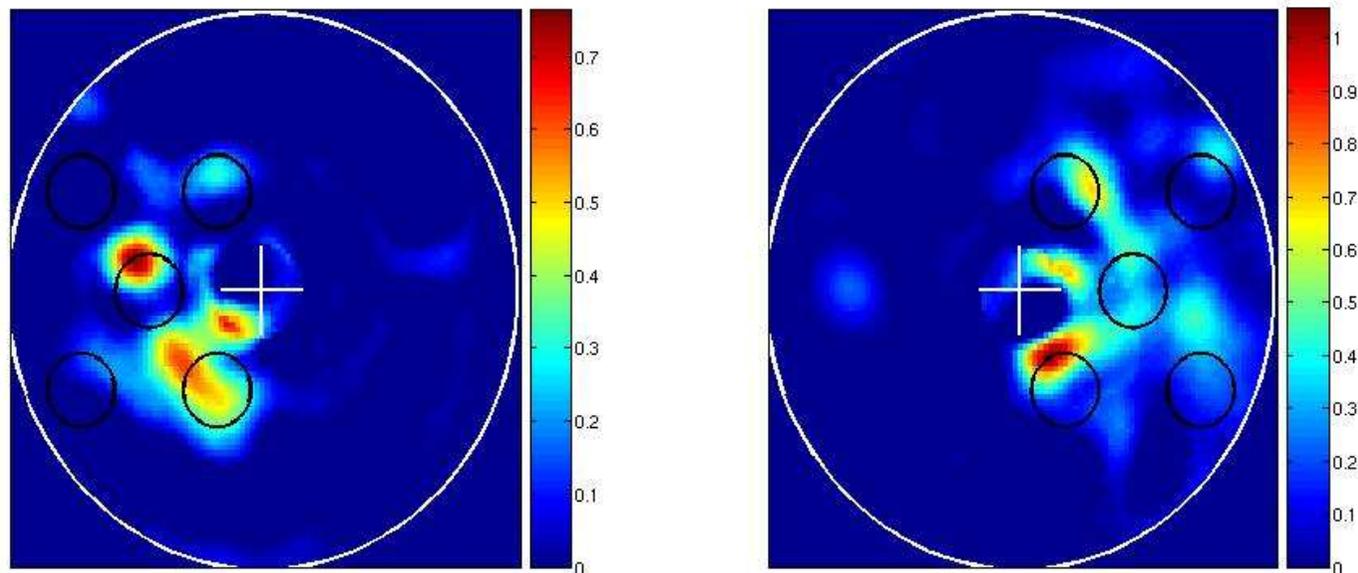
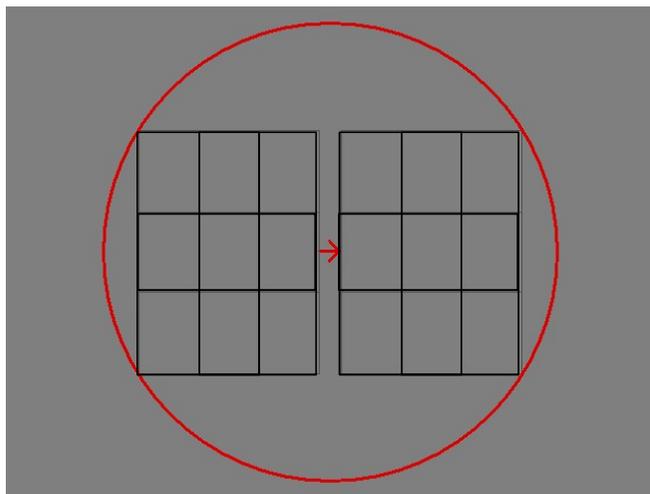
Secteur



Décodage d'une image mentale



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

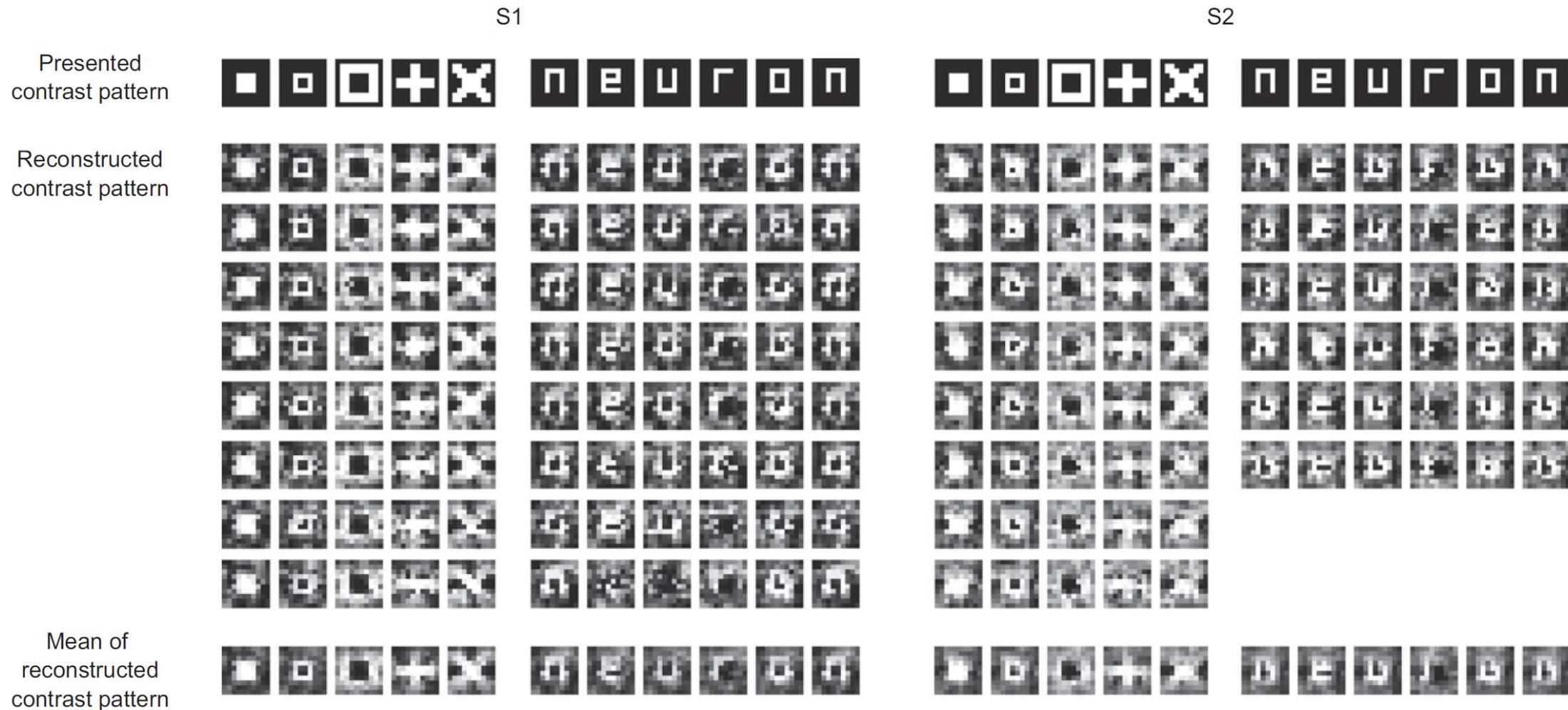


- Excellente classification du **côté** où le sujet imagine le domino
- Chez certains sujets, reconstruction du domino imaginé

Reconstruction détaillée des images vues par un sujet

Miyawaki, Y., Uchida, H., Yamashita, O., Sato, M., Morito, Y., Tanabe, H. C., ... Kamitani, Y. (2008). Visual Image Reconstruction from Human Brain Activity using a Combination of Multiscale Local Image Decoders. *Neuron*, 60(5), 915–929.

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.11.004>



Reconstruction de chaque image d'un film!

Nishimoto, S., Vu, A. T., Naselaris, T., Benjamini, Y., Yu, B., & Gallant, J. L. (2011). Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies. *Current Biology: CB*, 21(19), 1641–1646. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.08.031>

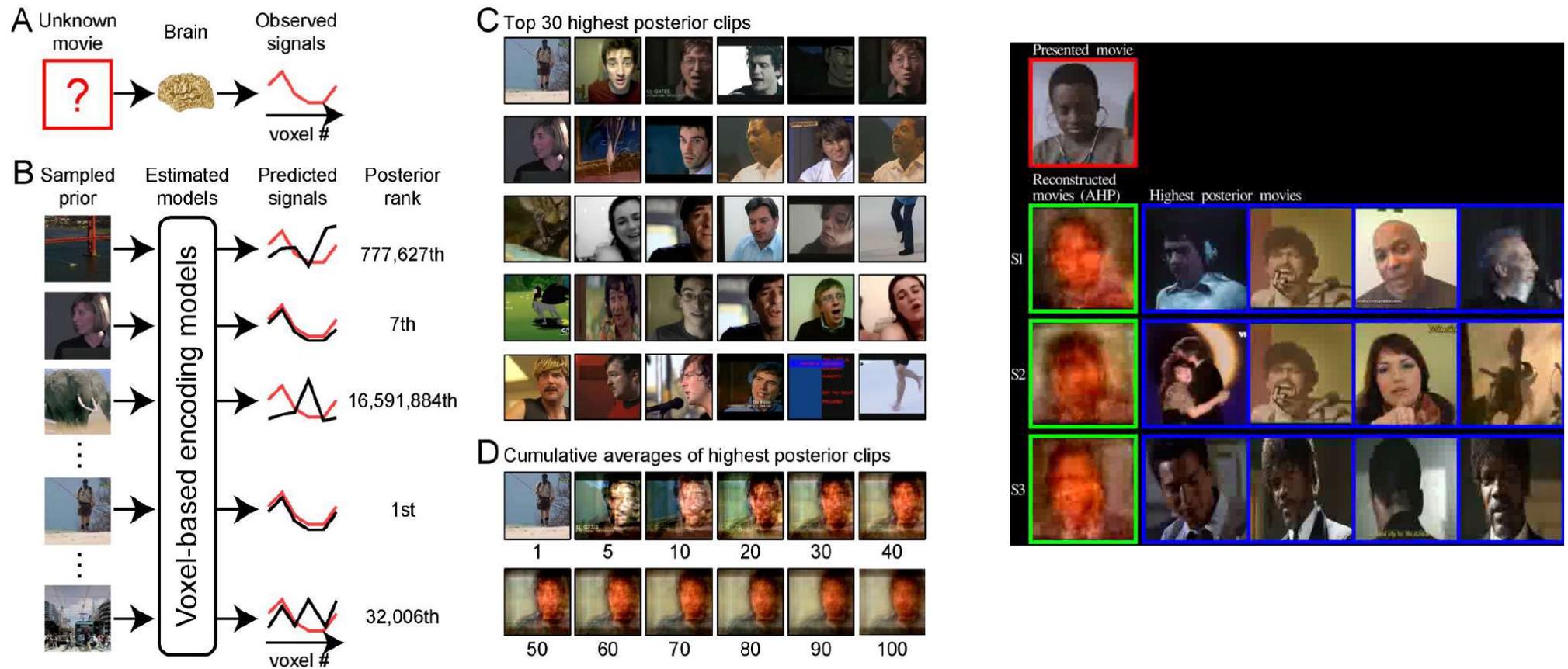


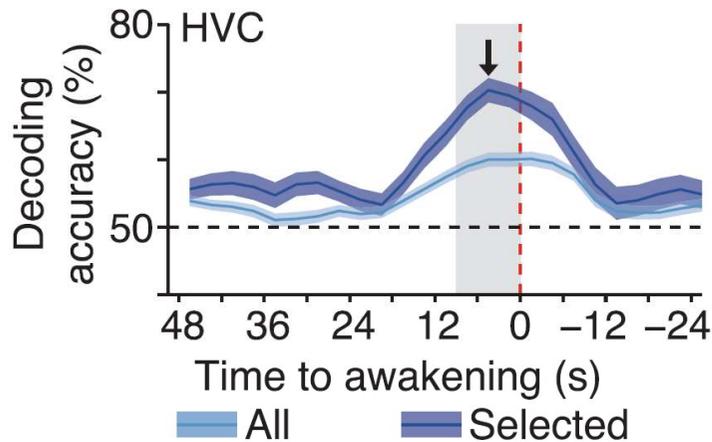
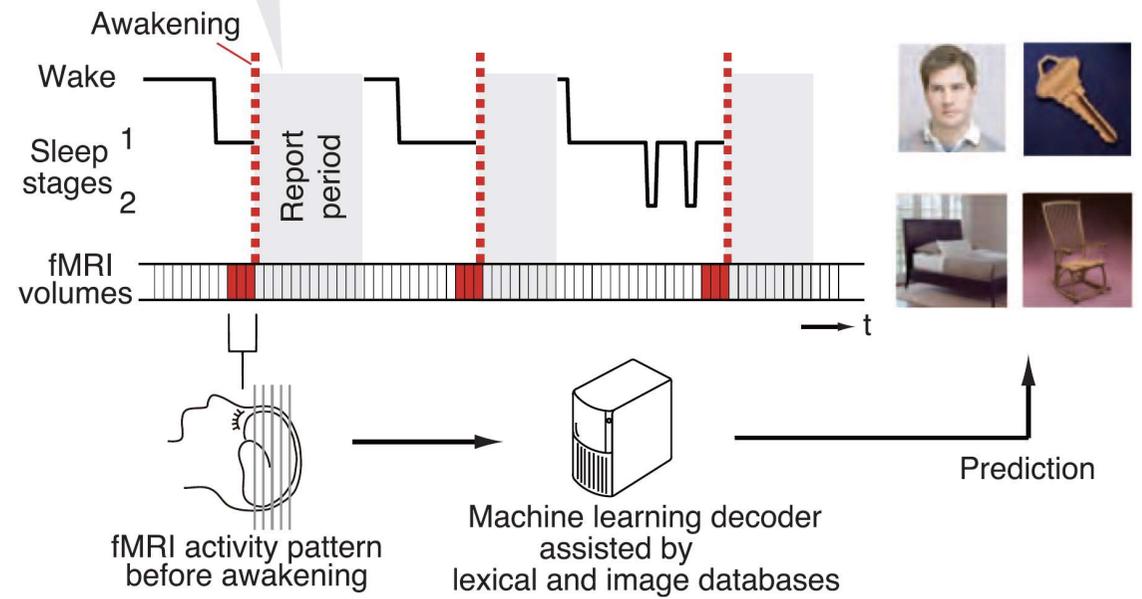
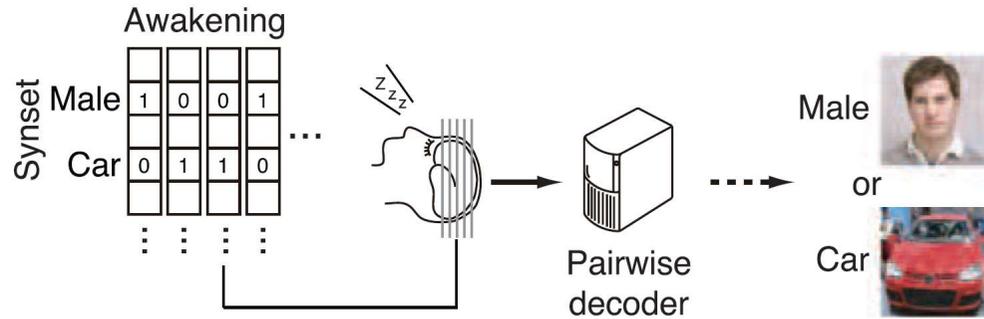
Figure S2. Schematic Diagram of Decoding Algorithm

Le décodage du contenu des rêves

Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y., & Kamitani, Y. (2013). Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1234330>

Pendant l'IRM fonctionnelle, 3 sujets se sont endormis et ont été réveillés près de 200 fois chacun !
Leurs descriptions ont été catégorisées avec WordNet.

Yes, well, I saw a **person**. Yes. What it was... It was something like a scene that I hid a **key** in a place between a **chair** and a **bed** and **someone** took it.



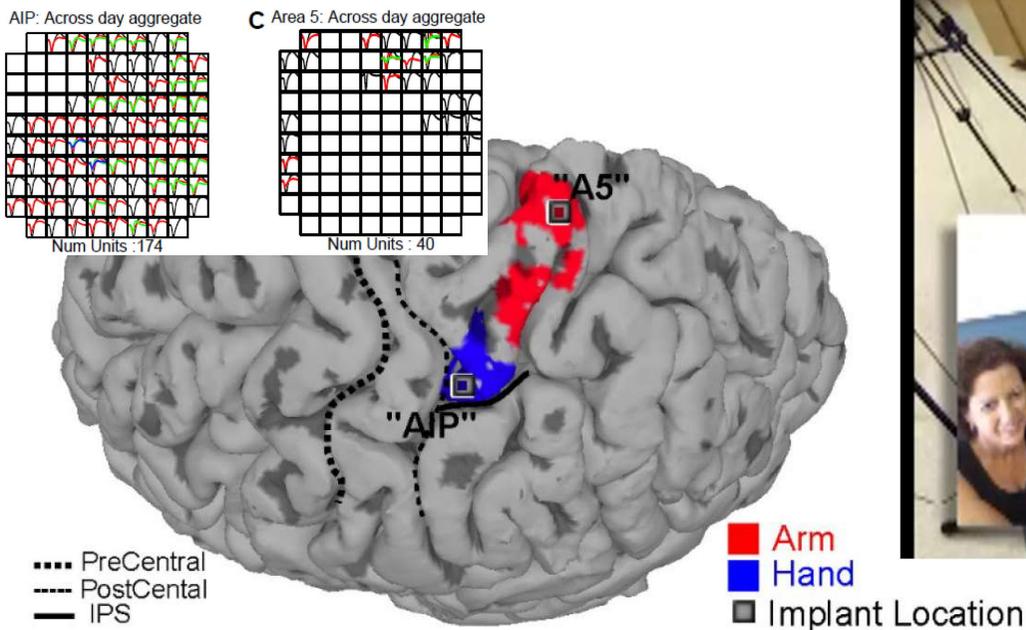
Un décodeur a été entraîné, chez le même sujet, à décoder les réponses cérébrales à des images de deux catégories.

Le même décodeur, appliqué aux données d'IRM fonctionnelle collectées juste avant le réveil, parvient ensuite à décider, mieux qu'au hasard, le contenu du rêve.

Le décodage de l'activité neuronale : vers des interfaces rapides cerveau-machine

Aflalo, T., Kellis, S., Klaes, C., Lee, B., Shi, Y., Pejsa, K., ... Andersen, R. A. (2015). Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human. *Science (New York, N.Y.)*, 348(6237), 906–910. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5417>

Un patient tétraplégique de 32 ans a été implanté avec 2 puces de 100 micro-électrodes le 17 avril 2013. Les mêmes électrodes peuvent être utilisées pour décoder de nombreux paramètres (mouvement réel, mouvement imaginé, but...) mais aussi pour stimuler et donner un retour tactile à la personne.

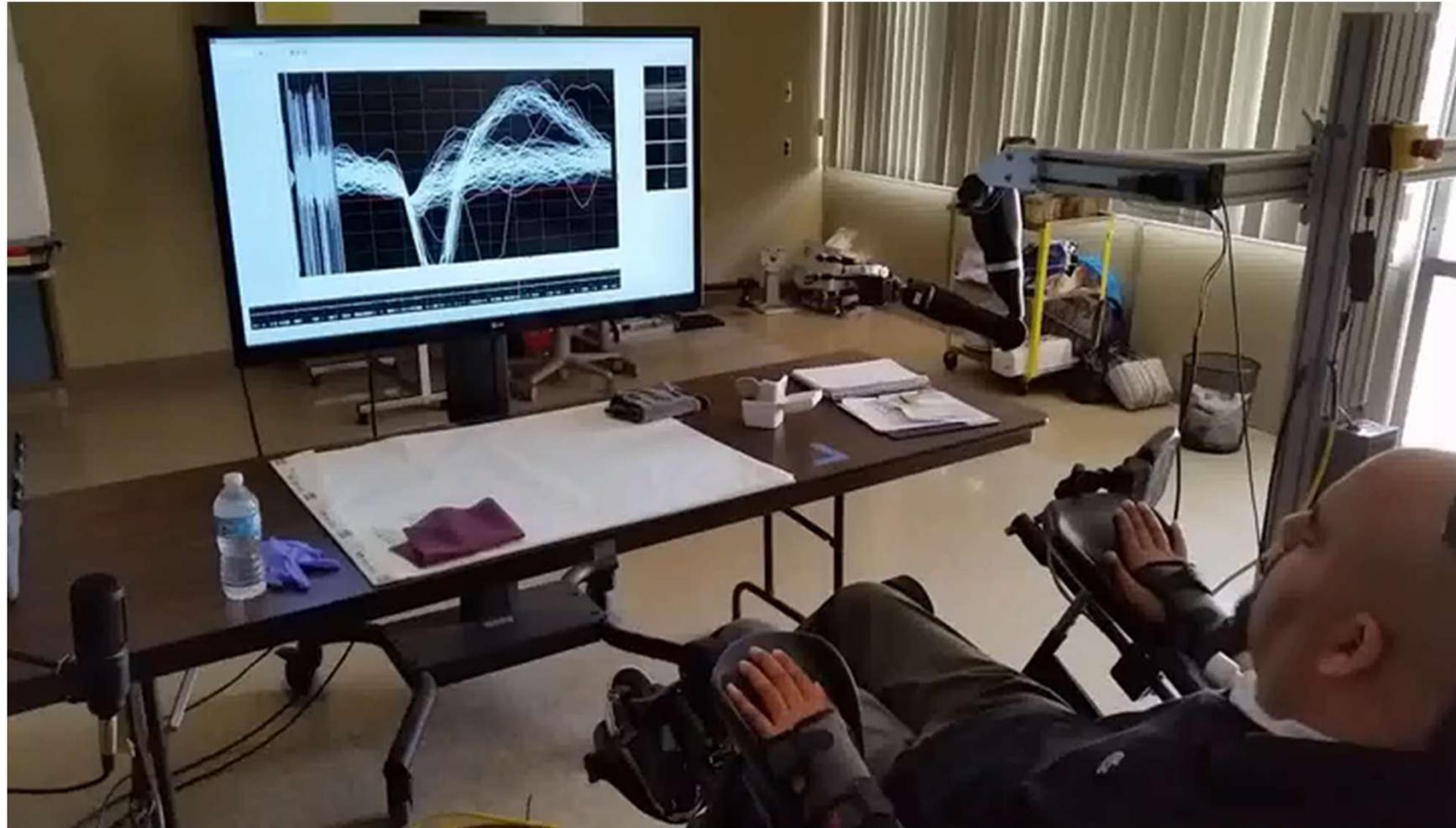


L'imagination permet de prendre le contrôle d'un neurone unique !

Aflalo, T., Kellis, S., Klaes, C., Lee, B., Shi, Y., Pejsa, K., ... Andersen, R. A. (2015). Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human. *Science (New York, N.Y.)*, 348(6237), 906–910. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5417>

Le patient rapporte qu'il parvient à contrôler ce neurone en imaginant différentes activités:

- Activer: Faire tourner l'épaule
- Inhibier: toucher son nez





Gravure de Matthäus
Greuter (16ème siècle)