

**Cours 2014:**

**Fondements cognitifs des apprentissages scolaires**

Stanislas Dehaene

Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°4

**La consolidation des apprentissages  
et l'importance du sommeil**

# Quatre piliers de l'apprentissage

Les neurosciences cognitives ont identifié au moins quatre facteurs qui déterminent la vitesse et la facilité d'apprentissage:

- **L'attention**
- **L'engagement actif**
  - Maximiser la curiosité et la prédiction active
- **Le retour d'information**
  - Signaux d'erreurs
  - Récompense et motivation
- **La consolidation**
  - Automatisation: transfert du conscient au non-conscient, et libération de ressources.
  - Sommeil

## Pilier 4: la consolidation: Transfert de l'explicite vers l'implicite

Au début de l'apprentissage, le cortex préfrontal est fortement mobilisé: traitement **explicite, conscient, avec effort**.

Progressivement, l'**automatisation** transfère les connaissances vers des réseaux non-conscients, libérant les ressources.

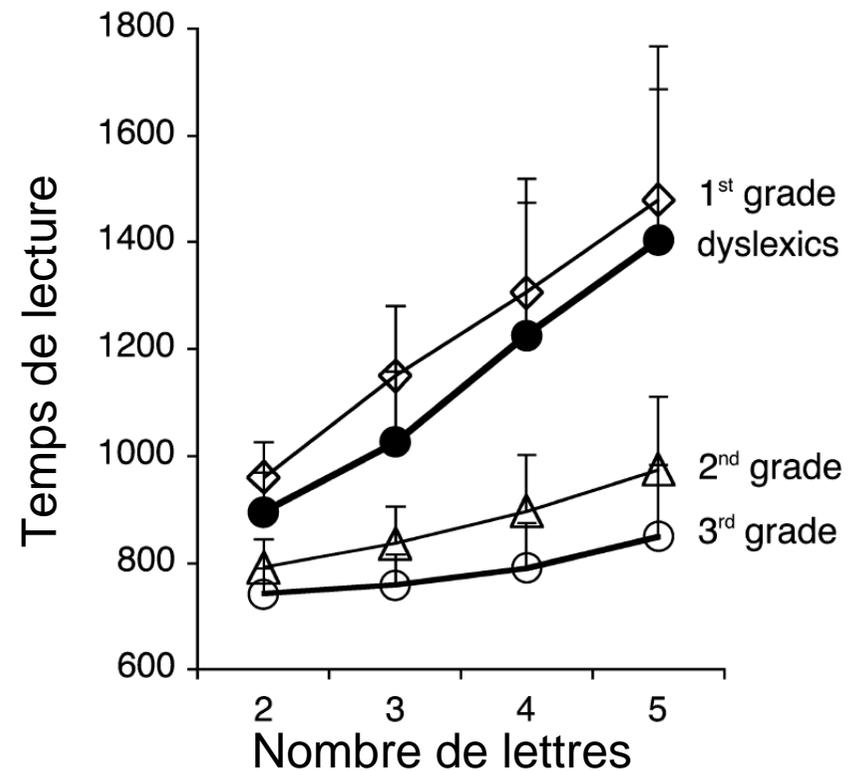
Exemple de la lecture:

Au début, l'enfant retient les correspondances graphème-phonème sous forme de règles explicites, qu'il applique une par une lorsqu'il lit un mot.

Par la suite, le décodage devient de plus en plus routinier et fondé sur des connaissances implicites, rapides et non-conscientes.

**Cette automatisation est essentielle:**

Lorsque la lecture devient fluide et automatique, l'enfant cesse de se concentrer sur le décodage et peut mieux réfléchir au sens du texte.



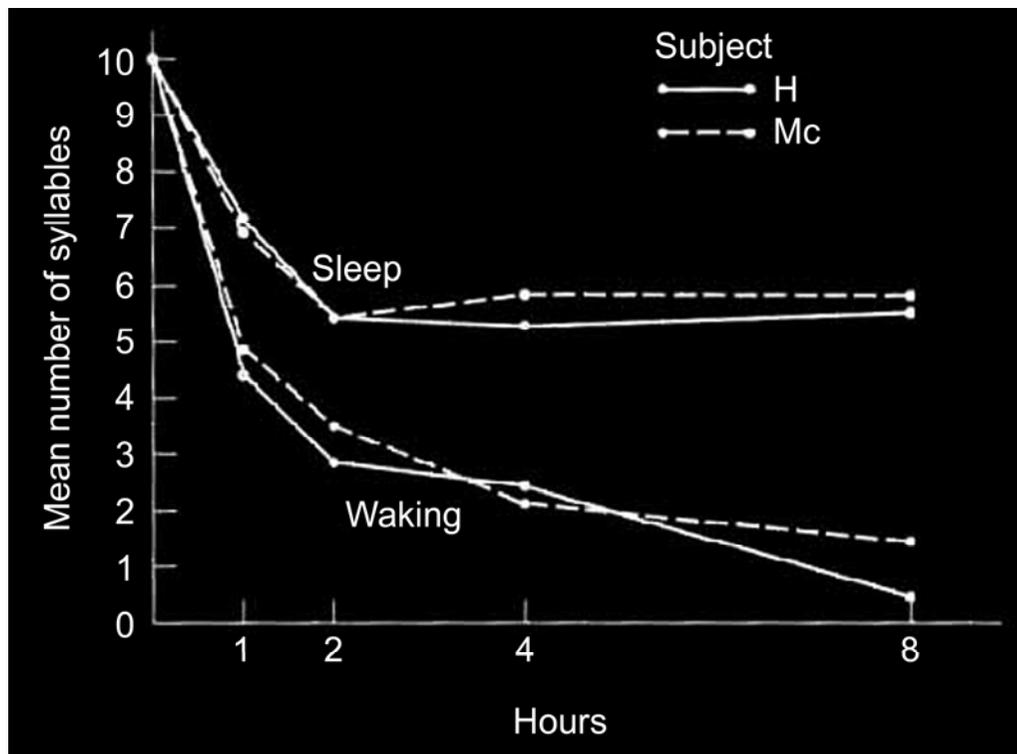
# Une première preuve du rôle du sommeil dans l'apprentissage

Jenkins & Dallenbach (1924) Am. J. of Psychol. 35:605-612

Apprentissage de syllabes sans signification.

Test après 1, 2, 4 ou 8 heures.

2 groupes de sujets: avec ou sans sommeil entre l'apprentissage et le test.



Résultats:

Décroissance régulière de la mémoire en fonction du temps (théorie d'Ebbinghaus), mais seulement dans le groupe resté éveillé.

Plusieurs interprétations possibles:

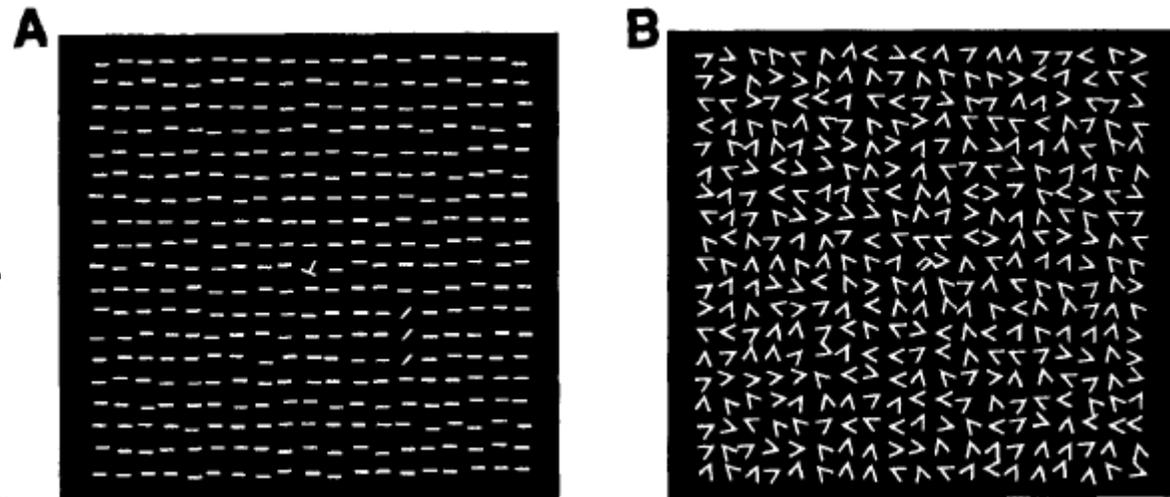
- Effet protecteur du sommeil (théorie « passive »)
- Fatigue au moment du test.
- Effet d'interférence des activités durant l'éveil.
- Effet consolidateur du sommeil

# Le rôle du sommeil dans l'apprentissage perceptif

Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J., & Sagi, D. (1994). Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, 265(5172), 679–682.

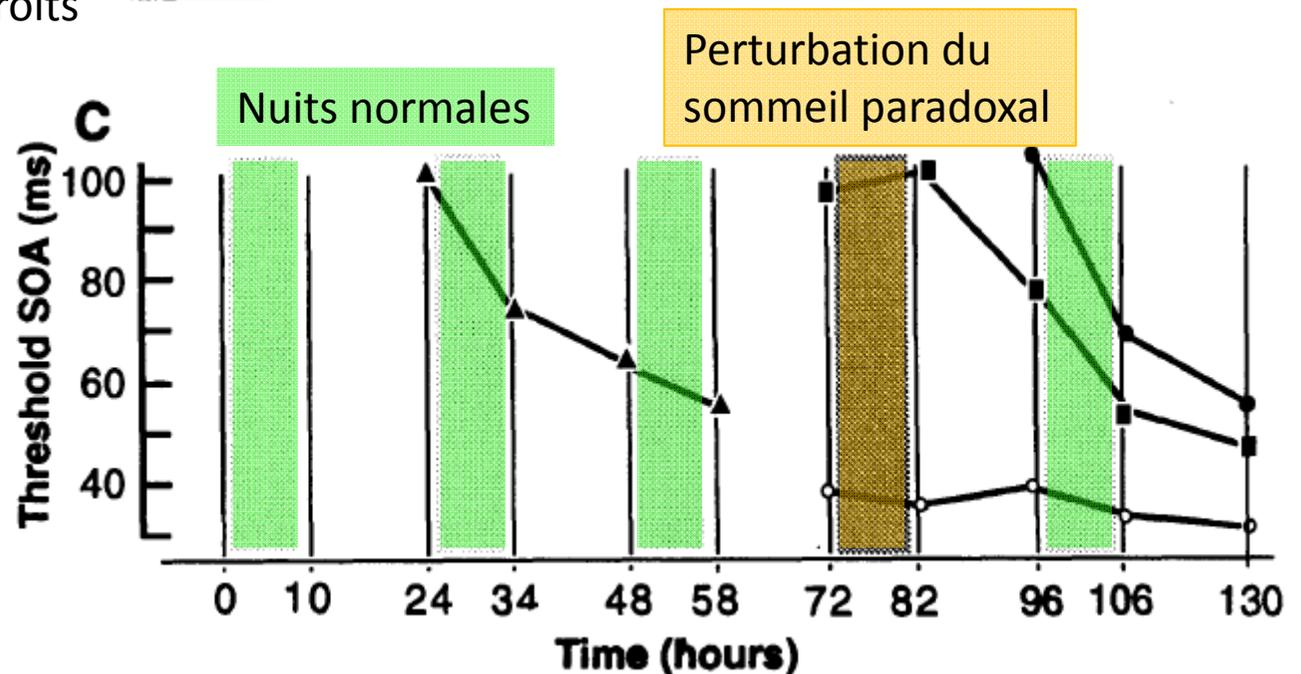
Apprentissage perceptif:

- détection d'une série de barres dans un écran bref et suivi d'un masque.
- L'apprentissage est spécifique à un endroit de la rétine, ce qui permet d'introduire plusieurs périodes d'entraînement à des endroits différents.



Résultats:

- La performance s'améliore nettement après une période de sommeil.
- La perturbation du sommeil paradoxal bloque sélectivement la consolidation mais pas la rétention.



# Le rôle du sommeil dans l'apprentissage perceptif

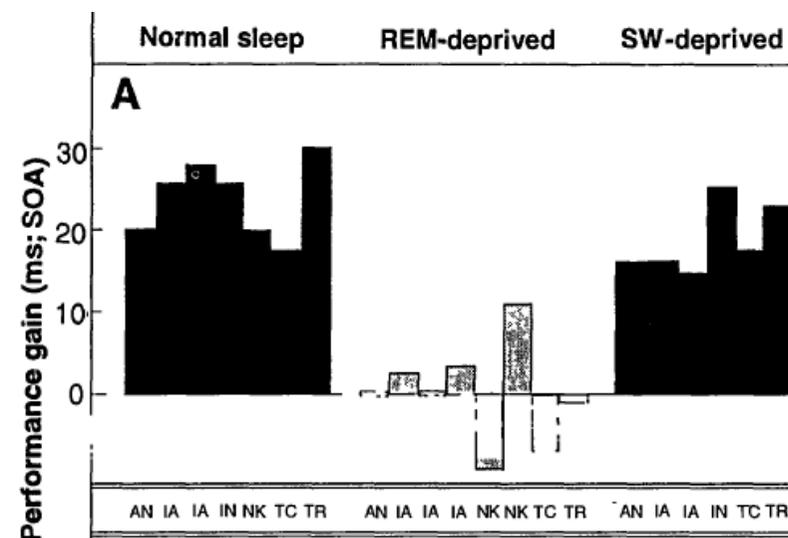
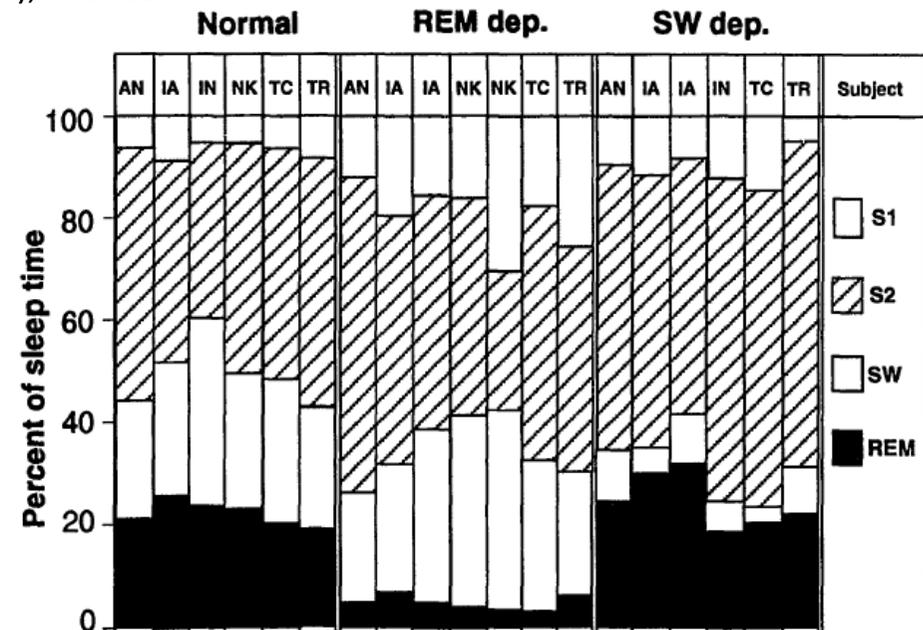
Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J., & Sagi, D. (1994). Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, 265(5172), 679–682.

L'effet semble sélectif de la privation de sommeil paradoxal: un groupe de sujets privés seulement de sommeil à ondes lentes ne montre pas d'effet significatif.

Résultat compatible avec l'hypothèse d'une dissociation entre apprentissage déclaratif et non-déclaratif:

- Le sommeil à ondes lentes permettrait la consolidation et la généralisation des connaissances déclaratives (par le biais de la réactivation hippocampique et des fuseaux de sommeil, thalamo-corticaux).

- Le sommeil paradoxal, lui, renforcerait les apprentissages perceptifs et moteurs (mémoire procédurale)



# 1995-2005: Réplifications et découvertes

- Stickgold, R., James, L., and Hobson, J.A. (2000a). Visual discrimination learning requires sleep after training. *Nat. Neurosci.* 3, 1237–1238.
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2004). Sleep-dependent learning and memory consolidation. *Neuron*, 44(1), 121–33.

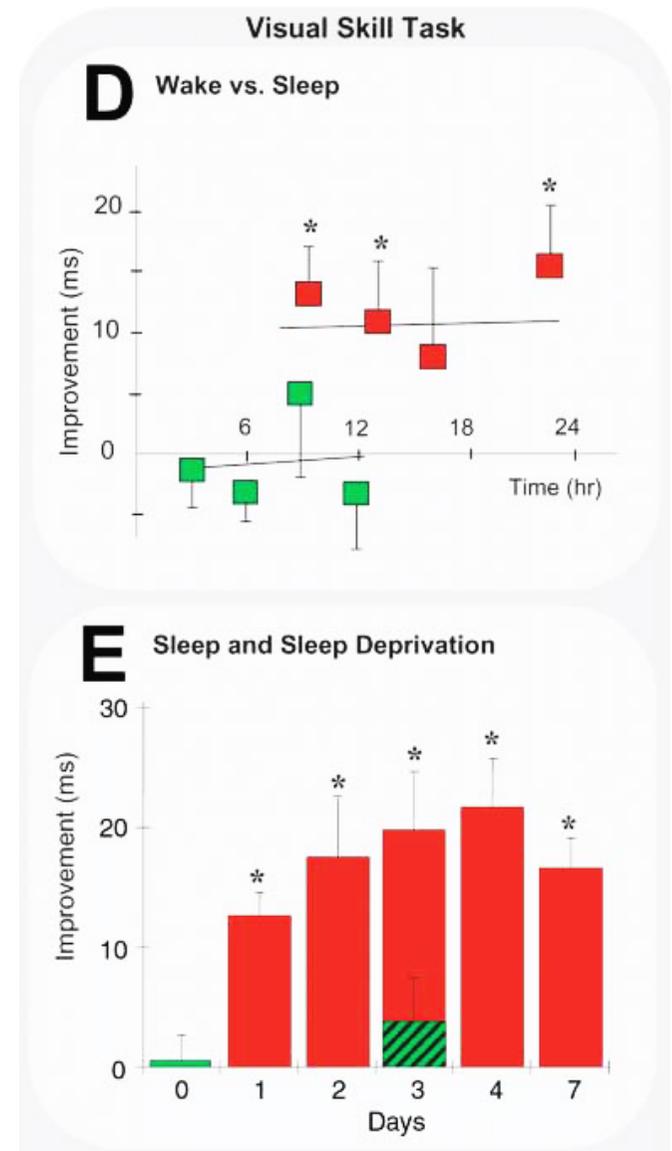
→ Apprentissage dépendant du sommeil et non du temps, maintenu plusieurs jours et continuant à s'améliorer.

- Walker, M. P., Stickgold, R., Alsop, D., Gaab, N., & Schlaug, G. (2005). Sleep-dependent motor memory plasticity in the human brain. *Neuroscience*, 133(4), 911–917.

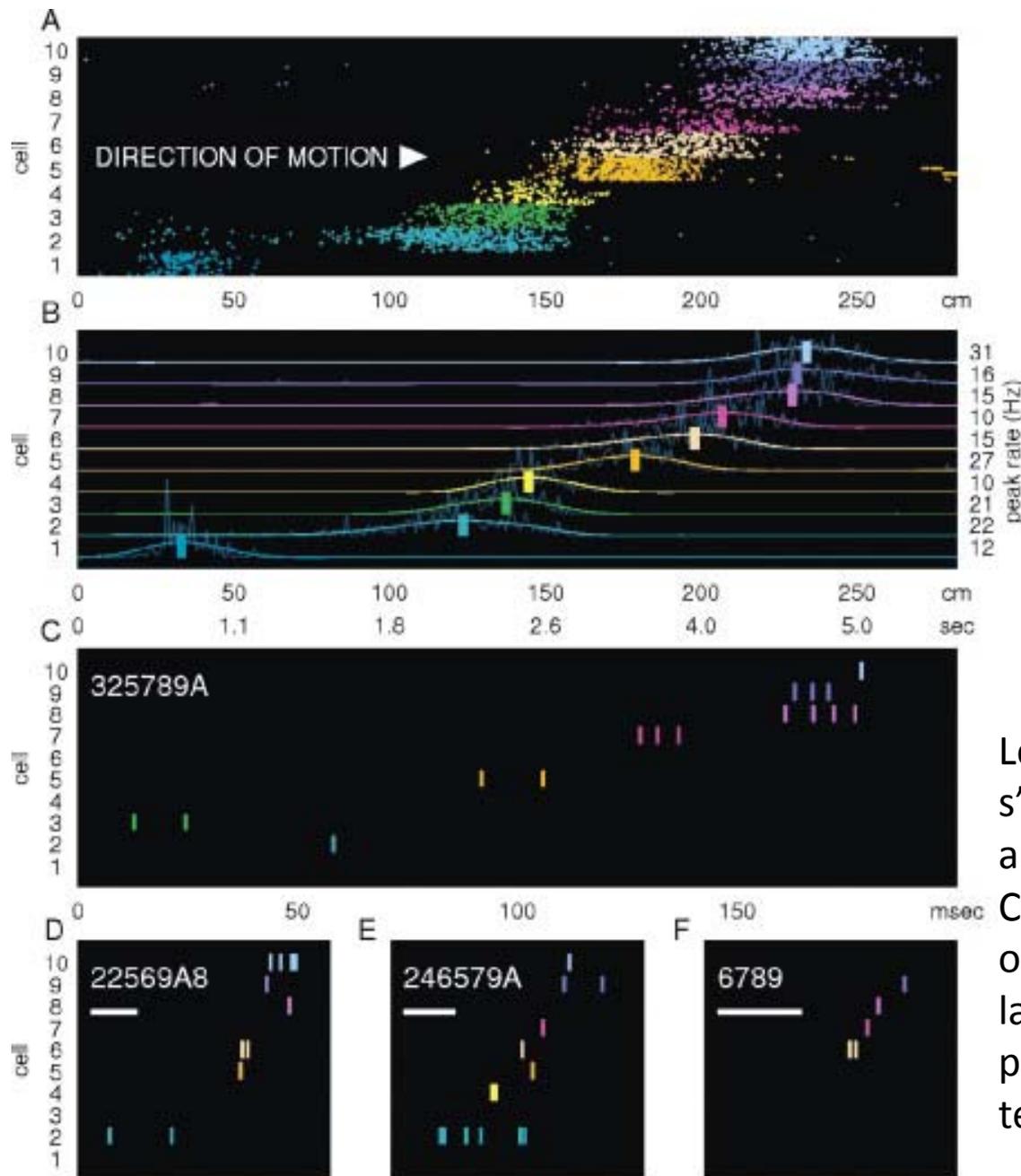
→ Après un apprentissage moteur, l'IRM montre des augmentations d'activité dans le cortex moteur, l'hippocampe et le cervelet après une nuit de sommeil. Inversement, l'activité décroît dans le cortex fronto-polaire et certaines aires pariétales et temporales, ce qui suggère un surcroît d'automatisation.

- Ribeiro, S., Goyal, V., Mello, C. V., & Pavlides, C. (1999). Brain Gene Expression During REM Sleep Depends on Prior Waking Experience. *Learning & Memory*, 6(5), 500–508.

→ Un gène associé à la plasticité cérébrale, zif-268, voit son expression augmenter dans l'hippocampe et le cortex au cours du sommeil paradoxal chez les rats préalablement exposés à un environnement enrichi.



# Réactivation (*replay*) dans l'hippocampe au cours du sommeil



Wilson, M. A., & McNaughton, B. L. (1994).

Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, 265(5172), 676–679.

Skaggs, W. E., & McNaughton, B. L. (1996). Replay of neuronal firing sequences in rat hippocampus during sleep following spatial experience. *Science*, 271(5257), 1870–1873.

Louie, K., & Wilson, M. A. (2001). Temporally structured replay of awake hippocampal ensemble activity during rapid eye movement sleep. *Neuron*, 29(1), 145–56.

Lee, A. K., & Wilson, M. A. (2002). Memory of sequential experience in the hippocampus during slow wave sleep. *Neuron*, 36(6), 1183–1194.

Foster, D. J., & Wilson, M. A. (2006). Reverse replay of behavioural sequences in hippocampal place cells during the awake state. *Nature*, 440(7084), 680–3.

Ji, D., & Wilson, M. A. (2007). Coordinated memory replay in the visual cortex and hippocampus during sleep. *Nat Neurosci*, 10(1), 100–7.

Les cellules de lieu de l'hippocampe s'activent dans un ordre reproductible au cours du sommeil à ondes lentes.

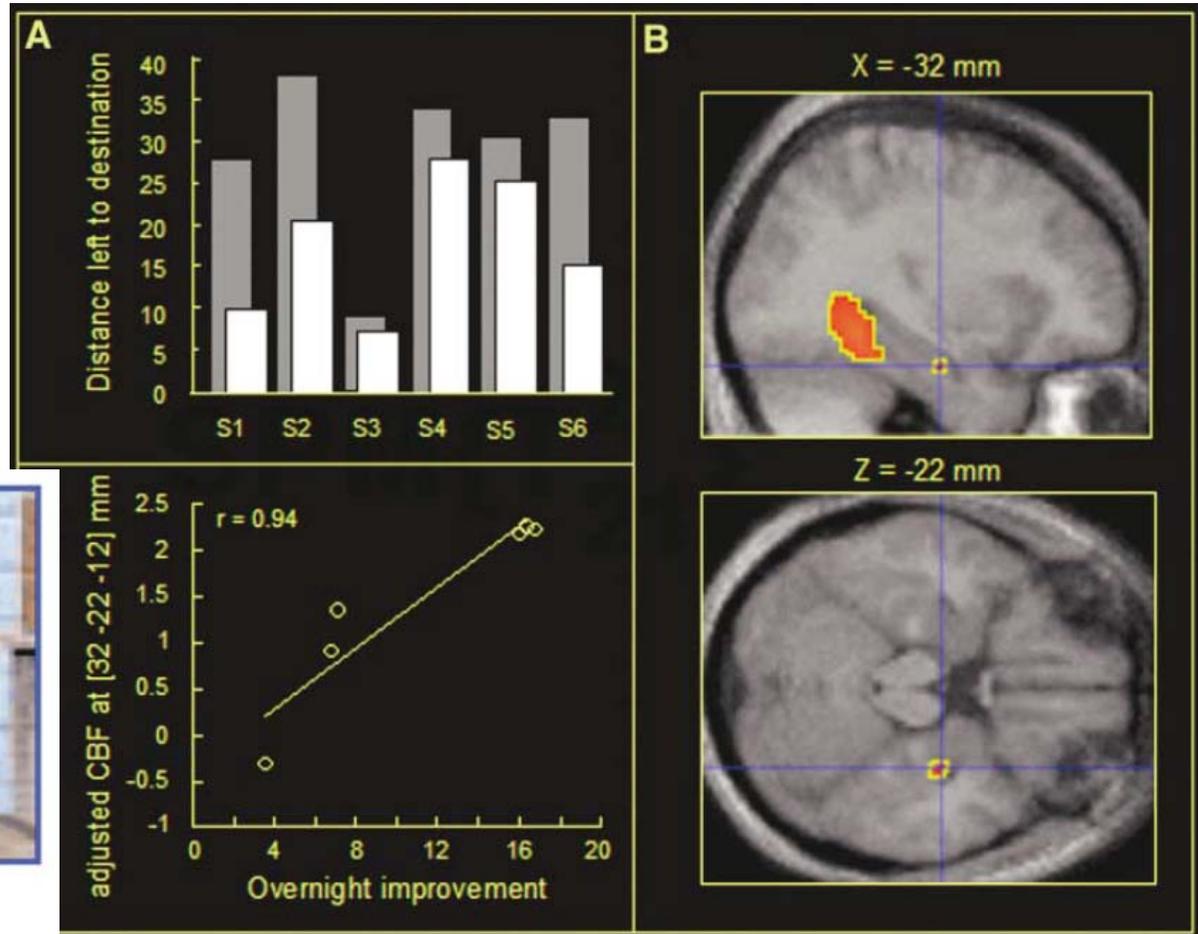
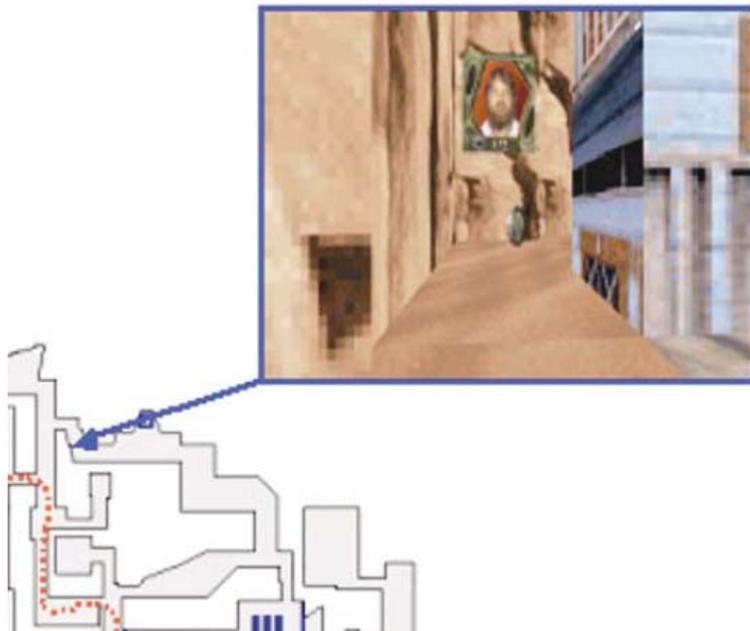
Cette activation reproduit l'activation observée au cours de l'exploration d'un labyrinthe – parfois à vitesse normale, parfois à l'envers, parfois à une échelle temporelle comprimée d'un facteur 20,

# Réactivation cérébrale dans l'espèce humaine

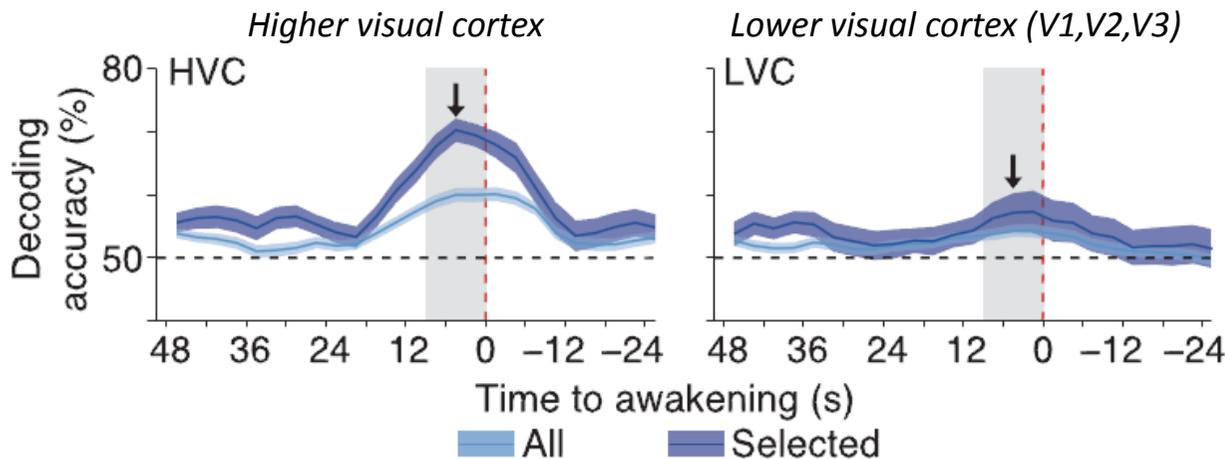
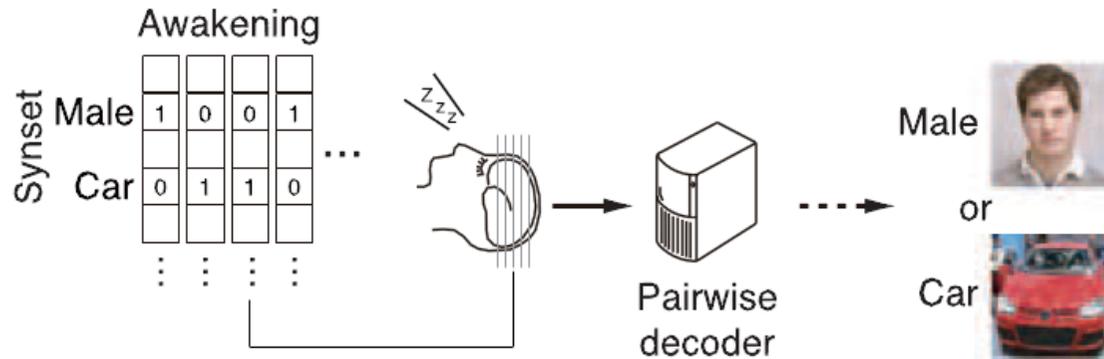
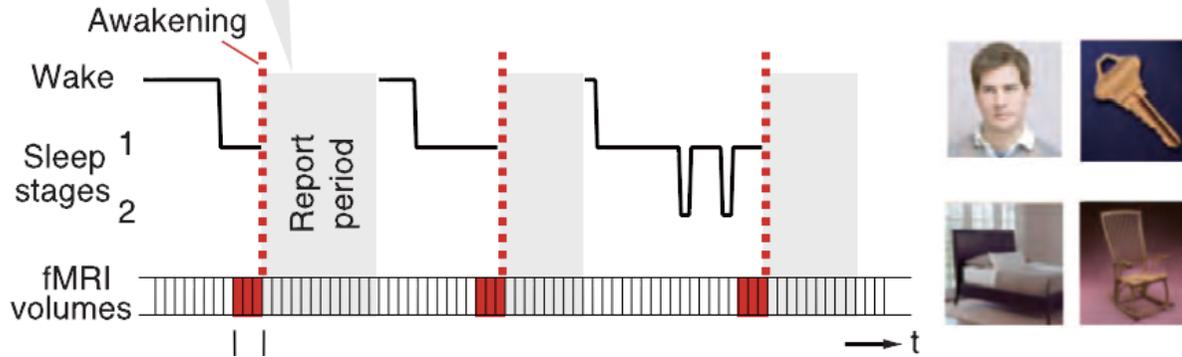
Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Collette, F., Perrin, F., Reggers, J., ... Maquet, P. (2004). Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron*, 44(3), 535–45.

L'apprentissage d'un jeu vidéo s'améliore après une nuit.

L'accroissement des performances est corrélé avec l'activation de l'hippocampe droit au cours du sommeil lent.



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.

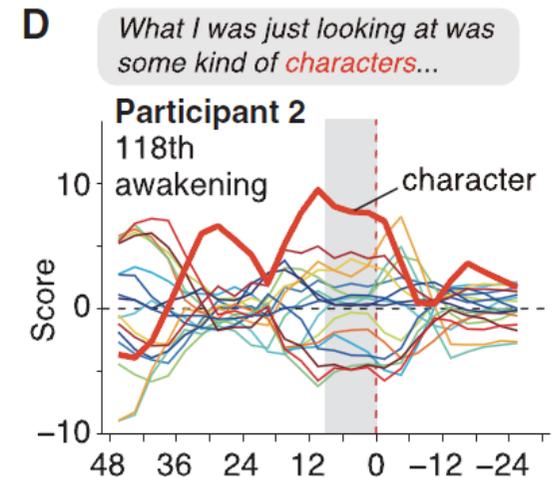


## L'activation corticale au cours du sommeil prédit le contenu visuel du rêve

Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y., & Kamitani, Y. (2013). Neural decoding of visual imagery during sleep. *Science*, 340(6132), 639–642.

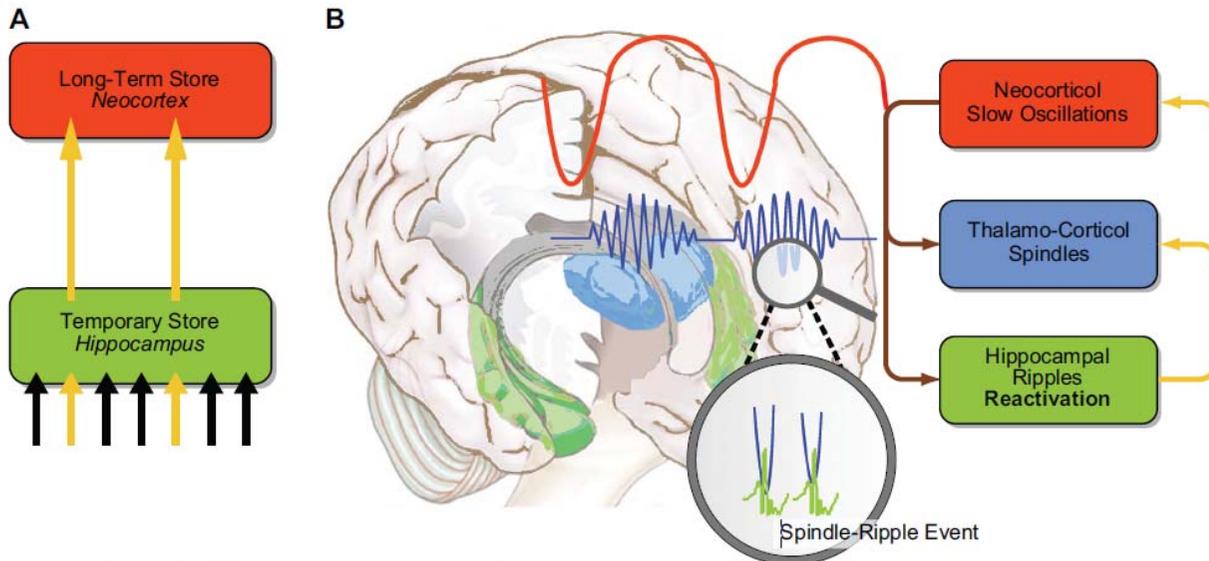
3 bons dormeurs acceptent de s'endormir dans l'IRM et d'être réveillés plus de 200 fois (dans le stade 1 ou 2).

Le contenu visuel qu'ils rapportent peut être partiellement prédit par l'activité corticale dans les secondes qui précèdent l'éveil.

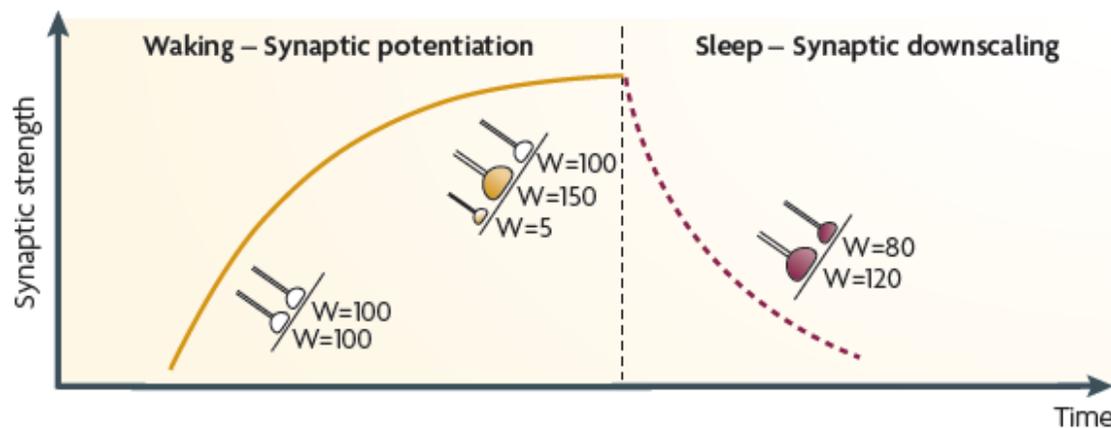


# Les modèles de la consolidation mnésique au cours du sommeil

Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews. Neuroscience*, 11(2), 114–126.



Transfert de l'hippocampe vers le cortex (Born)



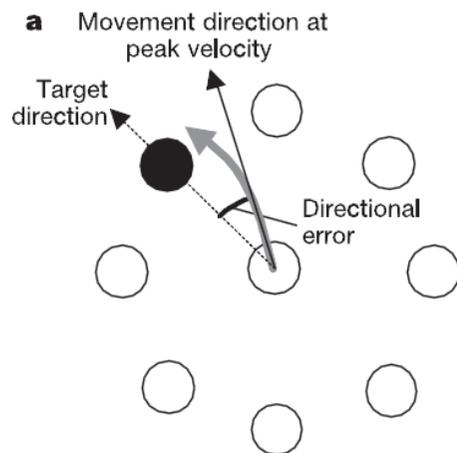
Elimination synaptique et élagage des représentations indésirables (Tononi)

Plusieurs hypothèses complémentaires sur le rôle du sommeil:

- **Transfert des souvenirs épisodiques en direction du cortex** : l'hippocampe (mémoire rapide) entraîne le cortex (mémoire lente, capable d'extraire règles et invariants)
- **Homéostasie synaptique** : élagage des représentations indésirables.
- **Restauration chimique**: Echange de métabolites avec le liquide céphalo-rachidien (Xie, Nedergaard, *Science*, 2013)

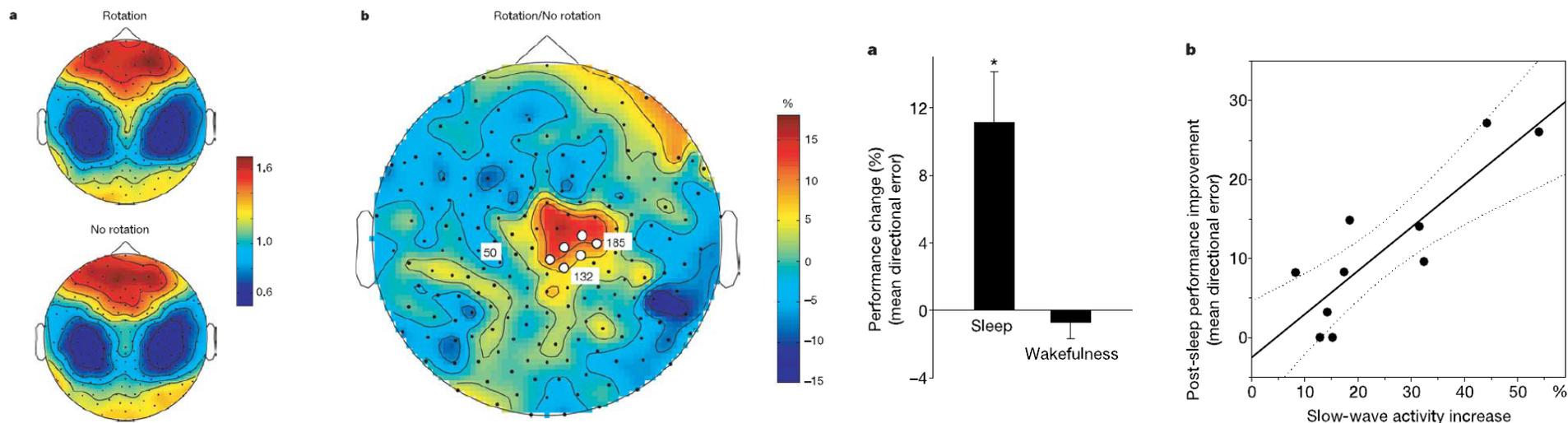
# Les performance mnésiques sont corrélées à la densité des ondes lentes et des fuseaux de sommeil

Huber, R., Ghilardi, M. F., Massimini, M., & Tononi, G. (2004). Local sleep and learning. *Nature*, 430(6995), 78–81.



Tâche de mouvement d'un joystick. Subrepticement, on introduit un angle de rotation entre le mouvement et son résultat sur l'écran.

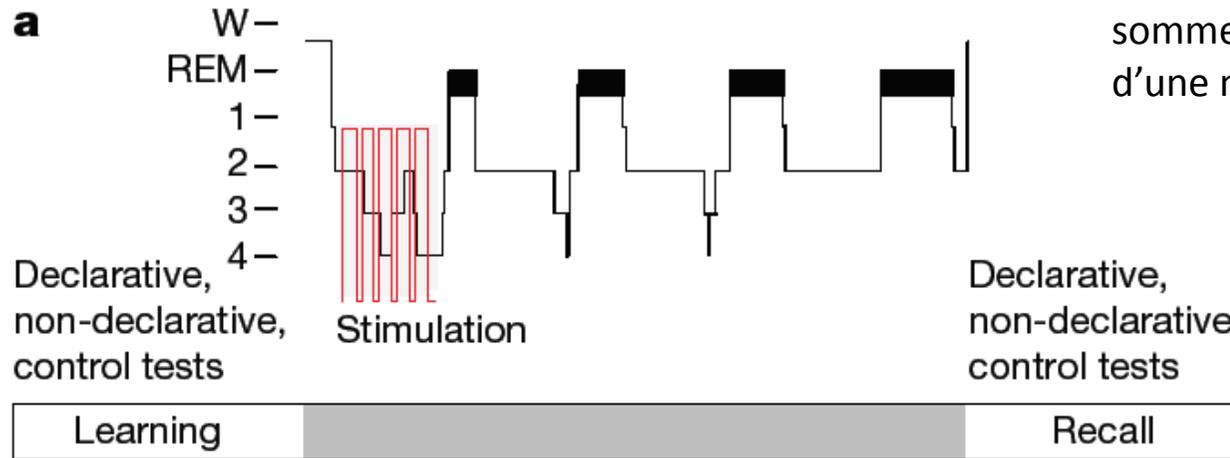
- Le nombre, l'amplitude et la pente des ondes lentes sont augmentées en regard du cortex pariétal impliqué par l'apprentissage de la rotation mentale.
- Cette augmentation est corrélée aux performances comportementales après sommeil



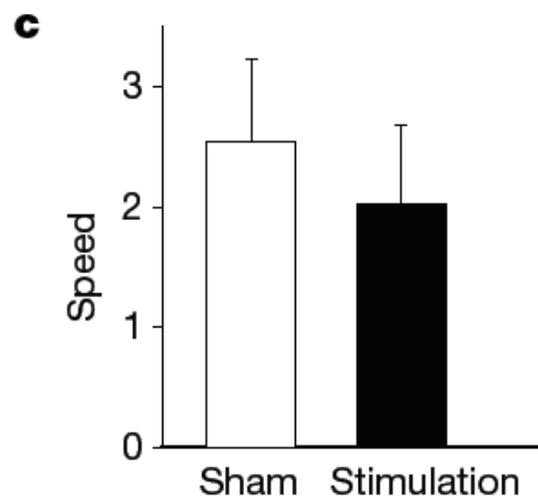
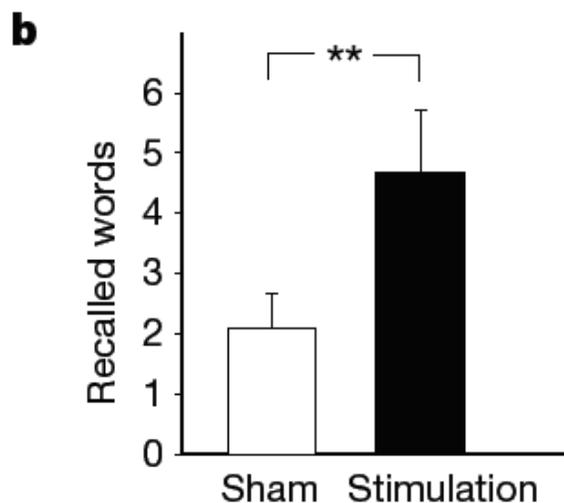
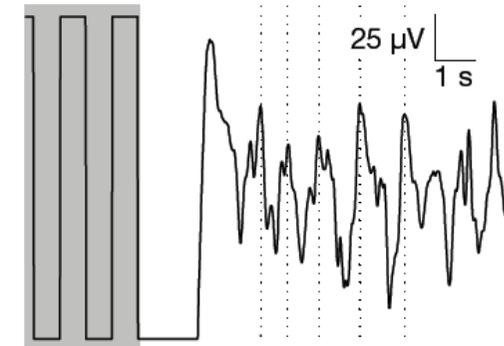
# Le lien entre sommeil et apprentissage est causal

Marshall, L., Helgadottir, H., Molle, M., & Born, J. (2006). Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature*, 444(7119), 610–3.

Stimulation magnétique transcrânienne dans la bande de fréquence des ondes lentes du sommeil (0.7-0.8 Hz)



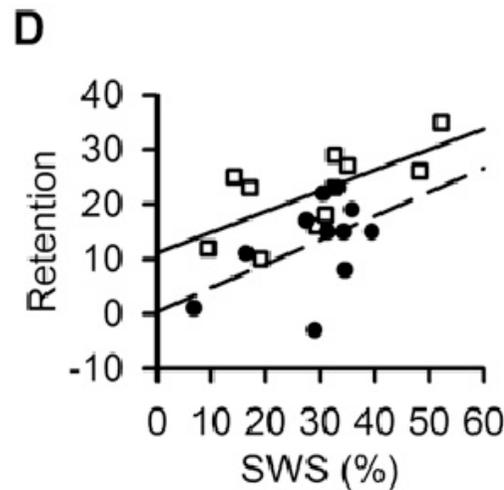
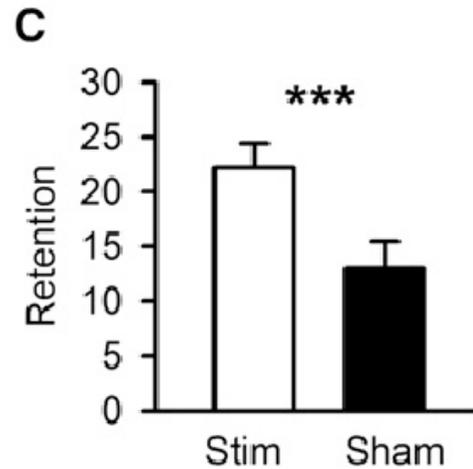
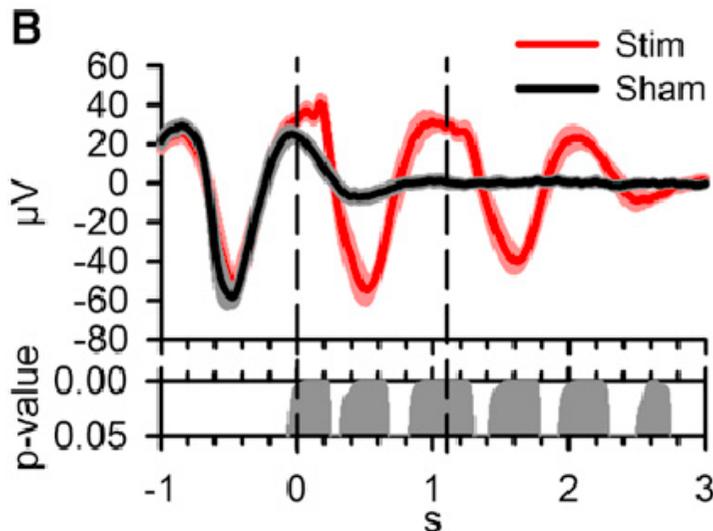
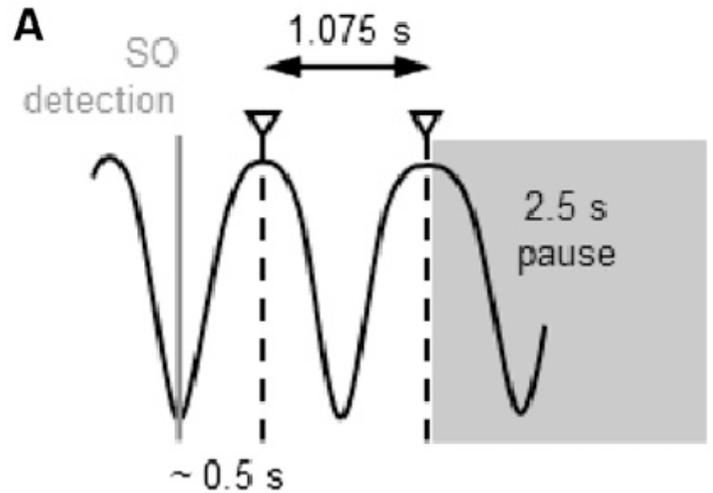
Entraînement temporaire des ondes de sommeil (mesurable durant des périodes d'une minute sans stimulation)



La mémoire est augmentée dans une tâche d'apprentissage de paires de mots (mémoire déclarative) mais pas dans une tâche motrice (mémoire procédurale).

# Une stimulation auditive peut augmenter la profondeur du sommeil

Ngo, H.-V. V., Martinetz, T., Born, J., & Mölle, M. (2013). Auditory closed-loop stimulation of the sleep slow oscillation enhances memory. *Neuron*, 78(3), 545–553.



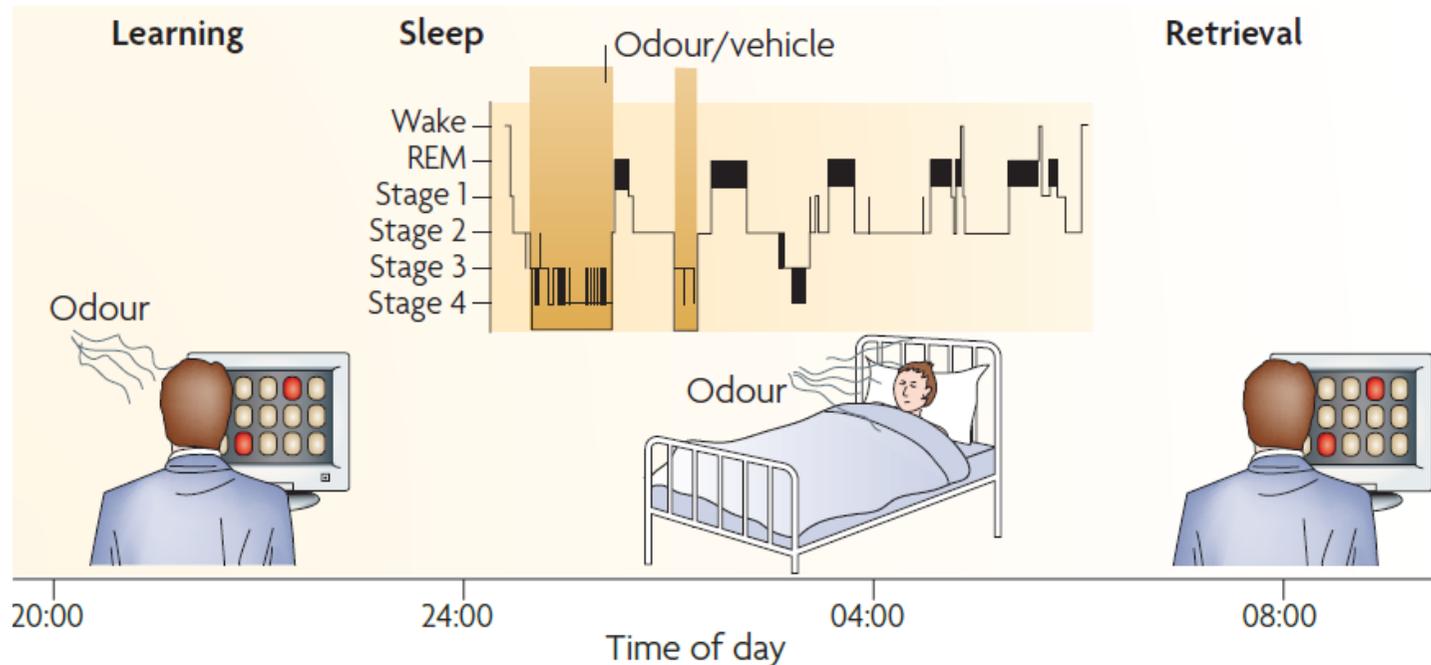
Stimulation auditive (bruit rose) synchronisée avec la phase des ondes lentes mesurée en temps réel.

Résultats:

- Entraînement de l'EEG (phénomène de résonance?)
- Augmentation de la rétention en mémoire dans une tâche de mémoire déclarative (paires de mots)
- Effet proportionnel à l'augmentation de la proportion de sommeil à ondes lentes.

# La consolidation peut également être augmentée par des indices sensoriels

Rasch, B., Büchel, C., Gais, S., & Born, J. (2007). Odor cues during slow-wave sleep prompt declarative memory consolidation. *Science (New York, N.Y.)*, 315(5817), 1426–1429.

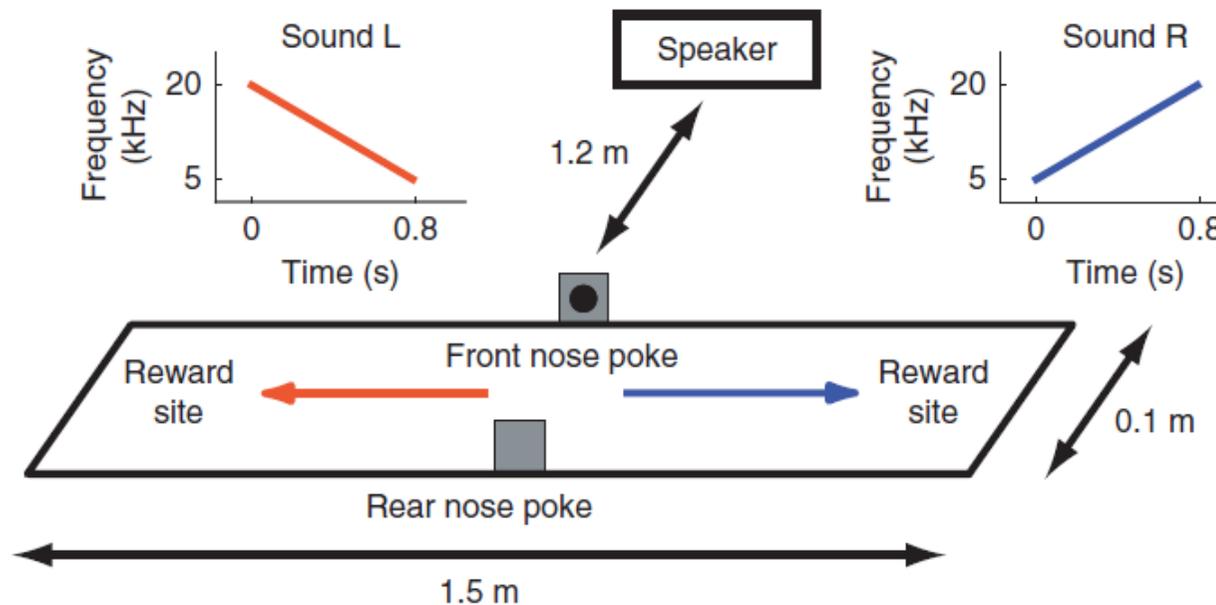


La présentation, au cours du sommeil, d'une odeur associée à la tâche cognitive apprise dans l'état de veille augmente la rétention en mémoire.



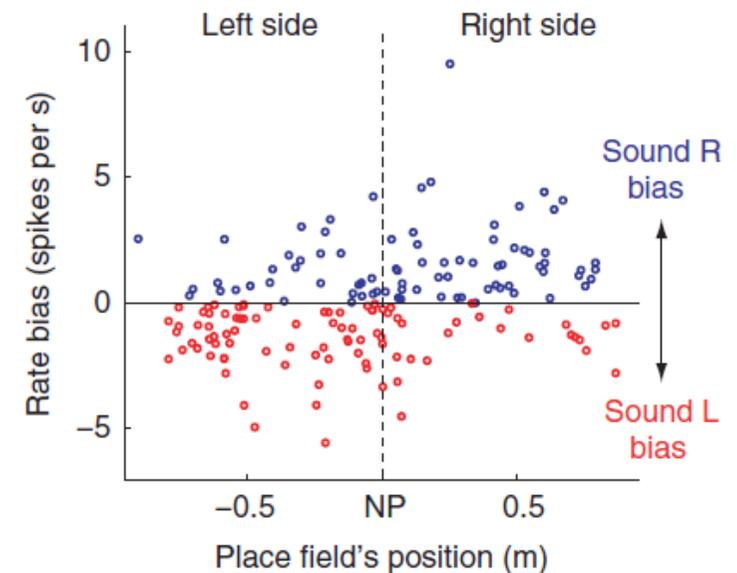
# Un indice auditif présenté durant le sommeil peut réorienter sélectivement la réactivation neuronale.

Bendor, D., & Wilson, M. A. (2012). Biasing the content of hippocampal replay during sleep. *Nature Neuroscience*, 15(10), 1439–1444.



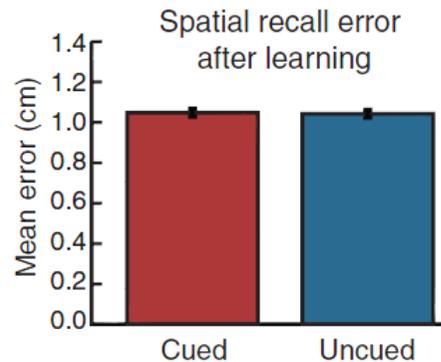
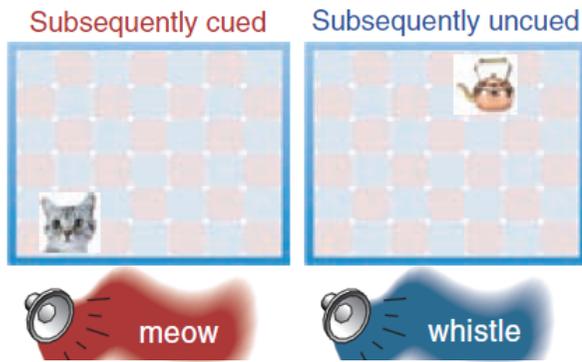
Avant le sommeil, présentation de deux sons différents en deux endroits de l'espace.

Pendant le sommeil, la présentation d'un des sons conduit à la réactivation sélective des cellules de lieu codant pour la position correspondante de l'espace.



# Un indice auditif présenté durant le sommeil peut déterminer quelles informations seront consolidées

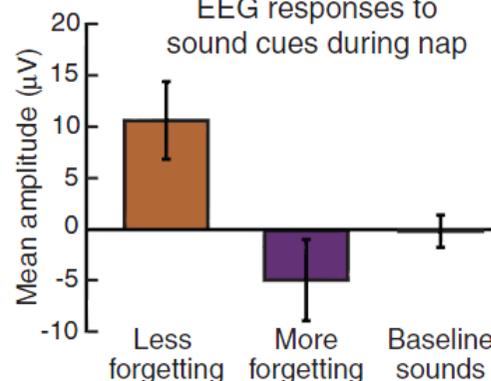
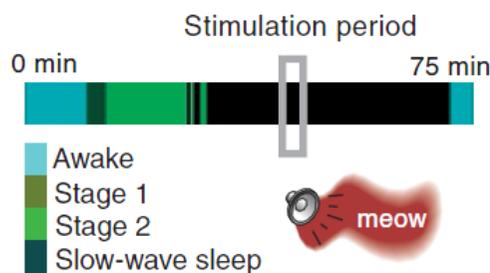
## A Learning – 50 object locations



Rudoy, J. D., Voss, J. L., Westerberg, C. E., & Paller, K. A. (2009). Strengthening individual memories by reactivating them during sleep. *Science*, 326(5956), 1079.

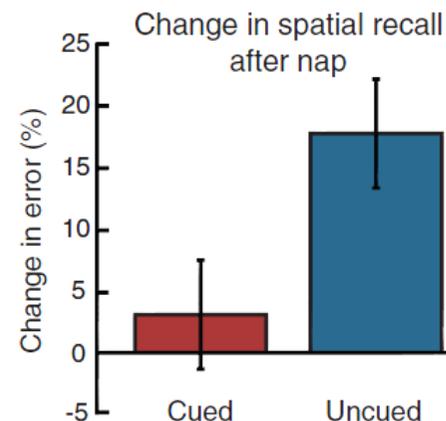
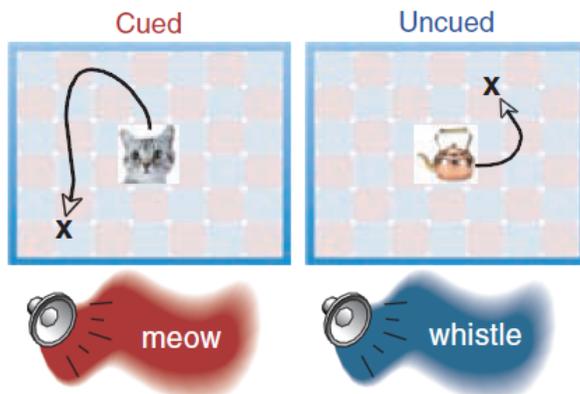
Avant le sommeil, mémorisation de 50 images, chacune associée à une position et à un son particulier.

## B Nap – 25 sound cues



Durant le sommeil, présentation de 25 de ces sons.

## C Test – 50 object locations

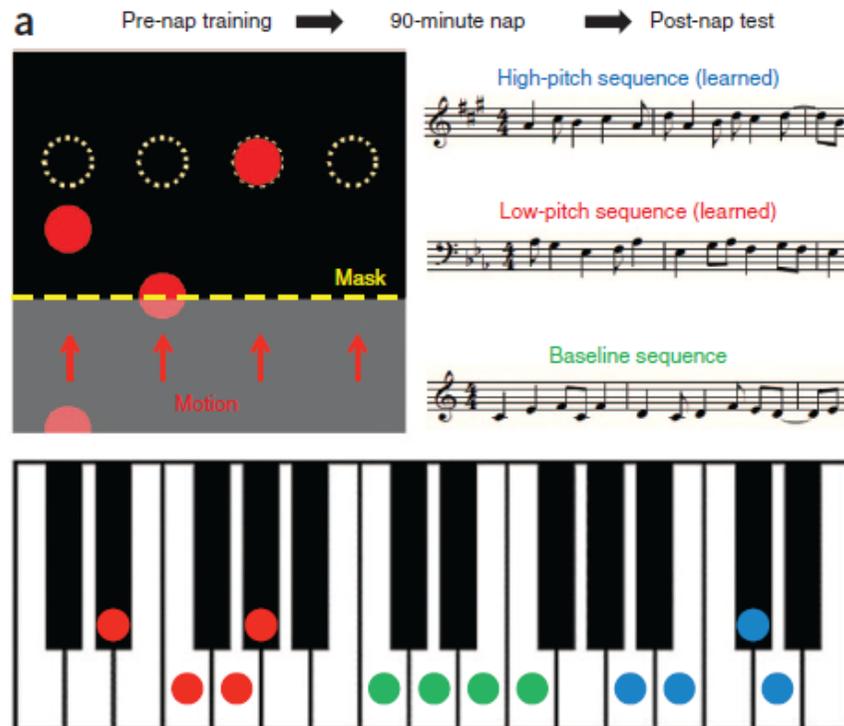


Après le sommeil, la mémoire spatiale est meilleure pour les images dont les sons ont été présentés durant le sommeil.

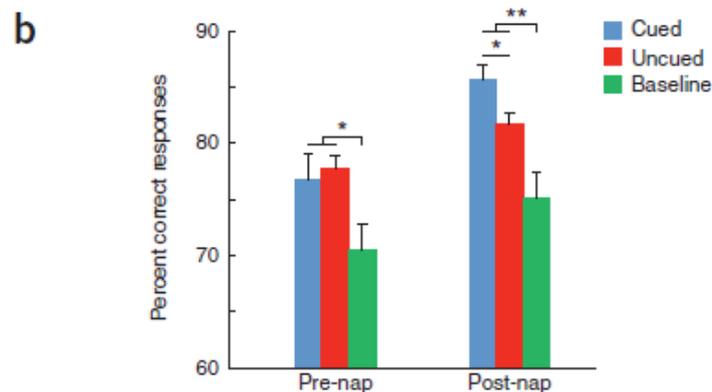
L'amplitude des potentiels évoqués par les sons, durant le sommeil, prédit l'amélioration des performances mnésiques.

# Un indice auditif présenté durant le sommeil peut déterminer quelles informations seront consolidées

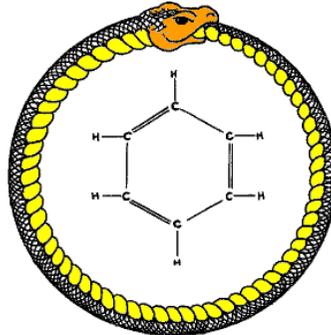
Antony, J. W., Gobel, E. W., O'Hare, J. K., Reber, P. J., & Paller, K. A. (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature Neuroscience*, 15(8), 1114–1116.



Résultats très similaires après une sieste de 90 minutes



# Le sommeil peut-il conduire à la découverte scientifique?



Découverte de l'anneau de benzène par le chimiste allemand Friedrich August Kekule von Stradonitz.

« (...) et une fois encore les atomes tourbillonnaient devant moi (...). Dans mon esprit, qui était rempli d'innombrables images semblables, je voyais de grandes formes étranges et de longues chaînes. Les formes se tordaient comme des serpents. Soudain, quelque chose se passa. Un serpent se mordit la queue et engendra une forme semblable à un anneau qui tournait devant mes yeux. Je me sentis comme frappé par une illumination et je me réveillai »  
... « Apprenons à **rêver**, mesdames et messieurs, et seulement alors, nous pourrons apprendre la vérité. »

Mythe ou réalité?

Peretz-Lavie évoque la possibilité que Kekule ait, en réalité, « emprunté » l'idée à un chercheur français...

PERETZ LAVIE

LE MONDE  
DU SOMMEIL

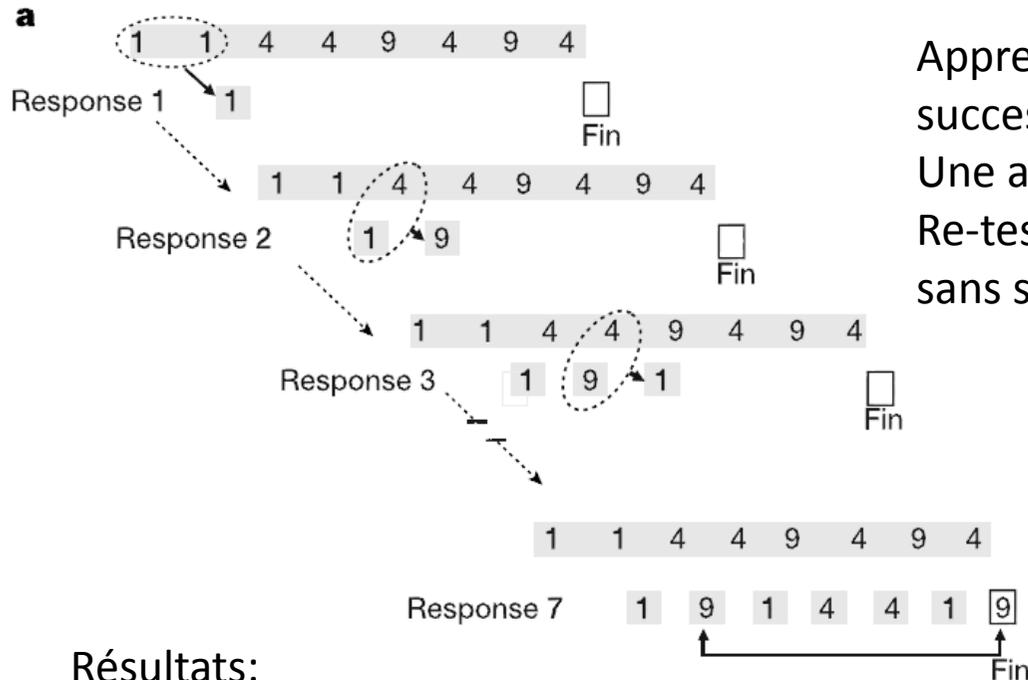


Préface de  
MICHEL JOUVET



# Le sommeil ne se contente pas de consolider, mais transforme également les apprentissages

Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427(6972), 352–5.



Apprentissage des règles de transformation successive d'une chaîne de 8 chiffres [1,4,9]  
 Une astuce cachée permet de répondre plus vite.  
 Re-test après une période de 8 heures avec ou sans sommeil.

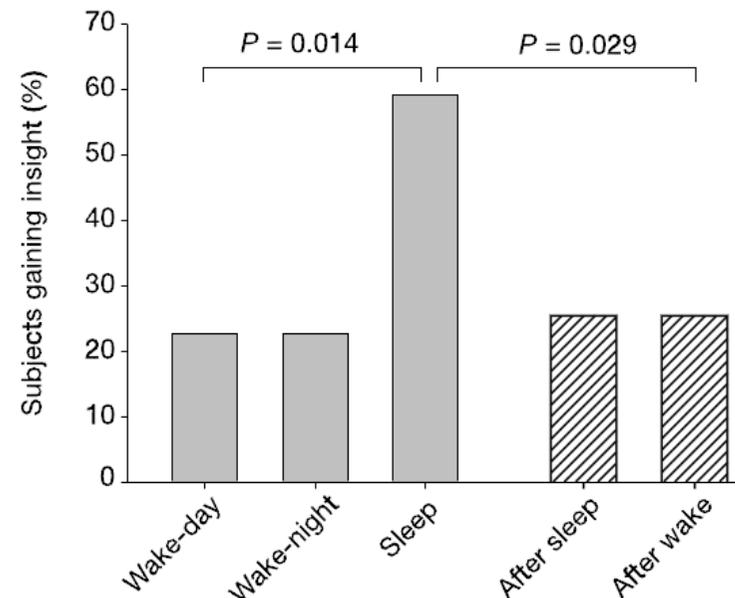
3 blocks	<b>SLEEP 23:00–7:00 h</b>	10 blocks
3 blocks	<b>WAKE 23:00–7:00 h</b>	10 blocks
3 blocks	<b>WAKE 11:00–19:00 h</b>	10 blocks

## Résultats:

Augmentation très importante du nombre de sujets qui découvrent l'astuce.

Deux groupes contrôle ne montrent pas de différence selon l'heure de la journée.

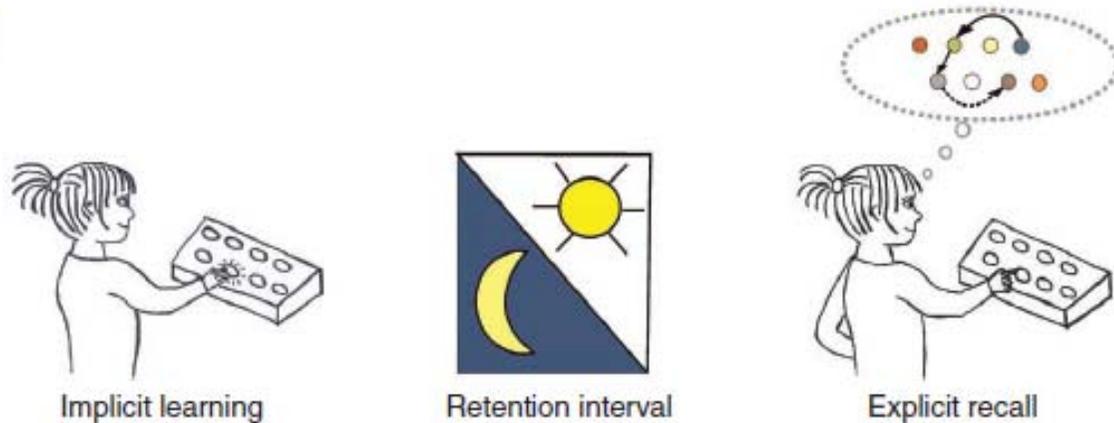
Certains indices dans les temps de réaction suggèrent qu'il existe des précurseurs implicites avant le sommeil, qui se transforment en une représentation explicite après le sommeil.



# L'enfant, bien mieux que l'adulte, peut convertir un apprentissage implicite en connaissance explicite après une nuit de sommeil

Wilhelm, I., Rose, M., Imhof, K. I., Rasch, B., Büchel, C., & Born, J. (2013). The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nature Neuroscience*, 16(4), 391–393.

**a**



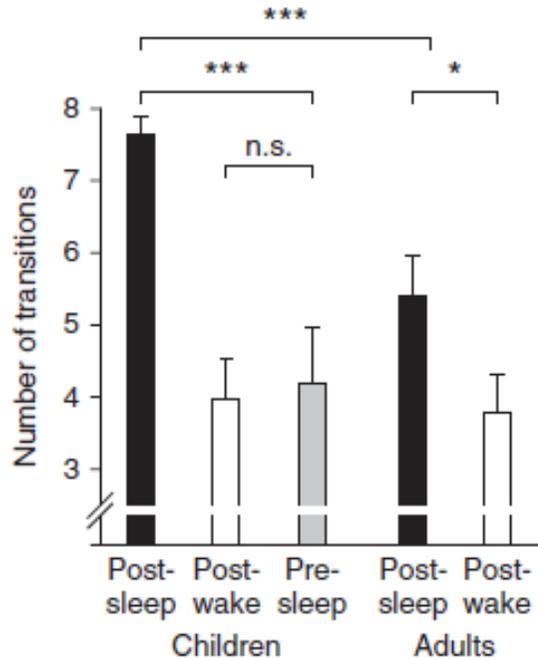
Apprentissage **implicite** d'une séquence motrice chez l'enfant (8-11 ans) et chez l'adulte.

Après une nuit de sommeil, le rappel **explicite** est bien meilleur qu'après une journée de veille.

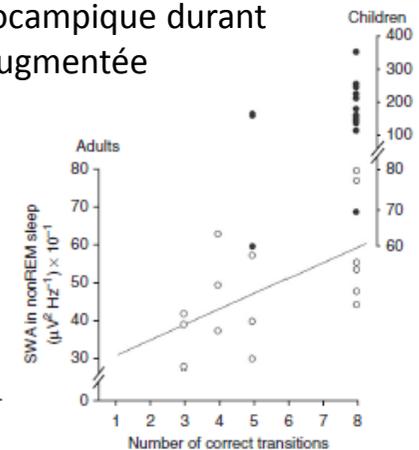
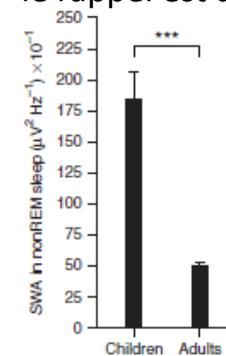
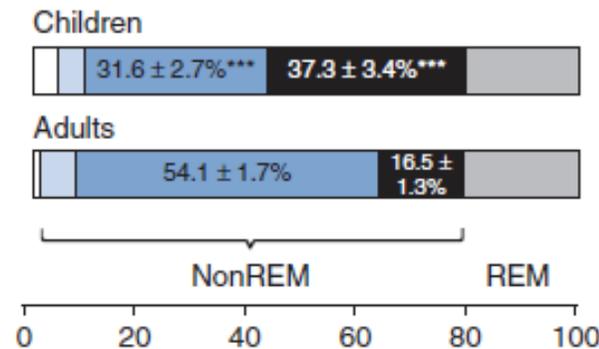
Les enfants ont plus de sommeil profond et la puissance des ondes lentes est supérieure.

L'activité hippocampique durant le rappel est augmentée

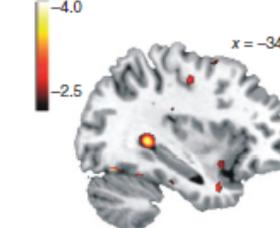
**b**



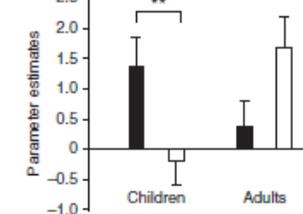
**c**



**c**

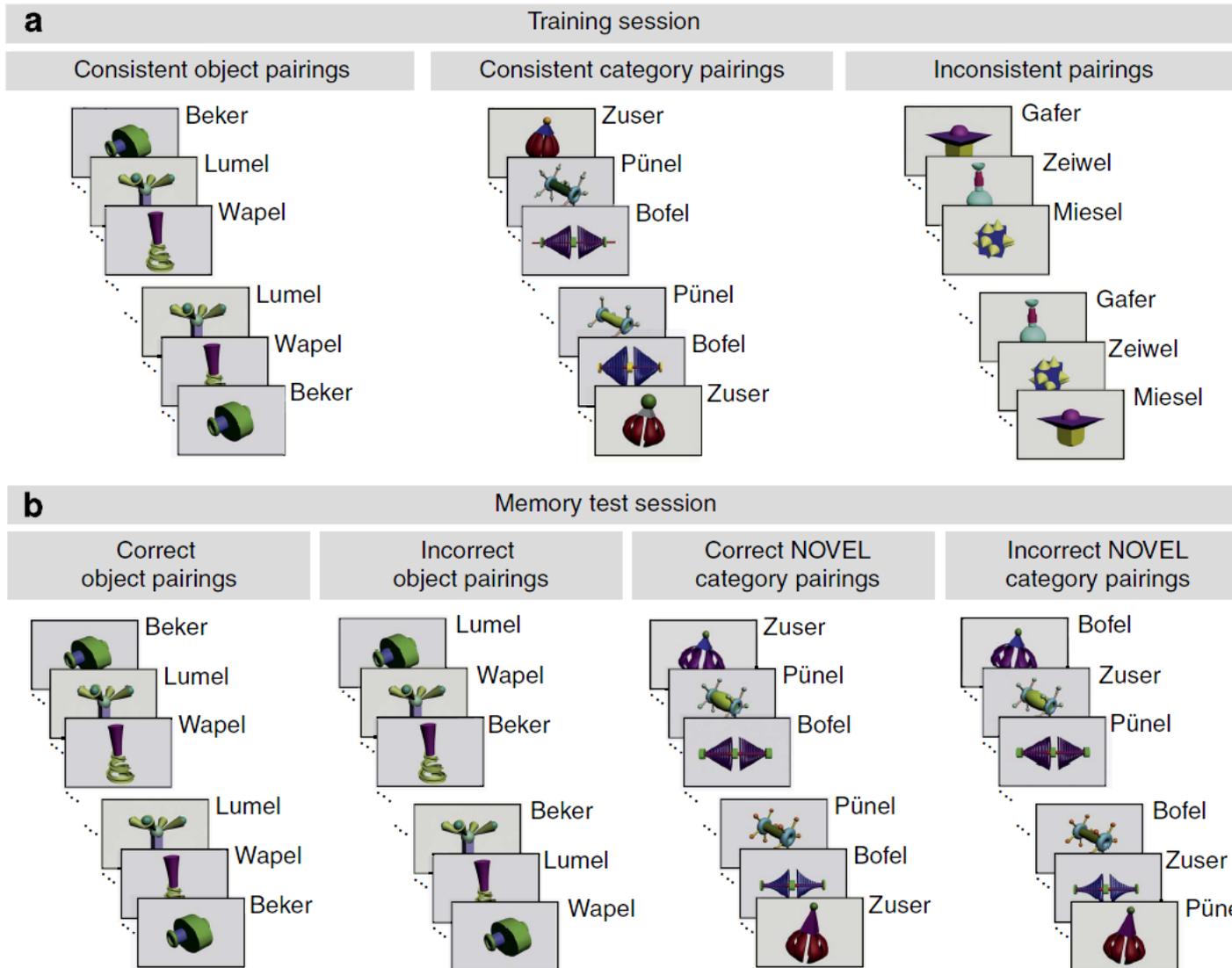


**d**



# L'importance du sommeil dans l'apprentissage lexical chez le bébé

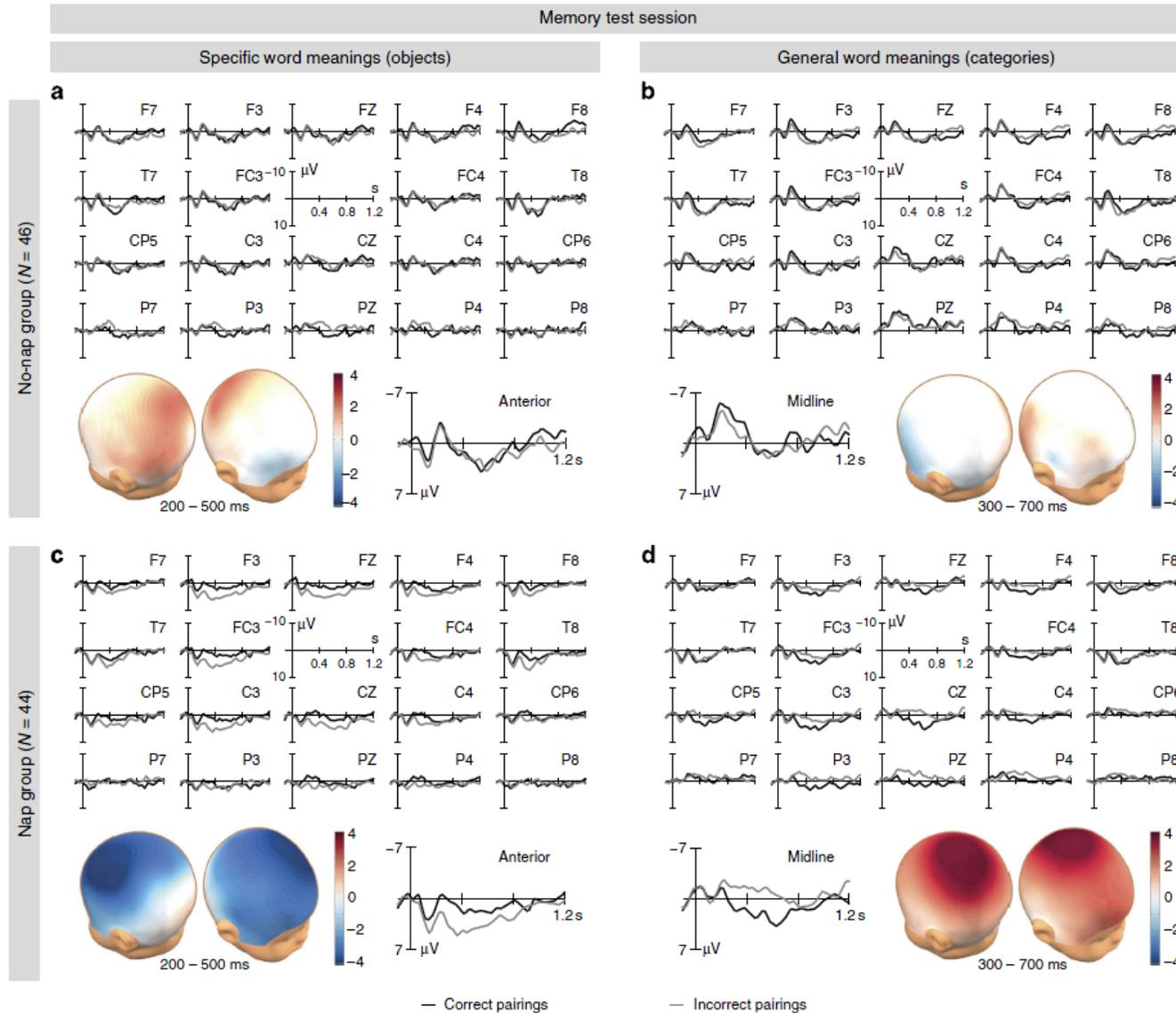
Friedrich, M., Wilhelm, I., Born, J., & Friederici, A. D. (2015). Generalization of word meanings during infant sleep. *Nature Communications*, 6, 6004. doi:10.1038/ncomms7004



Les enfants de 9 à 16 mois sont exposés à 72 paires objet-nom. Certains mots sont toujours appariés au même objet. D'autres sont appariés à une catégorie d'objets. D'autres enfin ne sont pas appariés aux objets de façon stable.

# L'importance du sommeil dans l'apprentissage lexical chez le bébé

Friedrich, M., Wilhelm, I., Born, J., & Friederici, A. D. (2015). Generalization of word meanings during infant sleep. *Nature Communications*, 6, 6004. doi:10.1038/ncomms7004

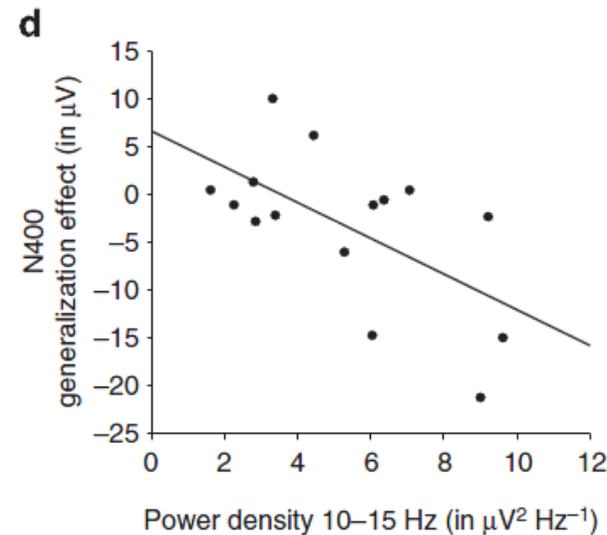
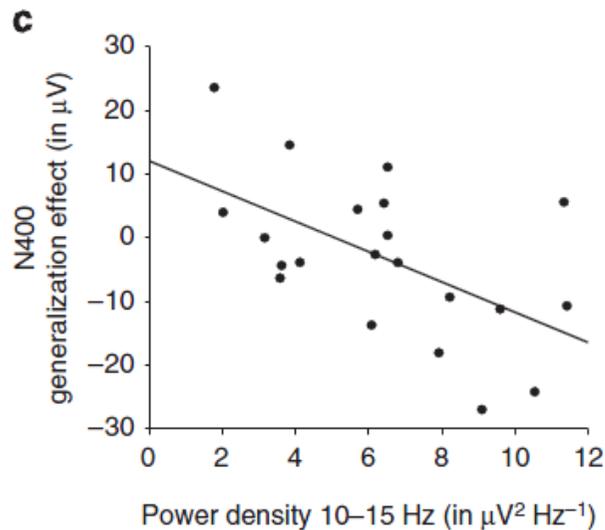
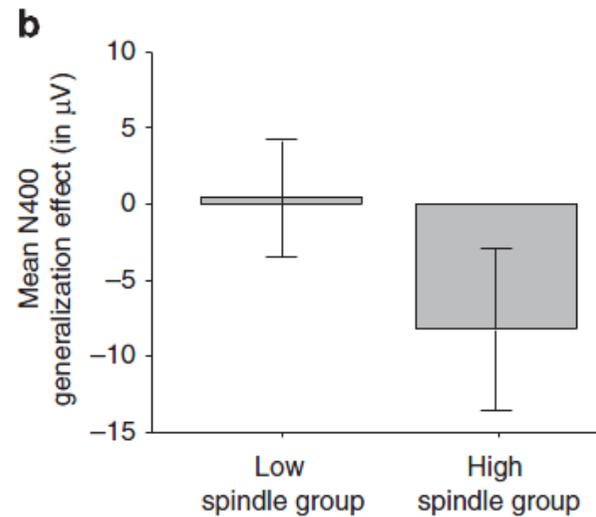
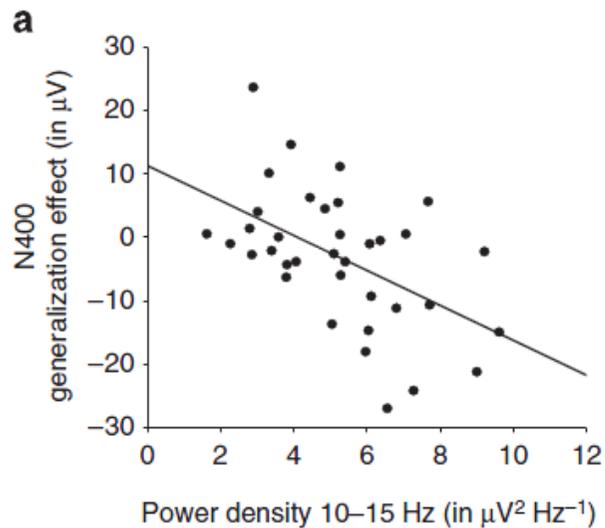


## Résultats:

- Chez les enfants qui n'ont pas dormi, aucune mémoire des mots associés aux objets ou aux catégories.
- Chez les enfants qui ont dormi, connaissance des mots spécifiques (N200-500, « *comprehension negativity* ») et connaissance des noms de catégories d'objets (N400)

# L'importance du sommeil dans l'apprentissage lexical chez le bébé

Friedrich, M., Wilhelm, I., Born, J., & Friederici, A. D. (2015). Generalization of word meanings during infant sleep. *Nature Communications*, 6, 6004. doi:10.1038/ncomms7004



- Corrélation forte entre la densité des fuseaux de sommeil (*sleep spindles*) et la réponse N400.

Critique possible:

- Les enfants sont-ils simplement plus fatigués lorsqu'ils n'ont pas dormi?

Mais résultats similaires dans un autre article chez le bébé de 6 ou 12 mois (testés 24 h plus tard, selon la quantité de sommeil dans les 4 heures suivant l'apprentissage):

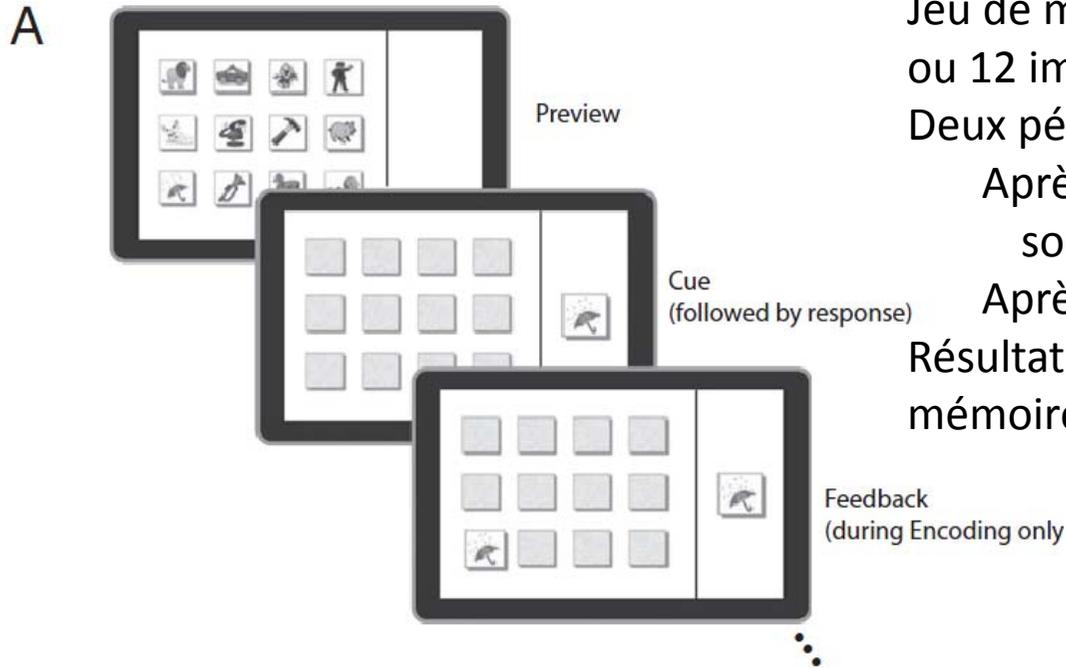
Seehagen, S., Konrad, C., Herbert, J. S., & Schneider, S. (2015).

Timely sleep facilitates declarative memory

consolidation in infants. *PNAS*, 112(5), 1625–1629.

# En maternelle, une sieste peut considérablement augmenter les apprentissages

Kurdziel, L., Duclos, K. & Spencer, R.M.C. Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 110, 17267–17272 (2013).



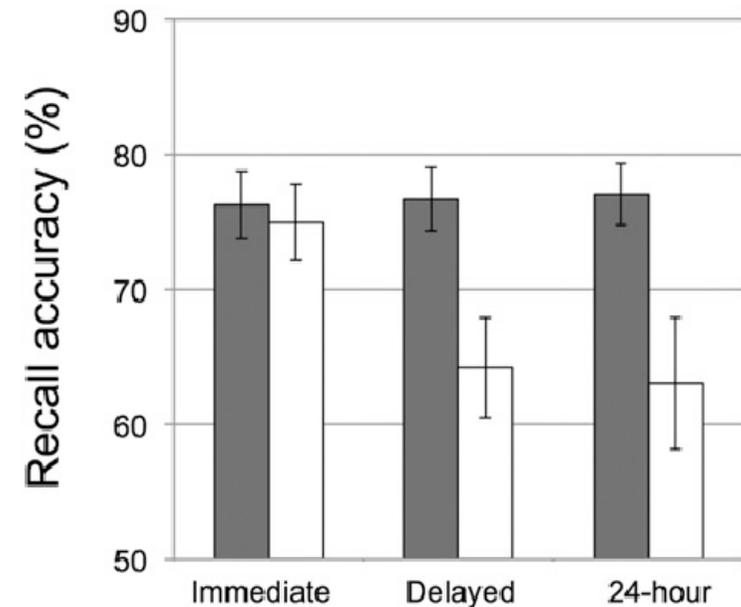
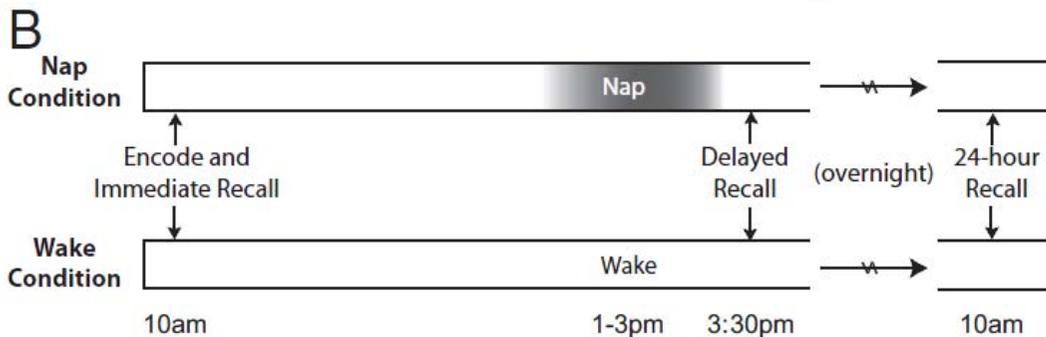
Jeu de mémoire classique: retenir la position de 9 ou 12 images sur l'écran.

Deux périodes de test:

Après 1-3 heures, soit juste après la sieste,  
soit après d'autres activités

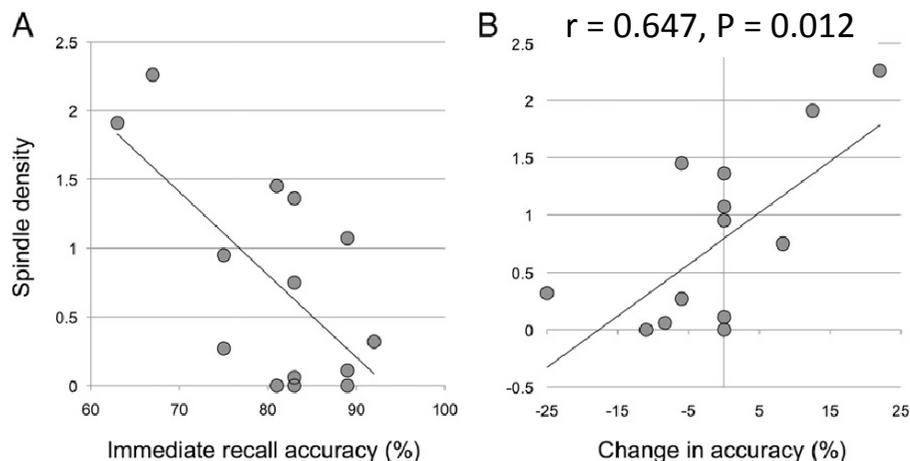
Après 24 heures.

Résultats: amélioration considérable de la mémoire chez les enfants qui ont fait une sieste.



# En maternelle, une sieste peut considérablement augmenter les apprentissages

Kurdziel, L., Duclos, K. & Spencer, R.M.C. Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 110, 17267–17272 (2013).



Le bénéfice n'existe que pour les enfants qui font régulièrement la sieste. Il n'est donc probablement utile de forcer les enfants à dormir, mais de laisser les enfants dormir s'ils en éprouvent le besoin.

La quantité de fuseaux (*spindles*) enregistrés par EEG au cours du stade 2 de sommeil prédit le progrès des enfants.

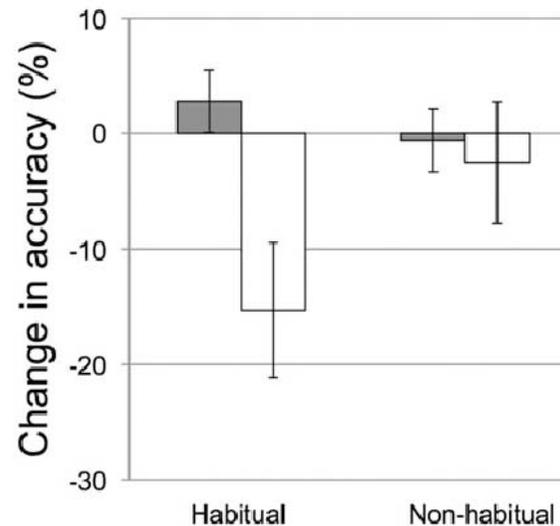


Fig. 3. Change in recall accuracy (delayed recall minus immediate recall) across the nap (gray bars) and wake (white bars) intervals for those who took five to seven naps per week ("Habitual") and those who took zero to two naps per week ("Non-habitual"). Error bars represent  $\pm 1$  SE.

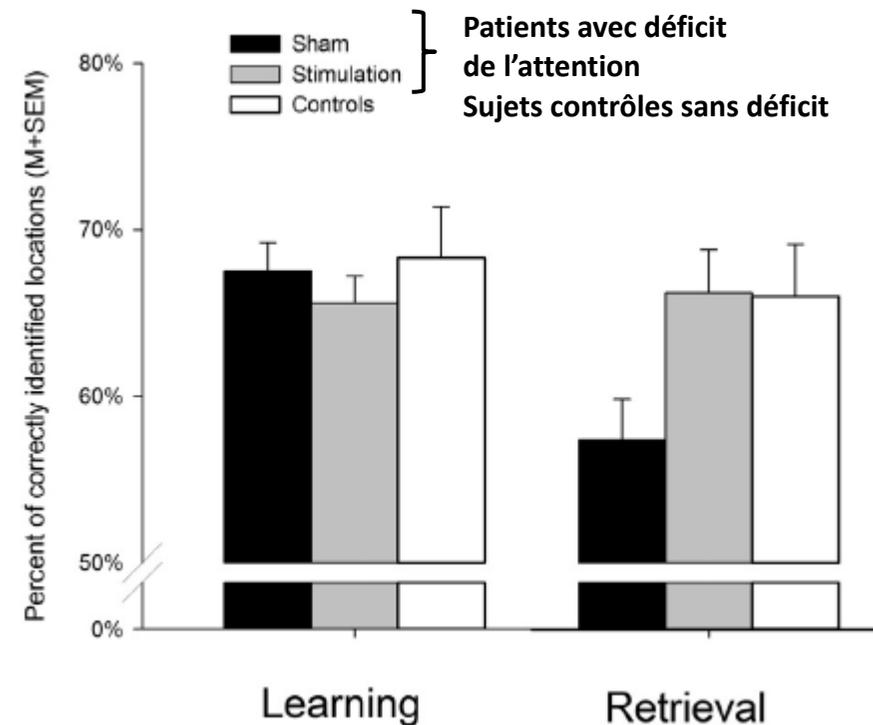
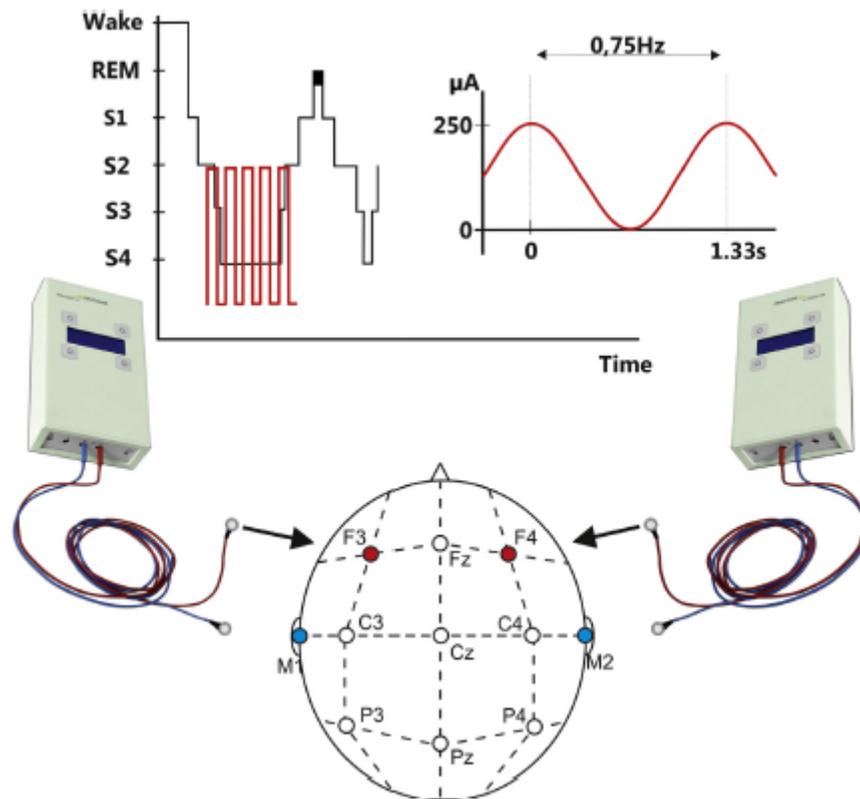
# L'augmentation de la profondeur du sommeil facilite l'apprentissage chez les enfants atteints de troubles de l'attention

Prehn-Kristensen, A., Munz, M., Göder, R., Wilhelm, I., Korr, K., Vahl, W., ... Baving, L. (2014). Transcranial Oscillatory Direct Current Stimulation During Sleep Improves Declarative Memory Consolidation in Children With Attention-deficit/hyperactivity Disorder to a Level Comparable to Healthy Controls. *Brain Stimulation*.

24 enfants de 10 à 14 ans (12 patients, 12 contrôles).  
Test = jeu de « memory » sur ordinateur, avec 15 paires de cartes.  
Stimulation bilatérale synchronisée, à 0.75 Hz, en début de sommeil.  
Seuls les patients sont testés deux fois, dans un ordre aléatoire, à une semaine d'intervalle, avec ou sans stimulation.

Résultats:

- Non-stimulés, les patients retiennent moins de cartes que les enfants contrôles.
- Une fois stimulés, leurs performances se normalisent.



## Conclusion: L'importance du sommeil dans les apprentissages

Le sommeil fait partie intégrante de notre algorithme d'apprentissage

Il intervient dans la **consolidation** des apprentissages: une période de sommeil, même courte, améliore

- la mémoire déclarative
- L'automatisation des activités procédurales
- la découverte de régularités (*insight*)

Durant le sommeil, notre cerveau rejoue (parfois à vitesse accélérée) les décharges neuronales éprouvées pendant la veille.

Conséquences dans le domaine éducatif:

- (1) **Améliorer la durée et la qualité du sommeil** peut être une intervention très efficace, notamment pour les enfants avec troubles de l'attention
- (2) Pour un bénéfice maximal, il semble que le sommeil doive survenir dans les heures qui suivent l'apprentissage.
- (3) La consolidation est particulièrement importante pour les informations que nous avons besoin d'apprendre.
- (4) il faut **distribuer l'apprentissage** : tous les jours!
- (5) Et laisser dormir les adolescents dont les cycles de sommeil sont décalés.

