



# Une petite histoire de l'IRM fonctionnelle : plus de 30 années résumées en moins de 40' !

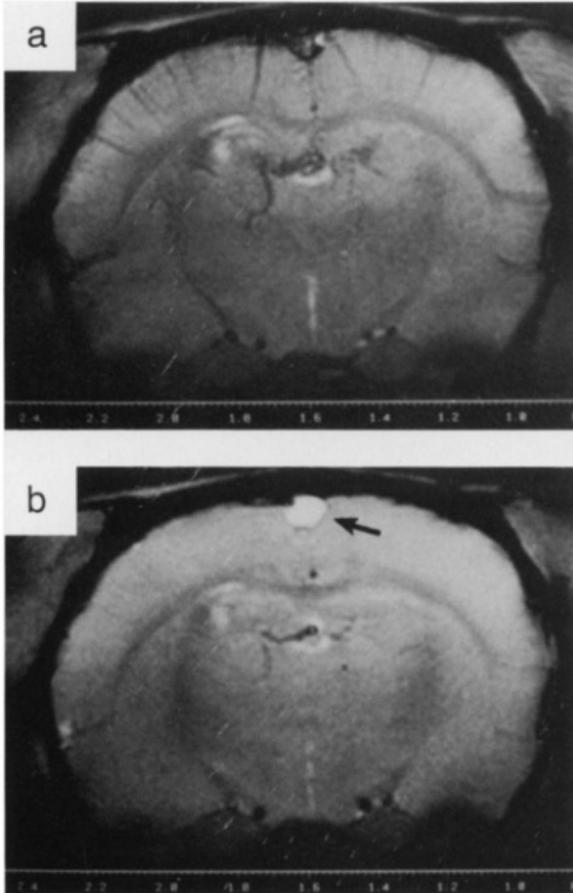
Julien Sein & Jean-Luc Anton

(Centre IRM-INT@CERIMED, Marseille)

<https://irmf.int.univ-amu.fr>



# 1990 : découverte du phénomène (sérendipité) : contraste BOLD

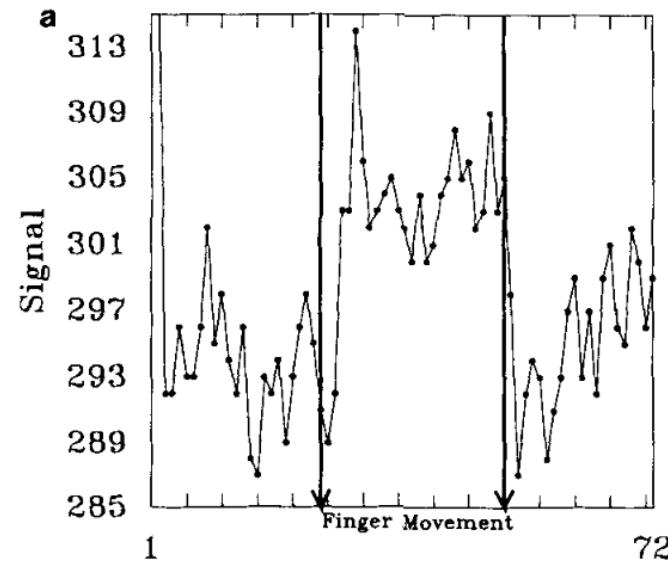
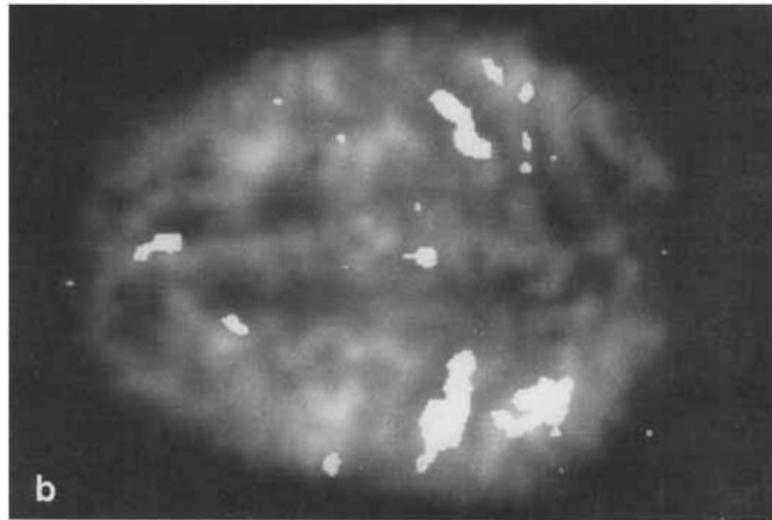


Rat, 7T, Echo de gradient, TE = 12ms  
117 um x 117 um x 550 um

Respiration de CO<sub>2</sub> +++  
→ Flux sanguin +++  
→ Apport en O<sub>2</sub> dans les veines +++  
→ T<sub>2</sub>\* +++

# Premières études IRMf chez l'être humain

- 1.5T GRE-EPI axial, TE=50ms, TR=3s, voxel :  $3.12 \times 3.12 \times 25$  mm
- tâche motrice de la main (tapping)



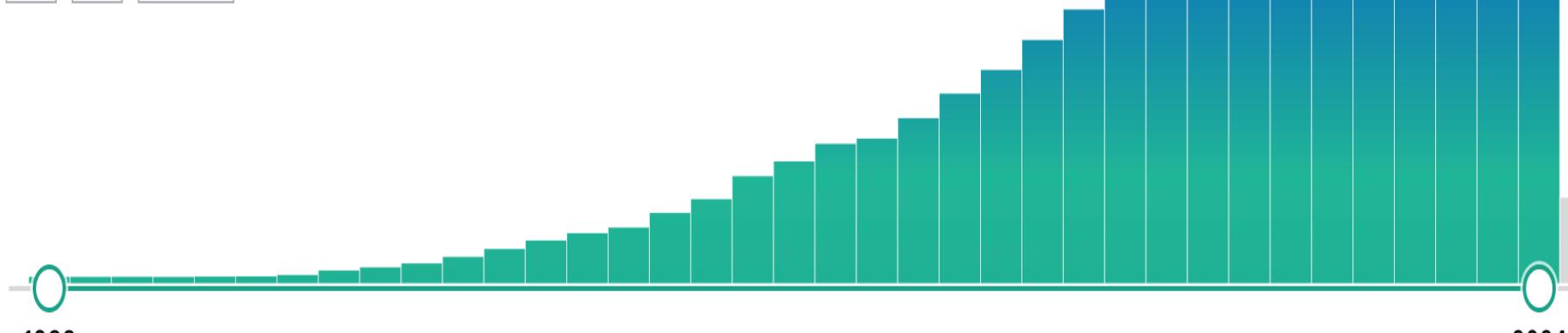
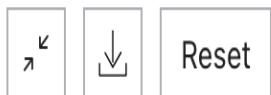
Bandettini & al, 1992

# IRMf : développement rapide et intense

RESULTS BY YEAR

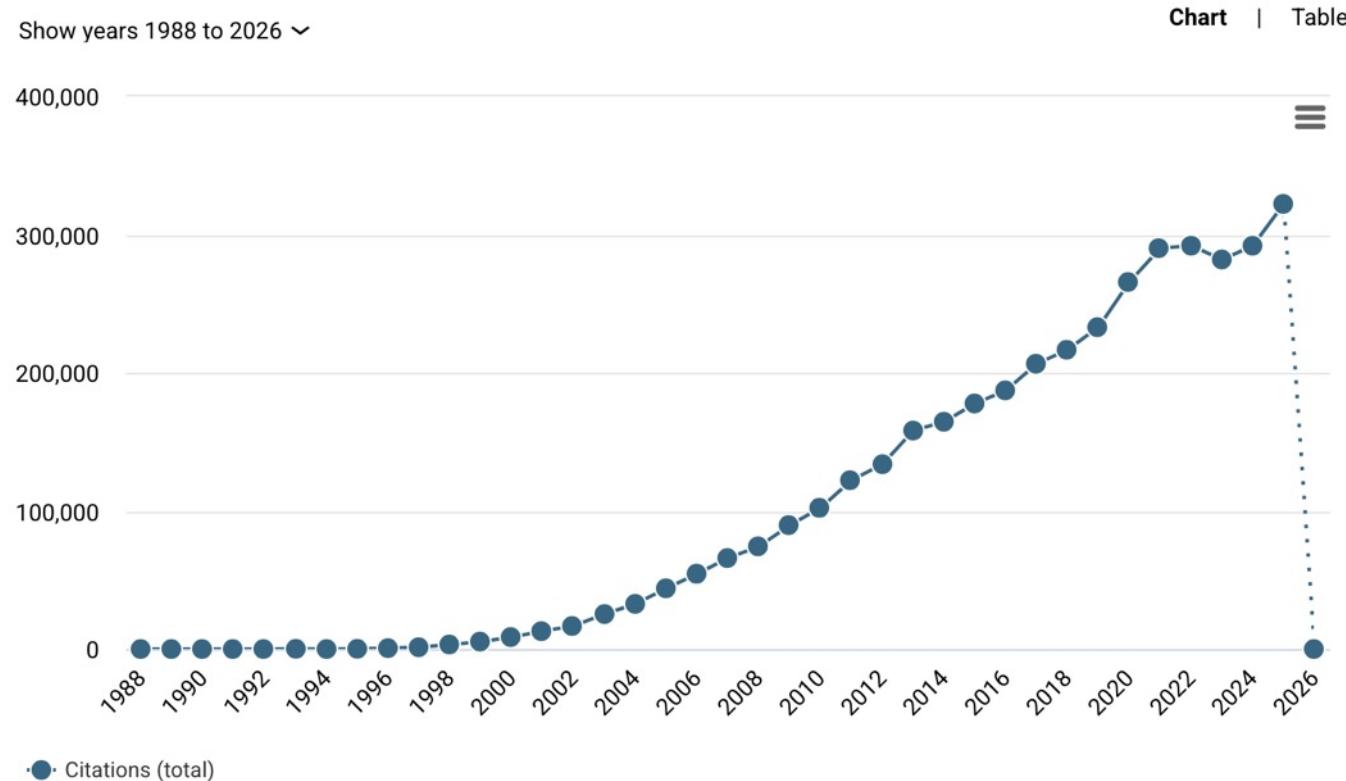
84,750 results

« < Page 1 of 8,475 >



PubMed : "fMRI" OR "functional MRI" OR "functional magnetic resonance imaging »

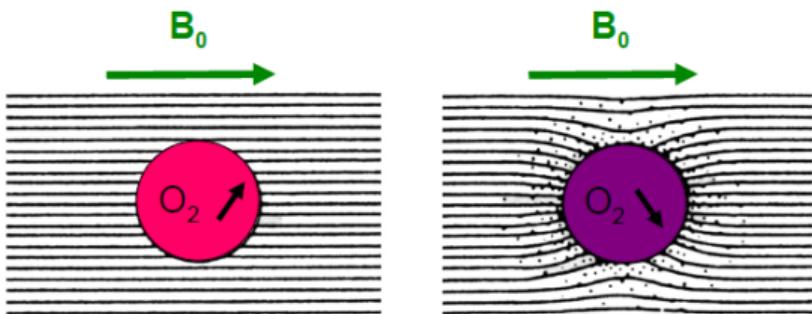
# IRMf : développement rapide et intense



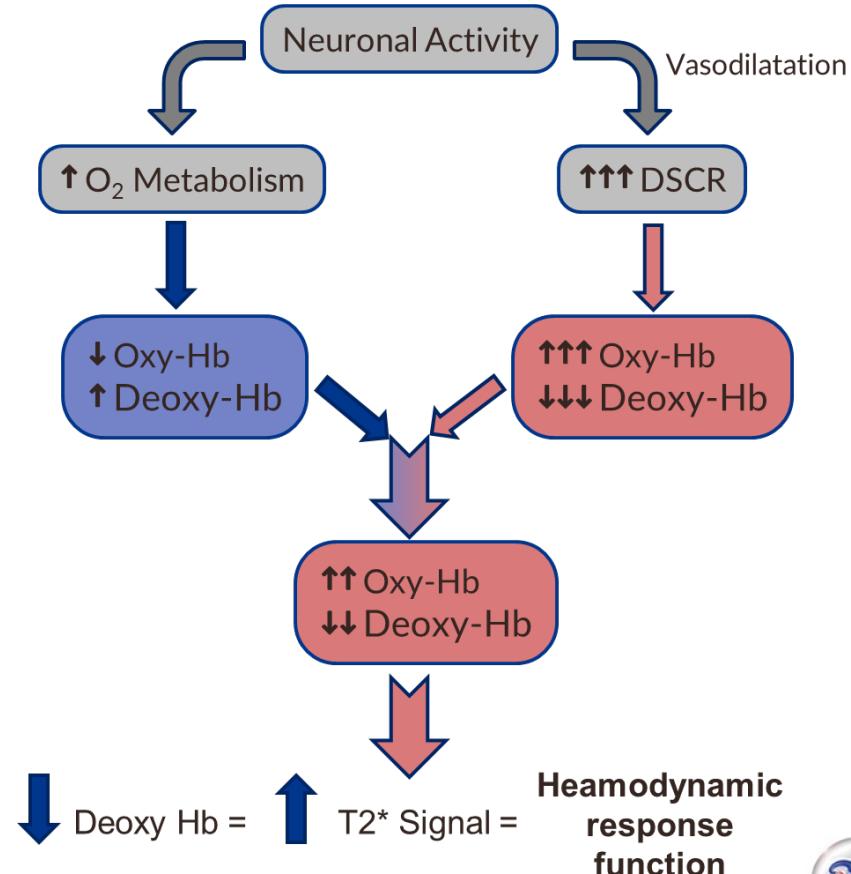
# Principe biophysique du phénomène : dans les veines et capillaires

Deux états différents de l'hémoglobyne  
(Pauling 1936)

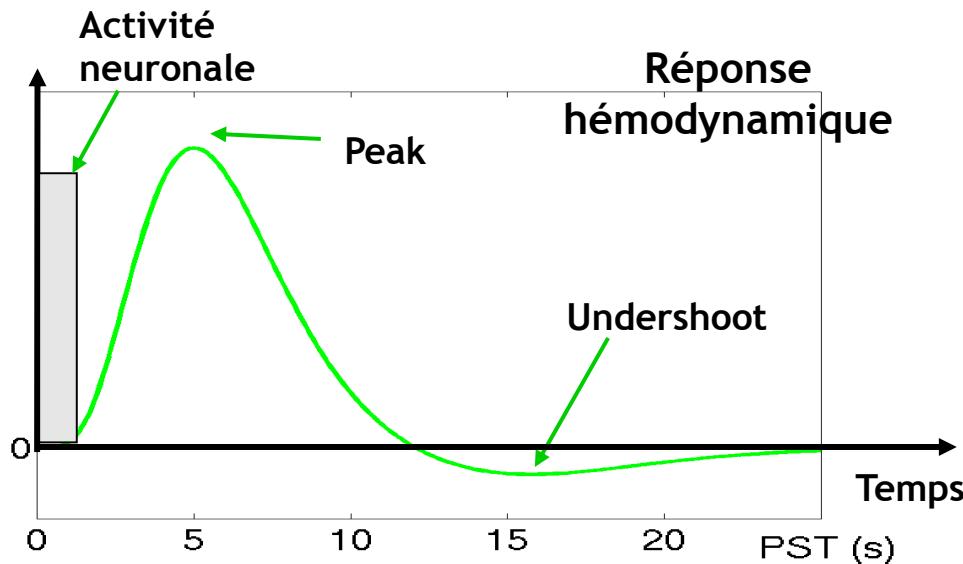
- **Oxyhemoglobin** : diamagnétique
- **Deoxyhemoglobin** : paramagnétique



Fox & Raichle, 1986

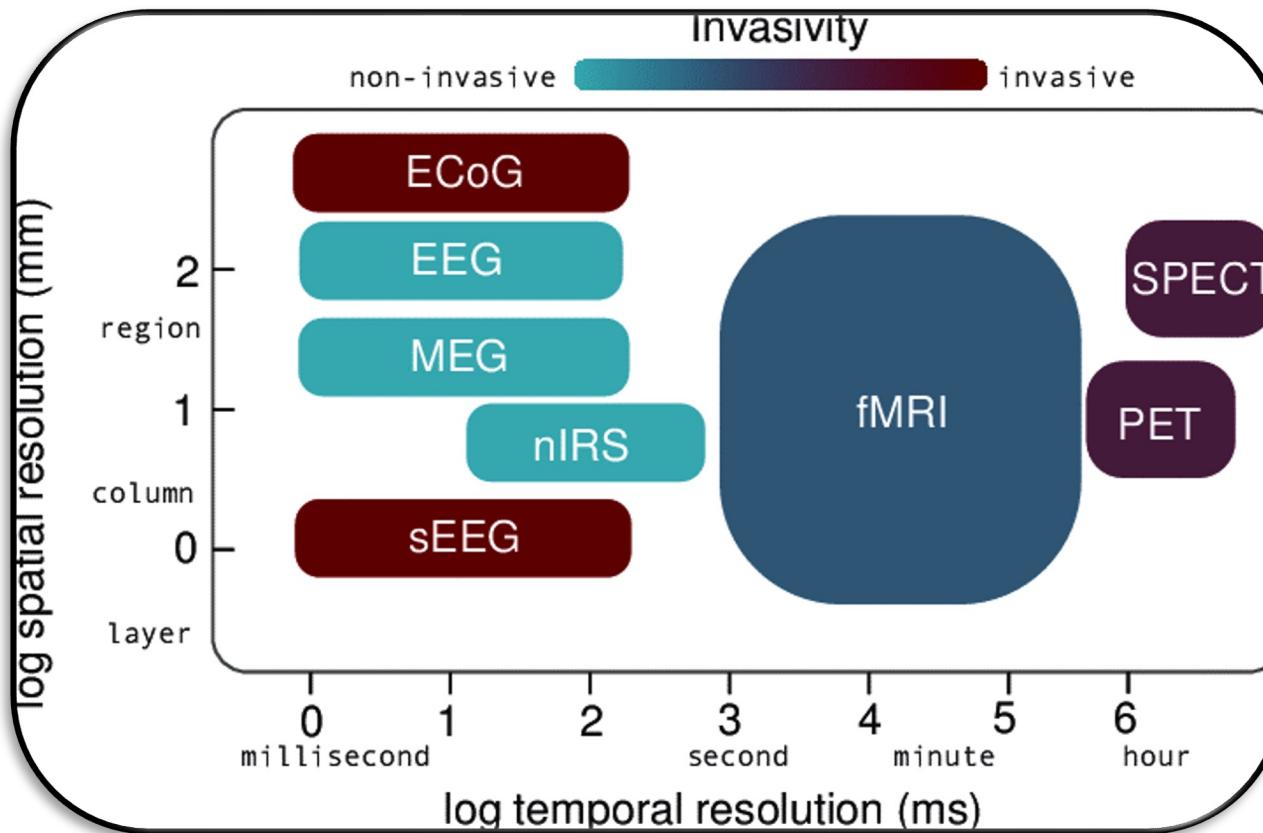


# IRMf BOLD : mesure indirecte de l'activité cérébrale



Réponse hémodynamique (HRF) : forme “canonique” (à discuter ...)

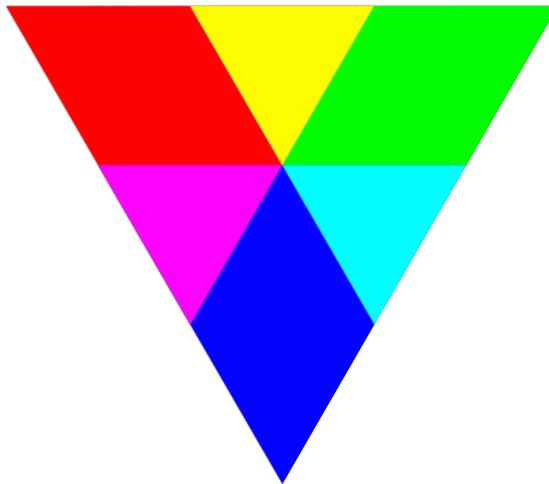
# IRMf BOLD et les autres techniques d'exploration cérébrale fonctionnelle



# L'IRMf : une aventure qui rassemble trois univers de recherche entremêlés en développement continu depuis plus de 30 ans

IRM : instrumentation & séquences d'acquisition

Méthodologies : paradigmes & analyse des images



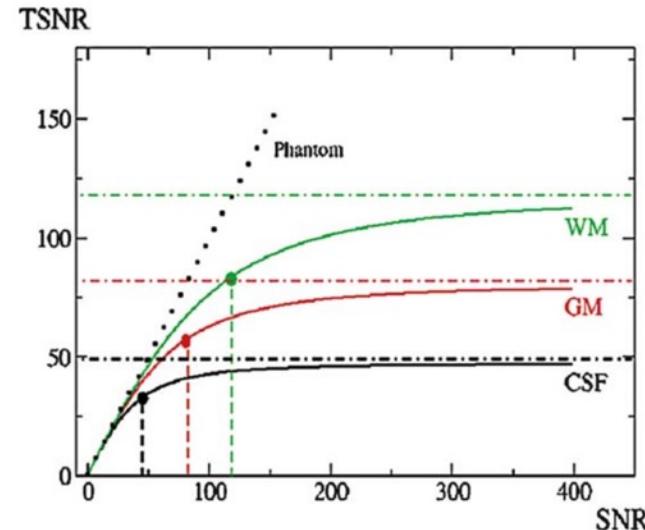
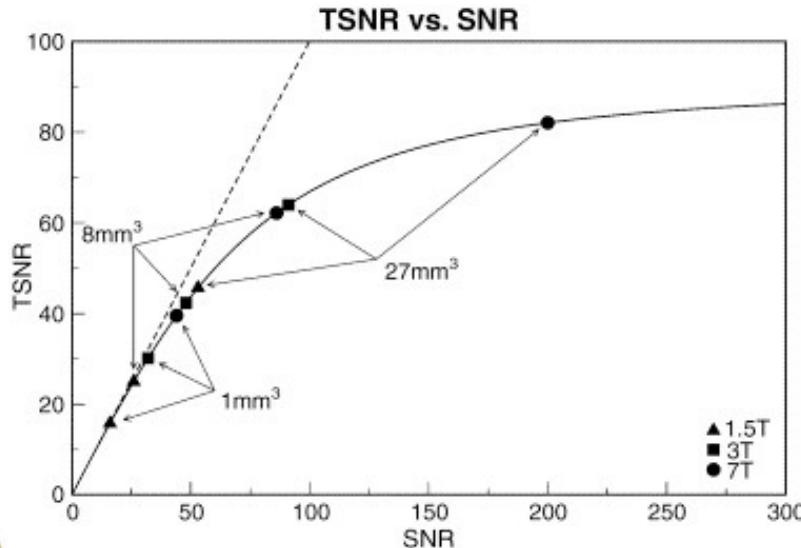
Interprétation des signaux & Neurosciences

# IRM : instrumentation

Champ magnétique B0 :

+ de plus en plus élevé : 1,5T → 3T → 7T → 11,7 T ...

→ Rapport Signal-sur-Bruit (SNR) de plus en plus élevé  
Mais Signal-sur-Bruit Temporel (TSNR) limité à cause du bruit physiologique



Murphy & al 2007

## IRM : instrumentation

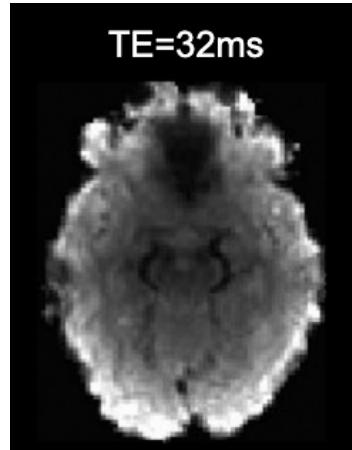
Champ magnétique B0 :

+ de plus en plus homogène spatialement (shims d'ordre élevé)

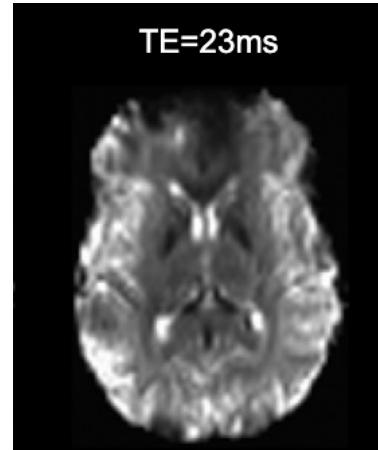
Mais encore des problèmes pour les hauts champs dans les régions à fort gradient de susceptibilité magnétique

- Perte de signal à TE long
- Distorsions spatiales en lecture EPI

3T



7T



## IRM : instrumentation

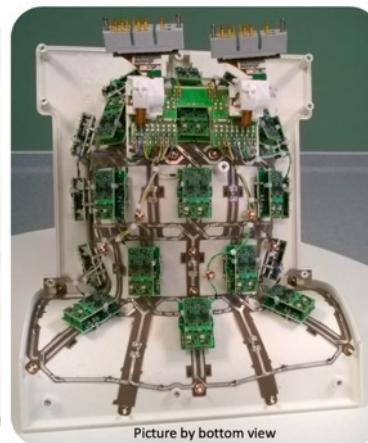
### Chaine Radiofréquence (RF) :

- \* émission B1+ plus homogène (antenne à plusieurs canaux en parallèle pTX)  
mais limite de SAR (Specific Absorption Rate) à haut champ
- \* ou émission B1+ par antenne locale (mais problème d'homogénéité spatiale)
- \* réception B1- avec de plus en plus de canaux en parallèle :  $8 \rightarrow 16 \rightarrow 32 \rightarrow 64 \rightarrow \dots$

→ Augmentation du SNR et accélération de l'acquisition



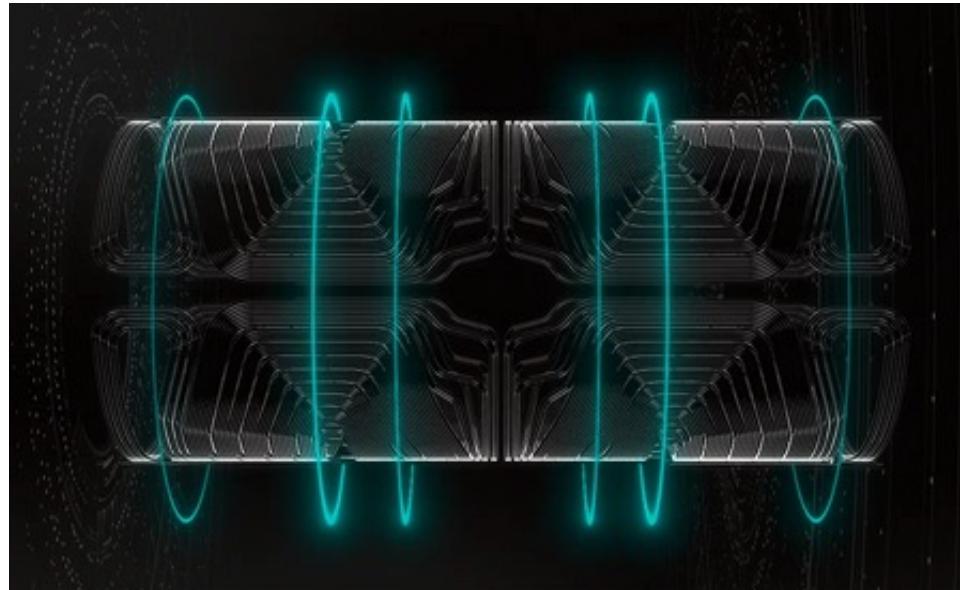
Centre IRM-INT@CERIMED



## IRM : instrumentation

### Système de gradients de plus en plus puissants

- + amplitude élevée :  $45 \text{ mT/m} \rightarrow 80 \text{ mT/m} \rightarrow 200 \text{ mT/m} \rightarrow \dots$
- + bonne linéarité (dans le cerveau)
- + vitesse de commutation élevée,  
mais limitée par la biologie (stimulations nerveuses périphériques)



# IRM : séquences d'acquisition

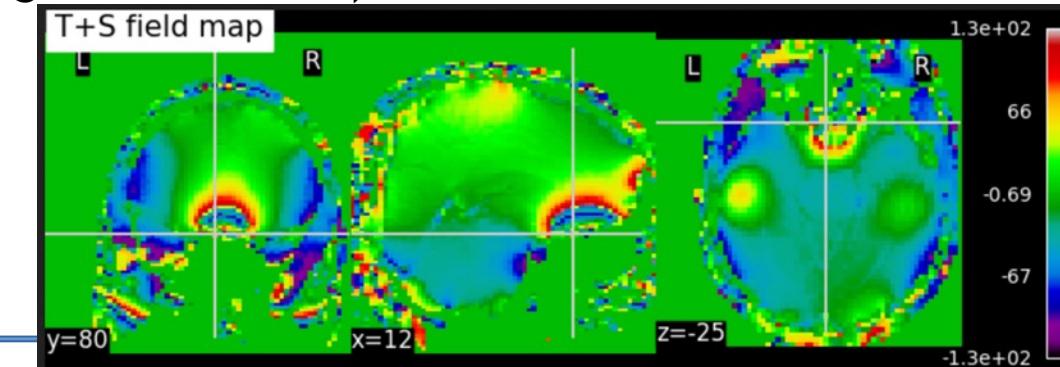
## Echo de Gradient :

- + bonne sensibilité au BOLD
- très (trop) sensible au niveau des veines de drainage

## Accélération :

- + Echo-Planar Imaging (EPI) (mais déformations au niveau de certaines régions)
- + GRAPPA (moins de distorsions mais sensibilité importante aux mouvements)
- ++ Multi-Bande (grâce aux antennes multi-canaux)

Correction des déformations spatiales grâce à une carte de champ B0  
(acquisition d'une fieldmap ou de trains EPI inversés : AP et PA, ou recalage non linéaire vers une image non distordue)



# IRM : séquences d'acquisition

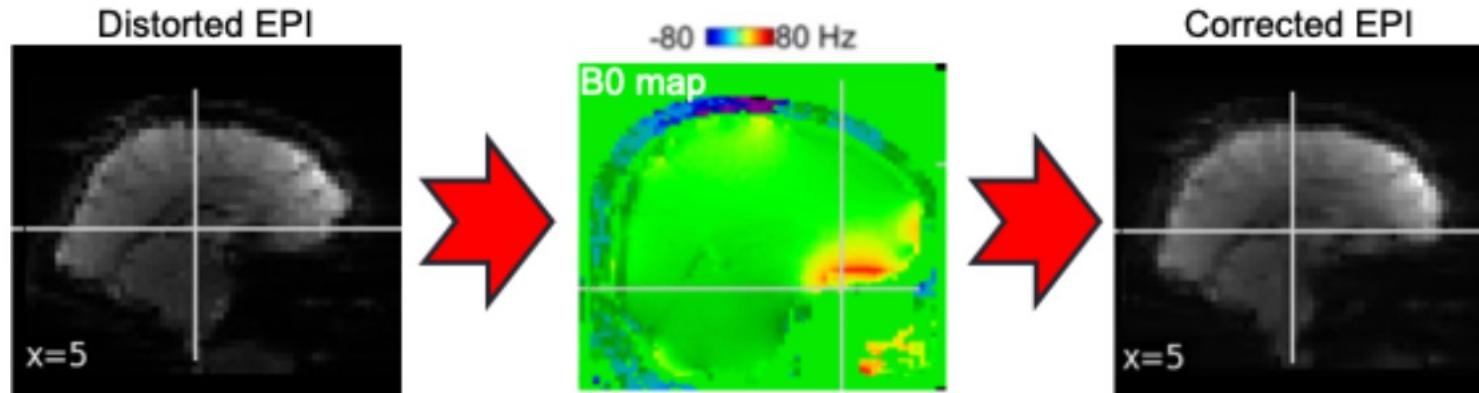
## Echo de Gradient :

- + bonne sensibilité au BOLD
- très (trop) sensible au niveau des veines de drainage

## Accélération :

- + Echo-Planar Imaging (EPI) (mais déformations au niveau de certaines régions)
- + GRAPPA (moins de distorsions mais sensibilité importante aux mouvements)
- ++ Multi-Bande (grâce aux antennes multi-canaux)

Correction des déformations spatiales grâce à une carte de champ B0  
(acquisition d'une fieldmap ou de trains EPI inversés : AP et PA)

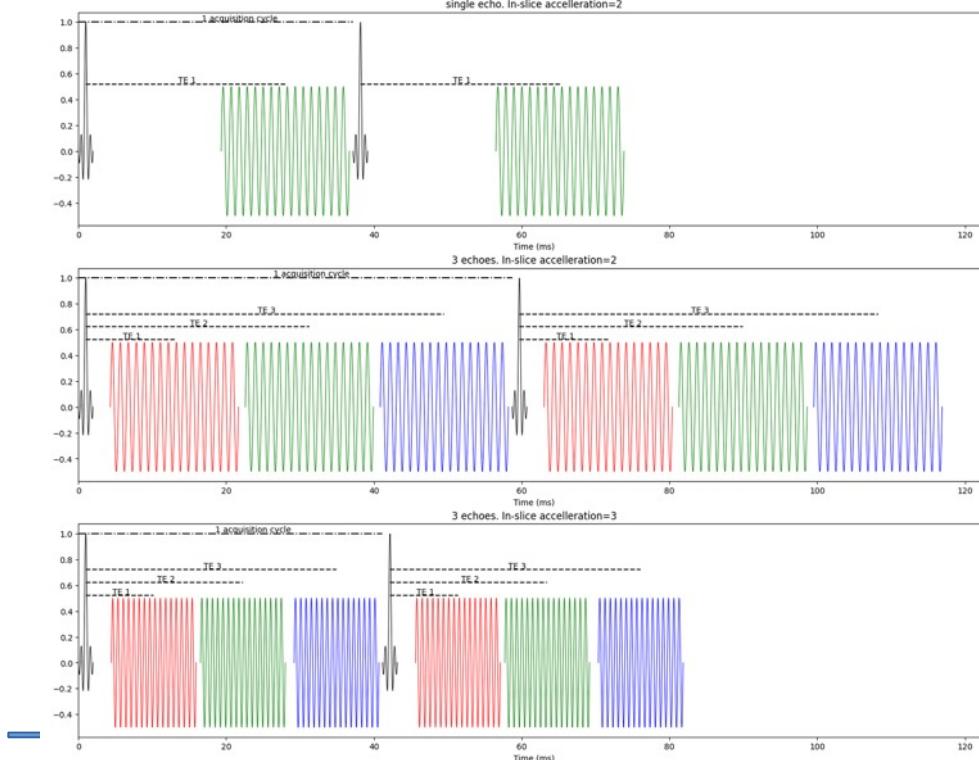


# IRM : séquences d'acquisition

Acquisitions multi-échos :

→ Adaptées aux variations du T2\* local dans le cerveau

mais nécessite accélérations de type GRAPPA ou Partial Fourier (sensibles aux mouvements)

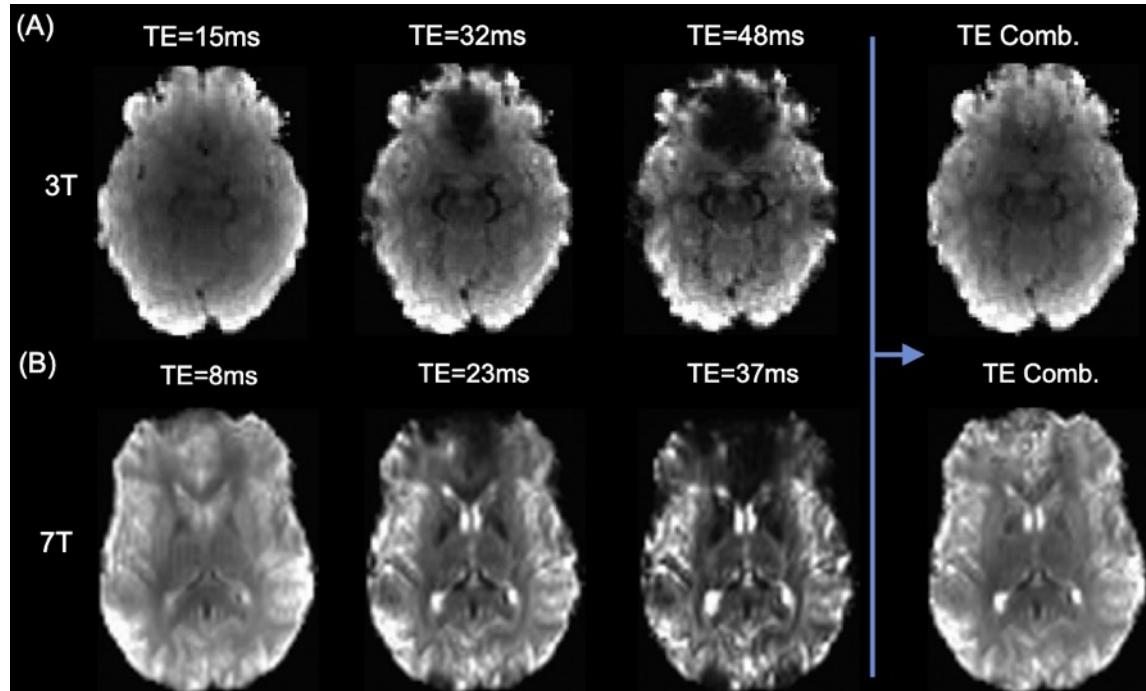


[https://me-ica.github.io/multi-echo-data-analysis/content/fMRI\\_Sequences.html](https://me-ica.github.io/multi-echo-data-analysis/content/fMRI_Sequences.html)

# IRM : séquences d'acquisition

Acquisitions multi-échos :

→ Adaptées aux variations du T2\* local dans le cerveau  
mais nécessite accélérations de type GRAPPA ou Partial Fourier (sensibles aux mouvements)



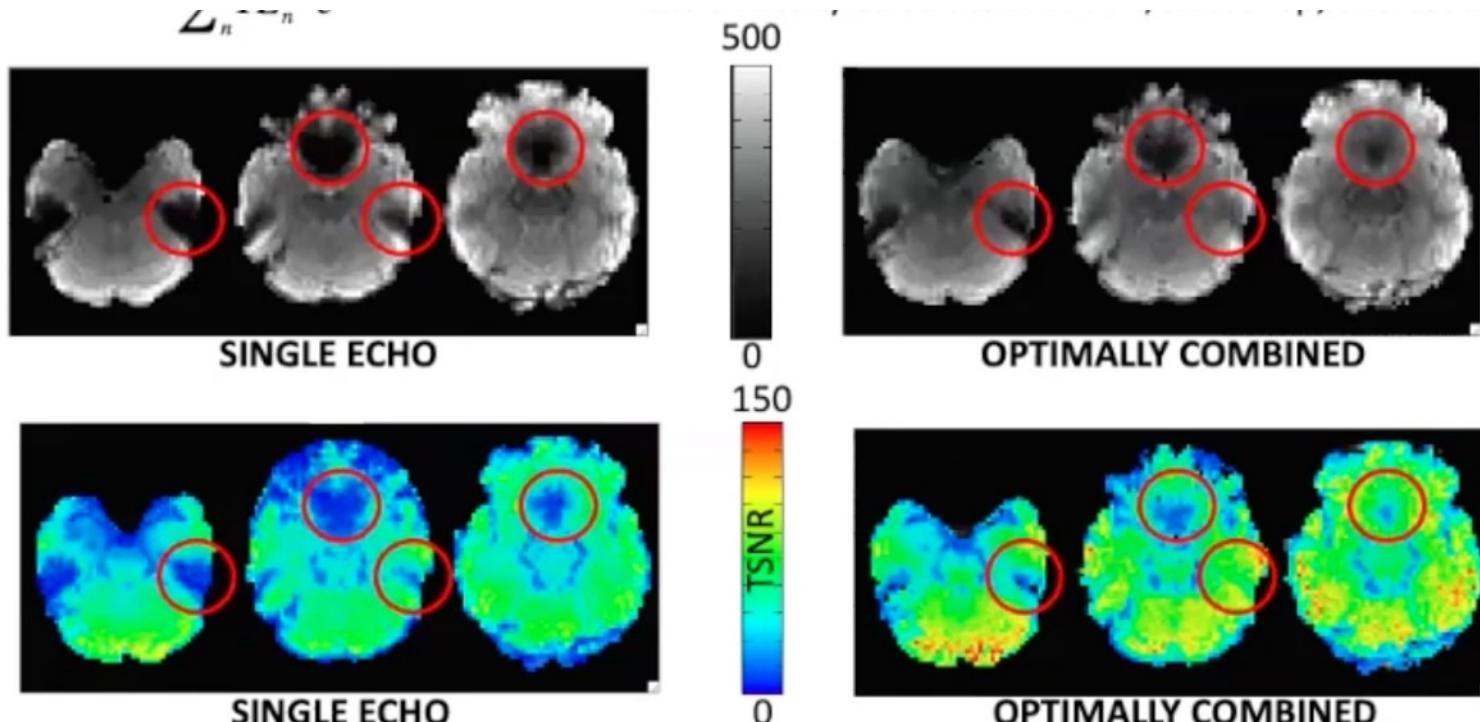
Kundu & al 2017

## IRM : séquences d'acquisition

Acquisitions multi-échos :

→ Adaptées aux variations du T2\* local dans le cerveau

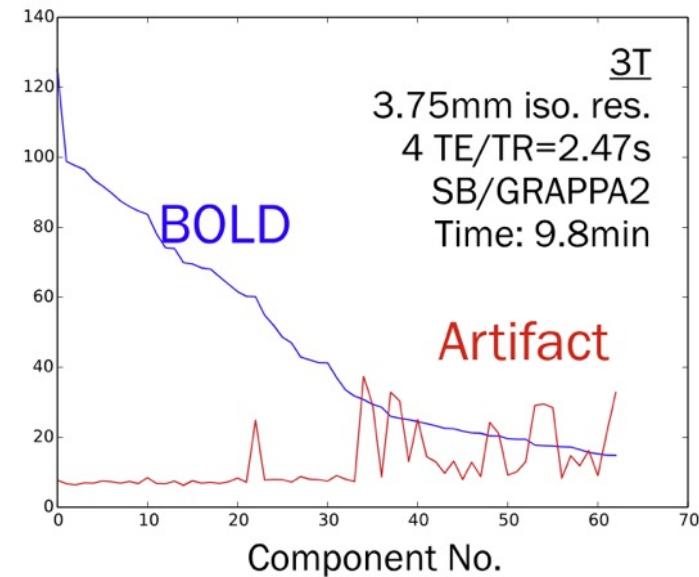
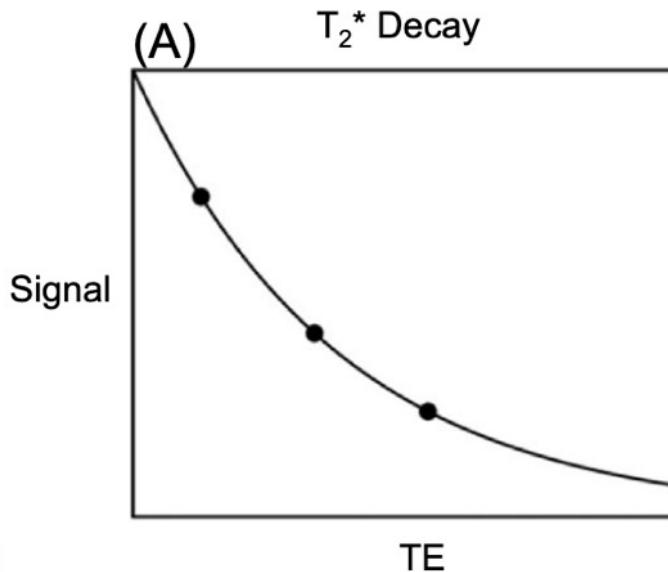
mais nécessite accélérations de type GRAPPA ou Partial Fourier (sensibles aux mouvements)



# IRM : séquences d'acquisition

Acquisitions multi-échos :

- Adaptées aux variations du T<sub>2</sub>\* local dans le cerveau
- mais nécessite accélérations de type GRAPPA ou Partial Fourier (sensibles aux mouvements)
- Correction possible des artefacts par la méthode ME-ICA

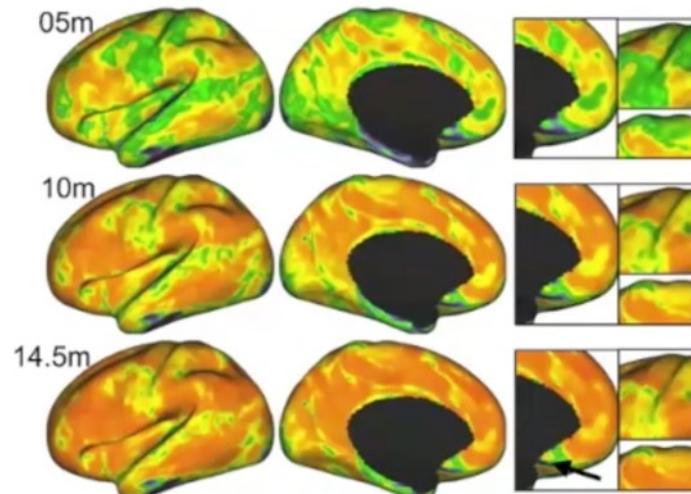


# Reliable for functional connectivity

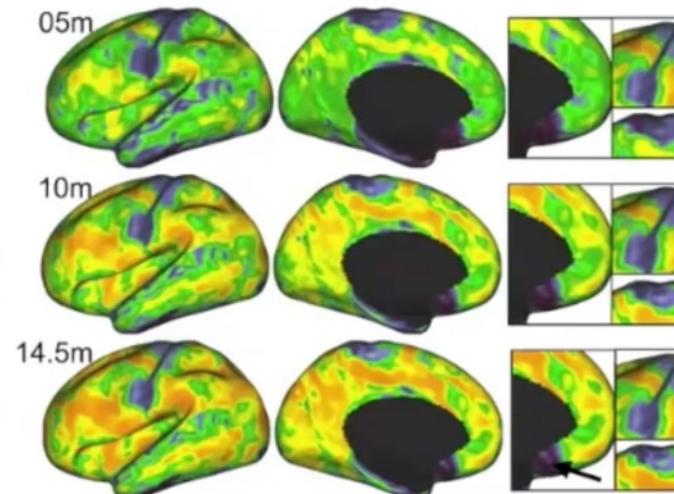
A

Reliability values in cortex (ME01: OC-ME vs. Fast-TR SE)

OC-ME + ME-ICA



Fast-TR SE + ICA-AROMA



Reliability ( $R^2$ )

0

1

Spatial correlations between voxel as seen for full run vs shorter runs

"In four densely sampled individual humans, just 10 min of multi-echo data yielded better test-retest reliability than 30 min of single-echo data in independent datasets."

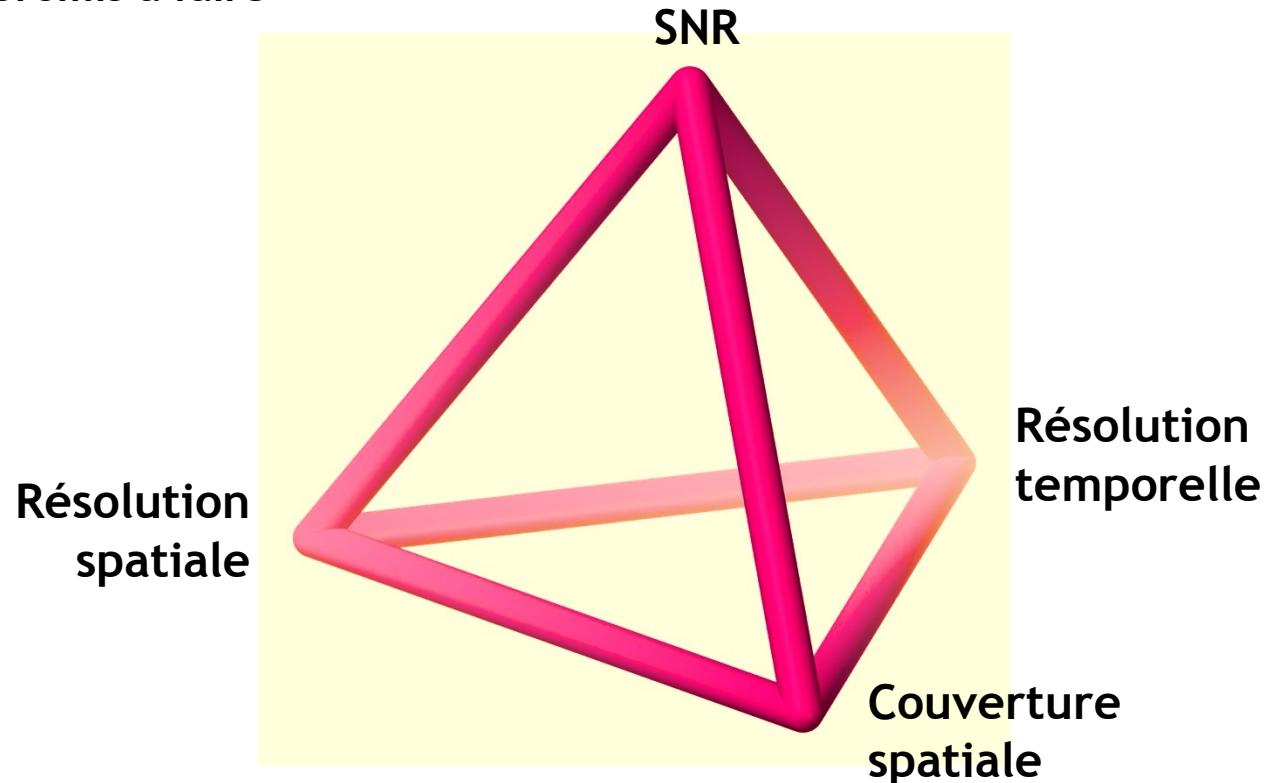
# Growth of multi-echo fMRI usage

- Neurocognitive aging data release with behavioral, structural, and multi-echo functional MRI measures
  - N=181 younger, 120 older
- Cambridge Centre for Ageing Neuroscience (Cam-CAN)
  - N=649
- Heart rate variability biofeedback training and emotion regulation
  - N=193
- Le Petit Prince
  - N=112
- Multi-echo Cambridge
  - N=89
- Evidence supporting a time-limited hippocampal role in retrieving autobiographical memories
  - N=40

<https://tedana.readthedocs.io/en/stable/multi-echo.html#datasets>

# IRM : séquences d'acquisition

Toujours des compromis à faire  
(No free lunch !)

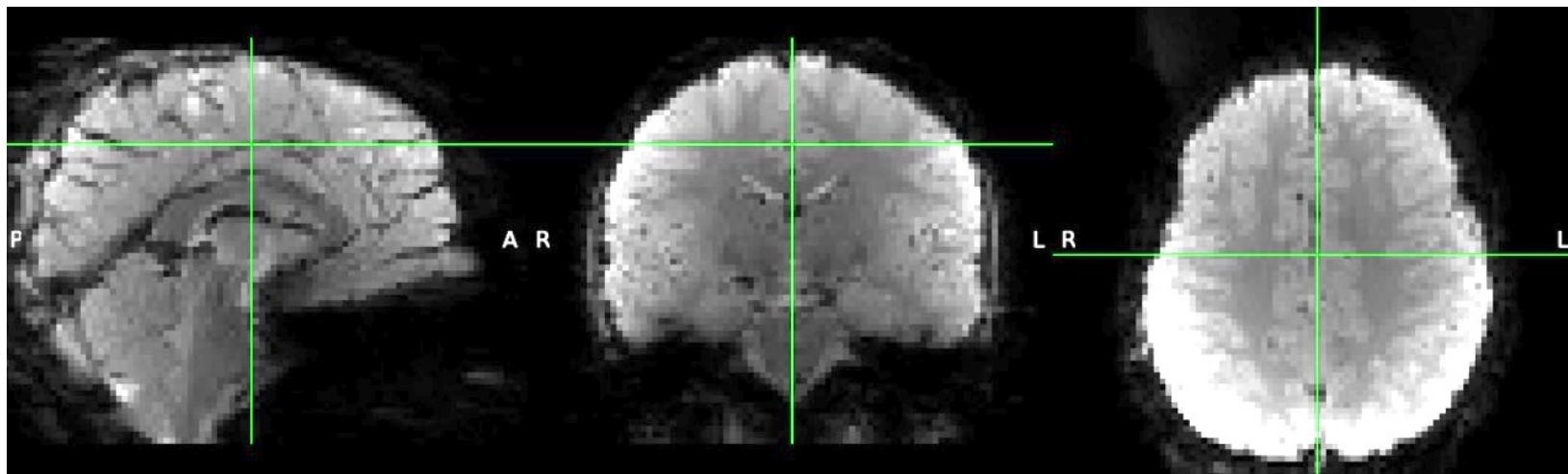


# IRM : séquences d'acquisition

Aujourd'hui, typiquement à 3T :

- + Temps de Répétition  $\approx$  1 sec
- + Résolution spatiale  $\approx$  2x2x2 mm
- + Couverture de l'ensemble du cerveau
- + SNR moyen  $\approx$  50
- + TSNR moyen  $\approx$  40

Image moyenne

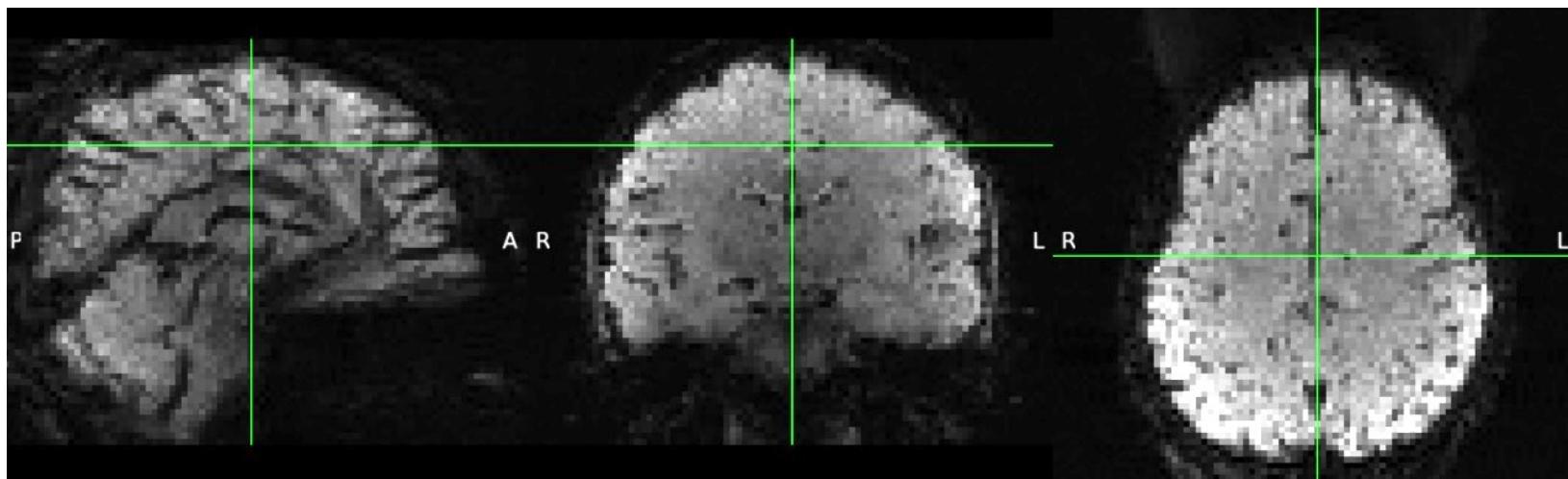


# IRM : séquences d'acquisition

Aujourd'hui, typiquement à 3T :

- + Temps de Répétition  $\approx$  1 sec
- + Résolution spatiale  $\approx$  2x2x2 mm
- + Couverture de l'ensemble du cerveau
- + SNR moyen  $\approx$  50
- + TSNR moyen  $\approx$  40

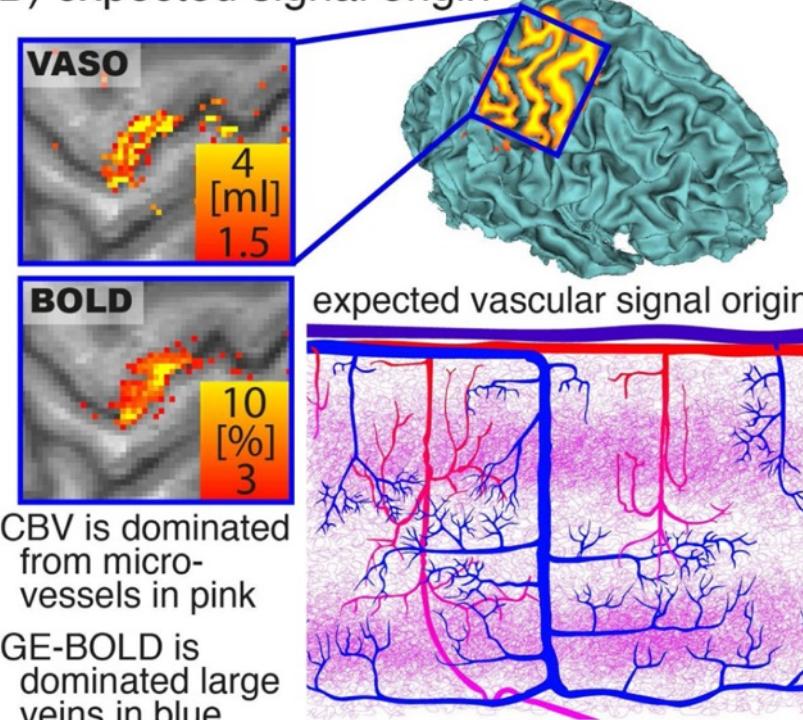
Image TSNR



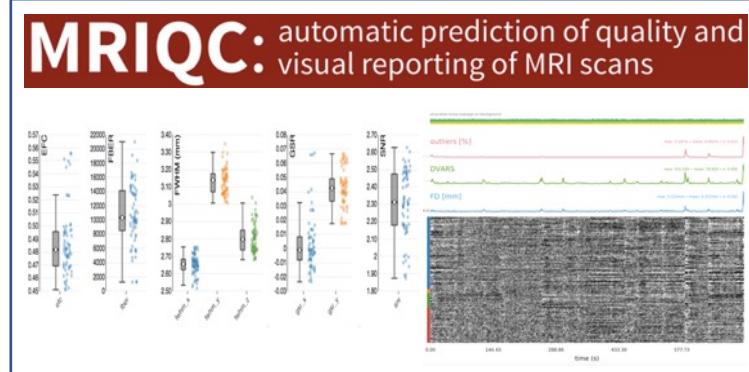
## IRM : autres types de séquences

Vascular-Space-Occupancy (VASO, changement du Volume Cérébral Sanguin : CBV) : moins sensible que GE (écho de gradient) → nécessite un très haut champ ( $\geq 7$  T)

B) expected signal origin

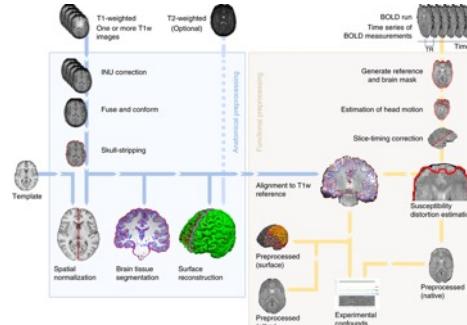


# Méthodologies : Analyse des images : énormes avancées de standardisation !



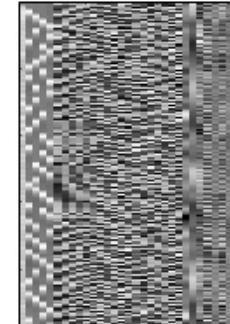
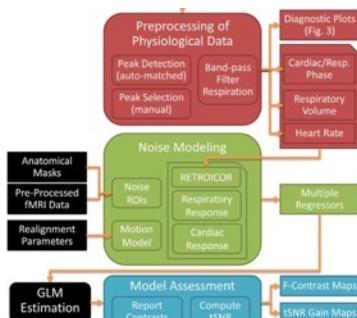
### fMRIPrep

a robust preprocessing pipeline for task-based and resting-state fMRI data



### GLM + denoising

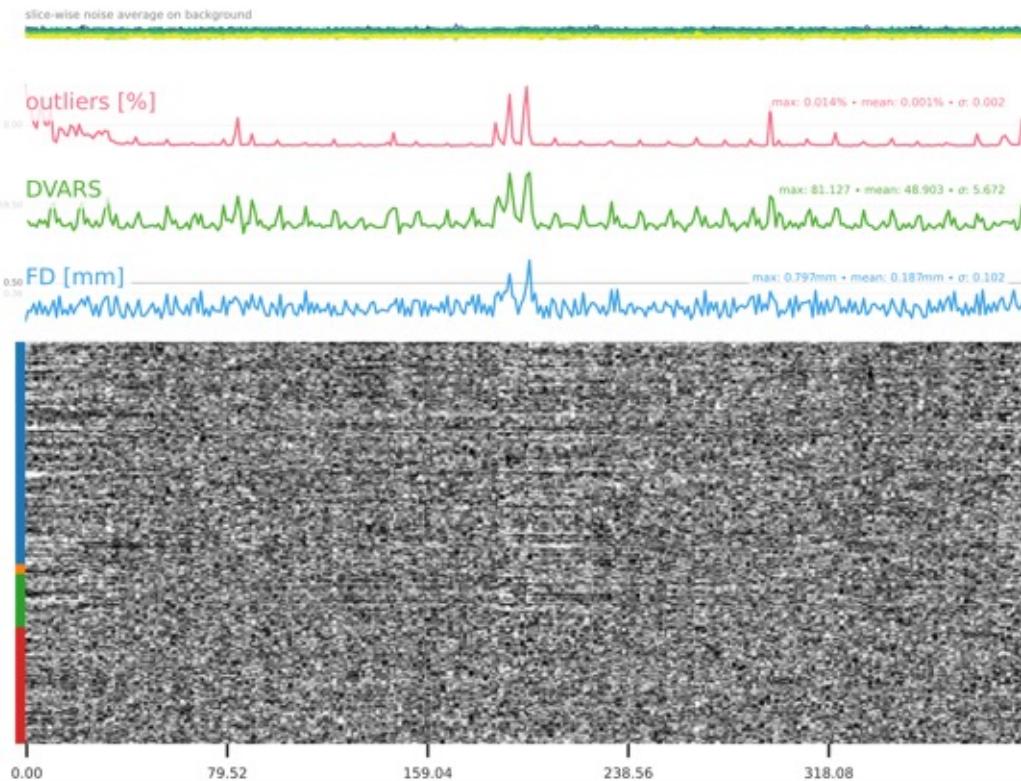
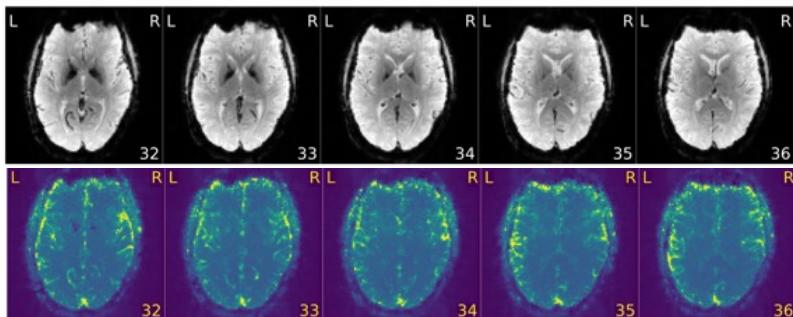
Physiological signals,  
CompCor, mvts parameters



# Méthodologies : Analyse des images

## Analyse qualité des données (QC : Quality Check)

Exemple : MRIQC (au niveau individuel)

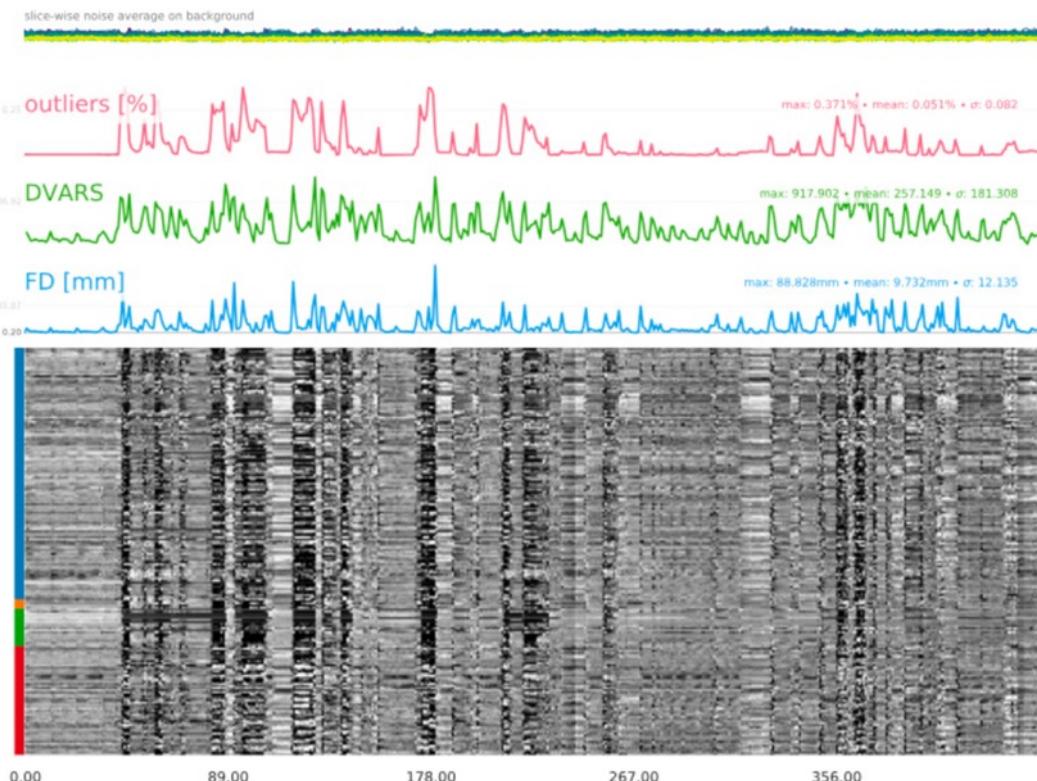
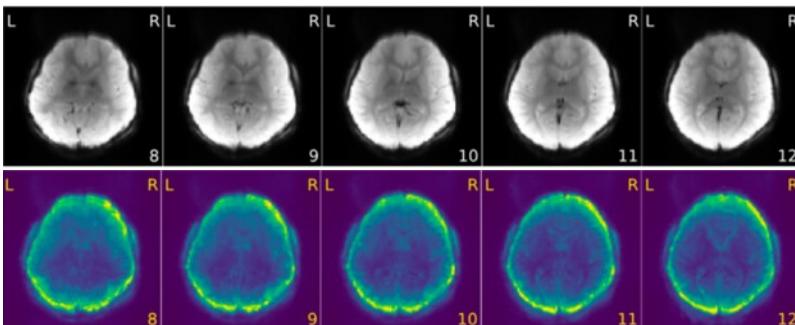


Bon sujet ☺

# Méthodologies : Analyse des images

## Analyse qualité des données (QC : Quality Check)

Exemple : MRIQC (au niveau individuel)

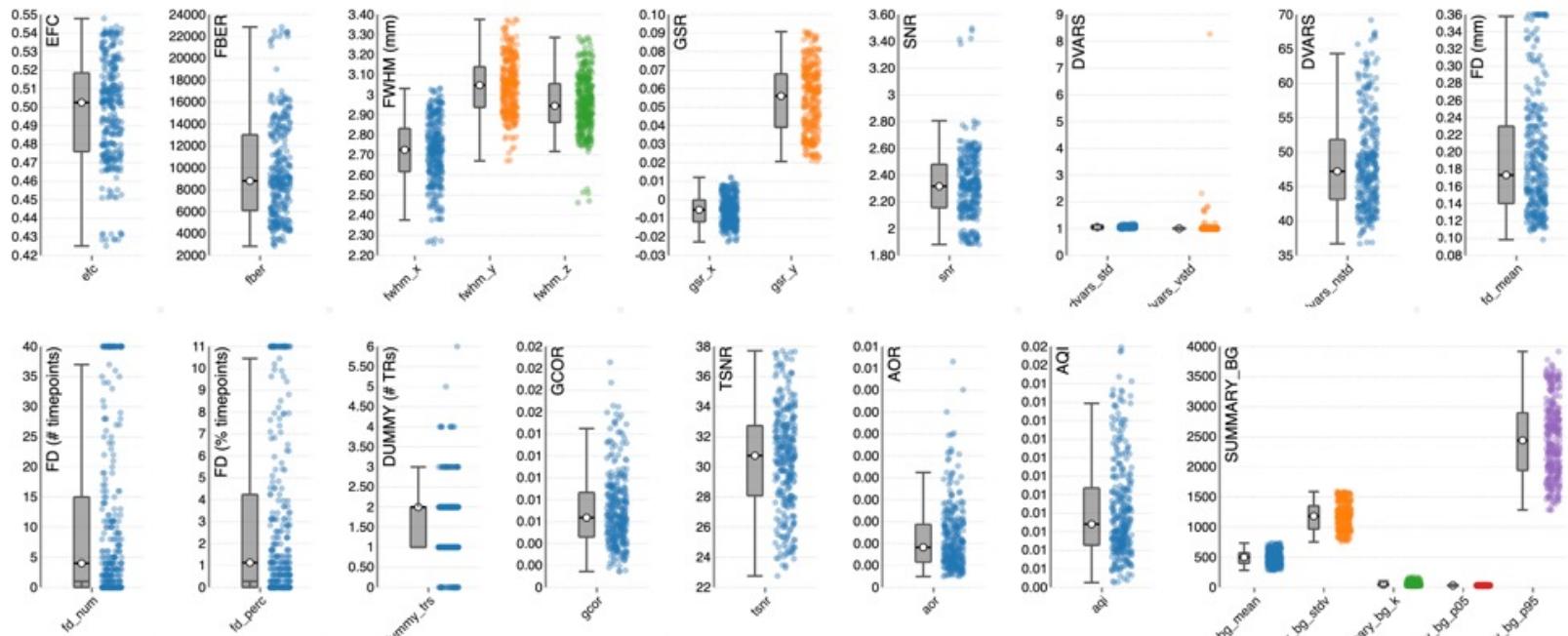


Mauvais sujet 😞

# Méthodologies : Analyse des images

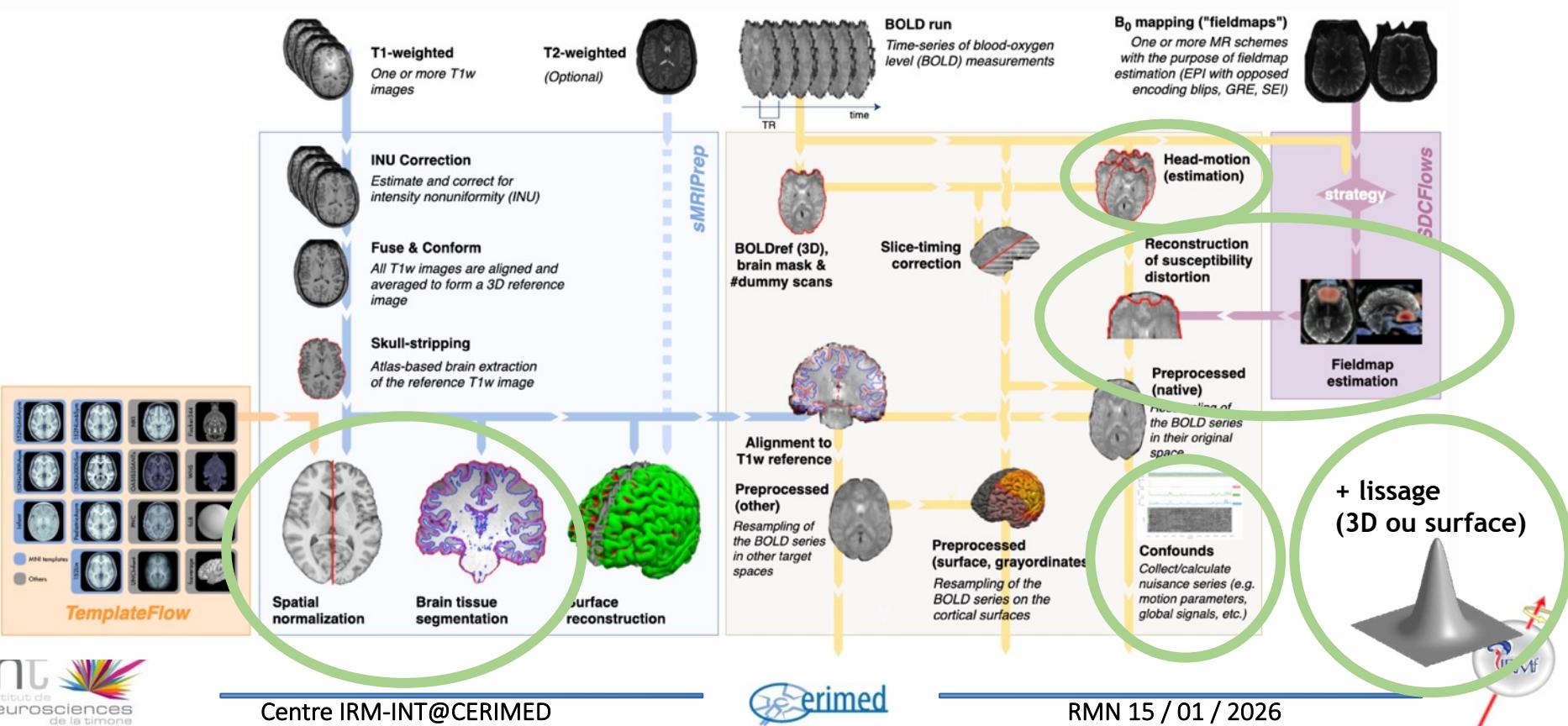
## Analyse qualité des données (QC : Quality Check)

Exemple : MRIQC (au niveau du/des groupe/s)



# Méthodologies : Analyse des images : pré-traitements

De plus en plus standardisé. Exemple : fMRIprep

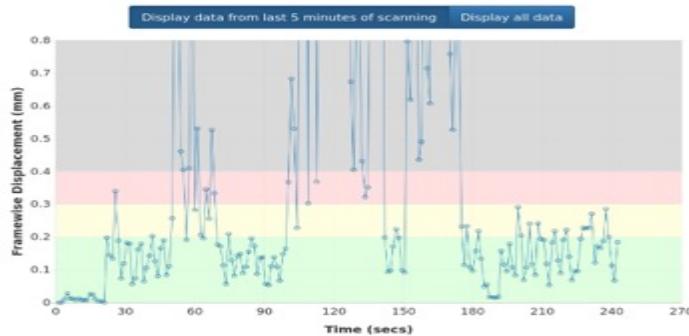


# Méthodologies : Analyse des images : débruitage !!

Première source de nuisance : les mouvements de la tête

En amont :

- bien caler / maintenir la tête & confort +++
- respirer régulièrement
- vérifier les mouvements en cours de manip



Summary						
Series	Description	Frames	TR (sec)	Time (min)	< 0.2 mm (min) (%)	< 0.3 mm (min) (%)
15	AUDIO_RUN1_PERC	182	1.224	3:42	1:57 (52.7%)	2:25 (65.4%)
10	task-rest_bold	15	1.224	0:18	0:18 (100.0%)	0:18 (100.0%)
9	task-rest_bold_SBRref	1	1.224	0:01	0:01 (100.0%)	0:01 (100.0%)



	< 0.2 mm	< 0.3 mm	< 0.4 mm
Good Time (min) (%)	2:17 (56.6%)	2:45 (68.2%)	2:55 (72.2%)
Good Frames	112	135	143
Bad Frames	86	63	55

# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour le débruitage

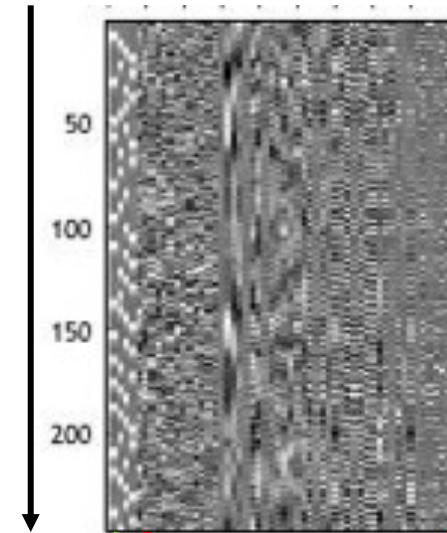
## Correction des nuisances :

- Mouvements de la tête
- Fluctuations physiologiques
- Instabilité système

## Les « régresser out »

- paramètres de mouvement
- aCompCor (signaux extraits du CSF et WM)
- Scans outliers
- ...

Matrice de dessin :  
Modèle Linéaire Général



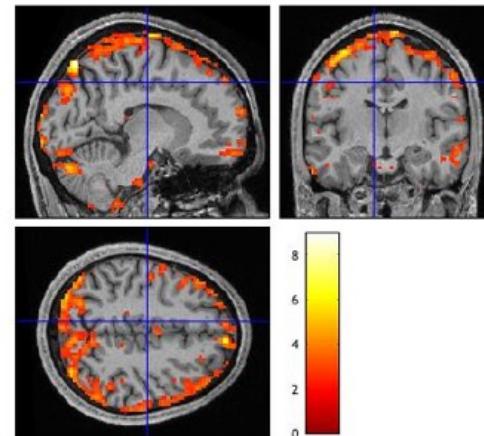
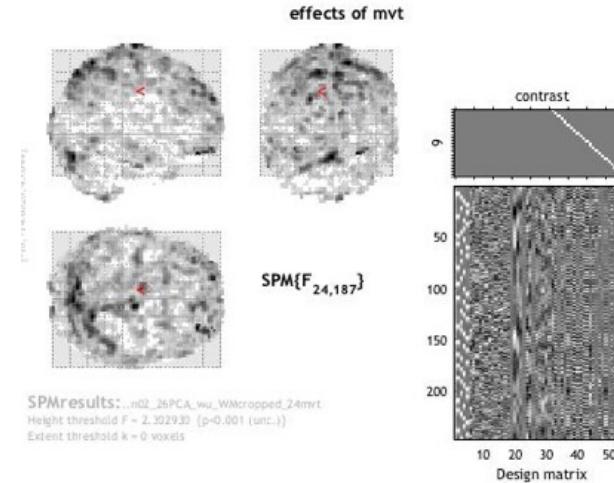
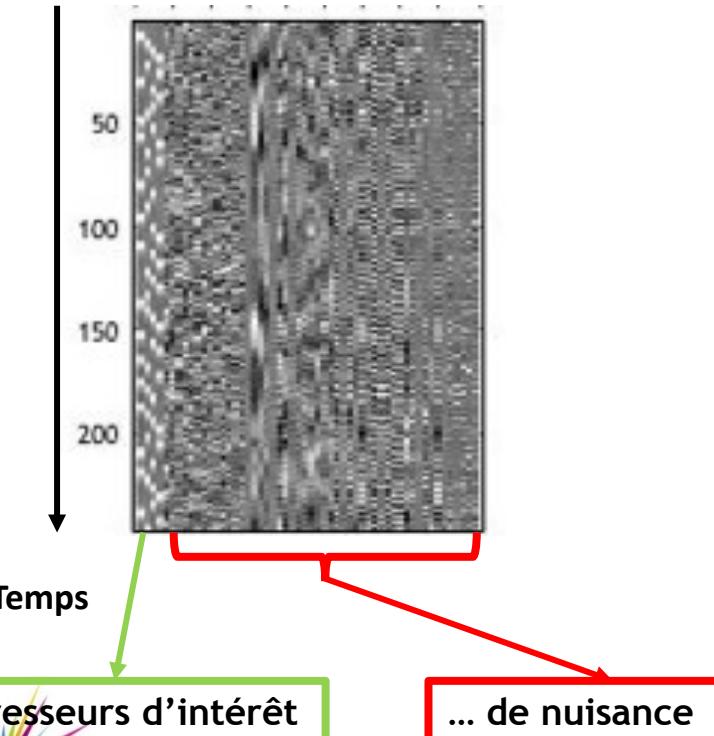
Temps

Régresseurs d'intérêt

... de nuisance

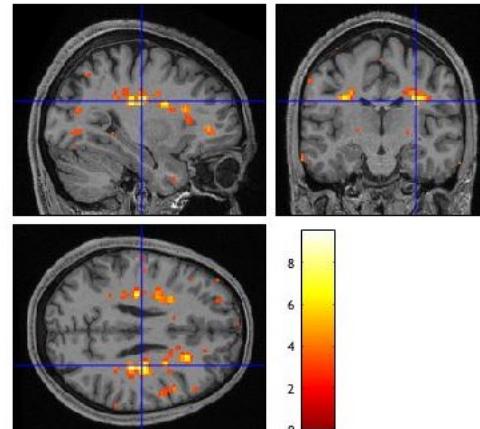
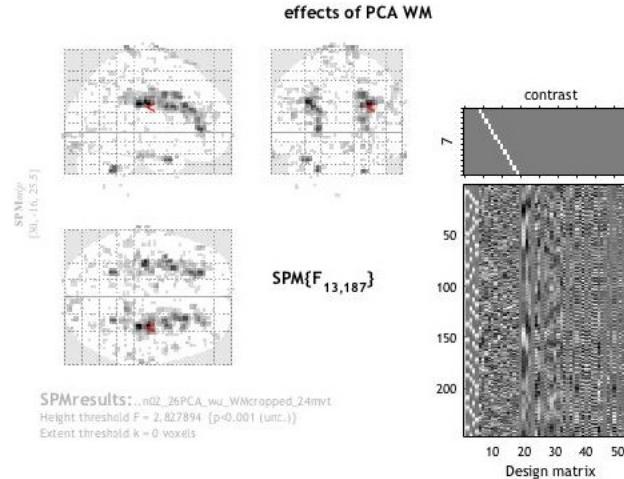
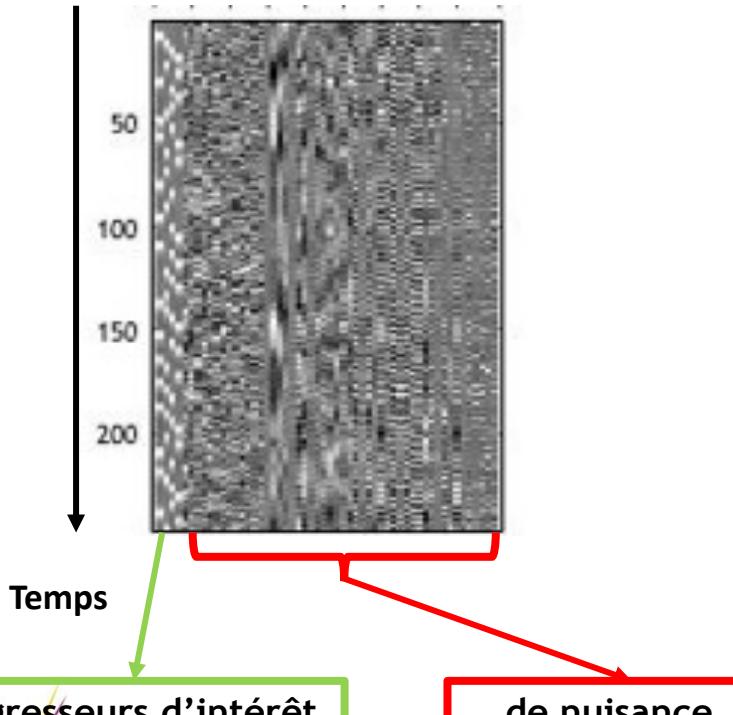
# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour le débruitage

Matrice de dessin :  
Modèle Linéaire Général



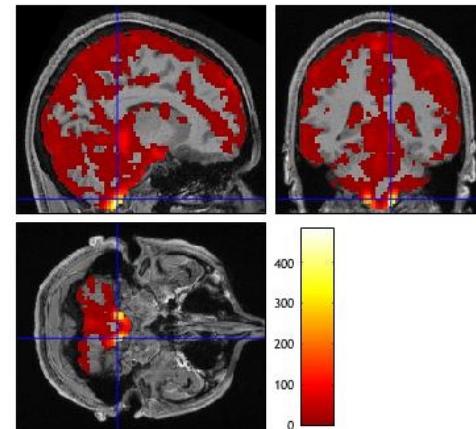
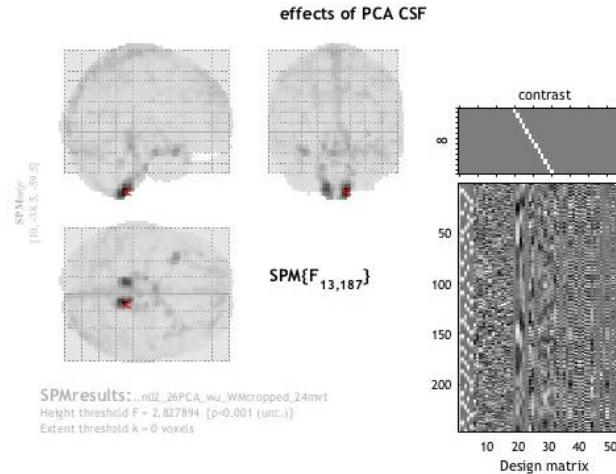
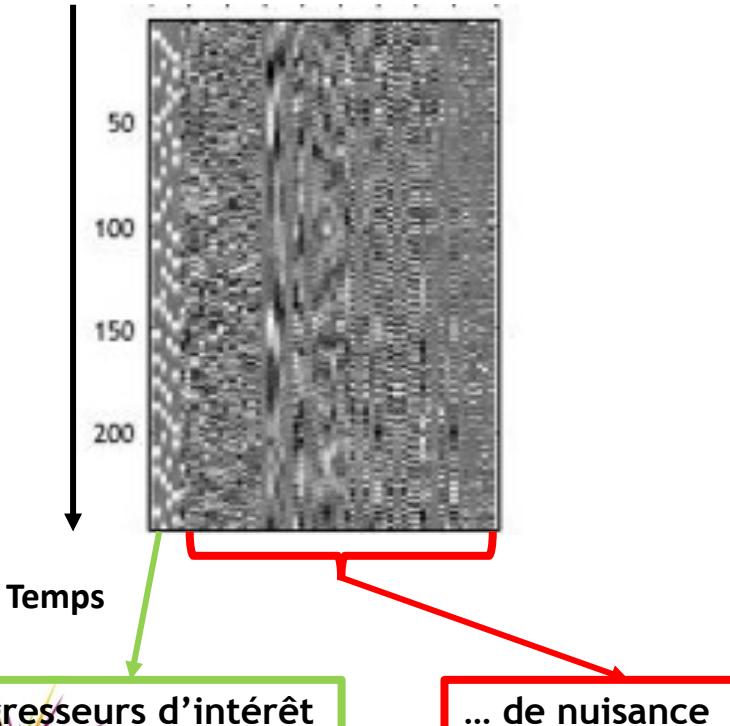
# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour le débruitage

Matrice de dessin :  
Modèle Linéaire Général

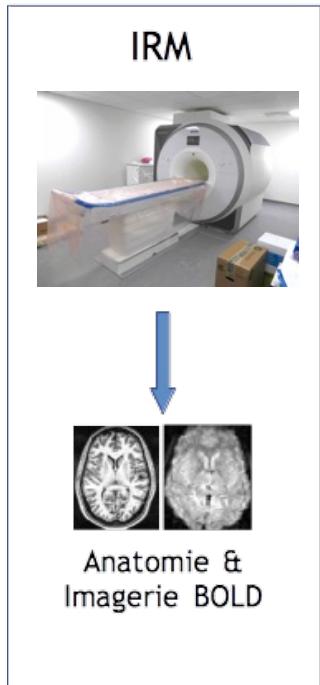


# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour le débruitage

Matrice de dessin :  
Modèle Linéaire Général

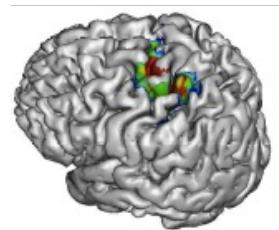
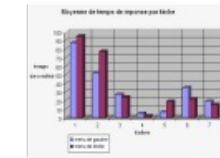
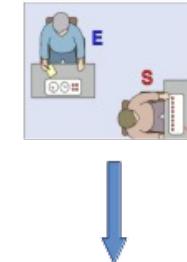


# Méthodologies : paradigmes (activation)



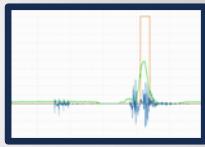
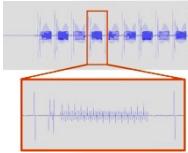
Acquisition simultanée  
des images IRM  
ET  
du comportement du  
sujet, enregistré dans  
l'imageur

Psychologie  
expérimentale

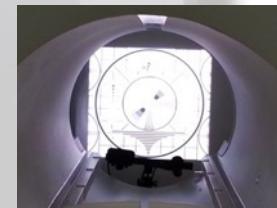
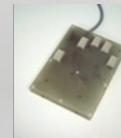
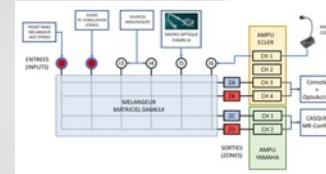
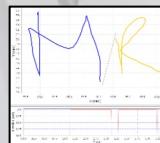
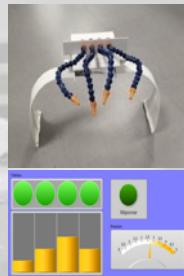


IRM fonctionnelle (IRMf)

# Méthodologies : paradigmes (activation) → instrumentation

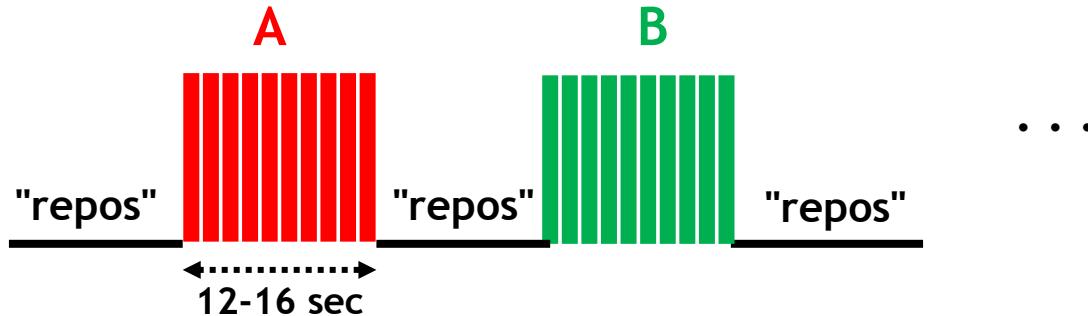


EMG : poster #088

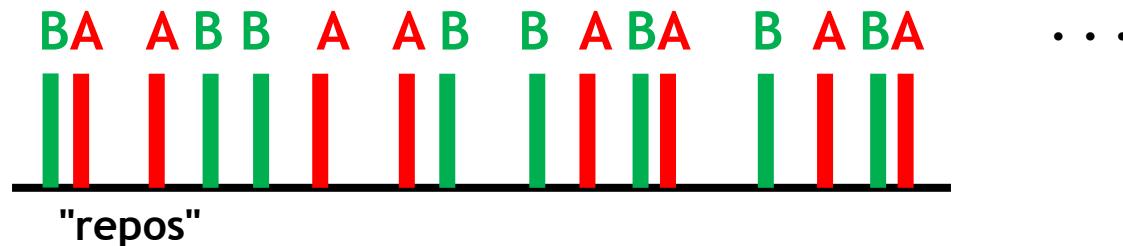


# Méthodologies : paradigmes (activation)

- Dessins temporels :
  - Bloc

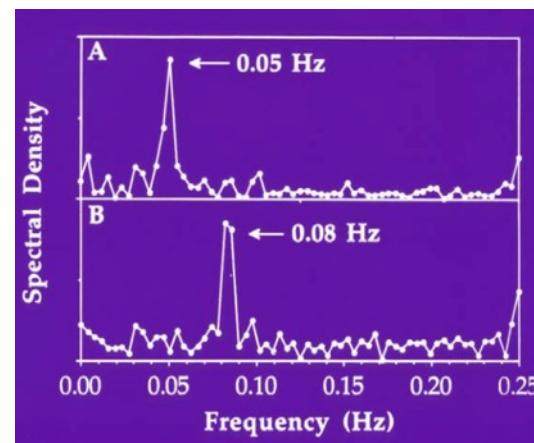
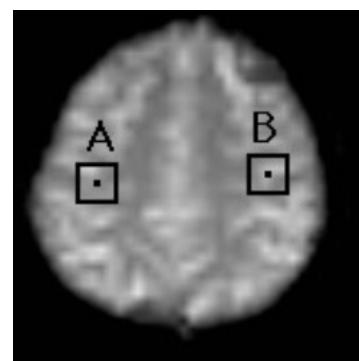
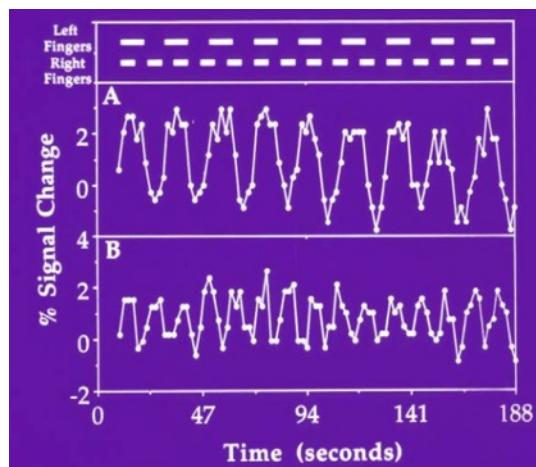
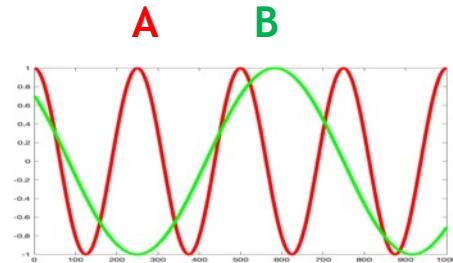


- Evènementiel



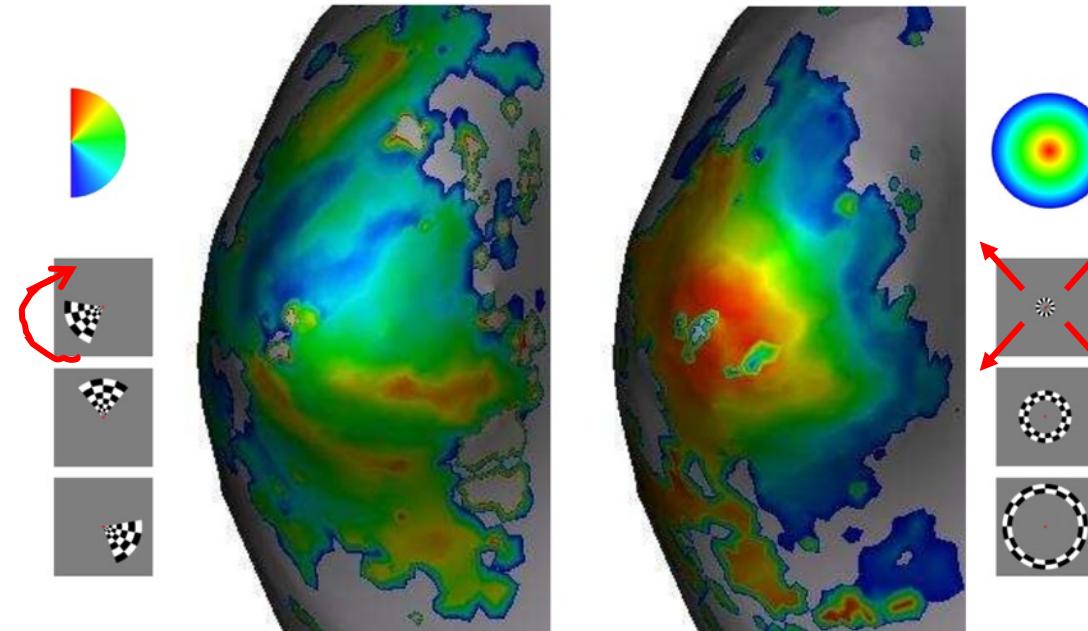
# Méthodologies : paradigmes (activation)

- Dessins temporels :
  - Modulation par la fréquence (frequency encoding)



# Méthodologies : paradigmes (activation)

- Dessins temporels :
  - Modulation par la phase (phase encoding)  
→ ex : rétinotopie



## Méthodologies : paradigmes (activation)

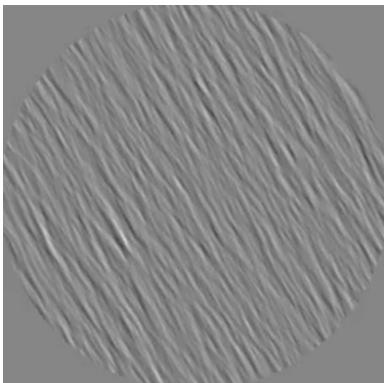
- Manipulation psychophysique :
  - Catégoriel : tâche A versus tâche B
  - Factoriel : manipulation de plusieurs facteurs :
    - Effet principal de chaque facteur
    - Interaction entre les facteurs

Facteurs & niveaux	A1 (ex : mouvement)	A2 (pas mouvement)
B1 (ex : attention)	A1 B1	A2 B1
B2 (pas attention)	A1 B2	A2 B2

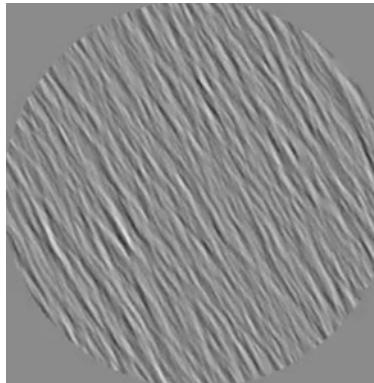
## Méthodologies : paradigmes (activation)

- Manipulation psychophysique :
  - Paramétrique : effet de l'amplitude d'un paramètre (ex : contraste de l'image)

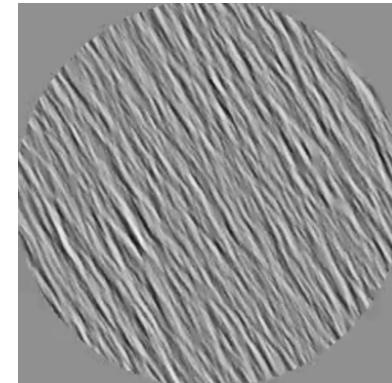
12,5%



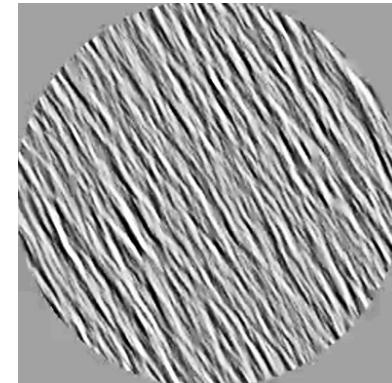
25%



50%



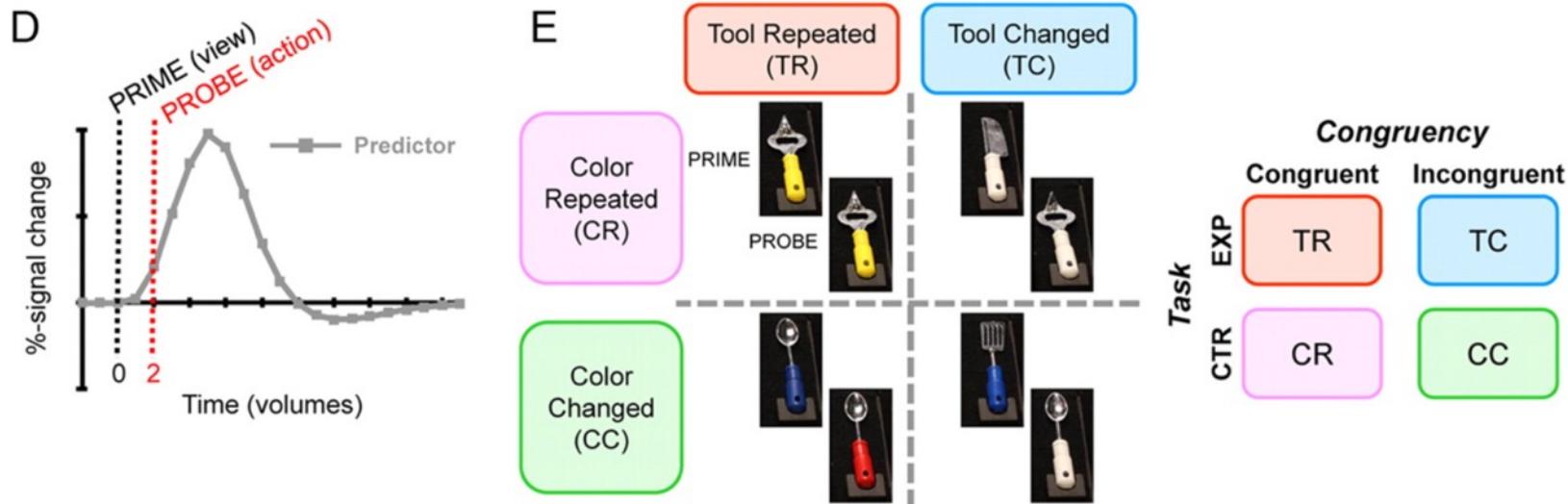
100%



# Méthodologies : paradigmes (activation)

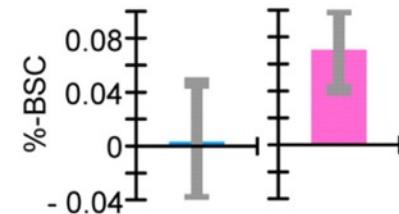
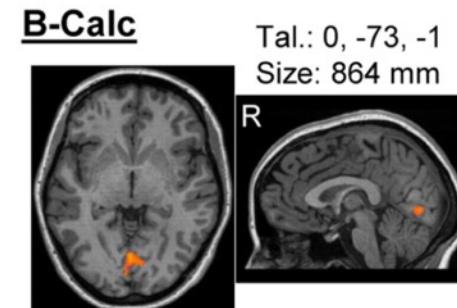
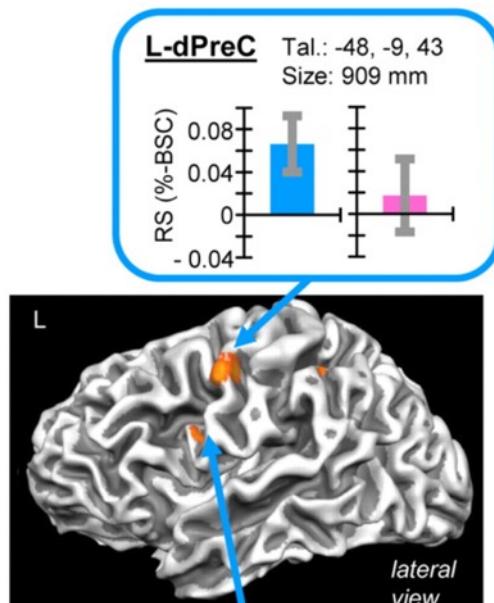
## - Manipulation psychophysique :

- Répétition-suppression : atténuation de la réponse BOLD due à la répétition de la caractéristique des stimuli traitée localement



# Méthodologies : paradigmes (activation)

- Manipulation psychophysique :
  - Répétition-suppression : atténuation de la réponse BOLD induite par la répétition de la caractéristique des stimuli traitée localement

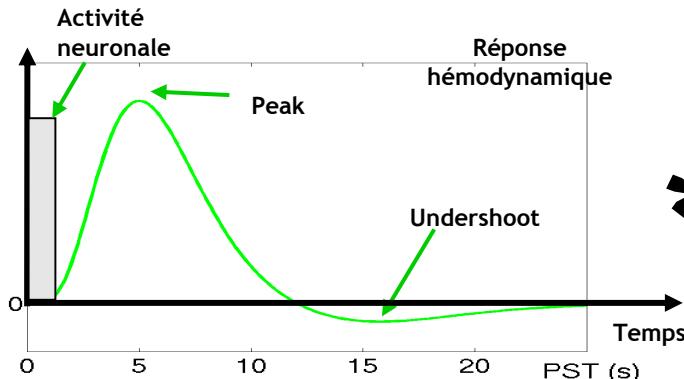


Valyear & al, 2012

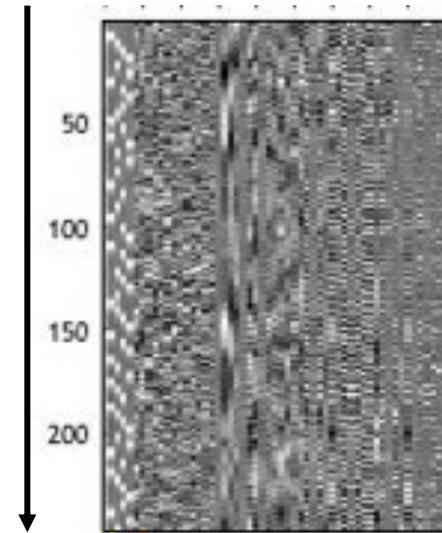
# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour l'IRMf d'activation

Hypothèses / approximations (discutables !) :

- même HRF partout dans le cerveau
- identique pour tous les sujets
- linéarité de la réponse HRF  
(quelle que soit la durée de l'activité neuronale)



Matrice de dessin :  
Modèle Linéaire Général



Temps

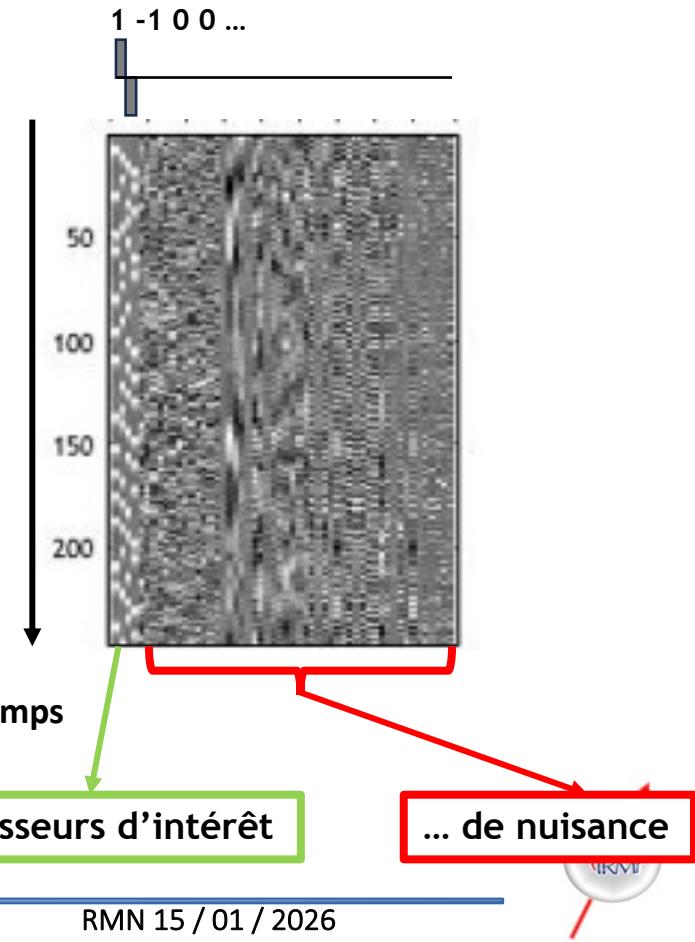
Régresseurs d'intérêt

... de nuisance

# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour l'IRMf d'activation

En chaque voxel (analyse univariée !!) :

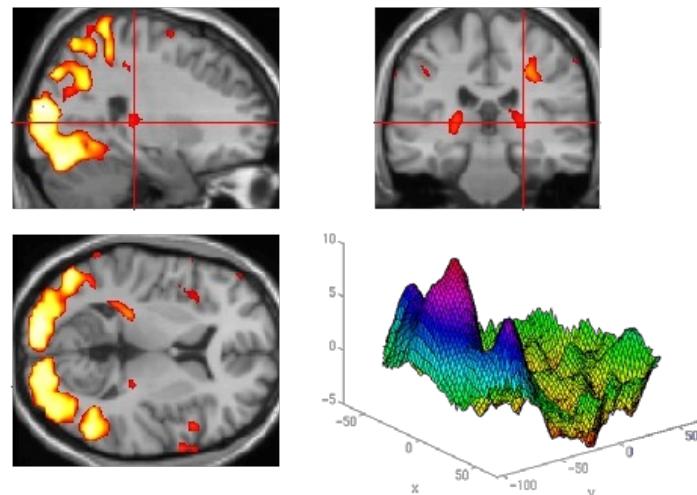
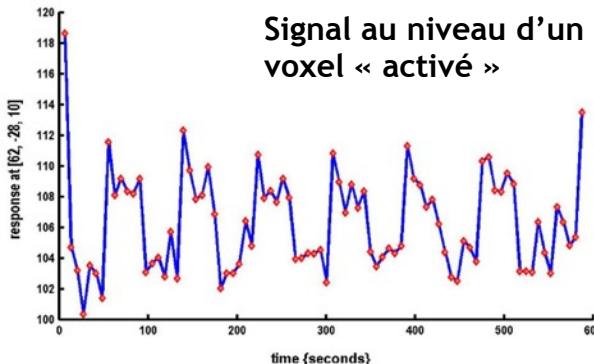
- estimation des coefficients de régression  
(méthode des moindres carrés : LMS)
- contraste d'intérêt (ex : 1 -1 0 0 0 ...)
- test statistique (contraste / variance résiduelle)



# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour l'IRMf d'activation

En chaque voxel (analyse univariée !!) :

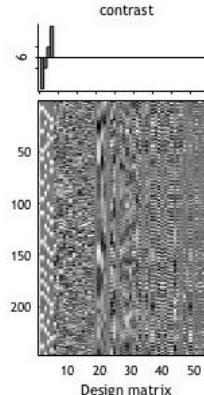
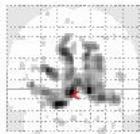
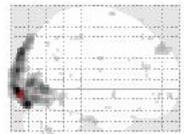
- estimation des coefficients de régression  
(méthode des moindres carrés : LMS)
- contraste d'intérêt (ex : 1 -1 0 0 0 ...)
- test statistique (contraste / variance résiduelle)
- seuillage
- correction pour les comparaisons multiples  
(FWE, FDR, ...) : au niveau du voxel ou du cluster



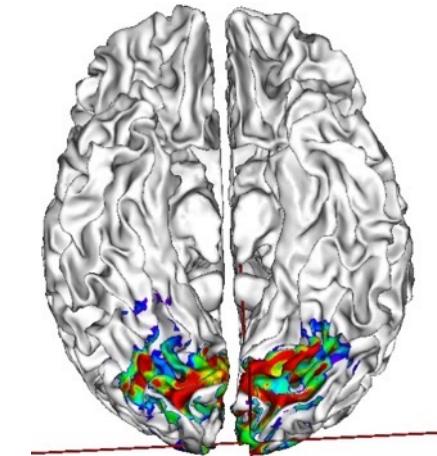
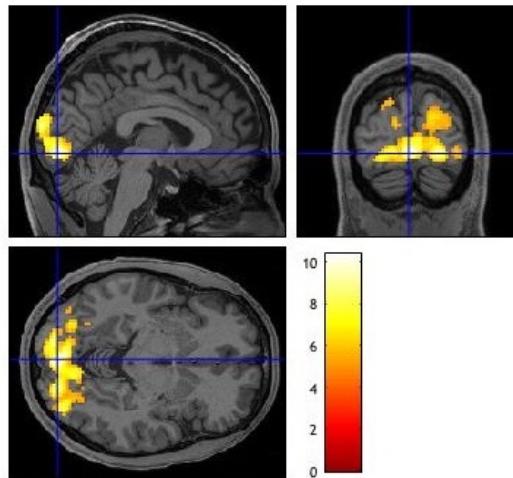
# Méthodologies : Analyse des images : GLM pour l'IRMf d'activation

[2.5, -96, -4.5]

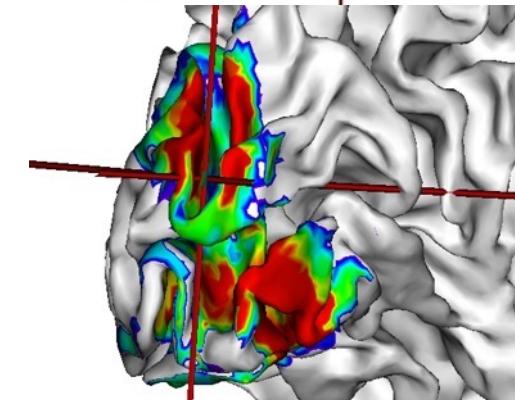
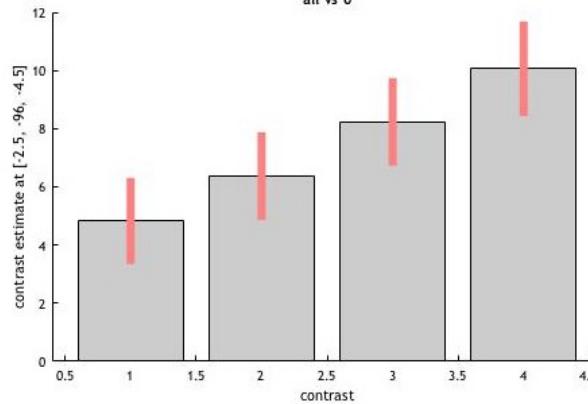
Parametric\_effects\_contrast\_visual



SPM{T<sub>187</sub>}

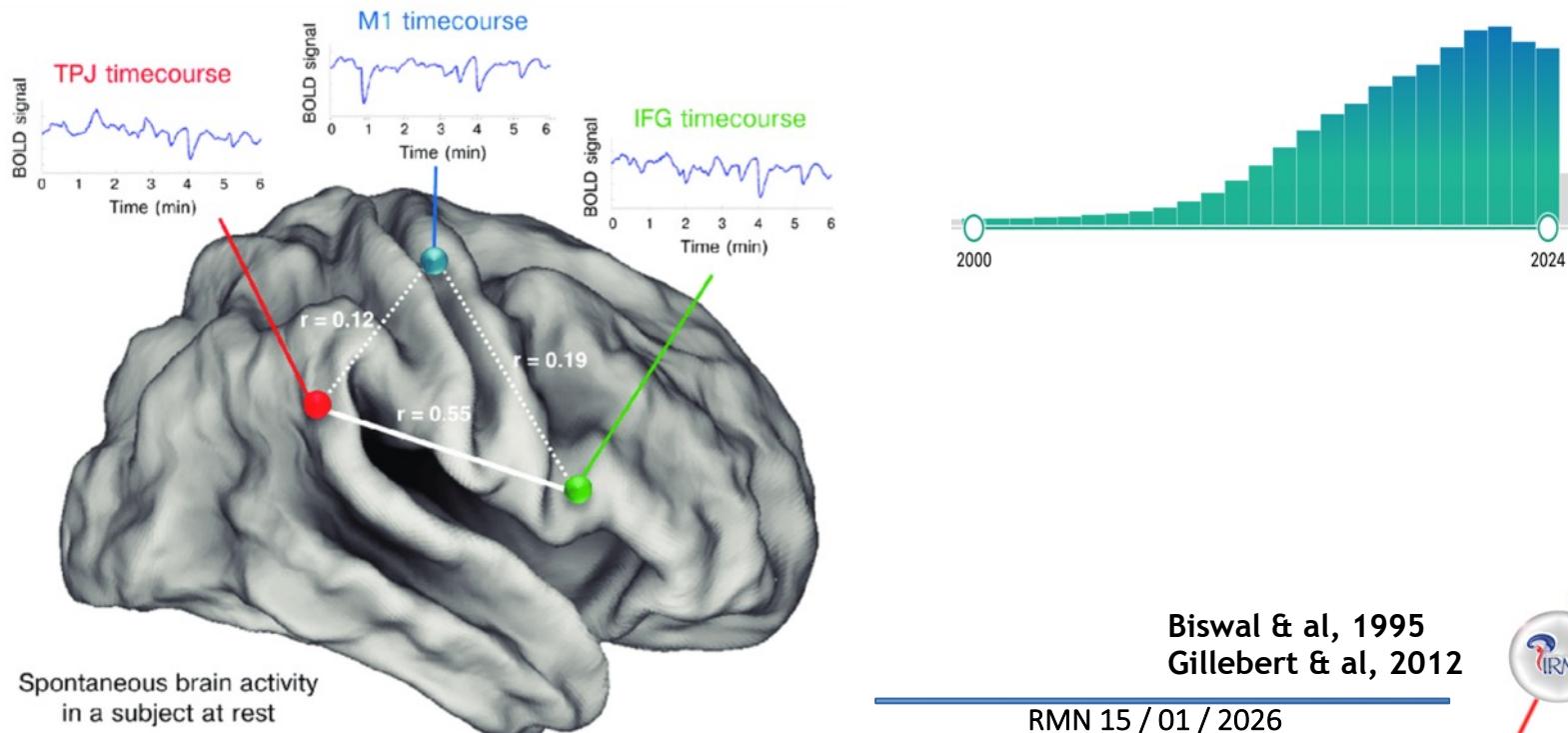


Contrast estimates and 90% C.I.  
all vs 0



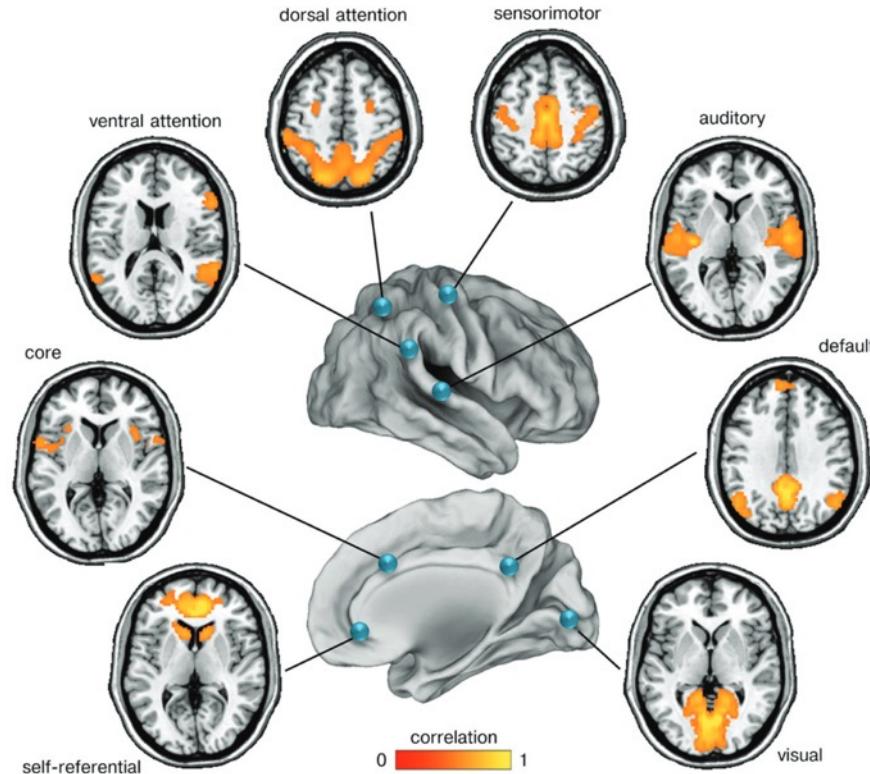
# Méthodologies : Analyses & paradigmes ( $\approx$ connectivité)

- Repos (resting-state fMRI) : facile à mettre en œuvre  $\rightarrow$  très répandu  
 $\rightarrow$  Corrélations dans la bande fréquentielle (0.01 - 0.1 Hz)  
Interprétation : « connectivité fonctionnelle » (discutable ...)



# Méthodologies : Analyses & paradigmes ( $\approx$ connectivité)

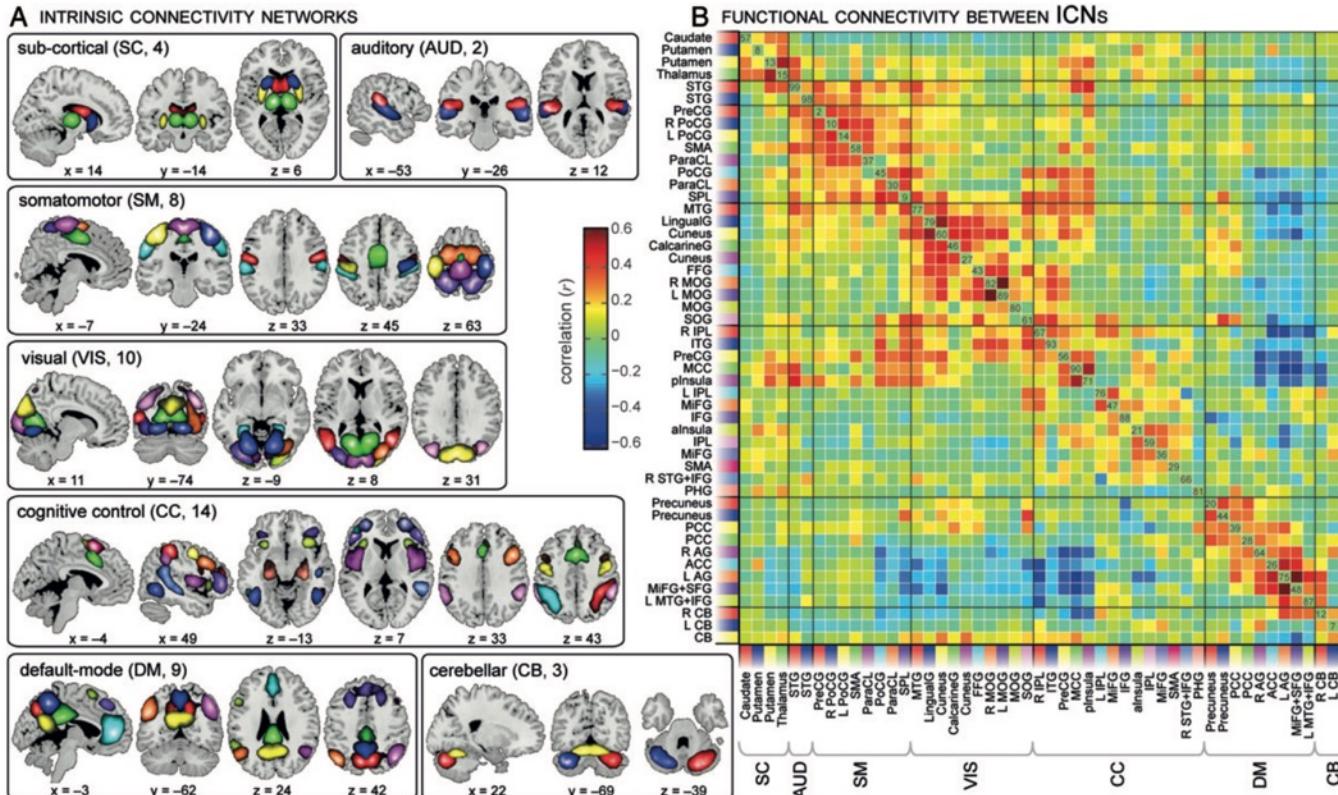
- Repos (resting-state fMRI) :  
→ Analyses des grands réseaux fonctionnels



Biswal & al, 1995  
Gillebert & al, 2012

# Méthodologies : Analyses & paradigmes ( $\approx$ connectivité)

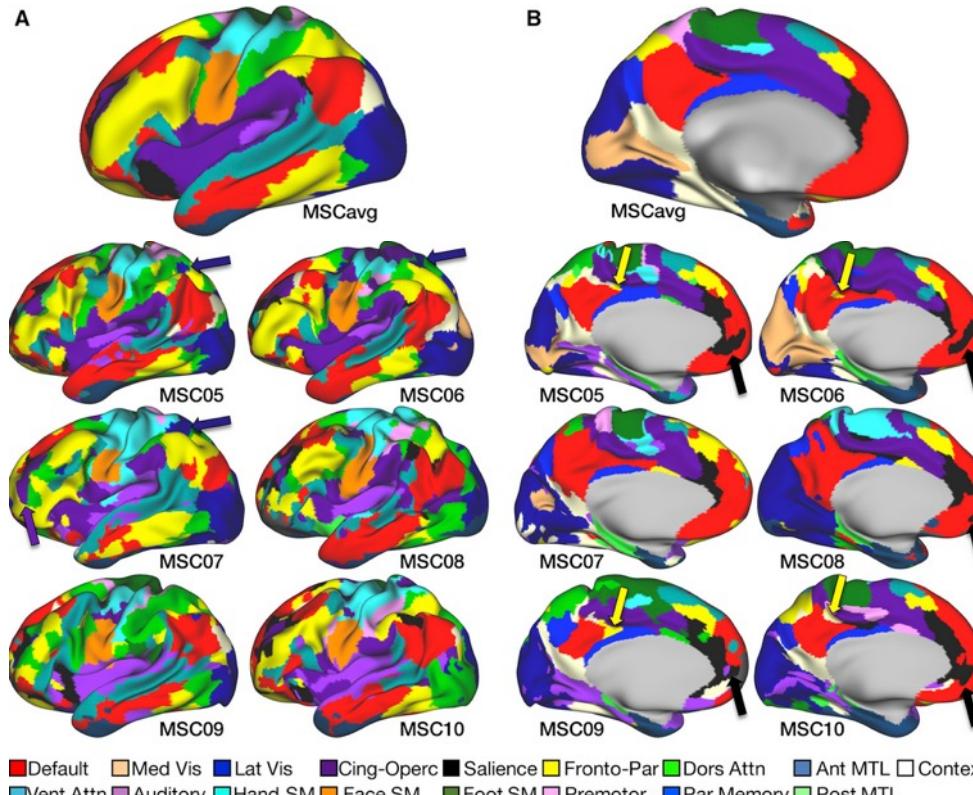
- Repos (resting-state fMRI) :  
→ Analyses des grands réseaux fonctionnels



Allen & al , 2012

# Méthodologies : Analyses & paradigmes ( $\approx$ connectivité)

- Repos (resting-state fMRI) :  
→ Analyses des grands réseaux fonctionnels → variabilités inter-individuelles !!

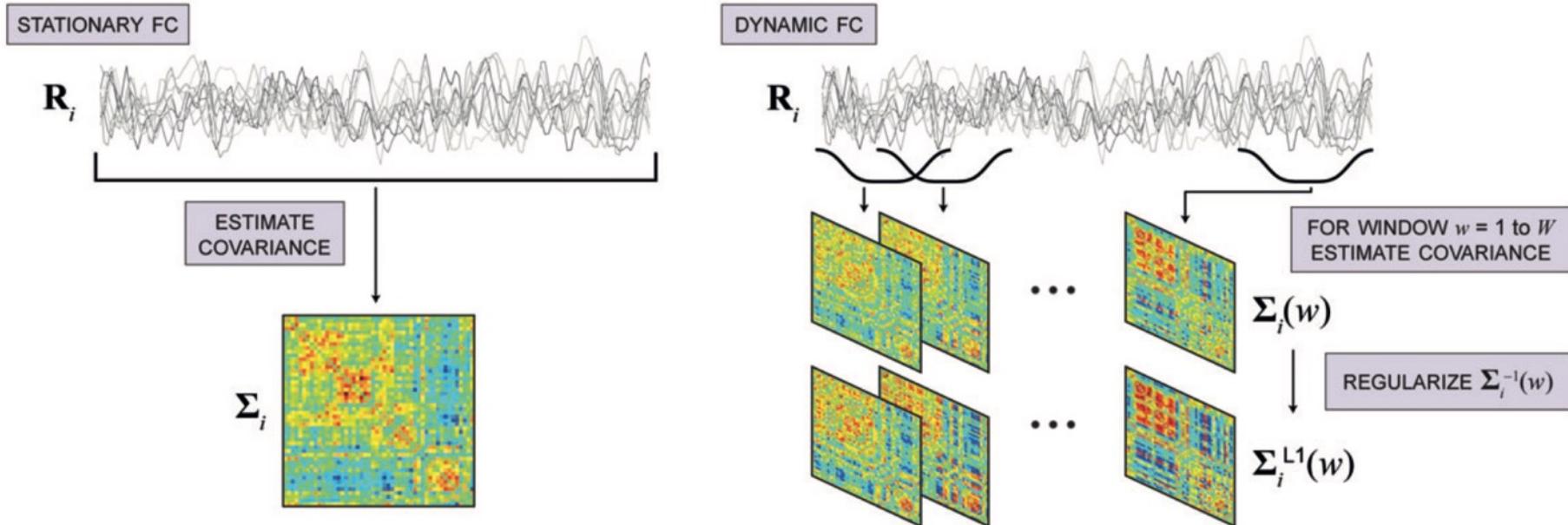


Gordon & al , 2017

RMN 15 / 01 / 2026

# Méthodologies : Analyses & paradigmes ( $\approx$ connectivité)

- Repos (resting-state fMRI)  
→ Analyses dynamiques : fenêtres temporelles glissantes



# Méthodologies : Analyses & paradigmes ( $\approx$ connectivité)

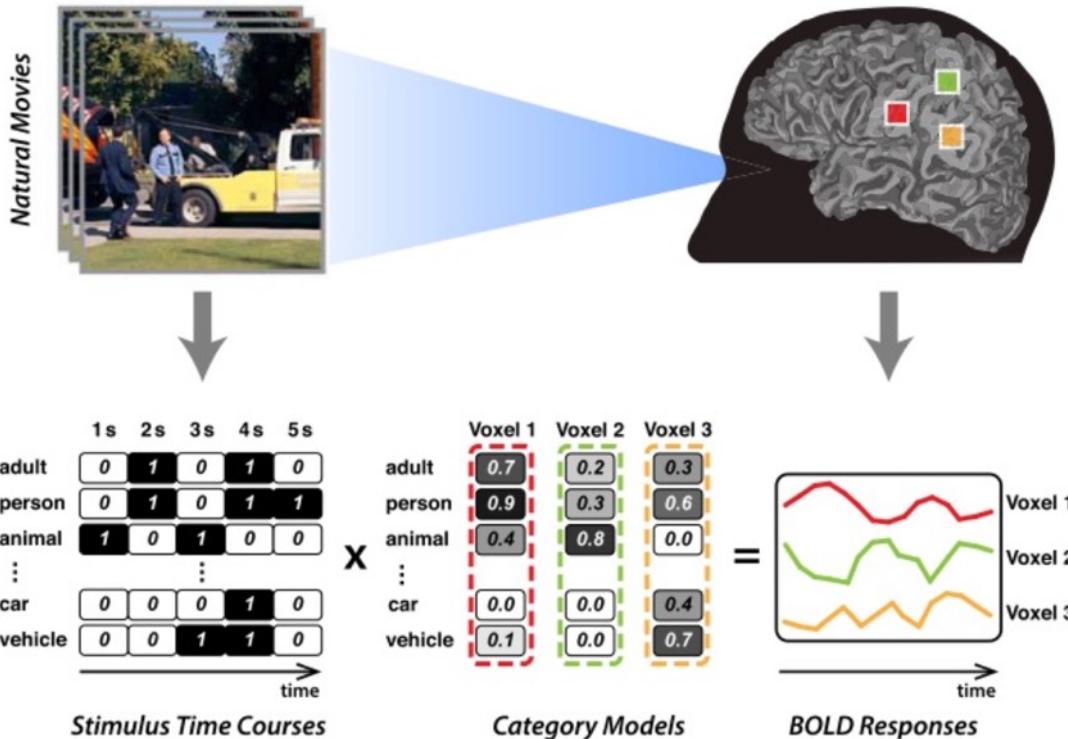
- Connectivité pendant la réalisation de tâches :
  - Connectivité effective
  - PsychoPhysiological Interactions (PPI)
  - Structural Equation Models (SEM)
- Dynamic Causal Models (DCM) : problème avec la forme lente et variable de la HRF
- Granger Causality : idem

# Méthodologies : Analyses & paradigmes

- protocoles naturalistes : visionnage de film, conversation ...

→ Catégorisation des évènements

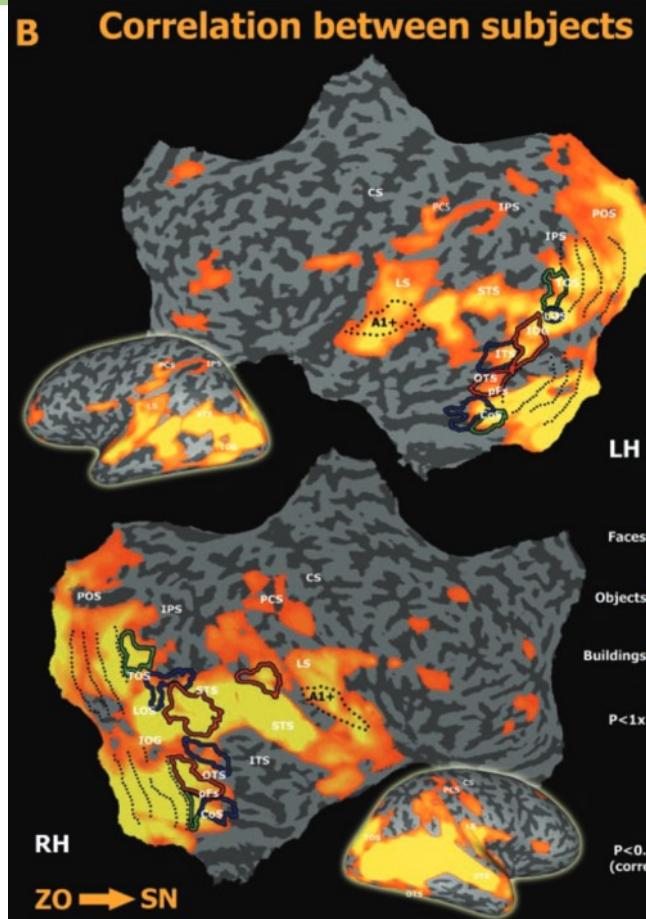
→ Catégorisation des régions cérébrales



Huth & al , 2012

# Méthodologies : Analyses & paradigms

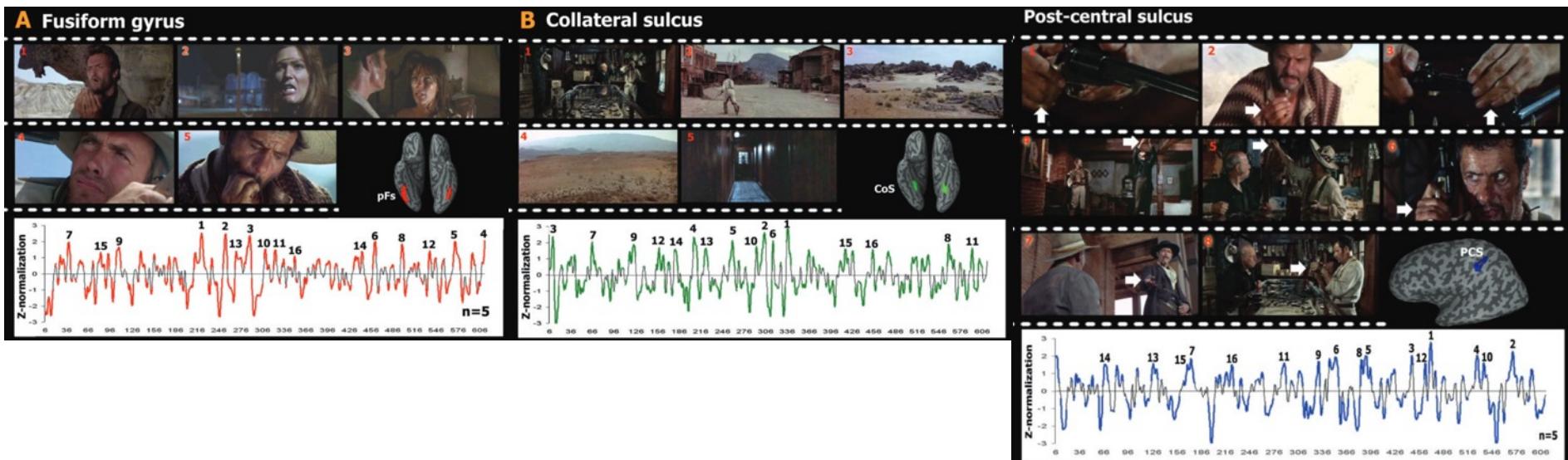
- protocoles naturalistes : visionnage de film
- Corrélation inter-sujets
- Réponses cérébrales stables induites par le visionnage  
(suppression des variabilités physiologiques ...)



Hasson & al , 2004

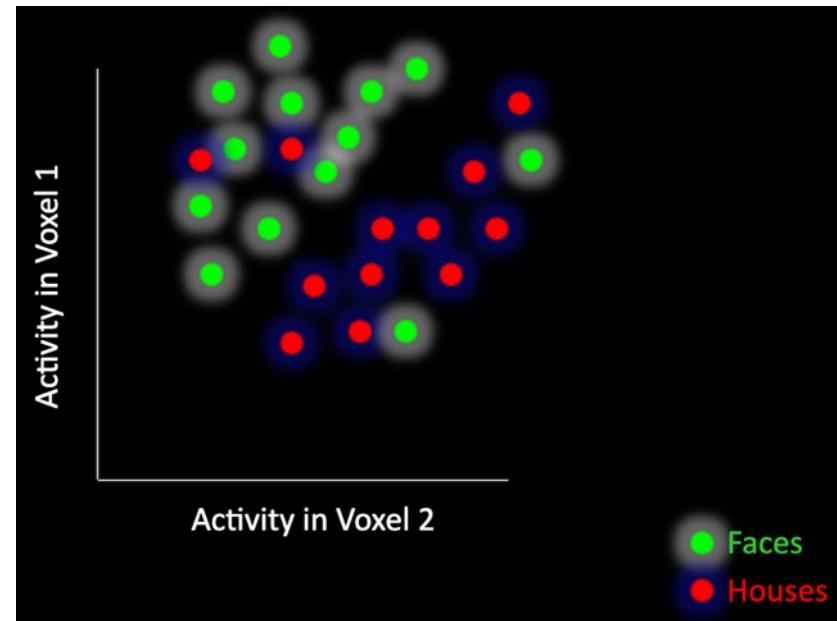
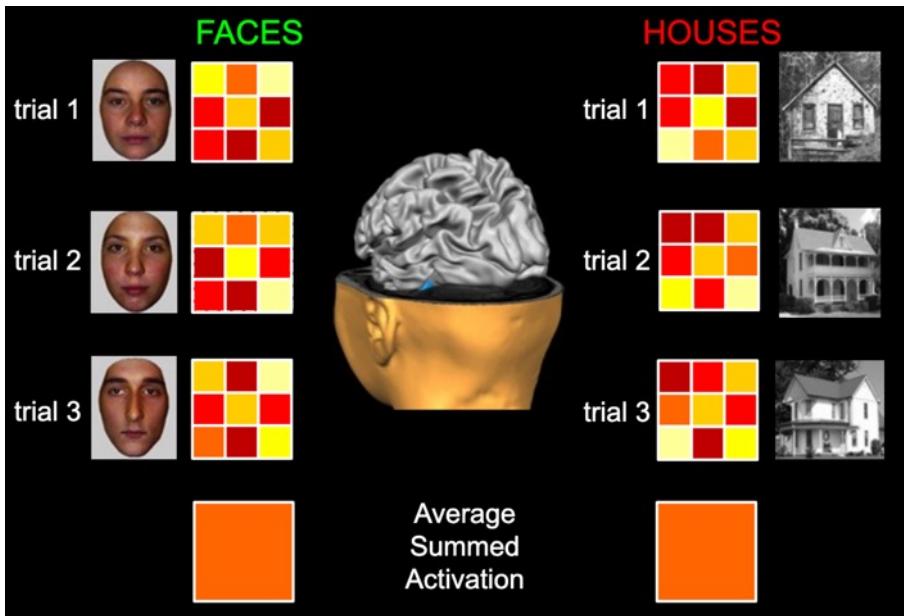
# Méthodologies : Analyses & paradigms

- protocoles naturalistes : visionnage de film  
→ sélectivité fonctionnelle révélée par corrélation inverse (reverse correlation)



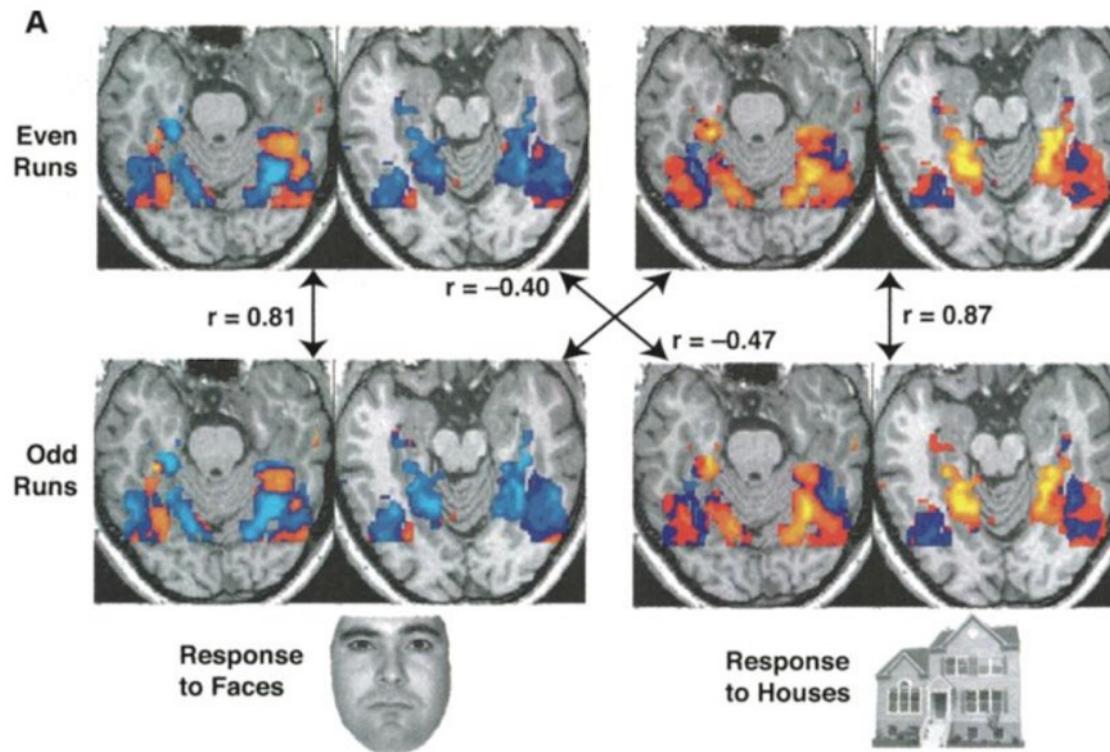
# Méthodologies : Analyses Multi-variées

- Analyse des profils spatiaux de réponses : Multi-Variate Pattern Analysis (MVPA)



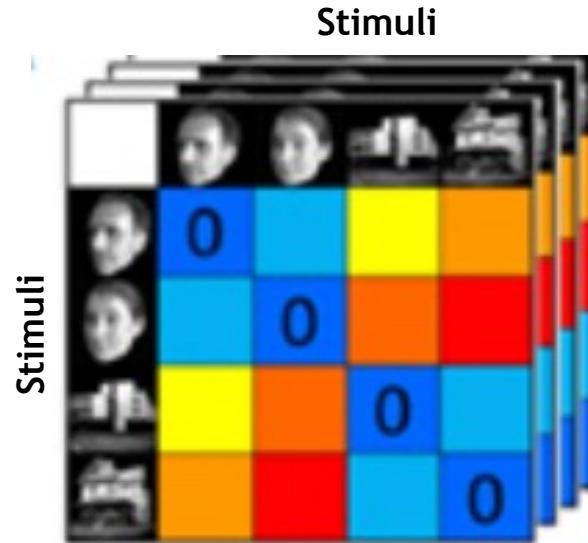
# Méthodologies : Analyses Multi-variées

- Analyse des profils spatiaux de réponses : Multi-Variate Pattern Analysis (MVPA)



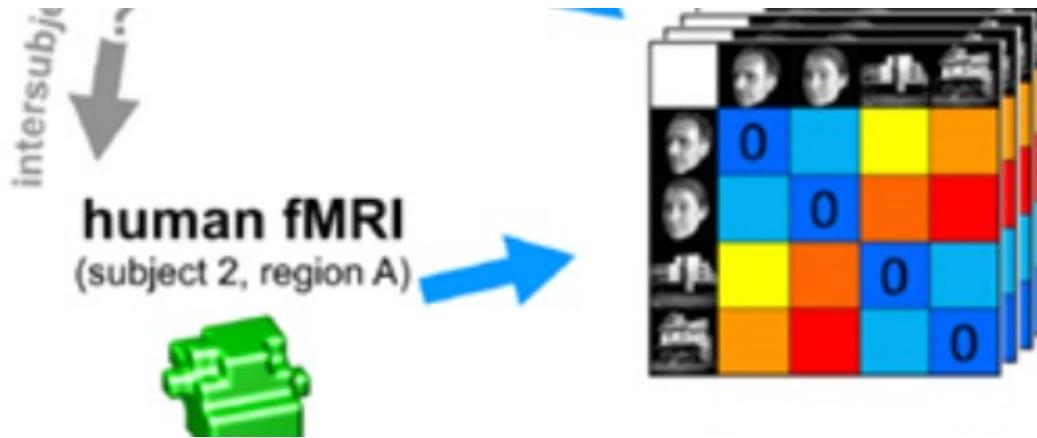
Haxby & al, 2001

- Analyse par similarité représentationnelle : Representational Similarity Analysis (RSA)



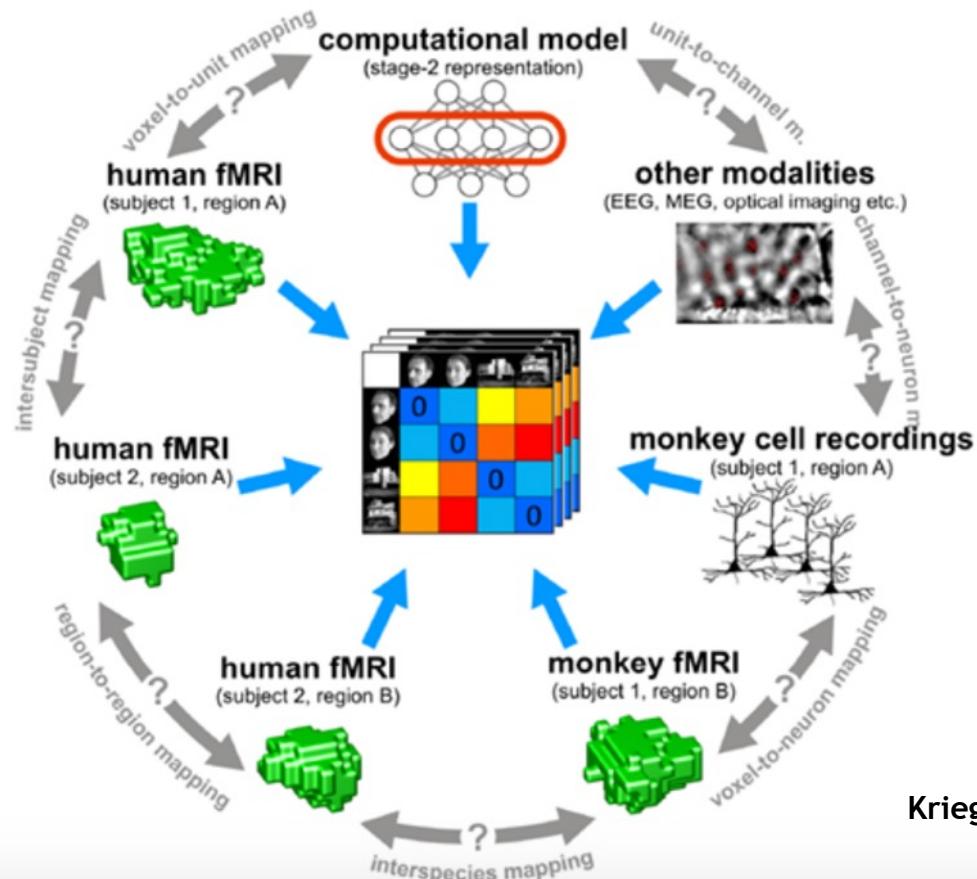
# Méthodologies : Analyses Multi-variées

- Analyse par similarité représentationnelle : Representational Similarity Analysis (RSA)



# Méthodologies : Analyses Multi-variées

- Analyse par similarité représentationnelle : Representational Similarity Analysis (RSA)

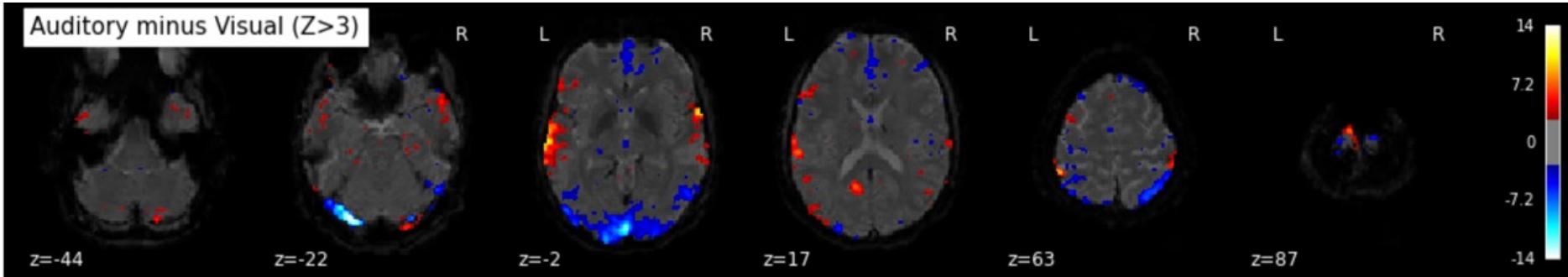


Kriegeskorte & al, 2008

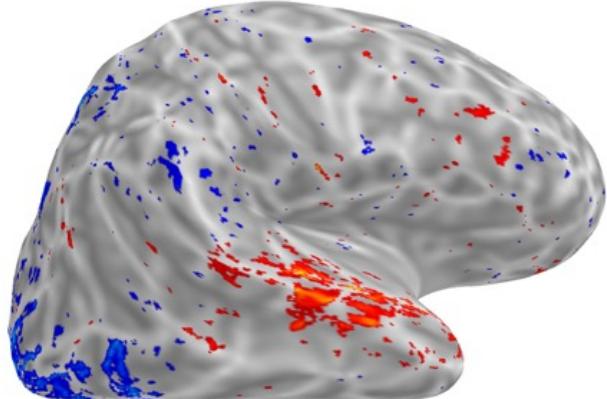
/ 2026

# Méthodologies : Analyse des images : volume 3D ou surface ?

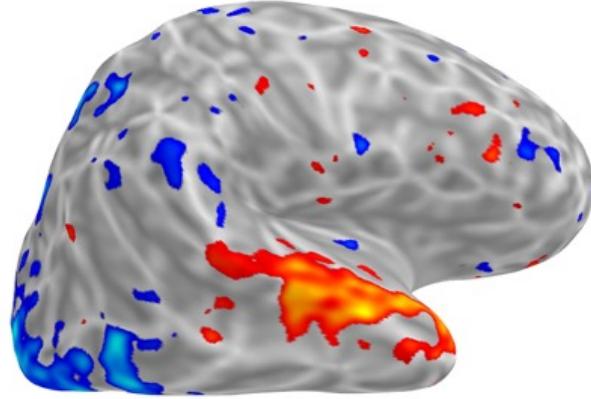
## Lissage et analyse en 3D



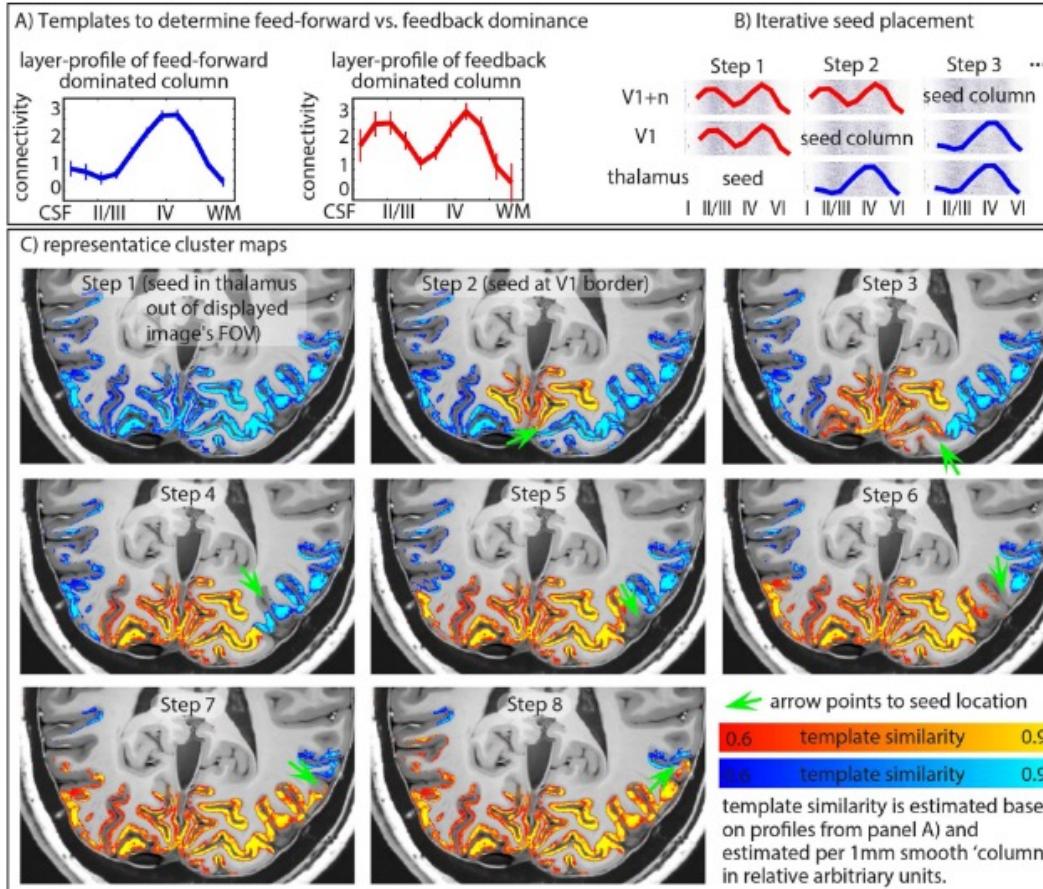
Analyse en surface (cortex)



Lissage et analyse en surface (cortex)



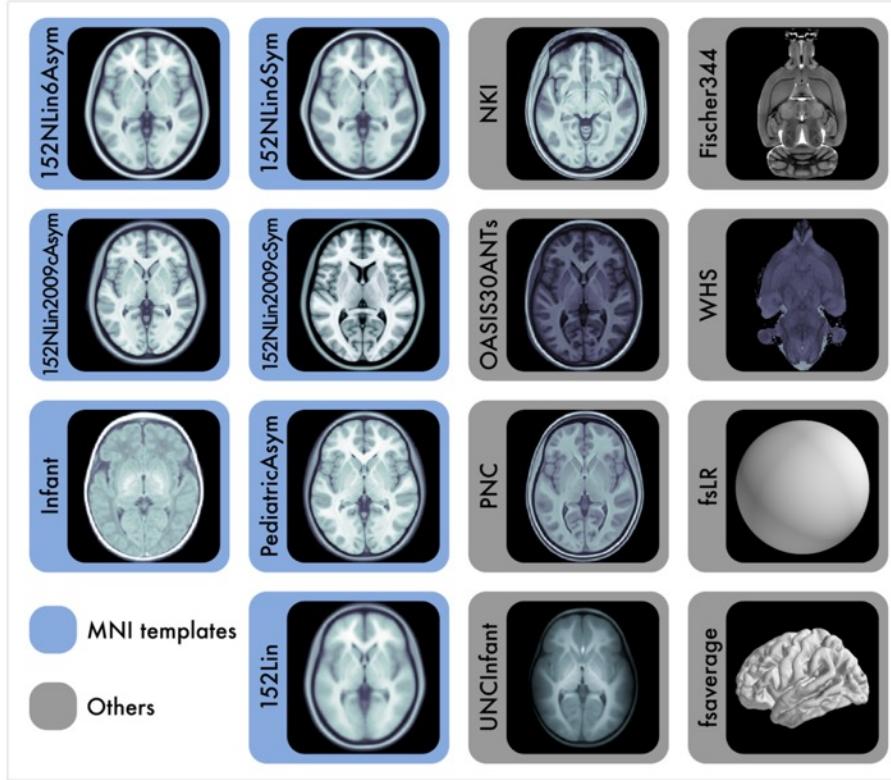
# Méthodologies : Analyse des images : laminaire ?



Huber & al, 2011

# Méthodologies : Analyse des images : étude de groupe

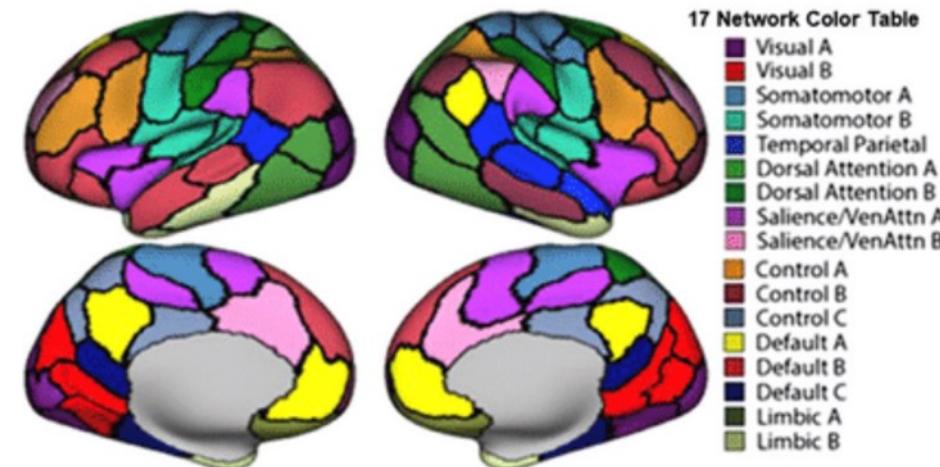
Cadre commun : Normalisation vers un template



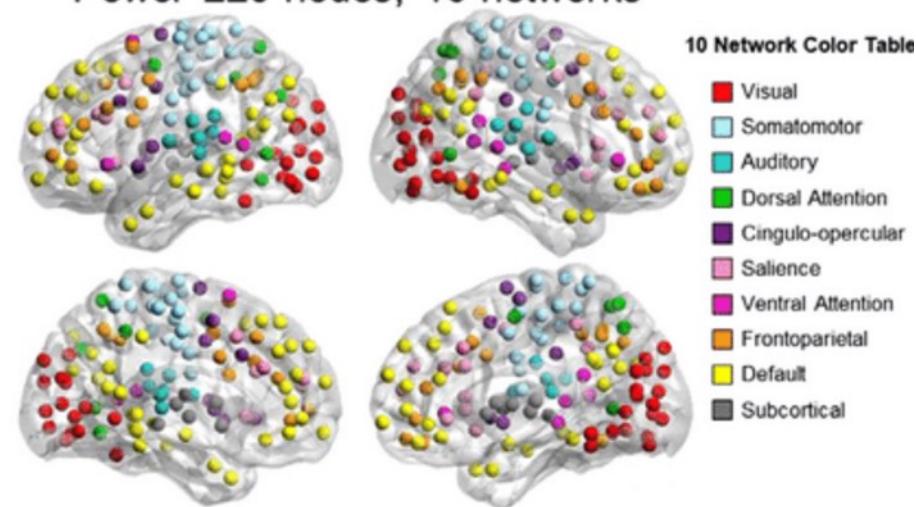
# Méthodologies : Analyse des images : étude de groupe

Cadre commun : Normalisation vers un template : atlas structurel et/ou fonctionnel

Schaefer 100 parcels, 17 networks

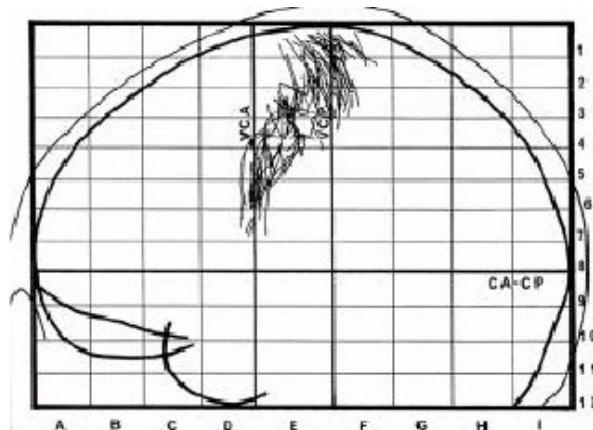


Power 229 nodes, 10 networks



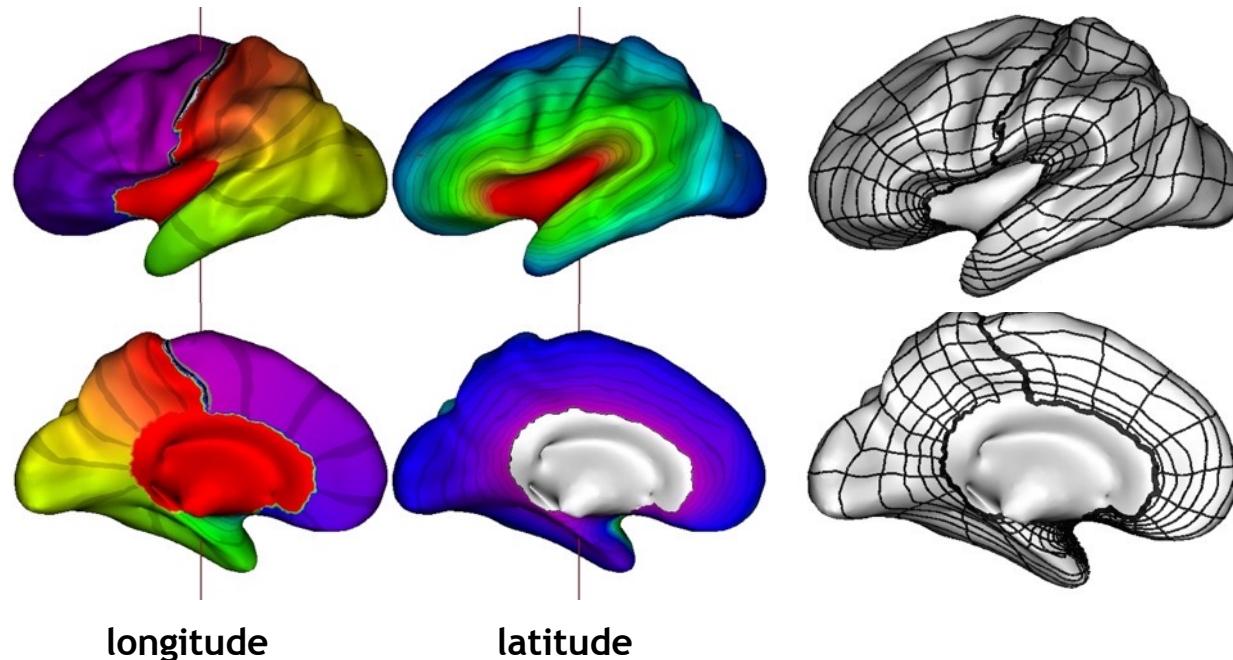
# Méthodologies : Analyse des images : étude de groupe

Problème : variabilité inter-individuelle



## Méthodologies : Analyse des images : étude de groupe

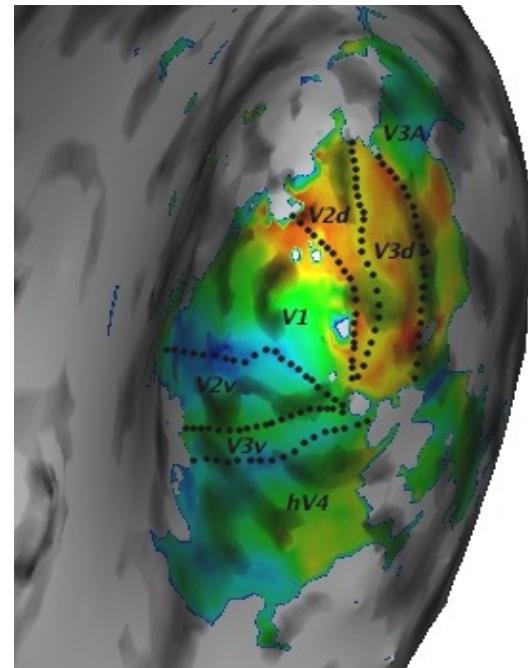
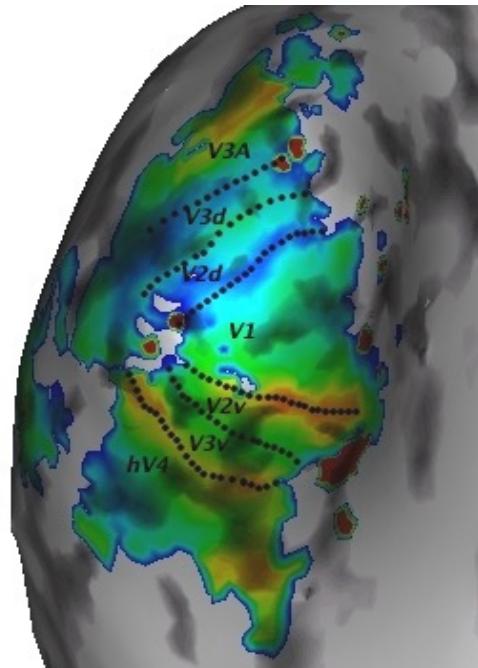
Prise en compte des variabilités structurales et/ou fonctionnelles  
→ Un modèle générique d'organisation de l'anatomie corticale  
(fondé sur les sillons individuels)



## Méthodologies : Analyse des images : étude de groupe

Prise en compte des variabilités structurales et/ou fonctionnelles  
→ Régions d'intérêt (ROI) fonctionnelles (functional localizers)

Exemple : Rétinotopie

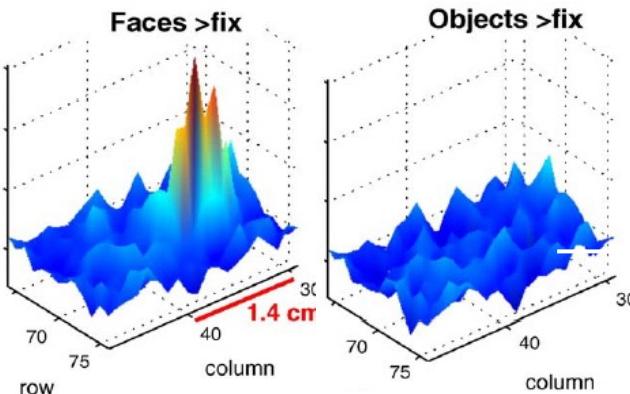


# Méthodologies : Analyse des images : étude de groupe

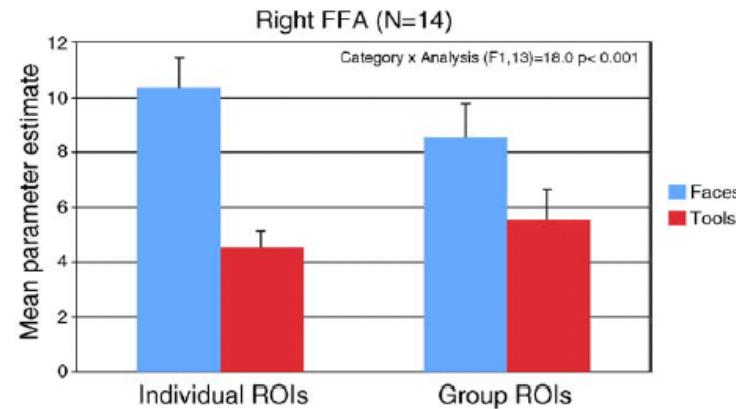
Prise en compte des variabilités structurales et/ou fonctionnelles  
→ Régions d'intérêt (ROI) fonctionnelles (functional localizers)

Exemple : Fusiform Face Area (FFA)

Réponse pour un sujet → ROI individuelle

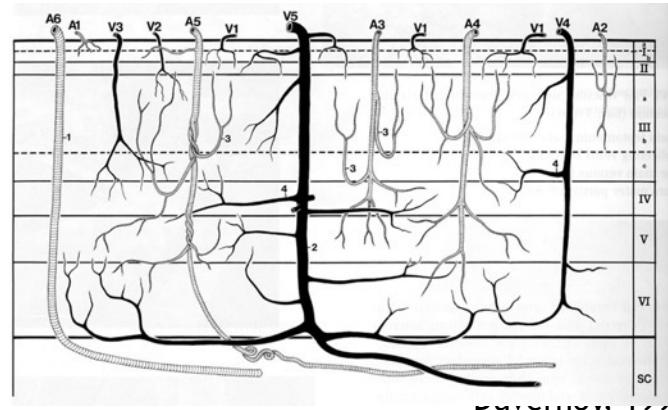
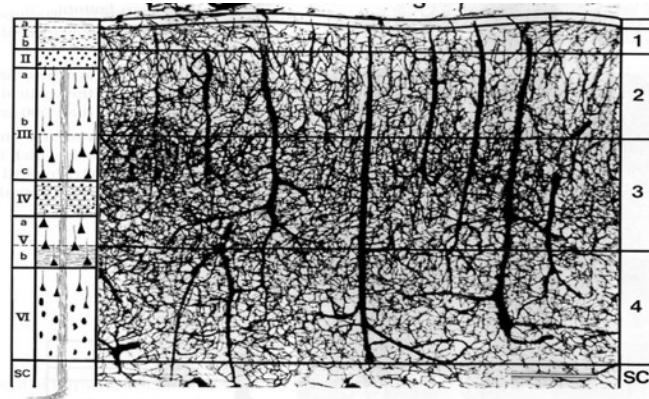
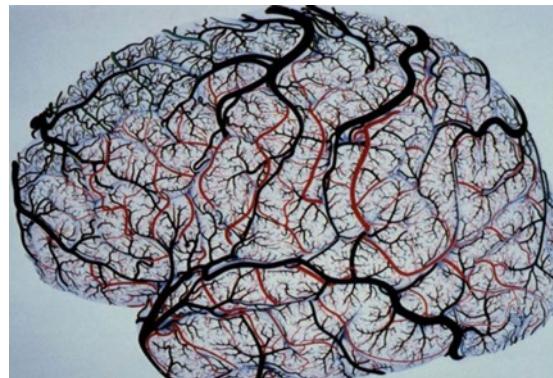


→ ROI individuelle plus sélective que ROI de groupe

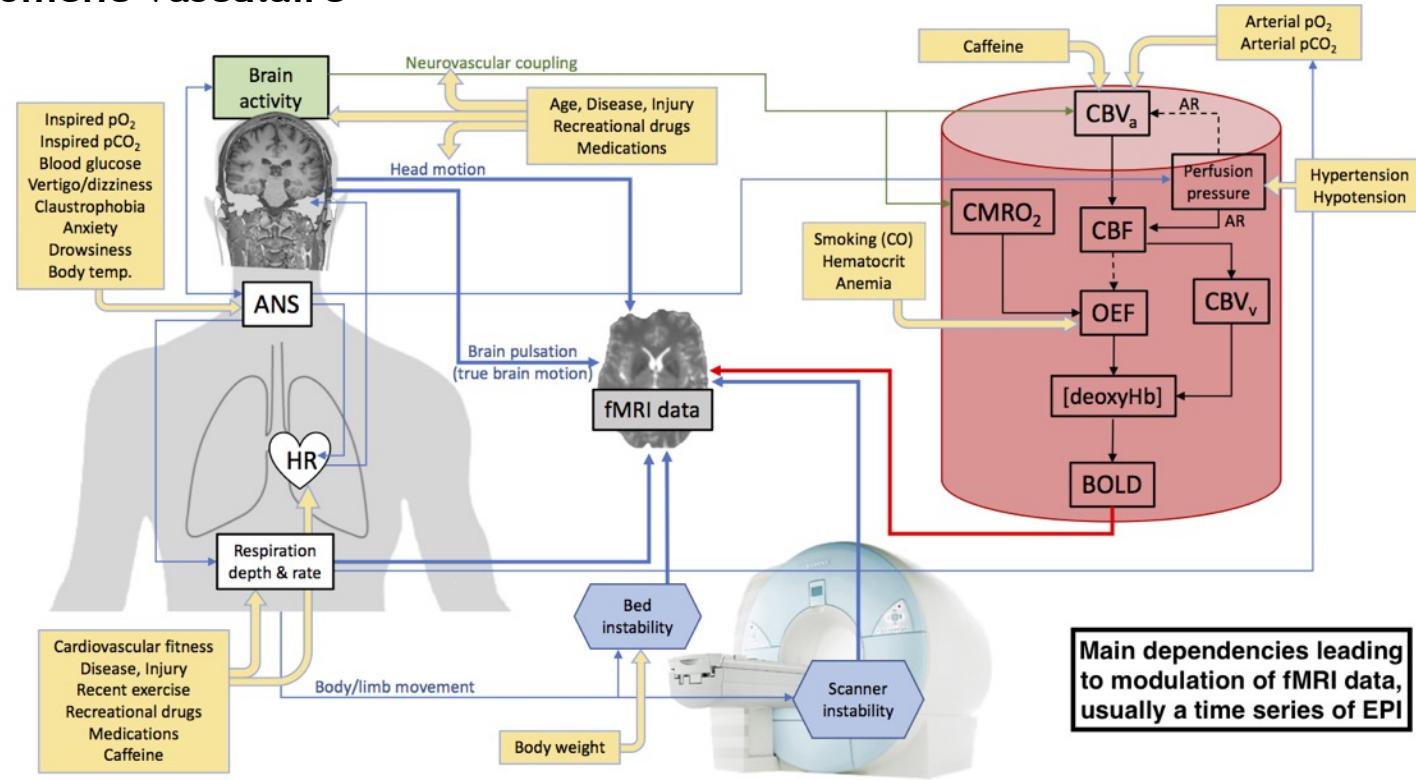


Saxe & al, 2006

## BOLD : phénomène vasculaire



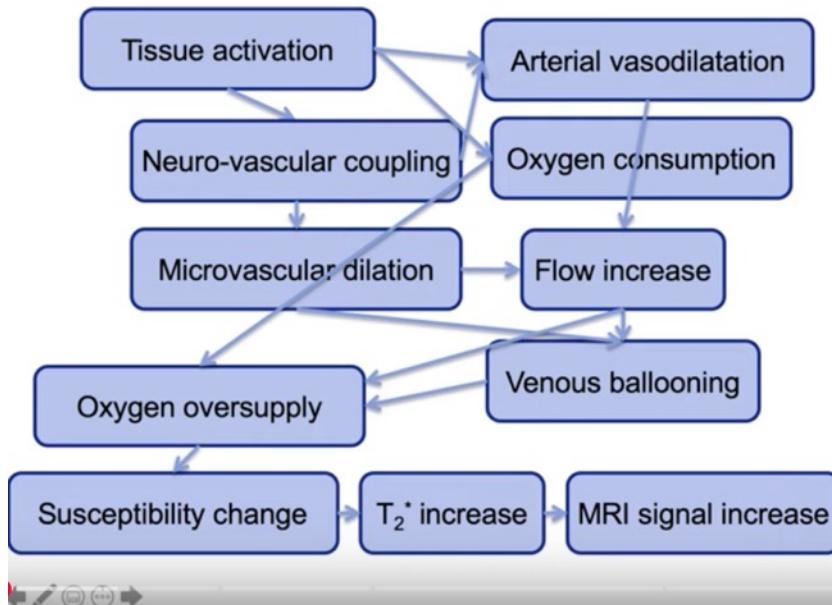
## BOLD : phénomène vasculaire



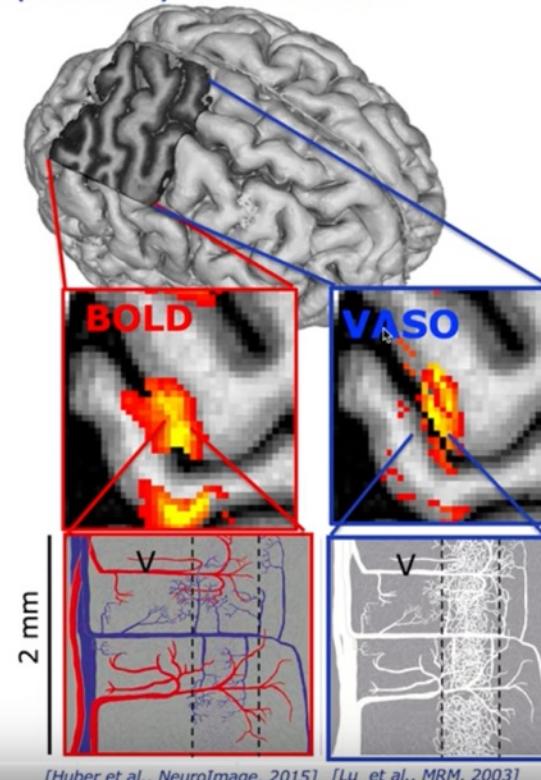
## Mesure indirecte de l'activité cérébrale : quantification & spécificité spatiale ?

### Quantifiability of GE-BOLD

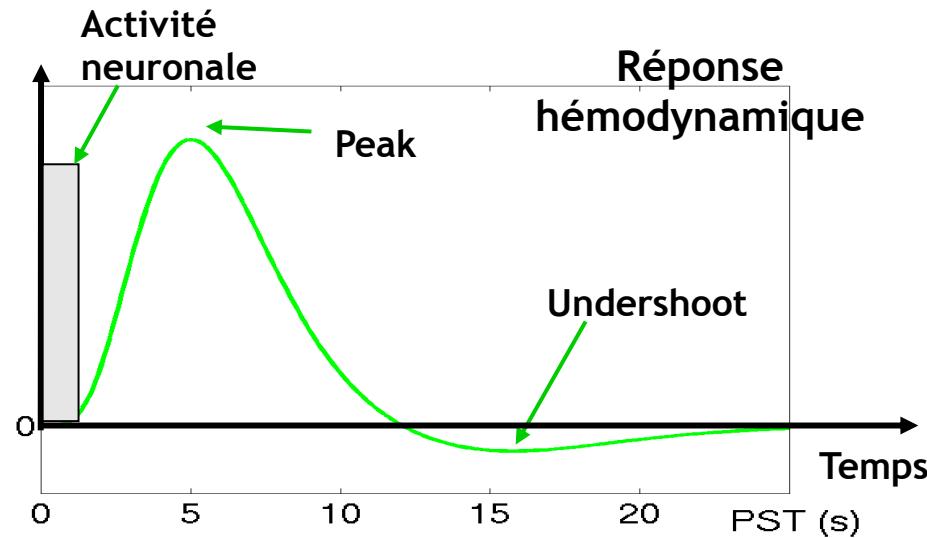
BOLD contrast origin is not straight-forward:



### Specificity of GE-BOLD



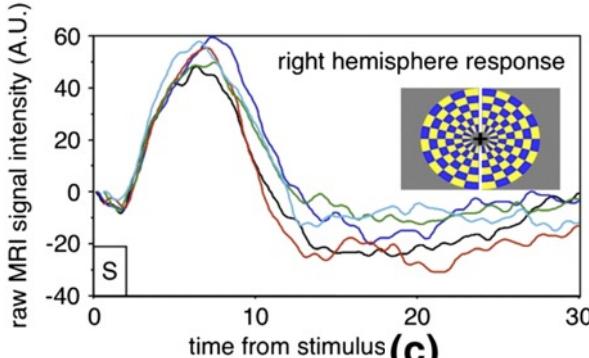
## Mesure indirecte de l'activité cérébrale : précision temporelle ?



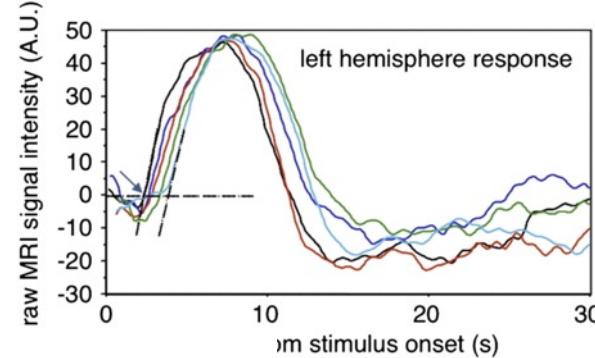
Réponse hémodynamique (HRF) : pas “canonique” !  
Lisse, lente, a priori variable selon les régions cérébrales et les sujets

## Mesure indirecte de l'activité cérébrale : précision temporelle ?

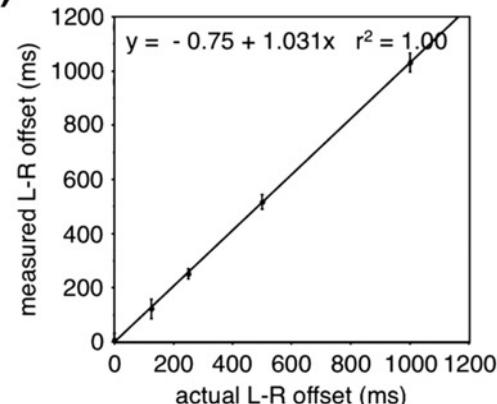
(a)



(b)



(c)

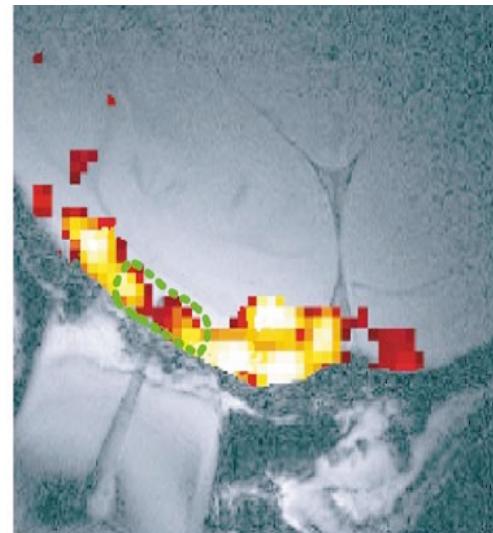
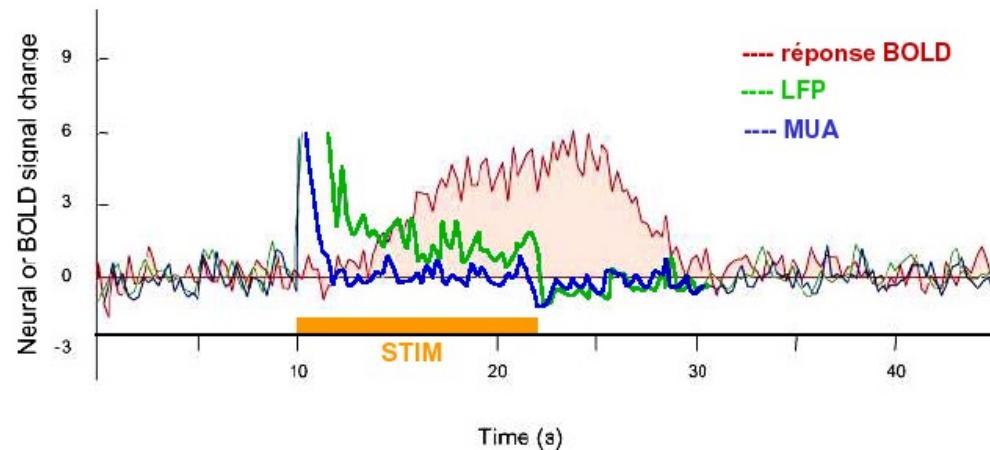


Protocole astucieux  
→ chronométrie mentale !

Menon & al, 1998

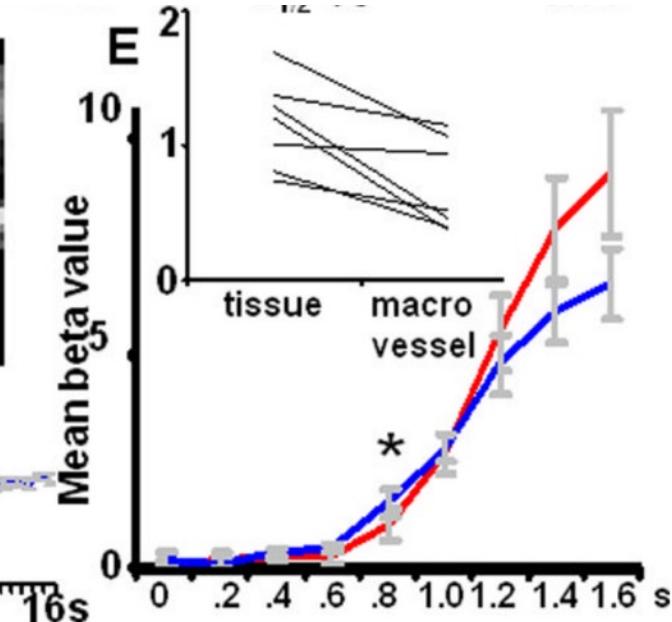
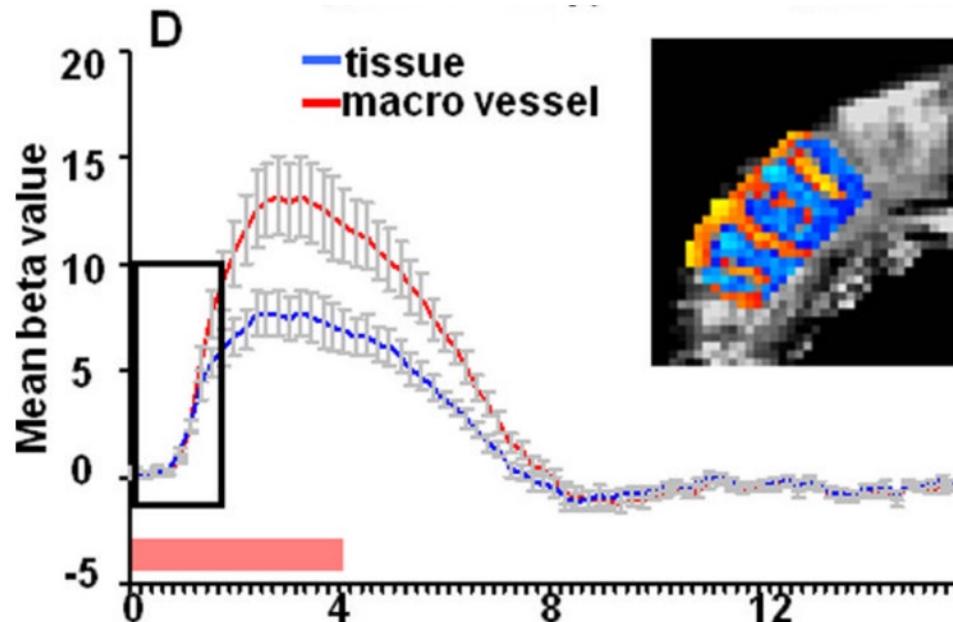
## Mesure indirecte de l'activité cérébrale : quel type d'activité ?

Chez le singe anesthésié, enregistrements conjoints :  
IRMf & signaux électriques neuronaux par microélectrode



La réponse BOLD semble corréler plutôt avec les LFP qu'avec les MUA : a priori plus sensible aux évènements dendritiques et synaptiques qu'aux potentiels d'action

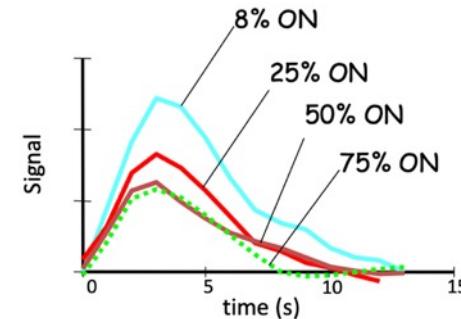
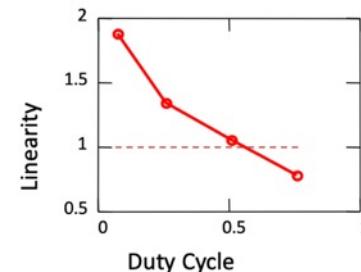
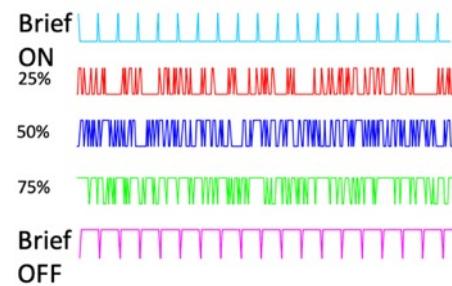
Origine de la réponse BOLD : tissus (micro-vaisseaux) & macro-vaisseaux  
(chez le rat à 11,7T :  $150 \times 150 \times 500 \mu\text{m}$  / TR = 200ms)



Non-linéarité de la réponse BOLD !

Par rapport à une simple convolution linéaire, l'amplitude de la réponse BOLD est :

- amplifiée pour des stimuli courts
- atténuée pour des stimuli longs

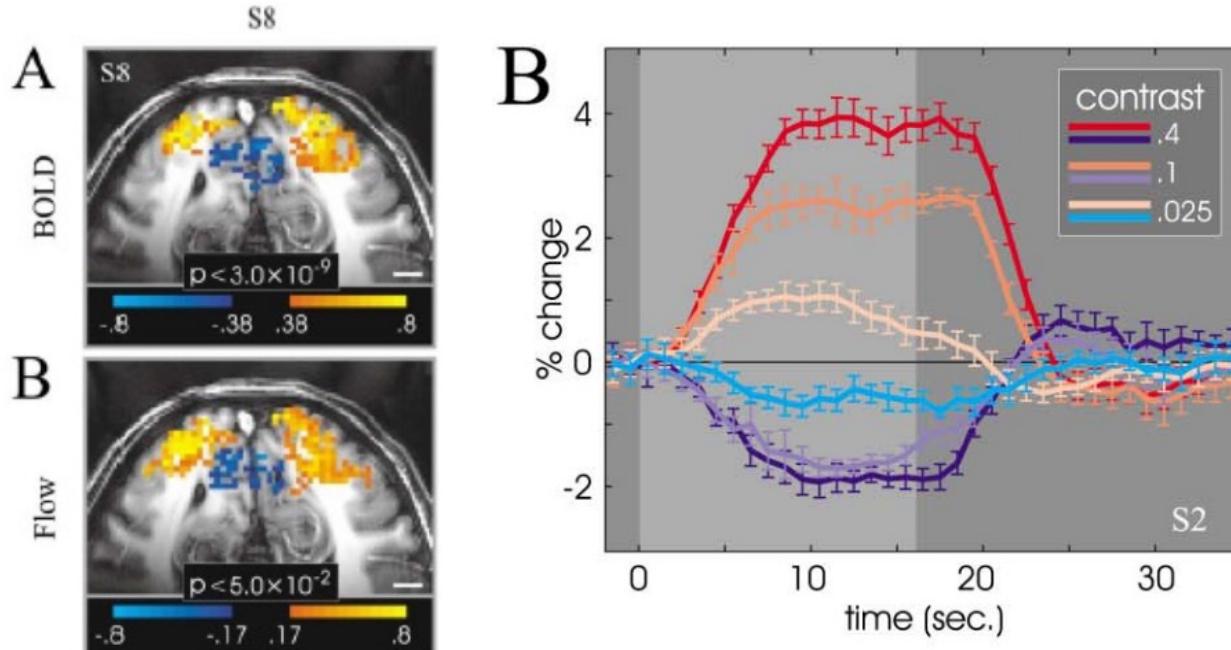


*Deconvolved Response*

Birn & al 2005

Réponse BOLD : positive ET négative

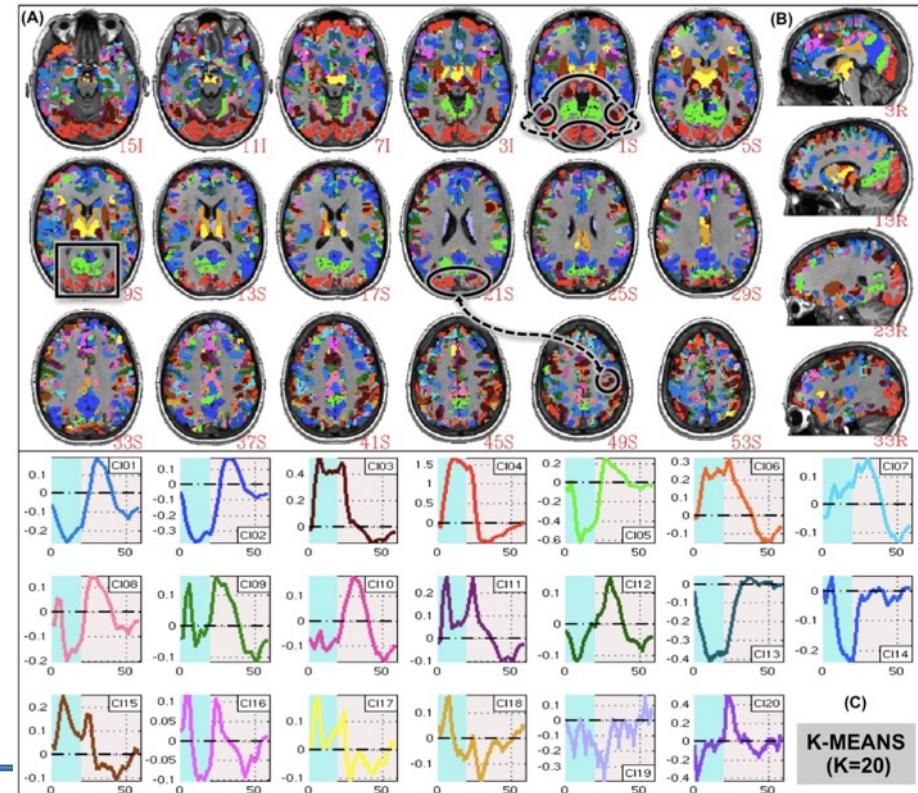
(réduction de l'activité neuronale & possible composante hémodynamique)



Schmucl et al, 2002

Moyenne de la réponse BOLD sur 9 heures, 100 runs  
Modèle libre simplement synchronisé sur le stimulus

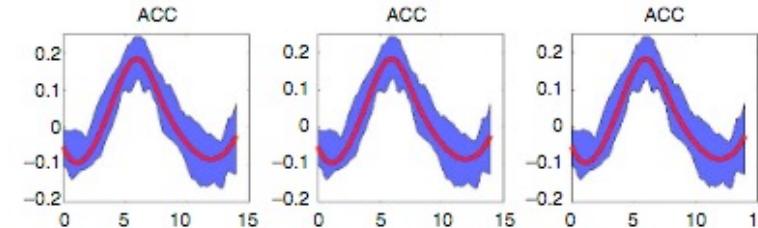
- Tout le cerveau « réagit » ?
- Formes variables



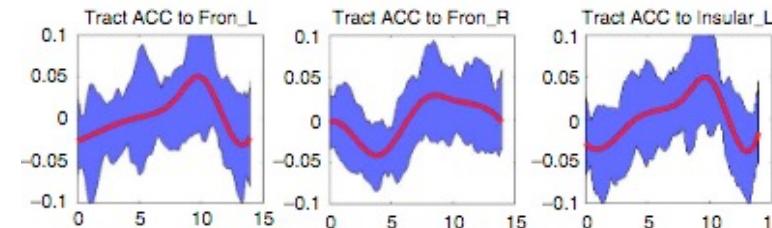
Réponse BOLD dans la substance blanche ?

- faible, variable, retardée
- reproductible ?

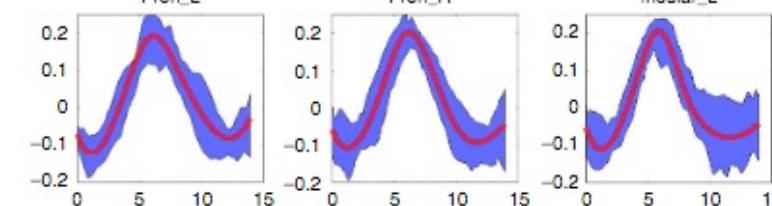
Cortex (région A)



Substance blanche  
Faisceau A-B



Cortex (région B)



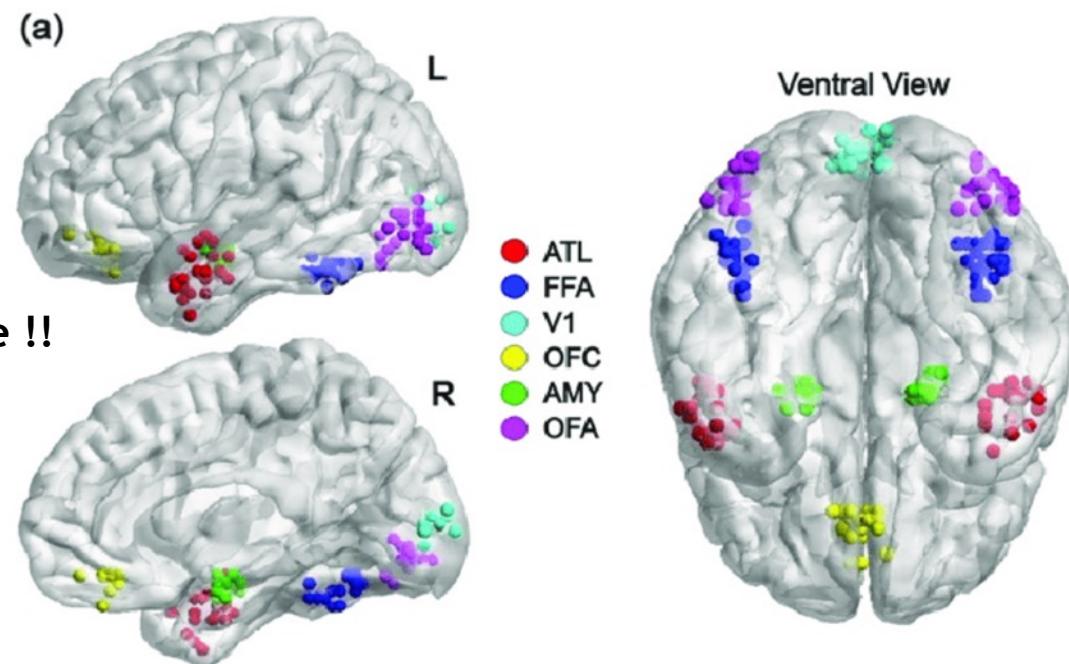
Li & al (2019)

- Cartographie fonctionnelle (tâche) : encore et encore !

- M1 : différents segments corporels
- S1 : différents segments corporels
- FFA (Fusiform Face Area)
- PPA (Parahippocampal Place Area)
- VWFA (Visual Word Form Area)
- TVA (Temporal Voice Area)

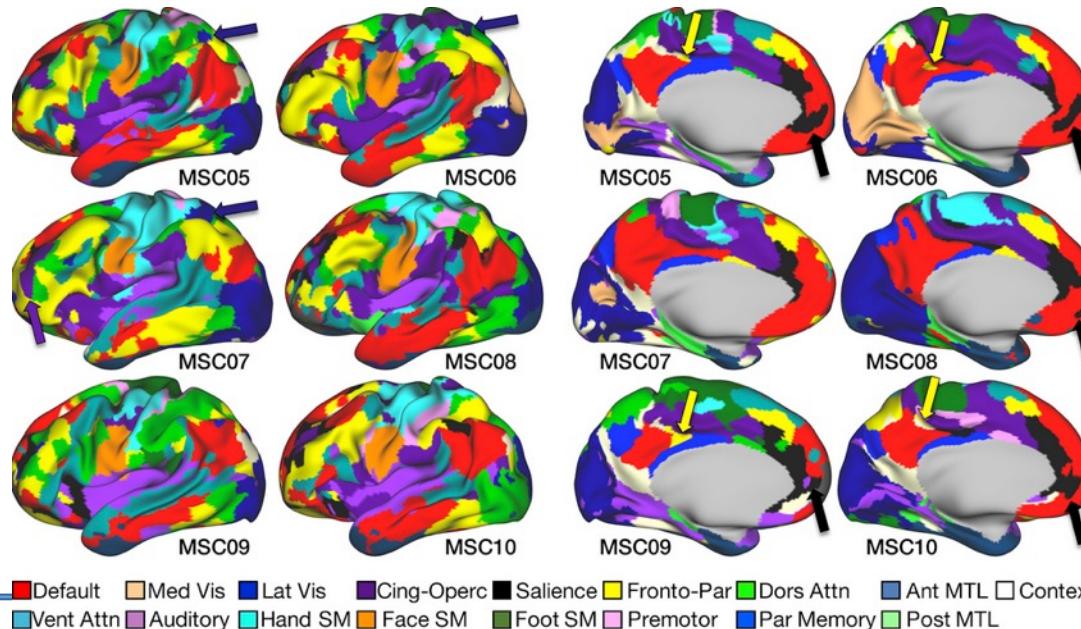
...

de plus en plus fine & individualisée !!



# IRMf : quelques découvertes ...

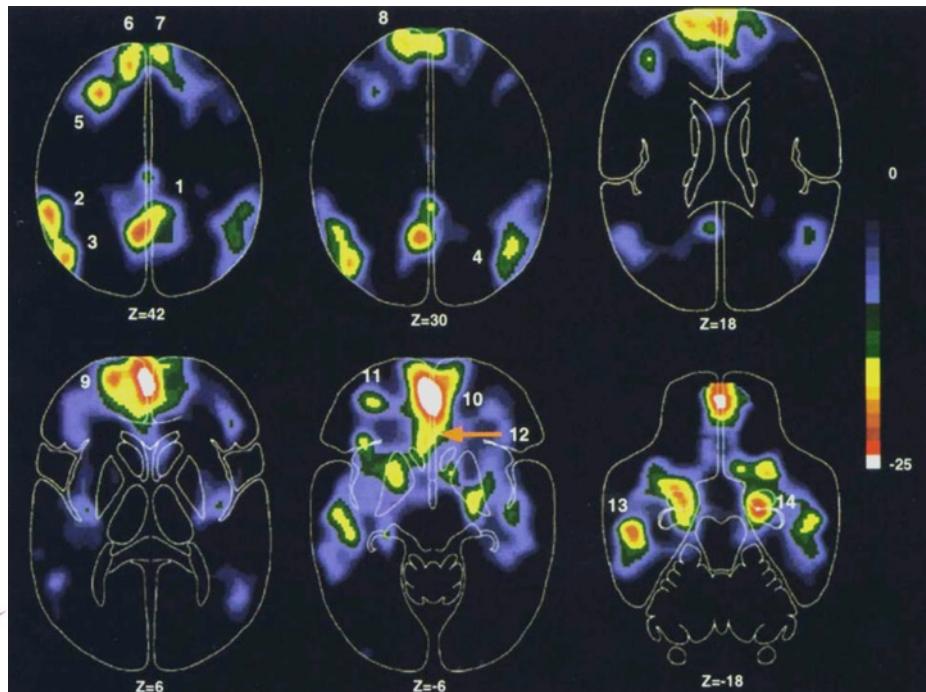
- Cartographie fonctionnelle (repos) : encore et encore !
  - Réseaux : mode par défaut, visuels (latéral, médial), cingulo-operculaire, fronto-parietal, attentionnels (ventral, dorsal), somatomoteur (main, visage, jambe), auditif, premoteur, mémoire pariétal, association contextuelle, médial-temporal (antérieur et postérieur) ...  
de plus en plus fine & individualisée !!



Gordon & al, 2017

# IRMf : quelques découvertes ...

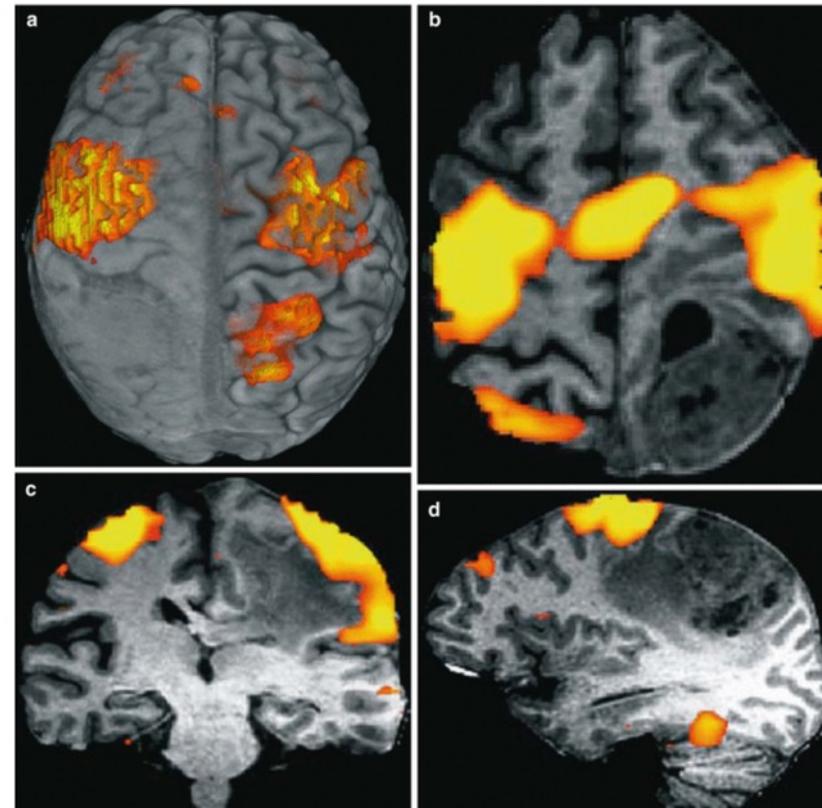
- Cartographie fonctionnelle :  
Activation du contraste "inverse" ("repos" VS n'importe quelle tâche "active")  
↔
- Réseau du mode par défaut révélé par IRMf de repos



Découverte pas attendue :  
sérendipité !

Shulman & al, 1997

- Cartographie : précise et individuelle !  
→ Préparation à la chirurgie



- Lien avec les modèles (IA, DL & co)

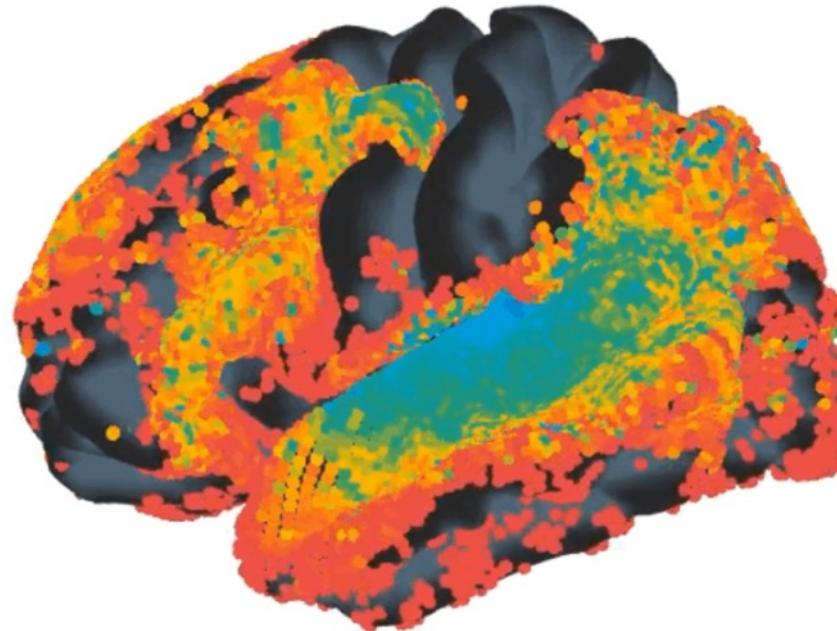
## wav2vec 2.0

deep net trained on  
600h of speech with  
self-supervised learning



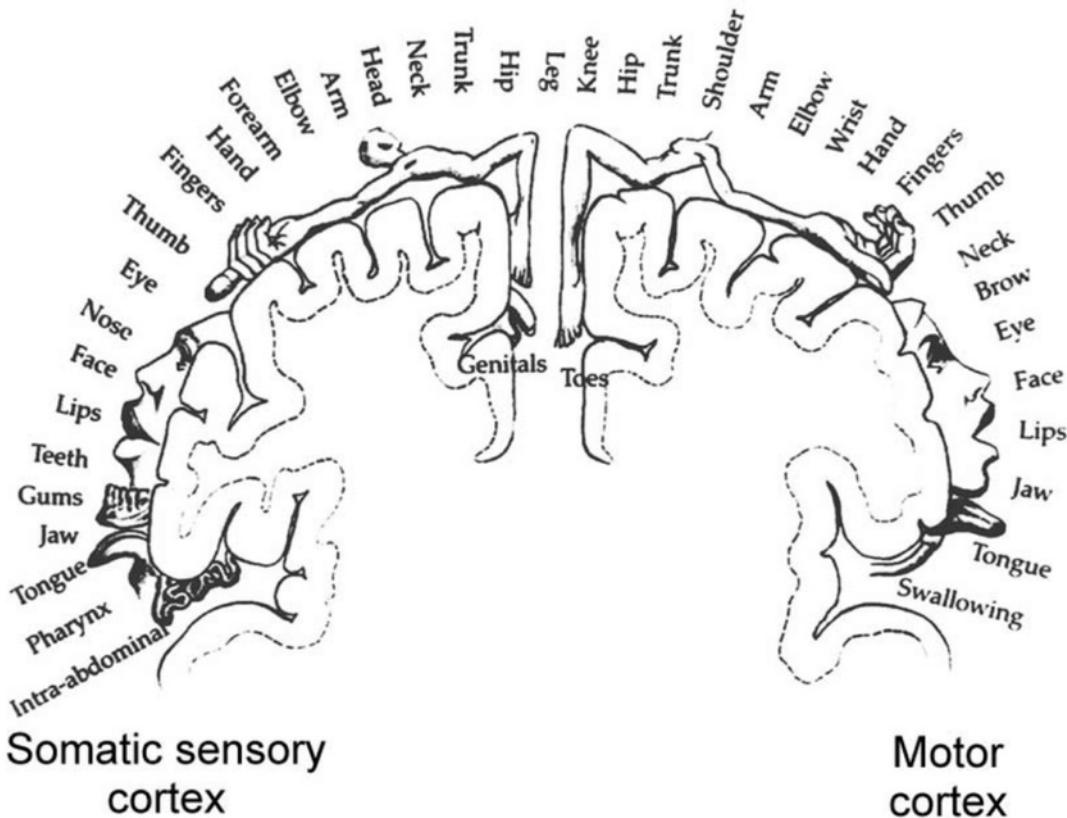
## human brain

417 volunteers  
recorded with fMRI



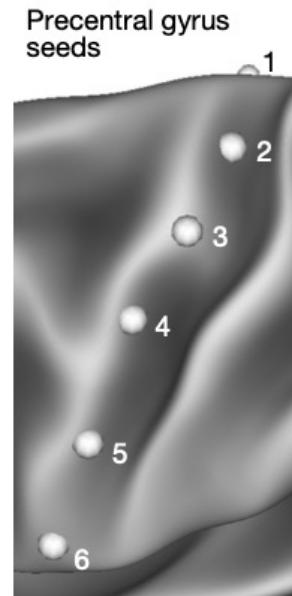
King & al, 2024

- Somatotopie établie depuis Penfield (1948)



## IRMf : quelques découvertes ...

- Somatotopie revisitée dans M1 / S1 !! Connectivité via IRMf de repos (cohorte de sujets)

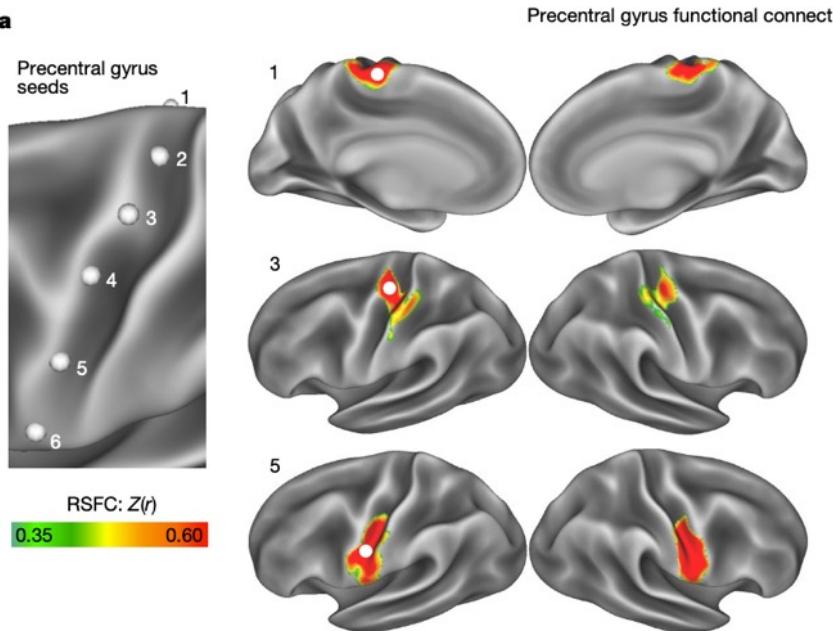


Gordon & al, 2023

# IRMf : quelques découvertes ...

- Somatotopie revisitée dans M1 / S1 !! Connectivité via IRMf de repos (cohorte de sujets)

a

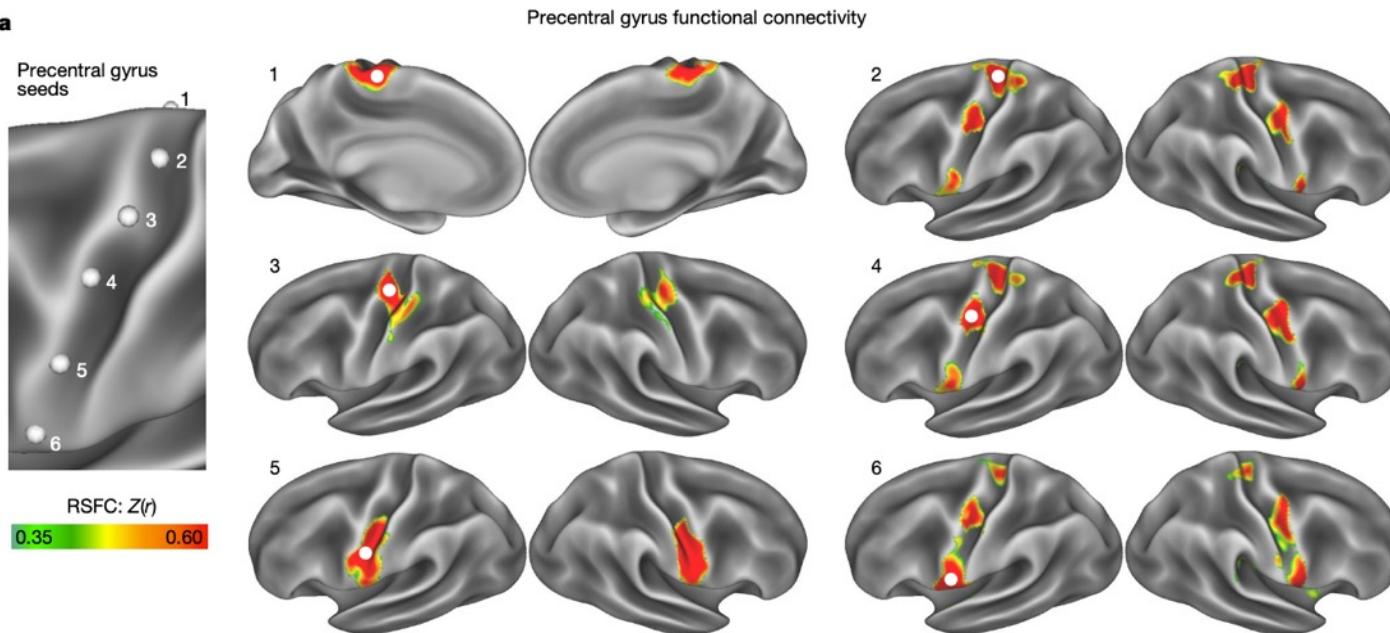


Gordon & al, 2023

# IRMf : quelques découvertes ...

- Somatotopie revisitée dans M1 / S1 !! Connectivité via IRMf de repos (cohorte de sujets)

a



Somato-Cognitive Action system Network (SCAN)

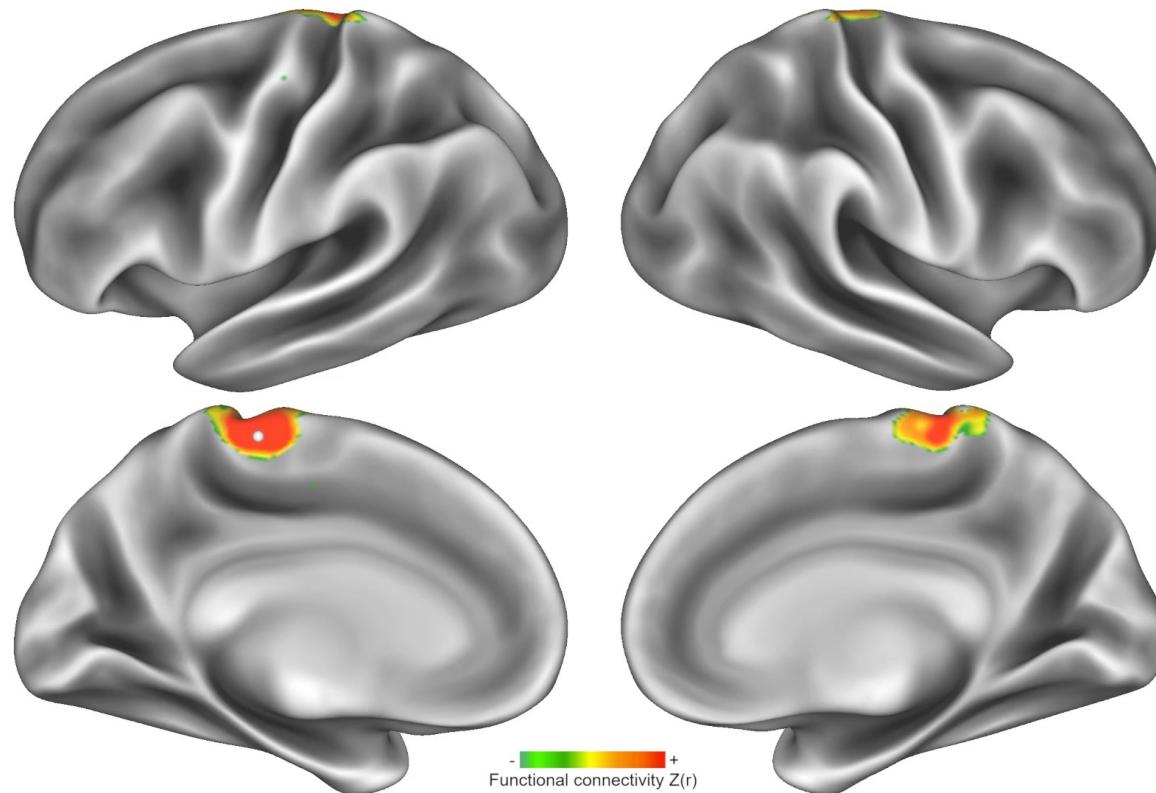


Cingulo-Opercular Network (CON)

Gordon & al, 2023

# IRMf : quelques découvertes ...

- Somatotopie revisitée dans M1 / S1 !! Connectivité via IRMf de repos (cohorte de sujets)



Somato-Cognitive Action system Network (SCAN)

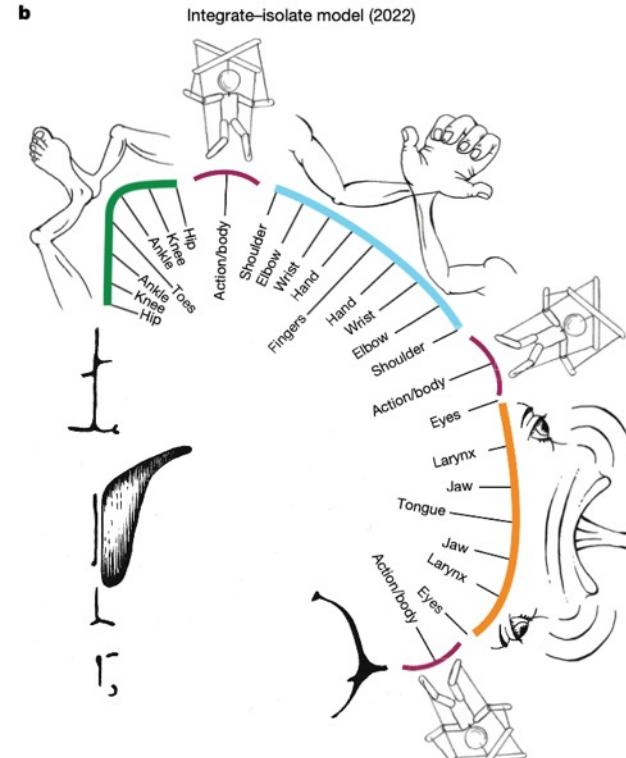
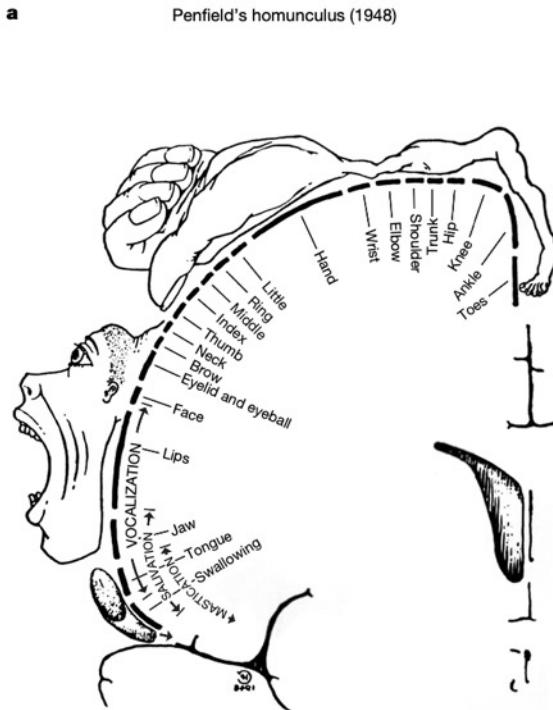


Cingulo-Opercular Network (CON)

Gordon & al, 2023

# IRMF : quelques découvertes ...

## - Somatotopie revisitée dans M1 / S1 !!



Somato-Cognitive Action system Network (SCAN)

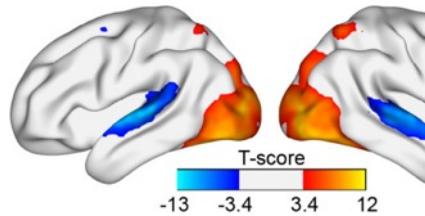


Cingulo-Opercular Network (CON)

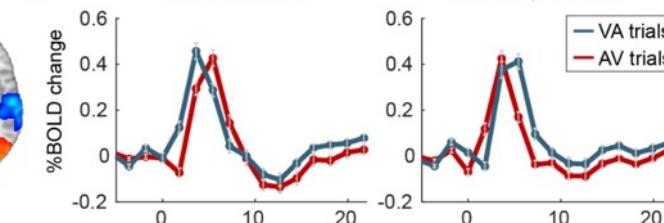
Gordon & al, 2023

- Relation avec les modèles de fonctionnement cérébral
- Biomarqueurs individuels
- Bio-feedback (activité locale ou connectivité) pour la thérapie
- IRMf de la substance blanche ?
- IRMf chez l'animal (par ex : Primate Non Humain (PNH) )

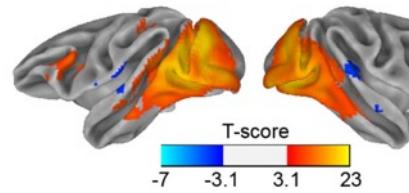
B Humans: sensory evoked activity



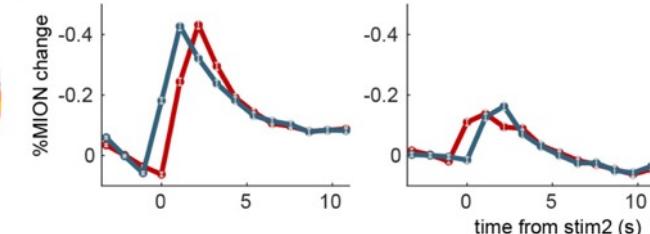
D Visual cortex



C Monkeys: sensory evoked activity



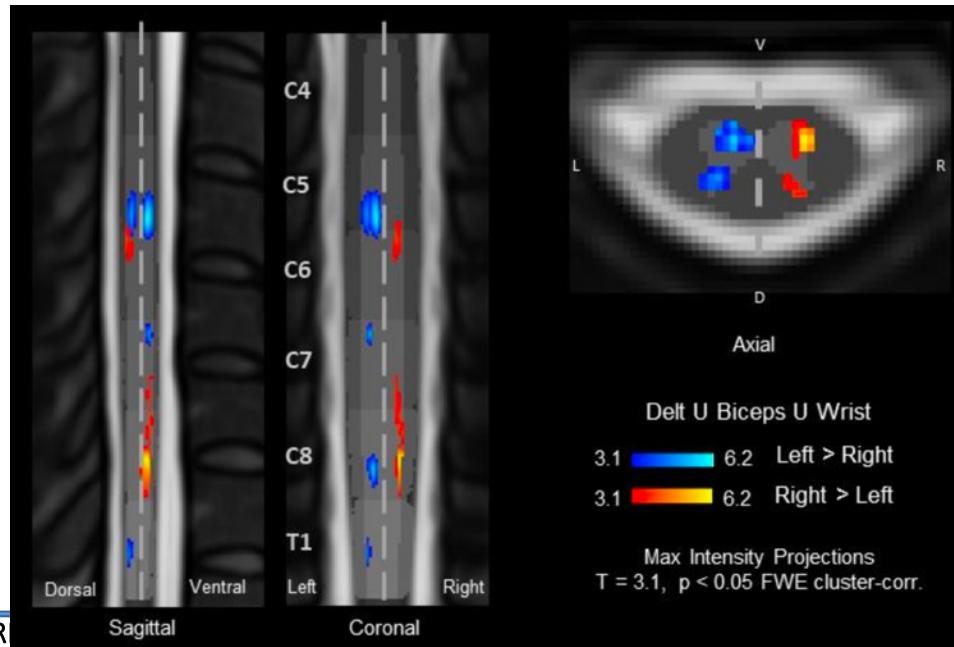
E



Van Kerkoerle & al, 2025

## IRMf : la suite ...

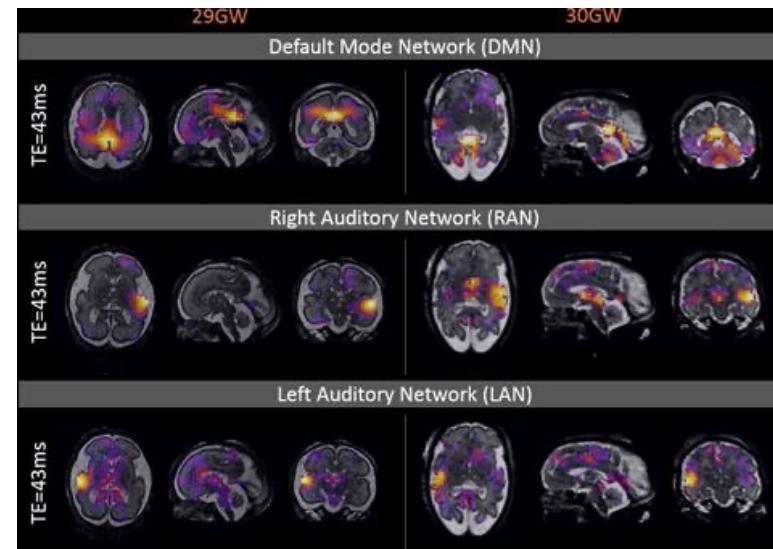
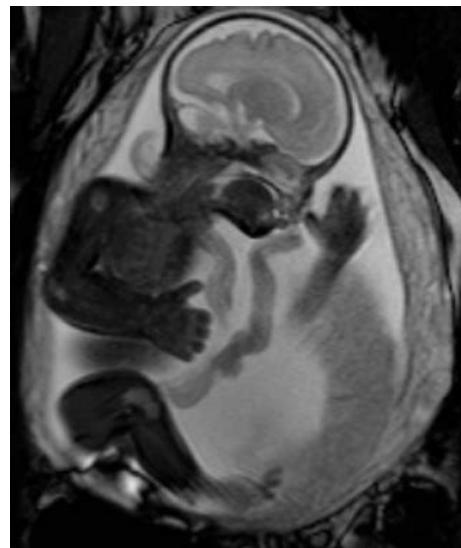
- Relation avec les modèles de fonctionnement cérébral
- Biomarqueurs individuels
- Bio-feedback (activité locale ou connectivité) pour la thérapie
- IRMf de la substance blanche ?
- IRMf chez l'animal (par ex : Primate Non Humain (PNH) )
- IRMf de la moelle



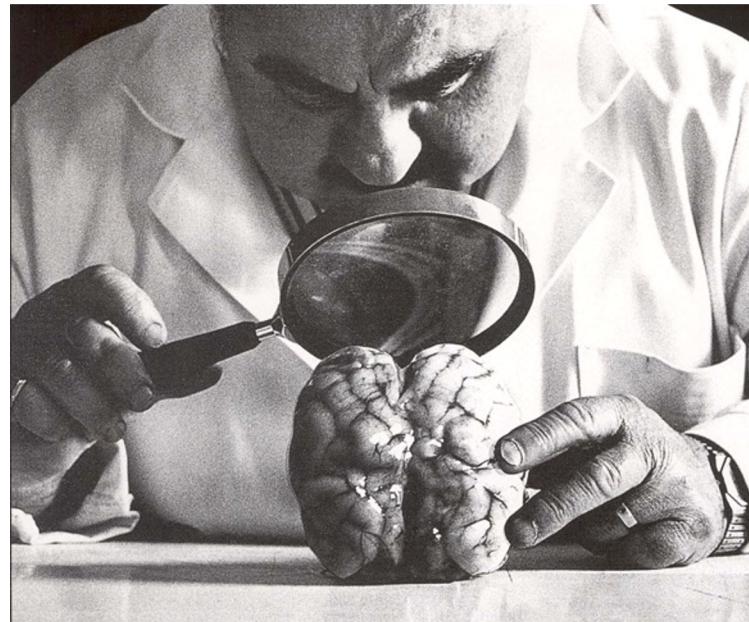
Schlienger & al, 2025

- Relation avec les modèles de fonctionnement cérébral
- Biomarqueurs individuels
- Bio-feedback (activité locale ou connectivité) pour la thérapie
- IRMf de la substance blanche ?
- IRMf chez l'animal (par ex : Primate Non Humain (PNH) )
- IRMf de la moelle
- IRMf fœtale
- ...

Blazejewska, 2017

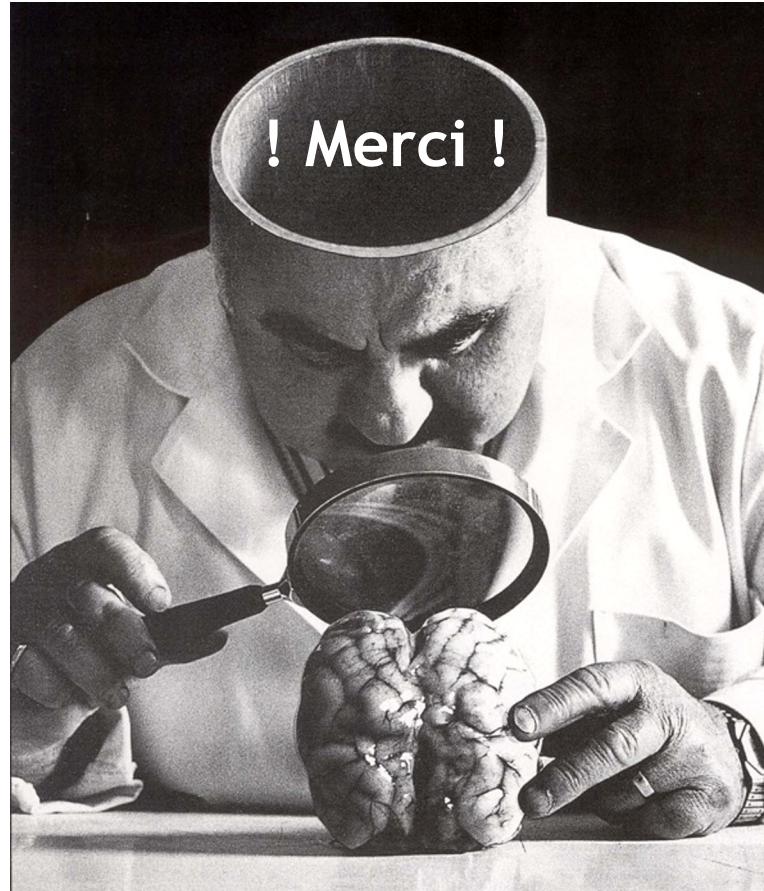


# Work still in Progress



C. Baillargeon

Work still in Progress : keep on thinking . . .



C. Baillargeon