

le cerveau humain : un réseau causal fonctionnel ?



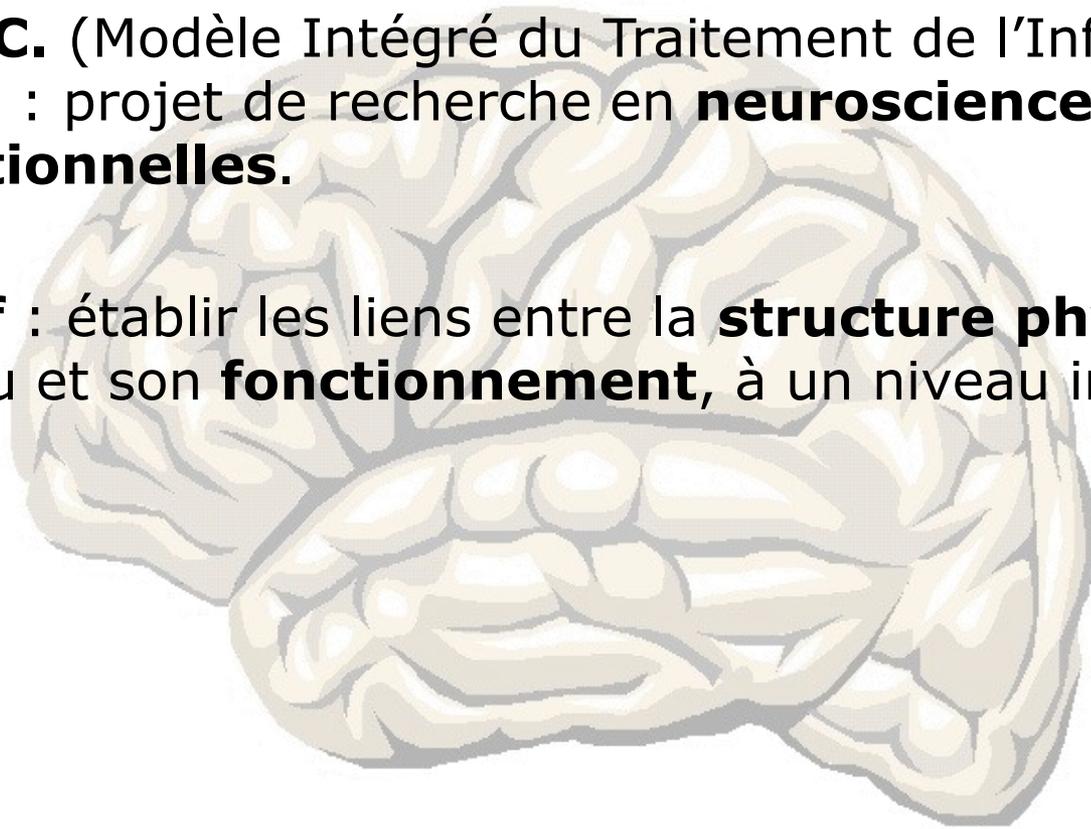
Vincent Labatut

—

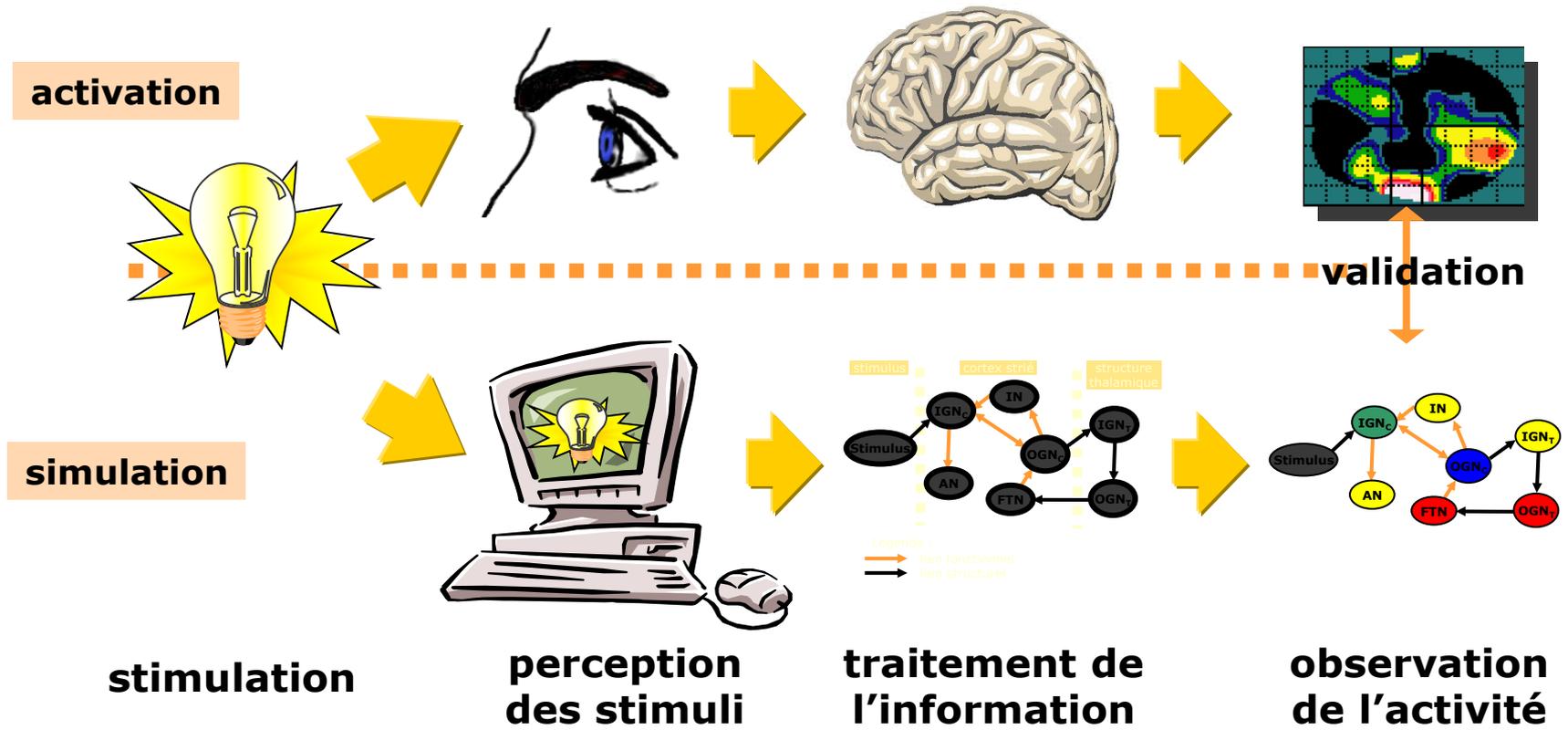
Inserm
● Unité 455

présentation de MITIC (1)

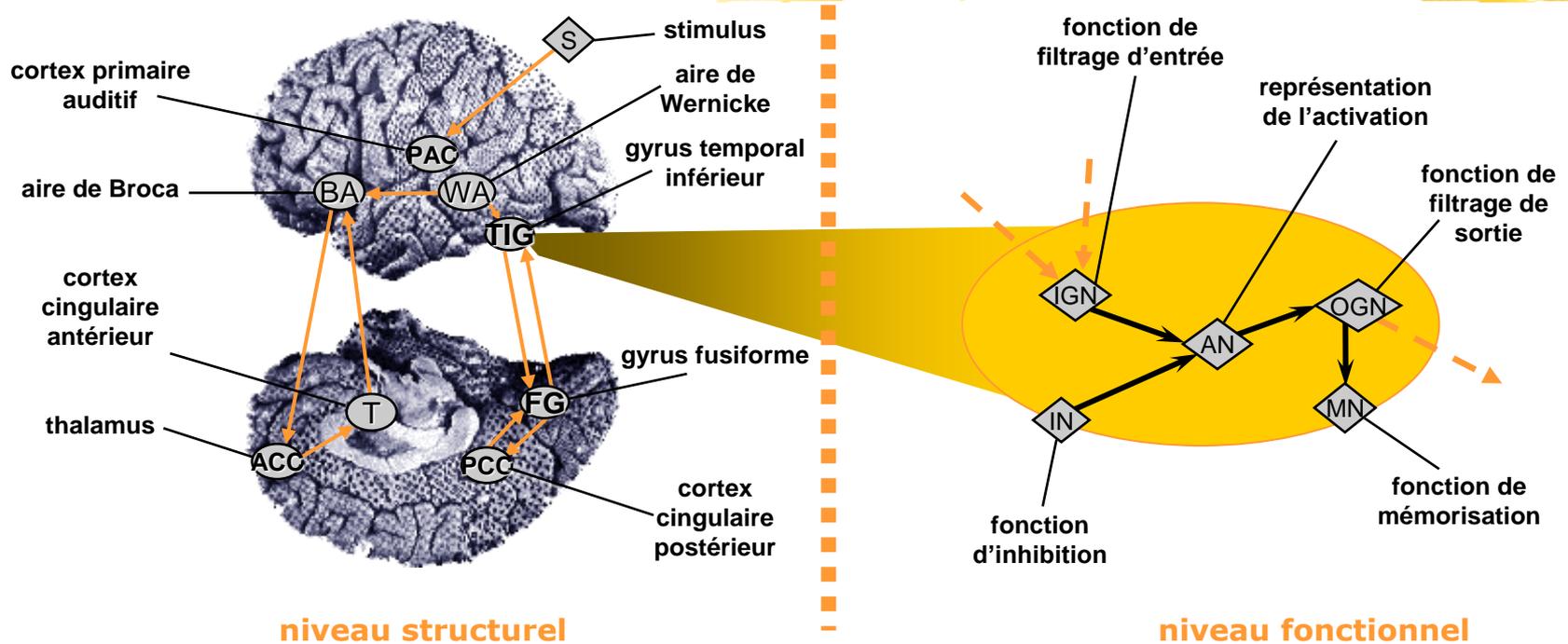
- **M.I.T.I.C.** (Modèle Intégré du Traitement de l'Information Cérébrale) : projet de recherche en **neurosciences computationnelles**.
- **Objectif** : établir les liens entre la **structure physique** du cerveau et son **fonctionnement**, à un niveau intégré.



présentation de MITIC (2)



représentation de la structure cérébrale



- un **réseau orienté** de nœuds **structurels** ou **fonctionnels**.
- chaque nœud peut correspondre à un **sous-réseau**.

► Représentation explicite de la structure cérébrale 4

contraintes sur le formalisme

causalité

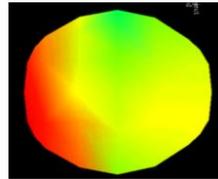
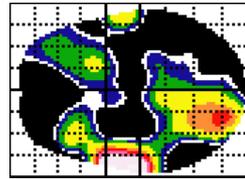
- justification **biologique**
(transmission du **signal cérébral**).
- justification **expérimentale**
(expression d'**hypothèses**).

Définition de la **causalité** retenue :

- **Contiguïté** spatiale et temporelle.
- **Régularité** statistique.
- **Non-précédence** de la cause sur l'effet.

contraintes sur le formalisme

- **imprécision** dans les données d'imagerie.



- **incertitude** dans les réactions cérébrales.

causalité

incertitude-
imprécision

contraintes sur le formalisme

- objectif : étudier la **dynamique** cérébrale.
- les données de neuroimagerie sont des séries **temporelles** de mesures

causalité

incertitude-
imprécision

temporalité

contraintes sur le formalisme

- relations cérébrales pouvant être **non-linéaires** (ex: présence de **seuils** au niveau neuronal).

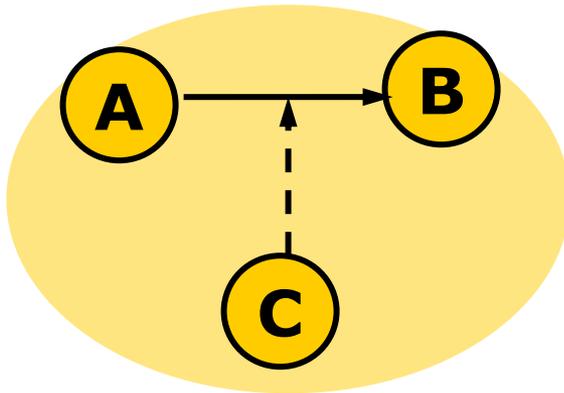
causalité

incertitude-
imprécision

temporalité

non-linéarité

contraintes sur le formalisme



- mécanismes de focalisation de l'**attention**
- apprentissage à **long** terme.

causalité

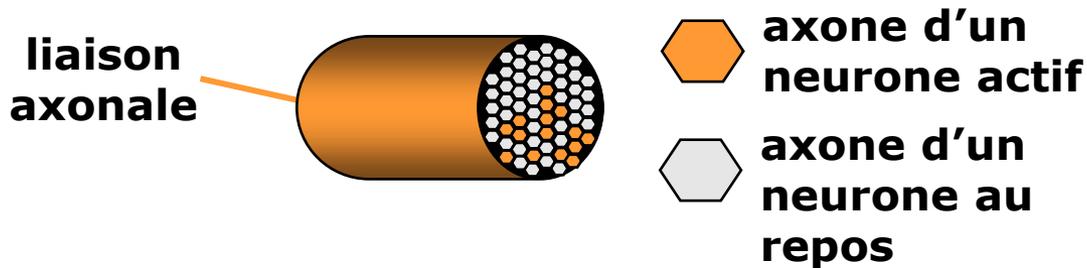
incertitude-
imprécision

temporalité

non-linéarité

modification
des
paramètres en
temps réel

contraintes sur le formalisme



à un niveau **global**, l'information transmise a deux composantes :

- **quantitative** : nombre de neurones qui ont déchargé, intensité de leur décharge (l'énergie).
- **qualitative** : configuration des neurones qui ont déchargé (type).

causalité

incertitude-
imprécision

temporalité

non-linéarité

modification
des
paramètres en
temps réel

numérique-
symbolique

réseaux de neurones ?

- modélisation **uniquement fonctionnelle** [Cohen et al. 90], [McClelland et al. 86].
 - ▶ biologiquement non-plausible.
 - ▶ pas de représentation de l'imprécision, pas adaptable.

- modélisation d'une fonction dans des **structures limitées** (cellule ou population locale) [Hunter et al. 97], [Dominey & Arbib 92].
 - ▶ pas de représentation de l'imprécision, pas adaptable.
 - ▶ structure limitée.

- modélisation dans des **structures plus étendues** [Berns & Sejnowski 98], [Arbib et al. 98] (mélange des deux autres types de RN).
 - ▶ pas de représentation de l'imprécision, pas adaptable.
 - ▶ la fonction modélisée est limitée.

causal functional networks ! [Pearl 00]

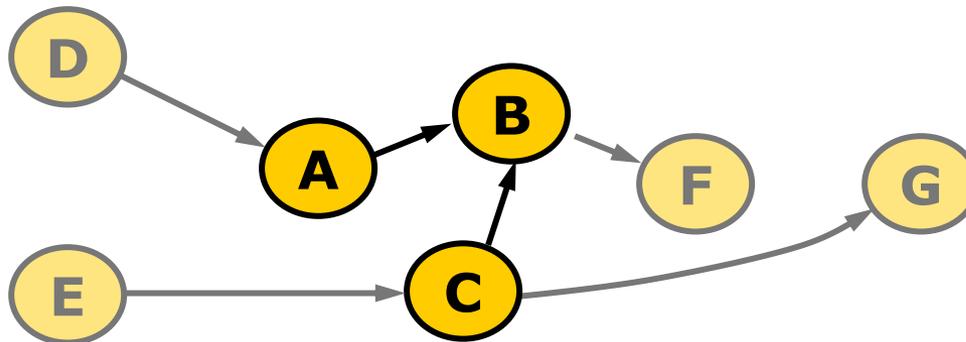
- un ensemble de variables aléatoires (nœuds).
- un ensemble de fonctions déterministes (arcs).

exemple :

si **A** et **C** sont les causes de **B**, alors :

$$\mathbf{B} = \mathbf{f}_B(\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{u}_B)$$

où \mathbf{u}_B est une v.a. représentant l'erreur, et \mathbf{f}_B une fonction pouvant être non-linéaire.



MoCCa [Labatut & Pastor 02]

modifications apportées aux réseaux causaux fonctionnels basiques pour un meilleur respect de nos contraintes :

- introduction d'une représentation discrète et explicite du temps (**temporalité**).
- manipulation de l'information sous forme d'un couple energie-type (**numérique-symbolique**).
- utilisation de variables aléatoires normales (**incertitude-imprécision**).

d'autres modifications à venir :

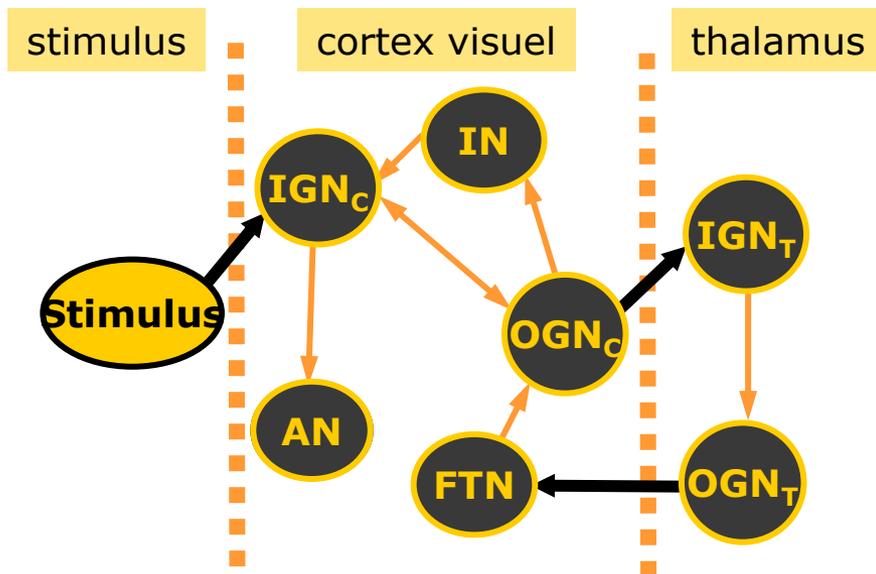
- possibilité de multiplier, diviser les les v.a. entre elles (en cours) (**non-linéarité**).
- inclure les mécanismes permettant la **modification des paramètres** en temps réel.



Inst...	Stim	Stim	IGN...	IGN...	IGNta	IGNta	AN	AN	INpa	INpa	INta	INta	LIN...	LIN...	LINta	LINta	OG...	OG...	OG...	OG...	FTN...	FT...	FTN...	FT...
	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.	E	e.t.
-1	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	3,00	0,10	3,00	0,10
0	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
3	1,00	0,00	0,30	0,00	0,30	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
4	1,00	0,00	0,59	0,00	0,59	0,00	0,60	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
5	1,00	0,00	0,74	0,01	0,76	0,01	1,79	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
6	1,00	0,00	0,72	0,01	0,80	0,01	3,29	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
7	1,00	0,00	0,61	0,01	0,76	0,01	4,81	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	0,01	0,70	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
8	1,00	0,00	0,48	0,01	0,72	0,01	6,18	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,01	0,68	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
9	1,00	0,00	0,36	0,01	0,73	0,01	7,39	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,01	0,65	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
10	1,00	0,00	0,27	0,01	0,80	0,01	8,48	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,01	0,65	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
11	1,00	0,00	0,17	0,01	0,92	0,01	9,55	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,01	0,70	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
12	1,00	0,00	0,04	0,02	1,07	0,01	10,63	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,01	0,80	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
13	1,00	0,00	0,00	0,00	1,27	0,02	11,75	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,94	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
14	1,00	0,00	0,00	0,00	1,52	0,02	13,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	1,11	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
15	1,00	0,00	0,00	0,00	1,79	0,02	14,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
16	1,00	0,00	0,00	0,00	2,05	0,02	16,33	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
17	1,00	0,00	0,00	0,00	2,31	0,02	18,38	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
18	1,00	0,00	0,00	0,00	2,56	0,02	20,69	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
19	1,00	0,00	0,00	0,00	2,81	0,02	23,26	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,25	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,10	3,00	0,10
20	1,00	0,00	0,00	0,00	3,06	0,02	26,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,48	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
21	1,00	0,00	0,00	0,00	3,30	0,02	29,13	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,69	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
22	1,00	0,00	0,00	0,00	3,53	0,02	32,42	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
23	1,00	0,00	0,00	0,00	3,76	0,02	35,95	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,11	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
24	1,00	0,00	0,00	0,00	3,98	0,02	39,71	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,32	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
25	1,00	0,00	0,00	0,00	4,20	0,02	43,70	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,52	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
26	1,00	0,00	0,00	0,00	4,42	0,02	47,90	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,72	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
27	1,00	0,00	0,00	0,00	4,63	0,02	52,32	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,91	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
28	1,00	0,00	0,00	0,00	4,84	0,02	56,95	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
29	1,00	0,00	0,00	0,00	5,04	0,02	61,79	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,28	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
30	1,00	0,00	0,00	0,00	5,24	0,02	66,83	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,46	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
31	1,00	0,00	0,00	0,00	5,44	0,02	72,08	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,64	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
32	1,00	0,00	0,00	0,00	5,63	0,02	77,51	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,81	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09
33	1,00	0,00	0,00	0,00	5,83	0,02	83,14	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,99	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,09	3,00	0,09

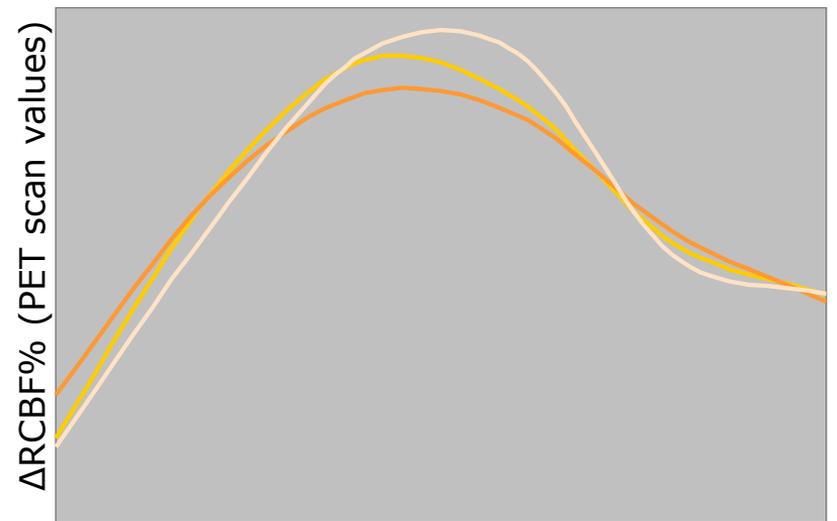
premier exemple d'application

le formalisme a été utilisé pour reprendre des résultats obtenus expérimentalement (TEP) par Fox & Raichle [84].



Légende :

- lien fonctionnel
- lien structurel



Légende :

- Fox & Raichle
- MITIC
- BioCaEn

conclusion



- travail original au niveau du **but** poursuivi : non pas l'interprétation d'imagerie, mais compréhension du fonctionnement cérébral.
- travail original dans son **approche** : les autres méthodes de modélisation en neurosciences computationnelles ne sont pas **causales**.
- travail original dans le **formalisme choisi** : formalisme récent et se démarquant des réseaux de neurones.
- ces particularités impliquent un développement double :
 - à un niveau **théorique** (IA et maths)
 - à un niveau plus appliqué (neurosciences)