

Centre National de la Recherche Scientifique

Rapport d'activité scientifique

Laurent U PERRINET

Pour évaluation par les sections du Comité national



Équipe NEural OPERations in TOpographies (NeOpTo)
Institut de Neurosciences de la Timone
UMR 7289, CNRS / Aix-Marseille Université
27, Bd. Jean Moulin, 13385 Marseille Cedex 5, France
https://laurentperrinet.github.io/
Laurent.Perrinet@univ-amu.fr

16 Février 2022

Table des matières

1	Curriculum Vitæ	2
1.1	Présentation rapide	2
1.2	Diplômes & titres universitaires	2
1.3	Expérience scientifique professionnelle	3
2	Résumé de mon activité scientifique	5
3	Rapport d'activité	6
3.1	Introduction : codage prédictif et code neural	6
3.2	Activités de recherche dans l'équipe InViBe (2012-2018)	6
3.3	Caractérisation fonctionnelle du système oculomoteur [Sanz12; Simoncini12]	7
3.4	Rôle fonctionnel des interactions latérales dans l'intégration spatio-temporelle [Perrinet12pred; Khoei13jpp; KhoeiMassonPerrinet17]	9
3.5	Rôle fonctionnel des interactions latérales dans l'intégration spatiale [PerrinetBednar15]	10
3.6	Modélisation de réseaux de neurones impulsionnels	13
3.7	Unification des théories computationnelles par la minimisation de l'énergie libre (MEL) [PerrinetAdamsFriston14]	16
3.8	Activités de recherche dans l'équipe NeOpTo (2018-2022)	17
3.9	Productions scientifiques sélectionnées	17
4	Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique	19
4.1	Encadrement de thèse et post-doctorants	19
4.2	Participation à des activités grand public	19
4.3	Collaboration artistique	19
4.4	Enseignement	20
5	Transfert technologique, relations industrielles et valorisation	20
5.1	Contrats et collaborations	20
5.2	Développements de logiciels	20
5.2.1	Mouvements des yeux et mouvement	21
5.2.2	Biologically-Inspired Computer Vision	21
5.2.3	Promotion du logiciel libre	21
5.3	Expertise scientifique	21
6	Encadrement, animation et management de la recherche	21
7	Objectifs / Projet de recherche	22

1 Curriculum Vitæ

1.1 Présentation rapide

- 48 ans, né le 23 Février 1973 à Talence (Gironde, France).
- Directeur de Recherche (DR2, CNRS), Affiliation : Équipe NEural OPerations in TOpographies (NeOpTo) - Institut de Neurosciences de la Timone (UMR 7289, CNRS / Aix-Marseille Université)
 - Adresse : 27, Bd. Jean Moulin, 13385 Marseille Cedex 5, France
 - E-mail : <mailto:Laurent.Perrinet@univ-amu.fr>
 - Téléphone : 04 91 32 40 44
 - URL : <https://laurentperrinet.github.io/>

Résumé quantitatif des contributions

- 51 publications dans les revues avec comité de lecture (dont 4 en révision, 16 en premier auteur, 15 en dernier auteur), avec un total de 2916 citations, indice h= 26 et indice i10= 46¹,
- 120 publications dans des actes de congrès avec comité de lecture,
- 4 livres et 6 chapitres de livres,
- 53 conférences invitées (dont 19 dans des congrès internationaux),
- 3 thèses en cours de direction (Hugo Ladret, Jean-Nicolas Jérémie, Antoine Grimaldi) et 3 finalisées (Angelo Franciosini, Victor Boutin, Mina Khoei),
- 4 Post-docs dirigés (Wahiba Taouali, Nicole Voges, Alberto Vergani, 1 à venir),
- 4 thèses co-dirigées (A Gruel, Mansour Pour, JB Damasse, J. Kremkow),
- 1 contrat en PI local (150k€), 1 AAP (100k€), 3 bourses de thèse obtenues,
- 20 contrats en collaborateur (dont 12 ANRs).

1.2 Diplômes & titres universitaires

Habilitation à Diriger des Recherches, AMU, Marseille

2017

École Doctorale Sciences de la Vie et de la Santé, Aix-Marseille Université, France. Sous le titre “Codage prédictif dans les transformations visuo-motrices”, j’ai défendu mon Habilitation à Diriger des Recherches le 14 avril 2017.

Le jury était constitué des Prof. Laurent Madelain (Université Lille III), Dr. Alain Destexhe (Université Paris XI, Rapporteur), Prof. Gustavo Deco (Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, Rapporteur), Dr. Guillaume Masson (Aix-Marseille Université), Dr. Viktor Jirsa (Aix-Marseille Université, Rapporteur) et du Prof. Jean-Louis Mege (Aix-Marseille Université).

Doctorat de Sciences cognitives ONERA/DTIM, Toulouse

1999-2003

Titre : *Comment déchiffrer le code impulsif de la Vision ? Étude du flux parallèle, asynchrone et épars dans le traitement visuel ultra-rapide*. Allocataire d’une bourse MENRT, accueil à l’ONERA/DTIM.

- Cette thèse a été initiée par les résultats de la collaboration pendant le stage de DEA. Elle a été dirigée par Manuel Samuelides (professeur à SUPAÉRO et chargé de recherche à l’ONERA/DTIM) et co-dirigée par Simon Thorpe (directeur de recherche au CERCo)
- Participation et présentations à de nombreux colloques internationaux (IJCNN99, NeuroColt00, CNS00, CNS01, LFTNC01, ESANN02, NSI02). Participation aux écoles d’été “EU Advanced Course in Computational Neuroscience” à Trieste (Italie) et “Telluride Neuromorphic Workshop” au Colorado (États-Unis).
- En parallèle, j’ai participé à l’organisation d’une conférence sur les réseaux de neurones dynamiques (DYN*2000). Je me suis aussi impliqué dans des activités d’enseignement (initiation à la programmation sous Matlab et théorie de la probabilité) pour des élèves de première et deuxième année d’école d’ingénieur (à

1. Au 16 Février 2022, cf. <https://scholar.google.com/citations?user=TVyUV38AAAAJ&hl=fr>

SUPAÉRO et à l'ENSICA, Toulouse) et des travaux dirigés de robotique (Traitement de l'image et reconnaissance d'objets au laboratoire d'Informatique et d'Automatique de SUPAÉRO).

- La thèse de doctorat a été soutenue le 7 février 2003 à l'université Paul Sabatier avec la mention "Très honorable avec les félicitations du jury". Le jury était présidé par Michel Imbert (Prof. Université P. Sabatier) et constitué par Yves Burnod (Directeur de recherche à l'INSERM U483) et Jeanny Hérault (Professeur à l'INPG, Grenoble).

DEA de Sciences cognitives	1998-1999
Univ. Paris VII, P. Sabatier, EHESS, Polytechnique, mention TB. Allocataire d'une bourse de DEA.	
— Assistant de recherche, ONERA/DTIM (Département de Traitement de l'Image et de Modélisation), Toulouse (stage de DEA).	3/1999-7/1999
— Étude de l'apprentissage de type Hebbien de réseaux de neurones basés sur un codage par rang.	
— Application à la reconnaissance de textures visuelles.	
— Assistant de recherche, USAFB (Rome, NY) / University of San Diego in California (États-Unis). Étude de l'apprentissage autonome dans un système complexe de type automate cellulaire.	7/1999-8/1999
Diplôme d'ingénieur SUPAÉRO, Toulouse, France.	1993-1998
Spécialisation dans le traitement du signal et de l'image et en particulier dans les techniques des réseaux de neurones artificiels.	
— Projets individuels sur la perception visuelle, la reconnaissance de locuteur, la compression de la parole et sur la reconnaissance de caractères.	
— Ingénieur ALCATEL, Vienne (Autriche). Département du <i>Voice Processing Systems</i> . Ce 'stage long' volontaire, intégré à une formation de SUPAÉRO sur les systèmes industriels, impliquait toutes les étapes de la conception d'un système de messagerie téléphonique de technologie élevée : conception, prototype, contrôle de qualité et étude marketing.	9/1995-6/1996
— Assistant de recherche, JET PROPULSION LABORATORY (NASA), Pasadena, Californie. Département des Sciences de la Terre, Laboratoire d'imagerie radar, INTERFÉROMÉTRIE RADAR SAR APPLIQUÉE À LA GÉOPHYSIQUE	4/1997-9/1997
— Programmation d'un processus de traitement d'images radar interférométriques SAR comprenant des corrections géographiques, une série de filtrages et un traitement d'interférométrie.	
— Étude et programmation d'un générateur de carte topographique.	
— Traitement des images obtenues pour surveiller la déformation de la croûte terrestre. Étude des tremblements de terre de Landers (Californie) et de Gulan (Chine).	
— Assistant de recherche, CERCo (CNRS, UMR5549), Toulouse (stage de fin d'études d'ingénieur). Développement d'un réseau de neurones asynchrone appliqué à la reconnaissance de caractères.	4/1998-9/1998
— Programmation du code du réseau de neurones asynchrones.	
— Étude et utilisation des statistiques non-paramétriques pour l'utilisation d'un code basé sur le rang d'activation des neurones.	
— Implantation d'une nouvelle règle d'apprentissage du réseau de neurones.	

1.3 Expérience scientifique professionnelle

Directeur de Recherche (DR2) (section CID51), INT/CNRS, Marseille	2020-...
Chargé de Recherche Classe Normale , INT/CNRS, Marseille	2019-2020
Au 1er janvier 2019, j'ai intégré l'équipe NeOpTo de Frédéric Chavane (DR, CNRS). J'implémente les modèles prédictifs dans des architectures bio-mimétiques.	

Chargé de Recherche grade 1 , INT/CNRS, Marseille	<i>2012-2019</i>
Au 1er janvier 2012, notre équipe a intégré l'Institut de Neurosciences de la Timone (UMR 7289, CNRS / Aix-Marseille Université) à Marseille (direction Guillaume Masson). J'ai approfondi les modèles en me concentrant sur un codage probabiliste distribué appliqué à la boucle sensori-motrice.	
Mission longue Karl Friston's theoretical neurobiology group (The Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, University College London, London, UK). Collaboration avec Karl Friston sur l'application de modèles d'énergie libre aux mouvements oculaires.	<i>10/2010-01/2012</i>
Chargé de Recherche grade 2 (section 7), INCM/CNRS, Marseille	<i>2004-2012</i>
Sous la conduite de Guillaume Masson à l'INCM à Marseille, j'ai étudié des modèles spatio-temporels d'inférence dans des scènes naturelles en application de la compréhension des mouvements oculaires.	
Post-doctorat , Redwood Neuroscience Institute (RNI), États-Unis	<i>2004</i>
Sous la conduite de Bruno Olshausen, j'ai comparé des modèles standards d'apprentissage avec une méthode originale centrée sur les potentiels d'action. Notamment, j'ai développé une méthode générique évaluant l'importance des processus homéostatiques dans l'apprentissage non-supervisé, qui a conduit à une publication dans le journal Neural Computation (référence A20-[Perrinet10shl]). J'ai ensuite étendu ce modèle à l'apprentissage spatio-temporels dans des flux video.	

2 Résumé de mon activité scientifique

Mon objectif de recherche est d'étudier l'hypothèse selon laquelle on peut comprendre les liens entre la structure neurale, notamment l'arrangement topographique des neurones entre eux et la nature du signal nerveux, et la fonction des systèmes sensoriels comme l'optimisation de leur adaptation aux statistiques des scènes naturelles par des processus de type prédictif.

Plus précisément, je vise à étendre la compréhension des facultés sensorielles et cognitives sous la forme de modèles de réseaux de neurones impulsionnels qui réalisent de façon efficace des algorithmes de perception visuelle. En effet, les brèves impulsions du potentiel de membrane se propageant au fil des neurones sont une caractéristique universelle des systèmes nerveux et permettent de construire des modèles efficaces du traitement dynamique de l'information. Dans un but fonctionnel, je désire notamment implanter dans ces modèles des stratégies d'inférence grâce à des mécanismes d'apprentissage auto-organisés fixant les relations spatio-temporelles entre les neurones. Dans une démarche applicative, nous envisageons la création de nouveaux types d'algorithmes basés sur ces recherches.

Résumé des travaux antérieurs et de leur impact scientifique

Mes travaux de thèse dirigés par Simon Thorpe et Manuel Samuelides ont permis d'explorer dans un cadre mathématique de nouveaux paradigmes de codage neural de type impulsif pour des images statiques [**Perrinet03ieee**] et en particulier comment ceux-ci peuvent être appris [**Perrinet10shl**]. Ceux-ci ont été étendus en collaboration avec Guillaume Masson à des modèles d'inférence statistique appliqués aux mouvements des yeux et à la boucle perception action [**Simoncini12**]. Un cadre théorique précis a été élaboré, sous le patronage de Karl Friston, pour tenir compte de la présence de délais temporels [**PerrinetAdamsFriston14**]. Actuellement, en collaboration avec Frédéric Chavane, j'étends des modèles dynamiques du traitement dynamique de scènes visuelles en mouvement [**KhoeiMassonPerrinet17**] dans des réseaux hiérarchiques [**BoutinFranciosiniChavaneRuffierPerrinet20** ; **Franciosini21**]. Nous avons récemment mis en évidence le rôle de la précision dans ce traitement d'information [**Ladret22**] et qui nous permet de construire de nouveaux algorithmes neuromorphiques de type Spiking Neural Networks [**Grimaldi22pami**]. Une contribution de ces travaux est enfin d'apporter un regard nouveau sur la structure des réseaux neuraux, notamment dans les aires corticales visuelles [**Chavane22**].

Mots clés

Perception, vision, détection du mouvement. Calcul parallèle événementiel, émergence dans les systèmes complexes, codage neural. Inférence Bayésienne, minimisation de l'énergie libre, statistiques des scènes naturelles.

3 Rapport d'activité

3.1 Introduction : codage prédictif et code neural

Le but de mon activité de recherche est de déchiffrer le “code neural”, c’est-à-dire de révéler dans la structure dynamique de l’activité neurale des algorithmes fonctionnels de traitement de l’information. Plus particulièrement je m’intéresse à comprendre comment le système visuel peut exploiter les régularités statistiques des scènes naturelles pour traiter le flux sensoriel de façon la plus efficace possible. Ce thème de recherche s’intègre donc plus généralement au problème de notre compréhension entre la structure du système nerveux central et de sa fonction. À ce titre, l’étude de l’intégration spatio-temporelle de l’information sensorielle est primordiale. En effet, les neurones présentent des contraintes physiologiques qui font que l’information sensorielle est locale aux premiers étages de captation du signal, alors qu’elle doit devenir globale et unique au niveau de la réponse comportementale. De plus, au fur et à mesure qu’ils montent les voies sensorielles jusqu’à la réponse motrice, ces signaux subissent de nombreuses transformations et subissent différentes sources de bruit. Ces problèmes se révèlent de façon saillante dans le système oculomoteur : Devant une réponse visuelle, comme l’image d’un prédateur pour une proie (et inversement), il est primordial à la survie du “sujet voyant” de pouvoir orienter son regard de façon efficace vers l’objet d’intérêt et de programmer une réponse adaptée le plus rapidement possible.

Dans ce cadre, le système oculomoteur procure un excellent modèle pour mettre à jour des processus de codage prédictif dans le code neural. En particulier, quel codage neural est le plus efficace pour l’intégration de l’information ? Comment intégrer différentes sources d’information (montante, associative, descendante) ? Quel est le meilleur compromis entre rapidité de la réponse et sa précision ? Afin de répondre à ces questions fondamentales pour les neurosciences, nous allons les aborder suivant les niveaux d’études suggérés par **Marr83**. Ceux-ci structurent mes axes de recherche suivant différentes approches :

Fonctionnelle Quelles fonctions sont à la source de la perception visuelle du mouvement ?

Algorithmique Comment exploiter le parallélisme et la dynamique des réseaux neuraux de façon efficace par rapport à la représentation de l’information visuelle ?

Computationnelle Comment implanter ces algorithmes dans la circuiterie neurale ? Quels enseignements ces modèles nous donnent pour déchiffrer le code neural ?

Cette dichotomie est bien sûr *a priori* arbitraire et constitue plutôt une grille de lecture pour aborder ces problèmes complexes.

Dans cet rapport, nous résumerons donc mon activité de recherche en suivant cette grille. Nous débiterons par un rappel rapide de mes travaux de thèse dans la section ?? et en particulier par l’étude du lien entre une propriété fonctionnelle (le codage ultra-rapide d’images naturelles) et son corrélat neural (un code neural utilisant la latence de décharge d’un neurone) tout en détaillant des algorithmes faisant le lien entre ces deux niveaux. Ensuite nous détaillerons dans la section ?? le travail initié au sein de l’équipe DyVA, dirigée par Guillaume Masson à l’INCM et en particulier les modèles que nous avons développés autour du système oculomoteur comme modèle dynamique d’intégration sensorielle. Je détaillerai enfin dans la section 3.2 les travaux de recherche effectués au sein de l’équipe INViBE dirigée par Frédéric Chavane à l’INT et nous nous sommes focalisés sur les liens entre codage neural et dynamique de la réponse oculaire. Cette section pourra ainsi introduire mon programme de recherche que je compte mener en temps que Directeur de Recherche.

3.2 Activités de recherche dans l’équipe InViBe (2012-2018)

En effet, suivant la restructuration des neurosciences sur les différents sites du CNRS à Marseille, le laboratoire INCM a intégré un nouveau site sur le campus de la faculté de médecine de la Timone, l’Institut de Neurosciences de la Timone (INT). Ce déménagement a pris place fin 2010 et a donné lieu à une restructuration des équipes arrivantes pour assurer la cohésion de l’ensemble. Notamment, l’équipe DyVA est devenue l’équipe “inference and visual behavior” (INViBE). Tout en gardant de nombreux points commun avec les thèmes et méthodes développés à l’INCM, la formation de cette nouvelle équipe a permis de redéfinir

son champ d'action. Notamment, l'accent a été mis sur l'intégration des pistes de recherche développées individuellement dans l'équipe et je vais développer dans cette section les principales contributions que j'ai pu apporter.

Une étape importante dans la structuration du thème de recherche a été la recherche de nouvelles sources de financement et de nouvelles collaborations. En particulier, nous avons obtenu un financement important grâce au projet BrainScaleS (commission européenne, contrat numéro FP7-269921), qui nous a permis d'envisager l'élaboration de nouveaux types d'algorithmes basés sur ces recherches. Une autre étape importante a été la collaboration avec Karl Friston à l'University College de Londres qui a permis d'étendre la portée théorique des modèles probabilistes que nous utilisons. Cette collaboration a pris la forme d'une mission longue de 14 mois (d'octobre 2010 à février 2012) sous l'invitation de Karl Friston et a permis l'établissement de nombreuses collaborations dans Londres et nationalement (notamment Jim Bednar à Edinburgh). Ces différents facteurs ont contribué à la restructuration du projet de recherche durant cette période que je détaille ici.

En particulier, tout en gardant une lecture proche des niveaux d'étude de Marr, nous allons progressivement les dépasser pour mettre en avant les collaborations entre différents niveaux. Pour cela nous allons d'abord étudier une approche héritée de l'ingénierie des systèmes pour caractériser le système oculomoteur (Sec. 3.3), pour ensuite étudier le rôle fonctionnel des interactions latérales dans l'intégration spatio-temporelle, et en particulier le rôle du codage prédictif (Sec. 3.4 et 3.5). Afin de confronter de tels modèles avec des données physiologiques et comportementales, nous allons enfin montrer des modèles de réseaux neuraux impulsifs à grande échelle, tout en formalisant une théorie de décodage de cette activité neurale en terme d'information visuelle (Sec. 3.6). Enfin, nous synthétiserons ces différentes approches en présentant le modèle de minimisation de l'énergie libre présentée par Karl Friston et son application à l'unification des différentes théories qui ont cours en neurosciences computationnelles (Sec. 3.7).

3.3 Caractérisation fonctionnelle du système oculomoteur [Sanz12; Simoncini12]

Mesurer la vitesse et la direction d'un objet en translation est une étape computationnelle cruciale pour bouger nos yeux, nos mains dans l'environnement, attraper un objet ainsi que percevoir l'organisation de la scène visuelle et de ses éléments. Par exemple, alors que nous avons une bonne connaissance des mécanismes perceptifs et neuronaux de l'encodage et du décodage de l'information de direction ainsi que des algorithmes biologiquement plausibles utilisés dans différentes espèces, comment le cerveau traite et représente l'information de vitesse reste largement incompris. Des neurones sélectifs à la vitesse ont été identifiés à différents niveaux hiérarchiques des voies visuelles chez l'homme et le singe mais ne savons toujours pas précisément comment cette sélectivité est construite. Ceci explique l'absence de modèle consensuel sur cette question. Une hypothèse de travail est que ces mécanismes neuronaux, et leurs corrélats perceptifs, combinent de façon non-linéaire l'information locale de mouvement extraite à travers plusieurs filtres spatiotemporels, prenant avantage de la structure multi-échelle des images naturelles. De plus, l'organisation perceptive de la scène et de ses parties doivent être pris en compte pour une intégration contextuelle et dépendant de la tâche. Enfin, le code neural sous-jacent à la perception de la vitesse reste lui aussi largement mystérieux et donc nous sommes loin de comprendre comment l'information de vitesse est décodé pour contrôler des réponses (oculo-)motrices et des jugements perceptifs. Récemment, nous avons proposé que l'estimation de la vitesse est intrinsèquement un problème multi-échelle et dépendant de la tâche [Simoncini12]. Nous avons défini un nouveau type de stimulus visuel de mouvement, des textures dynamiques dont la phase est aléatoire. Ces stimuli possèdent plusieurs des propriétés statistiques des images naturelles [Sanz12; Vacher15nips].

Une étape fondamentale a été franchie en important dans nos méthodes une approche héritée de l'ingénierie des systèmes. En effet, il est usuel pour caractériser le système oculomoteur d'utiliser des stimuli visuels simples comme des points, lignes ou des réseaux et de varier les paramètres de ces stimuli (contraste, orientation, direction, vitesse) pour

en déduire la réponse comportementale. L’avantage de cette méthode est clairement la simplicité des stimuli. Toutefois, celle-ci s’accompagne paradoxalement avec le désavantage de créer des stimuli pour lesquels l’information peut être distribuée à différents niveaux de complexité structurelle. Ainsi une ligne en mouvement apporte un signal simple de mouvement, mais inclut intrinsèquement aussi des informations de haut niveau, comme l’alignement des différentes informations locales de mouvement. Une approche inverse est d’utiliser des stimuli écologiques en utilisant cette fois-ci des scènes naturelles. Le désavantage de ces stimuli est cette fois-ci que la complexité du stimulus est trop grande alors que l’on ne contrôle pas le contenu informationnel. Une solution pour caractériser le système oculomoteur est plutôt de faire l’hypothèse qu’il infère le mouvement d’un objet à partir d’un modèle interne de ce mouvement. En paramétrisant ce modèle, on peut générer grâce au modèle direct des stimuli qui seront optimaux pour caractériser le système — sous réserve des hypothèses formulées.

J’ai formalisé un tel modèle de génération de texture qui a ensuite été implanté pour l’étude de la détection du mouvement [Sanz12], les *Motion Clouds* (voir <https://neuralensemble.github.io/MotionClouds/>). Il s’appuie sur la formalisation la plus simple d’un détecteur élémentaire de mouvement, le modèle “Motion Energy” [Adelson85]. Ce même modèle peut être de la même façon considéré comme la solution du problème inverse au modèle de conservation de la luminosité qui est souvent utilisé en vision par ordinateur [Aubert00]. Nous avons ensuite formulé ce modèle sous la forme d’une texture à phases aléatoires [Galerne10] en paramétrisant des axes perceptifs saillants (vitesse, direction, orientation) ainsi que les largeurs de bande (variabilité) qui leur sont associées (voir Fig. ??). On obtient alors des stimuli aux statistiques proches des images naturelles, avec un jeu de paramètres à contrôler et avec une implantation simple². Grâce à ce type de stimuli, nous avons pu par exemple caractériser la réponse oculomotrice en fonction de la richesse du contenu fréquentiel. Cette étude, parue dans *Nature Neuroscience* (impact factor 16.7), nous a permis de dissocier les différents processus non-linéaires en jeu dans une tâche décisionnelle ou perceptive : L’estimation du mouvement est intrinsèquement un problème multi-échelle et dépendant de la tâche [Simoncini12] (voir Fig. 1). Ces Motion Clouds constituent une base pour l’intégration de différentes études aux niveaux de la modélisation (pour valider les résultats théoriques), et aux niveaux physiologiques et comportementaux.

En particulier, nous avons développé autour de cet ensemble de stimuli différents axes de recherche. Dans une première étude, en collaboration avec Andrew Meso et Guillaume Masson, nous avons étudié l’estimation de la vitesse en fonction du contenu fréquentiel de la texture. Cette tâche est importante car elle nous permet de dissocier les contributions indépendantes des différents canaux dans la hiérarchie des voies visuelles et ainsi de caractériser finement la dynamique de l’intégration spatio-temporelle. Les résultats de psychophysique indiquent l’importance d’une information a priori telle que prédite par des modèles Bayésiens [Stocker06]. De façon plus surprenante, nous observons aussi des phénomènes de sur-estimation de la vitesse qui peuvent être expliqués en complétant ce dernier modèle [Meso13vss ; Meso14vss ; Vacher15nips]. Ces résultats expérimentaux peuvent être expliqués de façon globale en modélisant l’ensemble des transformations visuelles. En modélisant la génération aléatoire de textures en trois dimensions transformées par des opérations géométriques telles que des rotations, des zooms et des translations nous avons expliqué l’émergence d’a priori probabilistes qui nous ont permis de valider ces hypothèses de façon expérimentale. Ces travaux ont été publiés dans une conférence à au niveau scientifique [Vacher15nips] et sont aussi publiés dans une revue à comité de lecture [Vacher16].

Ce projet a réuni des psychophysiciens, des spécialistes du contrôle oculomoteur chez l’homme et des modélisateurs pour caractériser le système oculomoteur. Notre but est d’étendre le travail élaboré ensemble ces dernières années pour comprendre comment mouvements de poursuite et perception visuelle tirent avantage d’un traitement multi-échelle pour estimer le mouvement d’une cible. Nous poursuivons notre travail de conception mathématique de stimuli de haute dimensionnalité grâce à notre modèle génératif des

². Le code de cet algorithme de génération de textures est disponible sur <https://github.com/NeuralEnsemble/MotionClouds>.

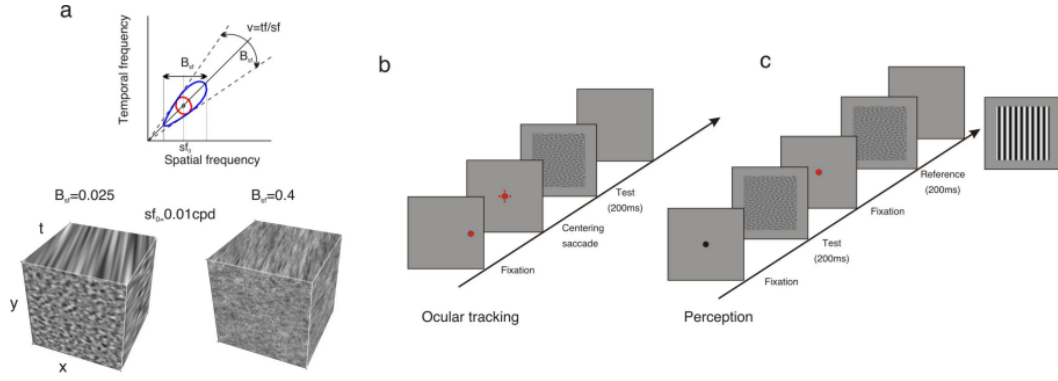


FIGURE 1 – Construction de stimuli de type Motion Clouds pour différentes tâches comportementales. Pour montrer que l’estimation du mouvement est intrinsèquement un problème multi-échelle et tâche dépendant, nous avons construit le protocole suivant. (a) Dans l’espace représentant la distribution spatio-temporelle de fréquence (espace de Fourier), chaque ligne passant par l’origine correspond à des stimuli se déplaçant à la même vitesse. Un simple réseau en translation pure correspond à un seul point dans cet espace. Nos stimuli de texture en mouvement ont une énergie distribuée dans une “ellipse” allongée le long d’une ligne de vitesse donnée, en gardant constantes les fréquences spatiales et temporelles moyennes. La bande passante spatio-temporelle a été manipulée par des largeurs de bandes différentes suivant ces axes, comme illustré par les cubes représentant les stimuli. La performance humaine a été mesurée pour deux tâches différentes, gérées en blocs parallèles. (b) Pour le suivi oculaire, les stimuli de mouvement ont été présentés pour une courte durée (200 ms) à la suite d’un centrage saccadique, visant à contrôler à la fois l’attention et la précision de la fixation. (c) Pour la discrimination de la vitesse, des stimuli de test et de référence ont été présentés successivement pour la même durée et les sujets ont été invités à indiquer si le stimulus de test a été perçue comme lente ou plus rapide que la référence. Les résultats présentés dans [Simoncini12] montrent alors des effets opposés de la largeur de bande dans ces deux tâches.

images naturelles. Grâce à eux, nous recherchons comment la vitesse est encodé grâce à l’extraction de l’énergie de mouvement dans différents filtres spatiotemporels. En analysant les réponses motrices et perceptives, nous mettons ainsi en évidence les mécanismes non-linéaires (dépendance au contraste, superposition, supra-linéarité, précision...) sous-jacente à l’intégration des sorties de ces filtres et nous pouvons donc modéliser ces mécanismes dans une nouvelle version de notre modèle computationnel. Par exemple des stimuli ont récemment été utilisés sur la rétine de rongeurs [Ravello19]. De plus, nous avons testé notre hypothèse que dans les scènes naturelles, ces mécanismes non-linéaires augmentent la précision des réponses et diminuent leur variabilité d’un essai à l’autre, ce qui conduit à des réponses motrices optimales. En comparant ces réponses motrices avec les jugements perceptifs, nous avons pu mettre en évidence une seconde hypothèse de travail : ces calculs non-linéaires dépendent de la tâche et du contexte sensoriel ou sensori-moteur [Simoncini12]. En particulier, nous avons vu dans quelle mesure les structures géométriques des scènes visuelles sont décisives pour la perception, au-delà du seul calcul de l’énergie de mouvement qui est utilisée par les mouvements oculaires.

3.4 Rôle fonctionnel des interactions latérales dans l’intégration spatio-temporelle [Perrinet12pred ; Khoei13jpp ; KhoeiMassonPerrinet17]

Les Motion Clouds ne sont qu’une étape dans la construction d’une approche systémique de la caractérisation du système oculomoteur. Ceux-ci sont en effet construits sur des hypothèses simples de synthèse du mouvement et vont nous servir de contrôle : Les scènes naturelles se caractérisent en effet par de nombreuses régularités statistiques qu’il faut alors introduire dans le modèle génératif de synthèse du mouvement. En particulier, il

est plus probable que la trajectoire de l'image d'un objet suive une trajectoire continue plutôt que dis-continue. Il est remarquable de noter qu'alors les modèles qui considèrent une indépendance conditionnelle entre les mesures voisines de mouvements considèrent par conséquent qu'une trajectoire dis-continue est aussi probable qu'une trajectoire continue.

Partant de ce constat, j'ai proposé un modèle d'intégration spatio-temporelle qui propose d'inclure l'information a priori que le mouvement d'un mouvement est continu et doit donc être pris en compte dans la dynamique globale du modèle. Nous avons mis en évidence la proximité de cette approche avec celle de **Burgi00** et aussi les limites de ce dernier modèle. En effet, établir des prédictions sur un espace de position et de vitesse entraîne une explosion du nombre combinatoire de prédictions possible. À l'inverse du modèle précédent qui considère une approximation grossière de l'espace topographique de position et de vitesse, nous avons utilisé une technique de traitement de l'image appliquée au suivi de contours, les filtres particuliers. J'ai implanté un tel algorithme qui fournit ainsi une plateforme de modélisation que nous appliquons à différents problèmes.

Une première application de cette méthode a consisté à résoudre le problème de l'ouverture. En effet, ce problème est remarquable car il souligne qu'une information locale (par exemple le mouvement d'une ligne infinie) n'est pas suffisant pour caractériser le mouvement global (le mouvement d'un segment fini dans une direction non perpendiculaire à son orientation). Classiquement, il est établi que ce problème est résolu par des mécanismes spécialisés qui détectent soit le mouvement au centre du segment, soit le mouvement des fins de lignes. Alors, il est courant d'admettre que cette dernière information résout le problème de l'ouverture par un processus de compétition. Grâce au modèle de codage prédictif basé sur le mouvement, nous avons au contraire montré que ces mécanismes spécialisés étaient plutôt une propriété émergente du système : il est suffisant pour résoudre les problèmes de l'ouverture (voir Fig. 2).

Il est étonnant de constater qu'avec des hypothèses simples —le codage prédictif basé sur le mouvement, nous pouvons ainsi caractériser des propriétés du système oculomoteur attribués classiquement à des mécanismes complexes et non-linéaires. Nous avons ainsi étendu, en collaboration avec Mina Khoei (en thèse FACETS-ITN) et Anna Montagnini (inViBe-INT), notre étude à un autre modèle classique pour l'oculomotricité : l'extrapolation du mouvement. Cette extension consiste à étudier le comportement du modèle lors d'une interruption transiente de l'entrée sensorielle. En effet, il est courant —par exemple lors d'un clignement de l'œil— que l'entrée sensorielle soit perturbée ou suspendue, et il est important pour le système de représenter une certaine continuité. Celle-ci se traduit à partir de certaines étapes dans la hiérarchie du système visuel par une activité neurale soutenue pendant l'interruption, comme montré dans le cortex infero-temporal chez le macaque [**Assad95**]. Nous avons mis en évidence que notre modèle pouvait répliquer un tel comportement et en particulier, nous avons apporté trois points : 1) une prédiction à la fois en position et en vitesse est nécessaire pour avoir un comportement robuste, 2) la représentation du mouvement perd progressivement de sa précision lors de l'interruption, et 3) le système doit avoir accumulé assez d'information pour être dans un mode de suivi. Nous avons publié ces résultats dans différentes conférences et journaux [**Khoei13jpp** ; **KhoeiMassonPerrinet17**]. Bien que ce modèle se base sur une conceptualisation de la propagation de l'information au sein d'une carte corticale (utilisant les filtres particuliers), nous verrons dans la section suivante (Sec. 3.6) qu'elle admet une implantation neuromimétique.

3.5 Rôle fonctionnel des interactions latérales dans l'intégration spatiale [**PerrinetBednar15**]

En parallèle de l'étude de la prédiction spatio-temporelles nous avons concentré nos efforts sur les dépendances spatiales dans les images naturelles. En effet, un autre axe d'exploration est d'implanter un prior d'association local similaire à celui utilisé pour le codage prédictif dans le temps (basé sur le mouvement), cette fois en étudiant les régularités statistiques des scènes naturelles dans l'espace à un instant donné. Une telle tâche est similaire à l'identification d'un "champ associatif" qui connecterait des neurones sélectifs à des orientations locales suivant leur régularités [**Field93**]. Ce concept est controversé

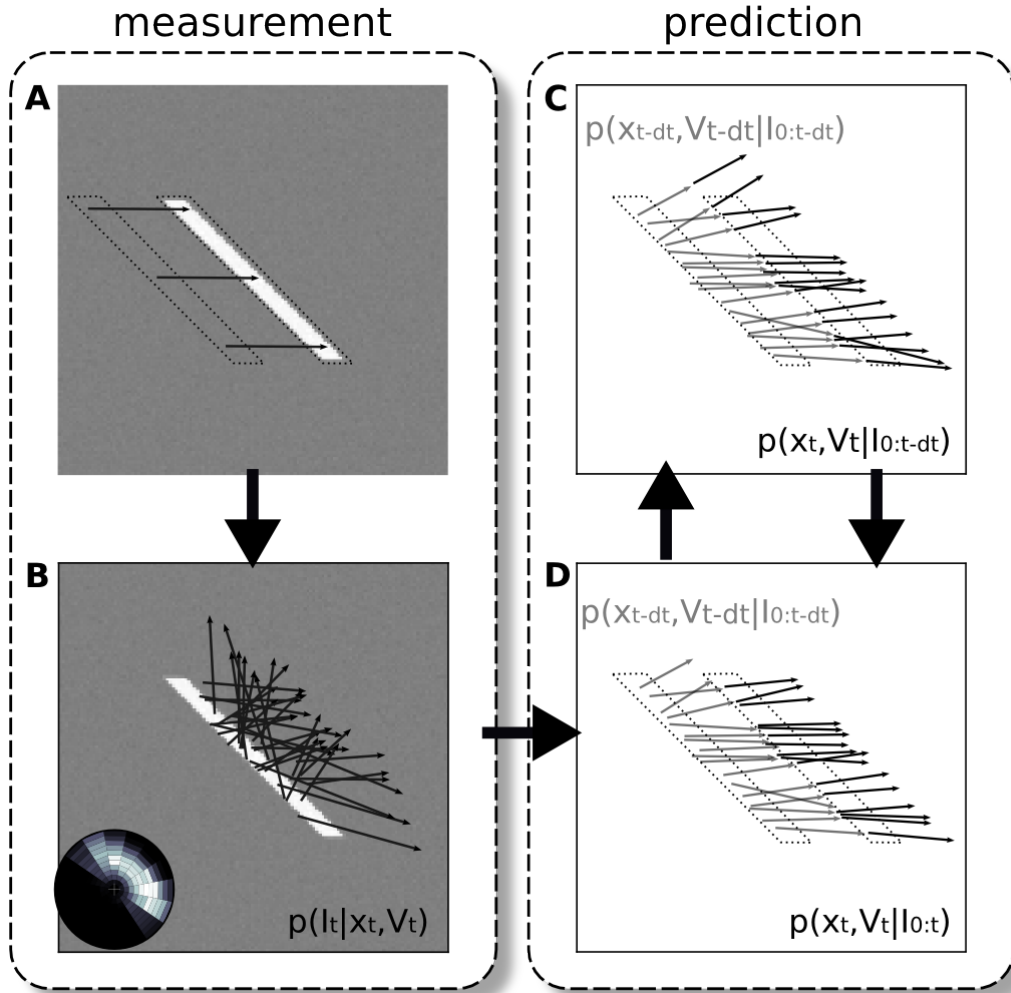


FIGURE 2 – Un codage prédictif basé sur le mouvement est suffisant pour résoudre le problème de l'ouverture. Ce modèle est constitué par un étage classique de mesure (estimation) et d'une couche de codage prédictif. L'étape de mesure consiste en (A) inférer à partir de deux trames consécutives du flux d'entrée (B) une distribution de probabilité de mouvement. Cette distribution est ici représentée par des échantillons dans l'espace possible des positions et vitesses du mouvement (flèches noires). Cette couche interagit avec la couche prédictive qui constitue (C) une étape de prédiction qui prédit l'état futur depuis l'estimation actuelle (des flèches grises aux flèches noires). Dans (D), l'étape d'estimation fusionne la prévision actuelle de mouvement avec la probabilité mesurée au même instant dans la couche précédente (B), comme représenté par les flèches noires. Dans [Perrinet12pred], nous avons montré qu'un tel modèle permet de résoudre le problème de l'ouverture. Ce même modèle a été étendu pour modéliser l'extrapolation du mouvement [Khoei13jpp] ou inclure des délais [KhoeiMassonPerrinet17].

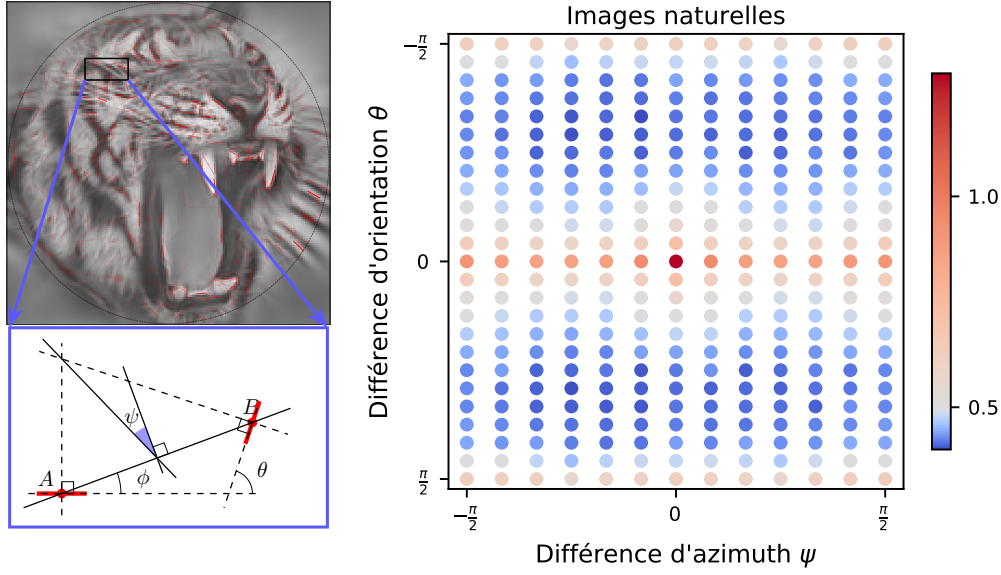


FIGURE 3 – **Co-occurrences de bord** : (A) Exemple d'image avec la liste des bords extraits superposés. Chaque arête est représentée par un segment de ligne rouge qui représente sa position (centre du segment), son orientation et son échelle (longueur du segment). Nous avons contrôlé la qualité de la reconstruction à partir de l'information de bord de sorte que l'énergie résiduelle était inférieure à 5%. (B) La relation entre un bord de référence «A» et un autre bord «B» peut être quantifiée en fonction de la différence entre leurs orientations θ , le rapport de l'échelle σ , la distance d entre leurs centres, mais aussi la différence d'azimuth ϕ . De plus, nous définissons $\psi = \phi - \theta/2$, qui est symétrique par rapport au choix du bord de référence ; En particulier, $\psi = 0$ pour toute arêtes co-circulaires. Comme dans **Geisler01**, les arêtes en dehors d'un masque circulaire central sont rejetées dans le calcul des statistiques pour éviter les artefacts.

car les études qui ont montré un corrélât neural pour une telle connectivité [**Bosking97**] sont souvent en contradiction avec des études physiologiques [**Chavane11** ; **Hunt12**]. En collaboration avec Jim Bednar (DTC, Edinburgh), j'ai utilisé des travaux précédents sur le représentation en ondelettes [**Fischer07cv**] pour quantifier un tel champ associatif. Il en ressort deux traits principaux : 1) quand on mesure la probabilité de cooccurrence de deux contours (voir Figure 3), leurs propriétés absolues (échelle, distance) sont indépendantes de leurs propriétés géométriques (azimuth, angle relatif) ; 2) les propriétés géométriques sont suffisantes pour caractériser des propriétés de ces images comme par exemple leur catégorie (animal/ non-animal ou naturel / artificiel). Nous avons détaillé ces résultats dans une publication dans le journal Scientific Reports [**PerrinetBednar15**]. Ces axes de recherche —prédiction sur une trajectoire et dans l'espace— sont complémentaires et nous verrons dans mon programme de recherche qu'il est possible de les combiner.

Dans le futur, l'extension de cette représentation calculée sur l'ensemble de l'image pourrait être améliorée en la couplant à des processus de classification locaux permettant de déterminer par exemple la position de l'objet à classifier et de segmenter progressivement la figure du fond afin de diminuer ainsi les distractions.

3.6 Modélisation de réseaux de neurones impulsionnels

L'étude que nous menons sur les régularités statistiques —dans les trajectoires des objets et dans l'espace— se doivent d'être validés par les résultats expérimentaux. Pour ce faire, nous utilisons deux approches complémentaires. La première consiste à utiliser des simulations à grande échelle des conductivités que nous avons mis en évidence pour comprendre si ces principes s'étendent tels quels à des réseaux de neurones. La deuxième approche consiste à utiliser les données neurales collectées au laboratoire et d'utiliser nos modèles pour décoder de l'activité neurale l'information visuelle pertinente.

Dans le premier axe, nous avons implanté en collaboration avec Bernhard Kaplan, Anders Lansner (KTH, Suède) et Frédéric Chavane (inViBe-INT), et dans le cadre de BrainScaleS, des simulations à grande échelle d'une aire corticale implantant le codage prédictif basé sur le mouvement. Cette simulation est basée sur le savoir-faire du KTH en la matière et nous a permis de valider le modèle probabiliste à l'échelle neuro-morphique. Nous avons utilisé comme contrôle le protocole d'extrapolation du mouvement (voir plus haut et [Khoei13jpp]). Les résultats ont montré des résultats similaires aux résultats théoriques (notamment les trois points évoqués plus haut), ainsi qu'une propriété reliée à l'implantation neurale. Durant l'interruption, la représentation probabiliste au niveau de la population de neurones reste la même, mais le niveau d'activité global (en termes de fréquence de décharge) diminue, en accord avec par exemple les mesures dans le cortex infero-temporal chez le macaque [Assad95]. Nous avons détaillé ces résultats dans une publication commune [KaplanKhoei14]. Il est important de noter que ce type d'implantation est basé sur une connectivité anisotropique qui n'avait jamais —à notre connaissance— été explorée. Ce modèle a fait partie des modèles sélectionnés dans BrainScaleS pour être implantés finalement sur les micro-circuits neuromorphiques à grande échelle.

Un aspect complémentaire à la simulation est l'étude du décodage de l'activité neurale. En collaboration avec Giacomo Benvenuto (thèse BrainScaleS) et Frédéric Chavane (inViBe-INT), nous avons étudié des modèles statistiques qui nous permettent d'extraire l'information visuelle de populations de neurones. En premier lieu, une telle approche permet de consolider les bases théoriques qui permettent de caractériser l'activité neurale, tant au niveau de la statistique de fréquence de tir des neurones que pour la paramétrisation des courbes de sélectivité neurale, par exemple en fonction de l'orientation et de la direction. Aussi, une telle caractérisation nous permettent de valider des modèles de décodage et de représentation de l'information dans l'activité neurale (comme par exemple [Jazayeri06]) et ainsi de boucler le lien avec l'implantation neurale de tels processus.

Pour ce faire nous avons recruté une étudiante en post doctorat, Wahiba Taouali, pour mieux comprendre les fondements mathématiques du décodage neural. Une première tâche a consisté à quantifier les différentes sources de bruit dans les enregistrements neurophysiologiques obtenus au laboratoire. En particulier, nous avons développé une méthodologie mathématique permettant de caractériser la variabilité des trains de potentiels d'action. Ce test statistique novateur nous a permis de montrer que la variabilité intrinsèque aux enregistrements s'établissaient de façon différentielle de la rétine, au thalamus et aux aires corticales supérieures. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans un journal à comité de lecture [Taouali16].

Une fois que ces principes du codage neural étaient mieux compris, nous les avons appliqués à des enregistrements effectués dans le cortex visuel primaire évoqué par une barre en mouvement. Grâce à la méthode de décodage neural nous avons pu valider l'hypothèse selon laquelle dans la représentation neurale, une population de neurones peut coder de façon efficace la position et l'orientation d'une barre en mouvement. En particulier, une signature particulière du codage neural montre qu'une barre en mouvement selon une trajectoire prédictive anticiper le long de son mouvement [Taouali15vss; Taouali16areadne; Perrinet19nccd].

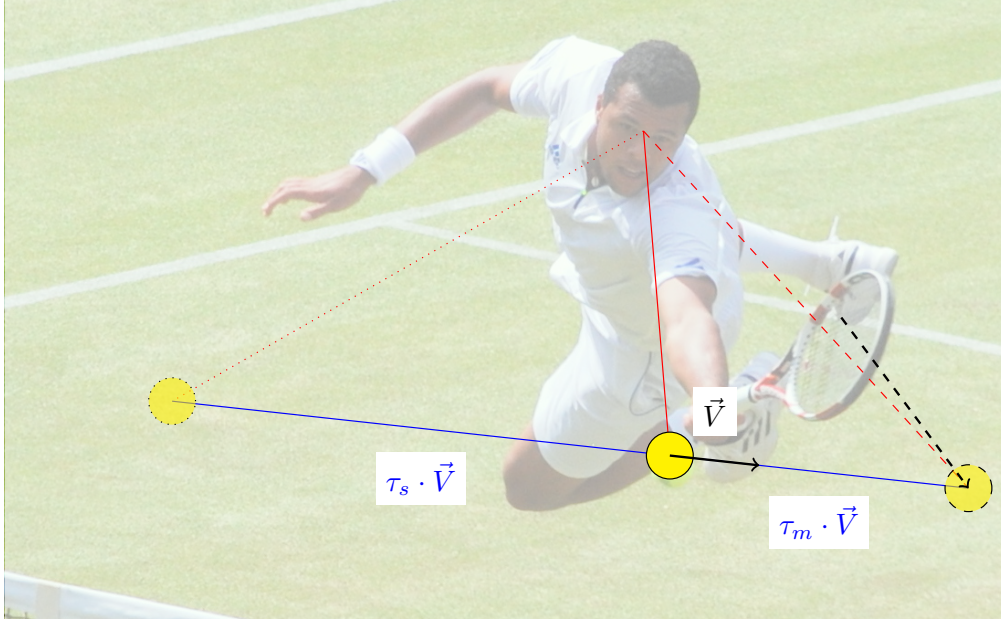


FIGURE 4 – La commande motrice doit être optimale sous la contrainte de délais axonaux. En effet, le système nerveux central doit faire face aux retards axonaux, tant au niveau sensoriel que moteur. Par exemple, dans le système visuo-oculomoteur humain, il faut environ $\tau_s = 50$ ms pour que l'image rétinienne atteigne les zones visuelles impliquées dans la détection de mouvement, et encore $\tau_m = 40$ ms pour atteindre les muscles oculomoteurs. En conséquence, pour un joueur de tennis qui essaie d'intercepter une balle à une vitesse de $\vec{V} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la position physique détectée est en fait à environ 1 m derrière la position vraie (comme représenté ici par $\tau_s \cdot \vec{V}$), alors que la position au moment de l'émission de la commande motrice se situera à .8 m après son exécution ($\tau_m \cdot \vec{V}$). Notez qu'à cet instant, si la position réelle de la balle donnée par son image visuelle transmise par les photorécepteurs de la rétine est approximativement à 45 degrés d'excentricité (ligne pointillée rouge), le regard du joueur est dirigé vers la balle à sa position *présente* (ligne rouge), de façon anticipée. Un contrôle optimal commande l'action (le mouvement futur de l'œil) de cette position retardée de la balle dans l'avenir — vers celle de la raquette (ligne noire brisée) pour diriger l'action vers la position attendue de la balle lorsque l'action atteint la périphérie (muscles).

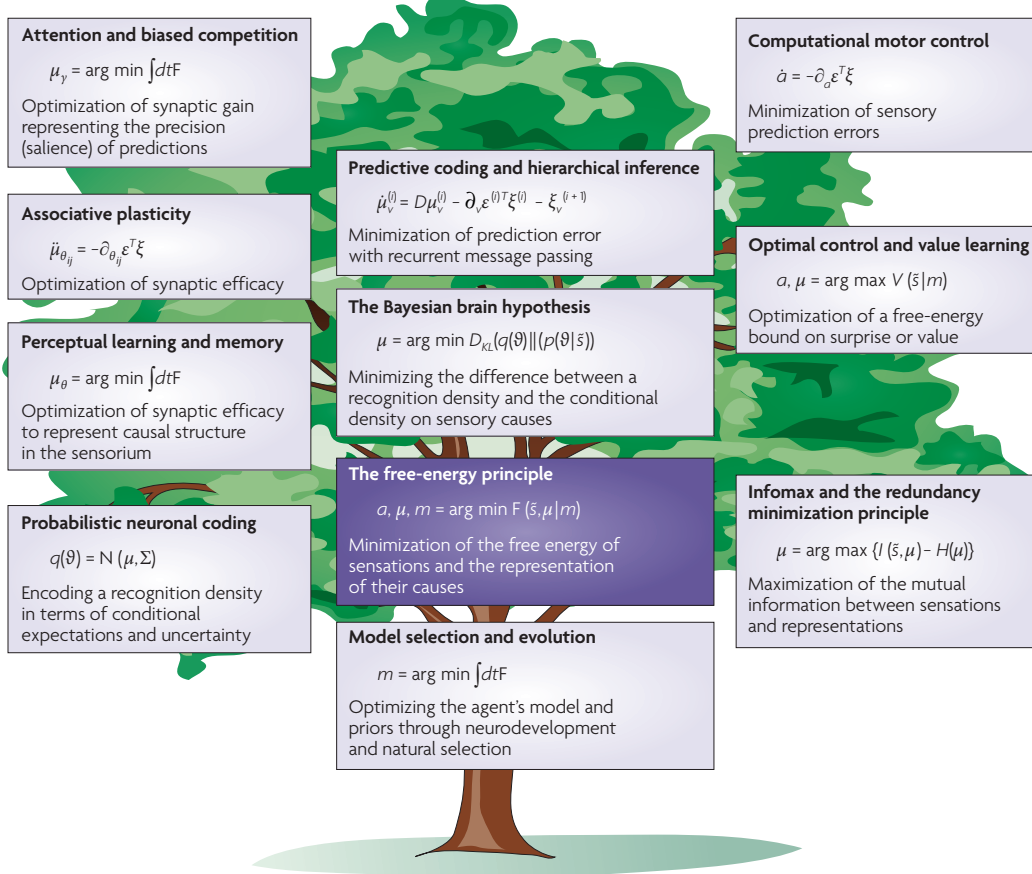


FIGURE 5 – **Unification des théories computationnelles par la minimisation de l'énergie libre (MEL)**. Cette figure extraite de [Friston10c] représente la place central du principe de MEL dans l'ensemble des théories computationnelles. En particulier, on peut noter que les principes que nous avons détaillés plus haut dans les chapitres précédents (réseaux de neurones heuristiques, principes d'optimisation, codage prédictif, ...) peuvent se rapporter à ce langage commun.

3.7 Unification des théories computationnelles par la minimisation de l'énergie libre (MEL) [PerrinetAdamsFriston14]

L'énergie libre est une mesure statistique qui quantifie la surprise d'échantillonner des données (par exemple sensorielles), connaissant *a priori* un modèle génératif de la synthèse (cause) de ces données. L'hypothèse de minimisation de l'énergie libre (MEL) considère que tout agent qui résiste à la tendance au désordre (tendance dictée par le second principe de la thermodynamique) développe alors nécessairement des stratégies de MEL, car celle-ci donne une borne supérieure mesurable de la surprise, c'est-à-dire de l'entropie liée à un modèle génératif. Dans la théorie développée par Karl Friston (UCL, Londres), appliquant ce principe aux neurosciences, il ajoute deux hypothèses supplémentaires :

- Le modèle génératif est hiérarchique et non-linéaire [Friston08b],
- La représentation des données comme densité de probabilité est approchée par des lois normales (approximation Laplacienne) dont les moments sont explicitement codés dans la décharge neurale [Friston09a].

Une première conséquence de ce principe est qu'un système appliquant ce principe modifie son état interne pour minimiser sa surprise. Cette minimisation s'établit aux différents niveaux du modèle hiérarchique et s'implante par la communication de transferts d'informations, généralisant ainsi la théorie établie par Mumford92. Cette jeune théorie, en plein développement théorique et applicatif, a engendré une unification —parfois décriée— de nombreux pans des approches computationnelles en neurosciences. Elle constitue à ce titre une avancée majeure dans les neurosciences dans ces dernières années.

J'ai initié une collaboration avec Karl Friston en 2010 pour appliquer ce principe à la modélisation du système oculomoteur. J'ai réalisé cette collaboration au cours d'une mission longue entre octobre 2010 et février 2012. Durant cette période, j'ai intégré son équipe de neurobiologie théorique, développé un modèle unificateur pour le système oculomoteur que nous avons décliné dans un premier temps en trois projets : Dans le premier, nous avons étudié comment ce principe pouvait permettre de décrire les principes computationnelles de la recherche visuelle (visual search) en l'appliquant à un modèle de saccades oculaires [Friston12]. En parallèle, nous avons étudié dans un second papier comment un modèle de la poursuite lente pouvait expliquer des phénomènes observés chez des patients schizophréniques [Adams12].

Ce travail a culminé avec la formalisation d'un modèle intégré du système oculomoteur. En particulier nous nous sommes attachés à prendre en compte l'existence d'inévitables délais de traitement entre la sensation rétinienne et la prise de décision oculo-motrice. L'inclusion de cette contrainte du système oculomoteur nous a permis le développement d'une théorie mathématique novatrice pour expliquer l'intégration du mouvement entre une sensation rétinienne retardée et le modèle interne. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans le journal Biological Cybernetics [PerrinetAdamsFriston14] et de nombreuses applications notamment de pouvoir modéliser l'illusion du Flash retardé [KhoeiMassonPerrinet17].

La majeure innovation de ce principe est de considérer l'agent et son environnement de façon globale. Dans cette approche systémique, le système oculomoteur est considéré comme un système intégré plutôt que le chaînage de processus élémentaires de traitement comme ce qui est classiquement accepté [Robinson86 ; Krauzlis89]. Appliqué à un agent, c'est-à-dire à un système pouvant agir sur son environnement pour minimiser son énergie libre, le principe de MEL conduit à l'*inférence active* [Friston09c]. Cette théorie permet d'unifier des modèles de natures différentes (probabilistes, modèle de contrôle, codage prédictif, réseaux Bayésiens, heuristiques sur des réseaux de neurones, ...) en proposant un langage commun [Friston10c] (voir Fig. 5). Nous avons détaillé cette proposition dans une publication dans le journal Biological Cybernetics qui montre des exemples concrets de ces différentes approches sur l'application de ce principe [PerrinetAdamsFriston14].

3.8 Activités de recherche dans l'équipe NeOpTo (2018-2022)

3.9 Productions scientifiques sélectionnées

Je présente ici un choix de 10 productions scientifiques pour les 10 derniers semestres d'activité. Les codes dans la marge correspondent à ceux utilisés dans la liste complète des publications.

A50 **Ladret22**

- Cette publication en révision (deuxième révision) combine 1/ une création de stimuli basée sur un modèle, 2/ des enregistrements neuro-physiologiques basés sur ce protocole novateur et 3/ une méthodologie nouvelle de décodage. Basés sur ces innovations théoriques et expérimentales, nous avons mis en évidence le rôle de la précision dans le traitement dynamique de l'information, et donc le rôle potentiel de processus prédictifs dans des données biologiques.

A48 **Grimaldi22pami**

- Nous avons combiné dans cette publication une approche d'ingénierie des systèmes neuromorphiques et une approche de modélisation des neurosciences computationnelles. L'objectif est de permettre une catégorisation rapide d'objets à partir de flux d'événements. Nous utilisons les données de caméras événementielles et une innovation a été de caractériser de manière extensive l'efficacité de ce réseau en fonction de différents paramètres d'entrée. La nouveauté était de rapprocher ce type de modèle des réseaux événementiels ou des réseaux de neurones à impulsions.

A47 **Chavane22**

- Dans cette revue de l'état de l'art sur l'anatomie du cortex visuel primaire, nous avons proposé une hypothèse novatrice sur l'organisation de la formation sur la surface de cette aire.

A46 **BoutinFranciosiniChavaneRuffierPerrinet20**

- Ce travail étend l'architecture habituellement rencontrée en apprentissage profond en incluant des processus prédictifs. Un résultat principal est d'obtenir après apprentissage un réseau dont la structure est explicable, un résultat majeur par rapport aux réseaux profonds classiques. Un second résultat est de montrer le parallèle entre ce type de réseaux et ce que l'on peut observer dans le cortex visuel primaire.

A44 **Dauce20**

- L'objectif de ce travail est d'introduire des processus actifs dans les modèles actuels de traitement d'images. Inspirés par ce qui peut être observé dans les systèmes biologiques, nous avons introduit des saccades oculaires pour résoudre le problème conjoint de l'identification et de la localisation d'objets dans les images. Le résultat principal est de pouvoir réaliser cette tâche avec beaucoup moins de ressources informatiques.

A43 **PasturelMontagniniPerrinet20**

- Nous avons introduit un nouveau paradigme dans lequel les protocoles expérimentaux peuvent changer à des moments imprévisibles. Ce travail combine une analyse théorique et des résultats comportementaux qui actualisent nos connaissances sur le traitement de la volatilité dans les données comportementales.

2017

A37 **KhoeiMassonPerrinet17**

- Dans cette publication de neurosciences computationnelles, nous avons montré que des principes de propagation dynamique sur la surface du cortex visuel pouvait permettre de donner une solution plus simple à des problèmes classiques de neurosciences de la vision. En particulier nous avons montré qu'un principe prédictif qui accumule de la formation le long d'une trajectoire d'un objet en mouvement permettait de résoudre le problème de l'ouverture.

2013

A33 **PerrinetAdamsFriston14**

- Cette publication permet de donner une un cadre théorique solide sur un problème majeur en neurosciences : le traitement des délais dans la chaîne des processus

cognitifs. En utilisant le cadre du principe de minimisation de l'énergie libre, nous avons développé une approche théorique qui permet de compenser pour ces délais. En particulier nous l'avons appliqué à différents problèmes dans la modélisation des mouvements des yeux, que nous avons étendu dans une autre publication à la modélisation du comportement neuro-typique ou dans le spectre schizophrénique.

B6 Perrinet20

- Dans ce chapitre d'ouvrage, je fais une revue de l'état de l'art sur les processus prédictifs et notamment comment ceux-ci peuvent permettre de donner des solutions simples à des problèmes neuroscientifiques.

B4 CristobalPerrinetKeil15bicv

- Dans ce livre, nous avons regroupé les contributions de chercheurs en neurosciences et en vision par ordinateur pour donner un cadre général d'une compréhension interdisciplinaire de la perception visuelle.

4 Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique

4.1 Encadrement de thèse et post-doctorants

Actuellement, j'ai l'occasion d'encadrer trois doctorants en tant qu'encadrant principal :

- Jean-Nicolas Jérémie “Bio-mimetic agile aerial robots flying in real-life conditions” (PhD, bourse AgileNeuroBot (ANR-20-CE23-0021), 10/2021-09/2024)
- Antoine Grimaldi “Ultra-fast vision using Spiking Neural Networks” (PhD, APRO-VIS3D grant (ANR-19-CHR3-0008-03), 2020 / 2023)
- Hugo Ladret “A multiscale cortical model to account for orientation selectivity in natural-like stimulations” (direction, bourse AMU, co-direction avec Christian Casanova, en cotutelle avec l'Université de Montréal, 2019 / 2023)

Précédemment, j'ai eu l'occasion d'encadrer des étudiants en direction de thèse, en post-doctorat ou en co-direction de thèse :

- Alberto Arturo Vergani “Visual computations using Spatio-temporal Diffusion Kernels and Traveling Waves” (Post-Doc, 04/2020 - 09/2021)
- Victor Boutin “Controlling an aerial robot by human semaphore gestures using a bio-inspired neural network” (PhD, bourse AMIDEX, 12/2016-03/2020)
- Angelo Franciosini “Trajectories in natural images and the sensory processing of contours” (PhD, bourse PhD program, 2017 / 2021)
- Kiana Mansour Pour “Predicting and selecting sensory events : inference for smooth eye movements” (PhD, 2015 - 2018)
- Jean-Bernard Damasse “Smooth pursuit eye movements and learning : Role of motion probability and reinforcement contingencies” (PhD, 2014-2017)
- Mina A Khoei “Emerging properties in a neural field model implementing probabilistic prediction” (PhD, 2011-2014)
- Wahiba Taouali “Motion Integration By V1 Population” (Post-Doc, 2013-2015)
- Nicole Voges “Complex dynamics in recurrent cortical networks based on spatially realistic connectivities” (Post-Doc, 2008-2010)
- Jens Kremkow “Correlating Excitation and Inhibition in Visual Cortical Circuits : Functional Consequences and Biological Feasibility” (PhD, 2006-2009)

4.2 Participation à des activités grand public

Je participe ou initie de nombreuses rencontres avec le grand public (cf. <https://laurentperrinet.github.io/project/tout-public/>) et récemment :

- Article de dissémination sur le hasard dans “The conversation” (6200 lectures au 16 Février 2022).
- Participation à une présentation “stand up” des NeuroStories : conférence invitée “Le temps des sens”.
- Article de dissémination sur le temps dans la perception dans “The conversation” (11600 lectures au 16 Février 2022).
- Participation à des activités de dissémination aux des Journées de Neurologie de Langue Française (JNLF) : conférence invitée “Des illusions aux hallucinations visuelles: une porte sur la perception”.
- Article de dissémination sur les illusions visuelles dans “The conversation” (12500 lectures au 16 Février 2022).
- Participation à des activités grand public : Rencontre avec les collégiens marseillais, fête de la science, participation à un jury autour de la société, la science et le cinéma.

4.3 Collaboration artistique

En parallèle avec les actions grand public, je développe une collaboration active avec un artiste plasticien, Etienne Rey (friche Belle de Mai, Marseille, voir <https://laurentperrinet.github.io/project/art-science/>). Nous avons produit plusieurs actions, entre autres :

- “Horizon Faille” – interstices, Caen , 2021
- “Sans gravité – une poétique de l’air” – Ardenome à Avignon, 2019
- “Instabilité (series)” @ Art-O-Rama, Installation avec sérigraphie, dessin mural, lumière, 2018
- projet “TRAMES” présentation à la Fondation Vasarely (Aix), 2016

4.4 Enseignement

Cours magistraux de Neurosciences Computationnelles en troisième année de licence Sciences et Humanités et dans le cadre du programme de thèse Marseillais en Neurosciences. 2019

- An introduction to the field of Computational Neuroscience , 2018
- Probabilities, the Free-energy principle and Active Inference.

J’ai récemment pris part à une école d’été organisée en janvier 2019 par le centre de neurosciences computationnelles de Valparaiso au Chili. Les thèmes abordés au cours de cette école étaient :

- adaptation comportementale,
- compensation des délais,
- modélisation Bayésienne,
- tutoriel modélisation de réseaux à spikes.

5 Transfert technologique, relations industrielles et valorisation

5.1 Contrats et collaborations

Au cours de 10 derniers semestres, j’ai eu l’occasion de collaborer sur plusieurs contrats de niveau national (ANR) et international (cf <https://laurentperrinet.github.io/#grants>) :

Actuellement, je suis impliqué dans les contrats suivants

- soit à titre d’investigateur principal :
 - ANR AgileNeuroBot (Co-ordinateur principal) : “Robots aériens agiles biomimétiques pour le vol en conditions réelles” (2021/2024)
 - APROVIS3D : “Aprovis3D : Event-Based Artificial Intelligence” (2019–2023, coordination globale du projet par Jean Martinet, université de Nice).
 - ANR PRIOSSENS (2021/2024) : “Modelling behavioural and neuronal data within the active inference framework” avec Anna Montagnini,
- soit à titre de collaborateur :
 - ANR ShootingStar (2021/2024) avec Frédéric Chavane,
 - ANR ACES (2021/2024) : “CAssignment of credit and constraints on eye movement learning” avec Anna Montagnini,
 - ANR RubinVase (2021/2024) avec Dario Prandi et Luca Calatroni.

Précédemment, j’ai eu l’occasion de collaborer sur les contrats suivants durant cette période :

- PhD DOC2AMU : An Excellence Fellowship, H2020 (Excellence Scientifique) : Actions Marie Skłodowska-Curie (IF, ITN, RISE, COFUND) (2016–2019)
- PhD ICN A grant from the Ph.D. program in Integrative and Clinical Neuroscience (PhD position, 2017 / 2021).
- SpikeAI : lauréat du Défi Biomimétisme (2019) “Algorithmes événementiels d’Intelligence Artificielle / Event-Based Artificial Intelligence” (2019).
- ANR Horizontal-V1 (2017–2021) : “Connectivité Horizontale et Prédiction de Cohérences dans l’Intégration de Contour” avec Yves Fregnac et Frédéric Chavane,

5.2 Développements de logiciels

Nous développons plusieurs lignes de recherche pour appliquer nos résultats à des problèmes concrets, sous forme de logiciels open source :

5.2.1 Mouvements des yeux et mouvement

- AnEMo : traitement du signal pour l’analyse des mouvements des yeux [Pasturel18anemo],
- MotionClouds : génération de textures pour la perception du mouvement [Sanz12; Vacher15nips; Vacher16],
- LeCheapEyeTracker – <https://github.com/laurentperrinet/CatchTheEye> : Oculomètre minimal utilisant l’apprentissage profond;

5.2.2 Biologically-Inspired Computer Vision

- openRetina : caméra événementielle minimale,
- SparseHebbianLearning : apprentissage non-supervisé d’images naturelles [Perrinet10shl; Perrinet19hulk],
- Simple Library for Image Processing : techniques de traitement de l’image, utilisé notamment dans [Perrinet15bicv; Ravello16droplets; PerrinetBednar15; Perrinet15eusipco; Perrinet16EUVIP],
- LogGabor : représentations multi-échelles des contours [Fischer07; Fischer07cv],
- SparseEdges : codage épars (parcimonieux) d’images naturelles [Perrinet15bicv; PerrinetBednar15],
- MotionParticles : prédiction dynamique par filtrage particulaire (permet de reproduire [Perrinet12pred; Khoei13jpp; KhoeiMassonPerrinet17]).

5.2.3 Promotion du logiciel libre

- Je participe à différentes initiatives afin de promouvoir les pratiques du logiciel libre
- écriture régulière d’un blog scientifique,
 - participation à des réseaux sociaux à des fins de dissémination comme twitter, stackOverflow, instagram ou gitHub.

5.3 Expertise scientifique

J’ai participé au développement de différentes entreprise de type “start-up” dans le cadre d’une autorisation de cumul :

- en 2019-2020 : missions d’expertise scientifique avec Arnaud Malvache à Unistellar, Marseille.
- 2019-2020 : missions d’expertise scientifique en collaboration avec Sid Kouider à NextMind, Paris.

6 Encadrement, animation et management de la recherche

Depuis Janvier 2022, je suis nommé à la commission interdisciplinaire (CID) 51 : Modélisation mathématique, informatique et physique pour les sciences du vivant.

Outre ces responsabilités scientifiques, je participe à l’animation scientifique sous d’autres formes. Tout d’abord pour l’évaluation de la recherche par les chercheurs en tant que membre d’un comité éditorial ou en temps que relecteur. Je développe aussi des collaborations internationales et en même temps dans la vie sociale de l’organisme :

- Scientific reports (Nature group) Membre du comité éditorial
- Relecteur dans de nombreuses revues et conférences, voir <https://publons.com/author/1206845/laurent-u-perrinet#profile>
- Membre de différents jurys internationaux (BE, NL) pour des évaluations de projets,
- Membre élu CLAS GLM de Marseille-Joseph Aiguier/Timone, responsable de la petite enfance.

7 Objectifs / Projet de recherche