



***Quand de pauvres petits poissons
rencontrent l'IA, la réalité virtuelle,
des robots et des drones !***

Clément Sire

***Laboratoire de Physique Théorique
CNRS & Université de Toulouse – Paul Sabatier***

<http://www.lpt.ups-tlse.fr/>

G. Theraulaz, R. Escobedo (CRCA, Toulouse)

F. Mondada, V. Papaspyros (EPFL) : AI, LureBot

L. Lei (University of Shanghai) : Cuboid Robots

G. Hattenberger, M. Verdoucq (ENAC) : Drones

S. Sanchez (IRIT), R. Bastien (CRCA) : VR-Fish (ANR)

[Article de vulgarisation dans le magazine *La Recherche*](#)





La physique théorique



- **L'art de traduire la réalité physique dans le langage mathématique (qui a toujours raison !)**
 - Exploiter les connaissances issues des **expériences**
 - Identifier les **bonnes échelles** pour étudier le système
 - Inclure les **mécanismes/ingrédients** minimaux
- **Théories et modèles offrent**
 - Une **représentation** synthétique et minimale du système
 - Une **explication quantitative** ou au moins **qualitative** des phénomènes observés et de leurs causes
 - Des prédictions pouvant être testées expérimentalement afin d'évaluer leur **pouvoir prédictif** et leurs **limites** (aller-retour théorie/expérience)
 - Une aide à la **conception** et à **l'analyse d'expériences**



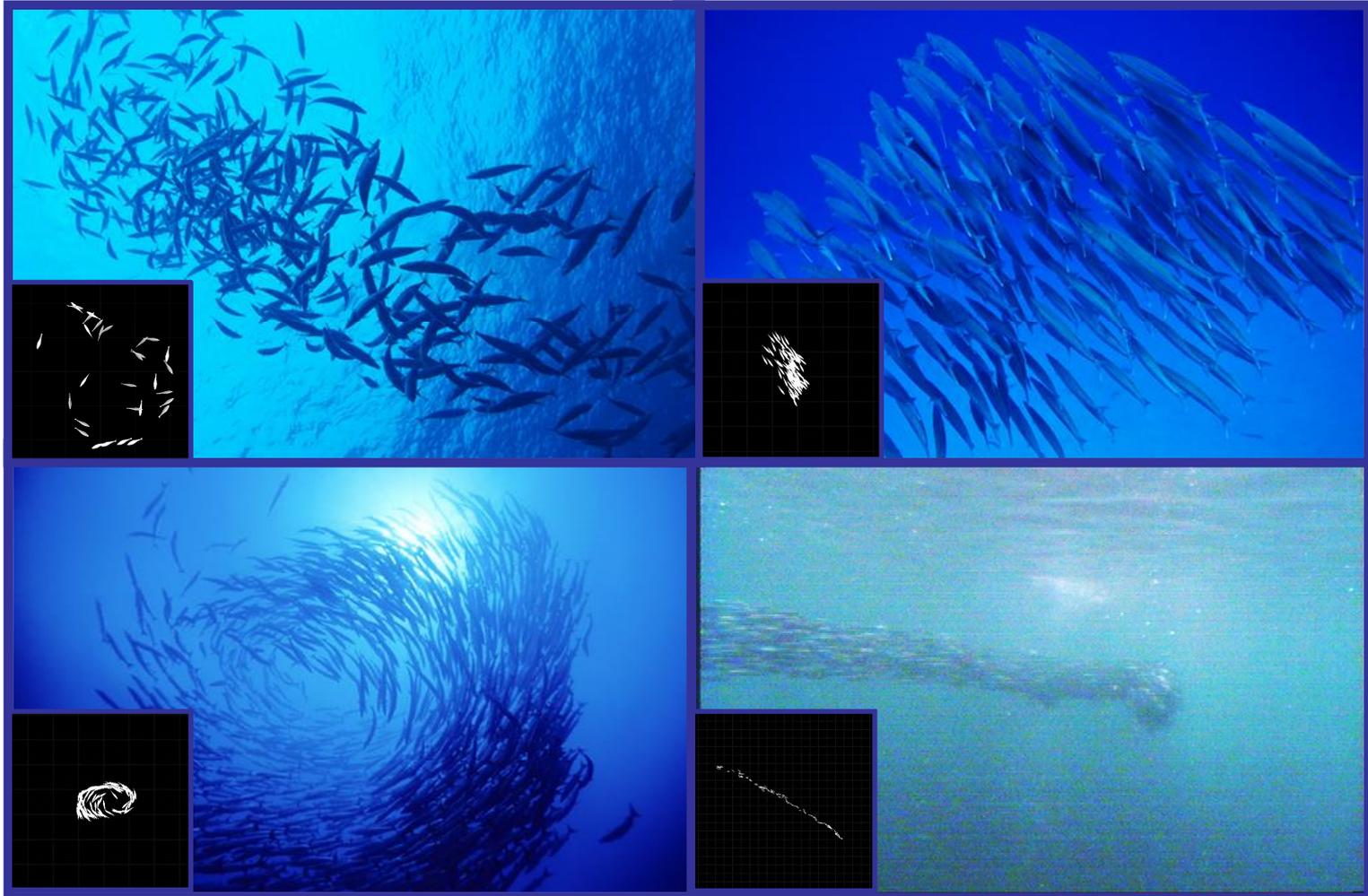
Plan



- **Modèles génératifs pour le mouvement collectif de groupes animaux**
 - **Mesures et reconstruction des interactions sociales** exploitant des heures de trajectoires
 - **Modèles analytiques** exploitant la reconstruction des interactions sociales
 - **Modèles d'apprentissage automatique (ML/DL)** entraînés sur des trajectoires réelles
- **3 applications de modèles génératifs pour étudier les bancs de poissons**
 - Le LureBot et les CUBOIDS
 - Réalité virtuelle (VR) pour poissons
 - Drones

Mouvements collectifs dans les bancs de poissons

Banc désordonné, aligné, en vortex...



Mesurer les interactions sociales



Mesurer les interactions sociales

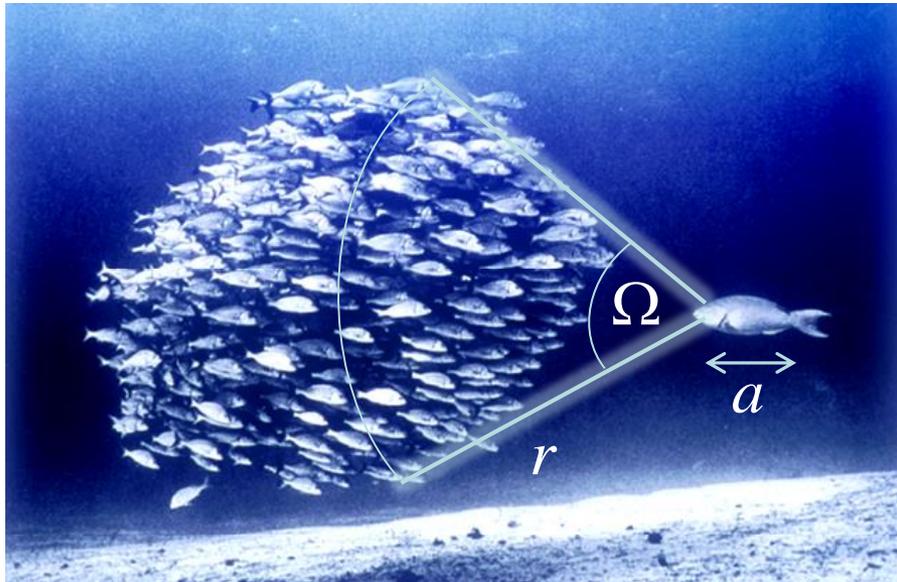
- Les « **forces** » **sociales** sont médiées par la **vue** (et d'autres sens) et sont en général « **non conservative** » :
 - Pas de **loi de l'action et de la réaction** de Newton (et donc pas « d'énergie sociale »)



- Dépendance des interactions avec les **vitesse**s
- Implique la possibilité de **nouvelles organisations collectives** de groupes animaux (par rapport à la physique de la matière inerte)

Interactions à longue portée ?

- Interactions d'attraction médiées par la **vision** devrait être une fonction linéaire de **l'angle solide** du groupe de poissons



$$F(r) \sim \Omega \sim \left(\frac{a}{r} \right)^{d-1}$$

- **Attraction à longue portée** (~gravitation) mais **écranée** par les obstacles

Mesurer les interactions sociales

- Interactions attendues avec **l'environnement** :
 - **Attraction/répulsion** entre individus et avec les obstacles
 - **Alignement** entre individus ou avec les parois
 - **Composante aléatoire** dans le mouvement (« libre arbitre »)
 - **Changement d'angle** d'un poisson entre deux instants proches

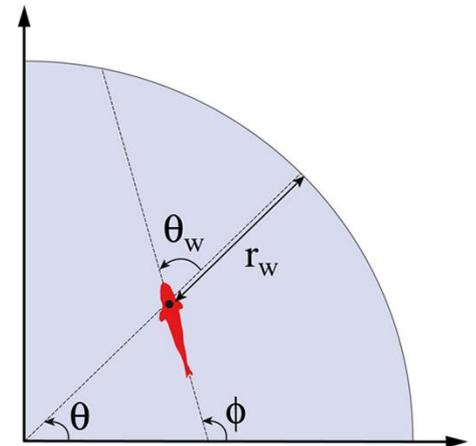
$$\delta\phi = \delta\phi_{\text{Aléatoire}} + \delta\phi_{\text{Obstacle}} + \delta\phi_{\text{Attraction}} + \delta\phi_{\text{Alignement}}$$

Mesurer les interactions sociales

- Méthodologie pour mesurer **quantitativement** les **interactions sociales** :
 - Enregistrer de **nombreuses trajectoires** d'individus, seuls ou en groupe
 - Ecrire une forme générale de **l'équation du mouvement** d'un poisson

$$\delta\phi = \delta\phi_{\text{Aléatoire}} + \delta\phi_{\text{Paroi}}(r_w, \theta_w)$$

(1 poisson seul interagissant avec le mur de l'aquarium)



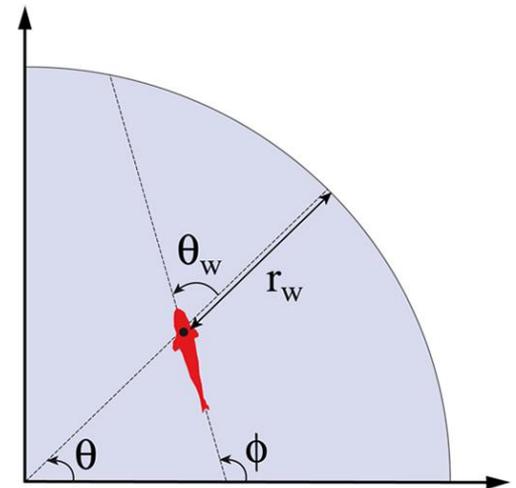
Mesurer les interactions sociales

- Méthodologie pour mesurer **quantitativement** les **interactions sociales** :
- Déterminer les **fonctions d'interaction** en **minimisant l'erreur** avec les **données expérimentales**

$$\text{Erreur} = \sum_{n=1}^{\# \text{ data}} \left| \delta\phi_n - \delta\phi_{\text{Paroi}}(r_{w,n}, \theta_{w,n}) \right|$$

$$\delta\phi_{\text{Aléatoire}} \approx \text{Erreur}$$

(1 poisson seul interagissant avec le mur de l'aquarium)



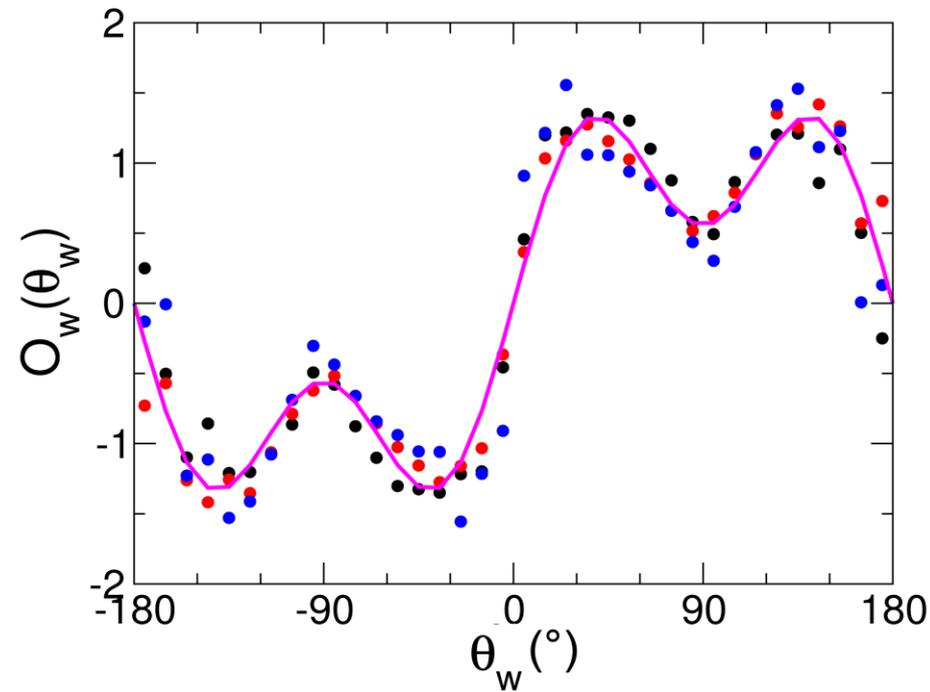
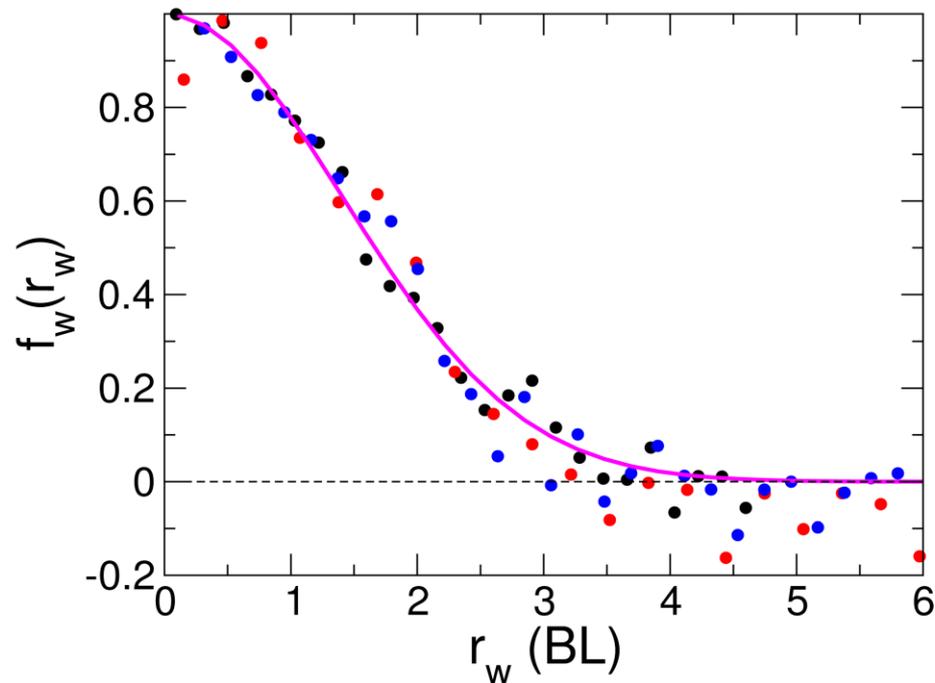
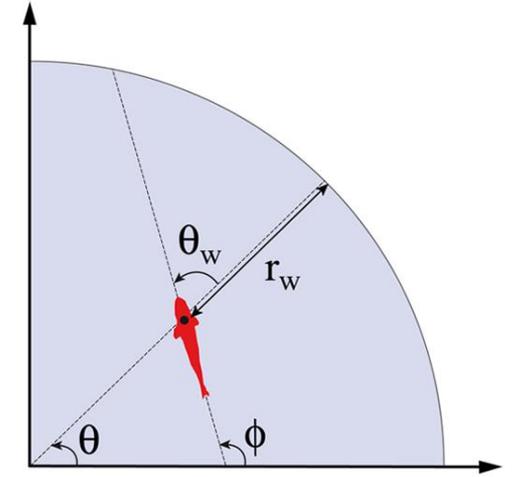
Mesurer les interactions sociales

Interaction avec le mur

$$\delta\phi_{\text{Paroi}}(r_w, \theta_w) = f_w(r_w) \times O_w(\theta_w)$$

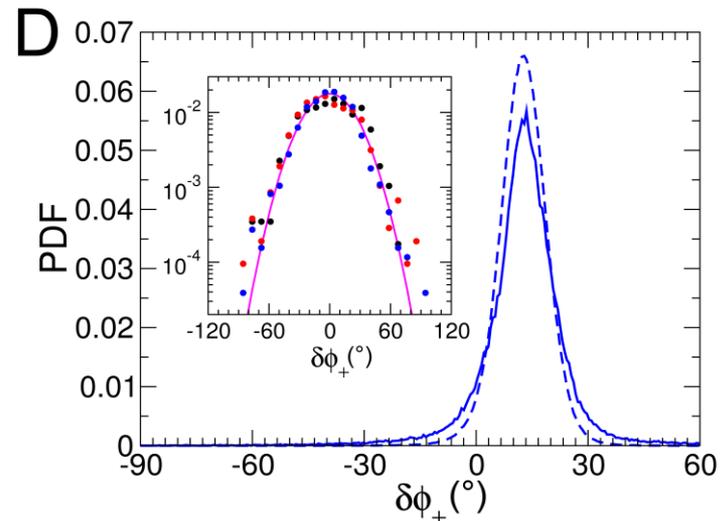
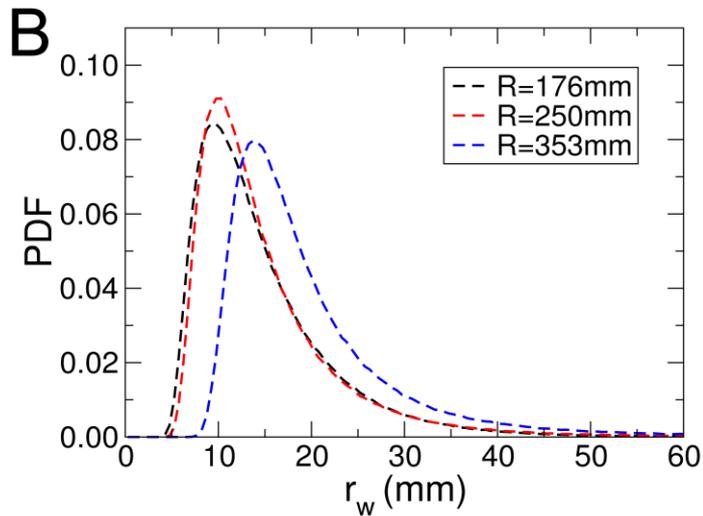
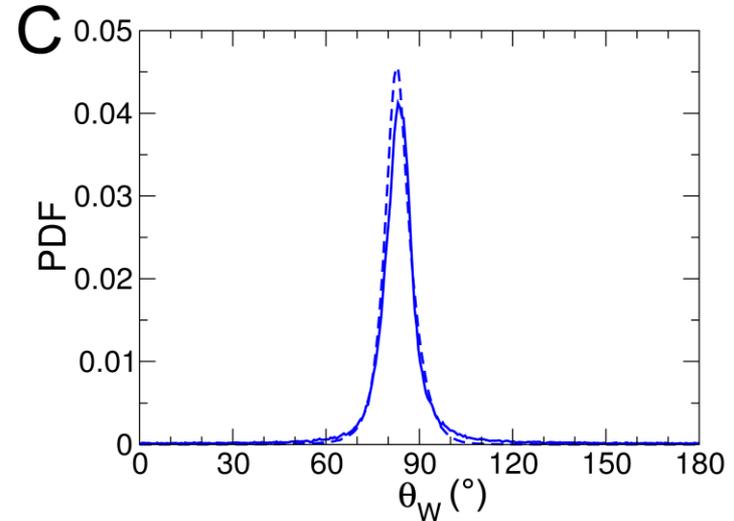
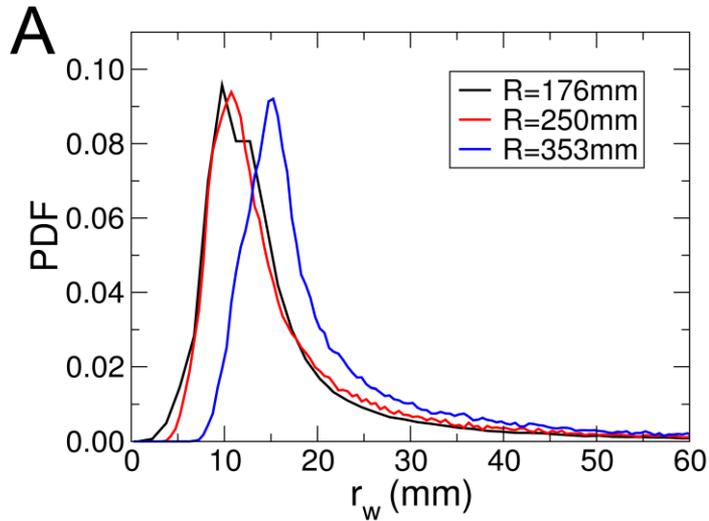
$$f_w(r_w) \approx \exp[-(r_w / l_w)^2], \quad l_w \approx 6 \text{ cm}$$

$$O_w(\theta_w) \approx \sin \theta_w [1 + \epsilon_2 \cos 2\theta_w], \quad \epsilon_2 \approx 0.7$$



1-fish experiments vs model (dashed lines)

PDF of the distance to the wall (3 arenas; A & B); for R=353 mm, PDF of the angle to the wall (C) & PDF of the angle change (D)



Measuring interactions in Hemigrammus

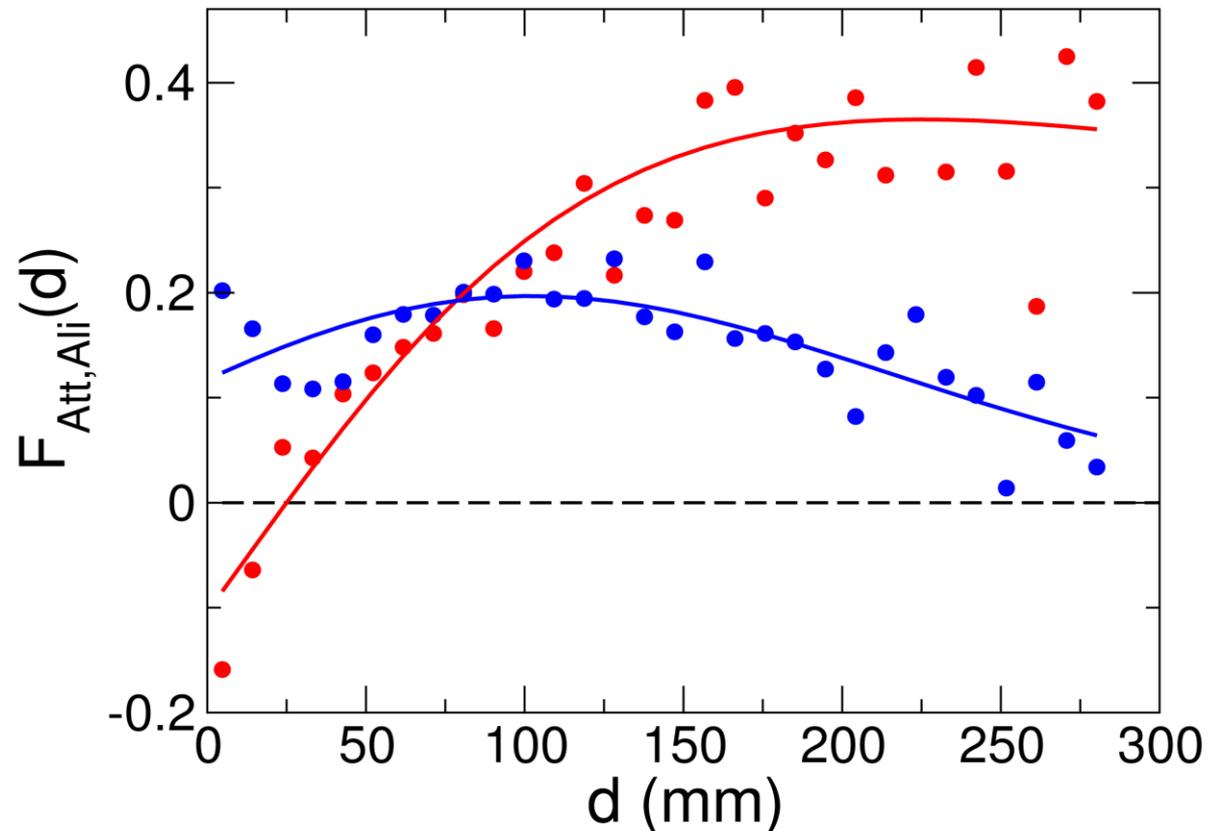
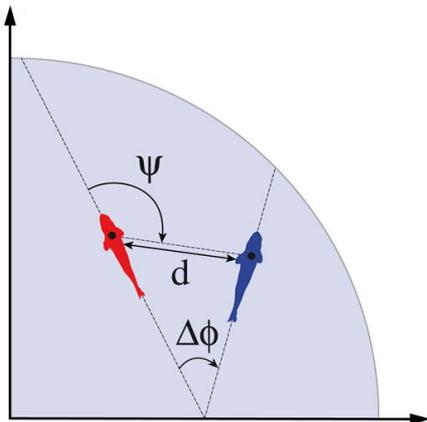
Attraction and **alignment** interactions between fish vs their distance

$$F_{\text{Att}}(d) \propto \frac{(d - a) / l_{\text{Att}}}{1 + (d / l_{\text{Att}})^2}, \quad F_{\text{Ali}}(d) \propto \left(\frac{d}{l_{\text{Ali}}} + c \right) \exp[-(d / l_{\text{Ali}})^2]$$

$$l_{\text{Att}} \approx l_{\text{Ali}} \approx 200 \text{ mm}$$

$$a \approx 1 \text{ BL} \approx 30 \text{ mm}$$

$$c \approx 0.4$$



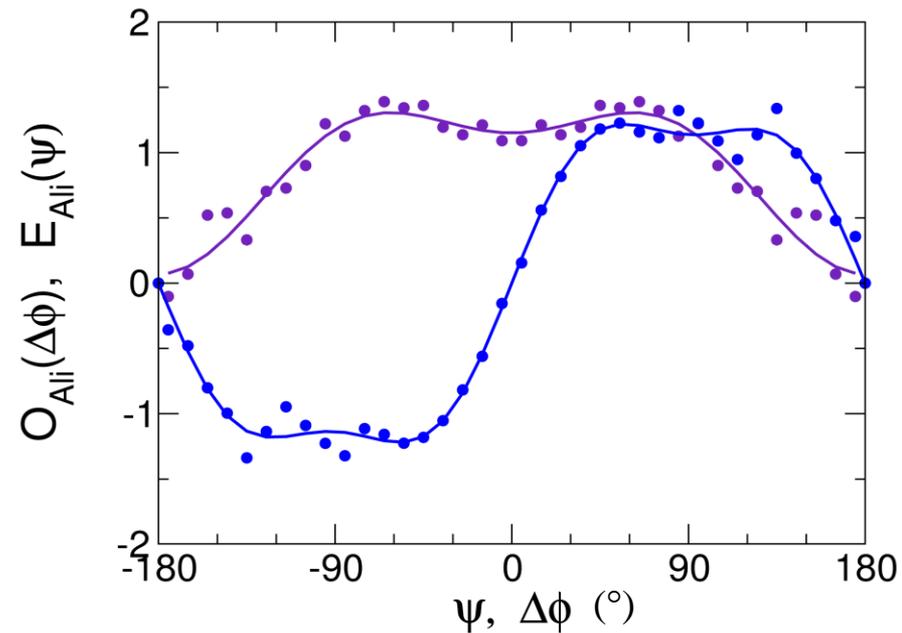
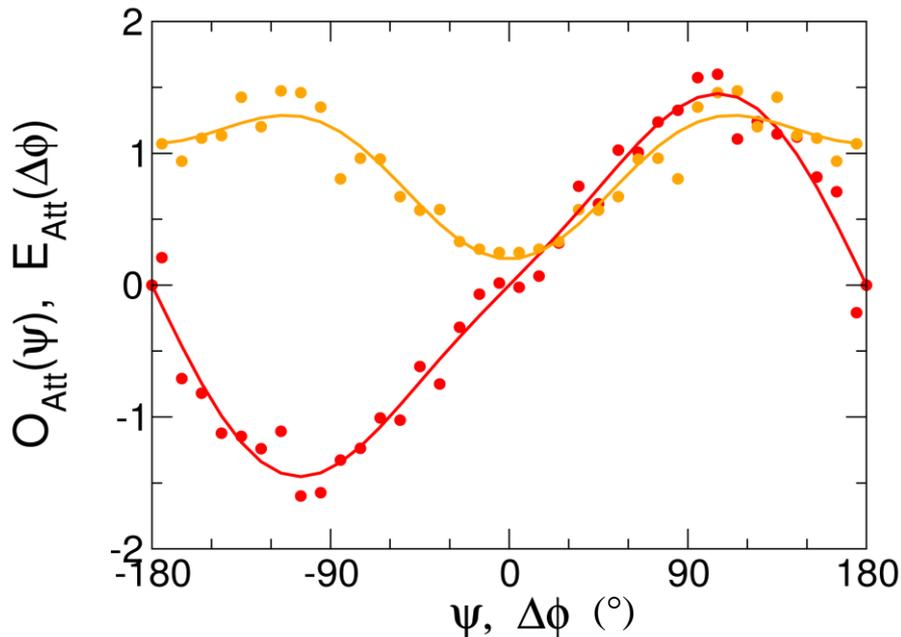
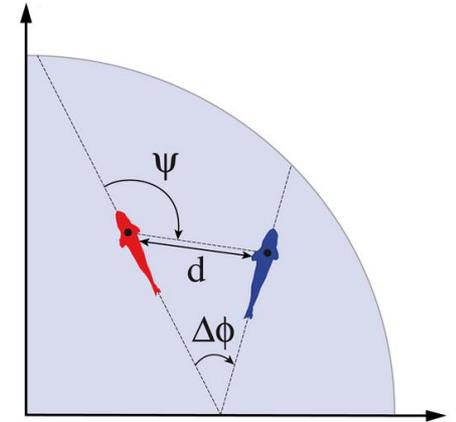
Measuring interactions in Hemigrammus

Attraction and **alignment** interactions between fish
vs viewing angle and relative heading

$$\delta\phi_{\text{Att}} = F_{\text{Att}}(d) O_{\text{Att}}(\psi) E_{\text{Att}}(\Delta\phi)$$

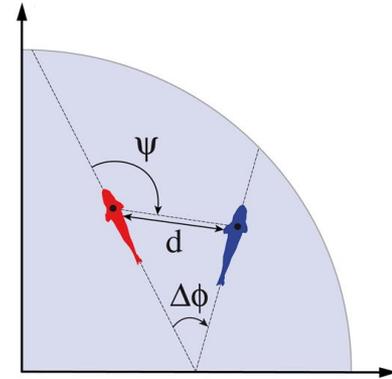
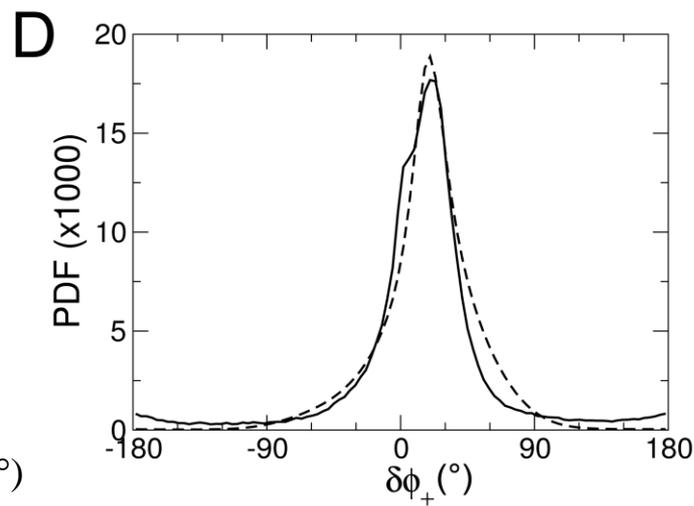
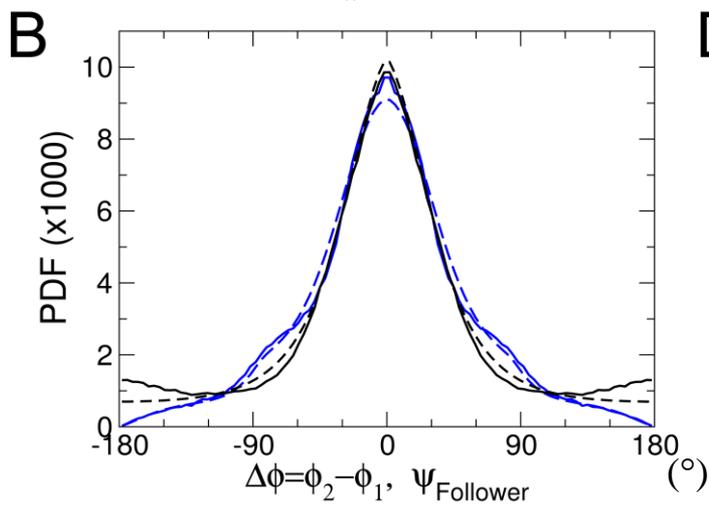
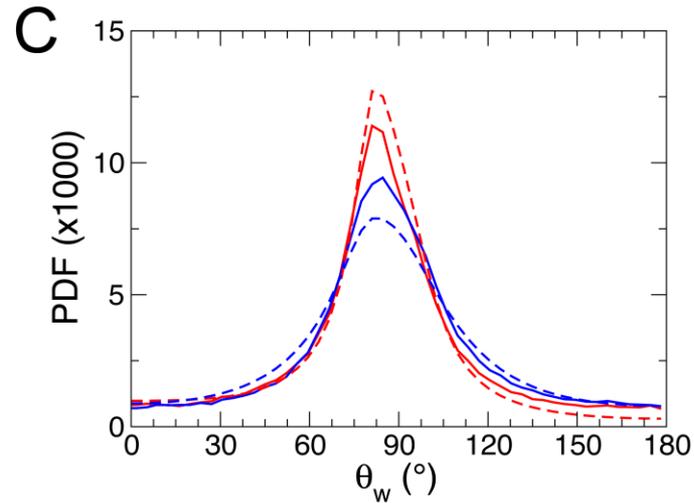
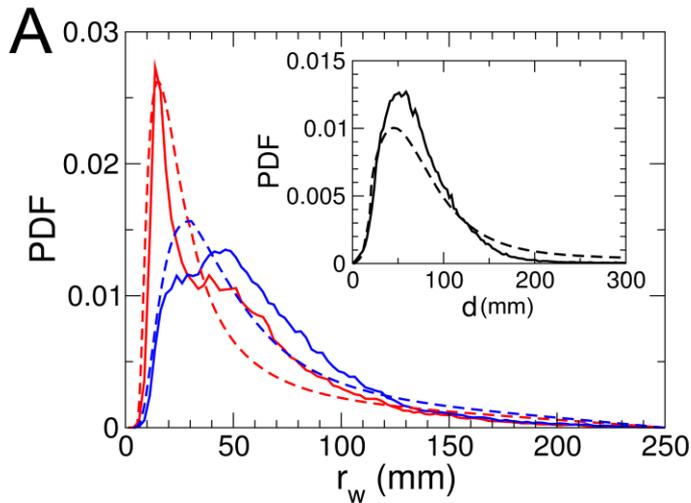
$$\delta\phi_{\text{Ali}} = F_{\text{Ali}}(d) O_{\text{Ali}}(\Delta\phi) E_{\text{Ali}}(\psi)$$

($O = \text{Odd}$; $E = \text{Even}$)



2-fish experiments vs model (dashed lines)

PDF of the distance (A) and angle (C) to the wall (**leader** vs **follower**); PDF of the heading difference (B; **black**) and the follower angle of view (B; **blue**), and of the angle change (D)

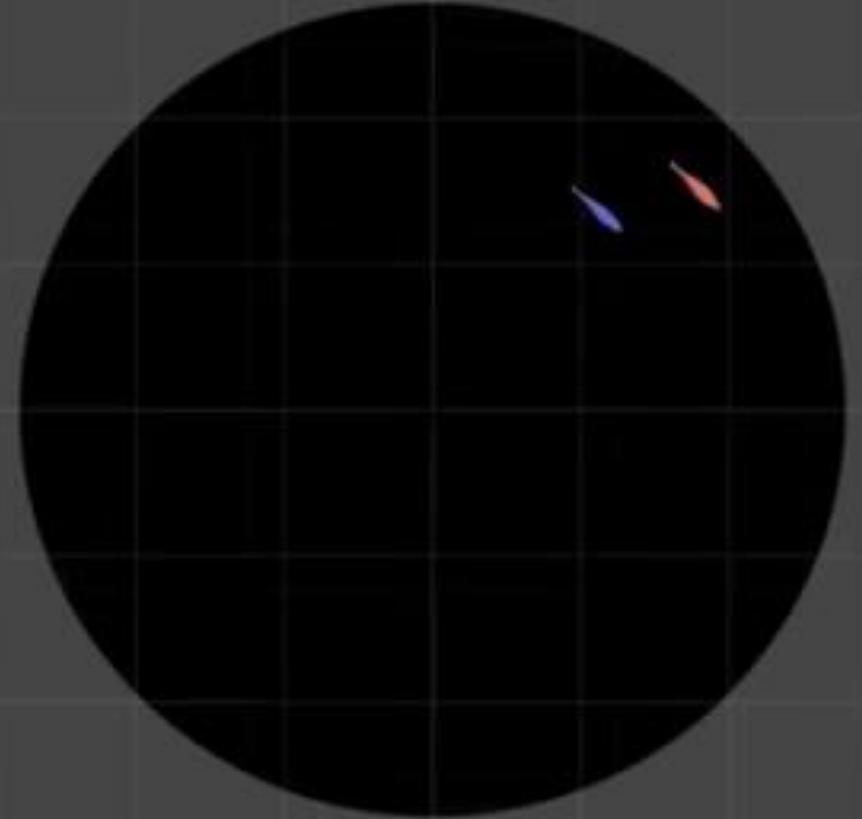
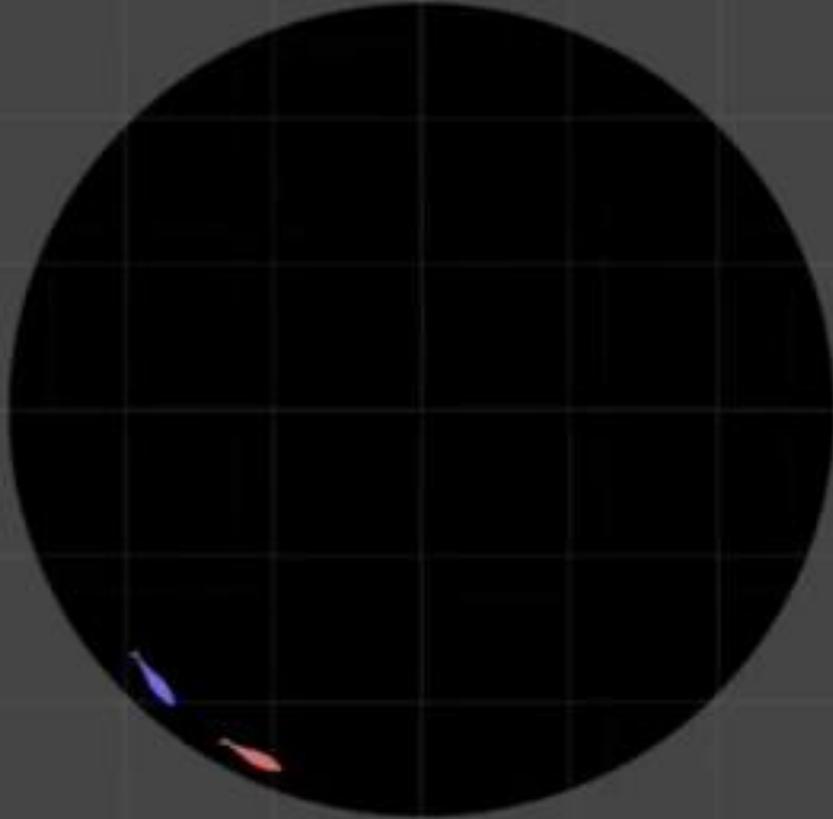




Modèle vs expérience (« test de Turing »)

Expérience

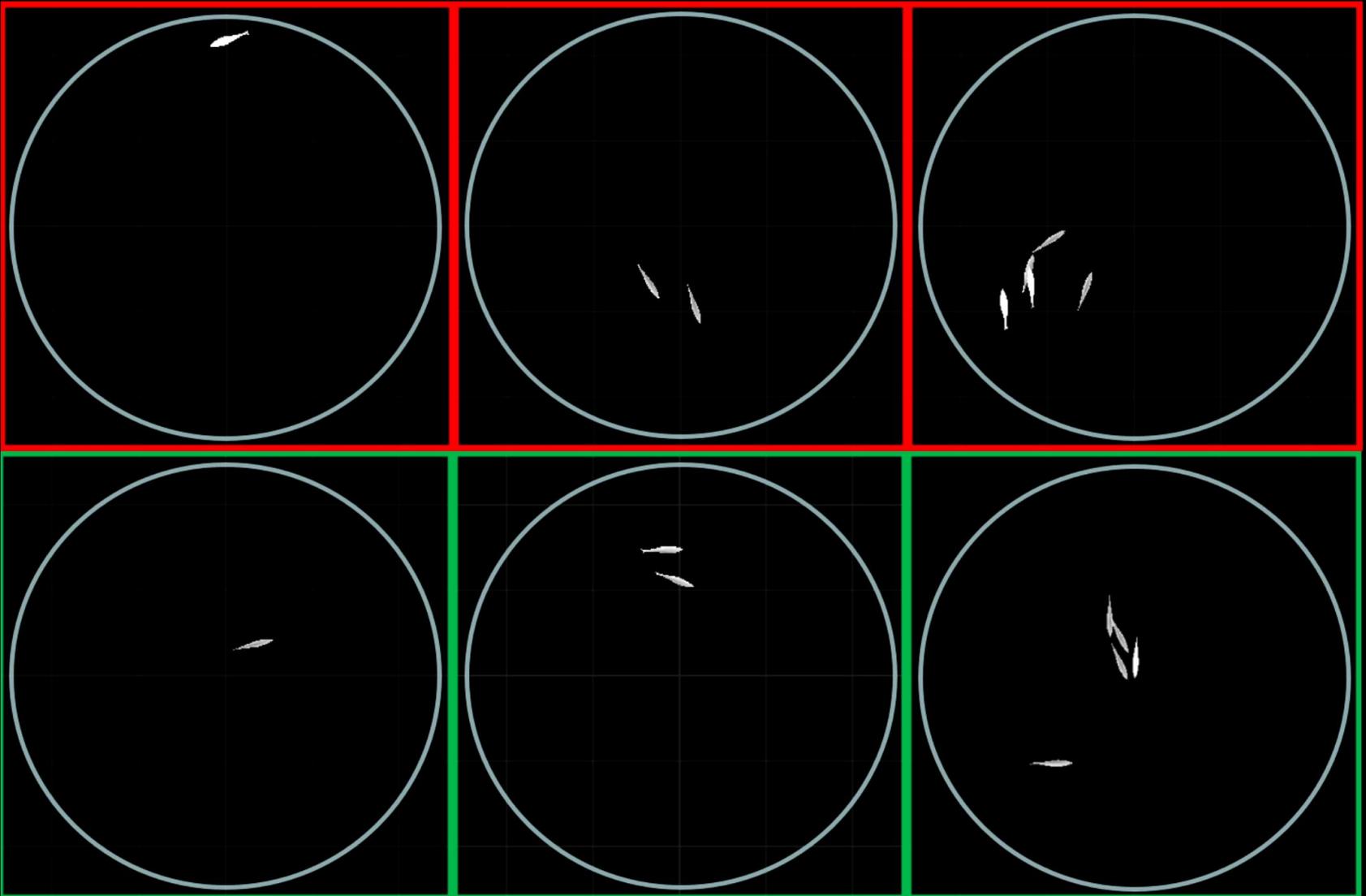
Simulations du modèle





Modèle vs expérience (« test de Turing »)

Expérience vs **Simulations du modèle**

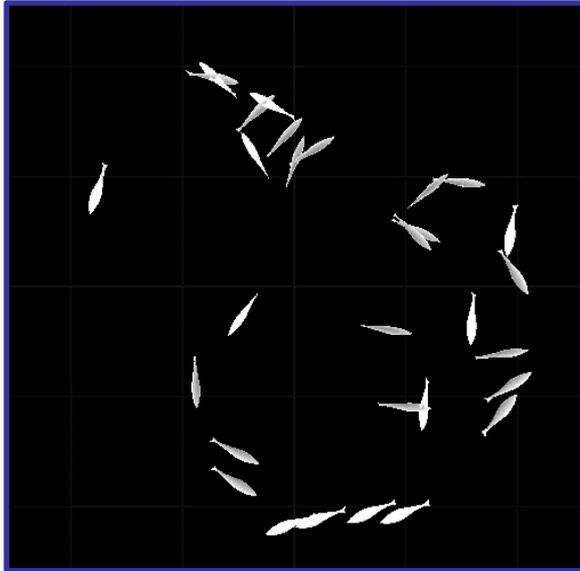


Additivité des interactions sociales ?

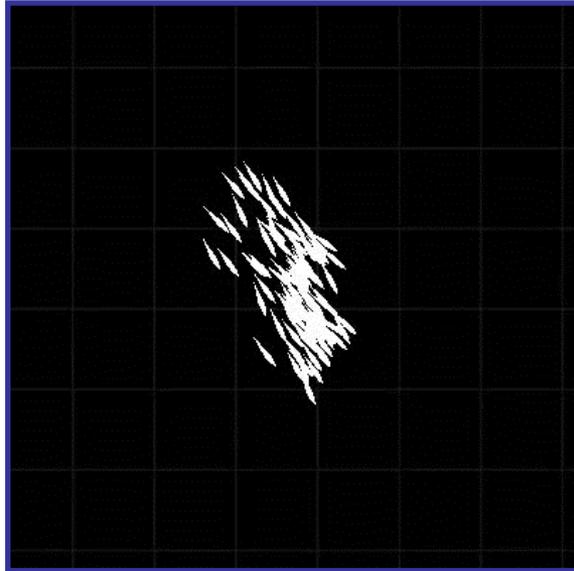
- Comment **combiner** les interactions sociales de paires dans **un groupe de plus de 2 individus** ?
- Du fait de **filtres cognitifs**, de nombreux animaux (poissons, oiseaux, moucheron...) ne prennent en compte qu'**un nombre limité de voisins** à un instant donné (contrairement au cas des forces physiques)
- Notion des **k voisins les plus influents** : ceux qui induisent **la plus forte accélération** sur un individu focal (*Hemigrammus* : $k = 2-3$; étourneaux : $k \sim 7$)



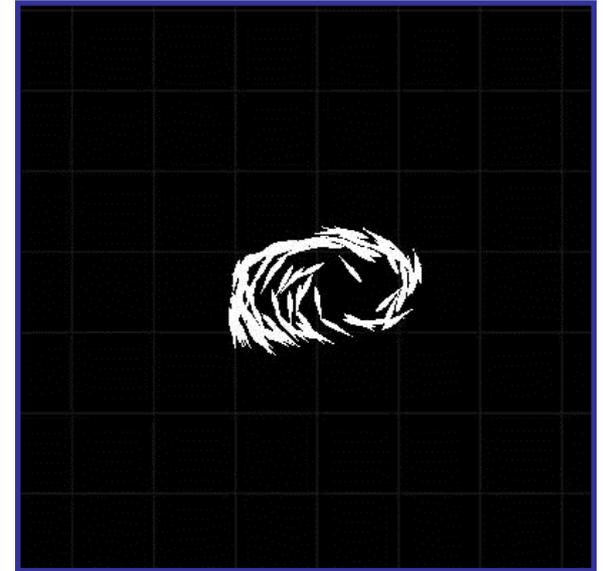
Phases collectives des bancs de poissons



Désordonné



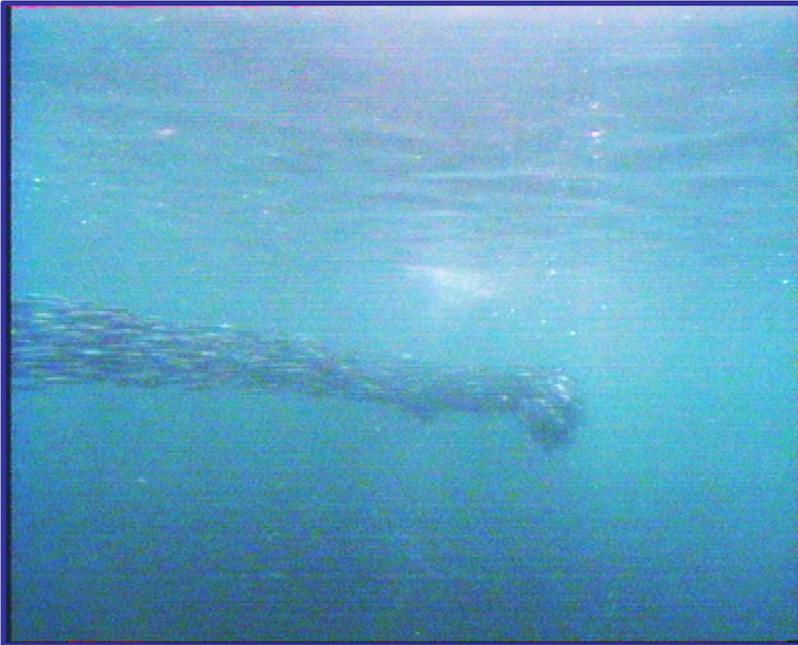
Aligné



Vortex



La phase allongée



Banc de harengs (Clupea harengus)
Photo P. Brehmer - IRD

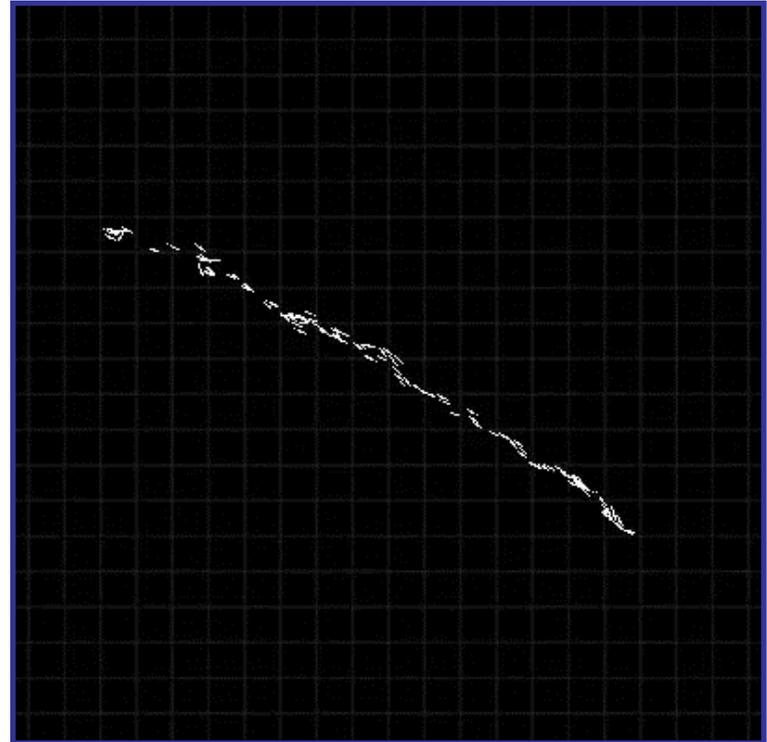




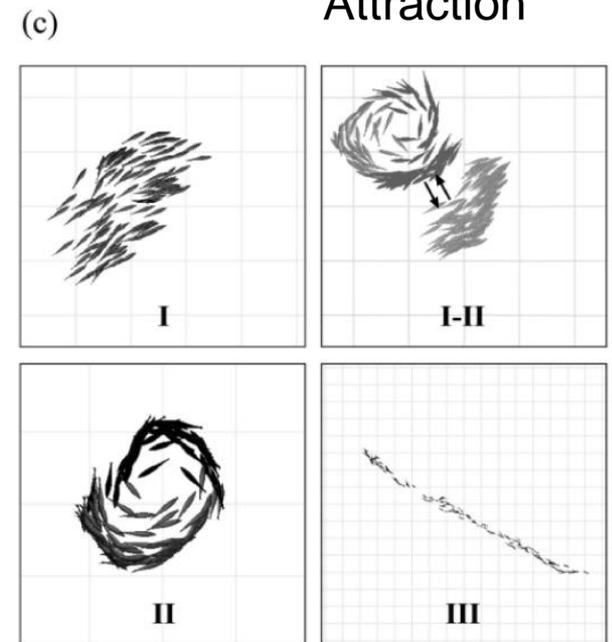
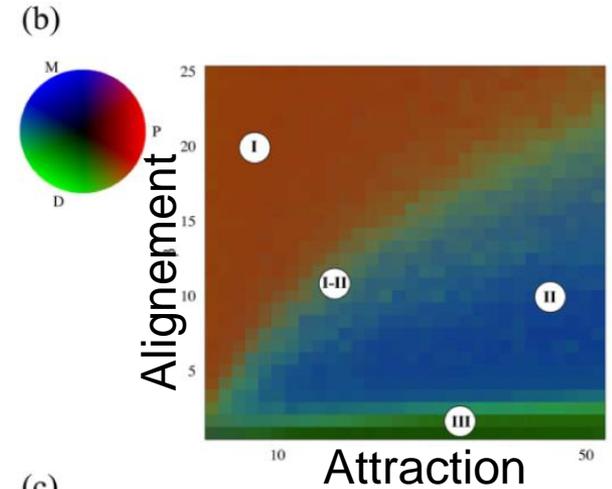
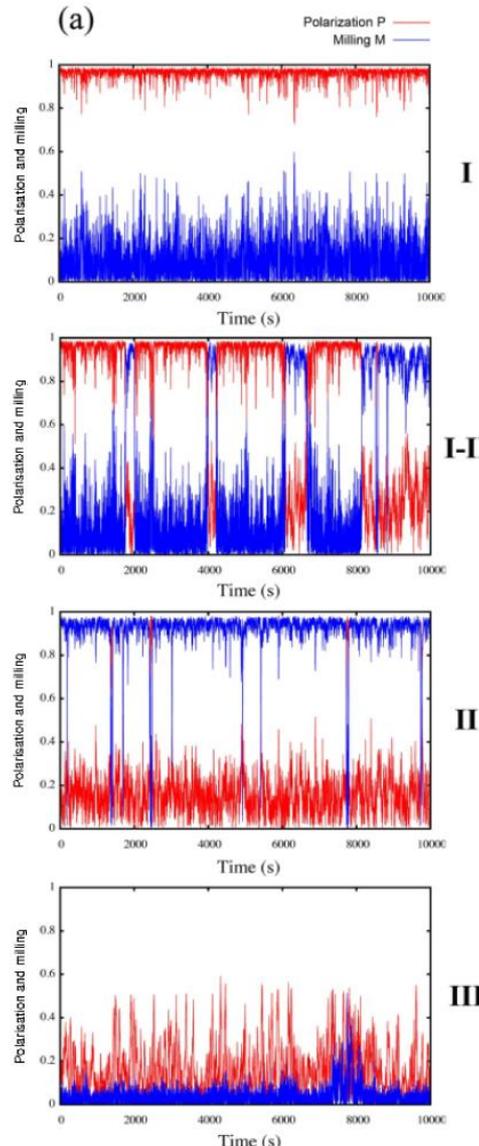
Diagramme de phase d'un banc

New J. Phys. 2014; *J. Roy. Soc. Interface* 2015;
Phys Rev. Lett. 2018; *PLOS Comp. Biol.* 2022

Paramètres d'ordre

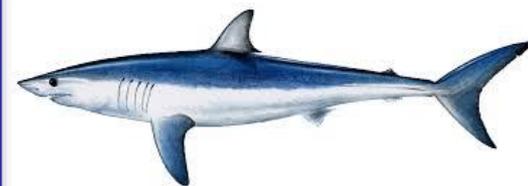
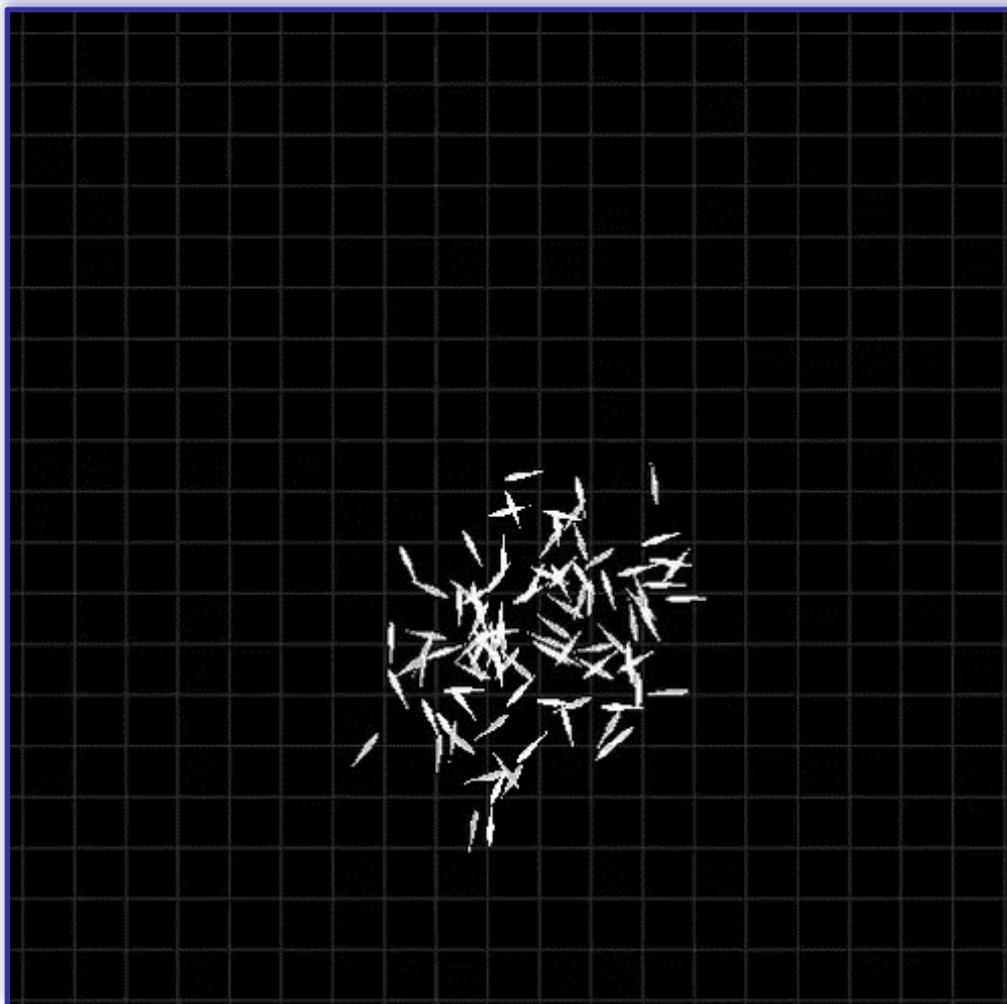
$$P = \frac{1}{N} \left| \sum_i \frac{\vec{v}_i}{|\vec{v}_i|} \right|$$

$$M = \frac{1}{N} \left| \sum_i \frac{\vec{r}_i \times \vec{v}_i}{|\vec{r}_i| |\vec{v}_i|} \right|$$





Model vs Predator





Un mot sur le Machine/Deep Learning

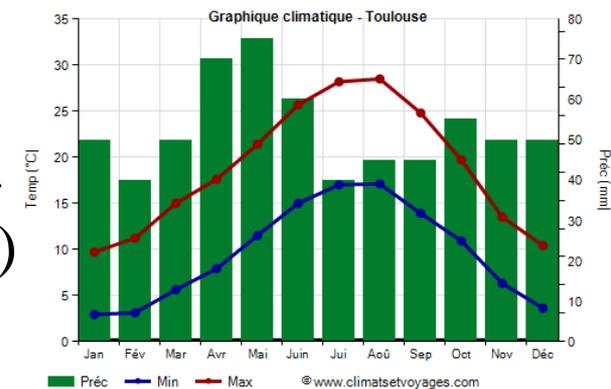
➤ Connaissant une **entrée X**, le but est de **prévoir** une **sortie Y** (la sortie peut aussi contenir du « bruit »)

➤ Exemples :

- **X** = jour de l'année et **Y** = température à Toulouse ce jour-là
- **X** = positions et vitesses de 5 poissons à un instant donné et **Y** = accélérations des poissons (pour générer leur trajectoire)
- **X** = les pixels d'une image et **Y** = les objets présents dans l'image
- **X** = une portion de texte et **Y** = les mots suivants du texte (ChatGPT...)

➤ On dispose de **données d'entraînement (exemples)** : $(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)$, pour $i = 1, \dots, N$ (**apprentissage supervisé**)

➤ Si la dimension d de l'entrée **X** est petite (par exemple, $d = 1$), on peut faire un « fit » (par exemple, linéaire) des données $(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)$





Un mot sur le Machine/Deep Learning

➤ Pour de nombreux problèmes, la **dimension d** de l'**entrée X** est **très grande** ! Et un fit naïf des données devient **impossible** !

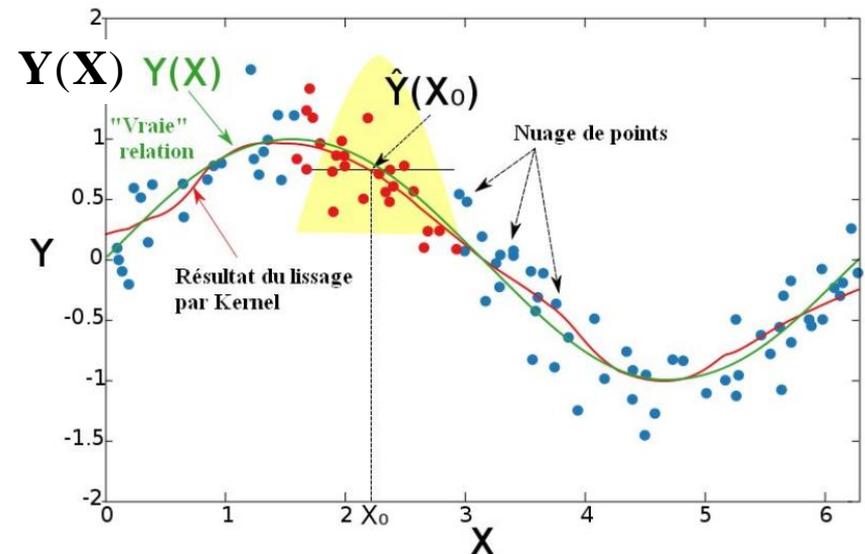
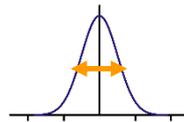
➤ Exemples :

- X = jour de l'année : $d = 1$
- X = positions et vitesses de 5 poissons à un instant donné : $d = 5 \times 4 = 20$
- X = une image à reconnaître : d est le nombre de pixels (\times couleurs **RVB**)
- X = une portion de texte : $d = 32000$ « tokens » (\times 12888 représentations)

➤ Méthodes de noyau (**kernel**) pour $(X_i, Y_i), i = 1, \dots, N$

$$\hat{Y}(X) = \sum_{i=1}^N K(X - X_i) \times Y_i$$
$$\approx Y(X)$$

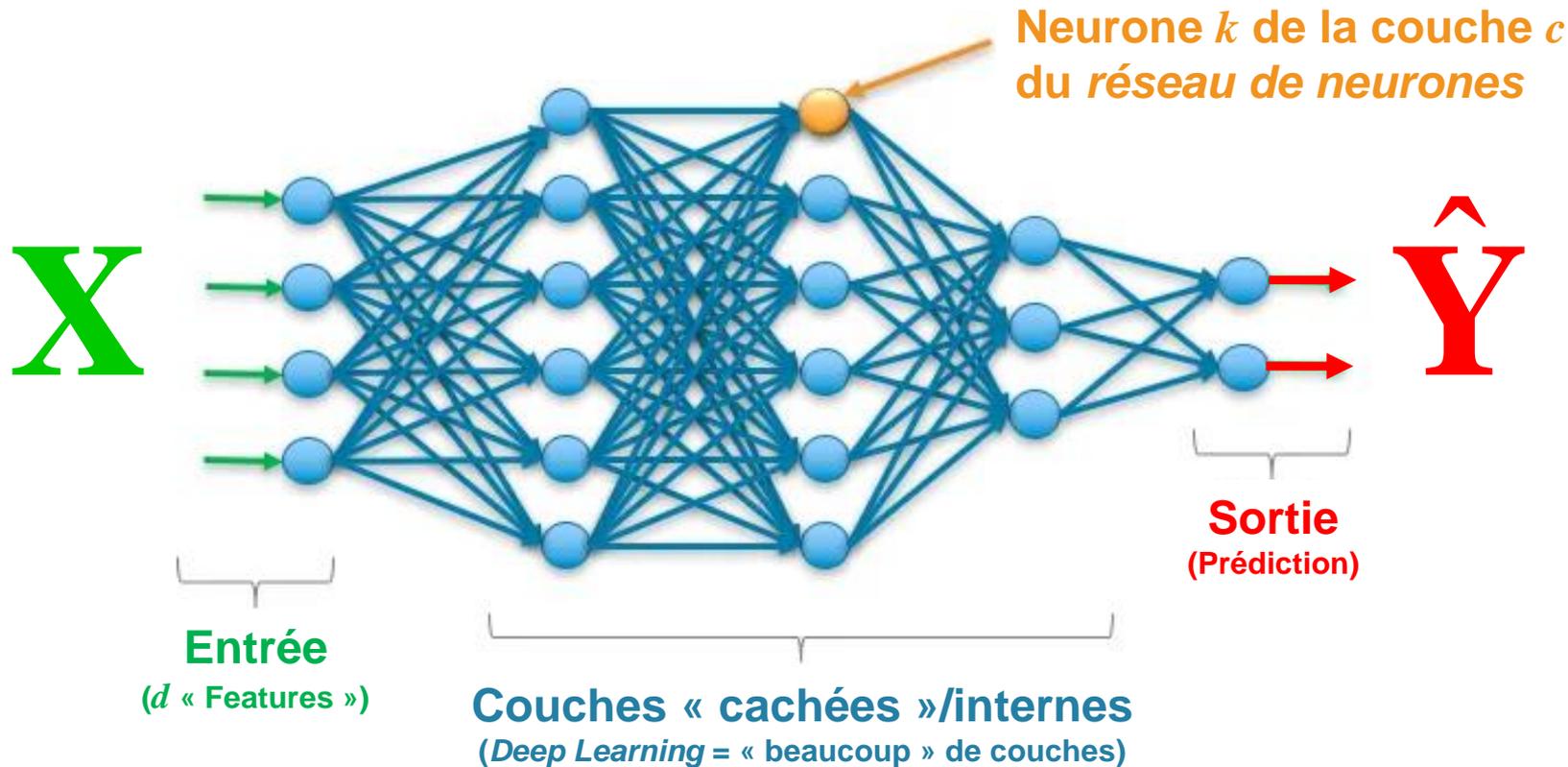
Le **noyau K** est caractérisé par sa **largeur** (paramètre ajustable)





Un mot sur le Machine/Deep Learning

➤ Méthodes de Machine Learning pour $(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)$, $i = 1, \dots, N$



$$\mathbf{X}_k^{c+1} = \sigma \left(w_0^c + \sum_l w_l^c \times \mathbf{X}_l^c \right)$$

σ est une fonction non linéaire (« sigmoïde ») et les w sont des paramètres (« poids » ; 10^5 pour les poissons ; 10^{11} pour ChatGPT !) obtenus en **minimisant l'erreur** entre les données \mathbf{Y}_i et les prédictions $\hat{\mathbf{Y}}_i$



Un mot sur le Machine/Deep Learning

- Les **méthodes de noyau** n'ont que très **peu de paramètres ajustables** (largeur du noyau) mais ne sont pas adaptés à de nombreux problèmes (notamment en haute dimension ou pour des entrées complexes – image, texte...)
- Les **méthodes de Machine/Deep Learning** ne sont en fait que des « **gros fits** » adaptés à une **entrée de grande dimension**
- Le **Machine/Deep Learning** est appliqué dans de très **nombreux contextes** (reconnaissance/génération d'images, voitures autonomes...), y compris comme modèles génératifs (modèles de langage type ChatGPT... et poissons !)
- **Ces méthodes ne sont pas explicatives, ni interprétables, et sont des sortes de « boîtes noires »** (notamment le ML/DL avec ses très nombreux paramètres)



« *Modèle* » *Deep Learning* de poissons

- Modèle ML/DL reproduisant la **dynamique des poissons**
- La structure du réseau inclut des **informations biologiques**
- Simple à entraîner avec **d'autres espèces**
- Possibilité **d'ouvrir la « boîte noire » du ML** dans ce contexte

Predicting long-term collective animal behavior with deep learning

V. Papaspyros^{1*}, R. Escobedo³, A. Alahi⁴, G. Theraulaz³, C. Sire^{2*}, F. Mondada¹

¹ Mobots group, École polytechnique fédérale de Lausanne

² Laboratoire de Physique Théorique, CNRS, Université de Toulouse — Paul Sabatier

³ Centre de Recherches sur la Cognition Animale, Centre de Biologie Intégrative, CNRS, Université de Toulouse — Paul Sabatier

⁴ VITA group, École polytechnique fédérale de Lausanne

* Corresponding authors: vaios.papaspyros@epfl.ch, clement.sire@univ-tlse3.fr

EPFL

FNSNF

FONDS NATIONAL SUISSE
SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
FONDO NAZIONALE SVIZZERO
SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER



Université
de Toulouse

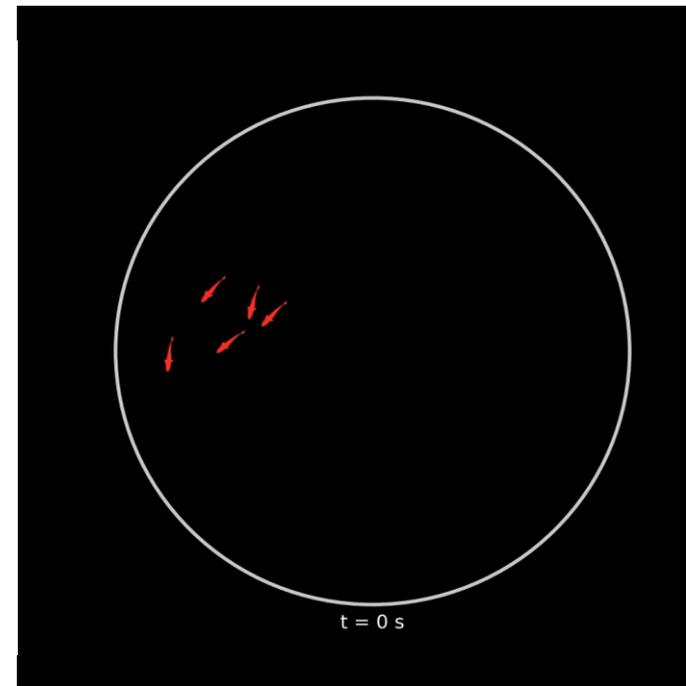
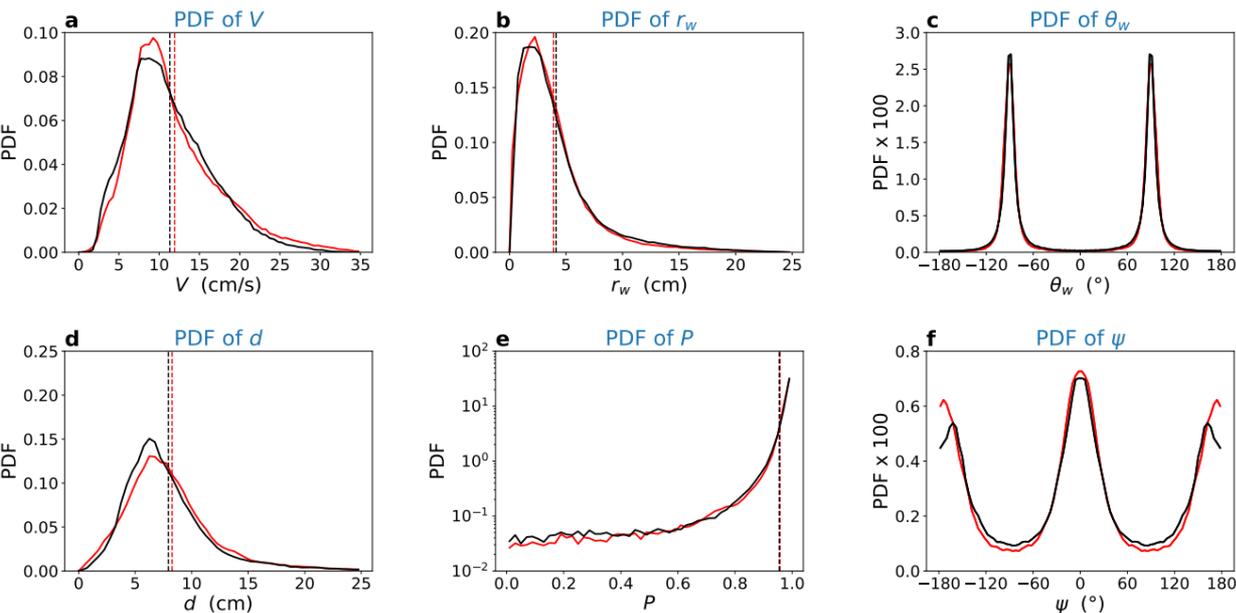




« Modèle » d'interpolation de Hilbert

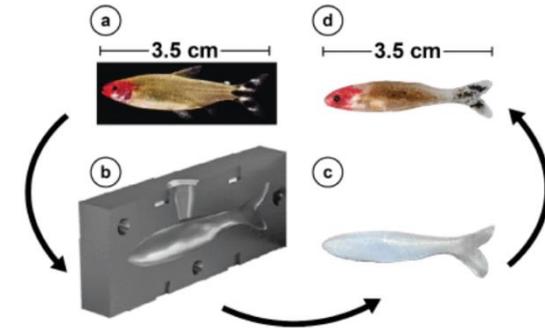
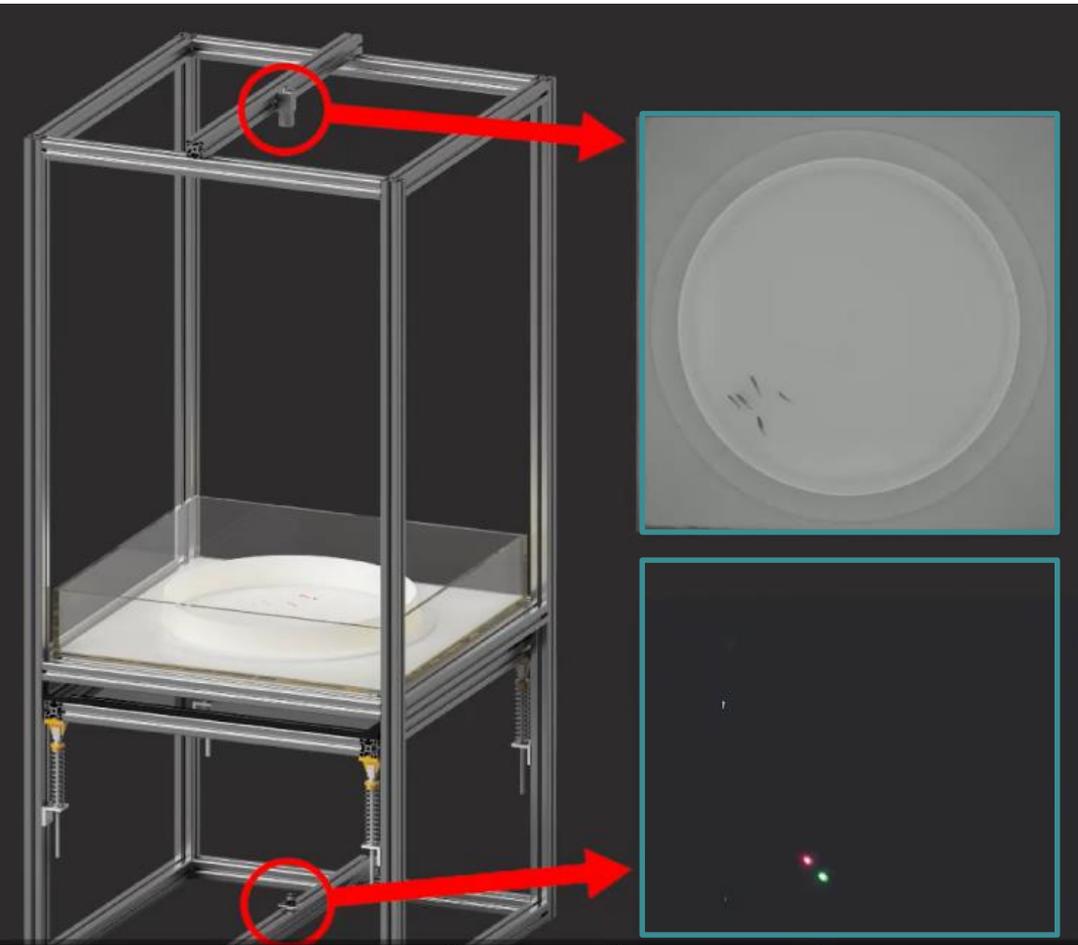
- Pas besoin de **phase d'entraînement**
- Formulation explicite **sans aucun paramètre ajustable**
- Simple à appliquer à **d'autres espèces**
- Comme pour le ML, modèle d'interpolation **non interprétable**

$$a(C) = \sum_{i=1}^N w_i(C) a_i, \quad w_i(C) = \frac{\|C - C_i\|^{-d}}{\sum_{j=1}^N \|C - C_j\|^{-d}}, \quad C = \text{position / vitesse des poissons}$$





Modèle(s) de bancs de poissons implémenté dans le LureBot





Modèle(s) de bancs de poissons implémenté dans le LureBot

A biohybrid interaction framework for the integration of robots in animal societies

V. Papaspyros^{1*}, D. Burnier¹, R. Cherfan¹, G. Theraulaz², C. Sire³, F. Mondada¹

¹ Mobile Robotic Systems (MOBOTS) group, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

² Centre de Recherches sur la Cognition Animale, Centre de Biologie Intégrative, CNRS, Université de Toulouse — Paul Sabatier

³ Laboratoire de Physique Théorique, CNRS, Université de Toulouse — Paul Sabatier

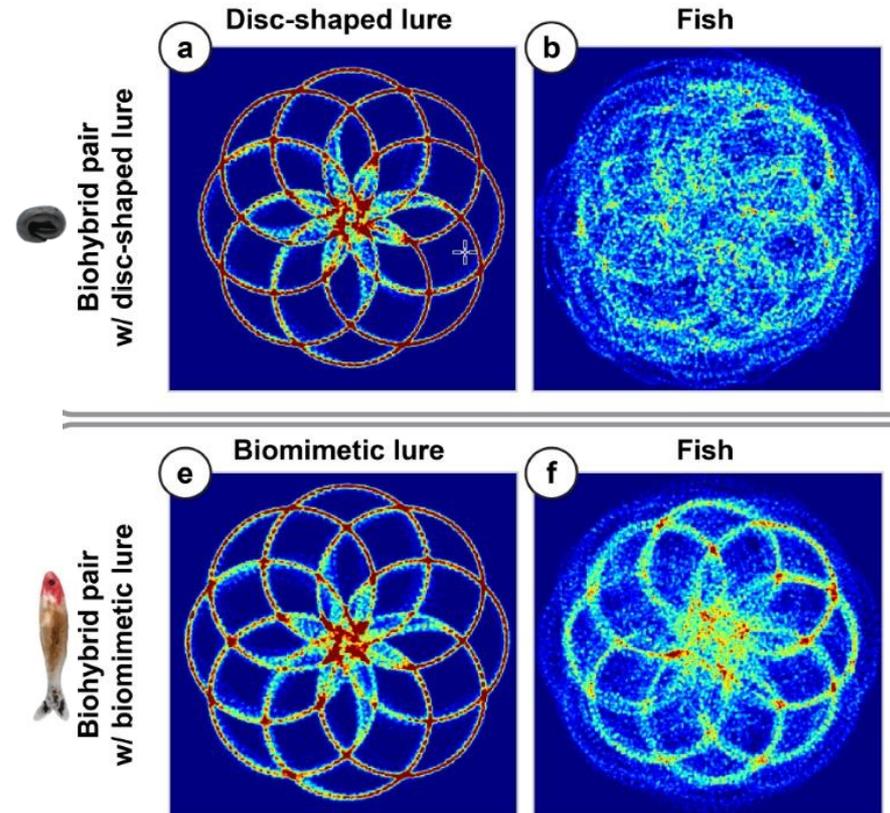
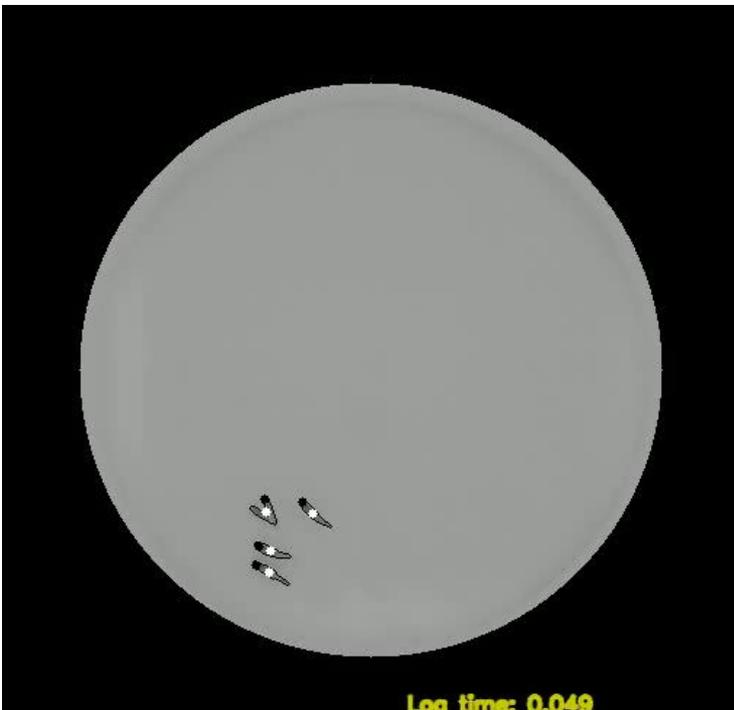
* Corresponding author: vaio.papaspyros@epfl.ch





Modèle(s) de bancs de poissons implémenté dans le LureBot

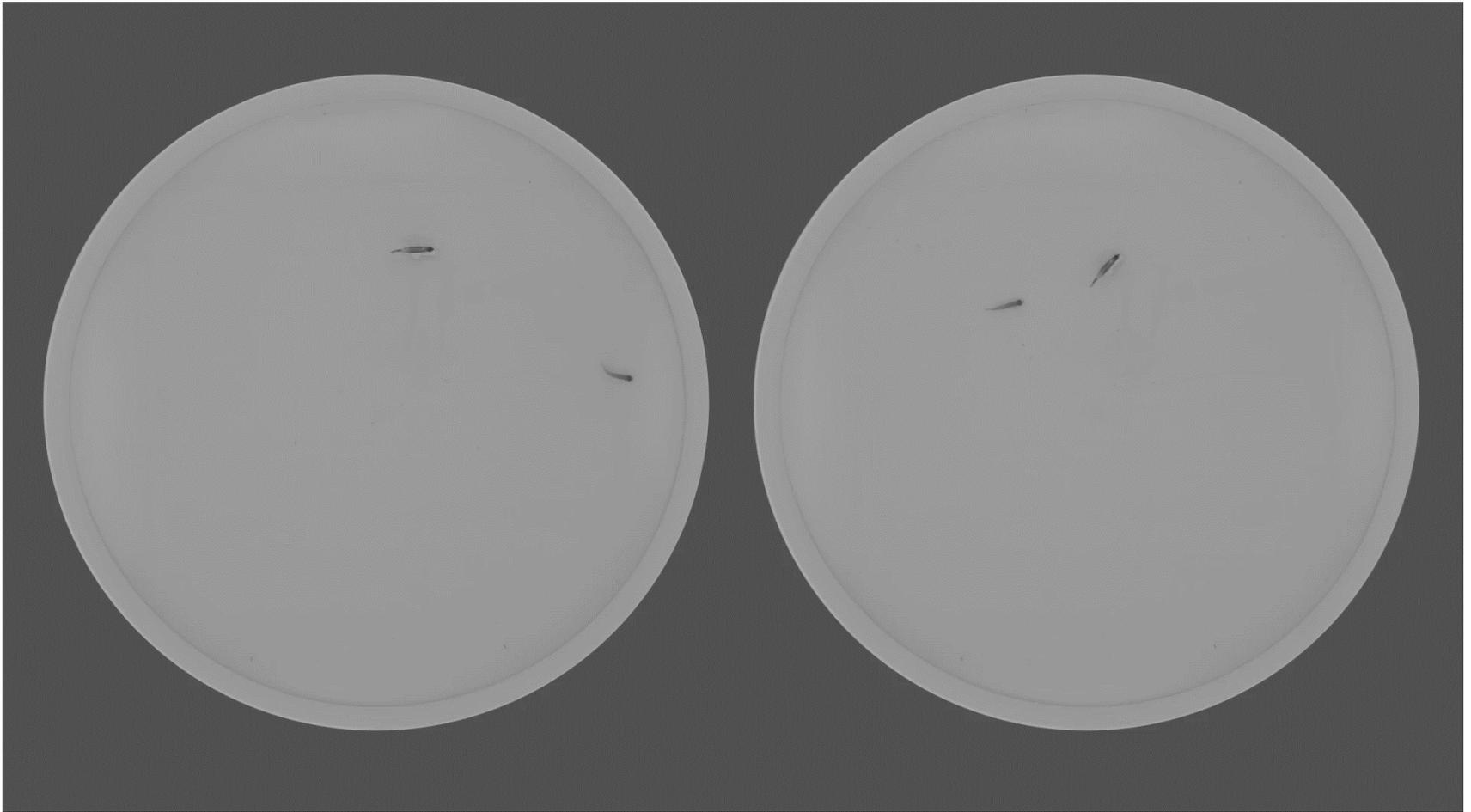
- Le LureBot est très bien accepté par les poissons
- Les interactions poisson-LureBot doivent être mesurées
- Une perturbation contrôlée pour étudier les bancs de poissons



Cartes de densité pour la position du leurre passif (en forme de disque ou biomimétique) et du poisson



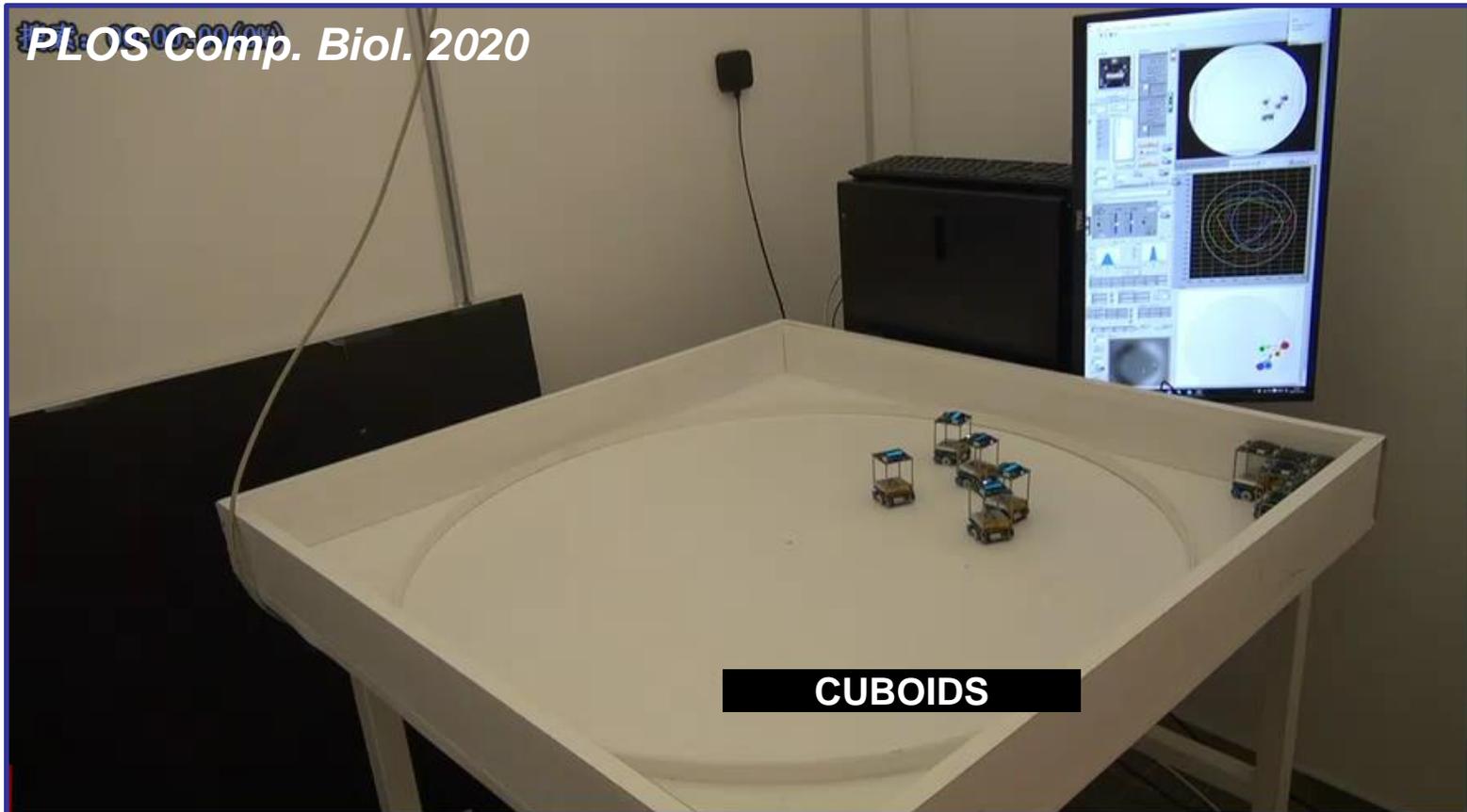
Le LureBot dans un écoulement « binational »





Modèle(s) de poisson implémenté dans les CUBOIDS

- Mise en œuvre littérale du modèle poisson... mais confrontée aux **contraintes physiques réelles**
- L'intérêt principal de ce travail était en fait de comprendre comment **les animaux combinent leurs interactions** (notion de **voisins les plus influents**)



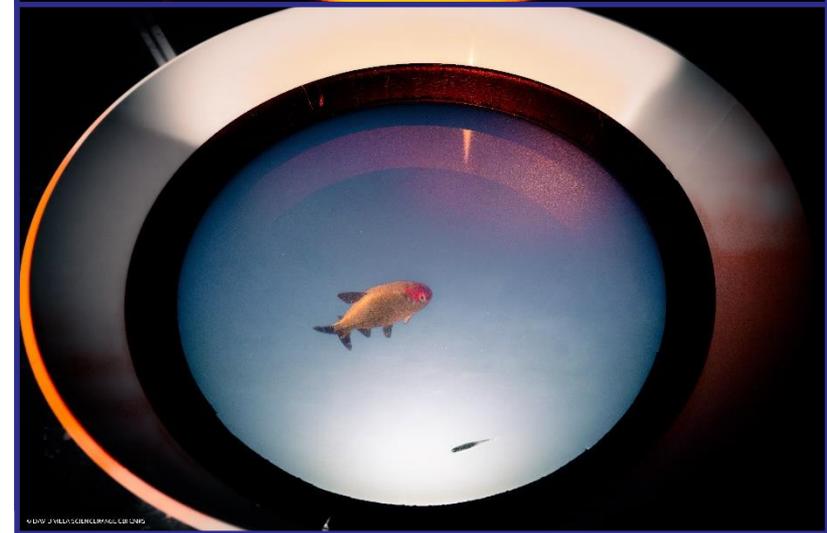


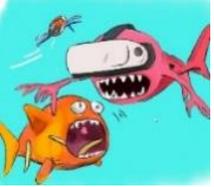
Réalité virtuelle pour poissons (ANR VR-FISHSCHOOL – CRCA-LPT-IRIT)

- Des leures réalistes sont projetés sur les bords du bol en vue anamorphique

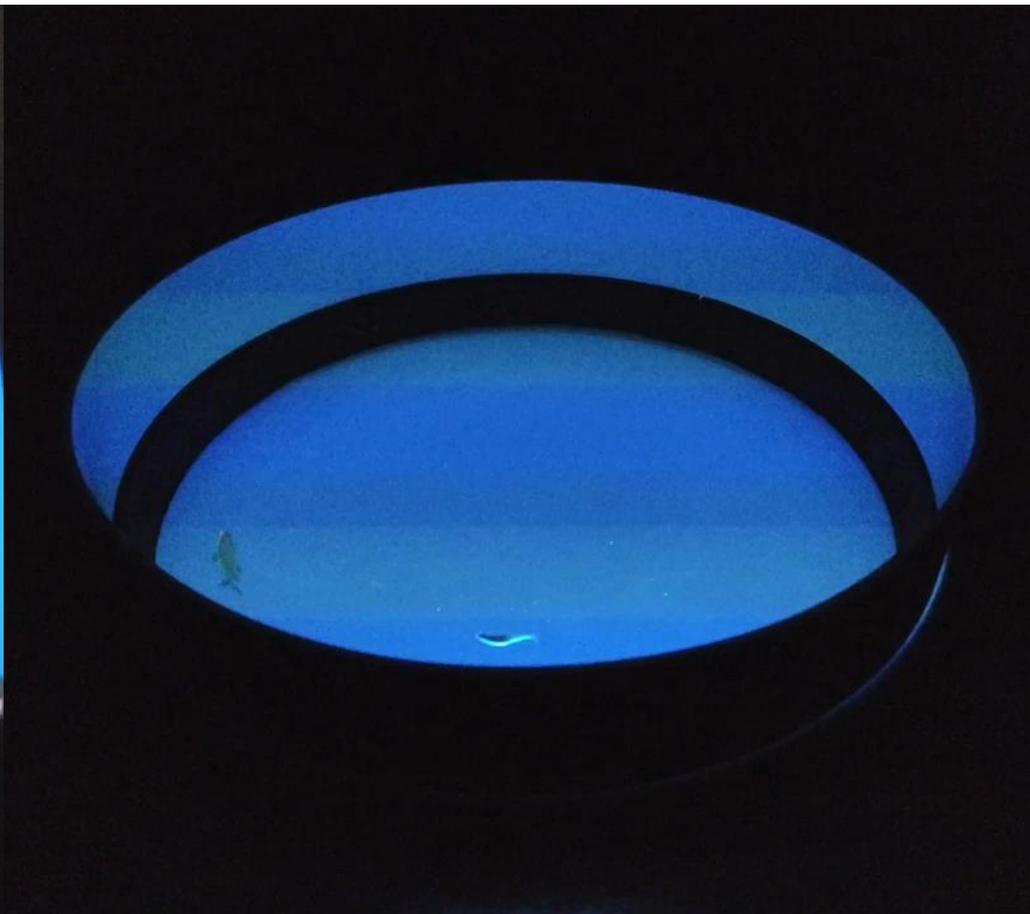
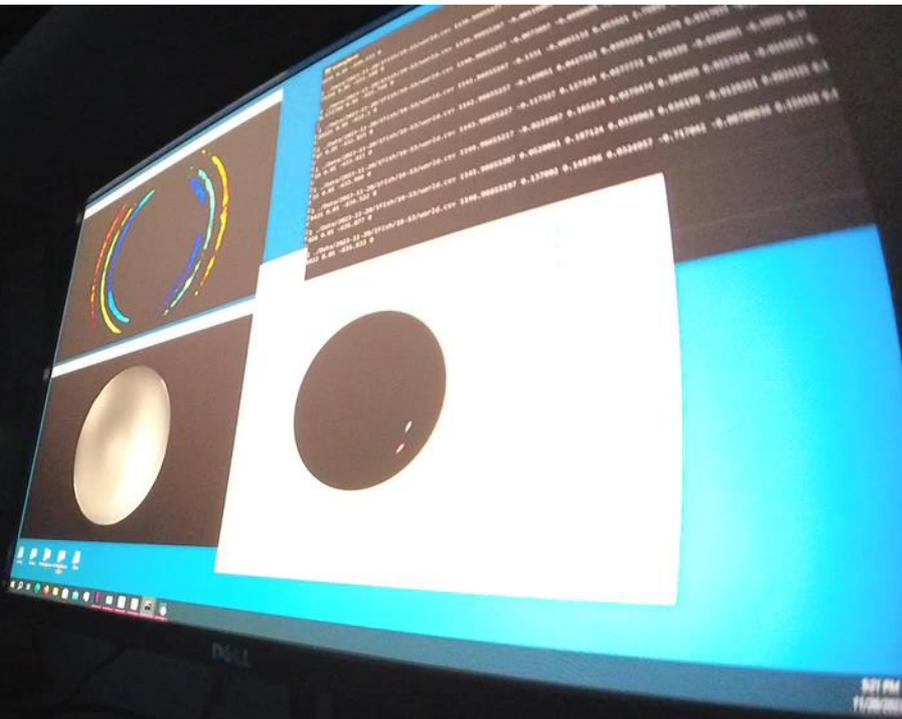


- Suivi 3D du poisson pour alimenter le modèle 3D des poissons-VR en boucle fermée
- Un outil pour étudier le comportement d'un seul poisson et sonder sa réponse à une perturbation (banc-VR) contrôlée (complémentaire au *LureBot*)



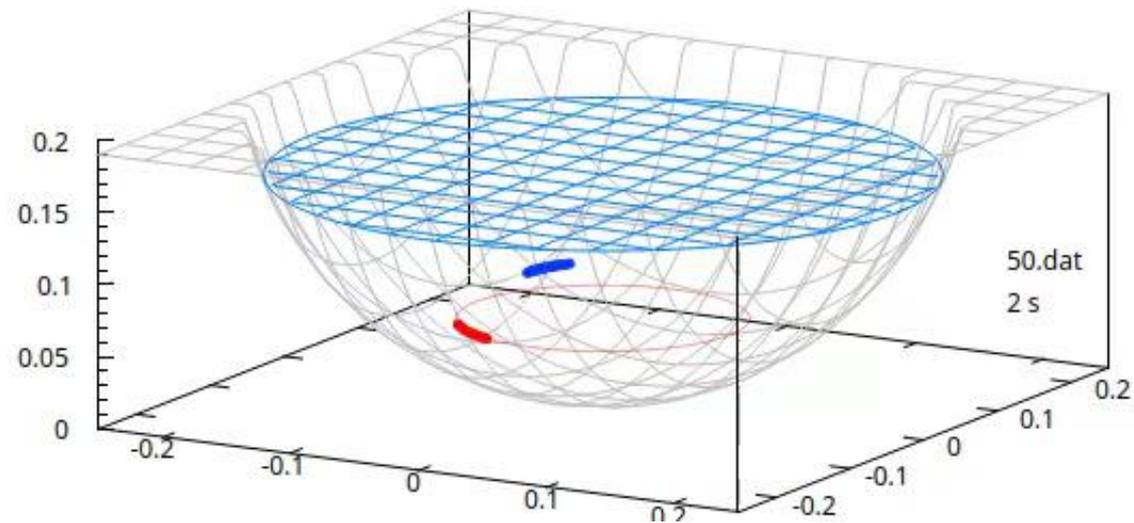
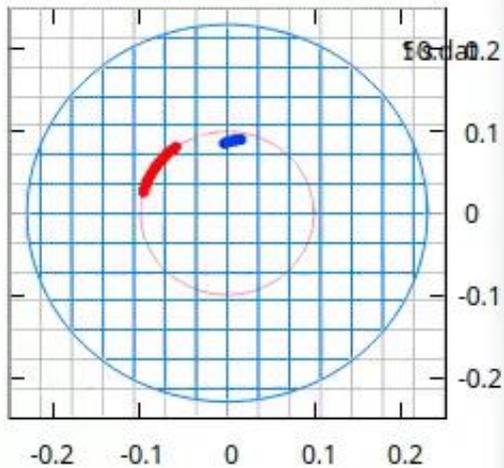
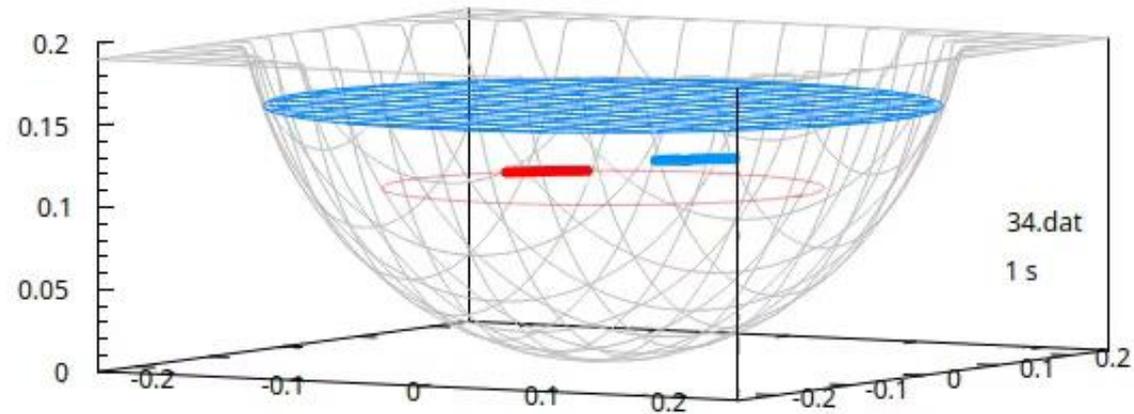
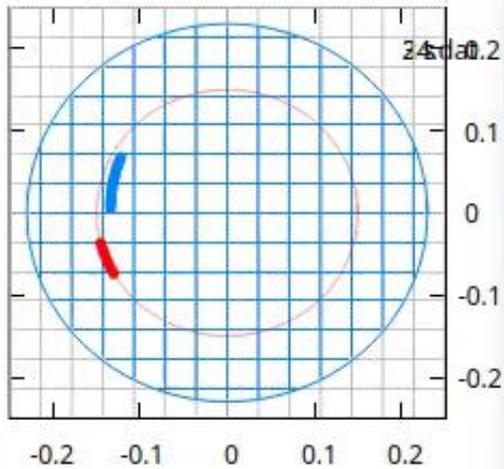


Réalité virtuelle pour poissons (ANR VR-FISHSCHOOL – CRCA-LPT-IRIT)





Réalité virtuelle pour poissons (ANR VR-FISHSCHOOL – CRCA-LPT-IRIT)





Model 3D bio-inspiré implémenté dans des drones



Bio-inspired 3D flocking algorithm with minimal information transfer for drones swarms

Matthieu Verdoucq (1,2), Clément Sire (3), Ramon Escobedo (2), Guy Theraulaz (2), and Gautier Hattenberger (1)

1: Ecole Nationale de l'Aviation Civile, Université de Toulouse, 31400 Toulouse, France

2: Centre de Recherches sur la Cognition Animale, Centre de Biologie Intégrative (CBI),

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) & Université Paul Sabatier, 31062 Toulouse, France

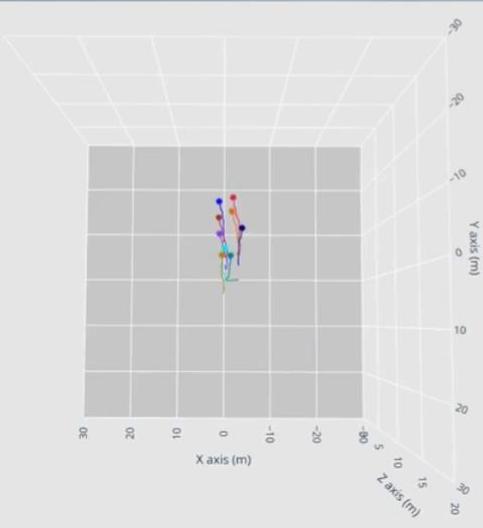
3: Laboratoire de Physique Théorique, CNRS & Université de Toulouse Paul Sabatier, 31062 Toulouse, France



Modèle 3D bio-inspiré implémenté dans des drones (avec Dronisos)



The swarm is flying in a cylindric arena





Nous ~~forçons~~ invitons aussi des humains à ~~nager~~ marcher dans un ~~aquarium~~ enclos circulaire

***(Mais nous ne prévoyons – pas encore – de les faire
interagir avec une AI, des robots, ou des drones...)***



***Phil. Trans. Roy. Soc. 2020; PLOS Comp. Biol. 2021;
J. Roy. Soc. Interface 2021; PNAS 2017 & 2023***



Conclusion

- **L'étude des phénomènes collectifs** dans les groupes d'animaux profite des **progrès rapides de la technologie** (**suivi 2D/3D** en temps réel ; **IA** ; réponse d'un banc de poissons à un **robot** ; réponse d'un seul poisson à un banc **VR** ; **drones**)
- **Reconstruction et modélisation des interactions sociales...** mais qui doit aussi s'adapter aux conditions et contraintes physiques réelles
- **Inspiration biomimétique pour les robots/drones...** mais, pas besoin de mettre en œuvre les formes réelles d'interactions sociales animales dans les robots/drones (qui peuvent néanmoins fournir des idées intéressantes dans le contexte robotique)
- **Une recherche très interdisciplinaire** (éthologues, informaticiens, roboticiens... et un physicien théoricien !)