

La Physique de la Société

*Et une introduction à la méthode en
sciences et notamment en physique*

Clément Sire

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

www.lpt.ups-tlse.fr

Où en est la physique?

Ses prochaines révolutions?

- **Très (trop ?) bonne compréhension** de la « matière inerte » de 10^{-10}m (voire 10^{-15}m) jusqu'à 10^{12}m (voire bien plus !)
- La **biologie** n'a certainement pas encore acquis le même degré de **maturité**
 - Les systèmes biologiques obéissent aux « lois » de la physique-chimie !
 - La biologie a énormément bénéficié de l'introduction d'outils expérimentaux issus de la physique et de la chimie

Où en est la physique?

Ses prochaines révolutions?

- **Émergence de la biophysique** : introduction des *outils, méthodes, et objectifs* de la physique à l'étude du vivant, à l'échelle
 - **Moléculaire** : ADN, protéines, moteurs biologiques...
 - **Cellulaire** : membrane, cytosquelette...
 - **Méso/macrosopique** : comportements collectifs (neurones, lymphocytes...), morphogenèse...
 - **???**
- **Une biologie interdisciplinaire** : biologie+chimie+physique+informatique+sciences humaines...

Physique de la société et/ou science sociales ?

- **???** = étude des phénomènes collectifs résultant des interactions dans les **groupes animaux et humains...**
- Par les **méthodes/outils** et avec les **objectifs** de la **physique...**
- Tout en préservant le caractère **intrinsèquement interdisciplinaire** lié à l'étude des sociétés animales : physique+biologie+SHS (économie, sociologie, philosophie...)+informatique...

Objectifs et méthodes de la physique (en deux transparents !)

➤ **Comprendre le monde !**

Procurer une **représentation**/description **qualitative** et **quantitative** d'un système ou phénomène physique, **expérimentalement vérifiable** (et vérifiée !), par des **théories/modèles** mathématiques **explicatifs et prédictifs** (et au **domaine de validité** si possible bien identifié)

➤ **Exemple** : la mécanique « classique » newtonienne

- Observations **qualitatives** et **quantitatives** de Tycho Brahe/Kepler et Galilée (~1610)
- Newton propose ses trois **lois de la mécanique** (inertie, accélération – $F=ma$, action et réaction) et la loi mathématique universelle de la **gravitation** (1686), **explicatives et prédictives** (toute la mécanique à notre échelle !)
- Le **domaine de validité** de la mécanique classique/gravitation est limité au 20^{ième} siècle par la **physique quantique** (basses échelles spatiales) et la **relativité générale** (grandes vitesses et échelles spatiales)

Objectifs et méthodes de la physique (en deux transparents !)

➤ **Comment ?**

- **Observer/décrire** (qualitativement) et **mesurer** (quantitativement) un système par des expériences (aussi « propres » que possible)
- **Traduire/représenter** la situation physique et les observations (et des **hypothèses**) dans le **langage des mathématiques (qui sont « vraies »)** ; ne retenir que les théories/modèles **expliquant** ces observations et mesures
- **Tester expérimentalement** les **prédictions** des théories et ne retenir que celle (celles ?) qui survit à ces tests de **robustesse**
- Par ces aller-retours théorie/expérience, identifier les **ingrédients cruciaux** pour décrire le système/phénomène physique et le **domaine de validité** de la théorie

Physique de la société : l'origine

- L'idée d'un comportement prédictible/« déterministe » des sociétés n'est pas nouvelle !
 - Thomas Hobbes, inspiré par les travaux de Galilée, conclut que le despotisme absolu est la manière optimale de gouverner une nation (~1640) !
 - À la même époque, William Petty se fait l'avocat et devient le père des statistiques sociales
 - Au début du 19^{ième} siècle, Pierre-Simon Laplace observe que nombreuses données de statistiques sociales obéissent à des lois mathématiques
 - Antoine Augustin Cournot publie en 1838 ses *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses*
 - À la même époque, Auguste Comte, fondateur du positivisme, appelle de ses vœux l'émergence d'une « physique sociale »
 - John Stuart Mill (1862) reconnaît que le grand nombre d'individus d'une société doit conduire à un déterminisme statistique (physique statistique)
 - Emile Durkheim fonde la sociologie moderne (~1890) sur les bases (assouplies/adaptées) du positivisme
 - ...

La physique de la société : pourquoi si tard ?

- Fin du positivisme/scientisme « intégriste »
- Reconnaissance de l'influence mutuelle entre l'observateur et « l'observé » en sciences sociales
- Les sciences sociales tendent à adopter une « approche psychologique » (et parfois, idéologique ou politique) pour comprendre le comportement humain
- L'idée que les sciences sociales, « sciences molles », ne peuvent adopter des méthodes des « sciences dures »... a la vie dure !
- Une description « physique » semble s'opposer à la notion de libre arbitre/choix et de hasard
- Peu de scientifiques formés avec une double et forte culture sciences molles/sciences dures (« positives »)
- « *Les sciences sociales sont les plus dures des sciences* » ; Herbert Simon

Physique de la société : qu'es aquò ?

- Elle ne vise pas à décrire le comportement précis d'un individu mais celui du **groupe** auquel il appartient
- Elle cherche néanmoins à identifier les **règles essentielles** de fonctionnement d'un individu, mais surtout à caractériser les **interactions** entre individus produisant des **comportements émergents** du groupe
(Descartes, *Discours de la méthode* ; 1637)
- Elle cherche à identifier des « **systèmes simples** », mais réalistes, afin de tester ses méthodes, et d'essayer d'identifier et caractériser **qualitativement** et **quantitativement** des phénomènes... **complexes**
- Elle s'appuie sur des **expériences** et l'exploitation d'une quantité extraordinaire et croissante de **données sociales** disponibles, mais aussi sur la **modélisation** (et ces aller-retours continuels entre théorie et expériences/données)

La physique de la société : quelques applications

- **Réseaux complexes** : internet, transport, échanges économiques, sociaux, neurones, interaction de protéines, épidémiologie...
- **Mouvements collectifs** : trafic routier, *mouvements collectifs de groupes humains, bancs de poissons*, nuées d'oiseaux...
- **Systemes en compétition** : éconophysique/finance, *sports*, croissance des villes ou de compagnies, politique internationale...
- **Structures de sociétés** : nids d'insectes, ségrégation sociale et culturelle, transmission des traits culturels, maîtrise du crime ou encouragement de la natalité/du mariage...
- **Émergence et dynamique d'opinions** : vote, idées, *révolutions technologiques*, modes, *prénoms*...
- ...

WSOP 2009: 57 tournois (200 – 6500 joueurs)

Main event: 6494 joueurs; 10000\$ buy-in ; prix du gagnant: 8.5 M\$



Les tournois de poker

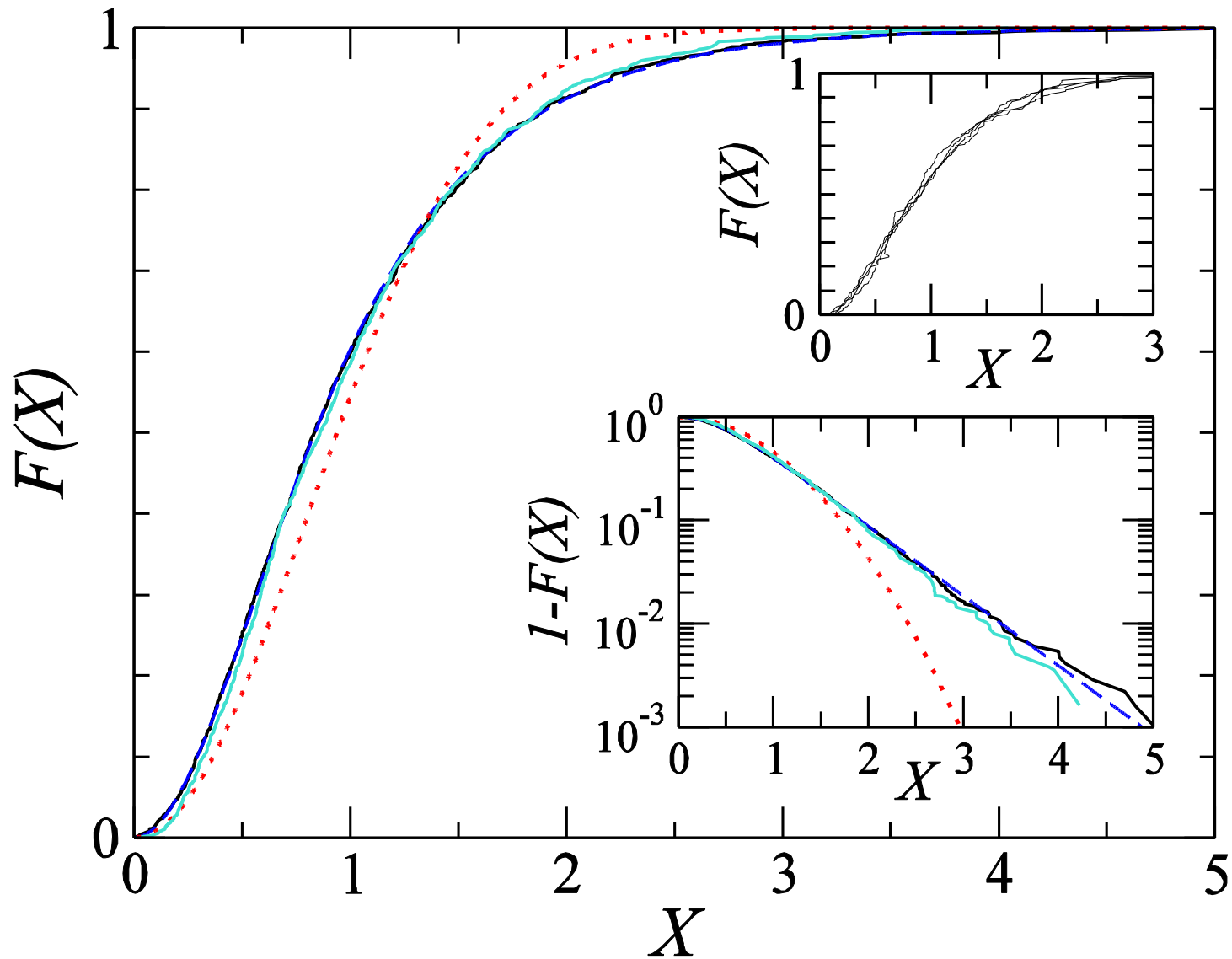
➤ Une économie simplifiée :

- Un système « propre » **isolé** du reste du monde
- Echanges de **valeurs** (jetons)
- Prise de **risque** (calculée ?) : « all-in ! »
- **Inflation** (augmentation exponentielle de la « blind »)
- **Rationalité** et **irrationalité** des joueurs, **libre arbitre**, **émotions** et **sentiments humains** (prudence, agressivité, bluff, courage, appât du gain...) : motivant !

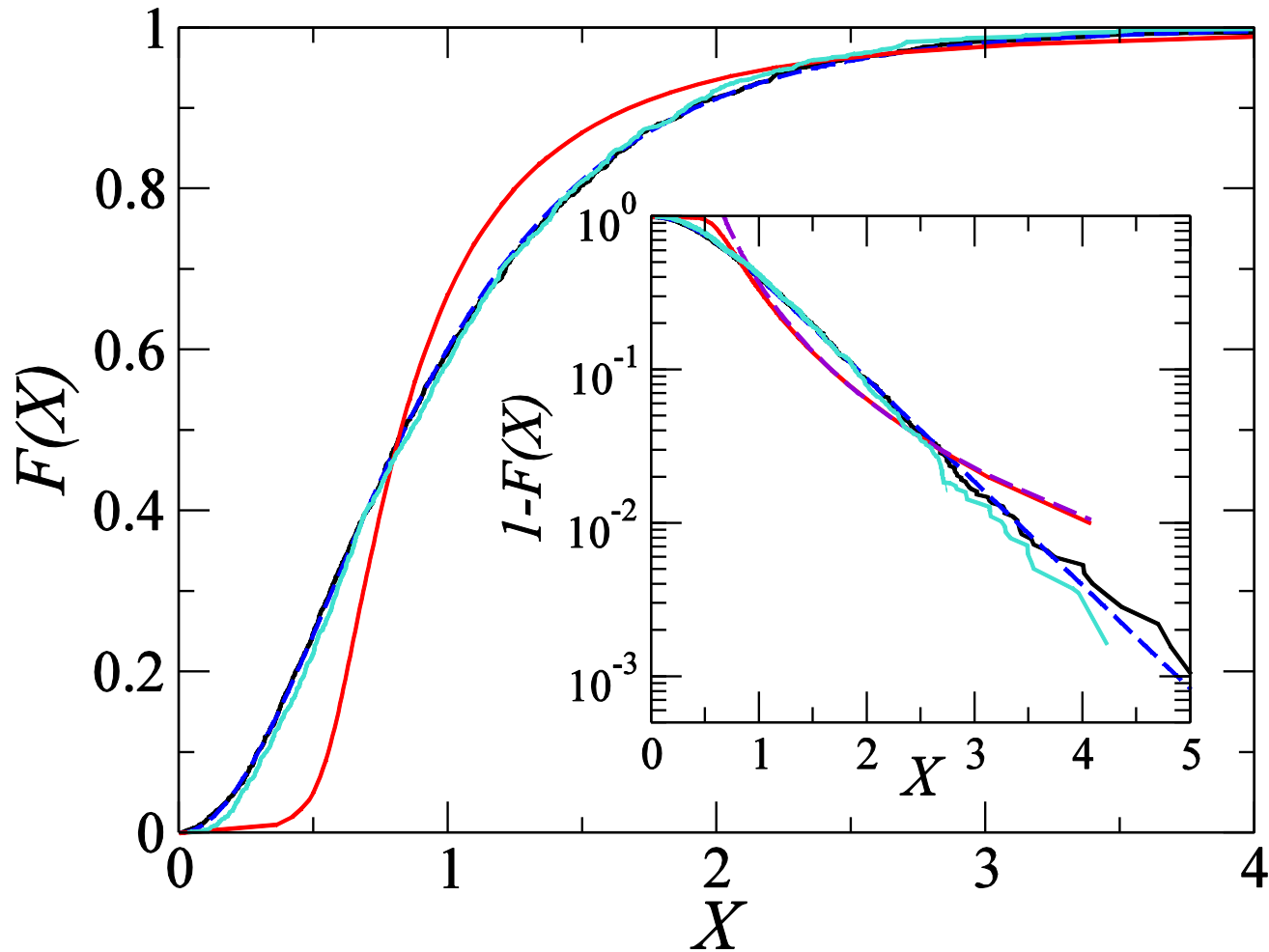
➤ Méthodologie :

- Collecte et analyse de données (Internet, WPT...) ; **mesures**
- Définition d'un **modèle numérique** fidèle et... complexe
- **Théorie mathématique** retenant les **ingrédients essentiels** (augmentation de la blind, « all-in » vs donnes conduisant à l'échange de quelques blinds)
- **Aller-retours** et comparaison « expériences »/théorie et **prédictions**

Fraction de joueurs $F(X)$ moins riches qu'un joueur donné ayant X fois la fortune moyenne



Comparaison avec la distribution des salaires bruts de la population salariée française (2007)
Le poker moins égalitaire pour $X < 2$, plus pour $X > 2$



$$1 - F_{\text{France}}(X) \sim X^{-2.5}$$

Rions un peu : les « équations du poker »

- ◆ Equation vérifiée par la dérivée de $F(X)$

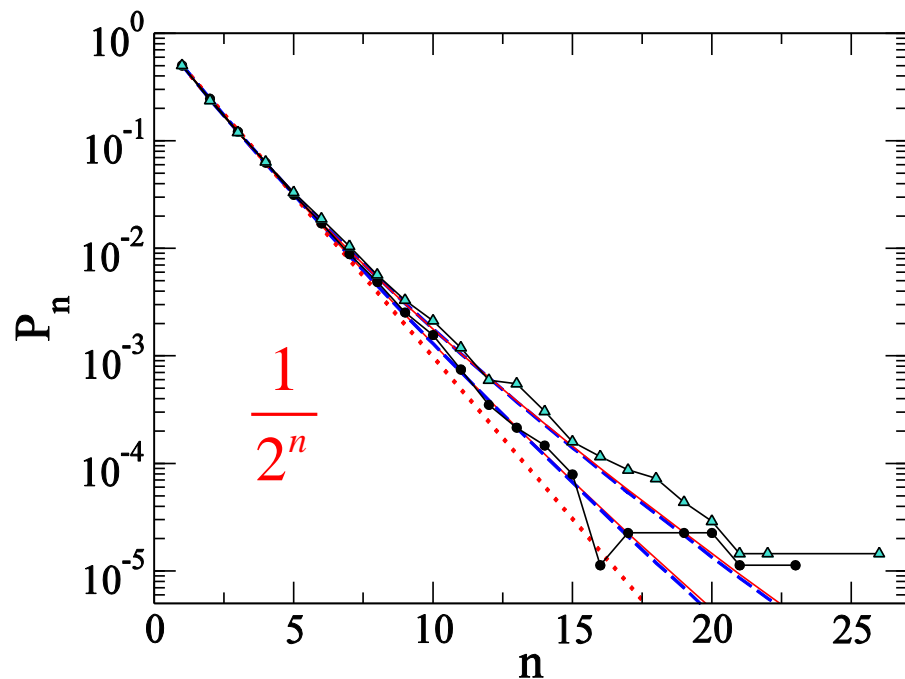
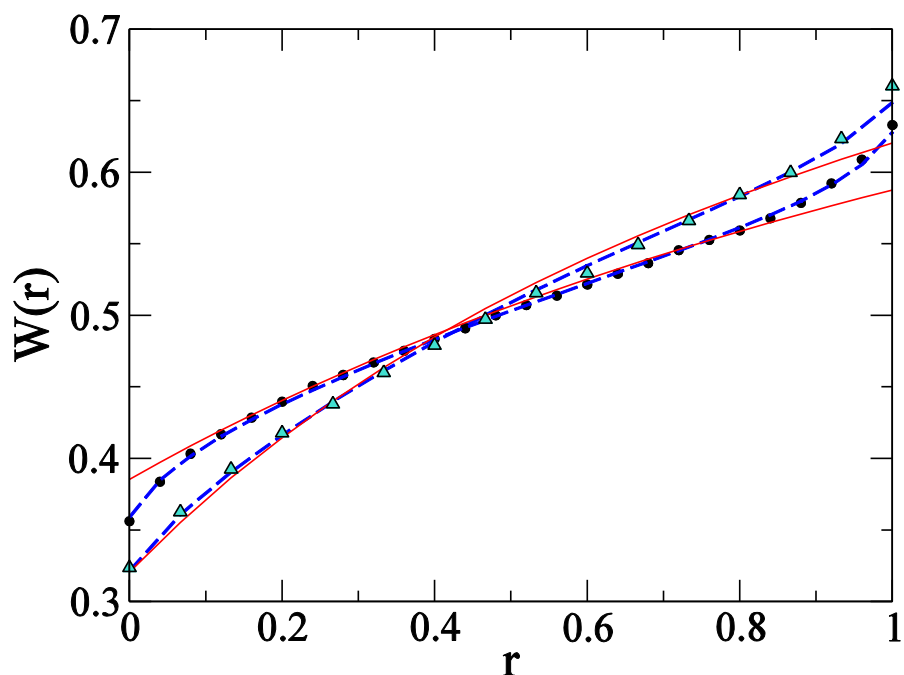
$$\begin{aligned} f''(X) + X f'(X) + \frac{1}{2} f(X/2) \int_{X/2}^{+\infty} f(Y) dY \\ + \int_0^{X/2} f(X - Y) f(Y) dY \\ + \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} f(X + Y) f(Y) dY = 0 \end{aligned}$$

- ◆ La durée d'un tournoi de poker en fonction du nombre initial de joueurs

$$\frac{t_f}{t_0} = \ln(N_0) - \frac{1}{2} \ln(t_0) + \ln\left(\frac{x_0}{b_0}\right)$$

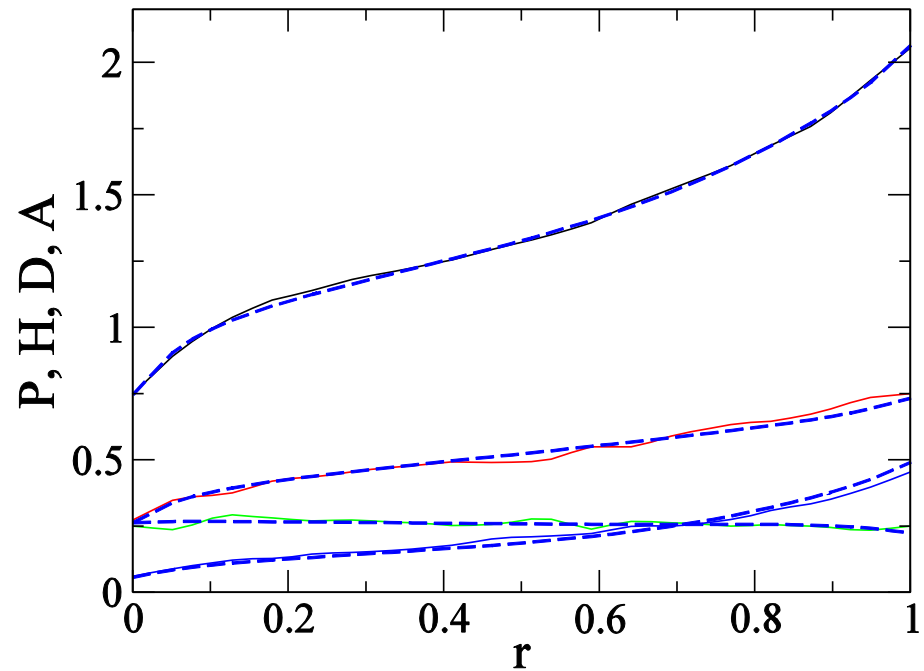
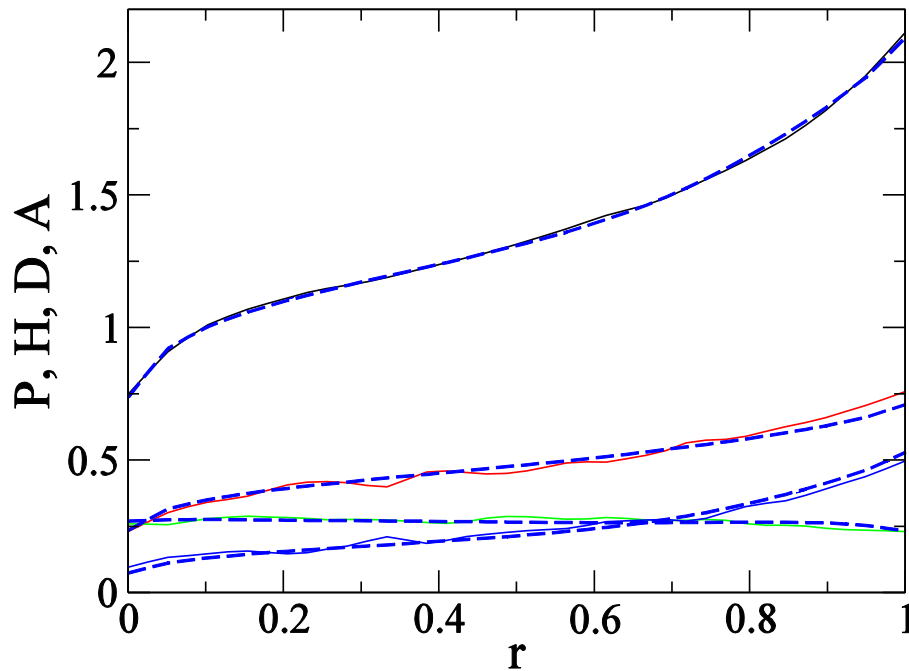
Modélisation des championnats de base-ball

- ◆ **Systeme isolé**; absence de match nul; aspects psychologiques mineurs; grande base de données
- ◆ **Fraction de victoires vs le rang final** durant deux ères identifiées par le modèle (1900-1960; 1961-2007)
- ◆ Distribution du nombre de **victoires répétées**

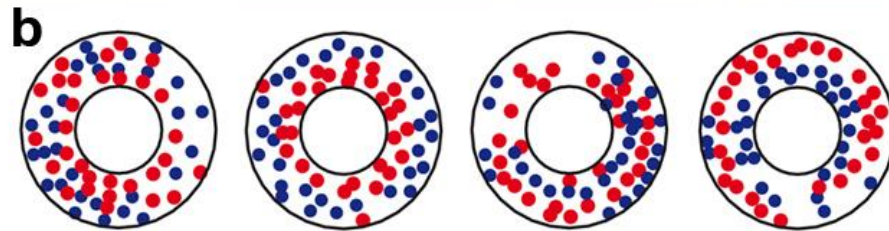
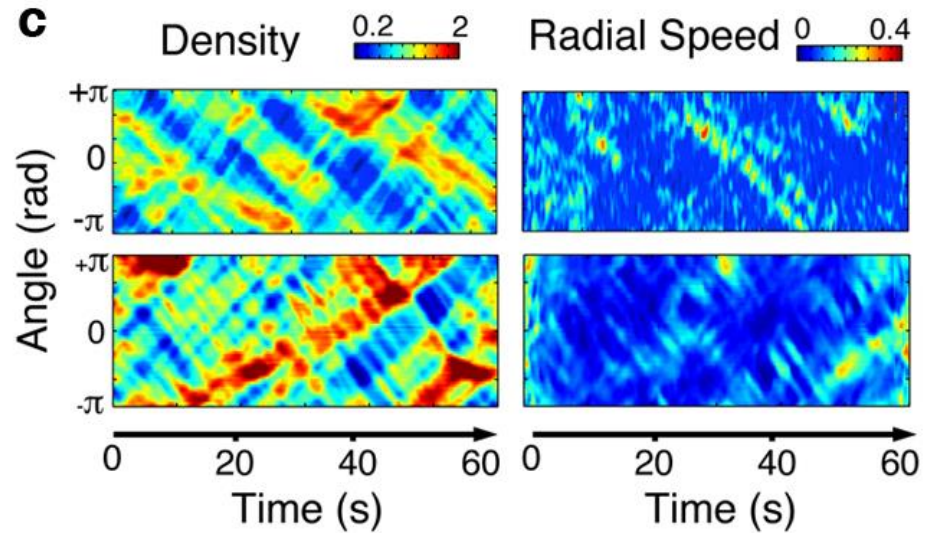


Modélisation des championnats de football

- ◆ **Nombre de points et fraction de victoires** (domicile & extérieur) et de **matches nuls** dans les ligues majeures européennes vs le **rang final** (UK et Allemagne)



Mouvements collectifs de groupes humains



a. *Dispositif expérimental* utilisé pour l'étude des déplacements collectifs de piétons.

Un système de capture de mouvement en 3D permet de suivre les positions de chaque piéton.

b. Lorsque deux groupes de piétons se déplacent en directions opposées, **le trafic se structure en files** distinctes après une vingtaine de secondes. Cette organisation collective est instable et peut disparaître quelques instants plus tard, puis réapparaître.

c. Densité de piétons dans le couloir et vitesse radiale des piétons dans une expérience (haut) et une simulation numérique (bas) du modèle heuristique de déplacement de piétons ($N=60$ piétons). Le modèle montre que l'instabilité de la dynamique de ségrégation résulte de la variabilité des vitesses de marche.

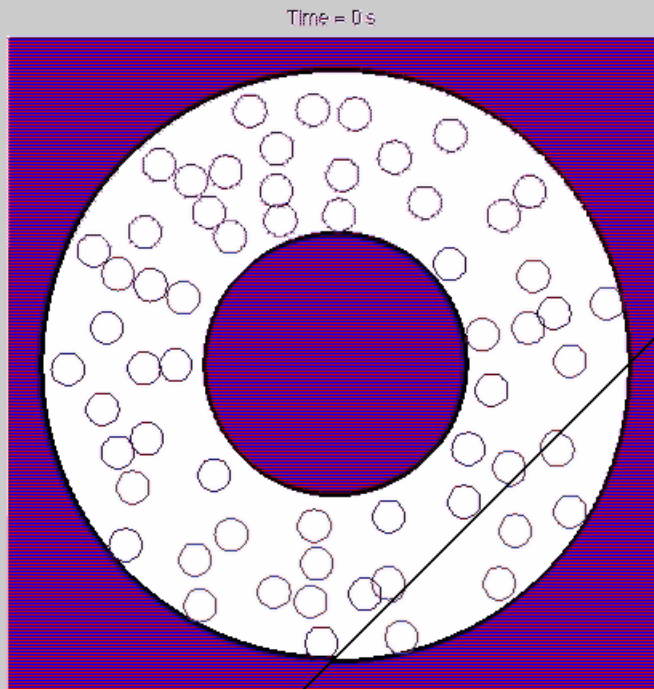
Mouvements collectifs de groupes humains

Modélisation du **mouvement individuel** (prises de décisions) et des **interactions** entre individus testée expérimentalement

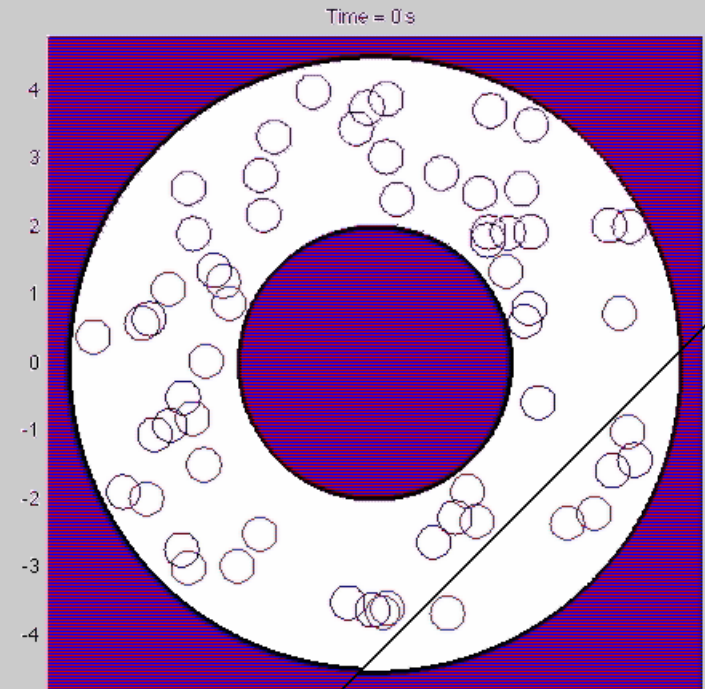
Formation spontanée de files et corrélations observées expérimentalement bien reproduites dans les simulations numériques



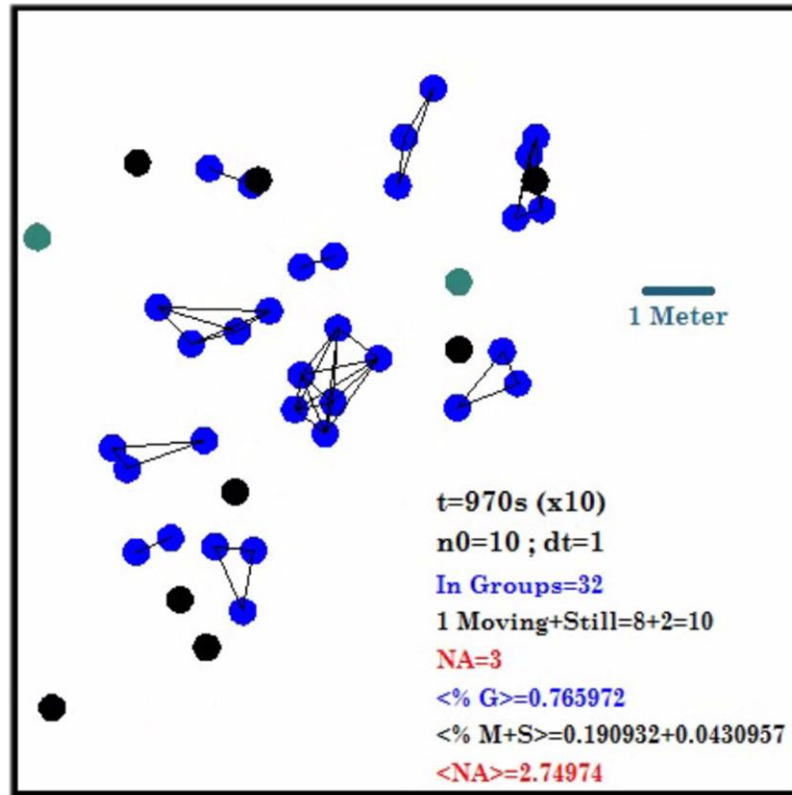
Expérience



Modèle



Dynamique de cocktails



- Ces **expériences** permettent de définir un **modèle** d'évaporation et de formation de groupes de conversation
- Définition d'une **caractérisation sociale** « objective » des individus (qui peut être réinjectée dans le modèle qui devient **prédictif**)

Mouvements collectifs dans les bancs de poissons



Expériences du CRCA Toulouse

(G. Theraulaz et al.)

- Ces expériences (1, 2, 5... 30 poissons) permettent d'identifier les **règles individuelles de prise de décisions**, les « **forces élémentaires** » (alignement – attraction), et les **paramètres microscopiques** conduisant à la modélisation mathématique



Modèle validé expérimentalement

- **Expériences** vs **simulations sur ordinateur du modèle**
Transition vers un banc ordonné quand on augmente la vitesse individuelle (et donc la force d'**alignement**)

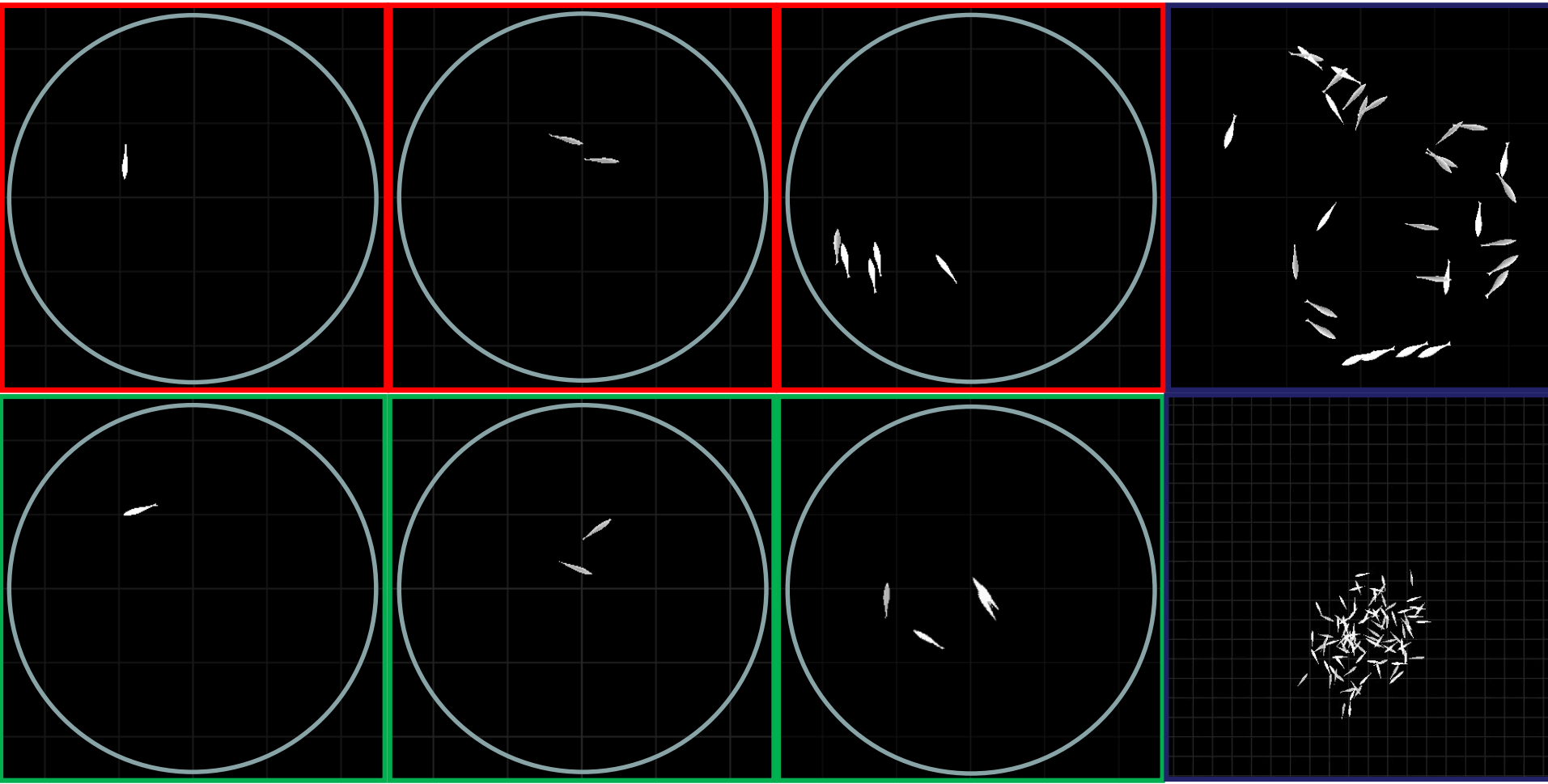
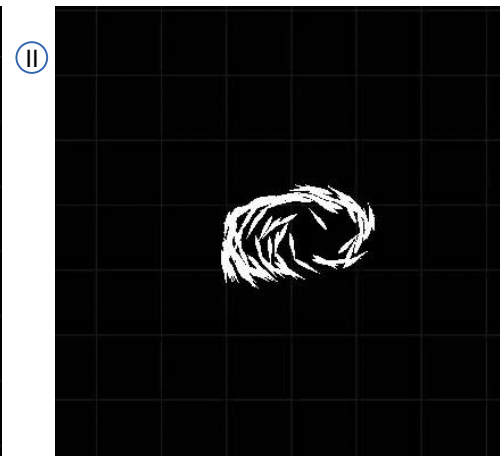
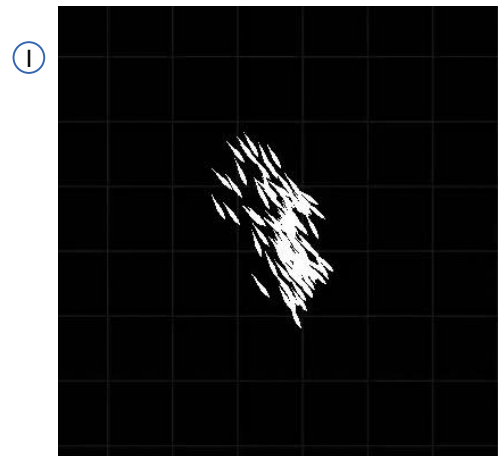
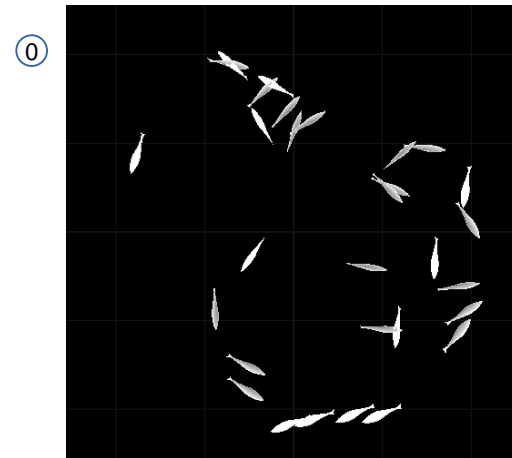
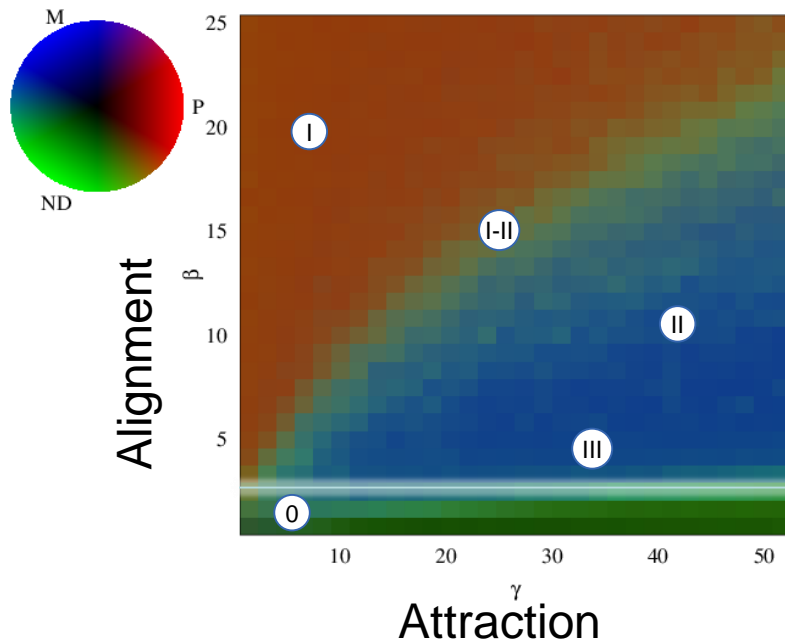
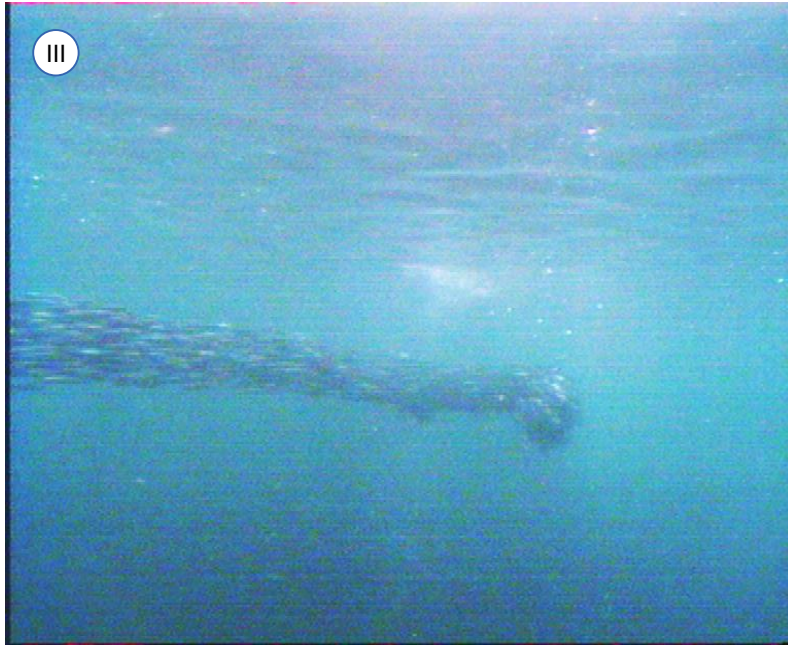


Diagramme de phase dans « l'océan » (vs attraction et alignement)

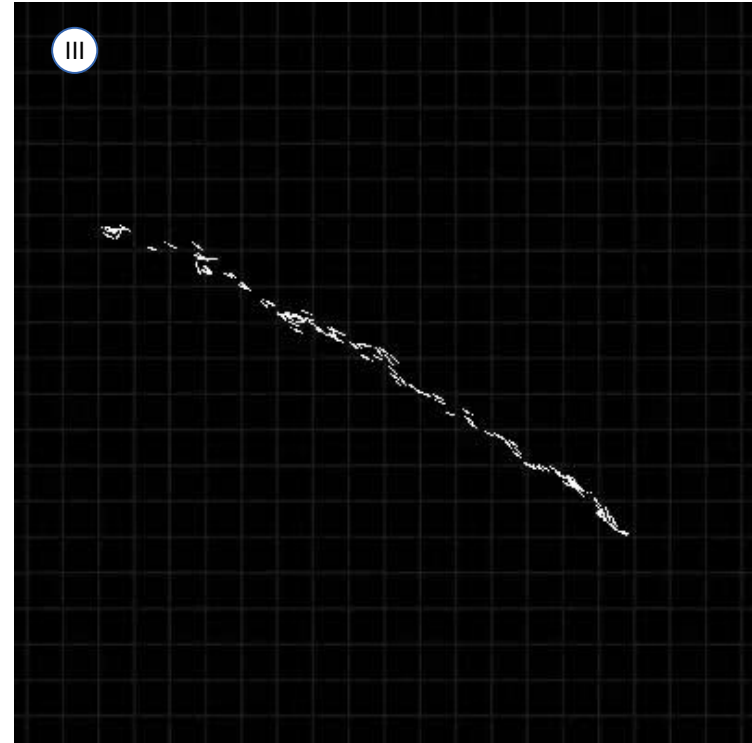
- Identification des trois phases communément observées : désordonnée (0), banc (I), et « moulin » (II)



Prédiction d'une phase étirée dans un petit domaine d'intensité des forces d'attraction et alignement

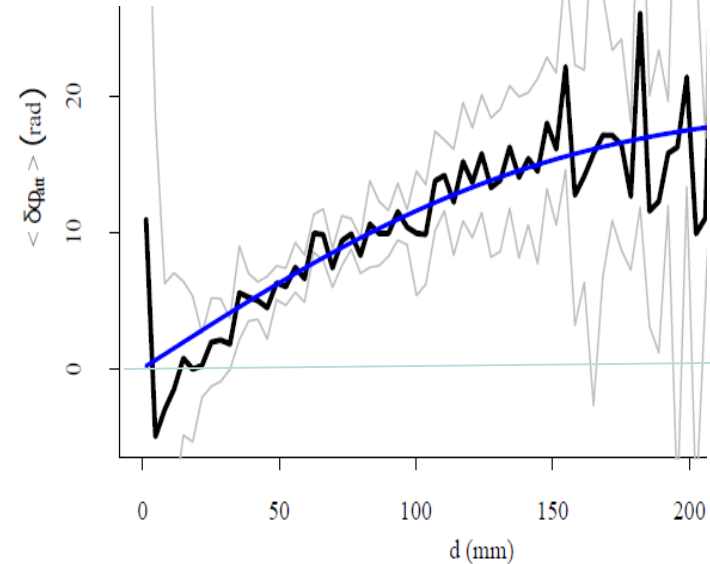
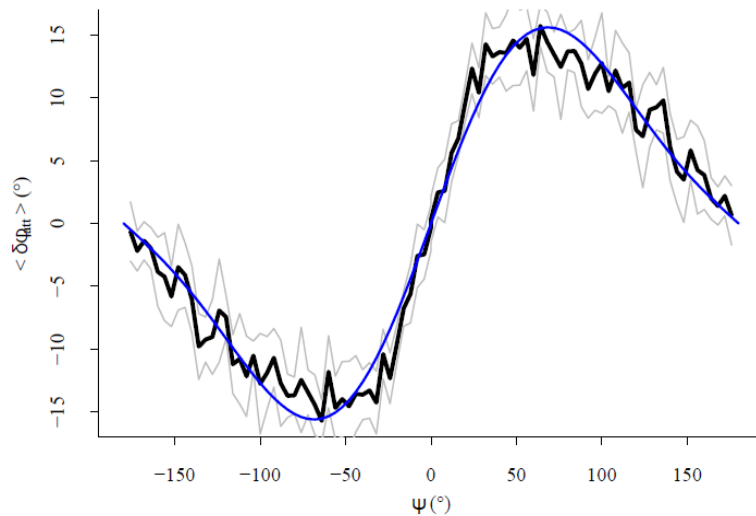
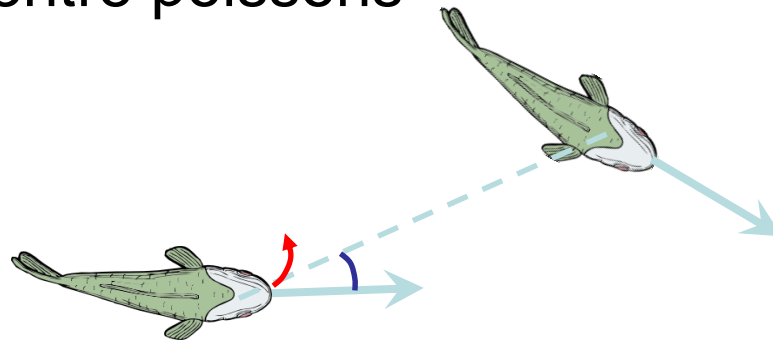


Banc de harengs de l'Atlantique (*Clupea harengus*)
Photo P. Brehmer - IRD



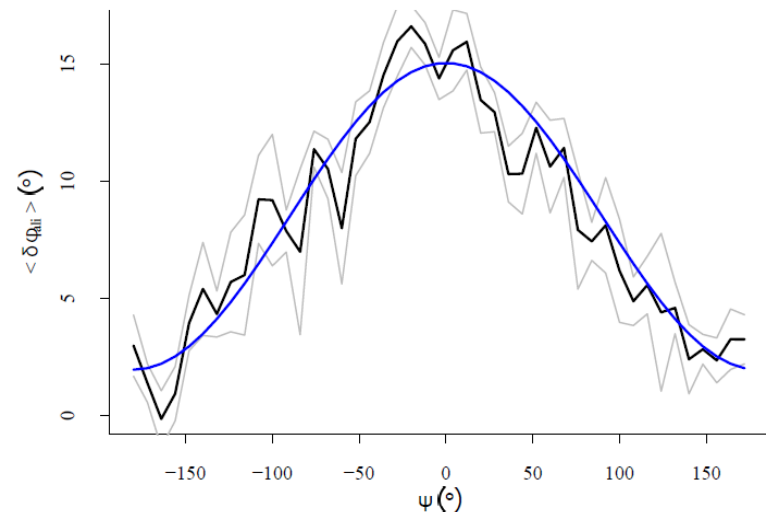
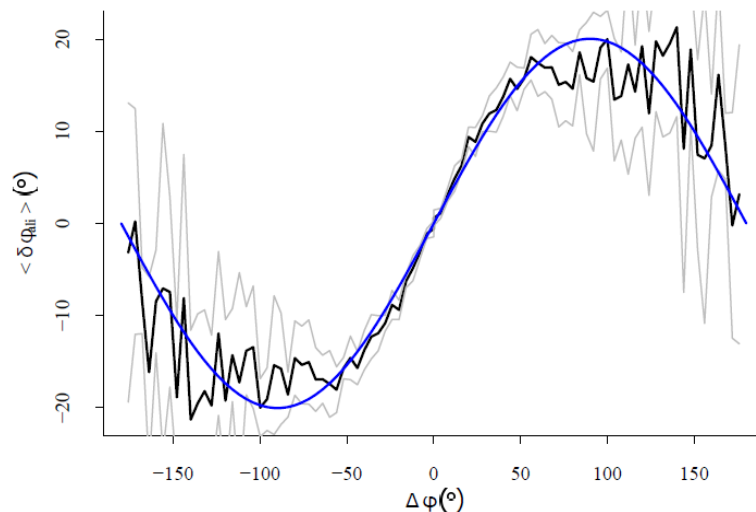
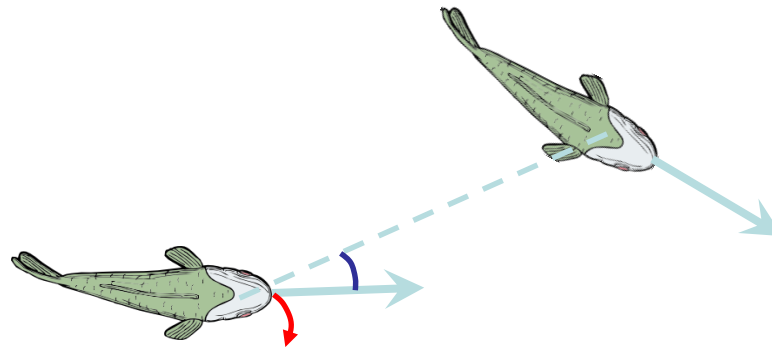
Mesures des « forces sociales » chez *Hemigrammus*

Force d'attraction (changement d'angle de direction induit) en fonction de l'**angle de vue (action-réaction)** et de la **distance** entre poissons



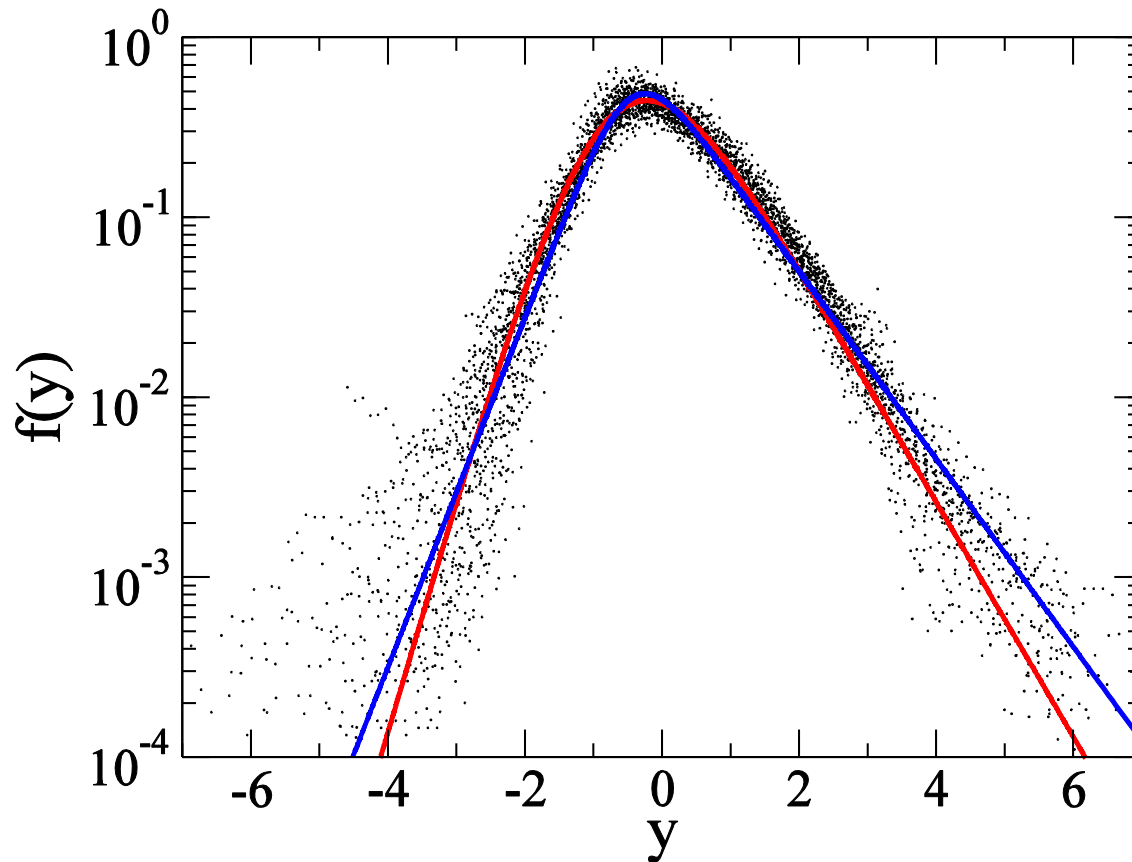
Mesures des « forces sociales » chez *Hemigrammus*

Force d'alignement (changement d'angle de direction induit) en fonction de l'**angle de vue (action-réaction)** et de l'**angle entre les directions** des poissons



L'émergence de la « nouveauté » : l'exemple des prénoms

- Nombre de fois où un prénom est donné en fonction du temps (remise à l'échelle du maximum et de la largeur du profil)



Conclusion

- Les **méthodes/outils/objectifs de la physique**, dans un cadre **interdisciplinaire**, permettent de représenter/décrire/comprendre **qualitativement** et/ou **quantitativement** certains systèmes de groupes animaux et humains
- Du groupe peuvent **émerger** des comportements qui ne sont **pas** forcément **codés** dans **l'individu**
- Cette approche ne s'oppose pas au **libre arbitre** individuel, ni à celui des « décideurs », au contraire !
- Elle vise aussi à influencer les sciences sociales modernes, tout en requérant la formation de **nouveaux scientifiques** ayant une large palette d'expertises (sciences « dures+molles »)
- Poser les **bonnes questions** et ne pas espérer de réponses aux mauvaises
- Les avancées récentes de la **biophysique** (biologie synthétique, biologie intégrative, physique de la société...) méritent d'être plus présentes sur la **place publique**

Merci de votre attention !...

Et merci à mes collaborateurs :

G. Theraulaz et son groupe au CRCA Toulouse (notamment D. Calovi & A. Litchinko), H. Chaté (CEA Saclay), G. Tredan & M. Roy (LAAS Toulouse), S. Redner (Boston)

Présentation téléchargeable (avec d'autres séminaires/vidéos/textes de vulgarisation) sur [ma page](#) sur le site du [LPT Toulouse](#)