HAL
open science

Physique-Statistique Des Événements Extrêmes Géophysiques

Davide Faranda

To cite this version:

Davide Faranda. Physique-Statistique Des Événements Extrêmes Géophysiques. Dynamique Chaotique [nlin.CD]. Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2020. tel-03009070

HAL Id: tel-03009070

https://hal.science/tel-03009070v1

Submitted on 17 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES

Laboratoire des Sciences du Climat et de L'Environnement

LSCE – UMR8212

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

DISCIPLINE / SPECIALITE :

Ecole Doctorale en Sciences de l'Environnement

Présentée par :

Davide Faranda

PHYSIQUE-STATISTIQUE DES EVENEMENTS EXTREMES GEOPHYSIQUES

Soutenue le : 13/11/2020

JURY

M Michel Crucifix, Professeur et DR FNRS, UC Louvain (Rapporteur)

Mme Anne-Laure Fougères, Professeur, Uni Claude Bernard Lyon (Rapporteur)

M Benoit Saussol, Professeur, Université de Bretagne Occidentale (Rapporteur)

Mme Liliane Bel, Professeur, AgroParisTech (Examinateur)

M Philippe Bousquet, Professeur, UVSQ LSCE CEA Saclay (Examinateur)

M Sandro Vaienti, Professeur, Uni Toulon & CPT Marseille (Examinateur)

Mme Dubrulle Bérengère, DR CNRS, SPEC CEA Saclay (Examinateur)

M Pascal Yiou, Ingénieur de Recherche, LSCE CEA Saclay (Tuteur)

A Luca, Mamma e Papà

Résumé

Comment modéliser le comportement moyen, la variabilité et les événements extrêmes de systèmes complexes ? Complexe est ce que nous percevons comme spatialement, temporellement et dynamiquement riche et esthétiquement beau. Cette richesse se décline sous la forme de tourbillons turbulents, de la rage d'un orage ou de la diffusion exponentiellement rapide d'un virus ou d'une crise économique. Dans mes activités de recherche, j'ai combiné le point de vue de la physique statistique et de la théorie des systèmes dynamiques pour concevoir des outils mathématiques qui agissent comme des loupes sur les systèmes complexes. La première question spécifique que j'ai abordée est de déterminer le nombre de variables, d'équations ou de données dont nous avons besoin pour décrire un événement spécifique, que cela se révèle ou non extrême pour le système que nous examinons. L'un des résultats de cette recherche est la possibilité d'étudier certains des systèmes les plus complexes comme par exemple un ensemble de vortex turbulents dans une géométrie confinée (écoulement de von Karman) avec trois équations dynamiques simples. Ces équations ne décrivent pas seulement l'état moyen du système, mais elles permettent une prévisibilité à court terme de son mouvement. Nous avons ainsi découvert que les événements extrêmes dans la circulation atmosphérique tels que les cyclones montrent souvent une structure plus simple que le comportement moyen de l'atmosphère : ils agissent comme des *condensats* où quasiment tous les degrés de liberté de la dynamique sont gelés. Cela implique qu'ils correspondent à des briques spécifiques de la géométrie mathématique sous-jacente et parfois inconnue de ces systèmes : les points fixes instables de la dynamique. Équipés de ces outils statistiques, nous pouvons donc rechercher l'empreinte de points fixes instables dans les phénomènes naturels et découvrir leur correspondance avec les événements extrêmes rencontrés dans la vie quotidienne: jusqu'à présent - et j'en donne un aperçu dans ce manuscrit - nous avons découvert qu'ils apparaissent comme des tourbillons turbulents extrêmes dans l'atmosphère, comme des tempêtes, des ouragans, des tremblements de terre ou même comme des états spécifiques du cerveau. Enfin, je rends également compte de mon activité imparfaite mais stimulante dans la communication de la beauté et de la richesse de systèmes complexes et de leurs extrêmes en images, sons et même avec un jeu vidéo sur les extrêmes climatiques.

Abstract

How to model complex systems? Complex is what we perceive as spatially, temporally and dynamically rich and esthetically beautiful. This richness is declined in the shapes of turbulent vortices, the rage of a storm, the exponentially fast diffusion of a virus or an economic crisis. In research activity, I have combined the point of view of statistical physics and dynamical systems theory to devise mathematical tools that act as magnifying glasses for complex systems. The first specific question I have tackled is to determine how many variables, equations or data we need to describe a specific event, whether this turns out or not to be extreme for the system we examine. One of the outcomes of this investigation is the possibility of studying some of the most complex systems we can figure out, namely an ensemble of turbulent vortices in a confined geometry with just three simple dynamical equations. These equations do not only describe the mean state of the system but they allow for short term predictability of its motion. Another counterintuitive result is that extreme events of the atmospheric circulation such as tropical or extratropical cyclones yield often a simpler structure than the mean behavior of the atmosphere: they act as *condensates* where all but few degrees of freedom of the dynamics are frozen. They correspond to specific bricks of the underlying and unknown mathematical geometry of those systems, namely the unstable fixed points of the dynamics. Equipped with these statistical tools, we can search the footprint of unstable fixed points in natural phenomena and discover their correspondence with extreme events encountered in the everyday life: so far – and I give an overview of these research in this manuscript - we have discovered that they appear either as extreme turbulent vortices in the atmosphere, or as storms, hurricanes, earthquakes or even as specific states of the brain. Finally, I also give an account of some imperfect but stimulating way to communicate the beauty and the richness of complex systems and their extremes to other human beings, in images, sounds and even with a video-game on climate extremes.

SOMMAIRE

Page

1. Curriculum vitæ 7
1.1 Biographie 7
1.2 Formation 8
1.3 Activité de Recherche 8
1.4 Prix Obtenus 8
1.5 Production Scientifique 8
1.6 Séjours de travail 17
1.7 Organisation de workshops et conferences 17
1.8 Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique 18
1.9 Participations à l'enseignement 20
1.10 Valorisation 21
1.11 Participations à des contrats de recherche : 21
1.12 Encadrement, animation et management de la recherche 24
2. Synthèse de mes travaux scientifiques 25
2.1 Cadre général de mes recherches 25
2.2 Volet Systèmes Dynamiques 26
2.3 Volet Climat et Extrêmes Climatiques 27
2.4 Volet Turbulence 30
2.5 Volet Physique Statistique 31
2.6 Volet Neurosciences et Médecine 32
2.7 Mon intégration au sein du LSCE et de l'équipe ESTIMR 32
2.8 Collaborations avec des partenaires académiques français.e.s 34
2.9 Collaborations avec des partenaires académiques internationaux 35
3. Projet de recherche 38
3.2 Climat et Extrêmes Climatiques 38
3.4 Axes de recherche interdisciplinaires et valorisation 46
3.5 Références projet 48
4. Selection de cinq publications 51
4.1 Faranda et al. "Numerical convergence of the block-maxima approach to the generalized extreme value distribution". *Journal of Statistical Physics, 145(5):1156-1180, 2011.* 51
4.2 Faranda e al. "The switching between zonal and blocked mid-latitude atmospheric circulation from a dynamical systems perspective". *Climate Dynamics*,

1-13, 2015. 51

4.3 Faranda et al. Stochastic Chaos in a Turbulent Swirling Flow *Physical review letters*, 119, 014502, 2017. 51

4.4 Faranda et al. "Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes". *Scientific Reports*, 7-41278, 2017. 51

4.5 Faranda et al. "The Hammam effect or how a warm ocean enhances large scale atmospheric predictability" *Nature Communications*, (10) 1316, 2019.....52

1. CURRICULUM VITÆ

Davide FARANDA, Bülach (Suisse), 07-02-1987
Chargé de Recherche Classe Normale CNRS au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, depuis Octobre 2015.
UMR CEA-CNRS-UVSQ 8212, CE Saclay, L'Orme des Merisiers, Bâtiment 714, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex France
01.69.08.85.41
davide.faranda@lsce.ipsl.fr

-London Mathematical Laboratory, 8 Margravine Gardens London W6 8RH (External Fellow)
-LMD/IPSL, Ecole Normale Superieure, PSL research University, Paris, France (External Fellow)

1.1 Biographie

Je me suis intéressé à la théorie des systèmes dynamiques et à ses applications géophysiques pendant mon mémoire de master à Bologne en 2010. Le développement des indicateurs dynamiques au niveau numérique et théorique est devenu mon sujet de thèse et le cœur d'activité de mes recherches. Mon projet de thèse s'est déroulé dans trois pays différents (Reading – Angleterre, Hambourg – Allemagne, École Polytechnique – France), en contact avec les communautés de climatologues (V. Lucarini, mon directeur de thèse), des physiciens (P. Manneville) et des mathématiciens (S. Vaienti, T. Kuna). Ces interactions ont donné un caractère très interdisciplinaire à mon travail. J'ai rendu mon manuscrit intitulé : « Extreme value theory for geophysical Flows » après deux ans et demi de thèse.
Mon expérience en France a débuté en 2013 dans le cadre d'une bourse postdoctorale au CNRS sous la direction de B. Dubrulle et F. Daviaud au SPEC – CEA Saclay. Mon travail portait sur la compréhension des phénomènes liés à l'intermittence dans les écoulements turbulents de laboratoire grâce à l'expérience de von Karman. Les développements théoriques et numériques nous ont également permis d'appliquer la méthode à des données financières pour la définition des précurseurs de crises.
En 2014, j'ai commencé un second contrat post-doctoral dans le cadre du projet A2C2 porté par P Yiou au LSCE. Nous avons développé des méthodes pour étudier les récurrences des régimes de temps atmosphériques notamment pendant les événements extrêmes (vagues de chaleur, vagues de froid, tempêtes extratropicales).
La formation interdisciplinaire que j'ai acquise durant ces premières phases de ma carrière m'a permis de construire un projet solide pour le CNRS, que j'ai rejoint en 2015. Depuis mon embauche, mon activité s'est inscrite au sein de l'équipe ESTIMR du LSCE. Elle se concentre surtout sur la définition d'outils numériques pour étudier les évènements climatiques extrêmes, s'appuyant sur des méthodes de physique statistique. L'universalité de ces méthodes me permet de poursuivre la collaboration avec le SPEC et l'étude des écoulements turbulents, et de les appliquer à des domaines différents tels que les neurosciences (en collaboration avec l'Université la Timone de Marseille). Mes collaborations internationales s'inscrivent dans ce travail de recherche interdisciplinaire : S. Vaienti (systèmes dynamiques, CPT – Marseille), Y. Sato (systèmes dynamiques et processus stochastiques, Hokkaido University, Japan), N. Vercauteren (Turbulence atmosphérique, FU Berlin, Allemagne), G. Messori (dynamique du climat, Stockholm, Suède). Au sein du CEA Saclay, je m'investis dans l'organisation d'un groupe de travail Climat-Meca-Stat qui fait le lien entre les compétences du LSCE et du SPEC tout en s'enrichissant de la présence d'autres laboratoires. Mon activité a récemment été récompensée par le prix EGU Division Outstanding Early Career Scientists Award de l'union européenne de géophysique.

1.2 Formation

2010-2013 Doctorat en Sciences de la Terre *cum laude*, Université de Hambourg (Allemagne). Mémoire : « Extreme Value Theory for Geophysical Flows », Directeur de Thèse : Valerio Lucarini

2008-2010 Master en Physique *cum laude*, Université de Bologne (Italie)

2005-2008 Licence en « Physique de l'atmosphère et météorologie » *cum laude*, Université de Bologne (Italie)

1.3 Activité de Recherche

2015- Chercheur CNRS au LSCE – Gif-sur-Yvette

- Étude de signaux du changement climatique dans les circulations atmosphériques observées pendant les vagues de chaleur et de froid
- Crises (bifurcations) dans les systèmes naturels et la finance
- Recherche de quasi-singularités dans les équations de Navier-Stokes à l'aide d'expériences de Von Karman (avec B. Dubrulle, F Daviaud, SPEC-CEA)

2014-2015 Post-doctorant CEA au LSCE – Gif-sur-Yvette

- Étude de récurrences rares dans les données de température

2013-2014 Post-doctorant CNRS au SPEC (UMR CEA – CNRS) –Saclay

- Étude de l'intermittence dans les écoulements turbulents

2013-2013 Post-doctorant au Klimacampus (Université de Hambourg)

- Théorie de récurrence de Poincaré dans les écoulements géophysiques

2009-2010 Tuteur d'étudiants (Université de Bologne - Italie)

1.4 Prix Obtenus

2019 Winner of the EGU Best Blog Posts of 2019 Competition

2018 EGU Division Outstanding Early Career Scientists Award 2018, Vienna, Austria.

2014 Citoyen distingué de la ville.de S. Agata Militello (Italie). Prix attribué sous le patronage du ministère de l'intérieur Italien – FENALC, 2014.

2013 EGU Outstanding Student Poster Award, 2013, Vienna, Austria

2013 Heidelberg Laureate Forum Participant sélectionné.

1.5 Production Scientifique

1.5.1 Revues à comité de lecture (par ordre chronologique)

[1] Davide Faranda, Valerio Lucarini, Giorgio Turchetti, and Sandro Vaienti. Numerical convergence of the block-maxima approach to the generalized extreme value distribution. *Journal of Statistical Physics*, 145(5):1156-1180, 2011.

[2] Davide Faranda, Valerio Lucarini, Giorgio Turchetti, and Sandro Vaienti. Generalized extreme value distribution parameters as dynamical indicators of stability. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 22(11):1250276, 2012.

[3] Valerio Lucarini, Davide Faranda, and Matteo Willeit. Bistable systems with stochastic noise: virtues and limits of effective one-dimensional Langevin equations. *Nonlinear Process. Geophys*, 19:9-22, 2012.

[4] Valerio Lucarini, Davide Faranda, Giorgio Turchetti, and Sandro Vaienti. Extreme value theory for singular measures. *Chaos*, 22(2):023135, 2012.

[5] Davide Faranda, Martin Federico Mestre, and Giorgio Turchetti. Analysis of round off errors with reversibility test as a dynamical indicator. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 22(09):1250215, 2012.

[6] Valerio Lucarini, Davide Faranda, and Jeroen Wouters. Universal behaviour of extreme value statistics for selected observables of dynamical systems. *Journal of Statistical Physics*, 147(1):63-73, 2012.

[7] Valerio Lucarini, Tobias Kuna, Jeroen Wouters, and Davide Faranda. Relevance of sampling schemes in light of Ruelle's linear response theory. *Nonlinearity*, 25(5):1311, 2012.

[8] Davide Faranda, Jorge Milhazes Freitas, Valerio Lucarini, Giorgio Turchetti, and Sandro Vaienti. Extreme value statistics for dynamical systems with noise. *Nonlinearity*, 26(9):2597, 2013.

[9] Davide Faranda and Sandro Vaienti. A recurrence-based technique for detecting genuine extremes in instrumental temperature records. *Geophysical Research Letters*, 40:1-5, 2013.

[10] Davide Faranda and Sandro Vaienti. Extreme value laws for dynamical systems under observational noise. Physica D: Nonlinear Phenomena, 280:86-94, 2014.

[11] Davide Faranda, Valerio Lucarini, Paul Manneville, and Jeroen Wouters. On using extreme values to detect global stability thresholds in multi-stable systems: The case of transitional plane couette flow. *Chaos, Solitons & Fractals*, 64:26-35, 2014.

[12] Valerio Lucarini, Davide Faranda, Jeroen Wouters, and Tobias Kuna. Towards a general theory of extremes for observables of chaotic dynamical systems. *Journal of statistical physics*, 154(3):723-750, 2014.

[13] Davide Faranda, Flavio Maria Emanuele Pons, Berengere Dubrulle, Francois Daviaud, Brice Saint-Michel, Eric Herbert, and Pierre-Philippe Cortet. Modelling and analysis of turbulent datasets using auto regressive moving average processes. *Physics of Fluids (1994-present)*, 26(10):105101, 2014.

[14] Davide Faranda, Berengere Dubrulle, and Flavio Maria Emanuele Pons. Statistical early-warning indicators based on autoregressive moving-average models. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 47(25):252001, 2014.

[15] Davide Faranda, Mickael Bourgoin, Sophie Miralles, Philippe Odier, Jean-Franois Pinton, Nicolas Plihon, Francois Daviaud, and Berengere Dubrulle. Robust estimate of dynamo thresholds in the von Karman sodium experiment using the extreme value theory. *New Journal of Physics*, 16(8):083001, 2014.

[16] Davide Faranda, Xavier Leoncini, and Sandro Vaienti. Mixing properties in the advection of passive tracers via recurrences and extreme value theory. *Physical Review E*, 89(5):052901, 2014.

[17] Davide Faranda, Berengere Dubrulle, Francois Daviaud, and Flavio Maria Emanuele Pons. Probing turbulence intermittency via autoregressive moving-average models. *Physical Review E*, 90(6):061001, 2014.

[18] Davide Faranda, Jorge Milhazes Freitas, Pierre Guiraud, and Sandro Vaienti. Sampling local properties of attractors via extreme value theory. *Chaos Solitons and Fractals*, 74:55-66, 2015.

[19] Martin Mihelich, Davide Faranda, Berengere Dubrulle, and Didier Paillard. Statistical optimization for passive scalar transport: maximum entropy production vs maximum kolmogorov-sinay entropy. *Non linear Processes in Geophysics*, 22, 187-196, 2015.

[20] Davide Faranda, Flavio Maria Emanuele Pons, Eugenio Giachino, Sandro Vaienti, and Berengere Dubrulle. Early warnings indicators of financial crises via auto regressive moving average models. *Communications in nonlinear sciences and numerical simulations*, 29(1-3) 233-239, 2015.

[21] Denis Kuzzay, Davide Faranda and Berengere Dubrulle. Global and local energy dissipation in turbulent von Karman flow. *Physics of Fluids*, 27-075105, 2015.

[22] Davide Faranda, Giacomo Masato, Nicholas Moloney, Yuzuru Sato, Berengere Dubrulle, Francois Daviaud, and Pascal Yiou. The switching between zonal and blocked mid-latitude atmospheric circulation from a dynamical systems perspective. *Climate Dynamics*, 1-13, 2015.

[23] Davide Faranda, Jorge Milhazes Freitas, Pierre Guiraud, and Sandro Vaienti. Extreme value theory for piecewise contracting maps with noise. *Stochastics and Dynamics*, 16(3), 1660015, 2016.

[24] Davide Faranda. Applications of Chaos Theory, chapter : Applications of extreme value theory for dynamical systems to the analysis of blood pressure data. CRC/Taylor and Francis edited by: Christos H Skiadas, United Kingdom, 2016. [chapter-pdf]

[25] Valerio Lucarini, Davide Faranda, Ana Cristina Gomes Monteiro Moreira de Freitas, Jorge Miguel Milhazes de Freitas, Mark Holland, Tobias Kuna, Matthew Nicol, Mike Todd, Sandro Vaienti. Book: Extremes and Recurrence in Dynamical Systems. ISBN 978-1-118-63219-2, 312 pages, Wiley, 2016.

[26] Davide Faranda, Carmen Alvarez-Castro, Pascal Yiou: Robust Return Times of hot and cold days via recurrences and extreme value theory. *Climate Dynamics*, 1-13, 2016.

[27] Davide Faranda and Dimitri Defrance: A wavelet-based-approach to detect climate change on the coherent and turbulent component of the atmospheric circulation. *Earth System Dynamics*, 7 517-523, 2016.

[28] Davide Faranda, Jorge Milhazes Freitas, Pierre Guiraud, and Sandro Vaienti. Statistical Properties of Random Dynamical Systems with Contracting Direction. *Journal of Physics A*, 49-204001, 2016.

[29] Ewe-Wei Saw, Denis Kuzzay, Davide Faranda, Alex Guittonneau, Francois Daviaud, Cecile Wiertel-Gasquet, Vincent Padilla, Berengere Dubrulle. Experimental characterization of extreme events of inertial dissipation in a turbulent swirling flow. *Nature Communications*, 7, 12466, 2016.

[30] Davide Faranda, Gabriele Messori and Pascal Yiou. Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes. *Scientific Reports*, 7-41278, 2017.

[31] Emmanuel Virot, Davide Faranda, Xavier Amandolese, Pascal Hemon. Chaotic dynamics of flags from recurring values of flapping moent. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 27-02, 2017.

[32] Martin Mihelich, Davide Faranda, Didier Paillard and Berengere Dubrulle. Is turbulence a state of maximal dissipation? *Entropy*, 19(4),154, 2017

[33] Gabriele Messori, Rodrigo Caballero and Davide Faranda. A Dynamical Systems Approach to Studying Mid-Latitude Weather Extremes. *Geophysical Research Letters*, GL0728879, 2017.

[34] Denis Kuzzay, Ewe-Wei Saw, Fabio Martins, Davide Faranda, Jean-Marc Foucaut, Francois Daviaud and Berengere Dubrulle. New criteria to detect singularities in experimental incompressible flows. *Nonlinearity*, 30(2381), 2017.

[35] Davide Faranda, Martin Mihelich and Berengere Dubrulle. A Non equilibrium Ising model of Turbulence. *Phase Transitions*, 2017.

[36] Davide Faranda, Yuzuru Sato, Brice Saint-Michel, Cecile Wiertel-Gasquet, Vincent Padilla, Berengere Dubrulle, & Francois Daviaud. Stochastic chaos in a turbulent swirling flow. *Physical review letters,* 119, 014502, *2017.*

[37] Guillaume Nevo, Nikki Vercauteren, Amandine Kaiser, Berengere Dubrulle, Davide Faranda. A statistical-mechanical approach to study the hydrodynamic stability of stably stratified atmospheric boundary layer. *Physical Review Fluids*, 2, 084603, 2017.

[38] Davide Faranda, Gabriele Messori, M. Carmen Alvarez-Castro, Pascal Yiou, Dynamical properties and extremes of Northern Hemisphere climate fields over the past 60 years, Nonlin. Processes Geophys., 24, 713-725, 2017.

[39] Martin Mihelich, Berengere Dubrulle, Didier Paillard, Davide Faranda, Quentin Kral. Maximum Kolmogorov-Sinai entropy vs minimum mixing time in Markov chains. *Journal of Statistical Physics*, 170(1), 62-68, 2018.

[40] Gabriele Messori, Rodrigo Caballero, Freddy Bouchet, Davide Faranda, Richard Grotjahn, Nili Harnik, Steve Jewson, Joaquim G. Pinto, Gwendal Rivière, Tim Woollings, Pascal Yiou. An interdisciplinary approach to the study of extreme weather events: large-scale atmospheric controls and insights from dynamical systems theory and statistical mechanics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018.

[41] Carmen Alvarez-Castro, Davide Faranda and Pascal Yiou. Atmospheric dynamics leading to West-European heatwaves since 1871. *Complexity,* Article ID 2494509, 2018.

[42] David Rodrigues, M Carmen Alvarez-Castro, Gabriele Messori, Pascal Yiou, Yoann Robin, Davide Faranda. Dynamical properties of the North Atlantic atmospheric circulation in the past 150 years in CMIP5 models and the 20CRvc2 reanalysis. *Journal of Climate*, 1-18, 2018.

[43] Davide Faranda, Valerio Lembo, Francois Daviaud and Berengere Dubrulle. Computation and characterization of local sub-filter-scale energy transfers in atmospheric flows. *Journal of Atmospheric Sciences,* 1-12, *2018.*

[44] Davide Faranda & Sandro Vaienti. Correlation dimension and phase space contraction via extreme value theory. *Chaos*, 28, 0411103, 2018

[45] Davide Faranda, Hamza Goudi, Pierre Guiraud, Sandro Vaienti. Synchronization and Extreme Value Theory for coupled map lattices. *Nonlinearity, 31(7), 3326* 2018.

[46] Paul Debue, Denis Kuzzay, Davide Faranda, Ewe-Wey Saw, Francois Daviaud, Berengere Dubrulle. Dissipation, intermittency and singularities. *Physical Review E, 97-053101,* 2018.

[47] Katerina Giamalaki, Claudie Beaulieu, Davide Faranda , Stephanie Henson, Simon Josey, Adrian Martin. Mechanisms triggering the 1976-77 regime shift in the North Pacific revealed by dynamical analysis. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 123 4388-4397, 2018.

[48] Claire Waelbroeck, Sylvain Pichat, Evelyn Böhm, Bryan C. Lougheed, Davide Faranda, Mathieu Vrac, Lise Missiaen, Natalia Vazquez Riveiros, Pierre Burckel, Jörg Lippold, Helge W. Arz, Trond Dokken, François Thil, and Arnaud Dapoigny. Relative timing of precipitation and ocean circulation changes in the western equatorial Atlantic over the last 45kyr. *Climate of the past* 14, 1315-1330, 2018.

[49] Davide Faranda, Gabriele Messori, Stéphane Vannitsem. Attractor dimension of time-averaged climate observables: insights from a low-order ocean-atmosphere model. *Tellus A,*(71)1-11,2019.

[50] Davide Faranda, Yuzuru Sato, Gabriele Messori, Nicholas Moloney & Pascal Yiou. Minimal dynamical systems model of the northern hemisphere jet stream via embedding of climate data. Earth System Dynamics, 10, 555 - 56, 2019

[51] Davide Faranda, Berengere Podvin, Anne Sergent. Reconciling embedding theorems and Proper Orthogonal Decomposition via the Rayleigh-Bénard convection. *Chaos*, 29-033110, 2O19.

[52] Nicholas Moloney, Davide Faranda, Yuzuru Sato. An overview of the Extremal Index. *Chaos*, 29-022101, 2019

[53] Nikki Vercauteren, Vyacheslav Boyko, Davide Faranda, Ivana Stipersk. Scale interactions and anisotropy in stable boundary layers. *Quarterly Journal of the Royal Metheorological society*, 2019

[54] Davide Faranda, M Carmen Alvarez-Castro, G Messori, P Yiou. The Hammam effect or how a warm ocean enhances large scale atmospheric predictability. *Nature Communications*, 2019

[55] M. Carmen, Alvarez-Castro, D Faranda, T Noël, P Yiou. Recurrence Spectra of European Temperature in Historical Climate Simulations. *Atmosphere, 10*-166, 2019.

[56] Théophile Caby, Davide Faranda, Giorgio Mantica, Sandro Vaienti, Pascal Yiou. Generalized dimensions, large deviations and the distribution of rare events. *Physica D,(400), 132143,* 2019.

[57] Theophile Caby, Davide Faranda, Sandro Vaienti, Pascal Yiou. On the computation of the extremal index for time series. *Journal of Statistical Physics*,(1-32) 2019.

[58] Davide Faranda, Gabriele Messori, Pascal Yiou. Diagnosing concurrent drivers of weather extremes: application to hot and cold days in North America. *Climate Dynamics,(1-15)* 2020.

[59] Pascal Yiou, J Cattieux, D Faranda, N Kadygrov, A Jezequel, P Naveau, A Ribes, Y Robin, S Thao, GJ van Oldenborgh, M Vrac. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *101*(1), S35-S40.

[60] Davide Faranda, Isaac Perez Castillo, Olivier Hulme, Aglaé Jezequel, Jeroen Lamb, Yuzuru Sato, Erica Thompson: Asymptotic estimates of SARS-CoV-2 infection counts and their sensitivity to stochastic perturbation, *Chaos (1-8)*, 2020.

[61] Paolo De Luca, G Messori, D Faranda. Dynamical Systems Theory Sheds New Light on Compound Climate Extremes in Europe and Eastern North America. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (1-15)*, 2020.

[62] Adriano Gualandi, Jean-Philippe Avouac , Sylvain Michel, Davide Faranda. The Predictable Chaos of Slow Earthquakes. *Sciences Advances (to appear)*, 2020

[63] Amandine Kaiser, Davide Faranda, Sebastian Krumscheid, Danijel Beluši, Nikki Vercauteren. Detecting regime transitions of the nocturnal and Polar boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* (to appear), 2020.

[64] Flavio Maria Emanuele Pons, Gabriele Messori, M Carmen Alvarez-Castro, Davide Faranda. Sampling hyperspheres via extreme value theory: implications for measuring attractor dimensions. *Journal of Statistical Physics* (under review), 2020.

[65] Davide Faranda et al. Boosting performance in Machine Learning of Turbulent and Geophysical Flows via scale separation. *Physical Review* (under review), 2020.

[66] Davide Faranda, Mathieu Vrac, Pascal Yiou, Aglaé Jezequel, Soulivanh Thao. Changes in future synoptic circulation patterns: consequences for extreme event attribution. *Geophysical Research Letters* (in review), 2020.

[67] Miriam D'Errico, P Yiou, C Nardini, F Lunkeit, D Faranda. Warmer Mediterranean temperatures enhance snowy cold spell intensity over Italy. *Scientific Reports* (under review), 2020.

[68] Davide Faranda. An attempt to explain recent trends in European snowfall extremes. *Weather and Climate Dynamics Discussions* (under review),*15,* 2020.

[69] Théophile Caby, Davide Faranda, Sandro Vaienti, Pascal Yiou. Extreme value distributions of observation recurrences. *Nonlinearity* (under review), 2020.

[70] Messori, G., Harnik, N., Madonna, E., Lachmy, O., and Faranda, D.: A Dynamical Systems Characterisation of Atmospheric Jet Regimes, *Earth System Dynamics Discussion* (under review), 2020

[71] Tommaso Alberti & Davide Faranda. On the uncertainty of real-time predictions of epidemic growths: a COVID-19 case study for China and Italy. *Communications in Nonlinear Sciences and Numerical Simulations* (in review), 2020.

[72] Paolo De Luca, Gabriele Messori, Davide Faranda, Philip J. Ward, and Dim Coumou, Compound Hot-Dry and Cold-Wet Dynamical Extremes Over the Mediterranean. *Earth Systems Dynamic Discussions* (in review), 2020.

1.5.2 Conferences invitées et seminaires

2013/10 Cambridge - Isaac Newton Institute for Mathematical Science. Workshop: Non-equilibrium Statistical Mechanics and the Theory of Extreme Events in Earth Science. Cambridge, UK

2014/06 Max Planck Institute for Complex Systems. Workshop: Physical origins of correlated extreme events. Dresden, Allemagne

2015/06 Extreme Value Analysis Conference. Ann Arbor, Michigan, USA

2016/05 «Strange Attractors in Climate » Kyoto University, Kyoto, Japan

2016/06 « Extreme events of the atmospheric mid-latitude circulation: » , Banff, Canada

2016/09 « Low-dimensional attractors for the North Atlantic atmospheric circulation », European Meterological Society meeting, Trieste, Italy

2016/11 «How To use statistical physics to study extremes and their climate change » Time Series Analysis In Environmental Science And Applications To Climate Change, Tromso, Norvège

2017/04 « EGU Nonlinear Processes Division Outstanding ECS Lecture by Davide Faranda », Vienna, Austria
2017/05 « Extreme Value Laws in Dynamical Systems », SIAM conference on Dynamical Systems, Snowbird, USA

2017/05 « Predicting atmospheric states from dynamical properties of attractor », GFDL, Princeton, USA

2017/09 « Stochastic Chaos in a Turbulent Flow », Climath Conference, Université de Reading, Angleterre

2017/10 « Predicting atmospheric states from local dynamical properties of the underlying attractor », Workshop on interdisciplinary approach to the study of extreme weather events, Stockholm, Suède

2017/11 «Stochastic Chaos in a Turbulent Swirling Flow », International Workshop on Complex Turbulent Flows (IWCTF2017), Larache, Maroc.

2018/02 «New Dynamical Systems Tools to study Atmospheric flows », CMCC, Bologna, Italie

2018/07 « Computation and characterization of local sub-filter-scale energy transfers in atmospheric flows », Berlin, Allemagne.

2018/09 « Dynamical systems tools to study atmospheric flows », Workshop Statistical inference for stochastic process models in weather and climate science, Leiden Lorentz Center, Hollande.

2018/09 «Correlation Dimension and Phase Space Contraction via Extreme Value Theory », Dynamics Days conference, Loughborough, Angleterre.

2018/11 «Computation and characterization of local sub-filter-scale energy transfers in atmospheric flows », Uppsala, Suède.

2019/03 « Medicanes and climate change », CMCC, Bologna, Italie

2019/03 "Minimal dynamical system model of the northern hemispheric jet", Imperial College, Londres, UK

2019/05 "Dynamical systems tools to study atmospheric flows and improve stochastic models", UniBrest, France

2019/05 "Dynamical systems tools to study atmospheric flows and improve stochastic models", UNSW, Sydney, Australia
2019/05" Can we predict weather and climate extremes using machine learning techniques?", University of Tokyo, Japan

2019/07 "Diagnosing concurrent drivers of weather extremes", Extreme Value Analysis Conferences, Zagreb, Croatie

2019/09 "Diagnosing concurrent drivers of weather extremes", PIK, Potsdam, Allemagne

2020/01 "Machine Learning for Turbulent and Geophysical Flows:Dangers and Opportunities", LMD-IPSL, Paris, France

1.5.3 Publications dans des revues sans comité

-Davide Faranda, "June Heatwave 2019: can we attribute the event to anthropogenic emission?", European Geoscience Union blog ,2019 https://blogs.egu.eu/divisions/np/2019/07/25/june-heatwave-2019-can-we-attribute-the-event-to-anthropogenic-emission/

-Davide Faranda, "Abrupt Warming could bring our planet a "Hothouse Earth" with catastrophic consequences for our economy and society", 2019 https://blogs.egu.eu/divisions/np/2019/09/09/abrupt-warming-could-bring-our-planet-a-hothouse-earth-with-catastrophic-consequences-for-our-economy-and-society/

-Davide Faranda, "After Lorenzo and Ophelia, should we prepare European coasts for tropical storms and hurricanes?" European Geoscience Union blog ,2019 https://blogs.egu.eu/divisions/np/2019/10/15/lorenzo-hurricanes/

-Davide Faranda, "Medicanes, thunderstorms and Acqua Alta in Venice: what is the role of climate change?" European Geoscience Union blog ,2019 https://blogs.egu.eu/divisions/np/2019/11/27/acqua-alta/

-Davide Faranda, "The 2020 extra-tropical monster cyclones and their (possible) relations with climate change", European Geoscience Union blog ,2020 https://blogs.egu.eu/divisions/np/2020/02/18/extra-tropical-monster-cyclones/

-Davide Faranda, "Why Bushfires raged out of control across Australia?", European Geoscience Union blog ,2020 https://blogs.egu.eu/divisions/np/2020/01/22/bushfires-australia/

1.5.4 Communications à des congrès, symposium

<u>Communications à l'EGU (European Geosciences Union)</u>

EGU2011-795 | Orale | NP3.1
Numerical convergence of the block-maxima approach to the Generalized Extreme Value distribution through an application of Freitas' Theorem
Davide *Faranda*, Valerio Lucarini, Sandro Vaienti, and Giorgio Turchetti

EGU2012-5458 | Orale | NP3.1
Breakdown of turbulence in a plane Couette flow. Can extreme fluctuations be used to understand critical transitions?
D. *Faranda*, V. Lucarini, and P. Manneville

EGU2013-3304 | Orale | NP3.2/AS4.17/GM6.6/HS7.7/SM1.7
Towards a General Theory of Extremes for Observables of Chaotic Dynamical Systems
Valerio Lucarini, Tobias Kuna, Davide Faranda, and Jeroen Wouters

EGU2014-15060 | Poster | NP8.1
Towards an understanding of the Maximum Entropy Production principle in climate toy models
Martin *Mihelich*, Berengere Dubrulle, Didier Paillard, Corentin Herbert, and Davide Faranda

EGU2014-12879 | Poster | NP8.1
A recurrence-based technique for detecting genuine extremes in instrumental temperature records
Davide *Faranda* and Sandro Vaienti

EGU2015-6055 | Poster | NP2.2
Normal, rare or extreme? A recurrence-based technique for the detection of genuine extremes
Davide Faranda, Carmen Alvarez-Castro, and Pascal Yiou

EGU2016-6343 | Orale | CL3.03/AS4.27
Is the dynamics of European Temperature extremes well represented in CMIP5 historical simulations?
Carmen Alvarez-Castro, Davide Faranda, Thomas Noël, and Pascal Yiou

EGU2017-7334 | Poster | CL1.01/AS4.9/CR1.12/HS7.9/OS1.13
Assessing the role of atmospheric circulation on heatwaves using CMIP5 historical simulations
M. Carmen Alvarez-Castro, Davide Faranda, and Pascal Yiou

EGU2017-1755 | Poster | NP3.3/CL5.19
Dynamical systems proxies of atmospheric predictability and mid-latitude extremes
Gabriele Messori, Davide Faranda, Rodrigo Caballero, and Pascal Yiou

EGU2017-7313 | PICO | CL5.04
Predicting atmospheric states from local dynamical properties of the underlying attractor
Davide Faranda, David Rodrigues, M. Carmen Alvarez-Castro, Gabriele Messori, and Pascal Yiou

EGU2018-1384 | Orale | NP1.1/CL4.03
Computation and characterization of local sub-filter-scale energy transfers in atmospheric flows
Davide Faranda, Valerio Lembo, Manasa Iyer, Denis Kuzzay, Sergio Chibbaro, Francois Daviaud, and B Dubrulle

EGU2018-9543 | Poster | NP1.1/CL4.03
Extreme values for dynamical systems and linear response
Tobias Kuna, Valerio Lucarini, Viviane Baladi, Jeroen Wouters, and Davide Faranda

EGU2018-9209 | Orale | NP6.1/AS2.5
Dynamic equilibrium properties and regime transitions in the nocturnal boundary layer
Nikki Vercauteren, Davide Faranda, and Danijel Belusic

EGU2019-11608 | Orale | SM3.1/NH4.11
Chaos and Slow Earthquakes Predictability
Adriano *Gualandi*, Jean-Philippe Avouac, Sylvain Michel, and Davide Faranda

EGU2019-8148 | Orale | CL4.23
Event Attribution of Climate Changes with Dynamically driven-Stochastic Weather Generators
Sheng *Chen*, Davide Faranda, and Mathieu Vrac

EGU2019-6826 | Orale | AS2.2
Scale interactions and anisotropy in stable boundary layers
Nikki *Vercauteren*, Vyacheslav Boyko, Davide Faranda, and Ivana Stiperski

EGU2019-1147 | Orale | ITS4.2/CL4.21/HS11.21/OS2.11 | Highlight
Increase of Southern European cold spell intensity under climate change?
Miriam *D'Errico*, Pascal Yiou, Cesare Nardini, and Davide Faranda

Communications à l'AGU (American Geoscience Union)

AGU2014 GC51A-0376 | Poster
A Recurrence-Based Technique for Detecting Genuine Extremes in Instrumental Temperature Records
Davide Faranda, Sandro Vaienti & Pascal Yiou

AGU2015 A54C-04 | Orale
Butterflies, Black swans and Dragon kings: How to use the Dynamical Systems Theory to build a "zoology" of mid-latitude circulation atmospheric extremes?
Davide Faranda, Pascal Yiou and Carmen MC Alvarez Castro

AGU2017- GC52B-02 | Orale
Dynamics and Thermodynamics of weather extremes: a dynamical systems approach
Davide Faranda, Gabriele Messori, James Doss-Gollin, David J Farnham, Upmanu Lall and Pascal Yiou

AGU2017 - GC21E-1138 | Poster
Detection and attribution of Southern European cold spells via a statistical Mechanics Approach
Miriam D'Errico, Davide Faranda, Pascal Yiou and Cesare Nardini

AGU2018 - A53M-2686 | Poster
How a warm ocean will make weather forecasting easier
Davide Faranda, M Carmen Alvarez Casto, G Messori, P Yiou

AGU2019 - A21J-2736 | Poster
The hammam effect or how a warm ocean enhances large scale atmospheric predictability
Davide Faranda, M Carmen Alvarez Casto, D rodrigues G Messori, P Yiou

Autres Communications

2011/07 International Conference on Statistical Physics. Larnaca, Cyprus
Davide Faranda and Valerio Lucarini "Extreme Value Theory for Geophysical Flows", Orale.

2013/02 American Institute of Mathematics workshop: Stochastics in geophysical fluid dynamics
Davide Faranda and Valerio Lucarini "Extreme Value Theory for Geophysical Flows", Orale.

2016/01 Journées de Physique Statistique 2016, Paris
Davide Faranda, Yuzuru Sato, Brice Saint-Michel, Cecile Wiertel-Gasquet, Vincent Padilla, Berengere Dubrulle, & Francois Daviaud. « Stochastic Chaos in a Turbulence Swirling flow », Orale.

2016/05 LIMSI, Orsay, France.
Davide Faranda, « Stochastic chaos and strange attractors in turbulence and climate », Orale.

2016/07 TIES Conference, Edimbourg, Ecosse
Davide Faranda « How to use the Dynamical Systems Theory to build a "zoology" of mid-latitude circulation atmospheric extremes? » Orale

2016/10 LSTA, Paris, France
Davide Faranda « Extreme of the atmospheric mid-latitude circulation » Orale.

2016/12 CFE-CMStatistics 2016, Seville, Espagne
Davide Faranda «Extreme events of the mid-latitude atmospheric circulation: A dynamical perspective » Orale.

2017/03 Nonlinear waves and Chaos Workshop, San Diego, USA
Davide Faranda «Predicting and characterizing atmospheric states from local dynamical properties of the underlying attractor » Orale.

2017/04 SCCS, Berlin, Allemagne
Davide Faranda, Yuzuru Sato, Brice Saint-Michel, Cecile Wiertel-Gasquet, Vincent Padilla, Berengere Dubrulle, & Francois Daviaud. « Stochastic Chaos in a Turbulence Swirling flow », Orale.

2017/06 Braintime meeting, Marseille, France
Davide Faranda « EMG analysis from local dynamical properties of the underlying attractor », Orale.

2017/08 Freie Universitaet, Berlin, Allemagne
Davide Faranda « How to fly Lorenz butterflies (and atmospheric flows) », Orale.

2017/08 European Turbulence Conference, Stockholm, Suède
Davide Faranda et al. « Local energy transfers and dual cascades in atmospheric flows », Orale.

2017/09 Ecole d'été MathDacc, Aussois, France
Davide Faranda « How to fly Lorenz butterflies (and atmospheric flows) », Orale.

2017/10 Dynamique des fluides astrophysiques et géophysiques, Paris, France,
Davide Faranda « Dynamical properties of the North Atlantic atmospheric circulation in the past 150 years », Orale.

2017/11 Journée Systèmes et Matière Complexes, Paris, France
Davide Faranda « How many degrees of freedom has a system of N non-interacting particles? », Orale.

2017/11 International Reanalysis Conference 5, Rome, Italie
Davide Faranda, Pascal Yiou, M Carmen Alvarez-Castro, Gabriele Messori « Evaluating the coherence of reanalyses' North Atlantic atmospheric circulation using dynamical proxies », Orale.

2018/01 Journées de Physique Statistique 2018, Paris
Davide Faranda, Flavio Pons, M Carmen Alvarez-Castro, Gabriele Messori « How many degrees of freedom has a system of N non-interacting particles? », Orale.

2018/05 Workshop PICS project, Sapporo, Japon
Davide Faranda «New dynamical Systems tools to study atmospheric flows », Orale.

2018/06 AOGS, Honolulu, USA
Davide Faranda et al. «Changes in Dynamics and Predictability of the North Atlantic Atmospheric Circulation », conference invitee.

2018/06 EcoClim School, Orsay, France.
Davide Faranda « Chaos in Weather and Climate Sciences », Orale.

2018/07 Seminaire IntheArt, groupe de machine learning, CEA, Saclay, France
Davide Faranda « New Dynamical Systems Tools to study atmospheric flows », Orale.

2018/11 Bottom UP journée de restitution, Saclay, France
Davide Faranda & Miriam D'Errico «DAMA Increase of Southern European cold spells intensity under climate change? », Orale.

2018/12 BrainTime 2 meeting, Marseille, France
Davide Faranda « Decomposition of Dynamical Systems Indicators along Multiple Directions », Orale.

2019/06 International Meeting of Statistical Climatology, Toulouse, France
Davide Faranda et al. « Assessing Dynamical Changes in Atmospheric Circulation Patterns Associated To Weather Extreme Events », Orale.

2019/07 London Mathematical Laboratory Summer School, ICPT, Trieste, Italie
Davide Faranda et al. « Can we predict weather and climate extremes using machine learning? », Orale.

2019/10 IHP, Paris, France
Davide Faranda et al. "Machine Learning for Geophysical Flows", Orale.

1.6 Séjours de travail

2016/05 (2 semaines) Japon
Ce séjour, financé par un contrat japonais JSPS, a été organisé par Y. Sato et N. Moloney en deux villes du Japon : Kyoto et Tokyo. J'ai participé en qualité d'invité aux deux workshops et j'ai pu échanger avec les scientifiques locaux sur les systèmes dynamiques. Ce séjour nous a permis ainsi de commencer le travail sur les modèles à basse dimension de la dynamique du jet atmosphérique publié en [14].

2017/05 (1 semaine) New York (Columbia University & GFDL Princeton)
Pendant ce séjour, j'ai eu la possibilité de rencontrer l'hydrologue Upmanu Lal et ses collaborateurs pour commencer un travail sur les extrêmes hydrologiques. Les résultats préliminaires de ce travail ont été présentés à AGU (voir section 2.7). Au cours de la même visite j'ai aussi été invité au GFDL de Princeton pour un séminaire organisé par S. Pascale. À cette occasion j'ai pu échanger avec plusieurs chercheurs.

2018/07 (3 semaines) Berlin (Freie Universitaet)
Ce séjour à Berlin a été financé par le projet PHC Procope DAAD Campus France dont je suis le co-porteur avec N Vercauteren. Pendant les trois semaines de séjour à Berlin, nous avons continué nos travaux sur la caractérisation des états métastables dans la couche limite et travaillé à une étude de l'isotropie de la turbulence. Les résultats ont été récemment acceptés en [29]. J'ai aussi eu l'occasion de donner un séminaire sur mes travaux de recherche ainsi qu'un cours de deux heures sur les systèmes dynamiques aux étudiants M2 en mathématiques de la Freie Universitaet.

2019/06 (2 semaines) Berlin (Freie Universitaet)
Ce séjour à Berlin a été financé par le projet PHC Procope DAAD Campus France dont je suis le co-porteur avec N. Vercauteren. Pendant les trois semaines de séjour à Berlin, nous avons continué nos travaux sur la caractérisation des états métastables dans la couche limite.

1.7 Organisation de workshops et conferences

2013/10 Organisation de 3rd Young Scientists Conference: Interdisciplinary Approaches to Global Change. Kiel, Allemagne

2016/11 Organisation du Workshop : «Application of Statistical Mechanics and Dynamical Systems to climate », environ 20 participants, 2 jours, Saclay, France

2017/10 Co-organisation du Workshop « Dynamique des fluides astrophysiques et géophysiques », environ 70 participants, Paris, France

2018/04 Convener Session EGU NP2.2/AS1.9/CL2.11 "Dynamical Extremes in Climate Sciences"

2018/10 Organisation du Workshop « Dynamical systems in Climate Sciences », environ 25 participants, 2 jours, Saclay, France

2019/04 Convener Session NP2.1 "Dynamical Extremes in Climate and Geophysical Sciences"

2019/11 Organisation du « Rencontre distribution des événements extrêmes application a la climatologie », 3 jours, Saclay, France

2019/02 Organisation de l'école d'hiver "Winter School: Physics and Mathematics of Turbulent Flows at Different Scales"

2020/03 Organisation du Workshop: "Workshop on Energetics and Drivers of Extreme Convective Events", 3 jours, LMD-IPSL, Paris

2020/04 Convener Session EGU NP2.3 "Extremes in Geophysical Sciences: Dynamics, Thermodynamics and Impacts"

1.8 Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique

1.8.1 Stages dirigés

David Rodrigues [M1 2016/09-2016/10] (co-encadrant : P. Yiou LSCE-CEA Saclay)
D. Rodrigues s'est occupé de la caractérisation et la détection d'extrêmes géophysiques par la théorie des systèmes dynamiques. Nous avons étudié les extrêmes atmosphériques (vagues de chaleur, vagues de froid) liés à la persistance d'une circulation stationnaire sur l'Europe ou à une circulation transitoire mais intense (tempêtes). L'objectif était de définir une métrique objective, fondée sur les systèmes dynamiques pour détecter et étudier ces phénomènes en utilisant le concept de stabilité d'une configuration dynamique, (e.g. un champ de pression). D. Rodrigues a utilisé ces métriques pour étudier les modèles CMIP5 et les réanalyses 20CR sur la période 1850-2000 dans la représentation de la circulation atmosphérique sur le secteur Nord Atlantique. Ses résultats ont permis de produire un article [25] dont il est premier auteur. Le résultat principal de l'article est de rendre le public conscient du fait que l'utilisation de la moyenne d'ensemble de réanalyses pour des études dynamiques de l'atmosphère peut être trompeuse, à cause de la suppression des degrés de liberté entres les membres de l'ensemble une fois moyennés. D. Rodrigues a poursuivi sa carrière comme ingénieur dans le secteur privé.

Guillaume Névo [M2 2016/02-2016/07] (co-encadrante : B. Dubrulle SPEC-CEA Saclay)
La compréhension du comportement de systèmes complexes tels que la turbulence, le climat ou les finances reste une tâche difficile à cause de l'élevé nombre de degrés de liberté de ces systèmes. Pour résoudre ce problème, G. Nevo a développé plusieurs outils à l'aide de la théorie des systèmes dynamiques, de la mécanique statistique ou des ajustements stochastiques pour les données, tels que le procédé ARMA (Auto Regressive Moving Average). Il a obtenu une description améliorée de la dynamique de la turbulence en échantillonnage les données temporelles originales en sous-

échantillons courts qui obéissent aux processus ARMA de base. Pendant son stage, G. Nevo était capable de produire des résultats assez solides qui ont été publiés dans l'article [21] dont il est premier auteur. G. Nevo a poursuivi ses études en s'orientant plus sur l'économie et la finance.

Alix Goudyme [M2 2017/02-2017/07] (co-encadrante : B. Dubrulle SPEC-CEA Saclay)
A. Goudyme a travaillé à l'amélioration des générateurs aléatoires de données climatiques et financières, en utilisant les indicateurs dynamiques. Les générateurs aléatoires sont normalement basés sur les propriétés globales statistiques extraites des séries de données à imiter. Dans le cadre de son stage, A. Goudyme a remplacé ces propriétés globales par des propriétés locales. Ceci implique que pour chaque valeur de la série, le générateur adapte le tirage aléatoire sur la base de la valeur de la série l'instant précédent. L'avantage de cette méthode est de reproduire certaines caractéristiques observées dans les séries géophysiques et financières (par exemple les indexes de bourse comme le Dow Jones) comme par exemple l'intermittence et la persistance autour de certaines valeurs de la série. A. Goudyme a poursuivi ses études avec un master en Machine Learning.

Adnane Hamid [M2, 2018/10-2019/02] (coencadrante V Gautard, IRFU,CEA)
Le stage d'A. Hamid consiste à faire de la projection climatique en utilisant des techniques de Machine Learning. Ce stage était motivé par des publications récentes qui montrent le succès des méthodes de machine dans la prévision de l'évolution de systèmes dynamiques chaotiques. Ainsi, nous avons entrepris d'implémenter ces méthodes en langage Python et de les tester sur les données de pression atmosphériques. La base des méthodes est un réseau de neurones qui peut apprendre les données sur une période passée pour apprendre comment le système évolue. Une fois que les données sont apprises, le réseau de neurones peut prédire comment cette donnée évolue. Un des problèmes rencontrés était le temps d'exécution et le besoin en mémoire pour entraîner le réseau de neurones. Une part importante du travail effectué a été l'optimisation en temps et en mémoire de l'algorithme implémenté. À l'heure actuelle, nous avons obtenu des premiers résultats pour la prédiction de l'évolution de la pression et de la température globale issues d'ERA Interim. Les prévisions Machine Learning des champs de pressions sont fiables jusqu'à 48h (selon les métriques typiquement utilisées dans les centres météorologiques). Ces résultats sont en cours de finalisation et publication. A. Hamid souhaite continuer sa formation avec un autre stage.

Takumi Chihara [M1,M2 2018/08-En Cours] (coencandrant Y. Sato, Hokkaido University, Japan)
T. Chihara travaille à Hokkaido University, en collaboration avec Y. Sato, B. Dubrulle et F. Daviaud, à la modélisation théorique de l'expérience dite de « von Karman », une expérience consistant à produire un écoulement fluide dans un cylindre à l'aide de turbines munies (ou non) de pales. L'ajout de pâles aux turbines a permis d'atteindre des nombres de Reynolds et des taux de turbulence élevés ce qui a permis de vérifier directement plusieurs hypothèses fondamentales en turbulence (intermittence, hypothèses de Taylor, mesures de dissipation). Cette expérience est utilisée au sein du laboratoire, qui possède une expérience importante de ce type d'écoulements, afin d'observer les diverses brisures de symétrie qui sont induites à la transition vers la turbulence et après cette transition. T Chihara est parti du travail que nous avons conduit en [2], pour déduire un modèle de l'écoulement de von Karman encore plus simple, et comprendre si les transitions entre états métastables sont causées par le chaos ou par les mouvements turbulents à petites échelles.

1.8.2 Thèses codirigées

Yoann Robin [2015-2018] (Encadrants : P. Yiou 50% et P. Naveau 40%, DF 10%) LSCE UVSQ
Le but de la thèse de Y. Robin était de quantifier les modifications de l'attracteur climatique quand le climat change. Pour cela, la distance de Wasserstein, venant de la théorie du transport optimal, permet de mesurer finement les différences entre les approximations discrètes des attracteurs, soit des distributions de probabilités. Appliquée à un modèle jouet de Lorenz non autonome, elle a permis de détecter et quantifier l'altération due à un forçage similaire à celui du forçage anthropique. La même

méthodologie a été appliquée à des simulations de scénarios RCP du modèle de l'IPSL. Des résultats cohérents avec les différents scénarios ont été retrouvés. D'autre part, la théorie du transport optimal fournit un contexte théorique pour la correction de biais dans un contexte stationnaire : une méthode de correction de biais est équivalente à une loi jointe de probabilité. Une loi jointe particulière est sélectionnée grâce à la distance de Wasserstein (méthode Optimal Transport Correction, OTC). Cette approche étend les méthodes de corrections en dimension quelconque, corrigeant en particulier les dépendances spatiales et inter-variables. Une extension dans le cas non-stationnaire a également été proposée (méthode dynamical OTC, dOTC). Ces deux méthodes ont été testées dans un contexte idéalisé, basé sur un modèle de Lorenz, et sur des données climatiques (une simulation climatique régionale corrigée avec des réanalyses SAFRAN). Pendant sa thèse, j'ai aidé Y. Robin dans la maîtrise des concepts appliqués de la théorie des systèmes dynamiques. Nous avons utilisé la distance de Wasserstein dans l'article [25], pour l'évaluation des modèles CMIP5. Y. Robin poursuit sa carrière de recherche comme post-doctorant à Météo-France.

1.8.3 Post-doctorats encadrés

Miriam D'Errico 2018/01-2019/06 [Financement Bottom Up CEA]
Avec M. D'Errico nous nous sommes focalisés sur les vagues de froid dans la région sud européenne. D'abord nous avons identifié les caractéristiques communes des vagues de froid observées en utilisant les réanalyses et des sources documentaires. Après nous avons simulé la dynamique des vagues de froid avec Planet Simulator (PlaSim), un modèle climatique complexité intermédiaire, en considérant plusieurs scénarios du changement climatique. Les analyses sont basées sur les analogues de circulation atmosphérique. Pendant une vague de froid, les caractéristiques dynamiques de la circulation atmosphérique sont similaires et elles peuvent être décrites en analysant la pression au niveau de la mer, le géopotentiel, la température et la couverture de neige. Une fois vérifié que le modèle reproduit les vagues de froid nous avons trouvé que, dans la région de l'Europe du sud, elles sont plus fréquentes et plus intenses. M. D'Errico souhaite poursuivre sa carrière scientifique en Italie, dans un service météorologique ou dans un centre de recherche.

Sheng Chen [2018-2019] Projet EUPHEME
S. Chen est au CEA depuis le 1er juin, 2018. Son travail postdoctoral, co-encadré en collaboration avec M. Vrac, fait partie d'un projet européen ERA4CS « EUPHEME », dont l'un des objectifs est de développer des méthodes d'attribution d'événements sur différentes échelles de temps, ainsi que de nouvelles techniques pour évaluer leur fiabilité. Plus précisément, ses activités concernent : i) la mise en place de modèles stochastiques pour les températures et les précipitations ; ii) le calcul d'indicateurs issus de la théorie des systèmes dynamiques ; iii) la combinaison des deux points ci-dessus pour le développement d'une méthode d'« extreme event attribution » (EEA) non-stationnaire iv) l'application de la nouvelle méthode développée à différents jeux de données (e.g., réanalyses, simulations climatiques).

1.9 Participations à l'enseignement

2018/07 Cours de Systèmes Dynamiques et climat aux étudiants M2 de mathématiques, Freie Universitaet, Berlin

2018/11 Cours de Physique du Climat dans le cadre de la Semaine « Athens » organisée par Agroparistech (durée 3h), Paris, France

2018/2019 Supervision d'un projet TPE de trois étudiants du Lycée scientifique de Tours sur le sujet : « Cyclones tropicaux et medicanes en France »

2019/06 Cours en Systèmes Dynamiques et climat aux étudiants M2 de mathématiques, Freie Universitaet, Berlin

2019/12 Intervenant dans une "Formation Intelligence Artificielle", Direction Recherche Fondamentale, CEA, Saclay

2019/2020 Interventions dans une classe de collège de Valenton (94) (4x2h)

1.10 Valorisation

2019 Participation à la « Repubblica dei Terrestri » Naples, Italie
Du 14 au 17 novembre, un événement international a eu lieu sur le Vésuve à Naples, à Terre, pour parler du changement climatique. L'initiative a été organisée par la *Repubblica nomade*, en collaboration avec *Il primo amore*. Le nom *Terrestri*, car nous sommes tous terrestres, hommes, femmes, animaux et plantes. Le programme a vu la participation d'écrivains et d'intellectuels tels que Bruno Latour, Davide Linci, Carla Benedetti, Franco D'Intino, Mario Martone, Flaminia Cruciani, Amitav Ghosh, Giuseppe Cederna, Antonio Moresco. Mon rôle en tant que chercheur en sciences du climat a été d'animer les discussions avec le public (classes de collège et lycée, journalistes, écrivains, artistes) à l'église Santa Maria delle Anime del Purgatorio et dans le Maschio Angioino, Marie de Naples.

2019-2020 Parrainage d'une classe de collège de Valenton (94)
En collaboration avec L'Association Science technologie société (ASTS) j'ai été parrain d'une classe de collège dans le cadre du projet Parcours science 2019-2020. L'objectif de ce parcours est de faire découvrir le métier de chercheur en lien avec le Climat. Il s'agit d'accompagner une classe de 4e ou de 3e durant 4 temps de rencontres pendant l'année scolaire, dont deux temps au collège et un temps consacré à la visite d'un laboratoire ou musée en lien.

2019-2020 Appli jeu-video pour smartphone et tablette « ClimarisK »
Je suis porteur du projet ClimarisK, un dispositif de médiation scientifique qui met en évidence la complexité du système climatique en mettant l'accent sur son aspect interdisciplinaire et sur l'urgence d'une action collective pour limiter le changement climatique. ClimarisK est une appli-jeu où les joueurs sont amenés à prendre des décisions au niveau local ou global pour limiter la fréquence et le s impacts (écologiques et socio-économiques) des événements extrêmes. ClimarisK a été développé dans le cadre de l'Incubateur de Médiation Scientifique du CNRS, un projet porté par la direction de la communication du CNRS en partenariat avec l'AMSCTI et l'ISC-PIF. Les autres partenaires du projet sont Elodie Vignier (CNRS – INEE), Anne Teyssèdre (SU-ITE), écologue et médiatrice scientifique interdisciplinaire, Marielle Vergès (Universcience, médiateur Cité des sciences et de l'industrie et cheffe de projet au Palais de la découverte), Maxime Jacquot, Professeur de Physique à l'Institut FEMTO-ST – Université de Bourgogne Franche-Comté, Catherine Senior et Nada Caud (IPSL). Le développement du jeu bénéfice actuellement du soutien de La Diagonale Paris-Saclay à la hauteur de 16 000EUR. Le jeu est au stade de prototype et il est développé par Opalgames.fr. La sortie du jeu est prévue fin 2020.

1.11 Participations à des contrats de recherche :

DESSERT
Intitulé : UnDErStanding the dynamics of atmoSphERic circulaTion
Durée : 2017-2019
Type de contrat : PICS CNRS
Montant financé : 15 000 EUR
Role : Porteur

Partnaires : Y Sato (University of Hokkaido, Sapporo, Japan – Partenaire), B Dubrulle, F Daviaud (SPEC – CEA Saclay, Partenaires)
Description : L'objectif de DESSERT est de décrire la dynamique du courant à jet aux moyennes latitudes en utilisant la position du jet. Articles [1,3,14] publiés dans le cadre du projet.

EUPHEME
Intitulé : EUPHEME
Durée : 2018-2021 (36 mois)
Type de contrat : ERA4CS
Montant financé : 2 500 000 EUR
Role : Workpackage coleader (WP3) et contact point for LSCE
Partnaires : 44 partenaires européens
Description : « The vision of EUPHEME is to place extreme weather events in the context of climate variability and change, thereby helping European citizens adapt to a changing climate and mitigate its worst effects »

DAMA
Intitulé : Detection and Attribution of European cold spells via a statistical mechanics Approach
Durée : 2018-2019
Type de contrat : PE Bottom UP CEA
Montant financé : 50 000 EUR
Rôle : Porteur
Partenaires : Cesare Nardini (SPEC CEA Saclay), Pascal Yiou (LSCE)
Description : M. D'Errico, qui a bénéficié d'un contrat postdoctoral dans le cadre de DAMA (cofinancé par le projet A2C2 de Pascal Yiou), a étudié la dynamique des vagues de froid sur l'Europe méridionale. L'étude, encore en cours, comprend i) la reconstitution d'une base de données de vagues de froid à partir des sources documentaires, ii) la simulation et l'étude des effets des émissions anthropiques sur les vagues de froid. (Voir aussi Section 3, Miriam d'Errico). Un article est en cours d'écriture.

BRAINTIME
Intitulé : Réseaux temporels : nouveaux paradigmes de la dynamique cérébrale
Durée : 2017-2018
Type de contrat : CNRS Inphyniti
Montant financé : 8 000 EUR
Rôle : Partner
Partenaires : Andrea Brovelli (INT Marseille, Porteur), Demian Battaglia (Partner), S. Vaienti (Partner)
Description : Dans le cadre du projet, notre but a été de développer de nouveaux outils à partir de techniques venant de la physique statistique et non-linéaire, et de l'inférence statistique pour les neurosciences cognitives et computationnelles. Deux articles sont en cours d'écriture.

DADAS
Intitulé : Data-driven approaches to study the dynamical stability of stably stratified turbulent flows
Durée : 2018-2019 (24 mois)
Type de contrat : PHC PROCOPE DAAD CampusFrance
Montant financé : 10 000 EUR
Rôle : Porteur
Partenaires : N. Vercauteren (Co-porteur)
Description : L'objectif de ce projet et de développer une vision unifiée de la dynamique de la couche limite atmosphérique.
Publications : Ref [29]

UBARISQ
Intitulé : Littoral Urbanisé : risques et enjeux face à la montée des eaux en Provence Alpes Cote ’Azur
Durée : 2019 (12 mois)
Type de contrat : DIREP Université de Toulon – Region Provence – Alpes – Cote d’Azur
Montant financé : 18 000 EUR
Rôle : Partenaire
Partenaires : Vincent Rey & Michel Dimou (Porteurs), S. Vaienti & P. Fraunie (Partenaires)
Description : approches stochastiques et multifractales pour étudier la dynamique du littoral.

DAMOCLES
Intitulé : Understanding and modeling compound climate and weather events
Durée : 2018-2022 (60 mois)
Type de contrat : EU COST action
Montant financé : 1 500 000 EUR
Rôle : Partenaire
Partenaires : Dr Jakob ZSCHEISCHLER (Porteur) + 50 partenaires prévenants de toutes l’Europe
Description : DAMOCLES (a) identifiera les processus clés et les combinaisons de variables qui sous-tendent les événements déterminés par plusieurs variables (compound) ; (b) décrire les méthodes statistiques disponibles pour modéliser la dépendance temporelle et spatiale entre plusieurs variables ; (c) identifier les données nécessaires pour documenter, comprendre et simuler les événements composés et (d) proposer un cadre d'analyse pour améliorer l'évaluation des événements à plusieurs composantes. DAMOCLES rassemble des climatologues, des modélisateurs d'impact, des statisticiens et des décideurs pour mieux comprendre, décrire et projeter les événements à plusieurs composantes, en vue des futures évaluations des risques

DINCLIC
Intitulé : Dynamical Indicators for climate change
Durée : 2019-2021 (36 mois)
Type de contrat : INSU – LEFE MANU
Montant financé : 21 000 EUR
Rôle : Porteur
Partenaires : P. Yiou (LSCE CEA), S. Vaienti (Université de Marseille)
Description : Les vagues de froid, de chaleur, les cyclones extra-tropicaux, sont des événements extrêmes climatiques associés à des configurations rares ou persistantes de circulation atmosphériques et/ou causés par des effets thermodynamiques. La composante dynamique est difficile à caractériser car elle repose sur des propriétés chaotiques de la circulation atmosphérique, un défi pour les scientifiques. DINCLIC développe des métriques basées sur la théorie des systèmes dynamiques pour séparer la contribution thermodynamique de celle dynamique à l'origine des évènements extrêmes.

EDECI
Intitulé : Energetics and Drivers of Extreme Convective Events
Durée : 2020 (12 mois)
Type de contrat : Ambassade de France en Allemagne
Montant financé : 5 400 EUR
Rôle : Porteur
Partenaires : N. Vercauteren (FU Berlin)
Description : En raison du changement climatique, il y a eu une augmentation de certains types d'événements météorologiques extrêmes et cela devrait se poursuivre avec le réchauffement climatique futur. Les événements convectifs extrêmes tels que les super-cellules, les mésocyclones ou les cyclones de type tropical peuvent avoir de graves impacts socio-économiques en raison de précipitations et de rafales exceptionnelles. Cela est particulièrement vrai en Europe et dans la région méditerranéenne, qui fait face à une vulnérabilité croissante à de tels événements météorologiques.

L'un des principaux défis pour améliorer les compétences de prévision est de comprendre les mécanismes physiques régissant les événements convectifs extrêmes dans le climat actuel et futur.

BOREAS
Intitulé : Bridging dynamic and thermOdynamical REsponse of coldspells of Anthropogenic forcing using Statistical mechanics
Durée : 2020-2022 (24 mois)
Type de contrat : ANR T-ERC
Montant financé : 120 000 EUR
Rôle : Porteur
Description : BOREAS détermine le rôle des changements climatiques dans la modification de l'intensité et la fréquence de tempêtes de neige qui frappent des régions européennes densément habitées. Malgré la hausse de la température globale, ces phénomènes extrêmes, assez coûteux en terme des dégâts sociaux et économiques, sont observés dans le climat présent. Les tempêtes de neige sont associées à des cyclones extratropicaux qui s'originent prés du Pole Nord. Au niveau local, les chutes de neige sont renforcées par la convection et la topographie du terrain. Ces rétroactions à différentes échelles peuvent modifier l'intensité et la fréquence des tempêtes de neige dans un climat futur. BOREAS clarifiera ce point en évaluant l'abondance des conditions météorologiques susceptibles d'entraîner des tempêtes de neige grâce à un ensemble d'indicateurs statistiques et dynamiques.

1.12 Encadrement, animation et management de la recherche

1.12.1 Responsabilités dans l'animation de programmes français ou internationaux

Projet de GDR CNRS: Dynamique des Fluides Géophysiques et Astrophysiques
Avec P. Fraunie (Université de Toulon), nous avons obtenu de la Mission Interdisciplinaire du CNRS l'organisation d'un workshop au siège du CNRS Michel Ange sur la thématique : Les enjeux, verrous et avancées Interdisciplinaires en Dynamique des Fluides Géophysiques et Astrophysiques (16 au 19 octobre 2017). Cette rencontre a eu pour objectif de faire un point sur ce sujet et préparer les actions à venir (GDR ou/et autres).

European Geosciences Union
Dans la division Nonlinear processes in Geophysics je recouvre le rôle de *scientific officer*, notamment dans la compétition Outstanding Student Poster Award.

Le groupe de travail climat et mécanique statistique
Je suis responsable du "Groupe interdisciplinaire de Travail Climat - Mécanique statistique" créé par l'équipe ESTIMR (Extrêmes : Statistiques, Impacts et Régionalisations) du Laboratoire LSCE et l'équipe SphYNX du SPEC avec l'objectif de promouvoir les échanges entre les chercheurs qui travaillent à l'interface de ces deux sujets.

1.12.2 Responsabilités et activités de direction d'équipe ou de laboratoire

2017-2018 : Membre élu du conseil de Laboratoire LSCE

2016-En cours : Organisateur du Groupe de Travail inter laboratoire LSCE-SPEC Climat Mécanique Statistique

2019-En cours : Commission de Thèses du LSCE : rôle de parrain

2. SYNTHESE DE MES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

2.1 Cadre général de mes recherches

Ma recherche porte sur plusieurs domaines, allant de la physique du climat, la physique statistique, la turbulence et les neurosciences. Le fil conducteur de toutes ces recherches est le développement des outils théoriques des systèmes dynamiques qui permettent d'étudier les phénomènes pour lesquels on dispose soit de séries temporelles, soit d'un modèle d'équations différentielles. Tous ces outils sont dérivés dans le cadre de l'étude de la récurrence, c'est-à-dire l'observation empirique que les états d'un système (situations météorologiques, conditions physiques ou neuronales) se répètent de façon similaire au cours du temps.

L'étude de la récurrence, qui est primordiale dans les systèmes dynamiques, a trouvé depuis une vingtaine d'années un nouvel essor grâce notamment à l'étude de la statistique des temps d'entrée et de retour dans des ensembles « petits » de l'espace de phase (l'ensemble des valeurs que les variables peuvent prendre), et à l'application de la théorie des valeurs extrêmes (Extreme Value Theory, EVT en anglais) aux observations engendrées par l'évolution de systèmes déterministes, éventuellement perturbés de manière aléatoire. Ces applications reposent sur le fait que les retours dans des ensembles petits de l'espace de phase sont rares et ainsi obéissent aux lois de la EVT. Certains de mes travaux de recherche se sont orientés vers une caractérisation théorique de ces temps de retour. Il est intéressant de souligner que ces techniques basées sur l'étude de la récurrence permettent à la fois de donner de nouveaux indicateurs statistiques pour décrire les états asymptotiques des systèmes complexes et chaotiques, mais aussi et surtout, de formaliser et quantifier les écarts à ces états limites. A partir de ce constat, j'entretiens des collaborations très étroites et continues avec des mathématiciens et des physiciens théoriciens. Un premier gros travail de synthèse sur la fondation mathématique de la EVT aux systèmes dynamiques et sur les applications physiques a été conduit dans l'ouvrage [25] dont je suis coauteur.

Les récurrences dans l'espace de phase ont une grande importance dans les systèmes complexes (par exemple en neurosciences et en sciences du climat), car elles révèlent les propriétés dynamiques des états observés. La EVT a ouvert la possibilité de mesurer ces propriétés de façon immédiate et intuitive [1-4,8-10,16,18,20,23,25,28,44,45,56,57,67]. En science de l'atmosphère, nous avons caractérisé les récurrences de la circulation atmosphérique et déterminé leur relation avec l'espace de phase sous-jacent [9,22,26,38,41,47,58]. La formalisation mathématique est compliquée par la nature fortement corrélée et souvent non-stationnaire de ces signaux, en particulier de ceux d'origine climatique. Cela implique la nécessité d'obtenir des théorèmes limites pour des variables aléatoires dépendantes et qui varient dans un environnement qui se modifie aussi de manière stochastique [7,11,12]. Il s'agit d'une synthèse entre des problèmes physiques et une investigation mathématique orientée aux applications. Dans le cadre de ce rapport de recherche, j'envisage de montrer mes contributions à l'étude de la récurrence, sur plusieurs axes, c'est-à-dire les systèmes dynamiques [1-4,7,16,20,23,25,28,44,45,56,57,67], les extrêmes climatiques [22,26,30,38,40-42,50,54-59,63,64,67], la physique statistique [1,6,12,14,19,28,37], la turbulence [13-15,17,19-22,29,32,34-37,39,43], la séismologie [69], les neurosciences/médecine [24].

2.2 Volet Systèmes Dynamiques

Depuis le début du XXe siècle, la nécessité de prévoir l'occurrence et le retour des extrêmes géophysiques comme les tempêtes, les inondations ou les sécheresses a motivé les mathématiciens à créer des outils statistiques pour étudier ces phénomènes. L'ensemble de ces outils constitue la théorie des valeurs extrêmes. Même si le noyau de la théorie a été développé dans les années 1940, son extension aux systèmes dynamiques, en particulier aux événements récurrents, date du début des années 2000. Depuis, la théorie des extrêmes s'est révélée être un outil statistique très efficace pour décrire, comprendre et prévoir certaines propriétés de récurrence des variables géophysiques ainsi que pour estimer les caractéristiques géométriques des ensembles limites (attracteurs). Un aperçu de l'application naissante de l'EVT aux systèmes dynamiques est exposé dans le livre [25] dont je suis coauteur. L'application de l'EVT était limitée aux séries temporelles. Ce cadre était utile pour étudier des phénomènes physiques localisés comme par exemple les extrêmes de température atmosphérique mesurés à un point spécifique de l'espace. Cependant, il n'existait pas de théorie pour étudier la dynamique chaotique des systèmes spatialement étendus, ce qui est pertinent pour modéliser plusieurs extrêmes géophysiques comme les tempêtes extratropicales étendues sur une surface des plusieurs milliers de Km. Pour étudier ces phénomènes, en collaboration avec les mathématiciens du CPT de Marseille, nous avons étendu l'EVT aux réseaux d'applications couplées (Coupled Map Lattices, CML en anglais) qui sont les modèles les plus simples et prenant en compte l'extension spatiale [12]. Dans ce cadre, une ou plusieurs variables sur un réseau spatial évoluent suivant une dynamique commune. D'un point de vue mathématique, cela relève d'un domaine très actuel et prisé de la théorie ergodique, celui des propriétés statistiques des systèmes dynamiques. L'objectif est d'établir des théorèmes limites soit pour les processus stochastiques associés à l'évolution de systèmes déterministes et aléatoires, soit pour les systèmes dynamiques à temps continu. Dans le cas des CML il y a un aspect supplémentaire et qui est particulièrement important pour la physique. Lorsque les réseaux d'applications couplées sont dénombrables, l'évolution temporelle se conjugue avec l'évolution spatiale pour donner lieu à ce qu'on appelle le chaos spatio-temporel et qui se prête à modéliser le comportement de systèmes de particules dans les limites hydrodynamiques et/ou thermodynamiques.

J'ai participé à deux travaux pour caractériser les récurrences dans le CML, un plus théorique et un appliqué aux données du courant à jet (jet Stream) aux moyennes latitudes. Dans l'article [45] nous utilisons dans le cadre de l'EVT, un premier travail de G. Keller et C. Liverani (*Communications in Mathematical Physic, 2006)*. En utilisant une théorie perturbative de l'opérateur de transfert (Perron-Fröbenius), Keller et Liverani ont calculé, pour deux applications couplées, une quantité qui permet de quantifier la probabilité que les deux coordonnées, après itération, soient synchronisées pour la première fois et avec une marge fixée à l'avance. Nous avons utilisé ce résultat pour calculer la distribution de temps de première visite dans une bande de l'espace de phase et la quantité calculée par Keller et Liverani. Cette quantité coïncide avec ce qu'on appelle, dans la théorie des extrêmes, l'indice extrémal. Ce résultat établit une connexion entre la distribution de temps de retour dans l'espace de phase et la synchronisation du réseau, ce qui a un indéniable intérêt physique. Dans l'exemple d'un réseau de stations météorologiques, synchroniser signifie enregistrer en même temps et sur plusieurs sites la même valeur d'une variable atmosphérique. Il existe plusieurs systèmes spatialement étendus où l'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes

dans les réseaux d'applications couplées pourrait améliorer la compréhension des phénomènes extrêmes.
Grâce à une collaboration avec Y. Sato (Université de Hokkaido, Sapporo, Japon) financée dans le cadre du projet PICS CNRS 'Dessert' dont je suis porteur, nous avons appliqué ces résultats pour décrire la dynamique du courant à jet aux moyennes latitudes en utilisant la position du jet extraite à partir des données ERA Interim 1979-2016 [22]. Ensuite, nous avons construit la carte de temps de retour et dérivé un modèle CLM où la position du jet est décrite en termes d'une composante à grande échelle déterministe et d'une composante aléatoire. Ceci est décomposé en trois parties : i) un bruit aléatoire spatialement décorrélé qui simule les effets de la turbulence à petites échelles, ii) un bruit spatialement corrélé qui représente l'action des ondes baroclines (cyclones extratropicaux) sur le jet et iii) un bruit homogène sur une grande région spatiale correspond à l'alternance géographique entre les continents et les océans. Ce modèle est capable de reproduire les caractéristiques les plus importantes de la dynamique du jet, notamment la présence de rupture et la formation des blocages atmosphériques.

Une grande partie de mes travaux sur les systèmes dynamiques a porté sur la définition d'un cadre théorique pour analyser les systèmes où les petites échelles peuvent être considérées comme une composante aléatoire [3,8,10,23]. En effet, l'étude des récurrences est classiquement définie pour les systèmes chaotiques déterministes. Nous avons étendu cette définition dans le cadre stochastique pour pouvoir justifier l'application des méthodes de récurrence aux données géophysiques et ceux enregistrés pour étudier les cerveaux en neurosciences. Enfin, grâce à la EVT, nous avons introduit d'autres indicateurs globaux du comportement dynamique des systèmes physiques, par exemple la dimension de corrélation (une mesure des degrés de liberté du système), les exposants de Lyapunov (une mesure du comportement chaotique du systèmes) et l'entropie des trajectoires [32,39].

2.3 Volet Climat et Extrêmes Climatiques

Grâce aux développements théoriques décrits en 2.2, mes recherches ont contribué à déterminer les conditions nécessaires pour l'application de la théorie des valeurs extrêmes quand la dynamique est perturbée avec du bruit stochastique, qui représente l'incertitude sur les mesures ainsi que la turbulence à petite échelle. Nous avons transformé ces théorèmes mathématiques en outils numériques qui nous ont permis de caractériser les récurrences des champs de pression atmosphérique dans la période 1948-2015. Dans l'article [30] nous avons utilisé les champs de pressions atmosphériques sur le secteur Nord Atlantique issues de la base de données NCEP pour étudier les propriétés de récurrence de différentes circulations. Cette étude démontre que les extrêmes géophysiques sont reliés aux extrêmes des systèmes dynamiques. Les métriques des systèmes dynamiques (dimension d et persistance Θ d'un champ atmosphérique) nous permettent de déterminer la rareté et la prédictibilité des champs de circulation atmosphérique avant de faire un modèle de prévision météorologique. Le concept de dimension instantanée est intuitif : pour une configuration atmosphérique ζ, la dimension instantanée $d(\zeta)$ mesure la densité de configurations similaires. Cela implique que d peut être lié à la fois à l'entropie et à la prévisibilité des trajectoires. La stabilité de l'état ζ est mesurée par $\theta(\zeta)$ défini comme l'inverse du temps de persistance moyen des trajectoires autour de ζ. Si ζ est un point fixe de la dynamique, $\theta(\zeta) = 0$. Pour une trajectoire quittant immédiatement le voisinage de ζ, $\theta = 1$. En général, plus la configuration est persistante, plus les états du système ressembleront à ζ.

De plus, ils nous informent de façon immédiate et sans analyses supplémentaires sur le régime de temps (zonale, anti-zonale, bloqué ou de type Atlantic Ridge) associé à un champ de circulation (voir Figure 2.1).

Les outils issus des systèmes dynamiques nous ont ainsi permis d'évaluer l'accord entre les modèles CMIP5 et les réanalyses 20CR sur la période 1850-2000 dans la représentation de la circulation atmosphérique sur le secteur Nord Atlantique [30,38,42]. L'article [42] met en garde contre l'utilisation de la moyenne d'ensemble pour des études dynamiques. En effet, la moyenne d'ensemble 20CR souffre d'un aplatissement de la variabilité dynamique causé par le manque d'observations de pression dans la première période de l'étude. L'article [42] était aussi l'occasion de s'interroger sur les changements de la circulation atmosphérique que nous pouvons détecter grâce aux outils des systèmes dynamiques. En utilisant plusieurs bases des données de réanalyses (20CR, ERA20C, CERA), l'ensemble des modèles CMIP5 avec les scénarios d'émissions RCP 4.5 et 8.5, nous avons déterminé une tendance significative à la zonalisation de la circulation atmosphérique. Cette tendance est attribuée au réchauffement océanique. Cette étude est dans une phase de révision avancée par le journal *Nature Communications*, et la version actuelle de l'article est mise à disposition ici.
Au-delà de ces travaux, mes recherches en sciences du climat portent sur la caractérisation des phénomènes extrêmes. Dans la suite, j'en donnerai quelques détails.

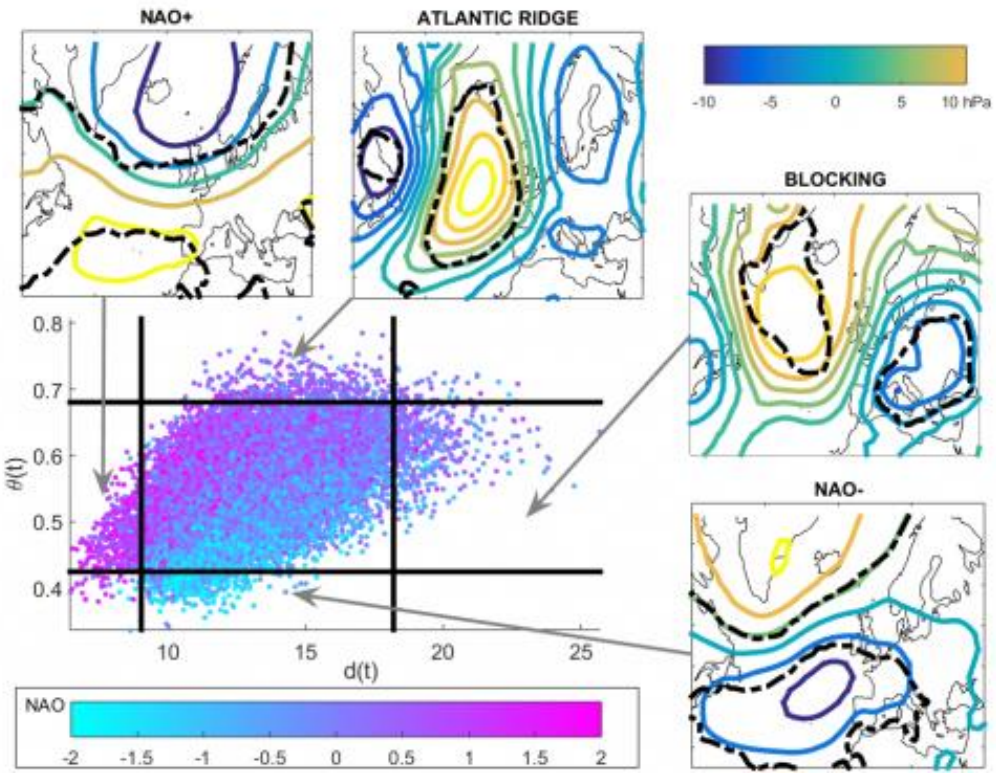

Figure 2.1 : Le diagramme de dispersion affiche les valeurs quotidiennes de la dimension instantanée *d* - plus haut est *d*, moins la circulation atmosphérique est imprévisible - et la persistance Θ - plus bas Θ plus la stabilité atmosphérique est grande - du champ de pression au niveau de la mer hPa) extraite de la base de données NCEP. L'échelle de couleurs représente l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAO). Voir [30] pour des explications.

Les vagues de chaleur

J'ai étudié la dynamique des vagues de chaleur [41] en m'appuyant sur des méthodes statistiques et dynamiques. Le but de ces études est de relier l'occurrence de ces évènements à la circulation atmosphérique et notamment à des conditions de blocage. J'ai proposé une description innovante des vagues de chaleur sur la France et l'Espagne qui suggère que les événements les plus intenses ont changé leur signature dynamique pendant le XXe siècle. J'ai montré aussi que l'augmentation de température pendant les vagues de chaleur est reliée à des conditions de blocage de la circulation atmosphérique avec une haute pression centrée sur les pays scandinaves. Les vagues de chaleur associées à d'autres conditions de circulation ne montrent pas de tendance de température au long du XXe siècle.

Les extrêmes de température

In [26], j'ai introduit une métrique pour évaluer les températures des modèles climatiques et déterminer leurs biais par rapport aux bases de données d'observations. La métrique est basée sur l'étude de la rareté de récurrence dans les températures chaudes et froides. J'ai calculé cet indicateur de rareté pour 100 ans de températures moyennes journalières sur l'Europe pour le modèle IPSL-CM5 et je l'ai comparé à deux réanalyses : ERA20C et 20CR. J'ai montré que, par rapport aux approches purement statistiques, la technique de récurrence est sensible aux changements dans la taille de la fenêtre de récurrence à cause des conditions imposées implicitement par la dynamique subjacente. Les biais les plus importants sont concentrés dans des régions spécifiques (Andalusia et Scandinavie) ou les paramétrisations radiatives des modèles sont importantes. Par exemple, en Scandinavie, une mauvaise représentation des propriétés d'albédo du terrain comporte de grandes déviations des données observées en hiver, quand une couverture neigeuse est présente.

Les tempêtes extratropicales

J'ai étudié les caractéristiques dynamiques des tempêtes tropicales dans les publications [30,33,60]. Cette étude consiste à déterminer les propriétés dynamiques de ces évènements extrêmes par rapport à l'état moyen de la circulation atmosphérique. Nous avons utilisé les champs de pression atmosphérique en [30] et les géopotentiel en [33]. En [30] j'ai montré que les tempêtes correspondent à des régions limitées de l'espace de phase avec des propriétés dynamiques bien précises. Dans le langage des systèmes dynamiques, les cyclones extratropicaux les plus intenses correspondent aux points fixes instables de la dynamique atmosphérique. Ces endroits de l'espace de phase sont caractérisés par une grande prévisibilité à grande échelle due à la présence d'un courant à jet très fort. Dans [33] j'ai mis en relation les extrêmes dynamiques mesurés sur les champs de géopotentiels avec les tempêtes de vent extrêmes et trouvé une corrélation significative. Ces études montrent que les concepts parfois abstraits et mathématiques introduits pour caractériser les points de l'espace de phase qui ont un comportement étrange sont tout à fait pertinents pour décrire des extrêmes géophysiques.

Les vagues de froid

L'étude des vagues de froid, dans le cadre d'un projet inter laboratoire LSCE-SPEC au CEA (post-doctorat de Miriam d'Errico [64]), est un autre exemple d'application de la théorie de récurrence aux évènements extrêmes. Le point de départ de cette étude est l'observation que, si nous considérons comme indicateur de l'intensité d'une vague de froid le cumul de neige, nous observons, au moins pour l'Italie, une tendance croissante, ce qui est en contraste apparent avec les trends globaux de réchauffement climatique. Pour étudier ce problème,

nous avons besoin de déterminer le rôle des émissions anthropiques sur les vagues de froid. Étant donné le nombre limité des événements, nous avons eu besoin de longues simulations de contrôle, ce qui demande l'utilisation des modèles à basse résolution. Pour cette tâche, nous avons utilisé PLASIM, un modèle open source développé par l'université de Hambourg. Dans une première phase, nous avons déterminé l'évolution à grande échelle des vagues de froid, et que toutes les vagues de froid ont une évolution similaire avec des structures de pression, températures, couverture neigeuse et géopotentiel communes. Ceci nous a permis de vérifier que PLASIM peut bien reproduire les vagues de froid. Notre résultat le plus important relève que les vagues de froid augmentent d'intensité et de fréquence dans un scénario ou la mer est plus chaude de 4°C et que seulement la fréquence augmente dans le scénario RCP 8.5 (Figure 2.2).

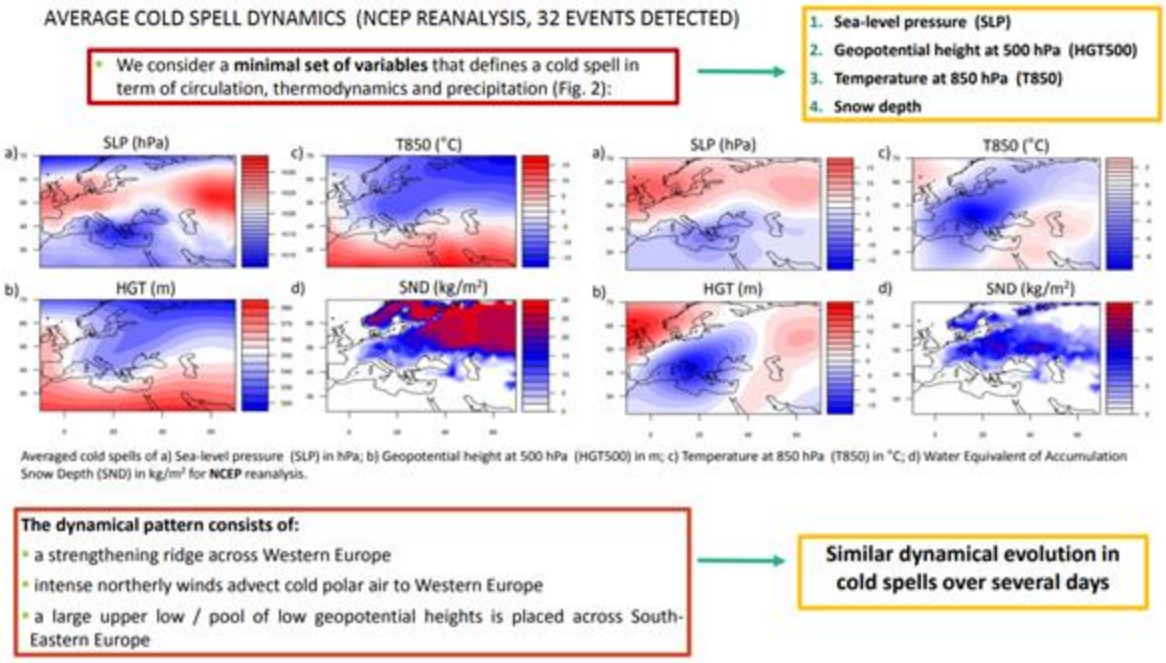

Figure 2.2 : Un extrait du poster AGU 2018 – 20182 qui décrit la dynamique moyenne dérivée par les réanalyses NCEP des vagues de froid détecté à partir des sources documentaires.

2.4 Volet Turbulence

Comprendre la turbulence est un enjeu majeur pour la sécurité des transports aériens et maritimes, mais aussi en météorologie. Le mouvement d'un fluide peut être décrit par les équations de Navier-Stokes, dont les solutions peuvent être extrêmement complexes quand elles décrivent des phénomènes dynamiques sur plusieurs ordres de grandeur d'échelle spatiale, de quelques centièmes de millimètre à plusieurs centaines de mètres.
En 1963, le météorologue américain Edward Lorenz modélise la convection atmosphérique, sans turbulence, par trois équations déterministes. Celles-ci lui permettent de mettre en évidence pour la première fois l'effet papillon, signe d'un comportement chaotique illustré par cette interrogation : *« le battement d'aile d'un papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas ? »* Cependant, pour les écoulements réels très fortement turbulents, les scientifiques n'ont pas réussi à trouver un modèle aussi simple que celui de Lorenz. Pour relever ce défi, avec l'équipe de turbulence du SPEC, nous avons analysé en détail une expérience de laboratoire, dite de von Karman, dans laquelle un écoulement très turbulent est produit par rotation de deux turbines dans un cylindre rempli d'eau. En [36] nous avons montré que la

dynamique des tourbillons peut être décrite par un système de trois équations similaires à celles proposées par Lorenz, mais cette fois stochastiques (Figure 2.3). Où se cachait donc la difficulté ? Jusqu'à présent, chaque vortex était décrit séparément. Or les petits vortex peuvent aussi être pris en compte comme une composante aléatoire capable d'influencer à chaque instant les grands vortex. Cette composante aléatoire introduit une nouvelle incertitude par rapport au chaos découvert dans le modèle initial de Lorenz, et renforce d'un degré supplémentaire l'effet papillon. Cette méthode a été ensuite appliquée à l'étude de la turbulence atmosphérique dans la couche limite, grâce à une collaboration avec Nikki Vercauteren (Freie Universitaet, Berlin) dans le cadre d'un projet de coopération financé par CampusFrance et la DAAD en Allemagne, et avec le SPEC-CEA Saclay, grâce au travail de stage de G Nevo [37] et dans [53,66]. Les données analysées ont été récoltées pendant une campagne de mesure sur le glacier Plaine Morte dans les Alpes suisses. La motivation de cette étude était de détecter la multi-stabilité des régimes turbulents en utilisant une mesure de distance de l'état de base de la turbulence homogène et isotrope. Les résultats ont montré la capacité de la méthode de reconnaître la subtile différence entre les régimes stables de la couche limite. Nous avons réalisé aussi d'autres travaux avec l'équipe de Turbulence du SPEC [13-15,17,19-22,29,32,34-37,39,43].

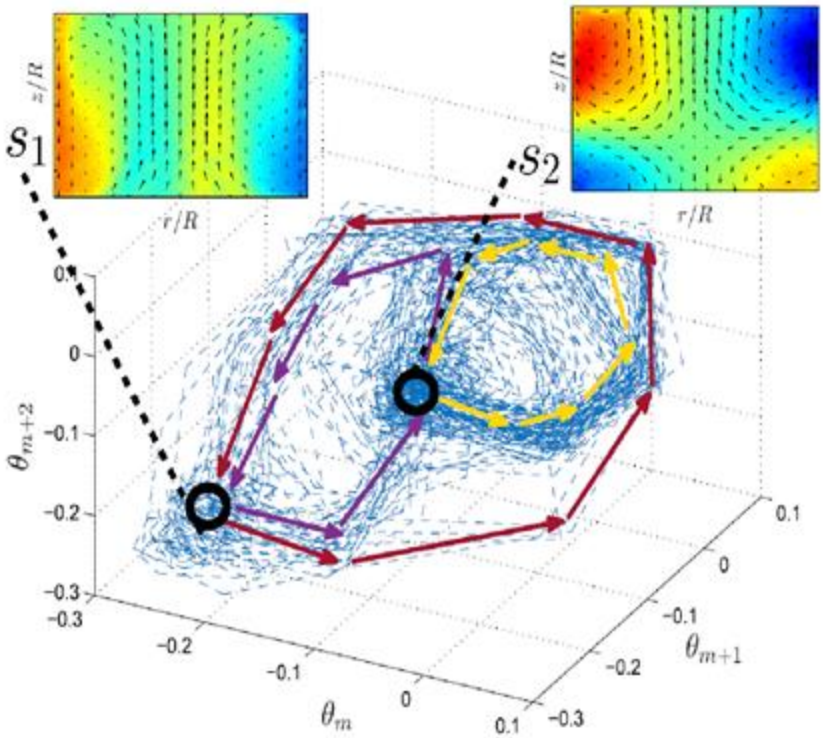

Figure 2.3: L'attracteur turbulent dans l'écoulement de von Kármán reconstruit avec l'embedding dans un espace tridimensionnel les valeurs d'un paramètre de controle θ. On peut identifier deux états quasi-statiques (étiquetés s1 et s2) correspondant aux champs de vitesse moyenne (Les encarts montrent, respectivement, la vitesse moyenne dans le plan (couleurs) et orthogonale (flèches) et dans l'attracteur les trois cycles (mis en évidence par des flèches colorées) montrent les seuls chemins possibles pour passer d'un état à l'autre.

2.5 Volet Physique Statistique

Avec l'équipe de turbulence du SPEC-CEA Saclay nous avons développé une méthode de mesure des champs de vitesses d'un fluide turbulent sur une large gamme d'échelles spatiales [29]. Cette méthode nous a permis d'observer pour la première fois des singularités dans la

dissipation d'énergie à petite échelle, qui semblent conforter certains travaux sur la résolution mathématique des équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes).
L'énergie mécanique apportée à un fluide visqueux se transforme en énergie cinétique, bien visible dans des tourbillons qui se ramifient ensuite en tourbillons plus petits (cascade turbulente). À plus petite échelle, ce mécanisme (dit de dissipation inertielle) finit par être dominé par le frottement, dû à la viscosité du fluide, et l'énergie mécanique est alors principalement dissipée sous forme de chaleur.
En dispersant dans un fluide de fines particules éclairées par un laser et en suivant leurs mouvements grâce à deux caméras de haute résolution, nous avons eu la surprise d'observer la présence, à petite échelle, de différents événements localisés et peu fréquents (distributions de vitesses en front abrupt, spirale, jet ou point de rebroussement), au cours desquels l'énergie est efficacement dissipée par un processus indépendant de la viscosité. Ces observations imposent une forte contrainte sur l'étendue des échelles auxquelles les équations de la mécanique des fluides doivent être résolues, ce qui pourrait bouleverser certaines méthodes numériques. J'ai aussi participé à d'autres travaux sur le sujet de la physique statistique, voir [1,6,12,14,19,28,37].

2.6 Volet Neurosciences et Médecine

Avec les équipes de D. Battaglia et A. Brovelli (Université la Timone et Université de Marseille) et Neurospin (Saclay) nous avons étudié la configuration temporelle des réseaux fonctionnels du cerveau, un sujet très actuel en neurosciences cognitives et computationnelles. Son investigation nécessite des nouveaux paradigmes allant au-delà des réseaux statiques. Dans le cadre d'un projet Inphyniti CNRS (2017-2018), notre but a été de développer de nouveaux outils à partir de techniques venant de la physique statistique et non-linéaire, et de l'inférence statistique. En particulier nous avons utilisé : i) des méthodes de réseaux temporels appliqués aux réseaux sociaux pour identifier les échelles temporelles de reconfiguration ; ii) des méthodes de la théorie des événements extrêmes pour trouver des analogues neuronaux de conditions atmosphériques extrêmes ; iii) des méthodes de problèmes inverses pour modéliser la configuration temporelle des réseaux cérébraux. Nous avons analysé la dynamique cérébrale à différentes échelles allant de l'apprentissage cognitif chez l'homme (données MEG et EEG intracrânien), pendant l'état de repos à différents âges pendant le vieillissement (IRMf), l'activité de populations neuronales chez des modèles animaux d'épilepsie, ainsi que des données simulées par « The Virtual Brain ». Un article est en cours d'écriture, mais nous avons déjà présenté les résultats dans le cadre du projet Inphinity sous forme de poster, disponible ici.
Dans le chapitre [24] j'ai aussi analysé les données de tension artérielle issues de la base de données MIMIC II, qui inclut des enregistrements longs pour des patients hospitalisés suite à un infarctus. L'analyse des récurrences a montré que la technique peut être utilisée pour définir une échelle de risque entre les patients.

2.7 Mon intégration au sein du LSCE et de l'équipe ESTIMR

Dans le laboratoire LSCE, je fais partie de l'équipe ESTIMR. L'équipe ESTIMR a pour objectifs principaux la compréhension et la modélisation de la variabilité climatique et environnementale à différentes échelles spatiales – depuis les très grandes structures liées à la dynamique atmosphérique jusqu'à des phénomènes très locaux – et à différentes échelles

temporelles – pour l'étude de climats passés, des processus présents et des évolutions futures. Dans ce cadre très vaste, l'une des forces de l'équipe ESTIMR repose sur une interaction multidisciplinaire soutenue entre climatologie, modélisation, physique et statistiques. Mon insertion dans l'équipe était donc naturelle comme complément des expertises en statistiques (M. Vrac, P. Naveau), en physique du Climat (P. Yiou, R. Vautard) et impacts climatiques (N. De Noblet).

Avec P. Yiou nous avons travaillé ensemble à la définition de plusieurs métriques pour l'étude des propriétés dynamiques de la circulation atmosphérique [22,26,30,38,40,41,42,50,54-59,63,64,67]. Notre complémentarité nous a permis d'adapter les outils des systèmes dynamiques à l'analyse de données géophysiques issues des réanalyses et des modèles climatiques. Nous avons co-encadré plusieurs stages M1 et M2 ensemble et nous co-encadrons la post-doctorante M. D'Errico grâce à un financement CEA (Bottom Up) sur les changements climatiques dans la dynamique de vagues de froids sur l'Italie et la France.

Avec M. Vrac, nous travaillons ensemble à la définition d'outils pour l'attribution des événements extrêmes dans le cadre du projet EUPHEME [48,59,63]. Dans ce projet, nous sommes responsables du post doctorat de Sheng Chen. S. Chen combine des modèles aléatoires pour la génération des séries climatiques (*stochastic weather generators*) avec les indicateurs des systèmes dynamiques pour prendre en compte les effets de la circulation atmosphérique. Ceci est un champ prometteur des sciences des attributions connues sous le nom de « conditional attribution ».

Je suis impliqué dans plusieurs projets au sein de l'équipe : le projet ERC A2CC2 coordonné par Pascal Yiou, le projet EUPHEME (un projet ERA4CS) dont je suis le responsable pour le LSCE. Nous avons aussi soumis à l'ANR deux projets collaboratifs pour 2019 : BICOLORE, un projet sur la correction de biais des simulations climatiques et SAMPRACE, un projet porté par Pascal Yiou sur la génération des évènements extrêmes avec des méthodes de type « importance sampling ».

Dans le laboratoire j'entretiens aussi des collaborations avec les autres équipes lorsque mes expertises sont demandées. Par exemple, j'ai eu le plaisir de travailler avec C. Waelbroek en [48] aux analyses par des méthodes d'ondelettes des *proxies* de la circulation océanique.

Le groupe de travail climat et mécanique statistique

Je suis aussi responsable du "Groupe interdisciplinaire de Travail Climat - Mécanique statistique" créé par l'équipe ESTIMR (Extrêmes : Statistiques, Impacts et Régionalisations) du Laboratoire LSCE et l'équipe SphYNX du SPEC avec l'objectif de promouvoir les échanges entre les chercheurs qui travaillent à l'interface de ces deux sujets. J'ai organisé environ cinq séminaires par an à partir d'Octobre 2015. Avec le soutien du projet européen A2C2 de Pascal Yiou, nous avons aussi organisé deux workshops du Groupe de Travail avec des invités internationaux. Ces workshops (2016 et 2018) nous ont permis de commencer de nombreuses collaborations internationales.
Plus d'informations sur le site web: http://www.lsce.ipsl.fr/Phocea/Page/index.php?id=183

2.8 Collaborations avec des partenaires académiques français.e.s

B. Dubrulle & F. Daviaud [SPEC-CEA-Saclay]
Mon activité scientifique bénéficie de l'interaction constante et constructive avec l'équipe de turbulence du Service de Physique de l'Etat Condensé (SPEC). Plusieurs méthodes appliquées aux données climatiques, ont d'abord été testées sur l'expérience de von Karman, qui permet d'obtenir un écoulement de laboratoire très turbulent et avec des structures de champs de vitesse proches de celles observées dans l'atmosphère. Nous avons exploré ce lien dans l'article [1], qui nous encourage à trouver des modèles dynamiques simples pour l'atmosphère. De façon similaire, dans l'expérience de von Karman nous avons reproduit un cycle énergétique qui ressemble à celui que Lorenz a trouvé pour l'atmosphère. J'ai ainsi contribué à l'analyse des évènements de dissipation qui peuvent donner lieu aux singularités dans les champs de vitesse des écoulements turbulents [13-15,17,19-22,29,32,34-37,39,43].

V. Gautard | IRFU, CEA Saclay
J'ai commencé récemment une collaboration avec V. Gautard, qui est experte des techniques de Machine Learning et gère le groupe de travail IntheArt. InTheArt est un projet appelé DRF-impulsion, qui vise à rapprocher différents instituts au sein de la DRF et du CEA autour du Machine Learning et plus généralement autour de l'intelligence artificielle. Ce projet est organisé en plusieurs grands thèmes tels que des présentations pédagogiques, des formations, l'organisation de séminaires. Dans le cadre *IntheArt* nous avons co-encadré ensemble le stage d'Adnane Hamid (voir section 3.1) et soumis l'article [62].

S. Vaienti [CPT-Marseille]
La collaboration avec S. Vaienti [1-44,8-10,16,18,20,23,25,28,44,45,56,57,67], mathématicien du CPT-Université de Marseille, se poursuit depuis plusieurs années sur la définition d'outils théoriques et numériques pour l'étude des systèmes dynamiques. Depuis 2015, nous avons collaboré sur plusieurs projets, notamment i) La caractérisation des valeurs extrêmes dans les réseaux couplés, ii) la définition des indicateurs dynamiques tels que la dimension de corrélation, les exposants de Lyapunov et l'entropie à partir de la théorie des valeurs extrêmes, iii) l'étude des systèmes déterministes perturbés avec un bruit aléatoire. Nous avons ainsi participé ensemble au projet Braintime, sur l'application des indicateurs dynamiques aux données de Neuroscience et au projet UBARISQ, porté par Vincent Rey et Michel Dimou : « Littoral Urbanisé : risques et enjeux face à la montée des eaux en Provence – Alpes – Cote d'Azur ».

D. Battaglia & A. Brovelli [Université La Timone – Marseille]
Avec les équipes de D. Battaglia et A. Brovelli (Université la Timone et Université de Marseille) et Neurospin (Saclay) nous avons commencé à étudier la configuration temporelle des réseaux fonctionnels du cerveau, un sujet très actuel en neurosciences cognitives et computationnelles. Son investigation nécessite des nouveaux paradigmes allant au-delà des réseaux statiques. Dans le cadre d'un projet Inphyniti CNRS (2017-2018), 'Braintime', notre but a été de développer de nouveaux outils à partir de techniques venant de la physique statistique et non-linéaire, et de l'inférence statistique.

P. Fraunie, V. Rey, M. Dimou [Université de Toulon – Toulon]
Avec P. Fraunie, nous avons obtenu de la Mission Interdisciplinaire du CNRS l'organisation d'un workshop au siège du CNRS Michel Ange sur la thématique "Les enjeux, verrous et avancées

Interdisciplinaires en Dynamique des Fluides Géophysiques et Astrophysiques" (16 au 19 octobre 2017). Cette rencontre a eu pour objectif de faire un point sur ce sujet qui nous avait réunis en novembre 2015 et préparer les actions à venir (GDR ou/et autres). Les thématiques que nous avions retenues alors ont été reprises dans le projet financé par le CNRS: i) Les interactions d'échelles (cascades directes et inverses, ondes) dans les domaines océan, atmosphère, planétologie, climat, ii) La relativité générale et la cosmologie (les trous noirs et leurs dynamiques), les plasmas iii) Les mécanismes de diffusion, mélange et transport (nouveaux paradigmes), iv) Les expériences de laboratoire et observations *in situ* (processus de petite échelle et à très grands nombres de Reynolds) v) Les équations de Navier-Stokes (limite incompressible des solutions compressibles, solutions singulières, composantes horizontales de Coriolis, instabilités baroclines, modèles quasi géostrophiques et non Boussinesq, Saint-Venant; vi) Les modèles et codes numériques (conception des nouvelles générations, vii) Les systèmes dynamiques (océan à méso échelle) et les extrêmes statistiques (climat), l'assimilation de données non linéaires, les approches stochastiques et multifractales. Avec V. Rey, M. Dimou et P. Fraunie, nous avons aussi déposé le projet UBARISQ, porté par Philippe Fraunie : « Littoral Urbanisé : risques et enjeux face à la montée des eaux en Provence – Alpes – Cote d'Azur ».

D. Defrance [UMR l'Ocean – Montpellier]

Avec D. Defrance, nous avons conçu [27] une procédure pour analyser les signaux du changement climatique en séparant la composante turbulente (phénomènes météorologiques convectifs, interactions avec la surface) de la composante cohérente (ondes atmosphériques, el Nino et autres oscillations). L'étude de simulations climatiques, obtenues par différents scénarios de forçage, démontre que les deux composantes (turbulente et cohérente) subissent des effets divers selon la région et l'amplitude du forçage.

2.9 Collaborations avec des partenaires académiques internationaux

London Mathematical Laboratory fellowship

Depuis 2017 je suis *research fellow* du London Mathematical Laboratory (LML), Londres, Angleterre. Le LML est un laboratoire de recherche en sciences fondamentales supporté par un système des donations et géré par un conseil d'administration. Le statut de *fellow* me permet d'accéder au laboratoire et à une *guesthouse* à Londres et de participer aux décisions et aux activités scientifiques du laboratoire. Une activité particulièrement intéressante du LML est la possibilité d'encadrer des étudiants pour un stage d'été avec une durée d'un mois. En 2018 j'ai co-encadré le stage de Takumi Chihara, en 2019 cel de Yuzuru Mitsui en collaboration avec Y. Sato.

G. Messori [Upssala University & Meterological Institute Stockholm, Suède]

Je travaille avec G. Messori depuis 2016 à la définition d'outils pour étudier la dynamique de l'atmosphère aux moyennes latitudes. G. Messori est un expert du déferlement des ondes planétaires, un phénomène qui régit la dynamique des blocages. Avec G. Messori nous avons publié plusieurs articles [30,33,38,40,42,49,50,54,58,60,61]. Ces études démontrent que les métriques des systèmes dynamiques nous permettent de déterminer : i) L'origine dynamique des extrêmes géophysiques, ii) La rareté et la prédictibilité des champs de circulation atmosphérique, iii) Le régime de temps (zonale, anti-zonale, bloqué ou de type Atlantic Ridge) associé à un champ de circulation iv) D'évaluer l'accord entre les modèles CMIP5 et les réanalyses 20CR sur la période 1850-2000 dans la représentation de la circulation

atmosphérique sur le secteur Nord Atlantique. Nos collaborations se basent sur un échange continu par mél et vidéoconférences, l'organisation de la session EGU « dynamical extremes in climate sciences » et plusieurs séjours de travail à Stockholm et à Saclay. G. Messori est aussi le porteur d'un projet ITN pour l'appel d'offre 2019. J'ai participé à ce projet et, en cas de succès, je serai leader d'un *workpackage*.

S. Gualdi & M. Carmen Alvarez Castro [CMCC Bologna, Italie]

J'ai eu l'occasion de travailler avec Mme Alvarez-Castro pendant son post-doctorat au LSCE, avec P. Yiou. Nous avons utilisé les outils de la théorie de systèmes dynamiques pour détecter et analyser les extrêmes atmosphériques liés à la persistance d'une circulation stationnaire sur l'Europe (vagues de chaleur, vagues de froid) ou à une circulation transitoire mais intense (tempêtes). Nous avons analysé les données historiques ainsi que les données produites par les modèles climatiques CMIP5 [26,38,41,42,54,55,61]. Mme Alvarez-Castro se trouve maintenant à Bologne et travaille avec S. Gualdi à la prévision saisonnière. Elle se propose d'appliquer les indicateurs dynamiques qu'on a développés à Saclay pour améliorer les prévisions. Le CMCC est aussi spécialisé dans l'étude de cyclones tropicaux méditerranéens (les médicanes). Mme Alvarez-Castro est experte dans la reconstruction des données historiques à partir des ressources documentaires. Notre objectif est d'établir une longue base de données des médicanes pour ensuite déterminer éventuels changements de leur dynamique face aux émissions anthropiques.

Y. Sato [Hokkaido University, Sapporo, Japan] & N. Moloney [LML, Londres, Angleterre]

Les collaborations avec Y. Sato et N. Moloney, au sein au London Mathematical Laboratory, ont permis de construire un cadre pour modéliser certaines caractéristiques de la circulation à moyennes latitudes avec des systèmes dynamiques à basse dimension. En [22] nous avons d'abord conjecturé que l'alternance entre phase zonale et bloquée de la circulation atmosphérique n'est pas compatible avec un système multi-stable mais plutôt avec un seul bassin d'attracteur chaotique, ou les propriétés dynamiques changent en fonction du point de l'espace de phase visité. Dans cette description, confirmée par l'analyse des données issues d'ERA Interim, le blocage est compatible avec une région de l'espace de phase occupée par un point fixe. L'article [36] était la motivation pour rechercher un modèle à basse dimension du jet, capable de décrire cette dynamique. En [50] nous avons dérivé ce modèle à partir des techniques *d'embedding* appliquées aux données de la position du jet et dérivées aussi d'ERA Interim. Avec Y. Sato et N. Moloney, nous avons plusieurs projets en cours : le projet « DESSERT » de coopération scientifique du CNRS (2017-2019) et l'école d'été du London Mathematical Laboratory. Avec Y. Sato, nous sommes aussi responsables de l'encadrement de Takumi Chihara en collaboration avec B. Dubrulle et F. Daviaud au SPEC, CEA Saclay.

N. Vercauteren [Freie Universitaet Berlin, Allemagne]

Avec Nikki Vercauteren (Freie Universitaet, Berlin) nous travaillons dans le cadre d'un projet de coopération financé par CampusFrance et la DAAD en Allemagne, et avec le SPEC-CEA Saclay [37,53,66]. Les données analysées ont été récoltées par N. Vercauteren pendant une campagne de mesure sur le glacier Plaine Morte dans les Alpes suisses. Notre projet commun est de détecter la multi-stabilité des régimes turbulents en utilisant une mesure de distance de l'état de base de la turbulence homogène et isotrope. Les résultats ont montré la capacité de la méthode de reconnaître la subtile différence entre les régimes stables de la couche limite. Nous poursuivons notre collaboration dans l'étude de l'isotropie de la turbulence atmosphérique en appliquant des méthodes des systèmes dynamiques [66].

S. Vannitsem [RMI, Brussel, Belgique]

S. Vannitsem est un expert de dynamique du climat ainsi que des systèmes dynamiques. Nous travaillons ensemble à définir certaines propriétés des modèles couplés atmosphère océan. En [49] nous avons montré une dépendance non triviale de la dimension de l'attracteur de la fenêtre temporelle de moyennage d'observables de la dynamique de l'océan et de l'atmosphère. Nos routes se sont croisées plusieurs fois lors des congrès tels que l'EGU, l'AGU et l'AOGS. S. Vannitsem est président de la division Nonlinear processes in Geophysics et j'ai le plaisir de l'aider dans l'organisation de la division dans mon rôle de *scientific officer*, notamment dans la compétition Outstanding Student Poster Award.

3. PROJET DE RECHERCHE

3.1 Résumé

Mes projets de recherche pour le futur sont orientés dans la poursuite des objectifs généraux de mon projet de recherche CNRS qui porte sur la description physique des phénomènes extrêmes complexes en climat, turbulence et neurosciences. Ma démarche est basée sur l'utilisation des champs, plutôt que des variables à un point de l'espace, pour caractériser les extrêmes et définir leur comportement extrémal avec la théorie de la récurrence : un champ n'est pas extrême à cause des valeurs qu'il contient mais à cause de sa rareté. Cette vision, assez naturelle dans les systèmes dynamiques mais moins exploitées en climat et neurosciences, permet d'étudier aussi les relations entre extrêmes physiques et la dynamique de l'espace de phase subjacent la dynamique.

Dans ce cadre, je résume les deux projets principaux qui ont été aussi présenté comme projets de recherche ANR et ERC. Le premier porte sur une caractérisation des cyclones extratropicaux extrêmes et le deuxième sur les vagues de froid. Je vais en donner un aperçu car, même si les projets ne seront pas financés, c'est dans ce domaine que je vais orienter mes prochaines recherches.

Dans une autre section je décrirai les développements méthodologiques que j'envisage pour améliorer l'application de la théorie de la récurrence aux systèmes complexes. Je vais aussi donner un aperçu de mes projets interdisciplinaires dans le cadre de neurosciences, et dans la valorisation de mes travaux sur les extrêmes dans les systèmes complexes.

3.2 Climat et Extrêmes Climatiques

3.2.1 Cyclones extratropicaux et Medicanes

Les changements potentiels dans la fréquence/intensité de cyclones extratropicaux extrêmes induits par le forçage anthropique sont difficiles à déterminer. Ils reposent sur les propriétés chaotiques de la circulation atmosphérique dont la dynamique possède un nombre élevé des degrés de liberté. Pour surmonter cette difficulté, mon idée est de projeter la dynamique sur un sous-ensemble d'indicateurs instantanés qui tracent la prévisibilité et la persistance des régimes de circulation. L'objectif scientifique et d'étudier les échanges d'énergie thermodynamique et cinétique dans le cycle de vie des cyclones et les processus physiques qui déclenchent des effets extrêmes. Le but est de préparer la société aux futurs cyclones extratropicaux extrêmes en étudiant les changements dynamiques dans des modèles climatiques à complexité croissante. Les simulations produites seront comparées aux données CMIP6. Mon projet inclut aussi l'étude des médicanes. Ces cyclones, qui frappent les régions autour de la Mer Méditerranée, ont un caractère hybride entre tempête extratropicale et ouragan.

La première étape pour progresser dans la compréhension de la dynamique des cyclones extratropicaux consiste donc à reconnaître l'essence chaotique [Lorenz, 1963] et hautement dimensionnelle de la dynamique atmosphérique et à la projeter sur des indicateurs objectifs pour discerner les signaux possibles du changement climatique. La nouveauté est de définir

de tels indicateurs en utilisant la théorie des systèmes dynamiques. Dans ce cadre, les trajectoires d'un système complexe arbitraire peuvent être projetées sur un espace dimensionnel d'indicateurs instantanés permettant de suivre la rareté, la récurrence et la prévisibilité des configurations du système [Lucarini et al. 2016]. Nous avons récemment prouvé que de tels indicateurs peuvent être dérivés de données climatiques avec des calculs sans coût [Faranda et al. 2017a, 2017b]. L'avantage principal est que nous passons d'un espace de phase à dimension extrêmement élevée (par exemple, pression au niveau de la mer, température, champs de précipitation sur une région) à un espace de phase à basse dimension, constitué d'une série d'indicateurs instantanés. Ces indicateurs sont liés à la nature zonale ou méridionale de la circulation dans les moyennes latitudes et peuvent donc être utilisés pour discerner entre la zonalisation ou l'amplification arctique du flux à moyenne latitude qui affecte largement la position des traces de tempêtes [Faranda *et al.*, 2018 ; Rodrigues *et al.*, 2018 ; Giamalaki *et al.,* 2018].

Outre la circulation atmosphérique à grande échelle, les contraintes géographiques locales affectent également la dynamique des cyclones extratropicaux. Les caractéristiques locales peuvent augmenter les précipitations et fournir une rétroaction énergétique pertinente qui maintient les conditions orageuses [Hawcroft *et al.*, 2016]. Il est alors primordial de suivre la cascade d'énergie dans l'atmosphère et d'étudier les conversions d'énergie dynamique en thermodynamique. Les progrès récents en turbulence et en mécanique statistique permettent de réaliser cela localement dans l'espace et dans le temps en utilisant la formulation faible de Karman-Howarth [Saw *et al.*, 2016]. Dans Faranda *et al.* [2018b], nous avons appliqué cette technique à l'étude de la réanalyse atmosphérique et montré que, à chaque échelle, le bilan énergétique est une interaction complexe entre réservoirs « dynamiques » et « thermodynamiques ». J'utiliserai cette formulation pour étudier les cascades d'énergie dans les cyclones extratropicaux. L'utilisation des modèles de complexité / résolution différentes, à partir des modèles de complexité dimensionnelle basse (PLASIM [Fraedrich *et al.*, 2015]) jusqu'aux modèles climatiques mondiaux (IPSL-CM5 [Dufresne *et al.*, 2013]) et aux modèles climatiques régionaux (WRF [Done *et al.,* 2004]) permettra de déterminer si le forçage anthropique a une incidence sur la dynamique des cyclones extratropicaux extrêmes dans les ensembles de données CMIP6 et réanalyse. La combinaison des indicateurs de systèmes dynamiques permettant de suivre les tendances atmosphériques zonales ou ondulées et des indicateurs de mécanique statistique permettant de suivre les transferts énergétiques locaux constituera le point clé pour détecter les changements dans la dynamique des cyclones extratropicaux extrêmes dans l'espace et dans le temps sous l'effet de forçage anthropique.

Détection de cyclones extratropicaux : nous allons construire une base de données sur les cyclones extratropicaux extrêmes au-dessus des régions de l'Atlantique Nord en examinant les produits de réanalyse et les sources documentaires, plutôt qu'en appliquant des algorithmes de détection automatisés. Cela permettra de sélectionner uniquement les événements ayant eu un impact sociétal important (tels que Xinthya 2010, Doris 2017, Frédérique 2018). Nous construirons ensuite un ensemble de variables minimales pour suivre l'évolution des cyclones extratropicaux dans l'espace des phases (par exemple, pression au niveau de la mer, vorticité potentielle, champs de vent, température, hauteur géopotentielle…).

Dynamique des cyclones extratropicaux observés : une fois les événements et les variables pertinentes identifiés, nous suivrons leur évolution en calculant les transferts d'énergie et en projetant l'ensemble de la dynamique sur l'espace de phase réduit des indicateurs

dynamiques. Ces indicateurs sont comparés à ceux calculés pour des cyclones extratropicaux non extrêmes pour comprendre les déclencheurs dynamiques spécifiques d'événements extrêmes.

Simulations de cyclones extratropicaux : nous effectuerons des simulations de cyclones extratropicaux extrêmes de modèles de circulation générale de complexité différente et sous différents scénarios d'émission : PLASIM [Fraedrich *et al.*, 2015], l'IPSL-CM5 [Dufresne *et al.*, 2013] et un modèle climatique régional (WRF [Done *et al.*, 2004]). Pour obtenir des événements comparables à ceux observés, nous suivrons la procédure décrite ci-dessus : i) Nous simulons d'abord de longs trajectoires avec PLASIM dans des conditions stationnaires. ii) Nous trouvons les meilleurs analogues correspondant aux cyclones extratropicaux extrêmes observés dans les ensembles de données de réanalyse. iii) Nous faisons ensuite des simulations IPSL-CM5 et WRF avec des conditions aux limites PLASIM et répétons les simulations à haute résolution. En ce qui concerne les données CMIP6, ces calculs permettent d'étudier le signal de changement climatique dans les longues simulations de contrôle (PLASIM), ainsi que dans conditions stationnaires à basse (modèle IPSL) et haute résolution (WRF).

Analyse des données du CMIP6 : nous projetons la dynamique simulée sur les indicateurs dynamiques. Nous comparons ensuite les indicateurs obtenus pour les cyclones extratropicaux dans les réanalyses centenaires (CERA, ERA 20C, 20CRv2c), les simulations et les modèles CMIP5-CMIP6. Cela permettra de comprendre les modifications de la dynamique des cyclones observée pour les scénarios RCP 2.6,4.5 et 8.5 ainsi que pour les scénarios 4xCO_2 et + 4° C à la température de la surface de la mer.

3.2.1 Vagues de Froid

Alors que la société souffre des conséquences du réchauffement climatique, en hiver, elle fait néanmoins face à des périodes de froid intense [Vavrus *et al.*, 2016]. En Europe et en Amérique du Nord, de tels événements semblent apparaître avec une fréquence similaire et parfois avec une intensité plus élevée au cours des deux dernières décennies qu'au XXe siècle [Deser *et al.*, 2017 ; Overland *et al.*, 2010 ; Strong *et al.,* 2009 ; Wu *et al.*, 2010]. En regardant tous les jours de neige à Rome de 1900 comptabilisés à partir de sources documentaires, nous observons que l'intensité des chutes de neige est plus forte ces dernières décennies alors que le nombre de chute de jours de neige est, lui, constant (Figure 3.1). Cela semble contredire les tendances au réchauffement et suggère que le forçage anthropique a un impact non négligeable sur de tels événements extrêmes, qui mérite d'être étudié. C'est l'objectif principal de mon projet de recherche sur les vagues de froid.

Les vagues de froid sont des phénomènes météorologiques complexes dont la dynamique doit être suivie dans le temps et à différentes échelles de l'espace : elles sont entraînées par la circulation atmosphérique à moyenne latitude par l'amplification des ondes planétaires [Tibaldi *et al.*, 1983, Barnes *et al.*, 2014, Lehmann *et al.*, 2015] alors qu'ils sont soutenus par des effets thermodynamiques se produisant à des échelles locales (par exemple, présence de neige sur le sol, disponibilité d'humidité) [Screen, 2017]. Comprendre la réponse de la circulation atmosphérique au forçage anthropique est donc la première étape pour suivre les modifications potentielles de la fréquence / intensité des périodes froides.

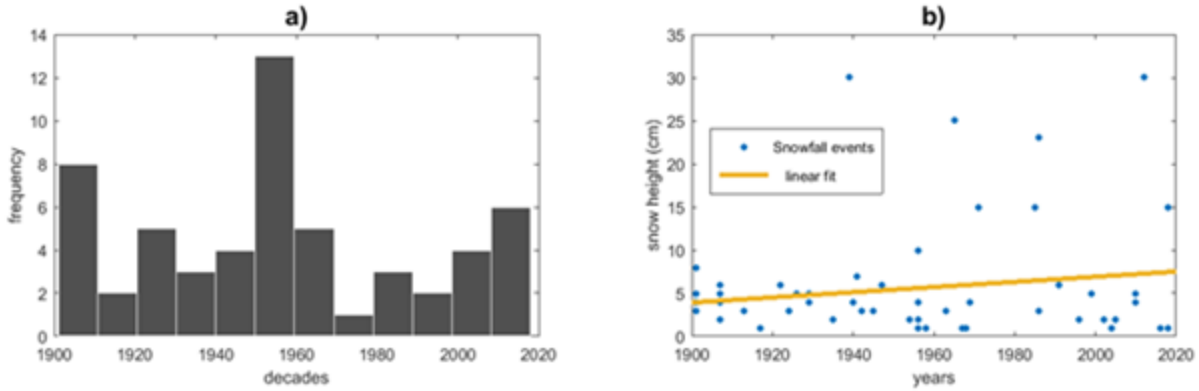

Figure 3.1: a) Fréquence des chutes de neige à Rome par décennie, b) Hauteur de la neige en fonction du moment de la survenue de la neige à Rome (en bleu), régression linéaire (en jaune).

Jusqu'à présent, il était très difficile de prouver un quelconque changement significatif dans la structure dynamique des ondes planétaires observées aux latitudes moyennes [Shepherd, 2014]. Les études existantes ne sont pas suffisamment concluantes pour déterminer si la fréquence / l'intensité des épisodes de froid diminue ou augmente sous l'effet d'un forçage anthropique. D'un côté, Cohen *et al.* [2014] et Kim *et al.* [2014] ont montré que la récente augmentation des températures dans l'Arctique est associée à une amplification des vagues planétaires, affectant les trajectoires des tempêtes et conduisant à une amélioration des conditions hivernales. De l'autre, plusieurs auteurs (dont moi-même) ont constaté une zonalisation de l'écoulement dans les latitudes moyennes en raison du réchauffement de l'océan, pouvant conduire à une diminution de la fréquence des épisodes de froid [Lorenz *et al.*, 2007 ; Faranda *et al.*, 2018a ; Chen *et al.*, 2017 ; Screen *et al.*, 2014]. Enfin, Cassou *et al.* [2016], Cattiaux *et al.* [2010] et Madonna *et al.* [2017] ont montré que cette controverse dépend de la projection du flux de latitudes moyennes sur des indices de circulation spécifiques.

La première étape pour progresser dans la compréhension de la dynamique des périodes froides consiste à reconnaître l'essence chaotique et hautement dimensionnelle de la dynamique atmosphérique et à la projeter sur des indicateurs objectifs pour discerner les signaux potentiels des changements climatiques [Lorenz, 1963]. Mon objectif est de définir de tels indicateurs en utilisant la théorie des systèmes dynamiques. Dans ce cadre, les trajectoires d'un système complexe arbitraire peuvent être projetées sur un espace à basse dimension d'indicateurs instantanés permettant de suivre la rareté, la récurrence et la prévisibilité des configurations du système [Lucarini *et al.*, 2016 ; Faranda *et al.*, 2013a]. Ces indicateurs se sont révélés être liés à la nature zonale ou ondulée de la circulation des latitudes moyennes et peuvent donc être utilisés pour discerner entre la zonalisation et l'amplification arctique du flux des latitudes moyennes [Faranda *et al.*, 2018 ; Rodrigues *et al.*, 2018, Giamalaki *et al.*, 2018].
Outre la circulation atmosphérique à grande échelle, les contraintes géographiques locales renforcent également les vagues de froid. Des caractéristiques locales telles que les Alpes en Europe ou les Grands Lacs aux États-Unis peuvent augmenter les précipitations et fournir une rétroaction énergétique pertinente qui maintient les conditions hivernales [Niziol *et al.*, 1995]. Il est alors essentiel de suivre la cascade d'énergie dans l'atmosphère et d'étudier les conversions d'énergie dynamique en thermodynamique. Les progrès récents en turbulence et

en mécanique statistique [Saw *et al.*, 2016] permettent d'y parvenir localement dans l'espace et dans le temps en utilisant la formulation faible de Karman-Howarth [Kuzzay *et al.*, 2015]. Dans Faranda *et al.* [2018b], nous avons appliqué cette technique à l'étude de la réanalyse atmosphérique et montré que, à chaque échelle spatiale, le bilan énergétique est une interaction complexe entre réservoirs « dynamiques » et « thermodynamiques ». Dans mon projet, j'utiliserai cette formulation pour étudier les cascades d'énergie en période de froid par le biais de simulations à différentes complexité / résolution. Comme pour les tempêtes, j'utiliserai des modèles à faible complexité dimensionnelle (PLASIM [Fraedrich *et al.*, 2015]), des modèles climatiques globaux (IPSL-CM5 [Dufresne *et al.*, 2013]) et des modèles climatiques régionaux (WRF [Done *et al.*, 2004]). La combinaison d'indicateurs de systèmes dynamiques permettant de suivre les tendances atmosphériques à grande échelle et d'indicateurs de mécanique statistique permettant de suivre les transferts énergétiques locaux est le point clé pour détecter les changements climatiques par temps froid dans l'espace et dans le temps.
Mon projet vise à préparer la société aux futures vagues de froid. Ses objectifs sont :

1. Identifier les caractéristiques communes des périodes froides observées à partir des jeux de données de réanalyses et des sources documentaires.

2. Projeter de la dynamique sur le sous-espace d'indicateurs dynamiques et mesurer des changements dans la dynamique de la circulation aux moyennes latitudes entre des scénarios de contrôle et des scénarios avec un forçage anthropique.

3. Simuler la dynamique des périodes froides à différentes résolutions avec des modèles de complexité croissante, dans plusieurs scénarios d'émission, et analyser si de telles modifications sont reproduites dans les jeux de données CMIP6 et de réanalyses.

<u>Dynamique des périodes froides et simulation</u>

Nous analysons des événements rares. Afin d'évaluer leurs modifications sous l'effet d'un forçage anthropique, nous utilisons des simulations climatiques en raison de la faible disponibilité des événements observés. Afin de prouver la faisabilité de mon projet, la première question à se poser est de savoir si les modèles climatiques peuvent reproduire les vagues de froid observées. Dans le cadre du projet DAMA (voir section 1 pour plus de détails sur cette subvention), nous avons effectué des analyses montrant que même des modèles de circulation générale à faible résolution peuvent reproduire fidèlement la dynamique typique d'une vague de froid. Dans DAMA, l'accent était mis sur les vagues de froid qui frappaient l'Italie, que nous avons reconstruites à l'aide de sources documentaires.

Nous avons d'abord déterminé que la dynamique à l'origine de ces événements porte une signature commune. Un ensemble minimal de variables a été identifié pour suivre l'évolution de 32 périodes de froid : pression au niveau de la mer, température à 850hPa, couverture de neige et hauteur géopotentielle à 500hPa. Les modèles moyens obtenus à partir de la réanalyse du NCEP (Figure 3.2a-d) montrent une structure d'onde planétaire prononcée avec une langue d'air froid entrant dans le bassin méditerranéen en provenance des Balkans.

Des simulations préliminaires [par Miriam D'Errico, projet DAMA] montrent que même les modèles à faible résolution comme PLASIM produisent des vagues de froid dont la dynamique est comparable à celle détectée lors de la réanalyse du NCEP. Les analogues sont utilisés pour détecter les vagues de froid au cours de 400 ans de simulations de contrôle PLASIM [Yiou *et al.*, 2013]. Les 30 meilleurs analogues sont utilisés pour construire une période froide simulée moyenne dont l'évolution présente des caractéristiques similaires à celles trouvées lors de la réanalyse du NCEP (Figure 3.3).

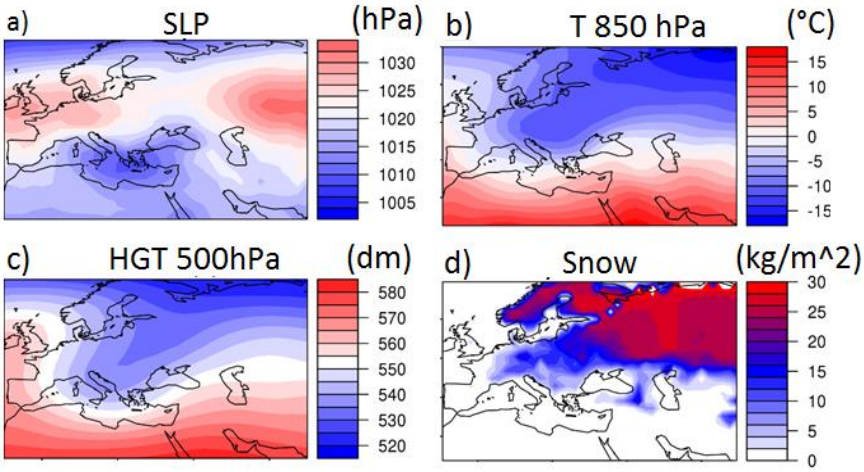

Figure 3.2 Dynamique de 32 vagues de froid su l'Italie : a) moyenne des champs de pression (SLP), b) moyenne des champs de température à 850 hPa (T850 hPa), c) moyenne du geopotentiel à 500 hPa (HGT), d) Moyenne de profondeur de neige.

<u>Simulation de vagues de froid</u>

Nous allons effectuer des simulations de vagues de froid sur la base de celles détectées dans les observations, tout d'abord en recherchant dans de longues simulations de contrôle (PLASIM) les événements correspondant le mieux à ceux trouvés via des sources documentaires (analogues). Nous utiliserons ensuite les champs de vagues de froid produits dans PLASIM comme conditions limites pour les simulations à haute résolution dans les modèles IPSL-CM5 et WRF-3. Des simulations seront effectuées à des conditions différentes de forçage anthropique mais fixes pour évaluer le rôle du changement climatique dans la modification de la probabilité d'occurrence de certains événements. Une brève description des modèles utilisés dans mon projet est donnée ci-dessous.

i) PLASIM : (le simulateur de planète) est développé par l'Université de Hambourg et disponible en open source [Fraedrich *et al.*, 2015]. Le noyau dynamique et les processus physiques constituent un modèle de circulation générale (MCG) des atmosphères planétaires. En soi, le noyau dynamique est un modèle de circulation générale simplifié. Nous utiliserons PLASIM pour produire de grandes statistiques sur les vagues de froid dans différents scénarios de forçage. La résolution horizontale de PLASIM est d'environ 300 km. La paramétrisation des processus physiques peut donc être simpliste. C'est pourquoi nous utiliserons PLASIM pour obtenir un grand échantillon statistique d'analogues des épisodes de froid observés et les utiliserons comme conditions aux limites dans le modèle IPSL CM5.

ii) Modèle IPSL-CM5/6 : Le modèle IPSL-CM5/6 est un modèle de système terrestre intégral [Dufresne *et al.*, 2013]. Outre le modèle atmosphère physique-terre-océan-mer-glace, il inclut également une représentation du cycle du carbone, de la chimie de la stratosphère et de la chimie de la troposphère avec des aérosols. Le modèle est développé et soutenu par un grand consortium français. Cela nous garantit l'accès aux sources de code ainsi qu'aux versions précédentes et l'expertise nécessaire pour exécuter et interpréter les résultats du modèle. Les vagues de froid ont une physique complexe et leur compréhension nécessite une paramétrisation fiable de la glace, des aérosols et du transfert de chaleur. Pour cette tâche, le modèle IPSL-CM5/6 semble plus approprié que PLASIM. Cependant, comme la résolution horizontale de l'IPSL-CM5/6 est d'environ 100 km, la représentation géographique à petite échelle est médiocre. Nous utiliserons le modèle IPSL-CM5/6 pour fournir des conditions aux bords pour WRF.

iii) WRF-3: Des processus physiques à petite échelle seront simulés dans WRF-3 [*Done et al.*, 2004]. Nous pourrions ici atteindre une résolution horizontale de 10 km et avoir une représentation réaliste des principales contraintes géographiques (grands lacs, Alpes, autres chaînes de montagnes, zones de chaleur urbaines). WRF est un modèle régional et par conséquent, il n'aura pas la représentation de la dynamique à grande échelle. Ceci motive l'utilisation du modèle IPSL-CM5 en combinaison avec le WRF.

Les exigences en termes de temps de calcul pour les trois modèles sont très différentes, alors que PLASIM peut exécuter des simulations de 500 ans en quelques jours sur un petit cluster, les modèles IPSL-CM5 et WRF-3 exigent davantage de ressources. Nous adopterons une stratégie précise pour éviter de faire des simulations coûteuses et inutiles

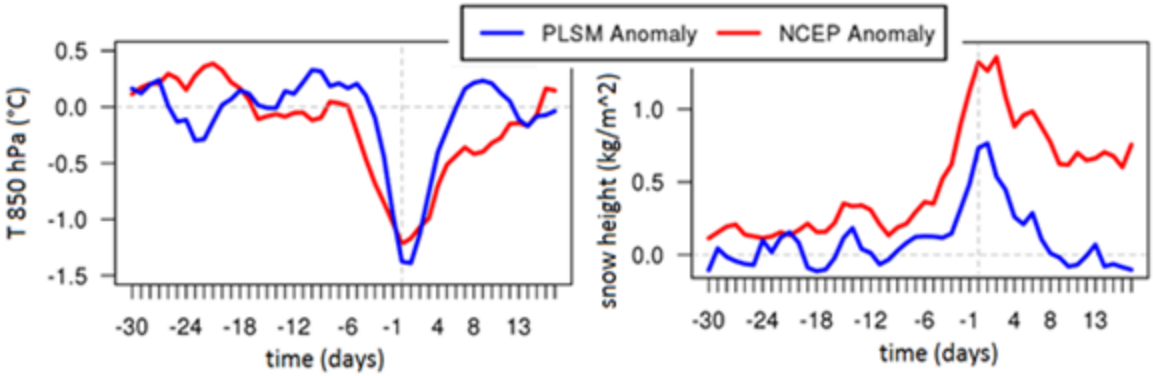

Figure 3.3: Température moyenne et hauteur moyenne de la neige en Italie pour 32 simulations de périodes froides en PLASIM (bleu) par rapport aux 32 périodes froides détectées dans les données NCEP provenant de sources documentaires [projet DAMA].

3.3 Systèmes Dynamiques et Physique Statistique

<u>Développement méthodologiques reliés aux extrêmes climatiques</u>

Les épisodes de froid, ainsi que d'autres événements extrêmes, sont liés aux états métastables transitoires de l'atmosphère, dont les propriétés dynamiques dépendent des propriétés instantanées plutôt que moyennes. Ces propriétés locales sont déterminées par deux quantités : la dimension locale et la stabilité de l'état considéré. Le concept de dimension

instantanée est intuitif : pour une configuration atmosphérique ζ, la dimension instantanée $d(\zeta)$ mesure la densité de configurations similaires. Cela implique que d peut être lié à la fois à l'entropie et à la prévisibilité des trajectoires. La stabilité de l'état ζ est mesurée par $\theta(\zeta)$ défini comme l'inverse du temps de persistance moyen des trajectoires autour de ζ. Si ζ est un point fixe de la dynamique, $\theta(\zeta) = 0$. Pour une trajectoire quittant immédiatement le voisinage de ζ, $\theta = 1$. En général, plus la configuration est persistante, plus les états du système ressembleront à ζ.
Ces propriétés instantanées n'avaient pas encore été calculées pour les flux atmosphériques pour deux raisons principales : (i) jusqu'à récemment, la longueur des séries chronologiques météorologiques à haute fréquence et géographiquement étendues était insuffisante pour permettre des estimations fiables, (ii) les méthodologies utilisées n'étaient pas adaptées.
Dans *Faranda et al.* [2017a, 2017b, 2018a], nous avons pu projeter les champs de pression du niveau de la mer NCEP de l'Atlantique Nord sur un sous-espace d'indicateurs instantanés permettant de suivre la rareté, la prévisibilité et la persistance des champs de circulation atmosphérique. De plus, dans *Faranda et al.* [2017a] nous avons montré que ces indicateurs sont liés à la nature zonale ou méridionale de la circulation dans les latitudes moyennes et peuvent donc être utilisés pour différencier la zonalisation et l'amplification arctique du flux dans les latitudes moyennes. Cette correspondance entre les valeurs des indicateurs et les états métastables sera la principale valeur ajoutée de mon projet pour étudier les extrêmes climatiques.
Ces indicateurs ne dépendent pas de la résolution de la simulation, comme le montrent Rodrigues *et al.* [2018]. Nous avons classé et évalué les modèles CMIP5 à l'aide des métriques instantanées, puis en moyenne sur une période de 150 ans. Nous avons déterminé que la dynamique des différents modèles CMIP5 au-dessus de l'Atlantique Nord est comparable à celle de la réanalyse 20CR. Dans Faranda *et al.* [2018a], nous avons détecté un signal de changement climatique sur la dynamique de la circulation atmosphérique de 1850 à 2100 combinant des réanalyses, des modèles climatiques et des simulations de grands ensembles.
Les développements théoriques prévus peuvent être résumés en plusieurs tâches :

<u>Estimations d'incertitude pour les indicateurs dynamiques</u> : Les indicateurs dynamiques sont dérivés d'un ensemble de théorèmes mathématiques [Lucarini *et al.*, 2016] dont la validité n'est en principe garantie que pour des séries temporelles infiniment longues. Bien que Faranda *et al.* [2017a, 2017b] ont montré que les indicateurs dynamiques fournissent des informations pertinentes également pour des ensembles de données finis, il est fondamental d'associer une incertitude à leurs estimations. L'incertitude est essentielle pour déterminer si des épisodes de froid sur différentes régions et différents scénarios de forçage sont prévus sur des indicateurs très différents. Cette tâche, à la frontière entre théorie et applications, sera réalisée en utilisant des modèles conceptuels d'écoulements atmosphériques : les modèles de Lorenz [1963] et Lorenz [1984] et en effectuant des expériences sur l'installation d'écoulement de von Karman disponible au SPEC-CEA. Cette installation est un indicateur de la dynamique de la circulation atmosphérique dans une configuration contrôlée mais turbulente. Il présente des transitions entre des états métastables dont la dynamique est très proche de celle du jet stream zonal à des transitions bloquées [Faranda *et al.*, 2017c].

<u>Indicateurs dynamiques dans un cadre non stationnaire :</u> De manière similaire à la tâche 1, mon projet est de vérifier la sensibilité des indicateurs dynamiques aux simulations obtenues avec différents forçages dans des modèles conceptuels et des écoulements turbulents en laboratoire à partir de l'expérimentation SPEC-CEA von Karman, dans laquelle les paramètres

sont changés brusquement ou en douceur. Cela permettra de valider l'utilisation des indicateurs dans le forçage continu du changement climatique, comme dans les données CMIP5, CMIP6 et de réanalyse.

Grandes déviations : L'entrée ou le retour d'un système dans le voisinage d'un état donné se caractérise par des indicateurs métriques (dimensions) et dynamiques (exposants de Lyapunov, entropie). Les données expérimentales et les simulations numériques cibl ent les états E de probabilité maximale et donc les indicateurs précédents affichent leurs valeurs typiques. La présence d'états rares ou extrêmes peut néanmoins être détectée par les grandes déviations par rapport à ces valeurs typiques. Nos premiers résultats [Faranda *et al.*, 2013a] montrent que la fonction de déviation est déterminée par les propriétés fines (fractales) de la mesure invariante et celles-ci peuvent être calculées directement *via* la théorie des valeurs extrêmes. Des travaux préliminaires ont aussi été menés pour simuler des vagues de chaleur extrême [Ragone *et al.*, 2018] à partir d'algorithmes d'échantillonnage d'importance.

Extrêmes spatio-temporels : Le développement de nouveaux concepts pour l'étude statistique du processus spatio-temporel associé à la récurrence dans les systèmes dynamiques [Lucarini *et al.*, 2016] ouvre la voie à une compréhension fine des processus dynamiques menant à la structure de dépendance des extrêmes multivariés, qui est un des aspects essentiels de l'estimation des probabilités de concomitance d'évènements extrêmes.

Réseaux d'applications couplées (RAC). Le système climatique est composé d'un grand nombre de variables, ce qui demande une modélisation par des systèmes dynamiques de grande dimension. Une possibilité pour décrire certains phénomènes climatiques et d'utiliser des réseaux d'applications construits avec des interactions non-linéaire et non-locales couplant de nombreux systèmes « simples », à la limite dénombrable. Ce dernier cas nous approcherait des systèmes spatio-temporels dont l'évolution est décrite par des EDP. La théorie de la récurrence et des extrêmes pour les RAC reste à faire, nous en avons esquissé les bases dans un travail préliminaire [Faranda *et al.*, 2018c]. L'enjeu est de taille car on pourrait décrire des comportements complexes comme la synchronisation, l'apparition d'évènements rares localisés (*chimeras* et *black swan*), etc.

Transport Optimal et changement climatique : Les changements de mesure invariante, liés à des changements de paramètres du système (comme des forçages climatiques), peuvent être mesurés par des outils issus du transport optimal (par exemple la distance de Wasserstein). La description de l'évolution des caractéristiques de récurrence du système par les propriétés du plan de transport optimal (entre deux mesures invariantes) présente un défi ouvert. L'interprétation physique de ce plan serait utile pour comprendre comment des situations « inédites » peuvent être générées dans un système non autonome.

3.4 Axes de recherche interdisciplinaires et valorisation

Correction des biais et impacts de changements climatiques

La correction des biais (BC) des simulations climatiques est désormais indispensable pour forcer les modèles d'impacts. La plupart des méthodes de BC sont univariées, fonctionnant indépendamment pour chaque variable et point : elles peuvent ainsi générer des données non-physiques.

De plus, les méthodes multivariées de BC (MBC) ne sont pas assez efficaces et flexibles pour être appliquées sur de nombreux modèles et un nombre élevé de dimensions comme cela nécessaire pour l'étude des impacts des changements climatiques.
Ce projet, en collaboration avec M. Vrac et P. Yiou (LSCE), a pour but de : i) Développer des méthodes de MBC applicables à de grands ensembles multivariés, ii) Appliquer les MBCs à des simulations climatiques globales (CMIP6) et régionales (CORDEX/2), iii) Étudier les impacts hydrologiques, agronomiques et forestiers des changements climatiques à partir des corrections par MBC, iv) Étudier les incertitudes apportées par les données de référence utilisées en BC, v) Partager les algorithmes & corrections avec la communauté scientifique.

Neurosciences

L'étude de la reconfiguration temporelle des réseaux fonctionnels du cerveau est un sujet très actuel en neurosciences cognitives et computationnelles. Par ailleurs, son investigation nécessite de nouveaux paradigmes allant au-delà des réseaux statiques. Notre but est de développer de nouveaux outils à partir de techniques venant de la physique statistique et non linéaire, et de l'inférence statistique. Nous avons déjà obtenu des résultats préliminaires dans le cadre du projet Inphyniti CNRS "Braintime".
Dans la suite, j'entends continuer mes travaux en collaboration avec l'Institut de Neurosciences de la Timone (Marseille) et en particulier, développer :
i) Des méthodes de réseaux temporels appliqués aux réseaux sociaux pour identifier les échelles temporelles de reconfiguration ;
ii) Des méthodes de la théorie des événements extrêmes pour trouver des analogues neuronaux de conditions atmosphériques extrêmes ;
iii) Des méthodes de problèmes inverses pour modéliser la configuration temporelle des réseaux cérébraux.
Nous analyserons la dynamique cérébrale à différentes échelles allant de l'apprentissage cognitif chez l'homme (données MEG et EEG intracrânien), pendant l'état de repos à diffèrents âges pendant le vieillissement (IRMf), l'activité de populations neuronales chez des modèles animaux d'épilepsie, ainsi que des données simulées par « The Virtual Brain ».

Valorisation

Mes activités de valorisation portent sur la perception des événements extrêmes par la société. En particulier, depuis 2018, je participe aux incubateurs CNRS : L'Incubateur de Médiation Scientifique du CNRS est un projet porté par la direction de la communication du CNRS en partenariat avec l'AMSCTI et l'ISC-PIF. La mission de cet incubateur est d'accompagner des chercheur.se.s et médiateurs.trices scientifiques à travers toutes les étapes de la conception d'un projet de médiation innovant et grand public portant sur un thème défini. Le thème choisi pour l'année 2018-2019 est l'approche systèmes complexes. Dans ce cadre, je porte le projet ClimarisK:
La Problématique que nous abordons est : comment mettre en évidence la complexité et l'interdisciplinarité du système climatique terrestre, les interactions entre mécanismes « humains » (économiques, sociaux, politiques...), écologiques et climatiques ?
L'objectif pédagogique général est d'explorer les effets des choix d'atténuations (mitigation) et d'adaptation aux événements extrêmes climatique au niveau local, régional et global. Explorer les mécanismes de rétroaction (notamment physique) qui produisent des effets extrêmes sur le système climatique. Nous proposons un double dispositif de médiation en miroir : i) Une appli ludique sur support Android/IOS, jouée à un nombre de joueurs allant de 1 à 6, pouvant être jouée partout (à la maison, dans le métro). Durée : entre 6 et 20 à minutes.

Des joueurs experts scientifiques, tels des youtubeurs, commentent leurs propres parties pour en faire des tutoriels disponibles sur youtube ; ii) Le jeu est augmenté des expériences et d'expositions complémentaires dans l'incubateur Palais de la découverte, l'IPSL.
Les joueurs, tous responsables d'une région du monde différente (avec des climats différents : antarctique, aride…), sont confrontés à des évènements climatiques extrêmes. Ils ont une mission différente selon le profil qu'ils ont choisi (responsable d'un pays protectionniste ou pas, écologiste, militariste...) et la région qui leur est attribuée. À chaque tour, des événements extrêmes (par exemple, une inondation) frappent les régions (l'occurrence des évènements est régie par un modèle climatique probabiliste qui prend en compte la concentration globale de CO2). Les joueurs réagissent à un niveau local (construire un barrage) ou global (par exemple imposer une taxe sur l'essence). Les effets des décisions à court terme, moyen terme et long terme, calculés par des experts scientifiques, modifient la popularité des joueurs et la concentration globale de CO2. La rétroaction temporelle est aussi prise en compte dans les calculs. Par exemple, une action qui aurait eu un effet positif (par rapport à l'objectif) en 2019, pourrait avoir un effet négatif en 2030. Les choix des joueurs leur font gagner/ou perdre des points de popularité. La partie documentation/analyse scientifique serait portée par des tutoriels (parties filmées d'experts scientifiques qui jouent au jeu) accessible sur Youtube. Un contenu scientifique concentré sera téléchargeable à partir du jeu. Conception du jeu en poupées russes, dont le nombre dépendra du budget : La première version comporterait une carte du monde et plusieurs niveaux de difficulté. Le jeu se complexifierait ensuite au cours des années (plus de régions, plus d'événements extrêmes, plus d'actions…).

3.5 Références projet

Barnes, Elizabeth A., et al. "Exploring recent trends in Northern Hemisphere blocking." *Geophysical Research Letters* 41.2 (2014): 638-644.

Cassou, Christophe, and Julien Cattiaux. "Disruption of the European climate seasonal clock in a warming world." *Nature Climate Change* 6.6 (2016): 589.

Cattiaux, J., et al. "Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate." *Geophysical Research Letters* 37.20 (2010).

Chen, Hans W., Fuqing Zhang, and Richard B. Alley. "The robustness of midlatitude weather pattern changes due to Arctic sea ice loss." *Journal of Climate* 29.21 (2016): 7831-7849.

Cohen, Judah, et al. "Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather." *Nature geoscience* 7.9 (2014): 627.

Deser, Clara, James W. Hurrell, and Adam S. Phillips. "The role of the North Atlantic Oscillation in European climate projections." *Climate Dynamics* 49.9-10 (2017): 3141-3157.

Done, James, Christopher A. Davis, and Morris Weisman. "The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model." *Atmospheric Science Letters* 5.6 (2004): 110-117.

Dufresne, J-L., et al. "Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5." *Climate Dynamics* 40.9-10 (2013): 2123-2165.

Faranda, Davide, et al. "Extreme value statistics for dynamical systems with noise." *Nonlinearity* 26.9 (2013a): 2597.

Faranda, Davide. *Extreme Value Theory of geophysical flows*. Diss. School of Integrated Climate System Sciences, University Hamburg, 2013b.

Faranda, Davide, Gabriele Messori, and Pascal Yiou. "Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes." *Scientific reports* 7 (2017a): 41278.

Faranda, Davide, et al. "Dynamical properties and extremes of Northern Hemisphere climate fields over the past 60 years." *Nonlinear Processes in Geophysics* 24.4 (2017b): 713-725.

Faranda, Davide, et al. "Stochastic chaos in a turbulent swirling flow." *Physical review letters* 119.1 (2017c): 014502.

Faranda, Davide, Alvarez-Casto MC. Messori G. and Yiou, Pascal. "The Hammam effect: how a warm ocean makes weather forecasting easier". *Nature communication (under review)* 2018a.

Faranda, Davide, et al. "Computation and characterization of local sub-filter-scale energy transfers in atmospheric flows." *Journal of the Atmospheric Sciences* 2018 (2018b).

Faranda, D., Ghoudi, H., Guiraud, P., & Vaienti, S. (2018c). Extreme value theory for synchronization of coupled map lattices. *Nonlinearity*, *31*(7), 3326.

Fraedrich, Klaus, et al. "The Planet Simulator: Towards a user friendly model." *Meteorologische Zeitschrift* 14.3 (2005): 299-304.

Giamalaki, Katerina Claudie Beaulieu, Davide Faranda , Stephanie Henson, Simon Josey, Adrian Martin. Mechanisms triggering the 1976-77 regime shift in the North Pacific revealed by dynamical analysis. Journal of Geophysical Research - Oceans, 123 4388-4397, (2018).

Hempelmann, Nils, et al. "Web processing service for climate impact and extreme weather event analyses. Flyingpigeon (Version 1.0)." *Computers & Geosciences* 110 (2018): 65-72.

Kim, Baek-Min, et al. "Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss." *Nature communications* 5 (2014): ncomms5646.

Kuzzay, Denis, Davide Faranda, and Bérengère Dubrulle. "Global vs local energy dissipation: The energy cycle of the turbulent von Kármán flow." *Physics of Fluids* 27.7 (2015): 075105.

Lehmann, Jascha, and Dim Coumou. "The influence of mid-latitude storm tracks on hot, cold, dry and wet extremes." *Scientific reports* 5 (2015): 17491.

Lorenz, Edward N. "Deterministic nonperiodic flow." *Journal of the atmospheric sciences* 20.2 (1963): 130-141.

Lorenz, Edward N. "Irregularity: A fundamental property of the atmosphere." *Tellus A* 36.2 (1984): 98-110.

Lorenz, David J., and Eric T. DeWeaver. "Tropopause height and zonal wind response to global warming in the IPCC scenario integrations." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*112.D10 (2007).

Lucarini, Valerio, Faranda D. et al. *Extremes and recurrence in dynamical systems*. John Wiley & Sons, 2016.

Madonna, Erica, et al. "The link between eddy-driven jet variability and weather regimes in the North Atlantic-European sector." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*143.708 (2017): 2960-2972.

Niziol, Thomas A., Warren R. Snyder, and Jeff S. Waldstreicher. "Winter weather forecasting throughout the eastern United States. Part IV: Lake effect snow." *Weather and Forecasting*10.1 (1995): 61-77.

Overland, James E., and Muyin Wang. "Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice." *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 62.1 (2010): 1-9.

Ragone, F., Wouters, J., & Bouchet, F. (2018). Computation of extreme heat waves in climate models using a large deviation algorithm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(1), 24-29.

Rodrigues, David, M Carmen Alvarez Castro, Gabriele Messori, Pascal Yiou and Davide Faranda. "Dynamical properties of the North Atlantic atmospheric circulation in the past 150 years in CMIP5 models and the 20CRv2c Reanalysis." *Journal of Climate* 2018 (2018).

Saw Ewe-Wei, D. Kuzzay, Davide Faranda, Alex Guittonneau, Francois Daviaud, Cecile Wiertel-Gasquet, Vincent Padilla, Berengere Dubrulle. Experimental characterization of extreme events of inertial dissipation in a turbulent swirling flow. Nature Communications, 7, 12466, 2016.

Shepherd, Theodore G. "Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections." *Nature Geoscience* 7.10 (2014): 703.

Screen, James A., et al. "Atmospheric impacts of Arctic sea-ice loss, 1979–2009: Separating forced change from atmospheric internal variability." *Climate dynamics* 43.1-2 (2014): 333-344.

Screen, James A. "The missing Northern European winter cooling response to Arctic sea ice loss." *Nature communications* 8 (2017): 14603.

Strong, Courtenay, Gudrun Magnusdottir, and Hal Stern. "Observed feedback between winter sea ice and the North Atlantic Oscillation." *Journal of Climate* 22.22 (2009): 6021-6032.

Tibaldi, Stefano, and A. Buzzi. "Effects of orography on Mediterranean lee cyclogenesis and its relationship to European blocking." *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 35.4 (1983): 269-286.

Vavrus, S., et al. "The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming." *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 26.9 (2006): 1133-1147.

Wu, Qigang, and Xiangdong Zhang. "Observed forcing-feedback processes between Northern Hemisphere atmospheric circulation and Arctic sea ice coverage." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115.D14 (2010).

Yiou, Pascal, et al. "Ensemble reconstruction of the atmospheric column from surface pressure using analogues." *Climate dynamics* 41.5-6 (2013): 1333-1344.

4. SELECTION DE CINQ PUBLICATIONS

4.1 Faranda et al. "Numerical convergence of the block-maxima approach to the generalized extreme value distribution"*. Journal of Statistical Physics, 145(5):1156-1180, 2011.*

Puisque la dynamique détermine la récurrence des observations dans les systèmes naturels, nous avons étudié plusieurs classes de systèmes dynamiques d'un point de vue théorique et numérique, en déterminant les conditions nécessaires pour l'application de la théorie des valeurs extrêmes. Ce cadre est pertinent pour les applications géophysiques dans lesquelles la turbulence à petite échelle ainsi que l'incertitude sur les mesures jouent le rôle du bruit.

4.2 Faranda e al. "The switching between zonal and blocked mid-latitude atmospheric circulation from a dynamical systems perspective"*. Climate Dynamics*, 1-13, 2015.

Dans cet article, nous appliquons de nouveaux outils mathématiques basés sur le calcul d'un indice extrémal afin de réexaminer les mécanismes dynamiques responsables des transitions entre les flux zonaux et bloqués. Nous rejetons l'affirmation selon laquelle la circulation aux latitudes moyennes présente deux équilibres stables distincts ou régimes chaotiques, en faveur d'un mécanisme plus simple qui est bien compris dans la théorie des systèmes dynamiques : nous identifions le flux bloqué comme un point fixe instable (ou point de selle) d'un attracteur chaotique d'un seul bassin, dominé par le régime des vents d'ouest.

4.3 Faranda et al. Stochastic Chaos in a Turbulent Swirling Flow *Physical review letters*, 119, 014502, 2017.

En 1963, le météorologue américain Edward Lorenz modélise la convection atmosphérique, sans turbulence, par trois équations déterministes. Celles-ci lui permettent de mettre en évidence pour la première fois l'effet papillon, signe d'un comportement chaotique illustré par cette interrogation : « Le battement d'aile d'un papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas ? » Cependant, pour les écoulements réels très fortement turbulents, les scientifiques n'avaient pas réussi à trouver un modèle aussi simple que celui de Lorenz**.** En s'appuyant sur l'expérience de laboratoire de von Karman, nous avons proposé un jeu de trois équations « simples » pour représenter un écoulement très turbulent. Ces équations conduisent à un comportement extrêmement chaotique qu'on pourrait qualifier de « super-effet papillon ». Il s'agit là d'un bon point de départ pour décrire des phénomènes atmosphériques complexes comme les nuages ou les précipitations.

4.4 Faranda et al. "Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes". *Scientific Reports*, 7-41278, 2017.

Cette étude démontre que les extrêmes géophysiques sont engendrés par des extrêmes de systèmes dynamiques. Les métriques des systèmes dynamiques nous permettent de déterminer la rareté et la prédictibilité des champs de circulation atmosphérique avant de faire un modèle de prévision météorologique. L'analyse d'un champ journalier demande seulement une seconde sur un ordinateur portable.

4.5 Faranda et al. "The Hammam effect or how a warm ocean enhances large scale atmospheric predictability" *Nature Communications*, (10) 1316, 2019.

Dans cet article, nous nous sommes demandés si le changement climatique en cours pouvait faciliter ou compliquer la prévision météorologique en bouleversant le chaos atmosphérique. Nous avons trouvé qu'une augmentation significative de prévisibilité était associée aux simulations avec un océan plus chaud, à l'image d'un hammam. *L'effet hammam* altère significativement les propriétés chaotiques de l'atmosphère, ce qui facilite les prévisions météorologiques. Ce n'est pas vraiment une bonne nouvelle parce que ces changements correspondent à de profondes modifications de l'atmosphère : les régimes de temps (alternances de perturbations et de temps stable) seront profondément altérés. De plus, bien que l'analyse des modèles climatiques du GIEC faite par les chercheurs ne montre pas de perturbation catastrophique de la circulation atmosphérique avant 2100, l'analogie avec des modèles mathématiques du chaos suggère que les modifications détectées pourraient être le premier symptôme d'un dérèglement majeur.

5. REMERCIEMENTS

La recherche est toujours une expérience collective, humaine et sociale. Merci à tou.te.s ceux qui m'ont aidé dans cette tâche et en particulier (en ordre alphabétique):

A Adamou, T Alberti, MC Alvarez-Castro, L Bayard, J Bazire, H Bercegol, L Bopp, F Bouchet, P Bousquet, P Braconnot, T Caby, N Caud, S Charbit, S Chen, C Cornu, E Cortijo, F Daviaud, D Defrance, P De Luca, F D'Andrea, M D'Errico, B Dubrulle, C Franzke, J & ACM Freitas, V Gautard, F Gerry, M Ghil, G Gottwald, M Grenet, A Gualandi, L Gualtieri, C Herbert, M Holland, C Huguen, A Jezequel, J Jouzel, M Kageyama, T Kuna, D Kuzzay, F Ladieu, V Lembo, Leoncini, V Lucarini, P Manneville, G Messori, M Mihelich, E Mouche, M Nicol, P Naveau, N de Noblet, E Olivry, V Padilla, D Paillard, S Pascale, JY Peterschmitt, F Pons, A Pouquet, G Ramstein, C Rea, J Riboldi, B Saint-Michel, P Sepulchre, C Tessier, S Thalabard, S Thao, M Todd, G Turchetti, S Vaienti, S Vannitsem, R Vautard, E Vasini, N Vercauteren, M Vrac, C Wiertel, J Wouters, P Yiou.

-Tous les membres ESTIMR et CLIM du LSCE, l'Equipe Informatique du LSCE, la direction du LSCE, l'administration du LSCE et tous les membres du LSCE et du SPEC.

-Les collegues de l'IPSL et en particulier du LMD-ENS Paris.

-Les collegues du London Mathematical Laboratory.

-L'équipe ClimarisQ

-Les membres du comité d'évaluation HDR

-Ma famille (Luca, Mamma e Papà) et mes ami.e.s