

# **Axe structurant « Phénomènes extrêmes » Fédération W. Doebelin, CNRS, UNS, OCA**

**10 mai 2013**

## **Table des matières**

<b>1. Préambule : la motivation scientifique du projet</b>	<b>p. 1</b>
<b>2. Les forces en présence</b>	<b>p. 3</b>
<b>3. La description scientifique du projet</b>	<b>p. 4</b>
Thème 1	p. 4
Thème 2	p. 5
Thème 3	p. 6
Thème 4	p. 7
Thème transversal	p. 8
<b>4. Les collaborations en cours sur les phénomènes extrêmes</b>	<b>p. 8</b>
A. Ondes extrêmes	p. 8
B. Chocs, fractures et ruptures	p. 9
C. Grandes fluctuations dans les systèmes hors équilibre	p. 10
D. Interactions, réactions et transitions dans des conditions extrêmes	p. 11
<b>5. Fonctionnement et stratégie de développement</b>	<b>p. 12</b>

## **1. Préambule: la motivation scientifique du projet**

L'objectif de ce projet est d'engager les laboratoires de la fédération Doebelin dans un programme de recherche pluridisciplinaire ambitieux et de longue haleine dont le fil conducteur est la notion de "phénomène extrême".

Cette démarche part du constat qu'il existe des compétences de très haut niveau à Nice et à Sophia Antipolis dans le domaine de la physique, notamment de la physique des systèmes placés dans des situations "extrêmes", c'est-à-dire dont les caractéristiques se situent au-delà des conditions, des états ou des événements normalement associés au système considéré.

Notre environnement fournit des exemples spectaculaires de phénomènes extrêmes qui parfois impactent sérieusement la société. Les tremblements de terre par exemple résultent de l'accumulation considérable d'énergie de déformation dans le sous-sol de la Terre du fait des mouvements des plaques lithosphériques, ce qui conduit au-delà d'un certain seuil à une relaxation brutale le long de grandes failles préexistantes et la génération d'ondes souvent destructrices. Le problème est que la physique de ce phénomène reste mal connue et son déclenchement et sa propagation restent largement imprévisibles. Un autre exemple bien connu est le phénomène de "vague scélérate" qui s'observe parfois à la surface des océans et qui est responsable de catastrophes maritimes. Ces vagues sont rares et sont extraordinaires par leur amplitude qui dépasse de loin ce que les théories "classiques" permettent de prédire. Leur existence a d'ailleurs longtemps été mise en doute en raison de la rareté des

observations. Elles font aujourd'hui l'objet de recherches actives et leurs analogues optiques dans des milieux désordonnés et non linéaires constituent, entre autres grâce à la taille des échantillons statistiques disponibles, un extraordinaire champ d'investigation.

D'autres phénomènes extrêmes se situent à des échelles qui n'affectent pas directement la société. Ils n'en sont pas moins importants pour comprendre l'organisation et l'évolution des systèmes physiques, depuis l'échelle atomique jusqu'à l'échelle astronomique. Par exemple la formation des planètes par collision d'objets en orbite autour du soleil est un phénomène extrême, de même que la collision de galaxies ou de trous noirs. A l'opposé dans l'échelle des longueurs, l'état de la matière connu sous le nom de "condensat de Bose-Einstein", lorsqu'un gaz dilué est refroidi à une température proche du zéro absolu, est un phénomène extrême (de par les conditions de son apparition). Il s'agit d'une manifestation macroscopique de la nature quantique de la matière dont l'étude joue un rôle clef dans la compréhension de propriétés fondamentales ou émergentes telles que superfluidité et supraconductivité.

Les phénomènes extrêmes se manifestent dans une grande gamme d'échelles spatiales ou temporelles et dans de nombreux systèmes physiques. Ils résultent souvent de l'interaction de processus ou d'échelles très différents. Leur étude requiert la mobilisation de **compétences pluridisciplinaires** : mise au point d'instruments performants pour l'observation, expérimentation en laboratoire, modélisation, étude mathématique, statistique et numérique des modèles... Du fait de la complexité des problèmes, ces différents domaines doivent impérativement se parler entre eux.

**Nice et sa région ont une double chance.** Celle d'une part de disposer de ces compétences pluridisciplinaires dont le dénominateur commun est la physique. Celle d'autre part de disposer d'une structure fédérative, la fédération W. Doebelin, à même d'organiser et de coordonner les échanges entre ces disciplines pour faire progresser la recherche sur les phénomènes extrêmes.

Le projet a aussi pour origine la demande de labex Xtrem qui avait été présentée en 2011 par l'Observatoire de Nice-Cote d'Azur (OCA) qui regroupe trois unités (Artémis, Géoazur et Lagrange) en collaboration (entre autres) avec les laboratoires de physique de l'UNS: INLN et LPMC, par ailleurs UMR du CNRS. Le labex Xtrem devait fédérer ces laboratoires dans le même esprit pluridisciplinaire autour de la thématique « phénomènes extrêmes », avec un focus géo/astrophysique et une composante « instrumentation » importante. Comme d'autres, ce labex n'a pas été retenu en dépit de la qualité scientifique du projet et de son rôle fédérateur pour la recherche niçoise.

Notre ambition est de reprendre ce flambeau, dans une version différente, sans doute moins ambitieuse mais très pertinente sur le plan scientifique et **recentrée autour de la physique**. En effet, la physique est au cœur des phénomènes que l'on étudie dans ce cadre et les laboratoires de physique niçois (LPMC sur le campus Valrose, CRHEA et INLN à Sophia Antipolis) rassemblent des compétences très fortes sur cette thématique. Par ailleurs l'intégration au projet d'équipes du laboratoire de mathématiques J-A Dieudonné (UMR du CNRS, membre de la fédération Doebelin) renforcera la composante « modélisation ».

A la suite d'une visite à l'UNS de la directrice de la Mission pour l'Interdisciplinarité du CNRS en janvier dernier, celle-ci a accordé une subvention de 40 k€ à la fédération Doebelin au titre de *projet exploratoire premier soutien* (peps) pour le projet « phénomènes extrêmes » sur le site de Nice Sophia Antipolis. Ce soutien est un signal fort de la part des tutelles vis-à-vis de la fédération Doebelin et de ses laboratoires membres. C'est pourquoi nous pensons qu'une opportunité réelle existe aujourd'hui pour créer dans notre région un pôle d'excellence pluridisciplinaire autour des phénomènes extrêmes, avec l'appui de l'UNS, du CNRS, et un soutien qui sera, nous l'espérons, accordé par les pouvoirs publics au niveau local et régional.

## 2. Les forces en présence

La pertinence du projet repose sur la diversité des compétences présentes dans les laboratoires de la fédération Doebelin. Le tableau ci-dessous décrit succinctement les laboratoires associés à cette initiative et leurs principales expertises dans le cadre des « phénomènes extrêmes » (description indicative et non exhaustive). Ces laboratoires de l'Université de Nice Sophia Antipolis sont des UMR du CNRS excepté le CRHEA qui est une unité propre. Artemis, Géoazur et Lagrange sont aussi des unités de l'Observatoire de la Côte d'Azur:

- **Artemis** (UMR CNRS 7250);
- **CRHEA** (UPR CNRS 10) ;
- **Géoazur** (UMR CNRS 7329, UR 082 de l'IRD);
- **Institut Non Linéaire de Nice** (INLN, UMR CNRS 7335);
- **Laboratoire Lagrange** (UMR CNRS 7293);
- **Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné** (LJAD, UMR CNRS 7351);
- **Laboratoire de Physique de la Matière Condensée** (LPMC, UMR CNRS 7336).

<b>Laboratoire</b>	<b>Equipes concernées par les phénomènes extrêmes</b>
<b>ARTEMIS</b>	<i>Méthodes et instrumentation pour la détection des ondes gravitationnelles (Virgo) Bruits et Signaux aux Limites</i>
<b>CRHEA</b>	<i>Electro (semi conducteurs à base de <a href="#">nitrides</a>, de <a href="#">SiC</a> ou de <a href="#">graphène</a>) Opto (applications opto-électroniques) Nano (nanostructures)</i>
<b>GEOAZUR</b>	<i>Dynamique des Failles et des Séismes Aléas et Vulnérabilités : Couplages, Processus et Conséquences Dynamique des Marges convergentes Dynamique Orogénique : Transferts et Couplages Imagerie et Ondes Astro/Géophysique</i>
<b>INLN</b>	<i>Physique Non-linéaire et Hors-équilibre Atomes froids Dynamique et complexité photoniques Systèmes fortement corrélés et gaz quantiques Optique non linéaire des cristaux liquides Physique théorique</i>
<b>LAGRANGE</b>	<i>Dynamique non linéaire, mécanique des fluides et turbulence Théories et Observations en Planétologie Théories et Observations en Planétologie Galaxies et cosmologie Physique stellaire et solaire Traitement du signal/images</i>
<b>LJAD</b>	<i>Modélisation Numérique et Dynamique des Fluides Analyse Numérique et Equations aux Dérivées Partielles Probabilités et statistiques Interfaces</i>

Il faut remarquer que les compétences indiquées ci-dessus balayent tout l'éventail de la méthodologie scientifique: observations, expérimentation et instrumentation, aussi bien que modélisation et outils mathématiques.

### 3. La description scientifique du projet

Comme indiqué dans le préambule la notion de « phénomène extrême » est prise ici dans un sens épistémique et s'il inclut les catastrophes naturelles telles que séismes, tsunamis et glissements de terrain, il concerne plus généralement les phénomènes physiques « hors norme » dont l'étude est essentielle pour comprendre l'organisation intime et le comportement des ondes et de la matière. Il est dès lors nécessaire d'envisager les phénomènes extrêmes sous différents angles. Par exemple on peut évoquer la notion d'évènement extrême et par là indiquer un évènement dont l'intensité ou l'ampleur est située à l'extrémité de la distribution d'intensité pour ce type d'évènement. De la même façon, on peut proposer les notions d'états ou de mesures extrêmes faisant référence à des états très éloignés de l'état normal d'un système et à des mesures qui atteignent ou dépassent des limites fondamentales. Enfin, les phénomènes physiques prenant place à des échelles ou dans des conditions extrêmes (des conditions qui mettent en jeu l'intégrité du système par exemple) trouvent naturellement leur place dans le présent projet.

Dans cette optique, les phénomènes extrêmes ont été regroupés dans cinq grands thèmes qui sont décrits ci-dessous. Le cinquième thème est de nature un peu différente car il ne porte pas sur les objets mais sur les méthodes. Il s'agit donc d'un **thème transversal**. Dans chacun de ces thèmes des équipes niçoises sont déjà à l'œuvre sur des projets collaboratifs dont certains sont à ce titre soutenus par la fédération Doebelin. Ces projets seront détaillés dans le paragraphe suivant.

Il est important de souligner que ces thèmes ne doivent pas être vus comme des **directions** de recherche exclusives ou limitatives. Au contraire il s'agit de bases conceptuelles qui ont le potentiel, au moment de la rédaction de ce projet, de fédérer et structurer l'avancement des connaissances sur les phénomènes extrêmes. L'évolution de ces thèmes, voire la naissance de thèmes nouveaux au cours du déroulement du présent projet devront être considérés comme des indicateurs de progrès puisque ces évolutions seront la conséquence d'une part des avancées scientifiques réalisées et d'autre part de la naissance de nouvelles activités collaboratives ayant trait aux phénomènes extrêmes.

#### Thème 1: ondes extrêmes

L'image de la houle se propageant à la surface de l'océan est familière à tout le monde. L'analyse classique des équations de propagation de ces *ondes de gravité* consiste à les supposer périodiques et à les voir comme une somme de composantes de Fourier interagissant entre elles selon des règles simples. Cette approche *faiblement non linéaire* est mathématiquement rigoureuse lorsque l'amplitude des ondes est faible relativement à leur longueur. Lorsqu'une vague se propage dans une zone où la profondeur diminue, cela conduit par un effet mécanique à une augmentation de son amplitude jusqu'au point où un phénomène très non linéaire se produit (déferlement). Un tsunami est une manifestation extrême de ce phénomène. Mais même lorsque la profondeur est grande, des vagues de hauteur exceptionnelle se forment parfois à la surface de l'océan, ce qu'on appelle des *vagues scélérates*. Ces vagues peuvent être observées autrement qu'à la surface de la mer, par exemple dans des dispositifs optiques où les ondes sont produites par des lasers ou par des générateurs de micro-ondes, ce qui permet de les observer en laboratoire et donc de les étudier avec une grande précision (activité soutenue

par l'ANR : projets Optiroc et Molosse). Le mécanisme par lequel ces ondes très particulières se forment est encore très mal compris.

Des ondes solitaires d'amplitude exceptionnelle sont également observables dans des dispositifs expérimentaux où les ondes de surface sont produites par la vibration verticale d'un récipient contenant un liquide (instabilité de Faraday). Cette expérience est connue pour produire de nombreux types de structures auto organisées et des transitions vers le chaos spatio-temporel qui sont largement étudiées, mais la formation d'ondes isolées de très grande amplitude est un phénomène qui pour l'instant n'est absolument pas compris.

Lorsqu'une onde se propage dans un milieu hétérogène désordonné, sa progression peut être entravée, ou même stoppée, ce qui conduit à un état de l'onde tout à fait inhabituel. Ce phénomène connu sous le nom de *localisation d'Anderson* s'observe dans différents dispositifs expérimentaux, par exemple des cavités micro-ondes ou des ondes quantiques (dans un condensat de Bose-Einstein). Ici, c'est la combinaison des effets non linéaires et du désordre dans le milieu qui doit être étudiée pour comprendre le phénomène. Cette interaction peut produire des dynamiques très riches et constitue un vaste champ d'exploration.

Tout progrès dans ces secteurs de recherche passera nécessairement par la confrontation des observations expérimentales, en mécanique des fluides comme en optique et photonique, et des modèles mathématiques que l'on peut construire à partir des lois fondamentales de ces systèmes physiques. L'ensemble des laboratoires de la fédération Doebelin est concerné par ce thème à l'un de ces titres.

## **Thème 2: chocs, fractures et ruptures**

Les processus de rupture, de chocs et de fractures ont un rôle essentiel dans de nombreux phénomènes, qu'ils soient observés dans un contexte physique, biophysique, astrophysique ou géodynamique.

La physique hors équilibre contrôlant ces processus est encore mal comprise, tout comme le rôle des propriétés mécaniques des matériaux dans le déclenchement et le comportement de la rupture. Par exemple, la très forte sensibilité des mécanismes de rupture aux interactions à très courte portée dans les verres rend ces phénomènes particulièrement difficiles à prédire. Il est pourtant indispensable de progresser sur la prédiction des événements de rupture, au vu par exemple de l'impact des phénomènes de cavitation ou bien sur de rupture sismique.

Les séismes, les glissements de terrain, comme les processus de fragmentation et de collision dans notre système solaire ou dans d'autres systèmes planétaires impliquent des processus de rupture. La physique hors équilibre contrôlant ce processus, comme le rôle des propriétés mécaniques des matériaux dans le déclenchement et le comportement de la rupture sont encore mal compris. Dans le cas de la formation des planètes la phase de fragmentation associée à la collision des corps doit être améliorée en incluant des processus comme la formation de microfracture ou d'endommagements non élastiques.

Jusqu'à aujourd'hui la naissance, la rupture sismique et le développement long terme des failles est basé sur un modèle mécanique très simple avec une faille de géométrie généralement planaire, ayant une épaisseur très faible ou nulle et affectant un milieu également simple assimilable à un milieu homogène élastique. Cette simplification a permis le développement de modèles mécaniques, reproduisant au premier ordre certaines des propriétés macroscopiques des failles et des ruptures. Toutefois depuis une dizaine d'années, l'augmentation et l'amélioration des observations dont nous disposons montrent que les failles sont intégrées dans des réseaux complexes de failles et que la rupture sismique n'est sans doute pas limitée à une zone étroite comme supposé jusqu'à présent, mais affecte

un large volume autour de ce plan.

Une telle nouvelle vision 3D des failles et des ruptures a des implications critiques dont les principales sont: 1) le milieu faillé, soit principalement la croûte, ne se comporte pas de façon strictement élastique. Tous les modèles simples produits jusqu'à présent sont donc partiellement inexacts; 2) Les failles et les ruptures ne sont pas des objets individuels dont on pourrait 'facilement' analyser les propriétés, mais au contraire des systèmes ayant un comportement collectif nécessitant une description à la fois individuelle et d'ensemble.

La modélisation des collisions entre petits corps rocheux pendant la formation des planètes développée à Lagrange, l'étude expérimentale et numérique de la fracturation conduite à Géoazur ainsi que les modèles granulaires développés au LPMC viendront s'enrichir mutuellement et permettront sans doute des progrès significatifs dans la compréhension des processus de fracturation.

### **Thème 3: grandes fluctuations dans les systèmes hors équilibre**

Un événement extrême peut souvent s'interpréter comme l'excursion d'un système physique très loin de son équilibre naturel. C'est par exemple le cas dans un fluide turbulent où des échanges intenses d'énergie localisés en temps et en espace peuvent altérer de manière dramatique les propriétés globales de l'écoulement. Dans de telles situations, les non linéarités du système sont souvent responsables de fluctuations fortes, non gaussiennes, qui ne peuvent pas être décrites en termes de champs moyens. Qu'il s'agisse de particules quantiques piégées, de fluides, de matériaux mous ou granulaires, de réactants chimiques ou d'espèces biologiques interagissant et diffusant dans un milieu complexe, de tels systèmes hors équilibre développent des instabilités, bifurquent, forment des motifs ou des singularités et suivent en général des lois d'échelle anormales ne pouvant être prédites par analyse dimensionnelle. L'approche thermostatique classique ne permet pas de décrire de tels systèmes. Toutefois, ceux-ci développent des propriétés universelles qui peuvent être comprises en termes de systèmes dynamiques aléatoires, de lois de conservation statistiques, de grandes déviations, de relations fluctuation-dissipation...

Au sein de la fédération Doebelin ces techniques sont utilisées par exemple pour étudier le transport passif par des écoulements turbulents et ont ouvert la voie à des expériences de laboratoire sophistiquées et à des simulations numériques utilisant des ressources de calcul parmi les plus performantes au monde. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs financements ANR et d'une bourse jeune chercheur de l'ERC (projet *Atmoflex*) pour l'étude des événements extrêmes dans l'atmosphère. L'application de ces techniques à autre type d'écoulement géophysique, le mouvement de convection du fer liquide dans le noyau de la terre, est une approche prometteuse pour comprendre l'effet géodynamo, c'est à dire l'existence d'un champ magnétique planétaire dont les fluctuations conduisent à des renversements des pôles magnétiques à intervalles irréguliers.

De nombreux autres processus naturels peuvent être étudiés de cette façon, des très petites échelles comme le développement et la dynamique d'une colonie de bactéries, jusqu'à la formation des planètes par accrétion de poussière autour d'une étoile, la dynamique des amas de galaxies, en passant par les glissements de terrains granulaires et la tectonique des plaques lithosphériques. Malgré leur diversité, ces situations ont en commun d'impliquer le couplage entre une multitude de processus microphysiques (réactions chimiques, transferts thermiques et radiatifs, interactions à longue portée, etc.) et de grandes gammes d'échelles spatiales et temporelles. Pour cette raison, ils ne peuvent être étudiés dans leur globalité, même si on était amené à les simuler sur les centres de calcul les plus performants.

Ces thèmes et ces méthodes réunissent une grande partie de la recherche en physique statistique et ses applications dans la région de Nice. Les approches théoriques et numériques développées à l'INLN et dans les laboratoires Dieudonné et Lagrange visent en général à étudier des modèles fortement simplifiés. On ne cherche alors pas à reproduire de façon quantitative des conditions réelles, mais l'idée

est plutôt de découvrir et d'expliquer les propriétés qualitatives les plus robustes. Grâce à de telles simplifications, on peut contrôler l'intégralité des fluctuations microscopiques afin de déduire leur influence sur les grandeurs globales. En revanche, dans les expériences de laboratoires menées au LPMC et à l'INLN ou dans les observations astrophysiques ou géophysiques, le détail des fluctuations et l'ensemble des processus physiques en jeu ne sont pas facilement accessibles. Dans ce cas, on mesure et on cherche à prédire leur influence sur les variations des grandeurs macroscopiques. Des progrès significatifs sont attendus du développement et de la consolidation des liens entre ces deux approches complémentaires.

#### **Thème 4: Interactions, transitions dans des conditions extrêmes**

Un environnement extrême représente un véritable défi, tant pour l'observation et la mesure des processus qui y ont lieu que pour leur compréhension et leur modélisation. Par ailleurs, c'est souvent aussi un risque majeur pour les propriétés ou l'intégrité des matériaux ou instruments qui y sont soumis. Il peut s'agir de valeurs très faibles ou très élevées de la température, des radiations, de la pression, de la densité... Des phénomènes très divers mais relevant de ce thème sont étudiés dans les laboratoires de la fédération Doebelin, on en mentionne ici quelques exemples.

- Un nuage d'atomes porté à une température extrêmement basse (nano ou microkelvins) montre des comportements collectifs complexes dont la description est parfois à la frontière entre la physique quantique et la mécanique des fluides. Un exemple est l'état superfluide où aux échelles suffisamment grandes, le système est décrit par deux fluides non miscibles. L'un est parfaitement non visqueux et l'autre représente les fluctuations thermiques des atomes excités. Aux plus petites échelles, l'aspect quantique impacte fortement la dynamique. La vorticité est quantifiée et la dissipation se fait par émission d'ondes sonores. Les similitudes entre cet état de turbulence quantique et la turbulence hydrodynamique classique permettent de décrire de façon statistique la dynamique des condensats de Bose–Einstein et de l'Hélium superfluide. Même dans un état non condensé, comme par exemple dans un piège magnéto-optique, une description cinétique, voire hydrodynamique, permet d'étudier la dynamique complexe du système. Une collaboration entre les équipes niçoises sur ce sujet permettra de comprendre si des interactions lumineuses entre atomes permettent de créer un état turbulent et d'étudier la possibilité de simuler en laboratoire des systèmes autogravitants à trois dimensions.

- Sous certaines conditions extrêmes de contraintes, les interactions entre un fluide et des particules qui y sont suspendues reste à ce jour mal compris. La raison essentielle pour cela est que leur couplage dépend de façon critique de la quantité d'impuretés que l'on peut trouver dans la phase fluide. Dans les milieux très denses, la dynamique du fluide est assujettie au mouvement des grains. Toutefois, la présence d'un fluide interstitiel affecte très fortement les contraintes de cisaillement des grains. Dans le cas opposé, de suspensions très diluées, les impuretés sont transportées par l'écoulement. Néanmoins, leurs taille et masse finies sont responsables de phénomènes de ségrégation et de l'apparition de corrélation entre leur distribution et les structures de l'écoulement.

- L'astrophysique et la géophysique fournissent un grand nombre d'exemples de processus se produisant dans des conditions extrêmes et qui pour ces raisons ne sont que très difficilement, voire pas du tout, reproductibles par des expériences de laboratoire. Pour l'essentiel, on ne connaît ces processus que par les observations que l'on peut en faire depuis la terre ou bien l'espace et un effort important de modélisation est nécessaire pour pouvoir les expliquer et les reproduire. Les interactions et les couplages entre processus, les réactions chimiques et les transitions de phases qui peuvent avoir lieu dans de telles conditions extrême ne peuvent pas être décrites par les approches classiques et leur compréhension reste à ce jour un sujet très actif de recherches.

Par exemple la détection et l'observation des planètes extra solaires a connu des développements formidables au cours de ces dernières années. La prochaine génération d'instruments d'observation ouvrira de nouveaux questionnements sur les qualifications de ces planètes pour la présence de vie. Pour s'attaquer à cette question, une idée est de développer une stratégie basée sur l'analyse

spectroscopique. Par exemple, les bactéries « extrêmophiles » peuplant la haute atmosphère de la Terre ont très certainement une signature spectrale dans le rayonnement émis dans l'espace par notre planète. Des efforts pluridisciplinaires en astronomie, biologie, chimie et physique de l'atmosphère permettront de développer les savoir-faire nécessaires pour détecter ces êtres vivants. Ces résultats permettront les développements instrumentaux nécessaires pour la détection d'une bio-signature dans les atmosphères des planètes du système solaire et, à plus long terme, des exoplanètes lorsque leurs spectres seront accessibles.

Mentionnons également le défi de la fusion thermonucléaire contrôlée à travers le projet international ITER, dont l'objectif est d'étudier la faisabilité de ce processus dans des conditions pré-industrielles. Les conditions extrêmes de température du plasma produit pendant la réaction rendent indispensable la simulation numérique des processus en jeu pour mettre au point les meilleures conditions expérimentales. Une équipe du LJAD est impliquée dans ce projet.

### **Thème transversal : les méthodes de la recherche**

- Mathématiques : EDP, contrôle optimal, probabilités et statistiques, systèmes dynamiques, traitement du signal...
- Instrumentation (expérimentations, observations) : optique adaptative, interférométrie, capteurs...
- Informatique : calcul haute performance, grandes bases de données....

## **4. Les collaborations en cours sur les phénomènes extrêmes au sein de la fédération Doebelin**

Les collaborations sur les phénomènes extrêmes font déjà partie des activités des laboratoires de la fédération Doebelin. Certains de ces projets sont financés en partie par la fédération, d'autres pas. Cependant la fédération soutient les projets listés ci-après. Les sujets de recherche sont rapidement décrits ainsi que les participants et les sources actuelles de financement. Une rubrique « demande de moyens » complète la description. Dans plusieurs cas la possibilité de recruter un post-doctorant ou un doctorant est d'une grande nécessité. C'est par le recrutement de jeunes chercheurs capables de faire le lien entre des disciplines différentes que ces projets pourront véritablement se développer et donner des résultats qui justifieront amplement les investissements.

### **A. Ondes extrêmes**

#### *1) Vagues fortement non linéaires*

La fédération Doebelin soutient depuis 2012 une étude expérimentale et théorique de vagues très non linéaires menée conjointement au LPMC (J. Rajchenbach), à l'INLN (L. Gil) et au LJAD (D. Clamond). L'expérience est réalisée en faisant vibrer verticalement un récipient ouvert rempli par un fluide. Sous certaines conditions des vagues de très grande raideur sont observées ainsi que des motifs très inhabituels. Leur analyse est hors de portée des méthodes classiques mais l'approche numérique devrait jouer un rôle important pour comprendre ce phénomène.

Une collaboration commence également entre D. Clamond et M. Ioualalen (Géoazur) sur la mise au point de codes numériques performants pour calculer des vagues tridimensionnelles où des phénomènes non linéaires multiples sont pris en compte afin de se rapprocher au mieux des états de mer réalistes. Ce travail est susceptible d'applications aux études de structures en mer par exemple. Ce travail s'inscrit également dans une dynamique de recherche développée au sein de Géoazur sur



les relations entre glissement de terrain sous marin – tsunami et a fait l'objet d'un projet d'ANR déposé en janvier 2013 en collaboration avec le LJAD.

2) *Localisation d'ondes: désordre (U. Kuhl LPMC, G. Labeyrie INLN) et non linéarité (M. Giudici INLN, A. Michon CRHEA)*

Les phénomènes de localisation d'ondes sont étudiés dans de multiples contextes, de l'hydrodynamique à l'optique. Ils peuvent être basés sur les effets du désordre, sur l'effet des nonlinéarités du milieu dans lequel l'onde se propage ou sur l'interaction de ces deux mécanismes. Dans tous les cas la dimensionnalité du système, et donc la dimensionnalité du phénomène de localisation, est d'importance fondamentale. Deux projets collaboratifs centrés sur ces phénomènes sont actuellement soutenus par la fédération. Le premier de ces projets (INLN-LPMC) concerne l'aspect « désordre ». Une transition métal-isolant générée par des effets d'interférence en présence de désordre est attendue en trois dimensions d'espace si le désordre est suffisant (localisation d'Anderson). Au contraire, en basse dimension cette transition n'est pas attendue puisque tous les états sont alors localisés. Toutefois, ces résultats sont établis dans le cas de désordre parfaitement décorrélé. Si cette condition est relaxée de nouveaux effets sont attendus, comme par exemple une transition vers des solutions délocalisées même en basse dimension. S'appuyant sur les dispositifs expérimentaux complémentaires présents à l'INLN (condensat de Bose Einstein) et au LPMC (cavités microondes), ce projet vise à étudier l'impact de corrélations spatiales sur la propagation d'ondes classiques et quantiques dans des milieux désordonnés bidimensionnels. De façon complémentaire, le deuxième projet (CRHEA-INLN) est centré sur l'impact des nonlinéarités dans les phénomènes de localisation. Dans le cas particulier des ondes lumineuses, nombre d'expériences ont montré des exemples de localisation à une ou deux dimensions. Au contraire, la forme la plus extrême de localisation, la localisation en trois dimensions d'espace, n'a toujours pas été observée. C'est dans ce contexte qu'une expérience basée sur un laser à semiconducteur utilisant du graphène comme absorbant saturable est mise en oeuvre à l'INLN. Cette expérience est basée sur des échantillons préparés au CRHEA qui sont actuellement en cours de caractérisation à l'INLN. Cette activité allie donc d'une part l'expertise présente à l'INLN dans les phénomènes de localisation de la lumière et d'autre part le savoir faire et les capacités technologiques présentes au CRHEA sur la réalisation d'échantillons de graphène. Un projet de cofinancement d'une bourse de thèse a été déposé à la région PACA.

**B. Chocs, fractures et ruptures**

1) *Faïlles, séismes, endommagement (I. Manighetti et F. Cappa, Géoazur, E. Lemaire et X. Noblin, LPMC)*

Ce projet soutenu par l'OCA et la fédération Doebelin a pour objectif de caractériser l'endommagement volumique associé à la croissance des failles à partir d'une approche observationnelle et expérimentale. Il s'agit d'une approche interdisciplinaire entre la physique et la géophysique qui doit contribuer à faire progresser notre compréhension du fonctionnement des failles et des séismes et d'initier des collaborations entre géophysiciens et physiciens sur le site de Nice.

L'endommagement volumique qui semble concomitant au développement de la fracturation, depuis son stade cosismique jusqu'à son stade évolué, cumulé et permanent. La prise de conscience de l'existence de processus de diffusion cosismique et d'endommagement large, permanent, du milieu faillé est extrêmement récente, de sorte que de nombreuses questions de premier ordre restent posées, tandis que les modèles actuels de fracturation et de rupture ne prennent pas en compte cette complexité et sont donc partiellement inadéquats. Les implications de cette inadéquation sont multiples, incluant leur impact sur nos estimations de l'aléa sismique et notre

connaissance des réservoirs géologiques.

Ce problème est abordé en couplant l'observation de systèmes de failles naturels (volet porté essentiellement par Géoazur), la modélisation physique expérimentale de la fracturation et de l'endommagement dans des milieux granulaires (volet porté essentiellement par le LPMC), et la modélisation numérique hydromécanique visant à reproduire les observations (volet porté essentiellement par Géoazur). Le volet Observations porte sur l'analyse de l'architecture et des propriétés cinématiques et mécaniques de certains systèmes de failles naturels, appréhendées par une combinaison entre observation de leur expression de surface sur imagerie satellitaire et observation de leur structure profonde illuminée par les données de sismicité sur et autour de leurs plans. L'objectif est de caractériser les propriétés de l'endommagement macroscopique autour des failles et d'établir éventuellement des relations empiriques entre certaines propriétés des failles et certaines propriétés de leurs zones endommagées.

Le volet Expérimental porte sur le suivi en continu (par photoélasticité et PIV) du développement de fractures et de zones d'endommagement au sein de matériaux granulaires hétérogènes déformés sous différentes conditions, notamment en présence de fluides. Les matériaux granulaires sont un bon analogue des roches endommagées, de sorte que ces expériences devraient s'avérer pertinentes pour décrire et mesurer en continu les paramètres majeurs de l'endommagement (champs, voire volumes de déformations/contraintes, diffusion des fluides, évolution des propriétés de friction, etc), en regard des paramètres majeurs de la zone fracturée (taille, géométrie 2 et 3D, déformations/contraintes accommodées, etc).

Enfin le volet Modélisation numérique vise à développer des modèles hydromécaniques en 2 et 3D capables de reproduire les observations naturelles et expérimentales acquises, en examinant particulièrement le rôle des fluides.

## 2) *Dynamique rapide de plantes*

Le phénomène de cavitation est souvent considéré dans un contexte de propulsion hydrodynamique et il est alors une cause de dégradation des performances ou même d'endommagement du système considéré. Pourtant, ce mécanisme de rupture qui prend place lorsque la valeur d'une pression négative est trop importante tient aussi une place centrale dans les mouvements rapides de certaines plantes et conditionne ainsi leur survie en tant qu'espèce. En effet, la dispersion des spores chez les plantes joue un rôle critique dans la survie des espèces sous une forte pression de sélection. C'est pourquoi plusieurs espèces ont « inventé » des mécanismes ingénieux pour disperser efficacement leurs spores. Parmi ceux-ci, on peut citer le mécanisme de catapulte des sporanges de fougères, une catapulte dans laquelle l'énergie est emmagasinée dans les parois d'un réseau dense de fibres de cellulose sous l'effet de l'évaporation de l'eau et qui est déclenchée par la cavitation. L'analyse expérimentale (au LPMC) de cette dynamique et sa modélisation (à l'INLN) est maintenant une source d'inspiration pour la réalisation (au LPMC) de dispositifs micro-fluidiques permettant d'observer et d'analyser la dynamique de cavitation en conditions contrôlées.

Il est intéressant de noter que l'on retrouve dans ce contexte biologique un rapport d'échelles de temps comparable à celui rencontré dans les tremblements de terre. En effet, la propagation de la cavitation se déroule sur une échelle de l'ordre de la microseconde, alors que le processus complet évolue à l'échelle de plusieurs dizaines de minutes ; les vitesses mises en jeu allant jusqu'à 700 m/s.

## C. **Grandes fluctuations dans les systèmes hors équilibre**

### 1) *Grandes déviations, interactions à longue portée en régime turbulent*

La physique statistique et la théorie des champs appliquées à des modèles simples de transport (dans un champ aléatoire gaussien dépourvu de corrélations temporelles) ont mis en évidence deux

mécanismes qui peuvent conduire à des fluctuations extrêmes dans un champ de concentration transporté par un écoulement turbulent. Le premier est intrinsèquement lié à la nature même du transport et résulte en la formation de fronts à travers lesquels le champ de concentration varie de façon très abrupte. Le second mécanisme vient de l'inertie éventuelle des particules transportées. Lorsqu'elles sont plus lourdes que le fluide, elles ont tendance à être éjectées par effet centrifuge et se concentrent préférentiellement dans les zones d'étirement de l'écoulement. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs financements ANR communs aux laboratoires Lagrange (J. Bec, H. Homann, G. Krstulovic, Y. Ponty) et LJAD (S. Musacchio, D. Vincenzi) et d'une bourse jeune chercheur de l'ERC (projet Atmoflex) pour l'étude des événements extrêmes dans l'atmosphère.

La mécanique statistique et la théorie des systèmes dynamiques aléatoires permettent aussi d'étudier et de prédire la variabilité à grande échelle des systèmes ayant un très grand nombre de degrés de liberté, comme par exemple les écoulements géophysiques et astrophysiques, voire même le système climatique. Des illustrations de ce type de problème incluent les oscillations à basse fréquence et les comportements bistables des courants océaniques ou bien l'inversion du champ magnétique terrestre. La modélisation et le contrôle des fluctuations aux petites échelles jouent un rôle fondamental dans la compréhension de ces phénomènes.

Un projet concernant la turbulence et les dynamiques collectives dans un grand piège magnéto-optique est financé en 2013 par la fédération Doebelin. Les laboratoires niçois possèdent une expertise intéressante pour ce thème en pleine expansion : expérimentation à l'INLN, modélisation et simulation numérique pour les effets à longue portée en mécanique des fluides au LJAD et au laboratoire Lagrange.

## 2) *Vols de Lévy et transfert radiatif*

La diffusion multiple de la lumière dans des vapeurs atomiques chaudes ne suit pas une loi de distribution normale. L'étalement de la densité d'énergie est dominé par des événements rares décrits par les vols de Lévy, des événements extrêmes par leur position dans la distribution de probabilité. L'analyse de ce phénomène physique trouve un intérêt interdisciplinaire dans l'étude des champs magnétiques présents dans les régions calmes du soleil, qui sont encore mal connus. En effet, ces études sont basées sur la mesure de l'effet Hanle produit par un champ magnétique turbulent sur la polarisation de résonance de raies spectrales formées par diffusion du rayonnement. Des codes numériques de transfert radiatif destinés à l'analyse des observations existent mais ne sont pas testés en laboratoire. Ainsi apparaît clairement la nécessité d'expériences permettant de valider ou d'affiner ces codes en conditions contrôlées. En effet, certains effets (interférences impliquant plusieurs transitions atomiques) peuvent modifier les signaux détectés en polarisation. Un dispositif expérimental a été préparé et est étudié dans le cadre d'un stage de M2 à l'INLN et les observations sont analysées à l'OCA. Les premières observations expérimentales ont déjà permis d'affiner les codes numériques sans polarisation. La prochaine étape consiste à réaliser des mesures de polarisation en régime de diffusion multiple.

## D. **Interactions, réactions et transitions dans des conditions extrêmes**

### 1) *Dynamique de l'étalement d'une goutte sous-refroidie sur un substrat super-hydrophobe: vers la glaçophobia*

Aujourd'hui, l'élaboration des nouveaux matériaux peut se faire en mariant la physique de la matière condensée, la science des matériaux, l'ingénierie chimique et la biologie. Par exemple, en s'inspirant des feuilles de la plante lotus, il a été possible de fabriquer des surfaces super-hydrophobes (surfaces qui repoussent l'eau). Ces surfaces jouent un rôle important dans l'industrie car elles peuvent être auto-nettoyantes (verres, peintures) et elles offrent des propriétés de mouillage très contrôlées. Cette approche « biomimétique » est très développée depuis une dizaine d'années. Une très grande compétence existe à Nice dans le domaine de la physico-chimie

de ces surfaces très spéciales.

Il existe actuellement, un besoin industriel grandissant pour développer des surfaces glaço-phobes (sur lesquelles le givre et la glace ne prennent pas) et une piste intéressante pour développer ces surfaces super-glaçophobes seraient l'utilisation de la super-hydrophobicité.

Les applications dans l'aéronautique sont claires mais il en existe aussi dans des domaines terrestres (prise de la glace sur les gaines des câbles électriques, givre dans les réfrigérateurs et vitre des automobiles, etc.).

Cette problématique fait donc appel nous seulement à la physico-chimie des surfaces mais aussi à la thermodynamique hors équilibre et à la physique non-linéaire à travers les équations de la mécanique des fluides et de la cristallisation.

L'étude actuellement menée à l'INLN (T. Frisch) et au LPMC (F. Celestini, F. Guittard) concerne sur la dynamique de l'étalement d'une goutte sous-refroidie sur un substrat super-hydrophobes en fonction des paramètres du système (vitesse de la goutte, température, diamètre de la goutte et tension de surface). Le LPMC possède une solide expérience dans la fabrication et la synthèse des substrats super-hydrophobes et dans la dynamique du mouillage, l'INLN développe des modèles théoriques pour les gouttes dans des conditions extrêmes (effet Leidenfrost), qui sont confrontés avec les résultats expérimentaux.

Cette étude pourrait permettre l'émergence de nouveaux concepts dans l'élaboration de substrats super-glaçophobe.

## 2) *Etude de la formation des chondres (C. Galino et C. Verati Géoazur, M. Delbo et P. Michel Lagrange)*

Les chondres de petits grains de silicate cristallin noyés dans une matrice qui constituent un composant majeur des météorites primitives. Leur analyse offre un aperçu unique des processus qui se sont produits durant la formation du Système Solaire à partir de son disque d'accrétion. L'étude de la présence dans les chondres de noyaux métalliques a permis aux équipes niçoises de proposer un nouveau scénario pour leur formation. Elle ne résulterait pas de l'interaction du gaz et de la poussière dans la nébuleuse protoplanétaire mais aurait eu lieu au cours d'événements hautement énergétiques liés à des collisions entre objets assez massifs. Ces travaux, qui sont soutenus par l'ANR, ont débouché sur de nouveaux questionnements nécessitant une compréhension pluridisciplinaire des processus mécaniques, hydrodynamiques, chimiques et thermodynamiques ayant lieu dans ces conditions extrêmes.

## 5. **Fonctionnement et stratégie de développement**

La fédération de recherche [W. Doebelin](#) fournit un cadre particulièrement bien adapté à la coordination et à la gestion de ce projet. Créée en 2004 pour rapprocher les activités des laboratoires de physique et de mathématiques de l'UNS, cette structure est suffisamment souple pour permettre un pilotage harmonieux des collaborations entre équipes des unités qui la composent ainsi qu'un soutien financier à des projets collaboratifs dont le potentiel scientifique interdisciplinaire élevé permet d'envisager un développement et des résultats significatifs.

Installée dans les locaux de l'INLN, la fédération Doebelin présente une structure très simple: un directeur secondé par une assistante de gestion (ITA) et un conseil composé des directeurs d'unité de la fédération et de personnalités présentes à des titres divers: un représentant du GIS AzurOpto, un membre extérieur (également membre du CS de l'université de Nice Sophia Antipolis) et des représentants des principaux axes de recherche soutenus par la fédération.

La fédération Doebelin finance chaque année des colloques et réunions qui renforcent les interactions entre laboratoires et des projets de recherche qui impliquent au moins deux laboratoires différents. Certaines réunions sont récurrentes (par exemple les journées de physique niçoise), d'autres sont

sélectionnées à partir d'un appel à projets annuel.

Cette organisation garantit à la fois la rapidité de réaction de la fédération et la rigueur de ses choix stratégiques et de ses engagements financiers.

Pour les « phénomènes extrêmes » on a vu à la section 4 qu'un certain nombre de collaborations existe, sur des thèmes qui sont variés mais qui sont tous clairement identifiables dans ce cadre. La fédération Doebelin peut donc très rapidement engager un soutien effectif, c'est d'ailleurs ce qu'elle fait depuis 2012. Cependant l'ambition est de soutenir des programmes de recherche, c'est-à-dire de favoriser non pas des projets limités par exemple à deux collaborateurs sur un sujet précis, mais plutôt des projets ayant une perspective de structuration et de pérennisation d'une activité centrée sur les phénomènes extrêmes. L'effet de levier sera recherché pour assurer un co-financement de bon niveau, tant en ce qui concerne les coûts matériels (instruments par exemple), que ceux nécessaires au recrutement d'étudiants doctorants et de jeunes chercheurs à travers des post-docs et des postes. D'autre part l'implication des laboratoires sera indispensable dans le soutien et dans le processus d'identification des projets qui seront retenus.

**Plusieurs types d'actions permettront de réaliser ces objectifs :**

- organisation de cours, ateliers thématiques, rencontres, pour favoriser les échanges entre chercheurs des différents laboratoires ;
- cours pour les doctorants afin de renforcer l'action de l'école doctorale et d'habituer les futurs chercheurs à penser en dehors du cadre étroit de leur équipe ;
- soutien à des projets scientifiques bien identifiés, sous forme de crédits mais aussi en appui à des demandes de moyens externes, notamment de bourses doctorales et postdoctorales (région, organismes français et européens...) .

Les modalités seront définies par le conseil de la fédération.

A l'horizon du prochain plan quinquennal l'objectif est de renforcer la visibilité et l'attractivité de la physique à Nice et dans sa région. Il serait par exemple envisageable de mettre en place un doctorat Erasmus Mundus spécifique « phénomènes extrêmes ».