

---

**Candidature au poste de Maître de Conférences Réf. 4332  
ouvert au recrutement à l'Université Paris Diderot  
Laboratoire APC – Sections 34 & 29**

Alexis Coleiro

Mars 2018

---

**Coordinnées :**

**Alexis COLEIRO**

Instituto de Física Corpuscular (IFIC)  
Parc Científic de la Universitat de València  
C/ Catedrático José Beltrà, 2  
E-46980 Paterna  
España  
Tél. : +33 6 33 10 98 47  
E-mail : [alexis.coleiro@ific.uv.es](mailto:alexis.coleiro@ific.uv.es)

**Table des matières**

<b>Curriculum Vitæ</b>	<b>3</b>
<b>Activités de recherche</b>	<b>9</b>
<b>Activités d'enseignement et d'encadrement scientifique</b>	<b>21</b>
<b>Projet de recherche</b>	<b>25</b>
<b>Projet d'enseignement</b>	<b>37</b>
<b>Liste des publications et des communications orales</b>	<b>41</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>47</b>



# Alexis Coleiro

Né le 04 août 1987

Nationalité française

INSTITUT DE PHYSIQUE CORPUSCULAIRE (VALENCE, ESPAGNE)

CHERCHEUR ASSOCIÉ AU LABORATOIRE APC (PARIS)

[alexis.coleiro@ific.uv.es](mailto:alexis.coleiro@ific.uv.es)

## Thématiques de recherche

---

*Approche multi-longueurs d'onde et multi-messagers des sources astrophysiques de haute énergie.*

- Systèmes binaires X : formation, évolution et impact sur leur environnement.
- Identification de nouvelles sources transitoires de haute énergie et étude des processus physiques associés.
- Couplage accrétion/éjection de matière dans les binaires X.
- Astronomie neutrino : recherche de sources de neutrinos de haute énergie avec le télescope ANTARES.
- Astronomie multi-messagers : contraintes sur l'origine du flux de neutrinos cosmiques détecté par IceCube, suivi multi-longueurs d'onde des candidats neutrinos, suivi multi-messagers des alertes ondes gravitationnelles.
- Supernovæ à effondrement de coeur : détectabilité de neutrinos et contraintes sur le mécanisme d'explosion.
- Développement d'outils statistiques et de *pipelines* de traitement des données multi-messagers.

## Formation

---

2010 – 2013	<b>Doctorat</b> , Université Paris Diderot. Spécialisé en Astronomie et Astrophysique. Mention Très Honorable.
2009 – 2010	<b>Master 2 Recherche</b> (Spécialisé en Astronomie, Astrophysique et Ingénierie spatiale). Université Paris Sud. Mention Bien (classement : 4 <sup>e</sup> / 42).
2007 – 2010	<b>Magistère de physique fondamentale</b> . Université Paris Sud. Mention Bien.
2005 – 2007	<b>Classes préparatoires aux Grandes Ecoles</b> (Physique, Chimie, Sciences de l'ingénieur – PCSI/PC). Lycée Kléber, Strasbourg.

## Activités de recherche

---

Depuis 01/2017	<b>Post-doctorat à l'Institut de Physique Corpusculaire de Valence (Espagne)</b> . Equipe Physique des Astroparticules.
09/2014 – 12/2016	<b>ATER au laboratoire APC (Université Paris Diderot)</b> . Groupe Astrophysique Haute Energie, équipe ANTARES/KM3NeT.
10/2010 – 12/2013	<b>Doctorat au laboratoire AIM (CEA – Irfu)</b> . Groupe Phénomènes Cosmiques de Haute Energie. <i>Etude multi-longueurs d'onde d'étoiles binaires accrétagées de grande masse observées par INTEGRAL et Fermi</i> . Thèse dirigée par Sylvain Chaty et soutenue le 25/09/2013.
Print. 2010	<b>Stage de Master 2 au GEPI. Observatoire de Paris</b> . Encadré par M. Lehnert. <i>Propriétés physiques des Lyman Break Galaxies</i> .
Print. 2009	<b>Stage de Master 1 à l'ESO, Santiago, Chili</b> . Encadré par A. Smette. <i>Spectro-astrométrie avec l'instrument CRIRES et application à l'étude des noyaux actifs de galaxies</i> .
Été 2008	<b>Stage de Licence 3 à l'Institut d'Astrophysique de Paris</b> . Encadré par B. Rocca-Volmerange. <i>Synthèse de populations de galaxies : implémentation d'une nouvelle bibliothèque de spectres stellaires</i> .

## Autre expérience professionnelle

---

04 – 08/2014	Consultant scientifique. Développement informatique (Python, C/C++) et traitement du signal, prestataire auprès de clients.
--------------	---

## Responsabilités scientifiques

---

Depuis 2017	Coordinateur du groupe de travail <i>Multi-messenger and transient sources</i> de la collaboration ANTARES. Il s'agit d'un des quatre groupes d'analyse de la collaboration. Le but principal est de signer l'origine cosmique des candidats neutrinos observés via la concomitance en temps et/ou en direction avec d'autres messagers. Je suis chargé de l'animation scientifique du groupe et de superviser les analyses qui sont réalisées dans ce cadre (entre 5 à 8 publications par an) en lien étroit avec les autres groupes de travail (calibration, simulation, outils d'analyse).
Depuis 2017	Membre du comité de pilotage de la collaboration ANTARES.
Depuis 2017	Coordinateur des activités <i>Online physics</i> au sein du groupe <i>Multi-messenger and transient sources</i> de la collaboration KM3NeT. Il s'agit avant tout de coordonner la préparation de l'exploitation en temps réel des données de KM3NeT et l'envoi d'alertes à d'autres observatoires pour la détection de sources astrophysiques transitaires, un des potentiels canaux de découvertes des futurs télescopes à neutrinos.
Depuis 2016	Co-porteur (avec T. Foglizzo - AIM / CEA Saclay) du projet exploratoire <i>Low Energy Astrophysics with KM3NeT</i> , impliquant 3 laboratoires et financé par le LabEx UnivEarthS à hauteur de ~30 k€ en 2017 et 2018.
Depuis 2016	Membre du comité de publication de la collaboration ANTARES.
Depuis 2015	Membre du groupe de travail international GWHEN (« <i>Gravitational Waves and High-Energy Neutrinos</i> ») qui rassemble notamment des membres des collaborations ANTARES, IceCube et LIGO/Virgo.
Depuis 2015	Rapporteur pour la revue scientifique de rang A <i>The Astrophysical Journal</i> .
2014 – 2016	Référent interne à la collaboration ANTARES pour plusieurs analyses multi-messagers.

## Encadrement scientifique

---

Depuis 10/2017	Co-encadrement de la thèse de Marta Colomer (co-tutelle Université Paris Diderot / Université de Valence) sur la détection de supernovæ à effondrement de cœur avec KM3NeT.
07/2017	Responsable du stage de David Vallés Pérez (L3 de physique Université de Valence, Espagne) sur la recherche de sources astrophysiques à émission multi-messagers (1 mois).
04 – 07/2017	Encadrement du stage de pré-thèse de Marta Colomer (M2 NPAC, Université Paris Sud) sur l'estimation de la sensibilité de KM3NeT aux supernovæ à effondrement de cœur (3 mois).
03 – 04/2017	Responsable du stage de Conrado Badenas (M2 de physique Université de Valence, Espagne) sur la recherche de contreparties neutrinos aux sources d'ondes gravitationnelles (2 mois).
Depuis 01/2017	Co-encadrement de la thèse de Giulia Illuminati (IFIC / Université de Valence, Espagne) sur la recherche de sources ponctuelles de neutrinos.
04 – 07/2016	Responsable du stage de Vincent Hocdé (M1 Astronomie et Astrophysique) sur la recherche de sources transitaires de neutrinos de haute énergie (3 mois).

<b>Depuis 2014</b>	Participation à l'encadrement des doctorants de l'équipe ANTARES/KM3NeT de l'APC. J'ai notamment encadré le travail de Timothée Grégoire pour l'extension de la recherche d'une contrepartie neutrino à GW170817 à toutes les saveurs de neutrinos.
<b>04 – 08/2013</b>	Participation à l'encadrement des stages de M2 de Dounia Saez et d'Amine Aboussalah sur l'observation multi-longueurs d'onde de la source transitoire Swift J1745-26.

## Activités pédagogiques

---

*Qualifié aux fonctions de Maître de Conférences en sections 34 et 29 (depuis 2014 et 2016 respectivement).*

<b>05 – 06/2017</b>	Ecole d'été <i>School on gravitational waves for Cosmology and Astrophysics</i> (Benasque, Espagne, 28 mai - 10 juin 2017). <i>Cours invité sur l'astronomie multi-messagers et multi-longueurs d'onde.</i>
<b>2016 – 2017</b>	Interrogations orales de sciences physiques en première année de classe préparatoire aux grandes écoles (PTSI). <i>Service de 48 heures (premier semestre) assuré au lycée Voltaire (Académie de Paris).</i>
<b>2016 – 2017</b>	Cours sur l'astronomie multi-messagers et neutrino. <i>Intervention de 2h dans le cadre du cours de D. Allard d'astroparticules au Master 2 NPAC (Noyaux, Particules, Astroparticules et Cosmologie).</i>
<b>2014 – 2016</b>	ATER à l'UFR de physique de l'Université Paris Diderot. <i>Service annuel de ~100 heures d'enseignement (193 h sur 2 ans).</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chargé de TD de physique en première année d'études de santé (PACES) ;</li> <li>• Chargé de TD et de TP de physique (Flux et lois de conservation) en L2 de Sciences Exactes ;</li> <li>• Travaux Pratiques de mécanique en L1 de Sciences Exactes ;</li> <li>• Oraux de physique en L1 de Sciences Exactes.</li> </ul>
<b>2010 – 2013</b>	Moniteur à l'UFR de physique de l'Université Paris Diderot. <i>Service annuel de ~70 heures d'enseignement (212 h sur 3 ans).</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chargé de TD de physique en PACES ;</li> <li>• Chargé de TD de physique (introduction à la mécanique) en L1 de Sciences Exactes ;</li> <li>• Animation d'une formation à l'astrophysique organisée dans le cadre du Plan Académique de Formation des académies de Paris, Versailles et Créteil ;</li> <li>• Encadrement d'un cours / TD d'Outils pour la Bureautique et Internet pour la première année de licence de Sciences Exactes.</li> </ul>
<b>2010 – 2011</b>	Encadrement d'un binôme de lycéens de 1ère S (lycée J.-P. Timbaud, Brétigny-sur-Orge) dans le cadre d'un TPE sur les aurores boréales.
<b>Avril 2011</b>	Encadrement d'un stagiaire de 1ère S dans le cadre d'un stage de découverte de la recherche.

## Organisation d'événements scientifiques

---

<b>2018</b>	Membre du <i>Scientific Advisory Committee</i> de la conférence <i>Very Large Volume Neutrino Telescopes</i> (10/2018). Dubna, Russie.
<b>2018</b>	Organisation du workshop <i>Core-collapse supernova neutrino detection</i> dans le cadre du programme PSI2 <i>Gamma-ray bursts and supernovæ</i> (06-07/2018). Orsay, France.
<b>2011</b>	Membre du comité d'organisation de la conférence des étudiants en Astronomie et Astrophysique d'Île-de-France (Elbereth).

## Responsabilités collectives

---

2012	Membre fondateur et membre du bureau de l'association des étudiants de l'École Doctorale d'Astronomie et d'Astrophysique d'Île-de-France (ED 127), AUDDAS.
2010 – 2013	Représentant des étudiants à l'École Doctorale 127.

## Distinctions et bourses de recherche

---

2017	Bourse post-doctorale <i>Severo de Ochoa Excellence Centre</i> .
2017	Bourse du LabEx UnivEarthS (30 k€ sur deux ans) pour le projet LEAK.
2010	Contrat Formation Recherche / CEA (2010 – 2013).
2009	Bourse de stage DGDF / European Southern Observatory.

## Compétences spécifiques

---

### Techniques et outils :

- Traitement et interprétation de données électromagnétiques (domaines visible, infrarouge, X, gamma et radio);
- Analyse de données en physique des hautes énergies;
- Simulation Monte Carlo en physique des hautes énergies;
- Détection Tcherenkov à eau;
- Analyse statistique, tests d'hypothèses;
- Programmation Python, ROOT, C/C++, IDL;
- Maîtrise des outils CASA, CIAO, ds9, Fermi Science Tools, HEAsoft, IRAF/PyRAF.

### Expériences observationnelles :

- Shift ANTARES (étalonnage du détecteur et contrôle de la prise de données) - 3 semaines;
- Astronome visiteur au VLT : ISAAC (4 nuits), X-Shooter (3 nuits), Pionier/VLTI (1 nuit);
- Astronome visiteur à l'IRAM / Pico Veleta;
- Pi-I de 2 programmes d'observations sur le VLT (X-Shooter);
- Co-I de 6 programmes d'observations avec le satellite INTEGRAL (*Observations au keV de microquasars Galactiques*);
- Co-I de 2 programmes d'observations avec *Herschel* / PACS et SPIRE (*Observations de binaires X de grande masse en infrarouge lointain*);
- Co-I de 11 programmes d'observations à l'ESO (instruments FORS2, ISAAC, X-Shooter et Pionier) en mode ToO et service (*Observations de sources transitoires de haute énergie*).
- Participation à la *Second summer school on multi-wavelength astronomy*, été 2010.

## Diffusion des connaissances

---

2017	Participation à l'organisation de la journée portes ouvertes <i>Expociència 2017</i> , Université de Valence, Espagne.
2014 – 2016	Conférences sur l'astronomie et les astroparticules pour 3 classes de Terminale (dans le cadre du programme de physique de Terminale S), Lycée J. Renoir, Bondy.
2016	Conférence sur les découvertes récentes en astrophysique pour les classes de Première S du Lycée franco-allemand, Buc.
2016	Atelier en présentiel sur l'astronomie multi-messagers en lien avec les ondes gravitationnelles pour les participants au MOOC « Gravité! », laboratoire APC.
2015	Animation d'une conférence d'astronomie au centre pénitentiaire de Melun.

<b>2014</b>	Participation à l'accueil de stagiaires de 3ème, laboratoire APC.
<b>2013</b>	Communiqués de presse / web : « Cartographie des binaires X de grande masse dans la Voie Lactée », ESA / CNES / Université Paris Diderot.
<b>2012</b>	Animation de deux conférences scientifiques à la maison d'arrêt de Fresnes.
<b>2011</b>	Atelier grand public sur les trous noirs au festival d'astronomie de Fleurance.
<b>2010</b>	Animation d'un atelier d'astronomie, Collège E. Triolet, Saint-Denis.
<b>2009</b>	Participation à l'organisation de l'Année Mondiale de l'Astronomie, Université Paris Sud.
<b>2008 – 2009</b>	Co-responsable de la coupole d'astronomie du campus de l'Université Paris Sud.
<b>2008 – 2009</b>	Membre du bureau de l'association d'astronomie de l'Université Paris Sud, Orsay.
<b>2008</b>	Campagne d'observation sur le télescope amateur (T60) du Pic du Midi.

## Résumé des publications

---

- 9 publications avec une contribution personnelle significative dans des revues à comité de lecture ;
- 24 publications en tant que co-auteur dans des revues à comité de lecture (dont deux soumises à publication) ;
- 7 Astronomer's Telegrams et circulaires GCN/TAN ;
- 16 publications dans des actes de congrès ;
- 3 notes internes à la collaboration ANTARES ;
- 4 articles web et communiqués de presse relatifs à mes travaux de recherche.

## Présentations orales et posters

---

- 15 présentations invitées (dont séminaires) ;
- 19 contributions orales dans des conférences, ateliers et réunions de collaborations ;
- 4 présentations de poster en conférence.



# Activités de recherche

Mes activités de recherche s'inscrivent dans le cadre de l'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie et se situent à l'interface entre l'astronomie multi-longueurs d'onde et multi-messagers. Ces investigations d'ordre observationnel et expérimental sont destinées à mieux cerner la formation des objets compacts, étoiles à neutrons et trous noirs en particulier, et à approfondir notre compréhension des phénomènes de haute énergie : accrétion/éjection de matière et origine du rayonnement cosmique à haute énergie.

Après avoir mené et interprété des observations sur une large gamme du spectre électromagnétique durant mes travaux de doctorat, et convaincu de l'intérêt d'une démarche multi-messagers, j'ai souhaité élargir mon champ d'étude aux astroparticules, et plus précisément aux neutrinos de haute énergie. Leur détection est devenue un enjeu majeur, pouvant aider à lever le voile sur l'origine des rayons cosmiques les plus énergétiques et apporter des contraintes fortes sur les processus d'accélération de particules. Je suis membre depuis 2014 des collaborations ANTARES et KM3NeT qui exploitent les télescopes à neutrinos situés en mer Méditerranée. D'abord rattaché à l'équipe ANTARES/KM3NeT de l'APC je suis maintenant à l'Institut de Physique Corpusculaire de Valence (Espagne). Malgré les différences notoires dans les méthodes de travail, j'ai rapidement trouvé ma place au sein de ces collaborations comme l'attestent les travaux développés en partie 2 et axés sur les thématiques multi-messagers et sources transitoires. Je suis aujourd'hui le coordinateur du groupe de travail « multi-messagers et sources transitoires », l'un des quatre groupes d'analyse de la collaboration ANTARES. Même si ce rôle nécessite un investissement régulier dans les travaux en cours et une connaissance assez large des activités de la collaboration en lien étroit avec les autres groupes de travail (calibration, simulation, outils d'analyse, etc.), je me concentrerai davantage dans la suite sur les travaux que j'ai menés personnellement et/ou sur lesquels je me suis investi techniquement.

L'exploitation des synergies entre les instruments que j'ai été amené à utiliser nécessite une bonne connaissance de leurs spécificités. Mon parcours m'a donné l'occasion de développer des compétences transverses en méthodes d'analyse de données et en compréhension des détecteurs. J'ai ainsi participé avec enthousiasme aux différents stades d'une expérience d'astroparticules : de la conception et l'optimisation d'un détecteur (KM3NeT), à l'exploitation des données (ANTARES, astronomie multi-longueurs d'onde).

Sur le plan des objets astrophysiques, je m'intéresse, depuis ma thèse de doctorat, aux systèmes binaires X dont l'étude de l'évolution permet de mieux estimer les taux de coalescences d'objets compacts donnant lieu à une émission d'ondes gravitationnelles. Aussi, ces systèmes binaires sont souvent caractérisés par des processus d'accrétion et d'éjection de matière dont l'observation permet de mieux comprendre l'accélération des particules dans les jets relativistes. Je complète ces travaux par l'étude multi-messagers d'autres sources transitoires ou variables telles que les noyaux actifs de galaxies (AGN) et les sursauts gamma (GRB).

Mes travaux sur l'évolution des binaires X sont résumés dans la section 1 alors que la section 2 aborde l'étude des phénomènes transitoires et d'accélération de particules. Chaque partie recense certaines des problématiques que j'ai abordées durant ma thèse et mes séjours post-doctoraux ainsi que quelques uns des résultats obtenus. La section 3 revient enfin sur les responsabilités scientifiques collectives qui m'ont été confiées.

## En bref

- Thèse au laboratoire AIM (CEA / Univ. Paris Diderot). Etude multi-longueurs d'onde de sources Galactiques de haute énergie détectées par INTEGRAL et *Fermi*;
- Identification de sources de haute énergie;
- Etude de l'évolution des couples d'étoiles massives;
- Etude des processus de rayonnement à haute énergie et d'accélération de particules dans les binaires X et gamma;
- Astronomie neutrino : membre des collaborations ANTARES et KM3NeT depuis 2014. Coordinateur du groupe de travail « multi-messagers et sources transitoires » au sein d'ANTARES.
- Suivi des alertes ondes gravitationnelles : développement d'algorithmes de traitement des alertes pour ANTARES;
- Recherche multi-longueurs d'onde (visible, infrarouge, X, gamma) de sources de neutrinos de haute énergie;
- Etude de la sensibilité de KM3NeT aux neutrinos de supernovæ (au MeV) – responsable du projet LEAK financé par le LabEx UnivEarthS.
- Contraintes sur l'origine du flux de neutrinos astrophysiques détecté par IceCube.

# I Evolution des binaires X massives : un point de vue multi-longueurs d'onde

Il a été prouvé récemment que la majorité des étoiles les plus massives de notre Galaxie vivent en couple ([Sana et al., 2012](#)) et subissent des transferts de matière durant leur vie.

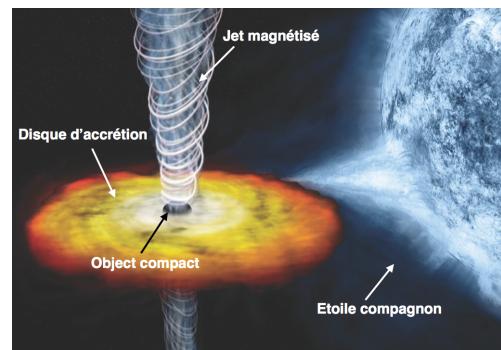
Au cours de l'évolution du couple binaire, l'étoile la plus massive engendre la première un objet compact qui attire la matière de la seconde étoile. C'est la phase dite de *binarie X* constituée d'un objet compact (étoile à neutrons ou trou noir) gravitant autour de l'étoile compagnon qui peut être de faible masse (*Low-Mass X-ray Binaries*; LMXB) ou de grande masse (*High-Mass X-ray Binaries*; HMXB)<sup>1</sup>. Les transferts de matière et de moment cinétique de l'étoile compagnon vers l'objet compact se traduisent par des phénomènes d'accrétion et d'éjection de matière (on parle alors de microquasar – voir figure 1 – en référence aux phénomènes observés au cœur des galaxies actives) et par l'accélération de particules, observés en premier lieu à haute énergie (domaine des rayons X et gamma) de manière transitoire sur des échelles de temps allant de la minute à l'année. Dans des conditions bien spécifiques (qui restent encore en partie à élucider), un tel système binaire terminera sa vie sous la forme d'un couple d'objets compacts, avant de coalescer. C'est ce phénomène, associé à une émission d'ondes gravitationnelles, qui a été observé pour la première fois le 14 septembre 2015 par la collaboration LIGO/Virgo ([Abbott et al., 2016](#)).

Toutefois, si l'évolution des étoiles isolées est aujourd'hui relativement bien connue, celle des systèmes binaires est très mal contrainte (voir section 1.1). Par conséquent, l'**estimation du taux d'ondes gravitationnelles qui seront détectées dans le futur est incertaine**. Par exemple, la phase d'enveloppe commune (qui permet sans doute au système binaire de perdre une partie de son moment cinétique avant de former un couple d'objets compacts) reste méconnue autant sur un plan observationnel que théorique.

De même, l'explosion des supernovæ donnant naissance à chacun des deux objets compacts du couple est dominée par l'apport d'énergie par les neutrinos qui génère des instabilités hydrodynamiques au cœur de l'étoile en fin de vie. Quand le chauffage par les neutrinos est suffisamment intense, les instabilités deviennent conséquentes et l'explosion se fait de manière asymétrique fournissant une impulsion au système binaire (appelée *kick*) lorsque ce dernier n'est pas rompu. Néanmoins, là encore les détails de ces processus sont méconnus (les simulations numériques ayant notamment des difficultés à reproduire l'énergie cinétique totale libérée lors de l'explosion).

Alors que les futurs détecteurs de neutrinos pourraient apporter une compréhension précise du mécanisme d'explosion (voir la section 2.3), son impact sur la binarité (et donc sur le nombre de couples d'objets compacts) peut-être appréhendé notamment en étudiant la vitesse de migration des binaires X dans notre Galaxie (voir section 1.2).

Ainsi, étudier la nature des systèmes binaires X, permet de **mieux appréhender leur évolution**. En ce sens, l'étude de ces étoiles binaires accrétantes contribue à une meilleure compréhension de la fin de vie des couples d'étoiles massives, **progéniteurs de certains sursauts gamma** (GRB) mais aussi des systèmes doubles d'objets compacts **émetteurs d'ondes gravitationnelles** lors de leur coalescence. De plus, l'accrétion et l'éjection de matière observées au plus proche de l'objet compact ont probablement un lien fort avec les mécanismes physiques observés dans les noyaux actifs de galaxies (AGN) mais aussi dans les GRB. En ce sens, l'étude des binaires accrétantes vise également à mieux comprendre **les phénomènes transitoires** de haute énergie (et en particulier



**Figure I – Vue d'artiste d'un microquasar.**

1. Elles sont qualifiées de binaires X car leur rayonnement se fait principalement dans le domaine des rayons X. Toutefois, dans la suite, j'emploierai également le terme plus générique de « binaire accrétante ».

l'accélération de particules jusqu'au GeV ou au TeV) observés à différentes échelles (spatiales et temporelles) dans l'Univers et qui font l'objet de la section 2 de ce document.

## 1.1 Question : les caractéristiques des binaires X de grande masse (HMXB) sont diverses. Y a-t-il différentes familles de HMXB et quel est le lien entre elles?

Les observations à haute énergie (keV-MeV) réalisées depuis 2002 par le satellite INTEGRAL dans la direction du plan Galactique ont mis en évidence de nouvelles classes de HMXB, certaines profondément absorbées dans les domaines visible et X, et d'autres présentant des sursauts d'émission rapides et intenses (voir par exemple Matt & Guainazzi 2003 et Negueruela et al. 2006). Ces observations révèlent des propriétés inattendues et un environnement circumstellaire complexe dont l'impact sur l'évolution du couple n'est pas clairement identifié. A l'heure actuelle, nous ignorons si ces différentes familles constituent des sources à l'évolution radicalement différente ou bien si elles constituent différentes étapes de l'évolution d'une même classe d'objets.

### ► Résultat 1 : identification de treize nouvelles HMXB dans la Voie Lactée (Coleiro et al. 2013)

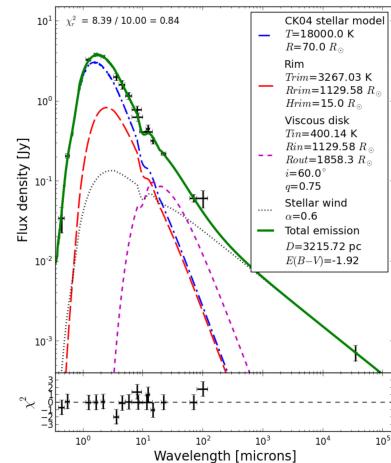
L'identification des sources transitoires ou variables détectées par INTEGRAL requiert une approche multi-longueurs d'onde, qui à été au centre de mes travaux de doctorat. Des observations multi-longueurs d'onde (dans les domaines visible et infrarouge en particulier) m'ont permis d'identifier 13 nouvelles HMXB dans la Voie Lactée (ce qui correspond à  $\sim 10\%$  de l'échantillon total décrit dans Liu et al. 2006), en grande partie constituées d'un objet compact orbitant autour d'une étoile supergéante.

Ces résultats remettent en question la vision traditionnelle de la population de HMXB que l'on pensait être majoritairement constituée de systèmes binaires composés d'un objet compact gravitant autour d'une étoile Be<sup>2</sup>. Ce changement de paradigme nécessite une explication sur le plan de l'évolution de ces objets et doit être pris en compte dans les modèles numériques d'évolution des étoiles binaires (voir par exemple Belczynski et al. 2012). Aussi, j'ai suggéré que les étoiles massives observées dans ces systèmes binaires obscurcis pourraient avoir initié la combustion de l'hélium en leur cœur et refléter ainsi la population de sources décrites dans les modèles de synthèse évolutive de Lommen et al. (2005) (il pourrait notamment s'agir d'un début de phase d'enveloppe commune). Ceci constitue une avancée importante dans la compréhension de la fin de vie de ces étoiles massives, progénitrices des couples d'objets compacts émetteurs d'ondes gravitationnelles.

### ► Résultat 2 : environnement proche des HMXB : un disque de poussière omniprésent ? (Coleiro et al. 2013 et Servillat, Coleiro et al. 2014)

Certaines HMXB présentent un environnement complexe. A ce titre, le système GX 301-2 est constitué d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile hypergéante (évoluée). La masse extrême de l'étoile compagnon ( $43 M_{\odot}$ ) fait de cette binaire accrétante l'une des plus massives observées à ce jour et constitue un cas d'étude idéal pour contraindre la masse inférieure initiale des étoiles formant des trous noirs. Dans cette perspective, comprendre l'influence de l'environnement sur l'évolution du système binaire est crucial pour mieux appréhender notamment la perte de masse des progéniteurs de binaires d'objets compacts.

Grâce aux observations réalisées sur l'instrument PACS à bord du satellite *Herschel*, nous avons montré



**Figure 2 – Ajustement des observations à l'aide d'un modèle de photosphère stellaire et de disque circumstellaire.**

2. Etoiles de type spectral B entourées d'un disque de matière.

que le flux détecté du domaine visible jusqu'au domaine radio, est émis non seulement par l'étoile hypergéante et les vents intenses qui s'en échappent, mais aussi par un disque circumstellaire composé de gaz et de poussière chauffés à différentes températures.

Ce résultat suggère un lien évolutif entre GX 301-2 et certaines étoiles supergéantes. Nous avons donc émis l'hypothèse que GX 301-2 pourrait représenter une étape particulière et très courte de l'évolution de ces systèmes binaires massifs, marquée par une perte de masse importante et non isotrope de l'étoile compagnon. Aussi, la présence d'un tel disque dans une autre HMXB (IGR J16318-4848) a été confirmée par des observations interférométriques que nous avons réalisées avec l'instrument PIONIER installé sur le VLTI (Chaty, Coleiro et al., *in prep.*). Ceci pose donc la question de l'universalité de ces disques et de leur impact sur l'évolution des binaires accrétantes.

## 1.2 Question : est-il possible de contraindre l'évolution des étoiles massives en étudiant la position des HMXB dans la Galaxie ?

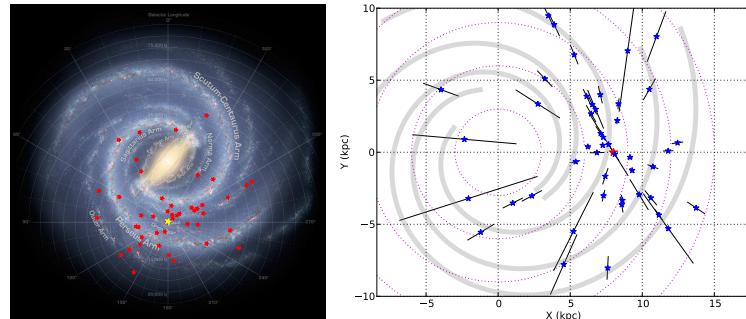
Grâce aux campagnes d'identification, l'échantillon de HMXB est aujourd'hui suffisamment grand pour entamer une étude de population. Analyser la répartition spatiale des HMXB représente un enjeu majeur pour mieux contraindre leur processus de formation et leur évolution. Cependant, la détermination fiable de leur position dans la Galaxie est difficile, et les méthodes employées, souvent différentes d'une source à l'autre.

### ► Résultat : cartographie des HMXB dans la Voie lactée (Coleiro & Chaty 2013)

J'ai développé une méthode qui a permis, pour la première fois, de déterminer de manière uniforme les distances de  $\sim 1/3$  des HMXB connues, en comparant les observations réalisées des domaines visible et proche infrarouge, à un modèle d'émission de l'étoile compagnon (qui domine l'émission des HMXB dans ce domaine de longueurs d'onde). En utilisant une fonction de corrélation à deux points, j'ai ensuite confirmé que la distribution des HMXB est corrélée à celle des complexes de formation stellaire dans la Galaxie. Par ailleurs, en étudiant la position des HMXB par rapport à leur position théorique (en supposant qu'elles soient nées dans les bras spiraux Galactiques), j'ai estimé leur âge moyen à  $\sim 48$  millions

d'années et leur distance moyenne de migration dans la Galaxie à  $\sim 0.1$  kpc, fixant ainsi des contraintes inédites sur leur évolution. La publication de cet article a été accompagnée d'un communiqué de presse conjoint ESA/CNES en 2013. Ces résultats alimentent maintenant les modèles numériques d'évolution des couples stellaires destinés à une meilleure compréhension de la formation des couples d'objets compacts, émetteurs d'ondes gravitationnelles lors de leur coalescence (voir par exemple Tauris et al. 2017).

Les données récoltées par le satellite GAIA devraient permettre de compléter significativement cette étude de population grâce à la mesure précise des paramètres astrométriques des binaires X les plus brillantes. C'est à ce titre que nous poursuivons actuellement cette étude dans le cadre d'un projet soutenu par le LabEx UnivEarthS en collaboration avec l'équipe LIGO/Virgo de l'APC et l'équipe haute énergie du laboratoire AIM (CEA Saclay).

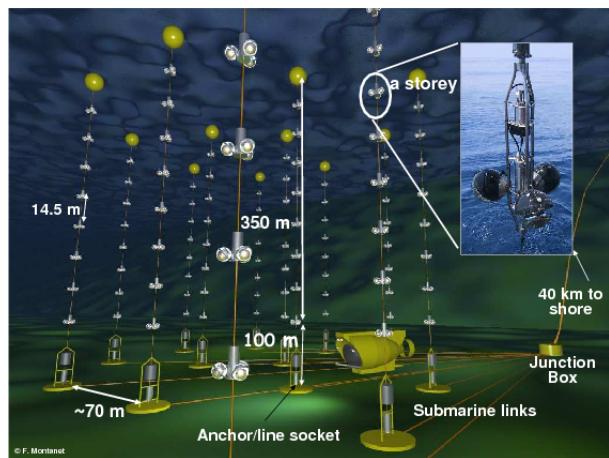


**Figure 3 – A gauche :** représentation de la distribution des binaires X de grande masse (HMXB) dans notre Galaxie. Les HMXB sont localisées par les étoiles rouges. L'étoile jaune correspond à la position du Soleil. **A droite :** position des HMXB (étoiles bleues) avec les incertitudes associées (zoom au voisinage du Soleil, représenté par l'étoile rouge située à 8 kpc du centre Galactique).

## 2 Phénomènes transitoires et accélération de particules dans les sources astrophysiques de haute énergie : un point de vue multi-messagers

Les processus permettant l'**accélération des particules** au voisinage des objets compacts restent globalement peu connus même s'ils sont observés (indirectement) dans différents types d'objets (sursauts gamma, noyaux actifs de galaxies, microquasars, etc.). Ils sont généralement associés à une émission à haute énergie et à une émission synchrotron dans le domaine radio. Lever le voile sur ces mécanismes d'accélération nécessite donc une approche multi-longueurs d'onde. A l'heure actuelle, l'**observation d'un flux diffus de neutrinos cosmiques par la collaboration IceCube** (Aartsen et al., 2013), et la première détection conjointe d'un signal gravitational et d'une contrepartie électromagnétique (Abbott et al., 2017a) ouvrent la voie à une **démarche multi-messagers** et viennent récompenser des décennies d'efforts instrumentaux.

Toutefois, l'astronomie multi-messagers n'en est qu'à ses débuts et la détection des neutrinos de haute énergie reste un véritable défi. Bien qu'il s'agisse des particules parmi les plus énergétiques dans l'Univers, leur section efficace d'interaction et leur flux étant très faibles, les neutrinos de haute énergie ( $E \gtrsim 100$  GeV) sont particulièrement discrets, ce qui implique l'utilisation de très larges volumes instrumentés d'eau ou de glace ( $\sim \text{km}^3$ ) pour les détecter. Cette détection se fait de manière indirecte, à l'aide de matrices 3D de modules optiques sensibles à la lumière Tcherenkov induite par le passage des particules relativistes chargées, produites lors de l'interaction inélastique des neutrinos avec les noyaux à proximité du télescope (voir figure 4).



**Figure 4 – Illustration du détecteur ANTARES constitué d'un réseau tridimensionnel de 885 photomultiplicateurs distribués sur 12 lignes de détection ancrées à 2500 m de fond en mer Méditerranée.**

Une démarche particulièrement prometteuse pour la détection de sources de neutrinos de haute énergie consiste à rechercher un signal neutrino en **coïncidence spatiale et/ou temporelle avec un signal détecté au préalable via un autre messager** (en particulier photons ou ondes gravitationnelles). C'est une approche sur laquelle je me concentre actuellement et qui est détaillée dans les sections suivantes. La détection d'un signal neutrino de haute énergie (TeV-PeV) associé à une source astrophysique représenterait une avancée cruciale dans notre compréhension des processus d'accélération des particules (voir sections 2.1 et 2.2). De même, avec une statistique suffisante, la détection de neutrinos au MeV associés à une supernova à effondrement de cœur pourrait mettre en évidence les processus hydrodynamiques de l'explosion (voir section 2.3).

### 2.1 Question : quels sont les processus physiques à l'origine de l'accélération des particules dans les binaires accrétantes ?

L'observation du rayonnement gamma (au GeV et au TeV) et la détection de neutrinos de haute énergie offrent des perspectives particulièrement prometteuses pour mieux contraindre les processus d'accélération de particules dans les jets et les vents issus des binaires accrétantes. Il s'agit de phénomènes complexes qui nécessitent une approche multi-longueurs d'onde et multi-messagers pour les analyser au mieux.

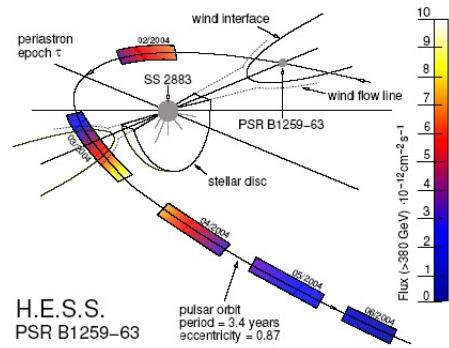
#### ► Résultat 1 : mécanisme d'émission au GeV de la binaire gamma PSR B1259-63 (Chernyakova et al. 2014)

Certains systèmes binaires émettent un flux gamma plus important que les autres et constituent une classe de sources à part : les binaires gamma (voir Dubus 2013). PSR B1259-63, couple stellaire composé d'un pulsar jeune

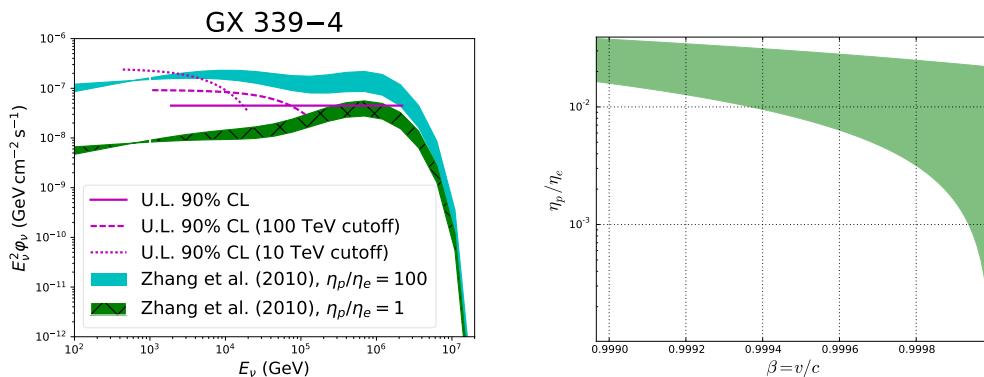
gravitant autour d'une étoile massive, elle-même entourée d'un disque de matière (voir figure 5), en fait partie. J'ai participé à l'observation de cette source dans les domaines visible et proche infrarouge. Ces observations quasi-simultanées ont été obtenues en 2010, lorsque le pulsar a atteint le périastre de son orbite et a traversé le disque entourant l'étoile massive. Dans le même laps de temps, des observations ont été déclenchées sur l'ensemble du spectre électromagnétique, en collaboration notamment avec les membres du consortium *Fermi*. En corrélant l'évolution du spectre infrarouge que j'ai obtenu, aux données dans les domaines visible et gamma, nous avons montré qu'il existe probablement une relation entre le sursaut observé avec *Fermi* au GeV et un changement d'état physique du disque entourant l'étoile massive. Il s'agit d'une piste intéressante dans la compréhension des mécanismes permettant l'accélération de particules et l'émission gamma qui pourrait en résulter. Ce résultat semble par ailleurs être confirmé par des observations réalisées en 2014, lors d'un nouveau passage au périastre.

#### ► Résultat 2 : les jets de microquasars sont-ils (en partie) composés de baryons ? ([Albert et al. 2017a](#))

La recherche d'une potentielle émission de neutrinos de haute énergie issue des binaires accrétantes permet d'apporter des contraintes uniques sur les processus d'accélération de particules au voisinage des objets compacts et sur les mécanismes physiques à l'origine de l'émission à haute énergie. Par exemple, la détection de neutrinos prouverait la présence de protons relativistes à l'intérieur des jets issus de ces objets. Or, le processus d'accélération des jets et l'énergie qu'ils possèdent sont certainement liés à leur composition<sup>3</sup>. Cette motivation nous a amené à réaliser une **recherche d'émission de neutrinos provenant de 33 binaires accrétantes** (dont sept microquasars confirmés).



**Figure 5 – Illustration de la variation du flux au TeV en fonction de la position du pulsar sur son orbite. La position et la taille du disque entourant l'étoile massive n'est qu'indicative. Crédit : collaboration H.E.S.S.**



**Figure 6 – A gauche :** limites supérieures sur le flux de neutrinos provenant du microquasar GX 339-4 pour trois spectres différents (en violet). Les résultats sont comparés aux prédictions de [Zhang et al. \(2010\)](#). **A droite :** limite supérieure sur la fraction d'énergie du jet de Cir X-1 contribuant à l'accélération des protons ( $\eta_p$ ) et des électrons ( $\eta_e$ ). Toutes les valeurs situées au-dessus de la zone verte sont exclues sur la base du modèle établi par [Distefano et al. \(2002\)](#).

3. Un jet constitué uniquement d'électrons et de positrons disposerait d'une énergie totale plus faible qu'un jet composé en partie de protons.

Si l'analyse n'a pas permis de détecter de neutrinos en coïncidence spatiale et temporelle avec un microquasar en activité, elle a néanmoins mené aux **limites les plus fortes sur l'émission de neutrinos** de ces 33 objets, permettant ainsi d'exclure certains modèles théoriques (voir figure 6) et de mettre des limites supérieures sur la fraction d'énergie du jet contribuant respectivement à l'accélération des électrons et des protons. Ces **contraintes inédites sur la présence d'une composante hadronique** dans les jets des plusieurs microquasars constituent un résultat précieux qui traduit l'importance croissante des observations neutrinos dans ce domaine de recherche.

## 2.2 Question : que peut nous apprendre l'Univers non-photonique sur les phénomènes transitoires de haute énergie (et réciproquement) ?

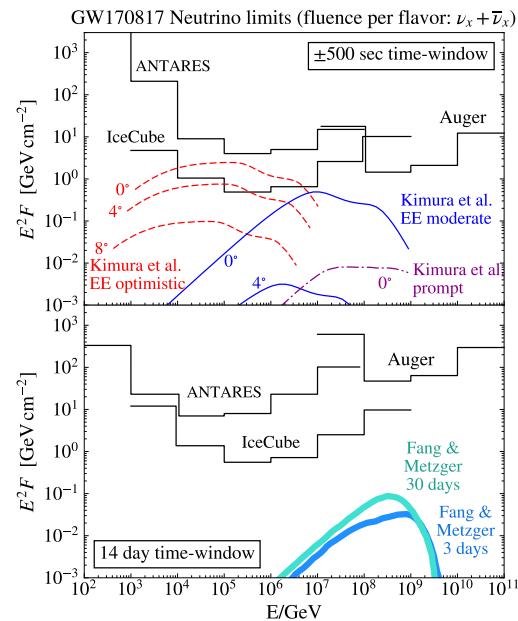
En scrutant l'ensemble du ciel visible (dont  $2\pi$  sr de façon plus optimale) à chaque instant, les télescopes à neutrinos sont particulièrement bien appropriés à une recherche de sources transitoires, d'autant que rechercher un potentiel signal neutrino sur une fenêtre temporelle courte réduit le bruit de fond de manière conséquente et augmente ainsi le potentiel de découverte. Le moyen le plus convaincant de confirmer une découverte reste l'association avec un signal coïncidant observé avec des instruments indépendants.

J'ai entrepris plusieurs études dans ce cadre. **Ces premiers travaux, établis dans le cadre de la collaboration ANTARES, serviront de base pour le développement d'un cadre d'analyse plus sophistiqué permettant la coordination de la réponse de différents instruments.**

► **Résultat 1 : recherche d'une contrepartie neutrino aux émissions d'ondes gravitationnelles détectées par LIGO/Virgo (Adrián-Martínez et al. 2016; Albert et al. 2017b; ANTARES Collaboration et al. 2017a; Abbott et al. 2017a; Albert et al. 2017d)**

Dans le cadre d'un accord d'échange des données avec la collaboration LIGO/Virgo, la **recherche d'une contrepartie neutrino aux premières détections d'ondes gravitationnelles par les détecteurs LIGO et Virgo** m'a été confiée en collaboration avec I. Bartos (LIGO/Virgo/Université de Floride) et C. Finlay (IceCube/Université de Stockholm) dès la détection de GW150914.

Suite aux premières études réalisées durant le *run* Advanced LIGO O1, ANTARES a officiellement intégré le groupe de suivi des alertes LIGO/Virgo fin 2016. A ce titre, j'ai apporté des améliorations par rapport à la première étude pour laquelle des coupures de qualité prédéfinies avaient été utilisées. En optimisant cette fois-ci l'échantillon de données de manière à améliorer la sensibilité de l'instrument, un facteur  $\sim 2$  a été gagné sur la limite sur la fluence neutrino émise lors de la coalescence des deux objets compacts. Ces analyses optimisées sont réalisées hors ligne, quelques jours après la réception de l'alerte. Néanmoins, répondre rapidement aux alertes (même de façon sous-optimale) est essentiel puisque cela permet de localiser une éventuelle contrepartie neutrino en temps quasi-réel et de contraindre ainsi la région du ciel à sonder ensuite par les instruments électromagnétiques. A ce titre, j'ai développé une chaîne de traitement spécifique destinée à la recherche d'une contrepartie neutrino dans les données en ligne qui est déclenchée dès la réception d'une alerte LIGO/Virgo.



**Figure 7 – Limite supérieure à 90% de niveau de confiance sur la fluence neutrino dans deux fenêtres de temps ( $\pm 500$  s et +14 jours), comparées aux prédictions théoriques. Les angles (lignes en pointillés rouges) indiquent la différence entre l'axe du jet et la ligne de visée (émission hors axe).**

Par la suite, en tant que coordinateur du groupe « multi-messager et sources transitoires » au sein de la collaboration ANTARES, j'ai été responsable des analyses de suivi neutrino pour GW170817. Si ces études n'ont pas mis en évidence de contrepartie neutrino associée à cette fusion de deux étoiles à neutrons, elles ont néanmoins permis de contraindre la fluence et l'énergie totale libérée sous forme de neutrinos lors de la coalescence (voir figure 7). Ces contraintes ont été utilisées pour tester les mécanismes de dissipation dans les jets relativistes associés aux GRB. La non-détection d'une contrepartie neutrino est en accord avec les prédictions des modèles d'émission de GRB courts, observés hors de l'axe du jet (voir figure 7, panel supérieur) d'une part, et avec les prévisions d'un modèle d'émission étendue en temps, associée à un vent relativiste de magnétar (voir figure 7, panel inférieur) d'autre part.

Signée conjointement par les collaborations ANTARES, IceCube, Auger et LIGO/Virgo, cette étude a été dévoilée le 16 octobre 2017, lors de l'annonce de la découverte de GW170817. Elle a été publiée dans *The Astrophysical Journal Letter* (Albert et al., 2017d). Elle est décrite également dans l'article multi-messagers associé à l'observation de cet événement (Abbott et al., 2017a), dont la collaboration ANTARES est co-signataire, et qui constitue une étape importante dans le développement de l'astronomie multi-messagers.

Enfin, l'utilisation de l'algorithme que j'ai développé pour estimer la limite sur la fluence neutrino de ces événements transitoires n'est pas restreinte à cette étude mais peut s'envisager dans un cadre beaucoup plus large d'analyses multi-messagers. Par exemple, il est désormais utilisé de manière systématique dans le cadre des suivis d'alertes associées à la détection de *Fast Radio Bursts*<sup>4</sup> (Petroff et al. 2017; Bhandari et al. 2017 incluent ainsi les toutes premières limites sur le flux neutrino émis par les FRB) et de neutrinos de haute énergie détectés par IceCube (voir résultat 2 ci-dessous).

#### ► **Résultat 2 : contraintes sur l'origine du flux diffus de neutrinos cosmiques détecté par IceCube (The ANTARES Collaboration 2015; ANTARES Collaboration et al. 2017b; Dornic & Coleiro 2017)**

Les sources à l'origine du flux diffus de neutrinos astrophysiques détecté par la collaboration IceCube (voir par exemple Aartsen et al. 2013) sont toujours inconnues malgré différentes pistes théoriques et de nombreuses recherches observationnelles spécifiques.

Une possibilité serait que tout ou partie des sources à l'origine de ce flux aient un comportement transitoire (émission sur un laps de temps très court). A ce titre, il a été suggéré que certains neutrinos cosmiques observés par IceCube pourraient avoir été émis par une source transitoire située à proximité du centre Galactique (Bai et al., 2014). Par conséquent, j'ai entrepris une **recherche de corrélations temporelles entre ce signal neutrino et les données acquises par le télescope ANTARES**. Aucune corrélation temporelle significative n'a été mise en évidence entre les deux échantillons. J'ai ainsi pu exclure que l'ensemble du signal cosmique détecté par IceCube dans cette région du ciel puisse provenir de phénomènes transitoires (d'une durée inférieure à la journée). Nous étayons actuellement cette analyse à l'ensemble du ciel avec Giulia Illuminati, doctorante à l'IFIC dont j'encadre les travaux. Les résultats de cette étude (encore *blindée* à l'heure actuelle) permettront de contraindre plus précisément l'éventuelle origine transitoire des neutrinos cosmiques détectés par IceCube. Enfin, nous réalisons actuellement une étude complémentaire visant à rechercher un signal transitoire dans les données ANTARES à l'aide d'une fonction de vraisemblance spécialement définie pour détecter un *clustering* spatial et temporel des événements neutrinos. Cette méthode, appliquée pour la première fois aux données ANTARES par Vincent Hocdé (dont j'ai supervisé le stage de Master) dans la région du centre Galactique, est en cours d'extension à l'ensemble du ciel.

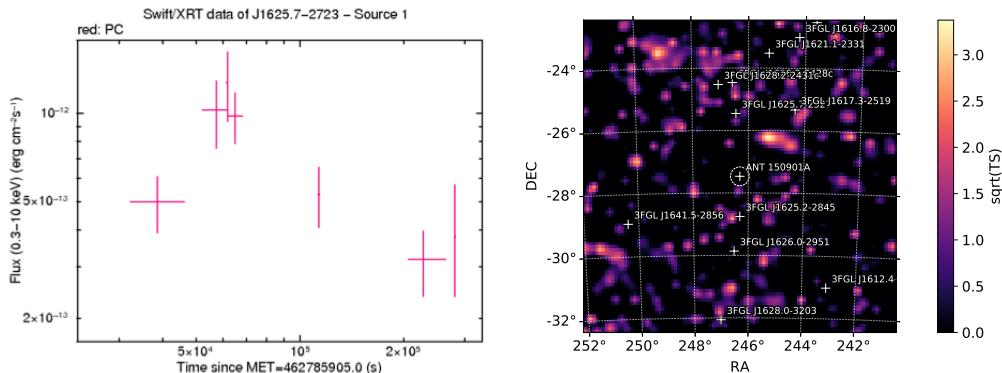
En plus des analyses traditionnelles, IceCube distribue également des alertes en temps quasi-réel lors de la détection d'événements intéressants (événements contenus dans le détecteur ou bien événements de très haute énergie,  $E > 1 \text{ PeV}$ ). Nous répondons à chacune de ces alertes en **cherchant un possible signal coïncident dans les données ANTARES**. L'idée directrice est d'**augmenter la sensibilité des télescopes à neutrinos et la significativité d'une éventuelle découverte**, au travers d'une détection simultanée grâce à plusieurs instruments

4. Emissions transitoires de l'ordre de la milliseconde, détectées dans le domaine radio et dont les sources sont encore inconnues, bien qu'une origine cosmologie soit privilégiée.

distincts. ANTARES étant plus sensible qu'IceCube à un signal au TeV sur une large partie du ciel austral, les limites sur le flux neutrino estimées grâce à ses données permettent de contraindre l'indice spectral d'une éventuelle source transitoire associée à ces événements. En particulier, la boîte d'erreur de deux alertes récentes (IC160731 et IC170922) est compatible avec la position de deux blazars. En dessous de 100 TeV, la surface effective d'ANTARES étant compétitive avec celle d'IceCube, nous avons pu exclure une relation entre les deux alertes neutrinos et les deux blazars, à condition que le spectre de l'éventuelle émission neutrino des blazars soit plus mou que  $dN/dE \propto E^{-2.4}$ . Encore préliminaires, ces résultats pourront contraindre les modèles d'émission neutrino à l'origine du flux IceCube. Accumulés sur le plus long terme, ils contribueront à donner une vision plus complète des processus d'accélération des particules dans les sources astrophysiques de haute énergie.

► **Résultat 3 : suivi multi-longueurs d'onde des événements neutrino transitoires** ([Coleiro, 2017](#); [Coleiro & Chaty, 2017](#))

Comme mentionné précédemment, les candidats neutrinos les plus intéressants détectés par IceCube font l'objet d'alertes envoyées à la communauté. ANTARES procède de manière similaire<sup>5</sup> en déclenchant des observations de suivi dans les domaines gamma, X, visible, et radio. Ainsi, le 1<sup>er</sup> septembre 2015, des données obtenues par *Swift*/XRT à la suite d'une alerte ANTARES ont révélé la présence d'une source X variable et inconnue, dans le cercle d'erreur de l'événement neutrino ([Coleiro 2017](#) et figure 8, panel de gauche). Afin d'identifier sa nature, j'ai traité les données issues de l'instrument LAT à bord de *Fermi*, pour rechercher une contrepartie gamma au dessus de 100 MeV (voir figure 8, panel de droite). L'absence de signal m'a amené à calculer une limite supérieure sur le flux gamma. J'ai ensuite observé cette source avec l'instrument X-Shooter (VLT), sensible de l'UV jusqu'à l'infrarouge proche. Ces données ont confirmé la **présence d'une étoile jeune et active en X**, probablement à l'origine de l'émission détectée par *Swift*, excluant de fait une association avec l'émission neutrino détectée par ANTARES. J'ai évalué la probabilité d'une telle coïncidence fortuite à  $\sim 3\%$ .

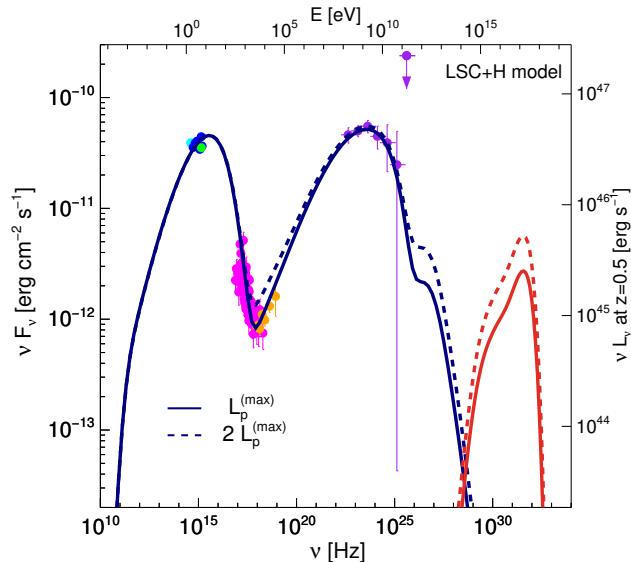


**Figure 8 – A gauche :** courbe de lumière *Swift*/XRT de la source transitoire découverte dans le champ de ANT150901A.  
**A droite :** carte de significativité déduite du traitement des données *Fermi*-LAT dans la même région du ciel entre 100 MeV et 500 GeV sur  $\pm 12$  h autour de la détection du neutrino.

Ces programmes de suivi des alertes neutrino n'ont pour le moment révélé aucune association significative entre une source électromagnétique et un neutrino de haute énergie. Néanmoins, un faisceau d'indices porte à croire que certains blazars pourraient contribuer au flux neutrino observé par IceCube (voir par exemple [Kadler et al. 2016](#); [Resconi et al. 2017](#); [Lucarelli et al. 2017](#)). En particulier, comme indiqué plus haut, *Fermi*/LAT ( $E \in [800 \text{ MeV}; 300 \text{ GeV}]$ ) et le télescope Tcherenkov MAGIC ( $E \geq 100 \text{ GeV}$ ) ont observé un sursaut d'activité du blazar TXS 0506+056 dont la position est compatible avec le neutrino de haute énergie IC170922, détecté par IceCube le 22 septembre 2017 ([Tanaka et al., 2017](#); [Mirzoyan, 2017](#)). Notons toutefois qu'aucune contrepartie n'a été observée par ANTARES ([Dornic & Coleiro 2017](#)). Afin de contraindre le redshift de ce blazar et permettre une modélisation de son émission à basses fréquences, j'ai déclenché des observations X-Shooter. L'absence de raies spectrales est typique d'un blazar en activité (le spectre est dominé par l'émission non thermique) et n'a

5. Essentiellement pour les neutrinos de haute énergie, les éventuels doublets de neutrinos provenant d'une direction similaire et en coïncidence temporelle, ou dans le cas d'un neutrino dont la direction est compatible avec la position d'une galaxie cataloguée.

donc pas permis d'estimer le redshift de la source ([Coleiro & Chaty, 2017](#))<sup>6</sup>. En revanche, couplé à des observations X obtenues avec les satellites *Swift*, NuSTAR et *Fermi*, ce spectre large bande permet une modélisation fine de la distribution spectrale d'énergie du blazar et donc une étude de l'association éventuelle avec l'événement neutrino détecté par IceCube. Je poursuis actuellement ces travaux en collaboration avec l'équipe de Derek Fox (Penn State University). Il en ressort que l'émission gamma est probablement dominée par les processus leptonniques (*synchrotron self-Compton* en particulier). Par ailleurs, la contribution liée à une composante d'émission hadronique est fortement contrainte par les données X<sup>7</sup> (voir figure 9) et permet d'évaluer le flux neutrino attendu entre 100 TeV et 1 PeV à  $\nu F_{\nu}^{\nu+\bar{\nu}} \lesssim 3 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , ce qui correspond à une probabilité de détecter un neutrino issu de ce blazar avec IceCube de  $\sim 10\%$ .



**Figure 9** – Distribution spectrale d'énergie (SED) du blazar TXS 0506+056 constituée d'observations multi-longueurs d'onde quasi-simultanées. La SED est ajustée par un modèle leptonnique (courbe bleue) incluant une contribution hadronique (luminosité des protons  $L_p^{(\max)}$ ). Les modèles considérant une luminosité des protons supérieure à  $L_p^{(\max)}$  (courbe bleue en pointillés) prédisent un flux X non compatible avec les observations réalisées par les satellites *Swift* et *NuSTAR*. Le flux neutrino associé aux deux modèles est indiqué par les courbes rouges.

Ces études viennent renforcer l'importance d'une démarche multi-messagers dont le retour d'expérience bénéficiera aux prochaines campagnes d'observation notamment avec KM3NeT, le successeur d'ANTARES en mer Méditerranée, et les futurs instruments X et gamma. Motivé par cet enjeu, j'ai récemment participé au déploiement d'une stratégie de recherche de contreparties électromagnétiques aux neutrinos détectés par ANTARES avec le satellite INTEGRAL qui pourra ensuite être étendue à KM3NeT. Par ailleurs, je me suis investi dans la préparation du livre blanc du projet e-ASTROGAM (satellite dans le domaine du MeV, [De Angelis et al. 2017](#)), en particulier, sur les synergies multi-messagers (liens avec les télescopes à neutrinos).

### 2.3 Question : quelles informations sur le mécanisme d'explosion des supernovæ à effondrement de cœur pourra apporter le télescope à neutrinos KM3NeT ?

Parallèlement à l'analyse des données ANTARES, je suis co-responsable du projet exploratoire LEAK (*Low Energy Astrophysics with KM3NeT*) financé par le LabEx UnivEarthS, à hauteur de 30 k€ en 2017 et 2018. Motivé par la possibilité de contraindre les processus physiques à l'œuvre durant la fin de vie des étoiles massives, ce projet ambitionne de **tester le potentiel du futur télescope à neutrinos KM3NeT pour la détection d'un signal**

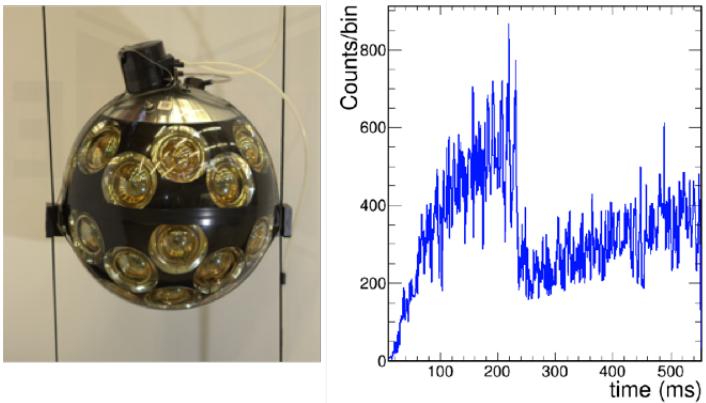
6. Ce redshift a néanmoins été estimé à  $0.3365 \pm 0.0010$  par une étude ultérieure et indépendante ([Paiano et al., 2018](#)).

7. En effet, l'absorption à la source des photons gamma de très haute énergie produits par la décroissance des pions neutres ( $\pi^0$ ) devrait produire une cascade électromagnétique et engendrer ainsi une émission X additionnelle de celle générée par les processus leptonniques

**neutrino au MeV issu de l'explosion d'une supernova à effondrement de cœur** (CCSN). J'ai initié ce projet en dehors du cercle de mes collaborateurs proches. Co-géré par Thierry Foglizzo (AIM/CEA Saclay), il réunit ainsi des spécialistes de la physique des supernovæ à effondrement de cœur, de la propagation des neutrinos dans la matière et des membres de la collaboration KM3NeT.

#### ► Résultat : étude de la sensibilité de KM3NeT à un flux de neutrinos au MeV

Les détecteurs Tcherenkov sont bien adaptés à la détection de neutrinos au MeV en provenance d'une supernova proche ; notamment par le processus inverse de décroissance beta sur les noyaux d'hydrogène :  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  qui produit une trace Tcherenkov de quelques centimètres suite à la propagation du positron dans l'eau. Toutefois, cette distance de propagation est largement inférieure à la distance typique qui sépare les modules de détection. Ainsi KM3NeT n'est pas optimisé pour la détection de ces neutrinos de basse énergie et il n'est pas possible de les identifier individuellement. Il s'agit ici plutôt de **rechercher une augmentation cohérente du taux de comptage** des modules optiques engendrée par l'interaction d'un grand nombre de neutrinos dans le détecteur. Le volume instrumenté de KM3NeT est conséquent et offrira un taux de détection important et donc une meilleure statistique sur l'évolution temporelle du flux neutrino d'une éventuelle supernova proche. Ceci est crucial pour mieux comprendre les instabilités hydrodynamiques (SASI en particulier) à l'œuvre durant l'explosion.



**Figure 10 – A gauche :** photographie d'un module optique de KM3NeT. **A droite :** taux de détection de neutrinos par KM3NeT simulé pour une étoile de  $27 M_\odot$  à  $10$  kpc en fonction du temps (bins de  $1$  ms pour la phase d'accréation de la CCSN). Les effets de l'instabilité hydrodynamique SASI sont visibles autour de  $200$  ms.

Le bruit de fond optique (provenant de la lumière Tcherenkov émise par les électrons relativistes issus de la décroissance du potassium 40 et de la bioluminescence) dégrade la sensibilité de KM3NeT à un tel signal. Cependant, le **design innovant des modules optiques de KM3NeT** (figure 10, gauche), constitués de 31 photomultiplicateurs de 7,5 cm de diamètre ([Adrián-Martínez et al., 2014](#)) permet d'**envisager une suppression efficace de ce bruit de fond** en cherchant à détecter des coïncidences multiples sur un même module optique. L'intention première de ce projet est donc de tester cette possibilité au travers d'une simulation Monte-Carlo des détecteurs (simulations GEANT4 en particulier) et d'implémenter les outils statistiques nécessaires à cette détection. **C'est l'objectif de la thèse de Marta Colomer (co-tutelle Université Paris Diderot / Université de Valence) que je supervise et qui réalise actuellement les toutes premières simulations de KM3NeT à des énergies inférieures au GeV.** Les premiers résultats confirment la capacité de détection (significativité supérieure à  $5\sigma$  pour une supernova Galactique) et laissent entrevoir pour la première fois la possibilité de résoudre avec KM3NeT les structures fines visibles dans la courbe de lumière neutrino et associées aux instabilités hydrodynamiques (figure 10, droite).

Ces travaux sont réalisés en collaboration avec l'équipe de H.-T. Janka (Max Planck Institute für Astronomy, Garching) qui nous fait profiter des dernières simulations numériques d'explosion de CCSN. Bien qu'exploratoire, cette problématique mérite d'être étudiée dans la mesure où l'explosion d'une supernova proche est un événement rare et important qu'il est nécessaire d'avoir anticipé avec l'ensemble des détecteurs de neutrinos disponibles. Une détection neutrino significative sur le plan statistique permettrait ainsi des progrès fondamentaux dans la compréhension des explosions de supernovæ et donc de la fin de vie des étoiles massives.

### 3 Responsabilités collectives scientifiques

Je suis membre des collaborations ANTARES et KM3NeT depuis 2014. Mon expertise en astrophysique m'a valu d'être rapidement référent interne à la collaboration pour plusieurs analyses multi-messagers liées à des sources transitoires (FRB, sursauts d'activités des microquasars et blazars, etc). Mon rôle était alors de vérifier et discuter la démarche employée ainsi que les résultats obtenus avant publication. En 2016, je suis devenu membre à part entière du comité de publication de la collaboration.

Pour ce qui concerne mes propres travaux de recherche, compte tenu de mon intérêt pour les systèmes binaires, j'ai rejoint le groupe de travail « GWHEN » qui réunit des membres des collaborations ANTARES, IceCube et LIGO/Virgo dans le but de mettre en place des recherches conjointes de neutrinos de haute énergie et d'ondes gravitationnelles. J'ai été particulièrement actif dans le suivi, par ANTARES, d'événements observés par LIGO et Virgo, depuis la première détection (GW150914) jusqu'à la récente observation d'une coalescence d'étoiles à neutrons (GW170817). **Les résultats obtenus, même sans détection de contrepartie neutrino, ont octroyé une grande visibilité à la collaboration ANTARES, qui m'a désigné à l'été 2017, coordinateur du groupe de travail « multi-messagers et sources transitoires ».** Le groupe réunit des chercheurs et doctorants travaillant sur les recherches de sources ponctuelles transitoires de neutrinos ainsi que sur les études multi-messagers, combinant les données de différents instruments. Dans ce cadre, mon champ de recherche s'est encore élargi par rapport aux activités décrites dans les parties précédentes. En tant que coordinateur, outre l'animation scientifique (visioconférences fréquentes, suivi des analyses en cours, présentation de l'avancée des travaux auprès de la collaboration, *chairman* d'une session plénière des réunions de collaboration, attribution des différentes tâches, etc.), je suis chargé de juger de la maturité des analyses avant les demandes d'*unblinding* ou de proposer de nouvelles études. Les activités du groupe se répartissent en trois catégories (voir par exemple [ANTARES Collaboration et al. 2017c](#) pour une revue plus exhaustive des travaux en cours) :

- les analyses en ligne qui consistent à envoyer et réceptionner des alertes multi-messagers pour *i*) rechercher des contreparties électromagnétiques à des neutrinos de haute énergie et *ii*) rechercher des contreparties neutrinos à des sources transitoires (coalescences d'objets compacts, GRB longs, sursauts radio rapides, etc.). Ces activités nécessitent une réponse rapide pour prévoir des suivis multi-longueurs d'onde et multi-messagers plus développés. Parmi les résultats récents, outre les suivis d'ondes gravitationnelles, les tous premiers suivis neutrinos associés aux FRB ont été publiés conjointement avec plusieurs collaborations ([Petroff et al., 2017](#); [Bhandari et al., 2017](#)) et méritent d'être mentionnés.
- Les analyses hors ligne qui visent à rechercher des émissions neutrinos associées à des sources astrophysiques préalablement connues comme émettrices de photons (essentiellement dans les domaines X et gamma). A ce titre, une recherche de neutrinos associés à quatre GRB brillants ([Albert et al., 2017c](#)) a été publiée en 2017.
- Les recherches de corrélations avec les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie détectés par les observatoires Pierre Auger et Telescope Array (un nouveau MoU vient d'être signé pour une recherche conjointe avec IceCube notamment).

Suite à mes travaux sur les recherches de contreparties neutrinos en temps réel, **je suis aussi responsable des activités de « physique en ligne » au sein de la collaboration KM3NeT**. Il s'agit de coordonner la préparation de l'exploitation en temps réel des données du télescope KM3NeT afin de rechercher des sources astrophysiques à émission multi-messagers. Le but est d'optimiser le temps de réponse de KM3NeT à des alertes extérieures (ondes gravitationnelles, électromagnétiques et neutrinos détectés par IceCube). A ce titre, l'une des premières activités consiste à prévoir des *templates* d'acceptance du détecteur en fonction des conditions expérimentales, notamment liés au degré de qualité de l'étalonnage disponible. C'est une activité clé qui pourrait conduire à la première détection d'une source astrophysique de neutrinos de haute énergie...

# Activités d'enseignement et d'encadrement scientifique

## I Résumé des activités d'enseignement et d'encadrement scientifique

Depuis le début de ma thèse, j'ai toujours cherché à enseigner. J'ai ainsi eu la chance d'exercer un **monitorat d'environ 64 heures annuelles** d'enseignement durant mes trois années de thèse. Par la suite, de 2014 à 2016, j'ai été **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)** à l'**UFR de physique de l'université Paris Diderot**, avec un service d'enseignement annuel statutaire de 96 heures équivalent TD. Au premier semestre de l'année scolaire 2016-2017, j'ai également assuré 48 heures d'interrogations orales (*colles*) de sciences physiques en première année de classe préparatoire aux grandes écoles PTSI au lycée Voltaire (Paris). La totalité de mon service d'enseignement, principalement effectué au niveau licence, s'élève ainsi à **~450 heures depuis 2010**. Mon investissement sur plusieurs années, notamment en ce qui concerne le module de physique assuré en première année d'études de santé (PACES), m'a permis de prendre davantage de responsabilités au sein de l'équipe pédagogique et de faire bénéficier de mon expérience à la fois les étudiants et les nouveaux enseignants. Je récapitule dans le tableau ci-dessous mes différentes activités d'enseignement. Le descriptif détaillé des modules est fourni en partie [2](#).

Module	Niveau	Formation	Nature	Année(s)	Volume
Physique	L1	PACES	TD	2010-2011	56 h
				2011-2012	28 h
				2012-2013	28 h
				2014-2015	56 h
				2015-2016	56 h
Mécanique physique S1	L1	Licence Sciences Exactes	TD	2011-2012 2012-2013	39 h 39 h
Outils pour l'informatique	L1	Licence Sciences Exactes	CM/TD	2010-2011	16 h
Introduction à l'astrophysique	-	Plan Académique de Formation des enseignants du secondaire	CM/TD	2011-2012	3 h
				2012-2013	3 h
Mécanique physique S2	L1	Licence Sciences Exactes	TP Oraux	2014-2015 2015-2016	6 h 2 h
Flux et lois de conservation	L2	Licence Sciences Exactes	TD	2014-2015	21 h
				2015-2016	24 h
Flux et lois de conservation	L2	Licence Sciences Exactes	TP	2014-2015	9 h
				2015-2016	18 h
Interrogations orales de sciences physiques	PTSI	CPGE Lycée Voltaire Académie de Paris	Oraux	2016-2017	48 h
Astronomie neutrino et multi-messagers	M2	Master NPAC	CM (cours de D. Allard)	2016-2017	2 h

Ces expériences ont confirmé mon goût et mon aptitude à enseigner la physique à l'université et plus généralement dans l'enseignement supérieur. **Les questions relatives aux pratiques d'enseignement m'intéressent tout particulièrement.** J'ai participé à deux formations (4 jours) en didactique de la physique organisées par le centre de formation des doctorants à l'insertion professionnelle de l'université Paris Diderot. Il s'agissait avant tout de questionner nos « rituels » d'enseignement et de travailler autour de stratégies pédagogiques permettant une meilleure appréhension des concepts (notamment à l'aide d'expériences simples). J'ai également participé au mois de juillet 2015 au colloque « *Enseigner la physique à l'université* » destiné à nourrir une réflexion sur l'enseignement de la physique à partir des expérimentations pratiquées dans les départements de physique des universités franciliennes.

**L'enseignement et la recherche sont deux activités liées et complémentaires à mes yeux.** Parallèlement à mon activité d'enseignement, je prends part à la formation et à l'encadrement des stagiaires et doctorants. En 2017, j'ai été invité à donner un cours sur l'astronomie multi-messagers dans le cadre de l'école d'été « School on gravitational waves for cosmology and astrophysics ». **Par ailleurs, je suis actuellement co-encadrant des thèses de Marta Colomer** (cotutelle Université Paris Diderot / Université de Valence) sur l'**astrophysique multi-messagers avec KM3NeT** (sensibilité aux supernovæ à effondrement de cœur) et de Giulia Illuminati (Université de Valence) sur la recherche de sources ponctuelles de neutrinos avec le télescope ANTARES. J'ai auparavant contribué à l'encadrement des doctorants de l'équipe ANTARES / KM3NeT de l'APC (et plus spécifiquement des travaux de Timothée Grégoire sur la recherche de contreparties neutrinos aux ondes gravitationnelles avec des candidats neutrinos de toutes saveurs détectés par ANTARES). **J'ai finalement été (co-)encadrant de 5 stages** (de la Licence au Master 2), à l'APC (Paris) et à l'IFIC (Valence) tel que détaillé dans mon Curriculum Vitæ.

**Enfin, la vulgarisation et l'initiation à la démarche scientifique et aux métiers de la recherche sont des activités qui me tiennent à cœur.** Durant l'année scolaire 2010/2011, j'ai encadré un binôme de lycéens dans le cadre de leur Travaux Personnels Encadrés, épreuve du Baccalauréat. Le sujet portait sur les aurores boréales. Je les ai principalement guidés dans la définition de la problématique de leurs travaux ainsi que dans la conception de dispositifs expérimentaux destinés à illustrer le phénomène étudié. Je leur ai également apporté un regard extérieur sur la rédaction du dossier final et sur la préparation de leur soutenance. En 2011, j'ai accueilli un stagiaire de 1ère S au sein de l'équipe pendant une semaine. Ce stage, organisé par l'association *Paris Montagne*, était avant tout destiné à lui faire découvrir le monde de la recherche, au même titre que les stagiaires de troisième que j'ai contribué à accueillir à l'APC. De même, dans le cadre de mes activités d'ATER à l'UFR de physique de l'université Paris Diderot, j'ai participé en janvier 2016 à un amphithéâtre d'orientation des lycéens sur les filières et métiers liés à l'espace et l'univers. Cette animation, organisée par le département de Sciences Exactes, visait en premier lieu à faire découvrir aux futurs bacheliers les formations proposées à l'UFR ainsi que leurs débouchés. **De manière plus large, j'interviens régulièrement en milieu scolaire (collèges et lycées) pour faire découvrir les métiers de la recherche, et je prends plaisir à animer des ateliers de vulgarisation auprès de différents publics (en milieu carcéral notamment).**

## 2 Descriptif détaillé des modules d'enseignement

### Enseignement de physique en PACES (première année d'études de santé)

- Implication personnelle : chargé de TD.
- Public : groupes de ~45 étudiants.

Ce module aborde plusieurs notions utiles en médecine tels que les concepts d'énergie (cinétique, potentielle, conservation de l'énergie mécanique), les lois de l'hydrostatique, puis les principes de l'écoulement des gaz et liquides parfaits et visqueux. Le programme se termine par l'étude des ondes sonores et lumineuses en appliquant ces concepts à l'acoustique et à l'imagerie médicale (scanner, échographie, caméra TEP, etc.). Dans le cadre de ce module, j'ai été chargé de la rédaction de plusieurs sujets de TD (qui sont renouvelés chaque année). Le fait d'avoir conservé cet enseignement plusieurs années m'a permis de m'investir davantage dans l'encadrement de l'UE. En particulier, sur la base de mon expérience et du retour des étudiants, j'ai fait évoluer mes méthodes pédagogiques. J'ai ainsi constaté les difficultés des étudiants vis-à-vis des outils mathématiques et de l'assimilation du cours, ce qui m'a amené, après discussion avec l'équipe pédagogique, à proposer des exercices complémentaires en adéquation avec leur demande. A ce titre, j'ai participé à la rédaction de TD de rappels mathématiques et j'ai conçu un ensemble d'exercices de préparation au concours, principalement axés sur le raisonnement et l'assimilation du cours. J'ai également participé chaque année à la rédaction du sujet de l'épreuve de physique du concours de PACES.

## Mécanique Physique S1 (L1 Sciences Exactes)

- Implication personnelle : chargé de TD et de TP.
- Public : groupes de ~25 étudiants.

Ce module offre un aperçu de quelques notions de mécanique classique (bilan des forces appliquées à un système, lois de Newton, travail, puissance, énergie). Cela passe par un rappel des outils mathématiques nécessaires à une mise en équation correcte des phénomènes physiques mais aussi à une sensibilisation aux lois d'échelle, aux ordres de grandeurs et aux approches dimensionnelles, démarches souvent déconcertantes pour des étudiants de L1.

Outre l'encadrement des TD, j'ai participé à la rédaction du sujet du partiel et de l'examen final et à la correction des copies. Le programme ayant été remanié en 2012, j'ai également participé à la rédaction des nouveaux sujets de TD.

## Mécanique Physique S2 (L1 Sciences Exactes)

- Implication personnelle : chargé de TP et d'oraux.
- Public : groupes de ~20 étudiants.

Ce module, qui a lieu au second semestre de L1, introduit des raisonnements physiques plus abstraits (cinématique en coordonnées non cartésiennes, mouvements circulaires, changement de référentiel, forces inertielles) ainsi que les concepts de quantité de mouvement et de moment cinétique. Il aborde aussi l'hydrostatique et ses applications.

Durant l'année 2014/2015, j'ai assuré deux TP proposés dans le cadre de cette UE : l'un sur l'étude de la chute libre et l'autre relatif au pendule simple. En 2015/2016, j'ai assuré une partie des oraux de cours portant sur les différentes thématiques abordées dans le programme et destinés avant tout à vérifier l'acquisition des connaissances principales en cours de semestre.

## Flux et lois de conservations (L2 Sciences Exactes)

- Implication personnelle : chargé de TD et de TP.
- Public : groupes de ~20 étudiants.

Il s'agit d'un cours transverse qui utilise les notions de mécanique vues en L1 et d'électromagnétisme enseignées en parallèle, mais aussi des notions élémentaires de transfert thermique (développées plus tard dans le cours d'introduction à la physique statistique de L3), et d'hydrodynamique (en M1).

Ce module ayant démarré à la rentrée 2014, j'ai participé à la construction du cours et à la rédaction des sujets de TD. Dans le cadre de ces TD, j'ai eu l'occasion de tester de nouvelles pratiques pédagogiques (travail en petits groupes, contrôle continu, passage au tableau). Je me suis également investi dans l'encadrement et la préparation des TP de cette UE qui permettent d'aborder de manière concrète trois principes étudiés sous un angle théorique en cours et en TD : la loi de Darcy, la calorimétrie par l'azote et le transfert thermique à l'intérieur d'un barreau métallique. Dans ce cadre, un travail important a été réalisé avec les étudiants au sujet de la présentation des résultats (unités, chiffres significatifs, choix des échelles des graphiques) et du recul pris par rapport aux résultats (identification des sources d'erreur et estimation des incertitudes, cohérence de l'ordre de grandeur annoncé, proposition d'amélioration du protocole).

## Outils pour l'informatique (L1 Sciences Exactes)

- Implication personnelle : chargé de TD.
- Public : groupes de ~20 étudiants.

Cet enseignement généraliste d'utilisation d'outils relatifs à la bureautique et à internet, est destiné à l'ensemble des étudiants de L1 de l'université. Il consiste principalement à initier les étudiants à l'utilisation des ordinateurs, à leurs systèmes d'exploitation et à certains outils informatiques d'usage courant (L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X par exemple). J'ai assuré les cours/TD d'un groupe de ~20 étudiants et rédigé l'examen de l'année 2010/2011.

### **Introduction à l'astrophysique (formation continue des enseignants du secondaire)**

- Implication personnelle : animation d'un atelier.
- Public : groupes de ~40 auditeurs.

J'ai animé un module d'introduction à l'astrophysique destiné aux enseignants du secondaire des académies de Paris, Versailles et Créteil, dans le cadre du Plan Académique de Formation. Cet atelier a pris la forme d'un cours/TD interactif avec exercices à réaliser (ré-exploitables en classe), afin de discuter ensuite des possibilités d'enseignement de l'astrophysique en collège et lycée et d'accompagner les enseignants dans la création de tels enseignements.

### **Interrogations orales de sciences physiques (CPGE PTSI)**

- Implication personnelle : examinateur.
- Public : groupes de 3 étudiants / heure.

J'ai été examinateur en première année de classe préparatoire aux grandes écoles (Physique, Technologie, Sciences de l'Ingénieur) au lycée Voltaire (académie de Paris) au cours du premier semestre de l'année scolaire 2016-2017. Les interrogations orales (d'une heure chacune) portaient sur le programme de physique et de chimie de PTSI (oscillateur harmonique, propagation des ondes, optique géométrique, chimie des solutions, etc.) dans le but de préparer les étudiants aux oraux des concours mais aussi de permettre aux étudiants de réviser leurs connaissances et d'appliquer le cours. J'ai été amené à concevoir les sujets des interrogations orales.

# Projet de recherche

## Astrophysique des hautes énergies : observations en astronomie photonique spatiale dans le contexte multi-messagers

### Résumé du projet

**Objectifs.** L'astronomie multi-messagers est appelée à révolutionner notre compréhension de l'Univers cataclysmique. Développer et coordonner les programmes d'observations multi-messagers représente un véritable défi mais constitue la condition nécessaire à une meilleure compréhension des processus physiques associés. Ce projet de recherche s'articule autour de trois grandes questions soulevées par les observations multi-messagers. D'une part, le but sera d'améliorer notre compréhension de la formation et des propriétés des éjectas relativistes au voisinage des trous noirs, ce qui nous conduira aussi à étudier l'origine des rayons cosmiques de haute énergie qui reste un mystère de l'astrophysique moderne. D'autre part, je poursuivrai l'étude de la formation des couples d'objets compacts détectés par LIGO/Virgo, dont l'origine fait encore débat. Enfin, la croissance des trous noirs supermassifs est, elle aussi, une problématique ouverte que nous étudierons à plus long terme grâce à une approche observationnelle similaire.

**Méthode.** Ces travaux reposent essentiellement sur l'astronomie photonique qui joue un rôle fondamental dans le contexte multi-messagers. Les données X et gamma, issues des missions spatiales de haute énergie SVOM et *Athena* seront ainsi exploitées en synergie avec les données des détecteurs d'ondes gravitationnelles et des télescopes à neutrinos. A ce titre, je m'investirai non seulement dans la mise en œuvre des études multi-messagers de l'APC mais aussi dans le développement du segment sol de SVOM et d'*Athena*, en lien étroit avec les équipes techniques du laboratoire.

**Pré-requis.** Pour mener à bien ce projet, je mettrai à profit mon expérience dans l'analyse des données multi-longueurs d'onde et multi-messagers, mais aussi dans la coordination d'activités multi-messagers. Les thématiques abordées se situant dans la continuité de mes activités de recherche actuelles, je dispose d'une bonne connaissance des enjeux du domaine. Enfin, actuellement impliqué dans les collaborations ANTARES et KM3NeT, je travaille en relation étroite avec les collaborations LIGO et Virgo (et en particulier avec l'équipe Virgo de l'APC) dans le cadre des suivis multi-messagers des signaux gravitationnels. Ces activités me seront utiles pour mener à bien ce projet qui requiert de nombreuses synergies avec ces collaborations.

**Mots-clés.** Astronomie photonique spatiale (X et gamma); astronomie multi-messagers (neutrinos, ondes gravitationnelles); analyse de données multi-longueurs d'onde; formation des jets relativistes; processus transitoires de haute énergie; évolution des objets compacts.

### I Introduction

L'existence des sursauts gamma (GRB), des noyaux actifs de galaxies (AGN) et de leur pendants à l'échelle galactique, les microquasars, soulève deux questions fondamentales. La première est : **comment l'énergie peut-elle être extraite de manière si efficace d'un volume si faible pour produire l'émission observée?** Même si les processus d'accrétion/éjection de matière ne sont pas encore compris en détails, la réponse doit impliquer la présence d'un objet compact dont la masse varie de quelques masses solaires dans le cas des microquasars et des GRB, à plusieurs centaines de millions de masses solaires pour les trous noirs supermassifs au centre des galaxies. Ceci implique une seconde question : **comment se forment ces objets compacts, et en particulier les trous noirs, aussi bien à l'échelle stellaire qu'au centre des galaxies ?**

**Le projet de recherche décrit ci-dessous s'articule autour de ces deux thématiques et se situe dans la continuité de mes travaux de recherche actuels.** Il repose sur l'astronomie photonique spatiale dans les domaines X et gamma, partie intégrante de l'approche multi-messagers qui est au cœur des activités du laboratoire APC. Cette approche, qui prend tout son sens depuis la détection récente des ondes gravitationnelles (Abbott et al., 2016, 2017a) et d'un flux de neutrinos cosmique de haute énergie par l'expérience IceCube (Aartsen et al., 2013), est vouée à révolutionner notre compréhension de l'Univers cataclysmique. **L'astronomie X et gamma joue un rôle tout à fait fondamental dans ce cadre, puisqu'elle permet non seulement de localiser les sources à l'origine d'une émission multi-messagers mais aussi d'identifier et comprendre les processus physiques qui les gouvernent.** Toutefois, à l'heure actuelle, la mise en œuvre concrète des synergies multi-messagers constitue

un challenge car elle nécessite un dialogue entre des communautés aux habitudes de travail différentes, des protocoles d'échanges de données parfois spécifiques, le respect de clauses de confidentialité, une interaction entre domaines au degré de maturité très différents, etc. C'est une activité que je mène actuellement au sein de la collaboration ANTARES, ce qui me place dans une position appropriée pour participer à la coordination effective des activités multi-messagers au sein du laboratoire APC.

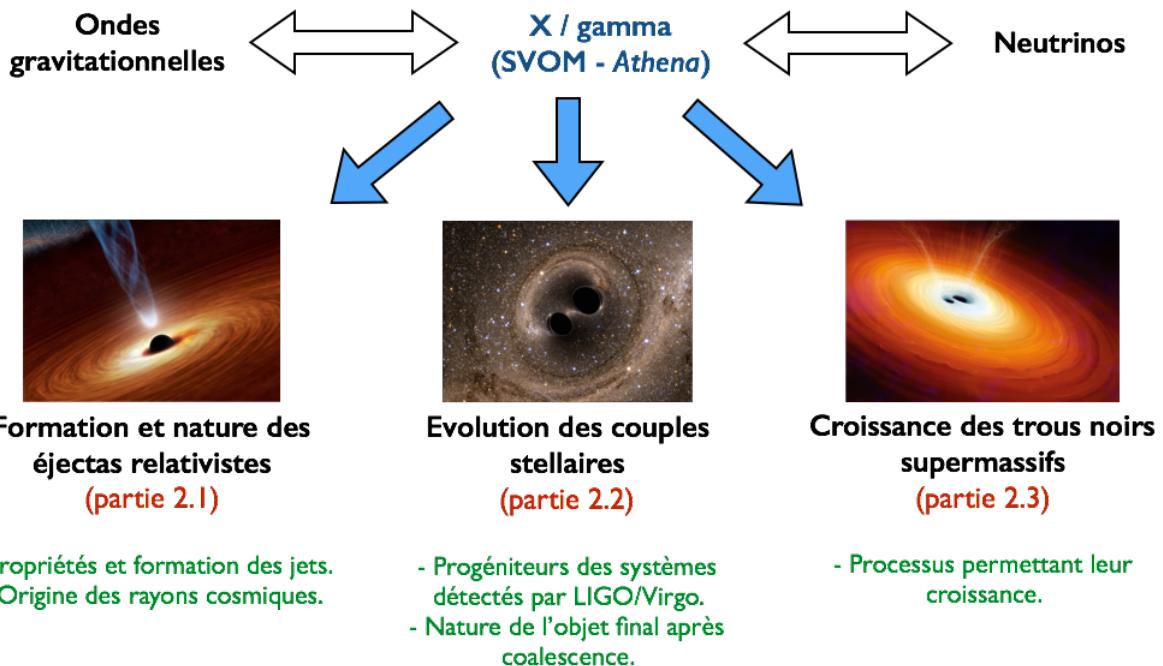
Mon projet de recherche a vocation à être mis en œuvre sur le long terme. Toutefois, plusieurs axes pourront être abordés dès 2018. Je souhaite notamment m'intéresser aux processus de formation et à la nature des éjectas relativistes observés dans les microquasars, dans les AGN et dans les GRB (partie 2.1). Ces travaux exploiteront essentiellement les données de la mission spatiale SVOM (*Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor*) qui sera mise en orbite dès 2021. Parallèlement à cela, mes activités aborderont l'étude de la formation et de l'évolution des systèmes binaires stellaires à l'origine des fusions d'objets compacts observées par LIGO/Virgo (partie 2.2). Ces travaux bénéficieront à la fois des données de SVOM mais aussi de celles du satellite *Athena* qui observera le ciel dans le domaine des rayons X mous à l'horizon 2030. A plus long terme, les méthodes et outils observationnels mis en œuvre dans les deux premières étapes de mon projet seront exploités pour étudier la croissance des trous noirs supermassifs. En particulier, nous mettrons à profit les synergies entre *Athena* et l'interféromètre spatial LISA destiné à la détection des ondes gravitationnelles entre 0.1 et 100 mHz, projet dans lequel l'APC joue un rôle majeur (partie 2.3).

Je suis particulièrement motivé à rejoindre le laboratoire APC au sein duquel j'ai eu la chance de travailler durant deux ans et auquel je suis actuellement associé. Le laboratoire est impliqué dans l'astronomie photonique spatiale (incluant les missions INTEGRAL, *Athena* et SVOM, sous la responsabilité respective d'Andrea Goldwurm et de Cyril Lachaud) mais aussi sur les projets LIGO/Virgo, LISA, ANTARES, KM3NeT, HESS et CTA, dont il sera aussi question dans ce projet. Ceci lui permet d'être en première ligne des activités multi-messagers actuelles. Il offre ainsi un environnement très favorable à la mise en œuvre de mon projet. Celui-ci s'inscrit dans les priorités thématiques du groupe Astrophysique à Haute Energie (dont la responsable est Anne Lemoire) en y apportant par ailleurs de nouvelles compétences et perspectives, concernant par exemple l'évolution des objets compacts. Certains axes de travail se veulent transverses et seront menés en lien avec le groupe Gravitation (dont le responsable est Eric Chassande-Mottin) et avec l'équipe ANTARES/KM3NeT (dont la responsable est Véronique Van Elewyck). Au delà des problématiques scientifiques abordées ci-dessous, mon expertise dans la coordination d'activités multi-messagers associées aux sources transitaires, et mon expérience dans deux collaborations internationales me permettront de prendre rapidement des responsabilités au sein des projets SVOM et *Athena*. Mon expérience d'encadrement des étudiants (en stage et en thèse) pourra enfin constituer un atout pour l'équipe d'accueil et les groupes de travail que je serai amené à intégrer.

## 2 Objectifs scientifiques

Mon projet de recherche s'articule selon la logique illustrée sur la figure 1. De manière générale, les trois volets (formation et nature des éjectas relativistes, évolution des systèmes binaires et croissance des trous noirs supermassifs) sont importants pour une meilleure compréhension de l'origine du rayonnement cosmique de haute énergie et de l'évolution des galaxies, régulée non seulement par l'évolution des étoiles massives et du trou noir central de la galaxie hôte, mais aussi par la rétroaction des sources de haute énergie.

Répondre aux questions abordées dans ce projet nécessitera l'exploitation des données X et gamma, issues de SVOM et *Athena* et des instruments en activité tels qu'INTEGRAL, *Fermi*, *Swift*, *Chandra* ou encore XMM-Newton ainsi que de leurs nombreuses données d'archive publiques. Ces observations seront utilisées en lien étroit avec les données multi-messagers disponibles à l'APC et couplées à des observations multi-longueurs d'onde qui seront obtenues via des demandes de temps d'observation. Enfin, l'APC a la chance d'être directement engagé dans la conception instrumentale des missions SVOM et *Athena*. Mon implication dans les collaborations ANTARES et KM3NeT m'a convaincu qu'un lien étroit entre les équipes techniques et scientifiques est fondamental à une bonne connaissance des instruments et donc à une exploitation fiable de leurs données. Par conséquent, je m'attacherai à décrire l'investissement que je souhaite avoir sur les sujets à l'interface entre les équipes techniques (informaticiens et instrumentalistes) et scientifiques dans le cadre de la préparation de SVOM et *Athena*.



**Figure 1 – Articulation du projet de recherche selon trois axes principaux.**

## 2.1 Formation et nature des éjectas relativistes

Les jets relativistes observés à la fois dans les microquasars, les GRB et les AGN semblent être associés aux processus d'accrétion observés à proximité immédiate des objets compacts. Néanmoins, les détails de ce couplage sont encore mal compris même si une physique commune pourrait gouverner ces trois familles de sources (Nemmen et al., 2012).

Alors que les processus d'accrétion/éjection sont étudiés en détail dans les microquasars et les AGN depuis plusieurs décennies, la physique à l'origine des GRB reste plus mystérieuse. Si l'observation récente d'une coalescence de deux étoiles à neutrons (GW170817) associée à un GRB court (GRB170817A) semble confirmer l'origine de ces événements transitoires de haute énergie, elle soulève aussi de nombreuses questions sur la structure et la dynamique de l'éjecta relativiste associé aux GRB, qui peuvent maintenant être étudiés sous différents angles de vue<sup>1</sup> et comparés aux éjections relativistes observées dans les AGN et les microquasars.

Cet axe de recherche est destiné à explorer les questions suivantes :

- Quelle est la structure des éjectas relativistes ?
- Ces jets sont-ils capables d'accélérer des rayons cosmiques de haute énergie ?
- Quel est le lien entre l'accrétion et l'éjection de matière ?
- Quelles sont les similarités et différences entre les jets observés dans les AGN, les microquasars et les GRB ?

Les phénomènes astrophysiques dont il est question ici sont généralement transitoires ou variables au cours du temps et sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Par conséquent, contraindre les processus physiques en jeu nécessite des suivis multi-longueurs d'onde rapides et simultanés. C'est le but du satellite SVOM. Constitué d'un imageur à masque codé observant en X durs / gammas mous (ECLAIRs), d'un spectromètre gamma (GRM), d'un télescope à rayons X mous (MXT), d'un télescope visible (VT) et d'un réseau de télescopes de suivi en optique et infrarouge au sol, il sera à même d'observer les sources transitoires sur une large gamme du spectre électromagnétique. Initialement conçu pour l'étude des GRB, les objectifs de SVOM se veulent bien plus larges puisqu'une partie non négligeable du temps d'observation sera consacrée aux cibles d'opportunités

1. En effet, la détection d'un signal gravitationnel permet de rechercher une émission électromagnétique associée à une coalescence d'objets compacts même si l'éventuel jet relativiste n'est pas orienté selon la ligne de visée.

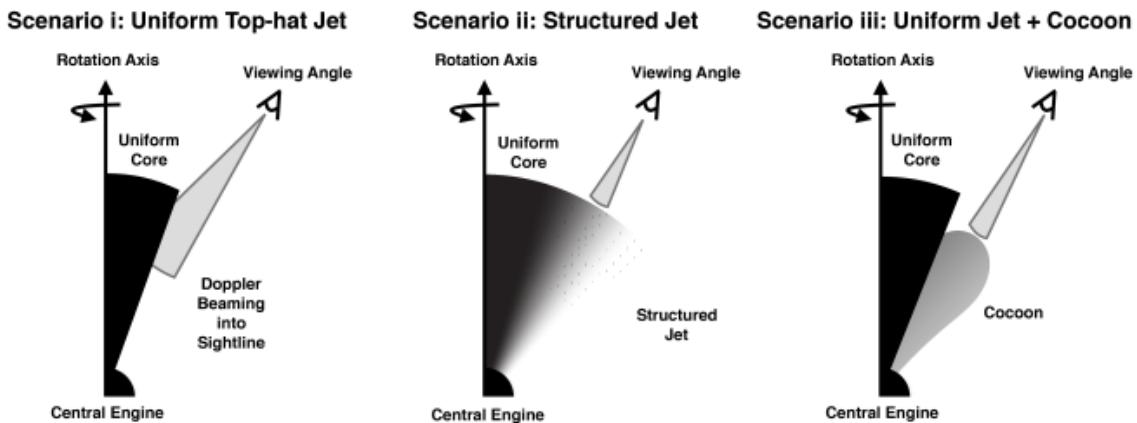
(ToO), dont la responsabilité est assurée par l'APC, et au programme général, qui englobe la science hors GRB, auquel l'APC participe également. Grâce aux compétences que nous aurons acquises à l'APC sur le suivi en X et gamma des sources transitoires et variables avec SVOM, nous pourrons ensuite jouer un rôle moteur dans l'étude des phénomènes transitoires et dans la gestion des ToO au sein du consortium *Athena*.

### 2.1.1 Suivi X et gamma des sources d'ondes gravitationnelles

Le taux de détection de coalescences de systèmes binaires est appelé à augmenter parallèlement à l'augmentation de la sensibilité des détecteurs Advanced LIGO et Virgo d'ici à 2020. De fait, les propriétés de GW170817 ne s'appliquent probablement pas à l'ensemble de la population de GRB courts et seule la découverte de nouvelles contreparties électromagnétiques permettra de décrire leur population de manière exhaustive.

L'APC sera en bonne position pour poursuivre ces travaux grâce notamment à l'expérience acquise sur les suivis multi-messagers avec INTEGRAL. Des demandes de temps d'observations à plus basse énergie (sur *Chandra* et *XMM-Newton* dans le domaine des X mous) sont en cours de rédaction pour assurer le suivi des ondes gravitationnelles qui seront détectées durant le troisième *run* d'observation qui démarrera à l'automne 2018. **Etant déjà impliqué dans le suivi des ondes gravitationnelles (avec la composante neutrinos de haute énergie), je pourrai rapidement prendre part à ces travaux qui ouvriront la voie à SVOM et Athena à plus long terme.** Le cas échéant, mon expérience dans la rédaction de demandes de temps d'observations sur différents instruments sera un atout afin d'obtenir des observations coordonnées à différentes longueurs d'onde.

**La découverte de GW170817 soulève la question de la structure et de la dynamique des éjectas relativistes associés aux coalescences d'étoiles à neutrons.** L'émission prompte et la rémanence observées pourraient s'expliquer par un jet structuré dont l'énergie et le facteur de Lorentz varient avec l'angle par rapport à l'axe du jet, ou encore par la formation d'un cocon d'ouverture plus large et faiblement relativiste associé à la propagation du jet à travers la matière préalablement éjectée (Kasliwal et al. 2017, figure 2), voire même par une émission moyennement relativiste isotrope. A l'avenir, les suivis observationnels sur le long terme dans le domaine des rayons X mous, couplés aux observations radio, permettront de contraindre précisément les modèles d'éjectas proposés ci-dessus et l'ouverture des jets relativistes (s'ils sont présents). La détection d'une coupure spectrale associée au refroidissement synchrotron et d'une décroissance de la courbe de lumière, fournira une estimation de la structure et de la vitesse de l'éjecta et précisera donc son origine (Mooley et al., 2017 ; Troja et al., 2018). De telles études pourront être envisagées dès 2018/2019 si le temps d'observation sur *XMM-Newton* et/ou *Chandra* est obtenu.



**Figure 2 –** Différentes configurations d'éjecta envisagées pour expliquer l'émission électromagnétique associée à GW170817. Figure extraite de Abbott et al. 2017b.

Dès 2021, SVOM assurera le suivi des détections LIGO/Virgo en synergie avec son réseau d'instruments au sol dont le déploiement dans les domaines visible et infrarouge est en cours. Néanmoins, pour que ce programme de suivi multi-longueurs d'onde soit mené efficacement, il sera nécessaire d'affiner la stratégie de recherche. Alors que plusieurs améliorations des suivis ont déjà été proposées dans les domaines radio et visible (voir par

exemple [Salafia et al. 2017](#)), les suivis en X et gamma doivent encore être optimisés pour permettre la localisation de la contrepartie, l'étude de l'éjecta relativiste et celle de l'objet final (voir aussi partie [2.2.3](#)). Un certain nombre de tâches sont à prévoir à ce sujet et seront menées dès 2018, en particulier avec Cyril Lachaud qui a la responsabilité de la gestion du programme « Cibles d'opportunités » de SVOM et avec Eric Chassande-Mottin (qui est un acteur clé des suivis multi-messagers des sources d'ondes gravitationnelles au sein des collaborations LIGO/Virgo) :

- **Optimisation de la stratégie de « pavage » du ciel** permettant une recherche rapide de la contrepartie dans le domaine des X avec l'instrument SVOM-MXT et avec les instruments optique/infrarouge de SVOM (au sol). Pour cela, les cartes de localisation LIGO/Virgo et les informations fournies par le signal gravitationnel (distance, masses des objets, inclinaison de l'orbite, etc.) seront utilisées pour modéliser le signal attendu et construire des cartes de détectabilité associées à des catalogues de galaxies proches. L'impact de l'incomplétude de ces catalogues devra être estimée.
- **Optimisation du temps d'exposition et du délai de suivi** (intervalle de temps entre la réception de l'alerte LIGO/Virgo et le démarrage du suivi SVOM).
- **Définition des critères permettant de confirmer la détection de la contrepartie et de la classifier** (variance du flux, intensité, morphologie spectrale, etc).
- ***Estimation de la probabilité de coïncidence fortuite.***

Ces optimisations seront réalisées grâce à des simulations Monte Carlo des observations SVOM qui prendront en compte le champ de vue et le niveau de bruit de fond des instruments, les propriétés des sources X connues dans le champs (fournies par les catalogues *Rosat-RASS* et plus tard par *eROSITA*), la densité de sources X non cataloguées dans le champ de vue en fonction de leur flux (distribution  $\log(N) - \log(S)$ ), etc.

Dans un avenir plus lointain, *Athena*, avec une surface effective entre 0.1 et 15 keV bien meilleure que celles de *Chandra* et *XMM-Newton*<sup>2</sup>, sera capable de détecter un échantillon plus grand de rémanences aux coalescences d'objets compacts. Par ailleurs, son spectrographe intégral de champ (X-IFU) pourrait permettre la détection de raies spectrales associées à l'environnement direct des GRB suffisamment brillants et proches. Une telle détection serait décisive pour mesurer de manière indépendante le redshift de la source ou encore la vitesse et la composition de l'éjecta. Toutefois, *Athena* n'est pas optimisé pour le suivi des événements transitoires et le cahier des charges associés aux ToO n'est pas encore arrêté. Je souhaiterais ainsi m'investir au sein du groupe de travail « *Targets of Opportunity* » du consortium pour anticiper les besoins et affiner la stratégie de suivi des sources transitoires, en cherchant un compromis entre les enjeux scientifiques et les performances techniques. Cela nécessitera la prise en compte du cycle utile de refroidissement des détecteurs, de la disponibilité du segment sol (nécessité d'une présence humaine pour décider d'exécuter la ToO ou non), du temps requis pour prévoir les observations depuis le sol, des créneaux de communication avec le satellite ou encore du temps de repointage des instruments. Ce travail sera bien sûr effectué en synergie étroite avec les équipes techniques investies sur le projet.

### 2.1.2 Suivi à haute énergie des blazars et des microquasars en activité

Une manière complémentaire d'étudier la dynamique des jets relativistes est d'observer les AGN et les microquasars, à différentes phases de leur activité. En effet, les processus d'accrétion/éjection pourraient être contrôlés par une physique commune comme l'en atteste le plan fondamental des trous noirs reliant la masse de l'objet compact, la puissance du jet et la luminosité X ([Merloni et al., 2005](#)) qui laisse entrevoir un couplage entre l'état du disque d'accrétion et l'émission de jets relativistes. Parallèlement au suivi des ondes gravitationnelles, je propose ainsi de poursuivre et d'accentuer mes investissements selon deux axes : d'une part, **le suivi multi-messagers des blazars** qui pourraient être à l'origine du flux diffus de neutrinos détectés par IceCube, et d'autre part, **le suivi multi-longueurs d'onde des microquasars** à différentes phases de leur activité. Avec cet axe de recherche, je serai bien placé pour m'investir dans les activités du programme général de SVOM. A ce

2. Entre 10 et 20 fois meilleure à 1 keV comparée à la surface effective de *XMM-Newton*.

titre, l'APC est responsable de l'implémentation du *pipeline* de traitement des données de l'instrument ECLAIRs (X durs/gamma mous) et de la fabrication des catalogues de sources. **Je suis prêt à m'investir, en lien étroit avec le centre de traitement des données spatiales (FACe, François Arago Center) de l'APC, dans ces travaux stratégiques qui permettront une exploitation rigoureuse des résultats de la mission.** Par exemple, les aspects suivants pourront être abordés en lien avec Jean-Marc Colley qui est le chef du projet à l'APC et sur la base de mes compétences en développement d'algorithmes d'analyses multi-messagers :

- **Participation au développement des algorithmes de gestion du bruit de fond et de calibration des données lors du passage de la Terre dans le champ de vue de SVOM<sup>3</sup>.** Ceci permettra l'utilisation des données malgré la présence de la Terre dans le champ de vue, afin de maximiser la quantité de données disponibles pour chaque source du catalogue.
- **Participation au développement des algorithmes de reconstruction des sources et de leur énergie.** Ce travail sera mené en collaborations avec Andrea Goldwurm et Aleksandra Gros (CEA/DAp).
- **Développement d'un outil interactif d'analyse rapide** des données (*quick look*). Il pourra notamment inclure de nouveaux algorithmes de détection de sources faibles et/ou transitoires.
- **Validation du pipeline du programme général.** Il s'agira par exemple de simuler le bruit de fond et une ou plusieurs source(s) dans le champ de vue pour s'assurer de la reconstruction adéquate des paramètres observés des sources (flux, indice spectral, etc.) par le *pipeline*.

A plus long terme, et sur la base de l'expérience acquise à l'APC sur le segment sol de SVOM, je pourrai m'investir dans la **définition et l'implémentation du segment sol d'Athena** au sein du groupe de travail associé et en collaboration avec les équipes techniques de l'APC qui contribuent actuellement au développement de la chaîne de lecture de l'instrument X-IFU, sous la responsabilité de Damien Prêle.

Sur le plan scientifique, une manière de comprendre le mécanisme de formation des jets relativistes est d'étudier leur composition. La preuve irréfutable d'une accélération hadronique dans les jets relativistes viendrait de la détection de neutrinos de haute énergie associés, qui aurait des retombées fondamentales sur la compréhension des processus d'accrétion et d'éjection de matière à proximité des trous noirs (voir par exemple [Zdziarski & Böttcher 2015](#)).

**Ayant contribué à la mise en place d'un programme de suivi avec INTEGRAL des événements neutrinos détectés par ANTARES, je m'investirai naturellement dans cette activité tout en préparant les programmes de suivi des alertes provenant des télescopes à neutrinos par SVOM, en collaboration avec l'équipe ANTARES/KM3NeT de l'APC.** Ces travaux ont d'ailleurs déjà débutés puisque le réseau de télescopes robotiques du programme SVOM (GWAC) effectue régulièrement des suivis optiques des neutrinos détectés par ANTARES. **Ces analyses conjointes seront appelées à s'étendre et constituent l'une des raisons d'être du laboratoire APC.** Une association significative entre une émission neutrino et une émission électromagnétique permettrait de lever le voile sur l'origine du rayonnement cosmique de haute énergie.

Plusieurs indices laissent penser que les jets relativistes de blazars pourraient accélérer des rayons cosmiques au delà de 10 PeV. Une coïncidence entre un neutrino de haute énergie détecté par IceCube (IC170922) et le blazar TXS 0506+056 actuellement en activité a été révélée en septembre 2017 ([Tanaka et al., 2017](#); [Mirzoyan, 2017](#)) et fait suite à des corrélations éventuelles avec d'autres blazars ([Kadler et al., 2016](#); [Resconi et al., 2017](#); [Lucarelli et al., 2017](#)). Ce lien demande toutefois à être confirmé par des données supplémentaires pour exclure une éventuelle coïncidence fortuite ou des biais de sélection.

Mais confirmer l'association neutrino/blazar nécessite une compréhension fine des paramètres physiques de la source estimés par ajustement de la distribution spectrale d'énergie (SED) par des modèles théoriques. Cette approche requiert des observations multi-longueurs d'onde obtenues le plus simultanément possible. **J'envisage donc de poursuivre les travaux que j'ai démarrés en collaboration avec une équipe de l'université Penn State pour caractériser les SED des blazars coïncidents avec les événements détectés par les télescopes à**

3. La configuration orbitale anti-solaire du satellite est telle que la Terre entrera dans son champ de vue à chaque orbite, modifiant la forme du bruit de fond.

**neutrinos** (voir le résumé de mes activités de recherche). Au travers de cette collaboration, nous continuerons le traitement et l’interprétation des données propriétaires *Swift*, NuSTAR et VLT/X-Shooter (de nouvelles demandes de temps d’observation sont en cours de rédaction) et des données publiques du satellite *Fermi*. Le but sera de contraindre une éventuelle origine hadronique de l’émission gamma. A ce titre, [Gao et al. \(2017\)](#) a montré que l’émission X est particulièrement importante pour contraindre la part d’énergie délivrée aux baryons relativement à celle délivrée aux leptons dans le jet. A partir de 2021, nous poursuivrons ces programmes d’observations avec SVOM et son réseau de suivi multi-longueurs d’onde qui permettra un suivi quasi-simultané des sources sur une large bande du spectre électromagnétique et par conséquent une caractérisation précise de leur SED.

Par ailleurs, une difficulté inhérente à l’approche décrite ici réside dans la détermination du redshift de ces objets dont l’émission est dominée par la composante non-thermique. Des observations X-Shooter couvrant une large bande (de l’UV jusqu’à l’infrarouge proche) seront déclenchées à cette fin et permettront aussi une couverture large de la SED dans ce domaine de longueurs d’onde. Enfin, ces activités pourront également s’envisager dans un cadre plus large, en collaboration avec l’équipe HESS/CTA de l’APC pour ce qui est de la détection du rayonnement gamma de très haute énergie qui peut être décisive pour confirmer une émission hadronique. Le groupe AHE de l’APC dispose également d’une expertise en polarisation X et gamma qui pourrait elle aussi tracer les processus hadroniques. Bien qu’une telle détection soit difficilement envisageable avec INTEGRAL (le temps d’intégration requis serait beaucoup trop important), cette activité pourra être envisagée avec les observatoires spatiaux futurs, tel qu’e-ASTROGAM.

Finalement, le suivi des microquasars joue un rôle complémentaire pour mieux comprendre le couplage entre la dynamique générale des jets relativistes et leur microphysique (accélération de particules et processus radiatifs). Grâce à leurs temps caractéristiques de variabilité beaucoup plus courts, un même microquasar peut être observé à différents stades de son activité ce qui permet une étude fine du couplage entre l’évolution du disque d’accrétion et celle du jet relativiste, mais au prix d’observations multi-longueurs d’onde simultanées souvent complexes à mettre en œuvre. **Je suis déjà engagé dans le suivi observationnel des microquasars dans le centre Galactique (avec INTEGRAL) et je souhaite à ce titre renforcer mon investissement dans ces activités dans les années à venir.**

Nous pourrons par exemple poursuivre la recherche d’émission au GeV dans les données d’archive de l’instrument LAT à bord du satellite *Fermi*. Comprendre l’origine exacte de cette émission gamma (détectée à l’heure actuelle uniquement dans trois microquasars, Cyg X-3 et de manière moins significative Cyg X-1 et V404 Cyg) revêt un enjeu particulier puisque cela pourrait permettre de tester l’universalité des processus d’accrétion et d’éjection relativiste. Une approche pourrait être d’appliquer des techniques similaires à celles utilisées pour la recherche de neutrinos de haute énergie, *via* notamment un *stacking* des contributions de plusieurs sources en utilisant le nouveau *processing* des données *Fermi*/LAT : Pass8. Cette partie du travail pourra être mise en œuvre dès 2018. Par ailleurs, à moyen terme cet axe d’étude reposera aussi sur un suivi systématique des microquasars en activité avec SVOM et sur un déploiement de campagne de suivi multi-longueurs d’onde avec les instruments au sol de SVOM notamment. A plus long terme, le spectromètre X-IFU à bord d’*Athena* nous permettra de mener une recherche étendue de raies baryoniques associées aux jets relativistes des microquasars et de vérifier ainsi le contenu hadronique des jets qui a été détecté à l’heure actuelle dans deux sources uniquement (4U 1630-47 et SS 433, [Díaz Trigo et al. 2013](#); [Kotani et al. 1994](#)). Enfin, *Athena* devrait permettre de mesurer le spin<sup>4</sup> des trous noirs de plusieurs microquasars (voir aussi partie 2.2) et de vérifier ainsi l’existence d’une corrélation entre la valeur du spin du trou noir et la puissance des jets relativistes (tracée par l’intensité du flux radio) qui est un sujet actuellement débattu au sein de la communauté ([Narayan & McClintock, 2012](#); [Russell et al., 2013](#)). Confirmer une telle corrélation revêt un enjeu fondamental pour distinguer les processus de formation des jets relativistes puisque cela signifierait que les jets puisent leur énergie du spin du trou noir et non de la rotation du disque d’accrétion.

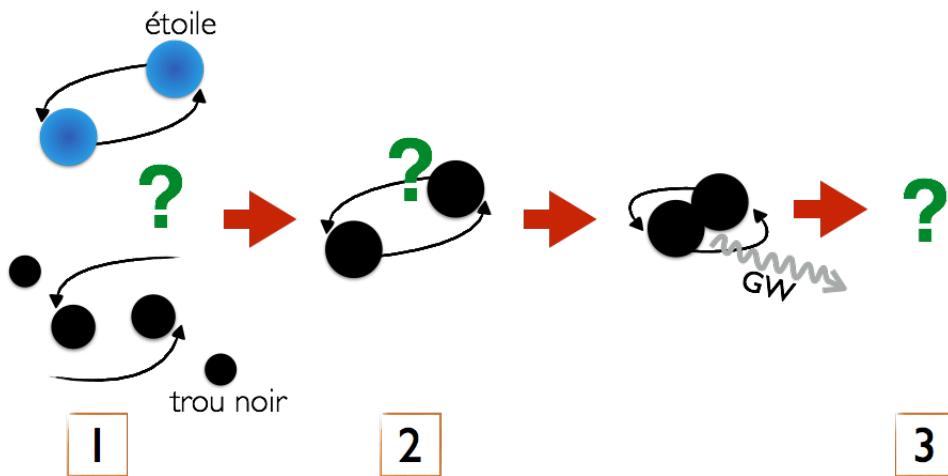
---

4. Le spin d’un trou noir est généralement défini par le paramètre sans dimension  $a_* \equiv cJ/GM^2$ , avec  $|a_*| \leq 1$ .  $M$  et  $J$  correspondent respectivement à la masse et au moment cinétique du trou noir.

## 2.2 Etude de l'évolution des couples stellaires

Si la mesure du spin des trous noirs de masse stellaire avec *Athena* offrira de nouvelles contraintes sur le mode de formation des jets relativistes, elle permettra aussi et surtout d'étudier leur formation et évolution. L'axe de travail décrit ici s'inscrit dans la continuité de mes travaux de thèse sur l'évolution des systèmes binaires mais aussi dans une démarche plus large initiée, à travers un financement du LabEx UnivEarthS, en collaboration avec des équipes des laboratoires APC et AIM et destinée à mieux comprendre l'évolution des systèmes binaires à l'origine des coalescences d'objets compacts observées par LIGO/Virgo. Je suis déjà membre de ce projet et souhaiterais continuer à m'y investir en y apportant de nouvelles contraintes observationnelles issues des instruments X et gamma et de leurs synergies avec les détecteurs d'ondes gravitationnelles et de neutrinos.

Les processus physiques menant à la coalescence de deux objets compacts sont encore mal compris. En particulier, on s'intéressera ici à trois phases précises illustrées sur la figure 3. La première (phase 1 sur la figure 3) correspond à la formation du couple d'objets compacts. S'agit-il d'un couple d'étoiles qui a évolué pour former un système double d'objets compacts, *via* notamment une enveloppe commune qui tend à diminuer la période orbitale du système ? Ou bien s'agit-il de deux objets compacts déjà formés qui ont été réunis par capture dynamique au sein d'un amas globulaire ? La seconde question qui nous intéressera (phase 2 sur la figure 3) est de savoir comment se forment les objets compacts constituant ces couples, au travers notamment d'une supernova à effondrement de cœur. Il s'agirait par exemple de comprendre l'influence du spin et de la masse du progéniteur et de tenter ainsi de distinguer les processus qui mènent à la formation d'un trou noir de ceux qui mènent à la formation d'une étoile à neutrons. Enfin, la coalescence des deux objets compacts constitue la dernière étape de leur évolution. Si le couple est constitué de deux étoiles à neutrons, la nature de l'objet final qui résulte de la coalescence n'est pas déterminée (phase 3 de la figure 3). Les observations dans le domaine des rayons X devraient permettre de répondre à cette question, c'est l'enjeu du troisième axe d'étude développé dans cette partie.



**Figure 3 – Illustration de l'évolution d'un couple binaire. Le projet décrit ici vise à étudier les trois phases indiquées (voir texte).**

### 2.2.1 Evolution d'un couple d'étoiles ou capture dynamique d'objets compacts ?

Les détections récentes de systèmes binaires compacts par LIGO/Virgo ne permettent pas encore de distinguer le mode de formation (évolution d'un système binaire isolé ou bien formation dynamique d'un système de deux objets compacts dans un milieu dense), ni de comprendre leur lien avec les systèmes binaires observés dans notre Galaxie. Les observations des systèmes de deux trous noirs permettent de mesurer le spin effectif  $\chi_{\text{eff}}^5$  qui s'avère pour l'instant relativement faible (même si ces résultats ne sont pas encore significatifs). De

5. Le spin effectif est défini par  $\chi_{\text{eff}} = \frac{M_{\text{BH}1}a_1 \cos \theta_1 + M_{\text{BH}2}a_2 \cos \theta_2}{M_{\text{BH}1} + M_{\text{BH}2}}$ , avec  $a_{1,2}$  les spins des deux trous noirs et  $\theta_{1,2}$  les angles entre le moment cinétique orbital et le spin des deux trous noirs.

telles valeurs de  $\chi_{\text{eff}}$  peuvent s'expliquer soit par des spins intrinsèquement faibles soit par un désalignement des spins des deux objets compacts. Alors que les spins de trous noirs stellaires mesurés en rayons X dans les microquasars les plus massifs sont généralement élevés, ces faibles valeurs de spins effectifs pourraient ainsi révéler un mode de formation différent des binaires X<sup>6</sup> et en particulier une formation par capture dynamique au sein d'un amas globulaire.

**Pour contraindre le mode de formation des systèmes binaires d'objets compacts détectés par LIGO/Virgo, nous pourrons ainsi poursuivre la mesure du spin des trous noirs stellaires présents dans les systèmes binaires X massifs**, dans notre Galaxie et dans certaines galaxies locales. Une meilleure statistique permettra de vérifier la compatibilité (ou l'incompatibilité) entre la distribution des spins déterminés par les observations en rayons X et celle des spins mesurés par LIGO/Virgo. Ces comparaisons seront réalisées, en prenant en compte les différences de métallicité et les transferts de masse, au travers de codes d'évolution des binaires. Nous emplirons à ce titre le code MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) que nous utilisons dans le cadre du projet LabEx. De même, les estimations de spins des binaires X massives, associées à des mesures de la masse des trous noirs dans le domaine visible, nous permettront de tester s'il existe différents canaux de formation au sein même de cette population. C'est en effet ce que prétendent certaines études récentes qui suggèrent une dichotomie dans les intensités de spin (mais basées sur un échantillon d'une dizaine de sources seulement, [McClintock et al. 2014](#)).

Grâce aux données des missions actuelles, nous devrions pouvoir mesurer le spin de quelques trous noirs supplémentaires, mais ce projet bénéficiera surtout de l'apport d'*Athena* qui permettra la mesure du spin de plusieurs dizaines de trous noirs stellaires. L'une des forces d'*Athena* résidera dans sa capacité à mesurer les spins par plusieurs méthodes complémentaires (*via* la modélisation de l'émission X du continuum émis par le disque d'accrétion ou en exploitant la forme des raies du fer émises par irradiation du disque). Ceci permettra une évaluation précise des erreurs systématiques associées et une inter-calibration des méthodes de mesure. Par ailleurs, une comparaison adéquate des deux observables (spins mesurés par LIGO/Virgo et spins mesurés dans le domaine des rayons X) nécessitera aussi une compréhension plus détaillée du processus d'explosion des supernovæ car un éventuel *kick*<sup>7</sup> transmis au système binaire pourrait impacter la valeur de spin effectif mesurée par LIGO/Virgo. Je décris dans la partie suivante une approche observationnelle qui pourrait aider à contraindre ces processus et qui permettra ensuite de calibrer les modèles numériques discutés ci-dessus.

### 2.2.2 Formation des trous noirs de masse stellaire

La formation d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir passe probablement par l'explosion (peut-être avortée dans certains cas) d'une supernova à effondrement de cœur (CCSN). A l'heure actuelle, compte tenu des incertitudes sur l'équation d'état de la matière ultra-dense, sur les interactions des neutrinos et sur le mécanisme d'explosion de la CCSN, il n'est pas possible de distinguer les progéniteurs des étoiles à neutrons de ceux qui forment les trous noirs de masse stellaire. Cependant, plusieurs approches observationnelles peuvent-être envisagées dans le contexte multi-messagers pour mieux contraindre le mode de formation des trous noirs.

**Tout d'abord, avec davantage de statistique, la distribution des spins des trous noirs dans les binaires X Galactiques (mesurés en rayons X) pourra être comparée à la distribution du spin initial des étoiles à neutrons.** Malgré la faible statistique actuelle, les spins initiaux des étoiles à neutrons semblent bien plus faibles que les spins des trous noirs, ce qui pourrait indiquer que ces derniers se forment majoritairement lorsqu'un gain de moment cinétique est assuré par l'accrétion de matière issue du progéniteur. Si cette accrétion de matière se prolonge *via* la formation d'un disque d'accrétion, elle pourrait permettre la formation de jets relativistes et engendrer un sursaut gamma long ([Miller et al., 2011](#)). Une alternative serait que la matière accrétée (*fallback*) sur la proto-étoile à neutrons entraîne son effondrement en trou noir sans émission électromagnétique associée. Confirmer la différence de distribution des spins est donc crucial pour distinguer les modes de formation des étoiles à neutrons et des trous noirs. Les mesures de spins envisagées dans la partie 2.2.1 seront exploitées dans ce cadre également.

Les résultats de ces analyses pourront être couplés aux estimations de mouvements propres des systèmes bi-

6. Le terme de « binaire X » définit l'ensemble des systèmes binaires constitués d'un trou noir ou d'une étoile à neutron accrétant une partie de la matière de l'étoile compagnon. A la différence des microquasars, ils ne comportent pas forcément tous des jets relativistes.

7. Le *kick* correspond à une impulsion éventuellement transmise au système binaire si l'explosion de la supernova formant l'un des deux objets compacts a lieu de manière asymétrique. Le mécanisme exact donnant lieu à cette asymétrie est encore peu connu.

naires X Galactiques fournis par la mission GAIA dès cette année, qui permettront de contraindre le *kick* reçu par un échantillon significatif de systèmes binaires X dans la Voie Lactée. Il deviendra ainsi possible d'étendre sur un plan statistique une étude qui reste encore aujourd'hui limitée à un petit nombre d'objets (Coleiro & Chaty, 2013), ce qui permettra finalement de distinguer le mécanisme d'explosion à l'œuvre suivant que la CCSN forme un trou noir ou une étoile à neutrons et en recherchant une éventuelle corrélation entre l'intensité du spin, celle du *kick* et la masse de l'objet compact.

Enfin, une supernova «*avortée*» donnant lieu à la formation d'un trou noir devrait aussi être associée à une émission d'ondes gravitationnelles et de neutrinos au MeV (voire à plus haute énergie si un GRB «*choqué*» se développe, Senno et al. 2016). S'il reste des progrès à faire en matière de simulation et d'interprétation du signal gravitationnel attendu lors de l'effondrement d'une CCSN, le potentiel d'une détection conjointe de neutrinos et d'ondes gravitationnelles est important. En particulier cela permettrait de mieux comprendre le mécanisme de l'explosion des supernovæ (notamment les asymétries de l'explosion et le *kick* inculqué à l'objet final). L'APC a mis en œuvre plusieurs analyses multi-messagers croisées auxquelles je souhaite continuer à participer en y incluant les données issues des télescopes X et gamma tel que proposé par Senno et al. (2016).

### 2.2.3 Quel est l'objet résultant de la coalescence de deux étoiles à neutrons?

L'évolution des systèmes binaires s'achève par leur coalescence, associée à une émission d'ondes gravitationnelles et d'un probable sursaut gamma court. Pour être exhaustive, l'étude de cette évolution implique de s'intéresser aussi à la nature de l'objet compact résultant de cette fusion. Il pourrait s'agir soit d'une étoile à neutrons stable (magnétar), soit d'un trou noir, soit d'une étoile à neutrons supramassive dont la rotation rapide empêche l'effondrement immédiat mais qui peut s'effondrer plus tard pour former un trou noir après avoir subi une perte de moment cinétique. Ceci dépend essentiellement de la masse finale de l'objet compact et de l'équation d'état de la matière ultra-dense.

L'étude de la nature du rémanent pourra être menée grâce aux observations de suivis des ondes gravitationnelles dans le domaine des rayons X décrites dans la partie 2.1.1. En particulier, si la contrepartie X est identifiée rapidement après la coalescence (ce qui sera notamment possible avec SVOM-MXT), nous rechercherons la présence de plateaux dans la courbe de lumière X qui pourraient être la signature d'un vent relativiste de magnétar. La durée et la luminosité de cette phase d'émission X sera ensuite utilisée pour contraindre son champ magnétique et sa période de rotation initiale. A l'inverse, une diminution brutale du flux X pourrait notamment correspondre à la formation d'un trou noir.

## 2.3 Etude de la croissance des trous noirs supermassifs

La dernière partie de ce programme de recherche constitue plutôt une prospective d'activités multi-messagers qui pourraient être envisagées à l'APC à l'horizon 2030. Elle vise à profiter des synergies entre *Athena* et *LISA* pour contraindre la formation des trous noirs supermassifs.

### 2.3.1 Etude des spins des trous noirs supermassifs avec *Athena* et *LISA*

La formation et l'évolution des trous noirs supermassifs, avec des masses généralement comprises entre quelques dizaines de millions et quelques milliards de masses solaires constitue un mystère de l'astrophysique moderne. Une possibilité serait que les étoiles de première génération (population III) de quelques centaines de masses solaires puissent être à l'origine des trous noirs supermassifs au travers d'une croissance rapide caractérisée par des phases d'accrétion intense dans les galaxies primordiales. De manière alternative, des trous noirs déjà massifs pourraient être formés à partir de l'effondrement de nuages de gaz primordiaux et pourraient ensuite croître par une accrétion de matière plus modérée mais active sur le long terme. Enfin, l'impact des coalescences de trous noirs sur la croissance des trous noirs supermassifs observés dans l'Univers proche est pour l'heure peu contraint.

A l'horizon 2034, *LISA* permettra l'observation des coalescences de trous noirs supermassifs sur une gamme de redshifts et de masse suffisamment importante pour sonder leur croissance. La distribution en masse des objets observés permettra de remonter à la masse des «graines» à l'origine des trous noirs plus massifs, alors

que la mesure des spins<sup>8</sup> de chacune des composantes du couple permettra de sonder les propriétés du flot d'accrétion contribuant à leur croissance. Toutefois, l'impact de l'accrétion est difficile à distinguer de l'impact des coalescences précédentes, qui toutes deux peuvent conduire à des spins élevés. **Dans le domaine des rayons X, *Athena* mesurera le spin d'une population de trous noirs supermassifs plus vaste. Ceci nous permettra de lever la dégénérescence associée aux observations effectuées par LISA (Berti & Volonteri, 2008) pour finalement mieux comprendre la contribution relative de l'accrétion et des coalescences sur la croissance des trous noirs supermassifs.**

Enfin, je pourrai aussi débuter ce travail à plus court terme selon un axe différent. En effet, SVOM apportera une contribution intéressante à l'étude de la croissance des trous noirs supermassifs au travers du sondage de l'amas de la Vierge qui sera effectué pour rechercher des événements de rupture par effet de marée (TDE pour *Tidal Disruption Events*) associés au « déchirement » d'une étoile lorsqu'elle se rapproche de l'horizon d'un trou noir supermassif. Etudier la fréquence de ces événements transitoires permettrait ainsi de déterminer la contribution des TDE à la croissance des trous noirs supermassifs (Wyrzykowski et al., 2017).

### 2.3.2 Recherche de contreparties électromagnétiques aux signaux détectés par LISA

Les synergies entre *Athena* et LISA ne s'arrêtent pas là. En effet, la détection des contreparties électromagnétiques aux coalescences de trous noirs supermassifs observées par LISA sera essentielle à plus d'un titre. Elle permettra par exemple une mesure du redshift des sources mais aussi une caractérisation de leur environnement. Enfin, l'observation des contreparties électromagnétiques est nécessaire pour les études cosmologiques et de physique fondamentale. **Grâce à l'expérience acquise sur les suivis électromagnétiques des émissions d'ondes gravitationnelles détectées par LIGO/Virgo, un programme similaire sera envisagé pour rechercher des contreparties électromagnétiques aux signaux détectés par LISA.** Identifier les sources X associées grâce à l'imageur grand champ WFI à bord d'*Athena* permettra de déterminer la galaxie hôte, et d'étudier la physique de l'accrétion dans ces objets. Même si le champ de vue de WFI atteindra quasiment 0.7 degré carré, il faudra optimiser la stratégie de recherche des contreparties. Des perspectives intéressantes de suivi dans le domaine visible pourraient également être envisagées avec le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*) en cours de construction au Chili et auquel participe l'APC.

## 3 Conclusion

Je souhaite vivement rejoindre l'UFR de physique de l'Université Paris Diderot en tant que maître de conférences rattaché au laboratoire APC. Mon projet de recherche s'inscrit dans le développement des activités du groupe Astrophysique à Haute Energie, sur la thématique de l'astronomie photonique spatiale de haute énergie. Il passera aussi par le recrutement de stagiaires et doctorants sur cette thématique comme je le mentionne dans le projet d'enseignement. Le projet en lui-même est dans la continuité de mes activités actuelles et s'articule autour de deux grands thèmes qui font écho aux problématiques actuelles de l'astronomie multi-messagers : *i)* l'analyse des éjectas relativistes à proximité des objets compacts, associée à la question de l'origine du rayonnement cosmique de haute énergie, et *ii)* l'étude de l'évolution des couples stellaires, progéniteurs des systèmes doubles d'objets compacts observés par LIGO/Virgo lors de leur coalescence. Enfin, l'étude de la croissance des trous noirs supermassifs est envisagée comme prospective à plus long terme. Ces travaux reposent sur les missions spatiales SVOM et *Athena*, et sur les missions en opération dans lesquelles l'APC est engagé. Ils tirentont partie de mon expérience de l'astronomie multi-longueurs d'onde et de la coordination d'activités multi-messagers. Par ailleurs, je suis prêt à m'impliquer sur le développement du segment sol de SVOM, en lien étroit avec le centre de traitement des données de l'APC (le FACe). De même, les premières phases de développement d'*Athena* nécessitent un lien étroit entre les équipes techniques et les équipes scientifiques pour s'assurer des performances finales de l'instrument. Je souhaite m'engager en ce sens dans les années à venir pour accroître progressivement la visibilité du laboratoire dans les groupes de travail du consortium. Je pourrai participer plus particulièrement aux activités des groupes « sources transitoires » et « cibles d'opportunités ». Mon expérience de recherche a nécessité une adaptation régulière à de nouvelles approches expérimentales et observationnelles. Cela démontre, je l'espère, ma capacité et ma motivation à aborder ce projet.

8. A la différence des trous noirs de masse stellaire, les trous noirs supermassifs accrètent probablement assez de masse au cours de leur évolution pour que l'intensité de leur spin en soit modifiée.



# Projet d'enseignement

**La transmission des connaissances est une activité qui me tient particulièrement à cœur et que je souhaite continuer à exercer dans la suite de ma carrière.** Mon expérience d'enseignement à l'UFR de physique de l'université Paris Diderot m'a permis de m'investir dans des unités d'enseignement (UE) variées et d'apprendre à connaître les spécificités locales ainsi que le profil des étudiants accueillis à l'université Paris Diderot. Aussi, il m'a fallu user de pratiques pédagogiques différentes selon que j'intervenais auprès des étudiants de première année d'études de santé (PACES) ou auprès d'étudiants de première et deuxième année de licence de sciences exactes, pour qui l'entrée à l'université constitue un tournant parfois difficile à négocier. Parvenir à leur faire comprendre les notions physiques abordées et les aider à construire un projet d'étude et un projet professionnel conforme à leur profil me motive tout particulièrement.

**Les enseignements que j'ai dispensés me permettent d'envisager l'enseignement de la physique sous différentes formes et au sein de diverses formations :** dans des filières générales de physique comme dans un cadre plus large, pour des publics dont la physique ne constitue pas l'enseignement principal. Sur la base d'un service annuel de 192 heures d'enseignement, je souhaiterais ainsi poursuivre mon investissement, à hauteur de ~100 heures par an dans les UE de physique en L1 et/ou L2 et en PACES. Reprendre des enseignements déjà assurés auparavant me laisserait également le temps de m'engager dans un nouvel (ou quelques nouveaux) enseignement(s), si possible en L3 ou au niveau master, en fonction des possibilités offertes par la foire aux enseignements de l'UFR.

Dans la suite de ce projet, je développe quelques idées et approches que j'aimerais soutenir si j'étais recruté, en particulier autour des enseignements évoqués ci-dessus. Je distinguerai les idées qui s'inscrivent dans le cadre des enseignements de licence (mais pas exclusivement) de celles qui sont davantage axées sur le niveau master (voire doctorat). Il ne sera évidemment pas possible de mettre en œuvre l'ensemble de ces idées à court terme, mais il s'agit plutôt ici de décrire les aspects qui me motivent et dans lesquels je souhaiterais pouvoir m'impliquer, à plus ou moins long terme.

## I Niveau Licence

La diversité des étudiants accueillis en L1 nous oblige à adapter les pratiques pédagogiques. En particulier, il nous faut tenir compte des difficultés des étudiants à l'entrée en licence, notamment au regard des programmes actuels de sciences physiques et de mathématiques du lycée. Un certain nombre d'adaptations structurelles ont ainsi été mises en place au sein de l'UFR (contrôle continu, travail en petits groupes, réduction du volume horaire journalier, etc.) depuis quatre ans. **Sur la base de mon expérience à l'UFR, je souhaiterais m'investir sur certains points qui me semblent importants en ce qui concerne l'évolution des contenus et des méthodes d'apprentissage.** Certains d'entre eux pourront probablement être discutés dans le cadre du renouvellement actuel des maquettes de l'UFR.

**En premier lieu, j'aimerais contribuer à la réflexion sur la réussite en licence et les nouvelles pratiques d'évaluation.** La réforme récente de l'entrée à l'université engendre la définition de pré-requis nécessaires à l'entrée en première année de licence et la mise en place d'UE de remise à niveau, voire d'**« année zéro »**, permettant de combler progressivement les lacunes anciennes et de réfléchir à l'orientation future des étudiants. La période est donc propice à ces évolutions et il m'intéresserait fortement d'y contribuer. Plusieurs pistes pourraient être abordées, deux d'entre elles sont détaillées ci-dessous.

- **L'auto-évaluation des étudiants de L1 et L2** permet non seulement aux enseignants de mieux apprécier le niveau des étudiants accueillis mais aussi aux étudiants d'évaluer leurs acquis et leurs lacunes vis-à-vis des compétences exigibles à leur niveau d'étude. La mise en place de tests d'auto-évaluation pourra notamment passer par l'Université des Sciences en Ligne (UNISCIEL) qui propose une banque de questions développées par une trentaine d'universités partenaires. Il m'intéresserait donc de rejoindre ce projet en proposant de nouveaux exercices et en contribuant à sa mise en œuvre à l'UFR de physique.

D'autre part, les nouvelles pratiques d'évaluation pourraient aussi reposer sur l'utilisation des boîtiers électroniques (ou *clickers*) dans le cadre des cours en amphi (l'UFR s'en est procurée un premier lot en 2016). Si l'outil semble avoir fait ses preuves, son usage doit néanmoins être accompagné d'une réflexion sur le choix des questions posées. Il m'intéresserait d'y prendre part au sein de l'UFR.

- **La conception de ressources de e-learning** (via certains logiciels tel que *scenari chain*) permet une remise à niveau en autonomie, sur des concepts nécessaires à l'entrée en L1. Sur la base de mon expérience notamment en PACES (où nous avons été amené à concevoir des exercices de remise à niveau en mathématiques), je souhaiterais m'investir dans la conception de nouvelles ressources pédagogiques, qui seront sans doute utiles dans le cadre des remises à niveau associées aux pré-requis à l'entrée en licence.

**Plus spécifiquement, la question de l'orientation des étudiants me tient à cœur.** J'ai ainsi eu l'occasion de constater que nombre d'entre eux (aussi bien en L1 qu'en L2) n'ont pas de projet d'orientation concret, ce qui entraîne souvent une baisse de motivation. Il me semble que cette problématique doit se travailler aussi bien au lycée qu'en licence. Au niveau de la licence, l'UE de pré-professionnalisation proposée au second semestre de L1 et L2 joue ce rôle. C'est également l'un des objectifs des réseaux d'anciens étudiants, dont le développement est facilité par internet. J'ai ainsi été à l'origine d'un tel réseau au niveau de l'école doctorale 127 et je pourrais faire profiter l'UFR de physique de cette expérience par l'intermédiaire également de l'Observatoire de la Vie Etudiante. En amont, il me paraît important de travailler à l'orientation des futurs bacheliers en continuant à nouer des liens forts entre les lycées et l'UFR de physique.

Il me paraît également important de ne pas oublier les étudiants qui s'épanouissent dans le cadre universitaire et qui y trouvent leurs repères dès la licence. **En particulier, si l'occasion venait à se présenter, je serais particulièrement intéressé par l'encadrement et le développement d'enseignements pluridisciplinaires et expérimentaux.** Par exemple, nous pourrions imaginer la mise en place de projets expérimentaux en rapport avec l'astrophysique (dans le cadre des projets de physique expérimentale de L3 notamment). A ce titre, il sera envisageable d'utiliser la coupole d'astronomie du campus qui devrait entrer en service prochainement. Constituée de deux télescopes et d'une lunette astronomique pilotés à distance, elle est particulièrement appropriée à de tels travaux pratiques qui constituerait aussi une approche originale du cours de physique contemporaine de L3. Les objectifs des projets pourraient par exemple porter sur la mesure de la dynamique des éjections de masse coronale du Soleil, la détermination de la distance d'une galaxie, la construction d'un diagramme de Hertzsprung-Russell, l'étude des nébuleuses planétaires, etc. Le matériel expérimental est dès à présent disponible, ce qui représente un atout dans une telle perspective pédagogique.

**De manière plus générale, je souhaiterais contribuer autant que possible à l'attractivité des formations proposées à Paris Diderot** et faire ainsi en sorte que les étudiants qui entrent en L1 à l'université poursuivent en master ici-même. Dans cette optique, j'essaierai de proposer des stages de L3, permettant aux étudiants motivés de découvrir le monde de la recherche.

## 2 Niveau Master

Ma formation personnelle, comme mon parcours en recherche, me conduisent également à considérer un cadre de formations plus spécialisées, avec des enseignements portant sur l'astrophysique, en particulier dans le cadre du second semestre de M1 PFSI (Physique Fondamentale et Sciences pour l'Ingénieur) et de l'année de M2 PFSI (spécialités Astronomie et Astrophysique - A&A - et Noyaux Particules Astroparticules et Cosmologie - NPAC -).

**En particulier, en M1 nous pourrons développer des TP qui profiteront également de la coupole d'astronomie installée sur le toit du bâtiment Lamarck.** Ces TP pourraient par exemple être réalisés dans le cadre des TP de l'option « traitement du signal » (à hauteur de 30 heures) ou dans le cadre de l'option « astrophysique » ayant lieu au second semestre. Ils seront d'un niveau supérieur à ceux proposés dès la licence et en lien direct avec l'enseignement des options d'astrophysique et de traitement du signal. Plus précisément, les caméras CCD qui équipent l'observatoire pourront être utilisées pour familiariser les étudiants avec les bases du traitement d'images et en particulier les notions de bruit thermique, bruit quantique, courant d'obscurité, filtres (passe-haut, médian), contraste, déconvolution, rapport signal sur bruit, etc. Dans le cadre du M1, ces TP

constitueraient une première approche des projets observationnels réalisés en M2 d'astronomie et d'astrophysique et fourniront ainsi un bagage solide aux étudiants de Paris Diderot désireux d'intégrer ce M2.

Si, à terme, l'occasion m'est donnée d'intégrer les équipes pédagogiques des M2 A&A ou NPAC, je souhaiterais développer certains aspects, en rapport direct avec mes activités de recherche. **L'approche multi-messagers et les astroparticules sont encore peu enseignées, même au niveau M2. Ces thématiques, qui reposent largement sur les développements instrumentaux récents, imposent des approches observationnelles nouvelles ainsi que des méthodes de détection et de classification des sources fondées sur des concepts statistiques complexes.** Afin de former les futurs spécialistes du domaine, j'essaierai, si l'opportunité m'est donnée, de renforcer l'enseignement de ces problématiques nouvelles, de manière coordonnée avec ce qui est enseigné dans le cours de traitement des données et l'option particules de hautes énergies du premier semestre de A&A notamment. Nous pourrons par exemple organiser des travaux pratiques de traitement de données multi-messagers (dans le cadre par exemple des méthodologies du premier semestre de A&A), en profitant des nombreux jeux de données publiques (ondes gravitationnelles, neutrinos, rayonnement X et gamma). Dans la même optique, l'observatoire astronomique du campus pourra être utilisé dans le cadre des projets expérimentaux du premier semestre de A&A ou dans le cadre de travaux de laboratoire du début d'année de NPAC. En profitant de l'automatisation complète de l'instrument, nous pourrions ainsi imaginer un projet axé sur le suivi des sources transitaires (à émission multi-messagers) dans le domaine visible.

Le cas échéant, je serais également intéressé à participer au développement d'offres de formations nouvelles et plus spécifiques (au niveau Master), s'inscrivant notamment dans le cadre d'un potentiel projet d'école universitaire de recherche adossé au LabEx UnivEarths.

**Enfin, dans le cadre de ces M2, j'essaierai de proposer dans la mesure du possible des stages relatifs à mon projet de recherche. A terme, ceux-ci seront susceptibles de se poursuivre en thèse au laboratoire APC, dans l'objectif de former de nouveaux chercheurs, spécialistes de l'astrophysique des hautes énergies et de l'approche multi-messagers, au cœur des activités du laboratoire.**



# Liste des publications et des communications orales

Les liens vers les différentes publications sont inclus dans la version électronique de ce document.  
Les publications indiquées par un astérisque (\*) seront adressées au comité de sélection en cas d'audition.

## Publications dans des revues internationales à comité de lecture

### Publications avec contribution personnelle significative

J'inclus dans cette liste les publications (réalisées dans le cadre des ANTARES et KM3NeT) pour lesquelles ma participation a été directe et/ou pour lesquelles je suis auteur correspondant.

- (\*) *Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory*, ANTARES collaboration, IceCube collaboration, Pierre Auger collaboration, LIGO Scientific collaboration & Virgo collaboration, [ApJL, 850, 2, L35, 2017](#).
- *All-sky Search for High-Energy Neutrinos from Gravitational Wave Event GW170104 with the ANTARES Neutrino Telescope*, ANTARES collaboration, Albert A. et al., [Eur. Phys. J. C 77, 911, 2017](#).
- *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, Abbott B. et al. (including ANTARES collaboration), [ApJL, 848, 2, L12, 2017](#).
- *Search for High-energy Neutrinos from Gravitational Wave Event GW151226 and Candidate LVT151012 with ANTARES and IceCube*, ANTARES collaboration, IceCube collaboration, LIGO Scientific collaboration & Virgo collaboration, [Phys. Rev. D, 96, 2, 022005, 2017](#).
- (\*) *Time-dependent search for neutrino emission from X-ray binaries with the ANTARES telescope*, ANTARES collaboration, Albert A. et al., [JCAP, 04, 019, 2017](#).
- *High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube*, ANTARES collaboration, IceCube collaboration, LIGO Scientific collaboration & Virgo collaboration, [Phys. Rev. D, 93 :12, 2016](#).
- *Herschel observations of dust around the high-mass X-ray binary GX 301-2*, Servillat M., Coleiro A., Chaty S., Rahoui F., Zurita Heras J.-A., [ApJ 797 :114, 2014](#).
- *Infrared identification of High-Mass X-Ray Binaries discovered by INTEGRAL*, Coleiro A., Chaty S., Zurita Heras J.A., Rahoui F., Tomsick J. A., [A&A 560 :108, 2013](#).
- (\*) *Distribution of High-Mass X-ray Binaries in the Milky Way*, Coleiro A. & Chaty S., [ApJ 764 :185, 2013](#).

### Publications en tant que co-auteur dans des revues avec comité de lecture

- *Multi-wavelength observations of the black-hole X-ray transient Swift J1745-26*, López-Oramas A., Coleiro A. & Chaty S., soumis à ApJ.
- *Spectroscopic identification of INTEGRAL high-energy sources with VLT/ISAAC*, Fortin F., Chaty S., Coleiro A., Tomsick J. A., Nitschelm C. H. R., soumis à A&A.
- *All-flavor search for a diffuse flux of cosmic neutrinos with 9 years of ANTARES data*, ANTARES Collaboration, Albert, A. et al., [ApJL, 853, 1, L7, 2018](#).
- *The SUrvey for Pulsars and Extragalactic Radio Bursts II : New FRB discoveries and their follow-up*, Bhandari S. et al. (including ANTARES Collaboration), [MNRAS, 475, 1427–1446, 2018](#).
- *Science with e-ASTROGAM (A space mission for MeV-GeV gamma-ray astrophysics)*, De Angelis A. et al., [arXiv :1711.01265](#).

- An algorithm for the reconstruction of high-energy neutrino-induced particle showers and its application to the ANTARES neutrino telescope, Albert A. et al., [AJ, 154, 6, 275, 2017](#).
- New constraints on all flavor Galactic diffuse neutrino emission with the ANTARES telescope, ANTARES Collaboration, Albert A. et al., [Phys. Rev. D, 96, 6, 2017](#).
- A polarized fast radio burst at low Galactic latitude, Petroff E. et al. (including ANTARES Collaboration), [MNRAS, 469, 4, 4465-4482, 2017](#).
- Search for high-energy neutrinos from bright GRBs with ANTARES, ANTARES Collaboration, Albert A. et al., [MNRAS, 469, 1, 906-915, 2017](#).
- Search for relativistic magnetic monopoles with five years of the ANTARES detector data, ANTARES Collaboration, Albert, A. et al., [Journal of High Energy Physics, Volume 2017, 7, 54](#).
- Results from the search for dark matter in the Milky Way with 9 years of data of the ANTARES neutrino telescope, ANTARES Collaboration, Albert A. et al., [Phys. Lett. B, 769, 249-254, 2017](#).
- Search for Dark Matter Annihilation in the Earth using the ANTARES Neutrino Telescope, ANTARES Collaboration, Albert A. et al., [Phys. of Dark Univ., 16, 41-48, 2017](#).
- First all-flavour Neutrino Point-like Source Search with the ANTARES Neutrino Telescope, ANTARES Collaboration, Albert A. et al., [Phys. Rev. D 96, 082001, 2017](#).
- Intrinsic limits on resolutions in muon- and electron-neutrino charged-current events in the KM3NeT/ORCA detector, KM3NeT Collaboration, Adrián-Martínez S. et al., [Journal of High Energy Physics, Volume 2017, 5, 8](#).
- Model-independent search for neutrino sources with the ANTARES neutrino telescope, Albert A. et al., [arXiv:1703.04351](#).
- Constraints on the neutrino emission from the Galactic Ridge with the ANTARES telescope, ANTARES Collaboration, Adrián-Martínez S. et al., [Phys. Lett. B, 760, 143, 2016](#).
- Limits on Dark Matter Annihilation in the Sun using the ANTARES Neutrino Telescope, ANTARES Collaboration, Adrián-Martínez S. et al., [Phys. Lett. B, 759, 69, 2016](#).
- Letter of Intent for KM3NeT2.0, KM3NeT Collaboration, Adrián-Martínez S. et al., [JPhG, 43, 8, 2016](#).
- Multiwavelength study of the fast rotating supergiant high-mass X-ray binary IGR J16465-4507, Chaty S., LeReun A., Negueruela I., Coleiro A., Castro N., Simón-Díaz S., Zurita Heras J.A., Goldoni P., Goldwurm A., [A&A 591A, 87C, 2016](#).
- A search for Secluded Dark Matter in the Sun with the ANTARES neutrino telescope, ANTARES Collaboration, Adrián-Martínez S. et al., [JCAP, 05 :016, 2016](#).
- Murchison Widefield Array Limits on Radio Emission from ANTARES Neutrino Events, Croft S. et al., [ApJ 820, 24, 2016](#)
- The prototype detection unit of the KM3NeT detector, KM3NeT Collaboration, Adrián-Martínez S. et al., [EPJ C 76\(2\), 2016](#).
- Multi-Wavelength Observations of the Binary System PSR B1259-63/LS 2883 Around the 2010-2011 Periastron Passage, Chernyakova M., Abdo A. A., Neronov A., McSwain M.V., Moldón J., Ribó M., Paredes J.M., Sushch I., de Naurois M., Schwanke U., Uchiyama Y., Wood K., Johnston S., Chaty S., Coleiro A., Malyshev D., Babyk I., [MNRAS 439 :432, 2014](#).
- A search for near infrared counterparts of three pulsar wind nebulae., Curran P., Chaty S., Zurita-Heras J.-A., Coleiro A., [A&A 534 :48, 2011](#).

## Astronomer's Telegrams (ATel) et circulaires GCN/TAN

- Search for counterpart to IceCube-171015A with ANTARES, Dornic D. & Coleiro A., on behalf of the ANTARES Collaboration, [ATel 10854 et GCN 22019](#).
- VLT/X-Shooter spectrum of the blazar TXS 0506+056 (located inside the IceCube-170922A error box) , Dornic D. & Coleiro A., [ATel 10840](#).

- *Search for counterpart to IceCube-170922A with ANTARES*, Dornic D. & **Coleiro A.**, on behalf of the ANTARES Collaboration, [ATel 10773 et GCN 21923](#).
- *Search for counterpart to IceCube-170321A with ANTARES*, Dornic D. & **Coleiro A.**, on behalf of the ANTARES Collaboration, [ATel 10189 et GCN 20926](#).
- *Search for counterpart to IceCube-161103A with ANTARES*, Dornic D. & **Coleiro A.**, on behalf of the ANTARES Collaboration, [ATel 9715 et GCN 20134](#).
- *Search for counterpart to IceCube-160814A with ANTARES*, Dornic D., **Coleiro A.** & Turpin D. on behalf of the ANTARES Collaboration, [ATel 9440 et GCN 19885](#).
- *Search for counterpart to IceCube-160731A with ANTARES*, Dornic D. & **Coleiro A.**, on behalf of the ANTARES Collaboration, [ATel 9324 et GCN 19772](#).

## Actes de conférences nationales et internationales

- *Search for time correlations between ANTARES neutrino candidates and IceCube/High-Energy Starting Events.*, Illuminati G., **Coleiro A.**, Barrios J. on behalf of the ANTARES collaboration. ICRC 2017, [Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, ICRC 2017, PoS 987](#).
- *Time-dependent search of neutrino emission from X-ray and gamma-ray binaries with the ANTARES telescope.*, Sanchez Losa A., Dornic D., **Coleiro A.** on behalf of the ANTARES collaboration. ICRC 2017, [Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, ICRC 2017, PoS 971](#).
- *Search for a high-energy neutrino signal from Fast Radio Bursts with the ANTARES telescope*, Sanguineti M., Turpin D., Dornic D., **Coleiro A.**, Bhandari S., Keane E., Petroff E. on behalf of the ANTARES collaboration. ICRC 2017, [Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, ICRC 2017, PoS 989](#).
- *Multi-messenger real-time follow-up of transient events with the ANTARES neutrino telescope*, Dornic D., **Coleiro A.** on behalf of the ANTARES collaboration. ICRC 2017, [Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, ICRC 2017, PoS 984](#).
- *Searching for High Energy Neutrinos detected by ANTARES in coincidence with Gravitational Wave signals observed during LIGO Observation Run O1.*, Pradier T., Baret B., **Coleiro A.** on behalf of the ANTARES collaboration. ICRC 2017, [Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, ICRC 2017, PoS 947](#).
- *Multi-messenger astronomy with ANTARES.*, **Coleiro A.** on behalf of the ANTARES collaboration. Les rencontres de Moriond VHEPU 2017.
- *Follow-up of GW150914 and multi-messenger studies of transient astrophysical sources with the ANTARES neutrino telescope.*, **Coleiro A.** on behalf of the ANTARES collaboration. RICAP 2016, [EPJ Web of Conferences, Volume 136, id.04003](#).
- *High-Energy Neutrino follow-up of first gravitational wave event GW150914*. **Coleiro A.**, Baret B., Pradier T., on behalf of the ANTARES collaboration. Neutrino 2016, [Journal of Physics : Conference Series, 888, 012045](#).
- *Search for spatial and temporal collective effects in the ANTARES neutrino telescope data*. **Coleiro A.**, Gracia Ruiz R., Kouchner A. on behalf of the ANTARES collaboration. VLVTnT 2015, [EPJ Web of Conferences, Volume 116, id.04001](#).
- *Transient neutrino emission from the Galactic Center studied by ANTARES*. **Coleiro A.** on behalf of the ANTARES collaboration. [Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, ICRC 2015](#).
- *Distribution of High Mass X-ray Binaries in the Milky Way*. **Coleiro A.** & Chaty S., [Proceedings of Science INTEGRAL 2012, 80](#).
- *Identification of 12 High Mass X-ray Binaries detected by INTEGRAL through NIR photometry and spectroscopy*. **Coleiro A.**, Chaty S., Zurita-Heras J.-A., Rahoui F., Tomsick J., [Proceedings of Science INTEGRAL 2012, 94](#).
- *Herschel observations of INTEGRAL supergiant High Mass X-ray Binaries*. Chaty S., **Coleiro A.**, Servillat M., Zurita Heras J.-A., Rahoui F., [Proceedings of Science INTEGRAL 2012, 92](#).
- *First results of X-shooter observations of IGR sources*. Goldoni P., Chaty S., Goldwurm A., **Coleiro A.**, [Proceedings of Science, INTEGRAL 2012, 96](#).

- *Herschel views on ultra-luminous X-ray sources.* Servillat M., Chaty S., Coleiro A., [Proceedings of Science INTEGRAL 2012, 101](#).
- *Distribution of High Mass X-ray Binaries.* Coleiro A. & Chaty S., [ASP Conf. Ser. 447 :265, 2011](#).

## Notes internes

- *Selection of ANTARES high-energy neutrino candidates.* Aublin J., Coleiro A., Fusco L.A., Kouchner A., ANTARES internal note, 2018.
- *Search for a neutrino counterpart to gravitational-wave transient events with ANTARES.* Coleiro A., ANTARES internal note, 2016.
- *Time correlation between IceCube HESE and ANTARES events.* Coleiro A., Bruny B. & Lachaud C., ANTARES internal note, 2016.

## Communications orales et posters

### Présentations invitées (dont séminaires)

- **Programme PSI2 Gamma-ray bursts and supernovæ (06-07/2018)** : Présentation invitée « Study of multi-messenger emission of GRBs with the ANTARES neutrino telescope ». Orsay, France.
- **GEMMA International Conference (06/2018)** : Présentation invitée « ANTARES neutrinos follow-up of gravitational-wave signals ». Lecce, Italie.
- **SVOM 3<sup>rd</sup> scientific workshop (05/2018)** : Présentation invitée « Astronomie multi-messagers des systèmes binaires ». Les Houches, France.
- **Congrès de la société française de physique (07/2017)** : Présentation invitée « Astronomie neutrino : une nouvelle fenêtre sur l’Univers de haute énergie ». Orsay, France.
- **Atelier transitoire 2020 (06/2017)** : Présentation invitée « Télescopes à neutrinos et sources transitaires ». Orsay, France.
- **Ecole d’été School on gravitational waves for Cosmology and Astrophysics (06/2017)** : Cours invité « Astronomie multi-messagers ». Benasque, Espagne.
- **e-ASTROGAM workshop : the extreme Universe (03/2017)** : Présentation invitée « Neutrinos and gamma-rays in the e-ASTROGAM range ». Padoue, Italie.
- **High energy neutrino and cosmic-ray astrophysics : The way forward / Weizmann Institute (01/2017)** : Présentation invitée « Multi-messenger astronomy with ANTARES and KM3NeT ». Rehovot, Israël.
- **Séminaire au Service de Physique des Particules / CEA Saclay (10/2016)** : L’astronomie neutrino à l’heure du multi-messagers. Saclay, France.
- **6<sup>th</sup> Roma International Workshop on Astroparticle Physics (RICAP 16) (06/2016)** : Présentation invitée « Multi-messenger follow-up of gravitational wave events with ANTARES ». Frascati, Italie.

- **GDR Neutrino 2016** (06/2016) : Présentation invitée concernant le suivi neutrino de GW150914. Grenoble, France.
- **Workshop « The physics of relativistic outflows » (03/2016)** : Présentation invitée concernant la recherche d'émission hadronique dans les sources transitoires Galactiques. Toulouse, France.
- **Séminaire au laboratoire AIM (02/2016)** : Séminaire sur l'astrophysique multi-messagers des sources transitoires Galactiques. Saclay, France.
- **Séminaire au CPPM (02/2016)** : Séminaire sur l'observation multi-messagers des microquasars. Marseille, France.
- **The gamma-ray sky with Astrogam (03/2015)** : Présentation invitée : « Synergies between Astrogam and neutrino telescopes ». Paris, France.

## Contributions orales

- **Rencontres de Moriond : Very High-Energy Phenomena in the Universe (03/2017)** : Contribution orale (au nom de la collaboration ANTARES) « Multi-messenger astronomy with ANTARES and KM3NeT ». La Thuile, Italie.
- **Lake Louise Winter Institute (02/2016)** : Présentation invitée (au nom des collaborations ANTARES et KM3NeT) concernant l'astronomie neutrino. Lake Louise, Canada.
- **International Cosmic Ray Conference (ICRC) (08/2015)** : Contribution orale (au nom de la collaboration ANTARES) : « Transient neutrino emission from the Galactic Center studied by ANTARES ». La Haye, Pays-Bas.
- **Workshop on European Neutrino Telescopes (05/2015)** : Contribution orale concernant la recherche de sources transitoires de neutrinos. Ischia, Italie.
- **Conférence INTEGRAL (10/2012)** : Contribution orale : « Distribution of the High-Mass X-ray Binaries in the Milky Way ». Paris, France.
- **Workshop « Evolution of Compact Binaries » (03/2011)** : Contribution orale sur la corrélation entre la distribution des HMXBs et la distribution des Complexes de Formation Stellaire dans la Galaxie. Viña del Mar, Chili.
- **Journal club Hautes Énergies (01/2011)** : Étude multi-longueurs d'onde de sources Galactiques de haute énergie. CEA Saclay, France.

## Contributions orales dans le cadre de réunions de collaborations

- 12 contributions orales dans le cadre des réunions trimestrielles des collaborations ANTARES et KM3NeT, principalement sur les analyses multi-messagers.

## Posters

- **Conférence ICRC 2017 (07/2017)** : Poster : « Search for time correlations between ANTARES neutrinos and IceCube High-Energy Starting Events », au nom de la collaboration ANTARES. Busan, Corée du Sud.

- **Conférence ICRC 2017 (07/2017)** : Poster : « Multi-messenger real-time follow-up of transient events with the ANTARES neutrino telescope », au nom de la collaboration ANTARES. Busan, Corée du Sud.
- **Conférence Neutrino 2016 (06/2016)** : Poster : « High-Energy Neutrino follow-up of first gravitational wave event GW150914 », au nom de la collaboration ANTARES. Londres, Royaume-Uni.
- **Conférence INTEGRAL (10/2012)** : Poster : « Multi-wavelength identification of new HMXB ». Paris, France.

## Références bibliographiques

- ANTARES Collaboration et al., 2017a, preprint, [arXiv:1710.03020](https://arxiv.org/abs/1710.03020)
- ANTARES Collaboration et al., 2017b, preprint, [arXiv:1711.01251](https://arxiv.org/abs/1711.01251)
- ANTARES Collaboration et al., 2017c, preprint, [arXiv:1711.01486](https://arxiv.org/abs/1711.01486)
- Aartsen M. G., et al., 2013, *Science*, **342**
- Abbott B. P., et al., 2016, *Physical Review Letters*, **116**, 061102
- Abbott B. P., et al., 2017a, *ApJL*, **848**, L12
- Abbott B. P., et al., 2017b, *ApJL*, **848**, L13
- Adrián-Martínez S., et al., 2014, *European Physical Journal C*, **74**, 3056
- Adrián-Martínez S., et al., 2016, *PRD*, **93**, 122010
- Albert A., et al., 2017a, *JCAP*, **4**, 019
- Albert A., et al., 2017b, *PRD*, **96**, 022005
- Albert A., et al., 2017c, *MNRAS*, **469**, 906
- Albert A., et al., 2017d, *ApJL*, **850**, L35
- Bai Y., Barger A. J., Barger V., Lu R., Peterson A. D., Salvado J., 2014, *PRD*, **90**, 063012
- Belczynski K., Bulik T., Fryer C. L., 2012, preprint, [arXiv:1208.2422](https://arxiv.org/abs/1208.2422)
- Berti E., Volonteri M., 2008, *ApJ*, **684**, 822
- Bhandari S., et al., 2017, preprint, [arXiv:1711.08110](https://arxiv.org/abs/1711.08110)
- Chernyakova M., et al., 2014, *MNRAS*, **439**, 432
- Coleiro A., 2017, Proceedings of Les Rencontres de Moriond 2017 (VHEPU)
- Coleiro A., Chaty S., 2013, *ApJ*, **764**, 185
- Coleiro A., Chaty S., 2017, The Astronomer's Telegram, **10840**
- Coleiro A., Chaty S., Zurita Heras J. A., Rahoui F., Tomsick J. A., 2013, *A&A*, **560**, A108
- De Angelis A., et al., 2017, preprint, [arXiv:1711.01265](https://arxiv.org/abs/1711.01265)
- Díaz Trigo M., Miller-Jones J. C. A., Migliari S., Broderick J. W., Tzioumis T., 2013, *Nature*, **504**, 260
- Distefano C., et al., 2002, *ApJ*, **575**, 378
- Dornic D., Coleiro A., 2017, The Astronomer's Telegram, **10773**
- Dubus G., 2013, *AAPR*, **21**, 64
- Gao S., Pohl M., Winter W., 2017, *ApJ*, **843**, 109
- Kadler M., et al., 2016, *Nature Physics*, **12**, 807
- Kasliwal M. M., et al., 2017, preprint, [arXiv:1710.05436](https://arxiv.org/abs/1710.05436)
- Kotani T., et al., 1994, *PASJ*, **46**, L147
- Liu Q. Z., van Paradijs J., van den Heuvel E. P. J., 2006, *A&A*, **455**, 1165
- Lommen D., Yungelson L., van den Heuvel E., Nelemans G., Portegies Zwart S., 2005, *A&A*, **443**, 231
- Lucarelli F., et al., 2017, *ApJ*, **846**, 121
- Matt G., Guainazzi M., 2003, *MNRAS*, **341**, L13
- McClintock J. E., Narayan R., Steiner J. F., 2014, *Space Science Reviews*, **183**, 295
- Merloni A., Heinz S., Di Matteo T., 2005, *Ap&SS*, **300**, 45
- Miller J. M., Miller M. C., Reynolds C. S., 2011, *ApJL*, **731**, L5
- Mirzoyan R., 2017, The Astronomer's Telegram, **10817**
- Mooley K. P., et al., 2017, preprint, [arXiv:1711.11573](https://arxiv.org/abs/1711.11573)
- Narayan R., McClintock J. E., 2012, *MNRAS*, **419**, L69
- Negueruela I., Smith D. M., Reig P., Chaty S., Torrejón J. M., 2006, in Wilson A., ed., ESA Special Publication Vol. 604, The X-ray Universe 2005. p. 165 ([arXiv:astro-ph/0511088](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511088))
- Nemmen R. S., Georgopoulos M., Guiriec S., Meyer E. T., Gehrels N., Sambruna R. M., 2012, *Science*, **338**, 1445
- Paiano S., Falomo R., Treves A., Scarpa R., 2018, *The Astrophysical Journal Letters*, **854**, L32
- Petroff E., et al., 2017, *MNRAS*, **469**, 4465
- Resconi E., Coenders S., Padovani P., Giommi P., Caccianiga L., 2017, *MNRAS*, **468**, 597
- Russell D. M., Gallo E., Fender R. P., 2013, *MNRAS*, **431**, 405
- Salafia O. S., Colpi M., Branchesi M., Chassande-Mottin E., Ghirlanda G., Ghisellini G., Vergani S. D., 2017, *ApJ*, **846**, 62
- Sana H., et al., 2012, *Science*, **337**, 444
- Senno N., Murase K., Mészáros P., 2016, *PRD*, **93**, 083003
- Servillat M., Coleiro A., et al., 2014, *ApJ*, **797**, 114
- Tanaka Y. T., Buson S., Kocevski D., 2017, The Astronomer's Telegram, **10791**
- Tauris T. M., et al., 2017, *ApJ*, **846**, 170
- The ANTARES Collaboration 2015, preprint, [arXiv:1510.04508](https://arxiv.org/abs/1510.04508)
- Troja E., et al., 2018, preprint, [arXiv:1801.06516](https://arxiv.org/abs/1801.06516)
- Wyrzykowski Ł., Hamanowicz A., Rybicki K. A., 2017, in Gomboc A., ed., IAU Symposium Vol. 324, New Frontiers in Black Hole Astrophysics. pp 127–131, doi:10.1017/S1743921317001636
- Zdziarski A. A., Böttcher M., 2015, *MNRAS*, **450**, L21
- Zhang J. F., Feng Y. G., Lei M. C., Tang Y. Y., Tian Y. P., 2010, *MNRAS*, **407**, 2468