

Titre du projet : Complexité Moléculaire autour des Etoiles de type Solaire : Soutien à ASAI et SOLIS

Volet : Recherche

Porteur du projet : Bertrand LEFLOCH

Laboratoires impliqués : IPAG

Bilan du projet pour l'année/la période

Bilan d'activité (1 page max)

Le but du projet visait à soutenir l'exploitation scientifique des deux grands programmes observationnels ASAI et SOLIS, avec le radiotélescope de 30m de l'IRAM et l'interféromètre NOEMA, dont le but est de comprendre l'émergence de la complexité moléculaire au cours de la formation des Etoiles de type solaire, plus particulièrement la formation des molécules organiques complexes et d'intérêt pré-biotiques. Ce projet associe dans une collaboration étroite plusieurs laboratoires en Europe et au Japon, avec observateurs, chimistes théoriciens, expérimentateurs. Cette collaboration est très fructueuse, donnant lieu à de nombreux résultats (et publications), qui sont décrits brièvement ci-dessous :

- i) De nombreux ions moléculaires ont été découverts *pour la première fois*, qui participent au couplage entre le gaz et le champ magnétique, et donc contrôlent son évolution dynamique. Vastel et al. (2016) ont ainsi rapporté la présence de HOCO^+ dans le cœur prestellaire L1544, puis, au moyen d'une modélisation chimique en phase gaz, ont contraint l'abondance de CO_2 , l'un des principaux constituants des manteaux de glace des grains de poussière. Quenard et al. (2017) ont détecté dans la même région la présence des ions protonés HCNH^+ et HC_3NH^+ et mis en évidence l'incapacité des réseaux chimiques à reproduire de manière cohérente l'abondance de ces ions en phase gaz.
- ii) Les chocs protostellaires constituent des laboratoires privilégiés pour étudier les processus astrochimiques à l'œuvre dans l'environnement des protoétoiles. De nombreux résultats importants ont été obtenus là-aussi, en particulier le premier recensement de l'ensemble des molécules organiques complexes présentes dans ces environnements extrêmes (Lefloch et al. 2017), parmi lesquelles des molécules d'intérêt prébiotique (glycolaldehyde). Ces résultats (voir aussi Lefloch et al 2016, Podio et al. 2017, Holdship et al. 2016) ont stimulé de nouveaux travaux sur la formation en phase gazeuse des molécules prébiotiques, et ouvrent la porte à l'approfondissement de la réactivité chimique de certains éléments peu abordés jusqu'alors (Phosphore, Silicium, Soufre) malgré leur importance dans ce contexte. Ces résultats sont confirmés de manière très convaincante par les premières résultats de SOLIS (Codella et al. 2017).
- iii) Le Large Programme SOLIS, et des observations complémentaires avec l'interféromètre ALMA, visent à mieux comprendre la complexité moléculaire à l'échelle des systèmes planétaires en formation autour des protoétoiles, et comment celle-ci est éventuellement propagée de l'enveloppe dans le disque protostellaire. SOLIS et ALMA nous ont permis d'élargir notre échantillon de protoétoiles associées à un hot corino (Oya et al. 2017, Lopez-Sepulcre et al. 2017, Sakai et al. 2017, Imai et al. 2016, Leurini et al. 2016, Codella et al. 2016) et nous donnent accès à la zone de transition entre l'enveloppe et le disque, et possiblement à la région de lancement du flot protostellaire qui

emporte une partie de l'énergie et le moment cinétique de l'enveloppe en effondrement (Sakai et al. 2017, Leurini et al. 2016).

Ces résultats ont fait l'objet de quatre communications *invitées* dans des conférences internationales. L'exploitation des premiers résultats de SOLIS sur la protoétoile OMC2-FIR4 a fait l'objet du stage de Master2 (Sebastien Manigand) et conduit à une publication récemment acceptée (Fontani et al. 2017). Les données SOLIS/CepE sont actuellement analysées dans le cadre de la thèse de Juan-David Ospina-Zamudio au sein de l'équipe Interstellaire. Une publication est sur le point d'être soumise.

Illustrations - avec légende et crédit (à envoyer également séparément)

Production scientifique (articles scientifiques, actes de congrès...)

- **26 Articles parus ou à paraître dans des revues à comité de lecture**

1- *The L1157-B1 astrochemical laboratory: testing the origin of DCN*

G. Busquet, F. Fontani, S. Viti, C. Codella, B. Lefloch, M. Benedettini, and C. Ceccarelli, 2017, A&A, in press, <https://arxiv.org/submit/1932867>

2- *L483: Warm Carbon-Chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity*

Y. Oya, N. Sakai, Y. Watanabe, A.E. Higuchi, T. Hirota, A. Lopez-Sepulcre, T. Sakai, Y. Aikawa, Cecilia Ceccarelli, B. Lefloch, E. Caux, C. Vastel, C. Kahane, S. Yamamoto, 2017, ApJ, 837, 174

3- *Carbon-chain growth in the Solar-type protocluster OMC2-FIR4*

F. Fontani, C. Ceccarelli, C. Favre, P. Caselli, R. Neri, S. Manigand, F. Alves, N. Balucani, E. Bianchi, E. Caux, A.A. Jaber, A. Lopez-Sepulcre, J. Pineda, I. Sims, A. Al-Edhari, R. Bachiller, L. Bizzocchi, S. Bottinelli, A. Chacon-Tanarro, R. Choudhury, C. Codella, A. Coutens, F. Dulieu, S. Feng, A. Rimola, P. Hily-Blant, J. Holdship, I. Jimenez-Serra, C. Kahane, J. Laas, B. LeFloch, O. Yoko, L. Podio, A. Pon, A. Punanova, N. Sakai, S. Spezzano, V. Taquet, L. Testi, P. Theulé, P. Ugliengo, C. Vastel, A.I. Vasyunin, S. Viti, and L. Wiesenfeld, 2017, A&A, in press, <https://arxiv.org/abs/1707.01384>

4- *Seeds Of Life in Space (SOLIS): III. Formamide in protostellar shocks: a crucial prebiotic molecule: evidence for gas phase formation*

Codella, C, C. Ceccarelli, P. Caselli, N. Balucani, V. Barone, F. Fontani, B. Lefloch, et al., 2017, A&A, 605, L3

5- *Complex organics in IRAS 4A revisited with ALMA: Striking contrast between two neighbouring protostellar cores*

Lopez-Sepulcre, A., N. Sakai, M. Imai, Y. Oya, Y. Watanabe, C. Ceccarelli, B. Lefloch, and S. Yamamoto, 2017, in press, <https://arxiv.org/abs/1707.03745>

6- *Detections of HC₃NH⁺ and HCNH⁺ ions in the L1544 pre-stellar core*

D. Quenard, C. Vastel, P. Hily-Blant, B. Lefloch, R. Bachiller, 2017, MNRAS, 470, 3194

7- *Silicon-bearing molecules in the shock L1157-B1: first detection of SiS around a Sun-like protostar*

L. Podio, C. Codella, B. Lefloch, C. Ceccarelli, R. Bachiller, N. Balucani, M. Benedettini, J. Cernicharo, N. Faginas-Lago, F. Fontani, A. Gusdorf, M. Rosi, 2017, MNRAS, 470, L16

8- *L1157-B1, a factory of complex organic molecules in a Solar-type star forming region*
B. Lefloch, C. Ceccarelli, C. Codella, C. Favre, L. Podio, C. Vastel, S. Viti, R. Bachiller, 2017, MNRAS, 469, L73

9- *Nature of shocks revealed by SOFIA OI observations in the Cepheus E protostellar outflow*
A. Gusdorf, S. Anderl, B. Lefloch, A. Leurini, H. Wiesmeyer, R. Güsten, M. Benedettini, C. Codella, B. Godard, A. I. Gómez-Ruiz, L. E. Kristensen, P. Lesaffre, G. Pineau des Forêts, D.C. Lis, 2017, A&A, 602, 8

10- *Decrease of the organic deuteration during the evolution of Sun-like protostars: the case of SVS13-A*

E. Bianchi, C. Codella, C. Ceccarelli, F. Fontani, L. Testi, R. Bachiller, B. Lefloch, L. Podio, V. Taquet, 2017, A&A, 467, 3011

11- *Vertical Structure of the Transition Zone from Infalling Rotating Envelope to Disk in the Class 0 Protostar, IRAS04368+2557*

N. Sakai, Y. Oya, A. E. Higuchi, Y. Aikawa, T. Hanawa, C. Ceccarelli, B. Lefloch, A. López-Sepulcre, Y. Watanabe, T. Sakai, T. Hirota, E. Caux, C. Vastel, C. Kahane, S. Yamamoto, MNRAS, 2017, 467, L76

12- *The shocked gas of the BHR71 outflow observed by Herschel: indirect evidence for an atomic jet*

M. Benedettini, A. Gusdorf, B. Nisini, B. Lefloch et al., 2017, A&A, 598, 14

13- *History of the solar-type protostar IRAS16293-2422 as told by the cyanopolyynes*

A. A. Jaber, C. Ceccarelli, C. Kahane, S. Viti, N. Balucani, E. Caux, A. Faure, B. Lefloch, F. Lique, E. Mendoza, D. Quenard, L. Wiesenfeld, 2017, A&A, 597, 40

14- *Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335*

Imai, Muneaki; Sakai, Nami; Oya, Yoko; López-Sepulcre, Ana; Watanabe, Yoshimasa; Ceccarelli, Cecilia; Lefloch, Bertrand; Caux, Emmanuel; Vastel, Charlotte; Kahane, Claudine, et al., 2016, ApJ, 830, L37

15- *Hot methanol from the inner region of the HH212 protostellar system*

S. Leurini, C. Codella, S. Cabrit, F. Gueth, A. Giannetti, F. Bacciotti, R. Bachiller, C. Ceccarelli, A. Gusdorf, B. Lefloch, L. Podio, and M. Tafalla, 2016, A&A, 595, L4

16- *Phosphorus-bearing molecules in solar-type star forming regions: first PO detection.*

Bertrand Lefloch, C. Vastel, S. Viti, I. Jimenez-Serra, C. Codella, L. Podio, C. Ceccarelli, E. Mendoza, J. Lepine, R. Bachiller, 2016, MNRAS, 462, 3937

17- *The complex organic reservoir in the L1544 pre-stellar core*

I. Jimenez-Serra, A. Vasyunin, P. Caselli, N. Marcelino, N. Billot, L. Testi, S. Viti, C. Vastel, B. Lefloch, R. Bachiller, 2016, ApJ, 830, L6

18- *Hot and Dense water in the inner 25 AU of SVS13A*

C.Codella, C. Ceccarelli, E. Bianchi, L. Podio, R. Bachiller, B. Lefloch, F. Fontani, V. Taquet, L. Testi, 2016, MNRAS, 462, L75

19- *First image of the asymmetric and precessing molecular jet driving the L1157 outflow*

L. Podio, C. Codella, F. Gueth, S. Cabrit, B. Tabone, C. Lefevre, S. Anderl, P. Andre, A. Belloche, P.Hennebelle, B. Lefloch, S. Maret, A. Maury, and L. Testi, 2016, A&A, 593, L4

20- *Diagnosing shock temperature with NH₃ and H₂O profiles*

Gomez-Ruiz, A., Codella, C., Viti, S., Jiménez-Serra, I., Navarra, G., Bachiller, R., Caselli, P., Fuente, A., Gusdorf, A. Lefloch, B., Lorenzani, A., Nisini, B., 2016, MNRAS, 462, 2203

21- *H₂S in the L1157-B1 Bow Shock*

J. Holdship, S. Viti, I. Jimenez-Serra, B. Lefloch, C. Codella, L. Podio, M. Benedettini, F. Fontani, R. Bachiller, C. Ceccarelli, M. Tafalla, 2016, MNRAS, 463, 802

22- *Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293–2422 Studied with ALMA*

Yoko Oya, Nami Sakai, Ana Lopez-Sepulcre, Yoshimasa Watanabe, Cecilia Ceccarelli, Bertrand LeFloch, Cecile Favre, Satoshi Yamamoto, 2016, ApJ, 824, 88

23- *Abundance of HOCO⁺ and CO₂ in the outer layers of the L1544 prestellar core*

C. Vastel, C. Ceccarelli, B. Lefloch, and R. Bachiller, 2016, A&A, 591, L2

24- *The ionization fraction and sulfur chemistry in Barnard 1*

A. Fuente, J. Cernicharo, M. Gerin, E. Roueff, J. Pety, N. Marcelino, R. Bachiller, B. Lefloch, O. Roncero, and A. Aguado, 2016, A&A, 593, L4

25- *Subarcsecond Analysis of Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535*

Nami Sakai, Yoko Oya, Ana Lopez-Sepulcre, Yoshimasa Watanabe, Takeshi Sakai, Tomoya Hirota, Yuri Aikawa, Cecilia Ceccarelli, Bertrand Lefloch, Emmanuel Caux, Charlotte Vastel, Claudine Kahane, and Satoshi Yamamoto, 2016, ApJ, 820, L34

26- *Water and acetaldehyde in HH212: The first hot corino in Orion*

C. Codella, C. Ceccarelli, S. Cabrit, F. Gueth, L. Podio, R. Bachiller, F. Fontani, A. Gusdorf, B. Lefloch, S. Leurini, and M. Tafalla, 2016, A&A, 586, L3

• **6 Articles soumis pour parution dans des revues à comité de lecture**

1- *Sulfur chemistry in the L1157-B1 Bowshock*

Jonathan Holdship, Serena Viti, Izaskun Jimenez-Serra, Bertrand Lefloch, Claudio Codella, Linda Podio, Milena Benedettini, Francesco Fontani, Rafael Bachiller, Mario Tafalla, Cecilia Ceccarelli, 2017, MNRAS, submitted

2- *Astrochemical evolution along star formation: Overview of the IRAM Large Program ASAI*

Bertrand Lefloch, R. Bachiller, C. Ceccarelli, J. Cernicharo, C. Codella, A. Fuente, A. Lopez-Sepulcre, C. Vastel, E. Caux, C. Kahane, M. Tafalla, M. Gonzalez, E. Bianchi, P. Caselli, A. Gomez-Ruiz, P. Hily-Blant, J. Holdship, E. Mendoza, J. Ospina-Zamudio, S. Pacheco, L. Podio, E. Roueff, N. Sakai, S. Viti, S. Yamamoto, K. Yoshida, T. Monfredini, H. Quitian, S. Bottinelli, H. Boechat Roberty, S. Cabrit, N. Marcelino, 2017, MNRAS, submitted

3- *Seeds Of Life In Space (SOLIS): The organic composition diversity at 300–1000 au scale in Solar-type star forming regions*

C. Ceccarelli, P. Caselli, F. Fontani, R. Neri, C. Codella, S. Feng, I. Jimenez-Serra, B. Lefloch, A. Lopez-Sepulcre, J. Pineda, C. Vastel, F. Alves, R. Bachiller, N. Balucani, E. Bianchi, L. Bizzocchi, S. Bottinelli, E. Caux, A. Chacon-Tanarro, R. Choudhury, A. Coutens, F. Dulieu, C. Favre, P. Hily-Blant, J. Holdship, C. Kahane, A. Jaber Al-Edhari, J. Laas, J. Ospina, Y. Oya, L. Podio, A. Pon, A. Punanova, A. Rimola, N. Sakai, I. Sims, S. Spezzano, V. Taquet, L. Testi, P. Theulé, P. Ugliengo, A.I. Vasyunin, S. Viti, L. Wiesenfeld, and S. Yamamoto, 2017, A&A, submitted

4- *Nitrogen oxyde in protostellar envelopes and shocks: the ASAI survey*

C. Codella, S. Viti, B. Lefloch, J. Holdship, R. Bachiller, E. Bianchi, C. Ceccarelli, C. Favre, I. Jimenez-Serra, L. Podio, M. Tafalla, 2017, MNRAS, submitted

5- *Chemical and Physical Picture of IRAS 16293-2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studied with ALMA*

Yoko Oya, Kana Moriwaki, Shusuke Onishi, Nami Sakai, Ana Lopez-Sepulcre, Yoshimasa Watanabe, Cecilia Ceccarelli, Bertrand Lefloch, Cecile Favre, and Satoshi Yamamoto, 2017, ApJ, submitted

6- *Deuterated methanol on Solar System scale around the HH212 protostar,*

E. Bianchi, C. Codella, C. Ceccarelli, V. Taquet, S. Cabrit, F. Bacciotti, R. Bachiller, E. Chapillon, F. Gueth, A. Gusdorf, B. Lefloch, S. Leurini, L. Podio, K. L. J. Rig1, B. Tabone, and M. Tafalla, 2017, A&A, submitted

- **5 Communications orales dans des conférences**

1) Complex Organic Molecules in Star Forming Regions (invited)

Lefloch B., XIII Workshop of Molecular Physics and Spectroscopy (WFME), October **2016**, Rio de Janeiro, Brazil

2) Observational Astrochemistry in the time of LLAMA (invited)

Lefloch, B. International Symposium and Workshop on Astrochemistry (ISWA) , July **2016**, Campinas, Brazil

3) The ASAI View on the Evolution of Molecular Complexity along the Formation of Sun-Like stars (invited)

Lefloch B. International Symposium and Workshop on Astrochemistry, July **2016**, Campinas, Brazil

4) Water in Outflow Shocks (invited)

Lefloch B., conference "Water in the Universe", 12-15 April **2016**, ESTEC, The Netherlands

5) The ASAI View on the evolution of Molecular Complexity along the Formation of Sun-Like Stars (invited)

Lefloch B. and the ASAI Team, Workshop on Astrochemistry 15th February **2016**, Riken, Japan

Bilan financier succinct (avec suivant les cas : co-financements éventuels, équipements achetés, missions, recrutements divers, fonctionnements divers...)

8k€ ont été affectés au projet par le comité de sélection (la demande était de 16k€)

- Remplacement d'un laptop + petit équipement informatique: 1.2k€
- 2 gratifications de stages de Master2 : 4.4k€
- Mission à Campinas (Sao Paulo, Brésil, conférence invitée) : 1.5k€ (co-financement par le Programme Physico Chimie du Milieu Interstellaire du CNRS)
- Mission au MPE a Garching: meeting annuel du consortium SOLIS (3 jours): 0.9k€

Annexes si besoin ou lien sur des sites existants et pérennes jusqu'à la fin du Labex (2020)

<http://www.oan.es/asai>

<http://www.iram.fr/ILPA/LP007>