

L'origine du diazote dans les comètes

Établissement : Université Bourgogne Franche-Comté

École Doctorale : Carnot-Pasteur

Spécialité : Astrophysique

Unité de recherche : Institut UTINAM, CNRS UMR 6213, Université de Bourgogne Franche-Comté, OSU THETA, Besançon, France

Directeurs de la thèse : Benoît Noyelles & Philippe Rousselot
benoit.noyelles@univ-fcomte.fr
philippe.rousselot@univ-fcomte.fr

Origine des fonds : Projet région Bourgogne-Franche-Comté (demande en cours)

Début de la thèse : le 1^{er} octobre 2019

Mots-clés : comètes – dynamique orbitale – diazote – spectroscopie – évolution du Système Solaire

Profil et compétences recherchées : M2 d'astrophysique, ou avec une forte composante d'astrophysique. Compétences en programmation.

Présentation détaillée du projet doctoral :

Parmi les principaux éléments chimiques présents dans le Système Solaire lors de sa création, figurent les molécules contenant de l'azote. Parmi celles-ci la plus abondante était vraisemblablement le diazote – N_2 – car c'est ce qui est maintenant observé dans les nuages moléculaires. Cette molécule est observée aujourd'hui dans un certain nombre d'objets du Système Solaire : les atmosphères de la Terre, de Vénus et de Titan, les objets glacés du Système Solaire externe, etc... Curieusement les comètes ne contiennent habituellement pas, ou très peu, de N_2 . Les raies d'émission de N_2 ne peuvent pas être observées dans le domaine visible dans les comas cométaires mais l'ion N_2^+ présente de belles raies d'émission dans ce domaine. Ce sont ces raies qui sont utilisées pour essayer de détecter le diazote dans les comètes.

Pendant des décennies la détection de l'ion N_2^+ a été un sujet de débat dans la communauté scientifique car la plupart des détections annoncées l'étaient avec des instruments peu performants et étaient potentiellement affectées par le N_2^+ également présent dans l'atmosphère terrestre (Cochran et al., 2000). Avant la mission Rosetta il y avait essentiellement deux comètes qui avaient fait l'objet d'une détection fiable du N_2^+ , dans les années 2000 : 29P / Schwassmann-Wachmann 1 et C/2002 VQ₉₄. Ces détections en complétaient d'autres, plus discutables. Récemment deux mesures précises du N_2 ont été publiées, pour la comète 67P / Churyumov-Gerasimenko, cible de la mission Rosetta (mesure *in situ* dans la coma ; Rubin et al., 2015), et pour la comète C/2016 R2 (PanSTARRS) (Cochran & McKay 2018 ; Opitom et al., 2019). Cette dernière en particulier, observée depuis le sol, présente une composition jamais observée jusque-là pour une comète : raies intenses de N_2^+ et CO^+ et raies « classiques » (CN, C_2 , C_3 , CH, NH_2 , OH...) absentes ou très faibles. Ces deux découvertes ont relancé l'intérêt de la communauté scientifique pour étudier l'origine du diazote dans les comètes. Celles-ci sont en effet des traceurs puissants des conditions physico-chimiques régnant dans la nébuleuse proto-solaire dans leur lieu de formation. C'est l'objectif de cette thèse d'apporter des éléments quantitatifs nouveaux dans cette étude.

Les objectifs de cette thèse sont d'identifier les réservoirs possibles des comètes riches en N_2 , de déterminer leur durée de vie dans le système solaire, d'examiner la stabilité à long terme de l'élément N_2 , et de contraindre son abondance. Le premier objet d'étude sera la comète C/2016 R2, mais d'autres seront également étudiées. Plusieurs autres comètes ont déjà été identifiées comme riches en N_2 , et la thèse devrait permettre d'en trouver d'autres, dont l'origine et le devenir seront étudiés. La thèse pourra suivre le plan de travail suivant :

I - Simulations numériques des trajectoires La composition inhabituelle de C/2016 R2 incite à penser qu'elle proviendrait d'une zone de formation différente de la plupart des autres comètes. Une autre hypothèse est qu'elle serait le résultat de la fragmentation d'un objet de la ceinture de Kuiper. La thèse commencera par une étude dynamique destinée à étudier quantitativement ces deux hypothèses. Les

outils développés seront également appliqués aux autres cas de comètes ayant fait l'objet d'une détection de N_2^+ . Ceci nécessitera de prendre en compte les incertitudes sur les positions de la comète mesurées, ainsi que les forces non-gravitationnelles agissant sur la comète à proximité de son passage au périhélie.

II – Identification de N_2 dans les archives Un aspect important du problème de l'étude de N_2 dans les comètes est l'hétérogénéité, voire le manque de fiabilité, des observations des raies de N_2^+ depuis le sol. Par ailleurs, les détections dans Rosetta et C/2016 R2 étant récentes, de nombreux observateurs de comètes n'ont souvent pas recherché les raies d'émission de N_2^+ . C'est pourquoi nous prévoyons d'effectuer une étude aussi exhaustive que possible des observations d'archive des comètes. Celles-ci sont disponibles par les archives des observatoires (ESO, Subaru, Gemini, Keck...), par des données accessibles au sein de l'équipe de recherche qui a été PI ou co-I d'un certain nombre d'observations spectroscopiques cométaires et par une collaboration avec une équipe de l'institut d'astrophysique de Liège qui dispose de presque deux décennies d'observations de comètes avec le spectrographe UVES du VLT. Les informations obtenues seront croisées avec des observations complémentaires déjà publiées pour certaines comètes, telles que le rapport $^{14}N/^{15}N$ mesuré dans CN ou NH_2 (Manfroid et al. 2009 ; Rousselot et al., 2014 ; Shinnaka et al., 2016b) ou le rapport ortho-para dans le NH_2 , traceur de la température de formation de la comète (Shinnaka et al., 2016a). Les biais observationnels seront également quantifiés autant que possible, la distribution des ions dans une coma cométaire étant différente de celle des radicaux neutres ce qui influence leur détection spectroscopique avec les méthodes habituelles d'observation. L'objectif de ce travail, qui prévoit aussi le développement d'un nouveau code de calcul de fluorescence de N_2^+ , sera également de quantifier autant que possible la quantité de N_2 pour la relier à l'histoire dynamique des comètes étudiées.

III – Identification de réservoirs et survie dynamique des comètes Les simulations numériques de la Partie I devraient permettre d'identifier des origines communes à un nombre significatif de trajectoires de comètes riches en N_2 . Ceci donnerait une contrainte sur le N_2 primordial dans le Système Solaire, que nous comparerions avec notre vision actuelle de la nébuleuse proto-solaire. Nous ferons également des simulations numériques dans le futur des trajectoires des comètes. De cette façon, nous contraindrons leur temps de survie dans le Système Solaire, et notamment le nombre de passages devant le Soleil. Nous pourrions également simuler les trajectoires de comètes à partir des réservoirs que nous aurons identifiés. Nous pourrions ainsi fixer des contraintes supplémentaires pour l'apport d'éléments par les comètes dans le Système Solaire interne.

Conditions scientifiques matérielles

Les calculs pourront être effectués sur le Mésocentre de calcul de l'Université de Franche-Comté.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche

Les travaux de recherche seront publiés dans des journaux à comité de lecture et présentés à des conférences internationales.

Collaborations envisagées

Une collaboration avec le laboratoire STAR (équipe OrCA) de l'Université de Liège est prévue.

Références bibliographiques

Cochran A.L., Cochran W.D., Barker E.S., 2000, N_2^+ and CO^+ in comets 122P/1995 SA (deVico) and C/1995 O1 (Hale-Bopp), *Icarus*, 146, 583-593

Cochran A.L., McKay A.J., 2018, Strong CO^+ and N_2^+ Emission in comet C/2016 R2 (Pan-STARRS), *ApJL* 854, L10 (4pp)

Manfroid J., Jehin E., Hutsemékers D., Cochran A., Zucconi J-M., Arpigny C., Schulz R., Stüwe J. A., Ilyin I., 2009, The CN isotopic ratios in comets, *A&A* 503, 613–624

Opitom C., Hutsemékers D., Jehin E., Rousselot P., Pozuelos F.J., Manfroid J., Moulane Y., Gillon M., Benkhaldoun Z., 2019, High resolution optical spectroscopy of the N_2 -rich comet C/2016 R2 (PanSTARRS), *A&A*, en cours de révision

Rousselot P., Piralì O., Jehin E., Vervloet M., Hutsemékers D., Manfroid J., Cordier D., Martin-Drumel M.-A., Gruet S., Arpigny A., Decock A., Mousis O., 2014, Toward a Unique Nitrogen Isotopic Ratio in Cometary Ices, *Ap. J. Letters* 780:L17 (5pp)

Rubin M., Altwegg K., Balsiger H. et al., 2015, Molecular nitrogen in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko indicates a low formation temperature, *Science*, 348, 232-235

Shinnaka Y., Kawakita H., Jehin E., Decock A., Hutsemékers D., Manfroid J., 2016a, Ortho-to-para abundance ratios of NH_2 in 26 comets: implications for the real meaning of OPRs, *MNRAS* 462, S124-S131

Shinnaka Y., Kawakita H., Jehin E., Decock A., Hutsemékers D., Manfroid J., Arai A., 2016b, Nitrogen isotopic ratios of NH_2 in comets: implication for ^{15}N -fractionation in cometary ammonia, *MNRAS* 462, S195–S209