

## Les espèces Semi-volatiles dans une comète (SeVoCo)

### *Contexte*

Les comètes sont considérées comme les objets les plus inchangés de notre système solaire. Leur étude nous permet de comprendre la composition chimique du disque protoplanétaire (il y a 4,6 milliards d'années) et le rôle joué par les comètes dans l'évolution de la Terre et du système solaire.

BIRA-IASB a participé au développement de l'instrument ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis), conçu pour mesurer la composition des gaz de la comète 67P. La haute résolution de DFMS (Double Focusing Mass Spectrometer) a permis d'analyser la composition du coma avec un niveau de détail sans précédent. Cela a conduit à la découverte d'une grande variété de molécules. L'étude des espèces volatiles a fourni des informations précieuses sur la comète, sa formation et les débuts de l'histoire de notre système solaire.

Le projet SeVoCo se concentre sur un groupe moins connu de constituants présentes dans la comète: les espèces semi-volatiles. Aucun instrument de Rosetta n'a été spécifiquement conçu pour les mesurer directement, et ce n'est qu'à partir des mesures de ROSINA/DFMS que l'on peut éventuellement en apprendre davantage sur eux de manière indirecte. Les composés semi-volatiles sont moins volatils que les principaux gaz de la coma ( $H_2O$ ,  $CO$  et  $CO_2$ ) et sont caractérisés par une libération retardée du noyau cométaire ou des particules de poussière, en fonction de la distance par rapport à la comète. Ce phénomène est également connu sous le nom de « source distribuée ».

### *Objectifs du projet*

Le projet SeVoCo vise à déterminer si certaines espèces présentes dans le coma proviennent d'une source distribuée, afin de mieux comprendre les composés semi-volatiles.

### *Méthodologie*

Les effets qui affectent à peine les substances volatiles très abondantes (telles que  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  et  $O_2$ ) peuvent jouer un rôle majeur dans la détermination des composés moins abondants. Étant donné que les substances semi-volatiles ne devraient être présentes qu'en petites quantités, une grande partie du projet s'est concentrée sur l'amélioration de la calibration de masse du DFMS. Une calibration de masse précise est essentielle pour identifier correctement les substances dans un spectre de masse et pour créer des spectres sommés. Les spectres sommés permettent de détecter les substances moins abondantes, y compris les composés semi-volatiles. En sommant les spectres de masse, l'incertitude de mesure est réduite et des espèces qui sont cachées proche de la limite de détection instrumentale peuvent être révélées.

### *Résultats*

Premièrement, des routines semi-automatiques ont été développées pour identifier et corriger les spectres problématiques. En utilisant le jeu de données nettoyé, la présence de  $Cl$ ,  $HCl$  et le rapport isotopique  $^{37}Cl/^{35}Cl$  dans le coma ont été analysés tout au long de la mission.

Le rapport isotopique moyen  $^{37}Cl/^{35}Cl$  est de  $0,336 \pm 0,017$ , avec une valeur  $\delta^{37}Cl$  de  $51 \pm 55$ . Cette valeur est cohérente avec les rapports isotopiques sur Terre et sur d'autres corps du système solaire. Cependant, on a trouvé plus de  $Cl$  que ce qui pouvait être expliqué par le  $HCl$  et le  $NH_4Cl$  sur la comète, ce qui indique une source supplémentaire de  $Cl$ . Ce chlore n'est pas libéré directement par le noyau de la comète ou les particules de poussière, ce qui indique une source distribuée. Cependant, l'identité de cette source supplémentaire de  $Cl$  n'a pas pu être déterminée.

Deuxièmement, un modèle de calibration de masse précis a été conçu tout au long de la mission pour les spectres de masse dont la masse nominale est comprise entre 13 et 69. Bien que le DFMS dispose d'un système de rétroaction pour compenser les effets de la température, on a constaté que des effets thermiques et thermomécaniques résiduels affectaient encore la calibration de masse. Le nouveau modèle permet une calibration de masse plus précise (à mieux qu'un pixel du détecteur) et rend donc possible la création de spectres sommés.

Finalement, certaines espèces moins abondantes détectées par DFMS ont été associées à des éléments réfractaires tels que le silicium (Si), le sodium (Na) et le fer (Fe). Ainsi, le Si s'est avéré relativement abondant lors du pointage décalé, ce qui indique une distribution uniforme de silicium atomique dans le coma, provenant peut-être d'une source distribuée. Cependant, la manière exacte dont ces éléments réfractaires entrent dans la phase gazeuse n'est pas claire et doit être étudiée plus en détail.

### *Conclusion et recommandations*

Le projet SeVoCo a montré que le Cl et certains éléments réfractaires ont des sources distribuées. Le terme « semi-volatile » n'est peut-être pas le plus approprié pour désigner ces substances, car il suggère que la volatilité est le seul facteur déterminant leur libération dans le coma. Cependant, il est peu probable que la libération de Cl et de substances réfractaires soit déterminé uniquement par leur volatilité sur les particules de poussière. Il est probable que ces substances soient libérées par un processus retardé à partir des (nano)particules, bien que le mécanisme de ce processus soit encore inconnu.

Le modèle de calibration de masse développé au cours du projet a montré que des corrections supplémentaires sont nécessaires pour une calibration de masse précise en utilisant des spectromètres de masse avec un secteur magnétique dans l'espace.

Les spectres sommés nous ont permis d'approfondir l'analyse des données. La plupart des espèces détectées ont pu être reliées à des composés déjà connus ou à leurs isotopes, mais un certain nombre de composés moins abondants ont été trouvés, alors qu'ils n'avaient pas pu être identifiés sans ambiguïté jusqu'à présent. Une étude plus approfondie des spectres sommés et des données DFMS individuelles est nécessaire pour parvenir à de plus amples conclusions.

### Mots-clés

Comètes, Atmosphère cométaire, Mission Rosetta, Analyse des gaz, Spectrométrie de masse