



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From ice to gas : constraining the desorption processes of interstellar ices

Fayolle, E.C.

Citation

Fayolle, E. C. (2013, October 1). *From ice to gas : constraining the desorption processes of interstellar ices*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/21863>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/21863>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/21863> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Fayolle, Edith Carine

Title: From ice to gas : constraining the desorption processes of interstellar ices

Issue Date: 2013-10-01

Résumé français

De la glace au gaz Comprendre les processus de désorption des glaces interstellaires

Des glaces dans les régions de formation des étoiles.

Les molécules sont présentes partout dans l'univers et sont principalement concentrées dans les nuages moléculaires, siège de formation des étoiles. Une riche variété de molécules a été observée, des plus simples (diatomiques) aux espèces plus complexes (molécules organiques, PAHs), et incluant des ions et des radicaux. Étudier leurs états énergétiques ainsi que leurs voies de destruction permet de connaître les conditions physiques dans lesquelles elles se trouvent et de prédire leur voie de formation et leur abondance dans les différentes régions du milieu interstellaire. Ceci constitue l'un des buts majeurs de l'astrochimie.

Les régions de formation des étoiles sont typiquement composées de gaz moléculaire et de grains de poussière de taille inférieure au micron. Dans les régions froides telles que les cœurs prestellaires, les parties externes des enveloppes protoplanétaires et le plan moyen des disques protoplanétaires, les molécules peuvent se former ou s'accréter sur les grains de poussières, formant ainsi des manteaux de glace. La composition chimique de ces glaces suivant la ligne de visée de différents types d'environnements protostellaires peut être obtenue par spectroscopie infrarouge. Le composé majoritaire est H₂O, suivi de CO, de CO₂ mais aussi de NH₃, CH₄, OCN⁻, CH₃OH et de molécules plus complexes non encore identifiées. La présence de ces molécules dans différentes phases solides, polaires ou apolaires, et les variations d'abondances moléculaires ont fourni d'importants indices quant à leur possible formation.

La figure 8.7 présente un schéma simplifié du scénario de formation et d'évolution des glaces durant la formation des étoiles. Les glaces simples se forment dans les nuages moléculaires durant l'étape prestellaire par accréation d'atomes et de petites molécules de la phase gazeuse sur les grains. À cette étape, ce sont principalement CO₂ ainsi que les molécules hydrogénées H₂O, CH₄, NH₃ qui se forment. Cette phase solide dominée par H₂O est dite "polaire". Quand le cœur prestellaire s'effondre pour former

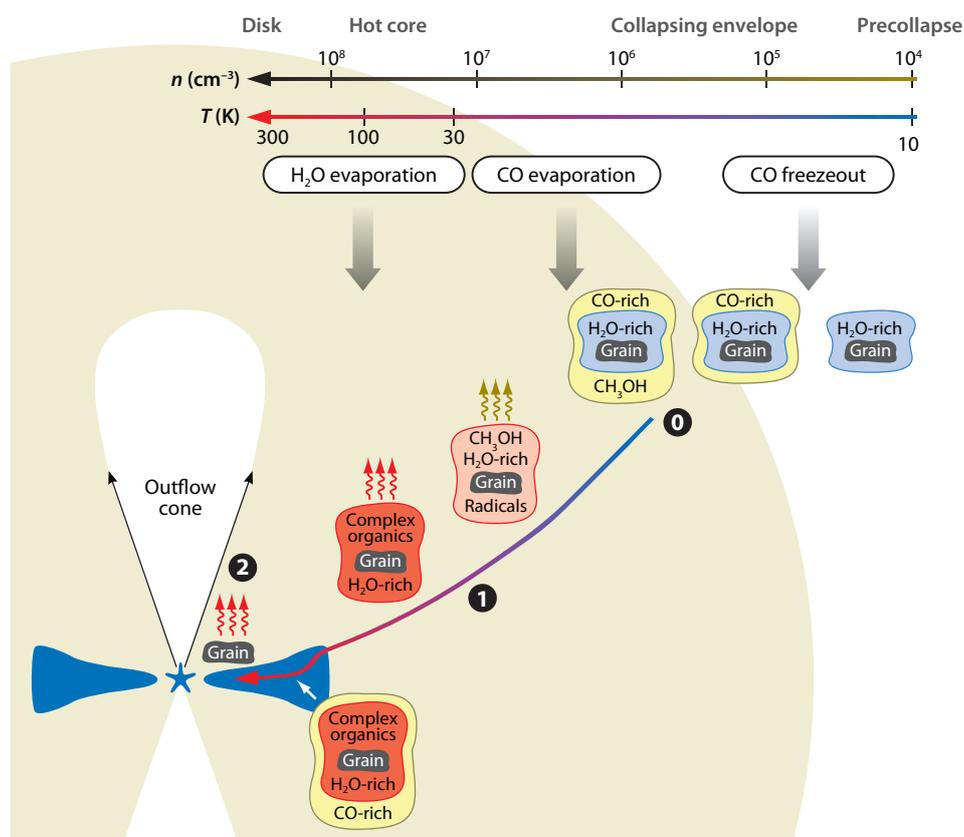


FIGURE 8.7: Schéma représentant l'évolution des glaces interstellaires des cœurs prestellaires, en passant par la phase protostellaire et les disques protoplanétaires. L'étape prestellaire voit la formation d'un premier manteau de glace riche en eau, suivi d'un épisode d'accrétion de molécules de la phase gazeuse durant l'effondrement du cœur prestellaire, formant un manteau de glace riche en CO. Les glaces vont subir des phénomènes d'hydrogénation, de réchauffement, et des réactions induites par les UV pendant la phase protoplanétaire où les grains migrent vers la proto-étoile. La plupart du manteau de glace va s'évaporer lorsque les grains atteignent les régions où les températures sont supérieures à 100 K, ce qui va donner lieu à une chimie riche en phase gazeuse. Alternativement, certains grains migrent dans la région centrale du disque protoplanétaire où les planètes et comètes se forment et ces grains peuvent ainsi être incorporés dans ces mêmes corps. Cette illustration a été élaborée par E. van Dishoeck et R. Visser.

la proto-étoile, la température diminue et les molécules qui se trouvaient encore dans la phase gazeuse - à l'exception de H_2 - viennent se condenser sur la première couche de glace riche en eau. Il en résulte un second manteau de glace, nommé cette fois "apolaire" puisque principalement composé de CO. Durant la phase protostellaire, la jeune étoile se nourrit de son enveloppe qui s'effondre, ce qui entraîne un réchauffement des grains gelés. C'est lors de cette étape que des molécules plus complexes vont pouvoir se former grâce à l'activation de réactions thermiques et à une augmentation de la

mobilité des radicaux formés sous l'effet de particules énergétiques environnantes. À mesure qu'ils s'approchent de la proto-étoile, la température augmente et les grains subissent alors des processus de sublimation. Autour de 100 K, la plupart des molécules condensées dans le manteau de glace sont libérées en phase gazeuse, enrichissent le milieu et participent également aux réactions chimiques. La relation entre la composition des glaces et l'observation d'espèces organiques complexes dans la phase gazeuse est le sujet du chapitre 7 de cette thèse. Néanmoins, une certaine fraction des glaces protostellaires migre dans le plan moyen du disque protoplanétaire, et les molécules formées précédemment sont sans doute à l'origine de la complexité moléculaire observée dans les systèmes planétaires. Dans les régions où la désorption thermique est négligeable, les particules énergétiques - principalement les photons UV - peuvent induire des phénomènes de désorption non-thermiques significatifs. Ce type de désorption peut notamment jouer un rôle dans les cœurs prestellaires (avant formation de l'étoile), les enveloppes protostellaires mais également à la surface des disques protoplanétaires.

Prendre en compte les processus de désorption thermique et non-thermique est fondamental pour comprendre l'interaction gaz-grains dans les régions de formation des étoiles. Les molécules en phase gazeuse sont communément utilisées par les radio astronomes pour sonder les conditions physiques du milieu interstellaire. Il est important de comprendre quels paramètres physiques conditionnent les liens entre les phases solide et gazeuse pour pouvoir utiliser les molécules comme sondes. D'un point de vue chimique, il est également nécessaire de connaître la répartition des molécules entre phase gazeuse et condensée puisque les réactions chimiques peuvent être très différentes d'une phase à l'autre ; certains produits peuvent se former préférentiellement dans une phase plus que dans l'autre. Le but principal de cette thèse est de caractériser et de comprendre les processus de désorption thermique et les processus non-thermiques photo-induits par le rayonnement UV dans les conditions du milieu interstellaire.

La désorption thermique des glaces

La désorption thermique des glaces est un processus important à l'étape protostellaire, lorsque la jeune étoile se nourrit de son enveloppe qui s'effondre. Les grains de l'enveloppe se réchauffent à mesure qu'ils se rapprochent de la proto-étoile et les constituants des manteaux de glaces sont libérés en phase gazeuse de manière sélective selon leurs énergies de liaison. Des expériences de laboratoire sont nécessaires pour comprendre comment ce processus de désorption se produit dans le cas de glaces interstellaires. Plus particulièrement, le chapitre 2 s'intéresse à l'impact de l'eau, principal composant des glaces interstellaires, sur la désorption d'espèces minoritaires plus volatiles. Des dépôts de mélanges $\text{H}_2\text{O} : \text{CO}_2$ de rapports de concentrations et d'épaisseurs variables sont préparés sur un substrat maintenu à très basse température sous ultra-vide, de manière à simuler les conditions rencontrées dans l'espace. La méthode expérimentale repose sur l'application d'une rampe thermique linéaire permettant de chauffer progressivement l'échantillon tout en enregistrant le signal de désorption des espèces triées en masse (spectromètre de masse). Le CO_2 pure désorbe aux alentours de 70 K. Cependant, lorsqu'il est mélangé à H_2O , seule une fraction désorbe à cette température tandis que le reste désorbe vers 140 K avec les molécules d'eau. Ce phénomène de piégeage est reproduit dans le chapitre 2 grâce à un modèle

de glace distinguant trois phases (voir figure 8.8 pour plus de détails sur le modèle).

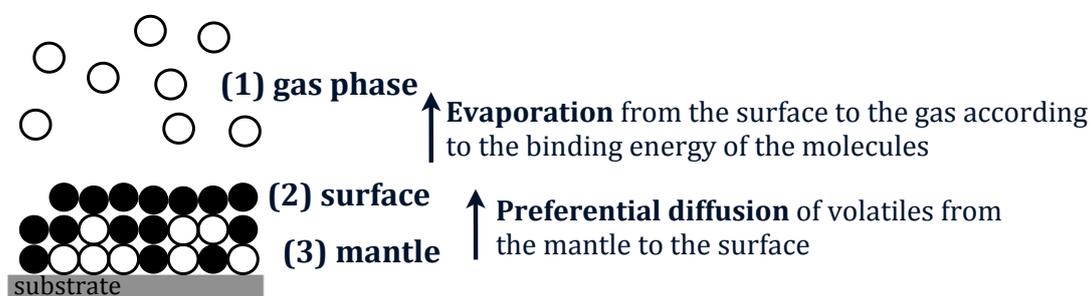


FIGURE 8.8: Principe du modèle de désorption 3-phases pour les volatiles (cercles vides) et les molécules d'eau (cercles pleins). La désorption des molécules vers la phase gazeuse provient de la surface selon l'énergie de liaison des molécules, et les molécules du manteau viennent remplir la surface après chaque événement de désorption. Le remplissage dépend de la facilité pour les molécules à diffuser du manteau vers la surface et est plus favorable pour les espèces volatiles car celles-ci sont moins liées à leur environnement.

Les expériences de laboratoire sont utilisées pour quantifier la migration des espèces volatiles du manteau vers la surface de la glace puisque celle-ci n'est pas statistique mais dépend de la diffusion de ces volatiles en matrice d'eau. En utilisant ce modèle, il est possible d'estimer la quantité de molécules volatiles qui reste piégées avec l'eau à des températures supérieures à leur sublimation en phase pure, et ceci en fonction de l'épaisseur, de la concentration de la glace et du taux de réchauffement spécifique pour une proto-étoile. Coupler ce modèle aux simulations des interactions gaz-grains du milieu interstellaire permet de mieux estimer la répartition entre phase condensée et phase gazeuse des espèces volatiles et donc de prédire de façon précise la chimie protostellaire.

Désorption photo-induite

Dans les régions froides où toutes les molécules - sauf H_2 - devraient se trouver en phase condensée, il est possible d'observer quelques molécules en phase gazeuse sous l'effet de processus de désorption non-thermique. Plus précisément, la désorption non-thermique induite par les photons UV a été invoquée pour expliquer la présence de gaz moléculaire froid dans les disques protoplanétaires. Des expériences de laboratoire ont donc été conduites pour mesurer l'efficacité de la photodésorption et pour comprendre son mécanisme. La plupart des expériences de photodésorption utilise des lampes micro-onde à décharge de H_2 pour induire la désorption car celles-ci produisent principalement des photons UV à la longueur d'onde de l'émission H-alpha et un continuum à plus basse énergie. Les rendements de photodésorption mesurés dépendent à priori du profil spectral de la décharge, très sensible aux conditions expérimentales.

Une nouvelle approche, développée dans les chapitres 3 à 6, consiste à utiliser comme source lumière le rayonnement synchrotron dans le domaine VUV (ultraviolet du vide, $\lambda < 200$ nm) afin d'étudier la photodésorption des glaces interstellaires.

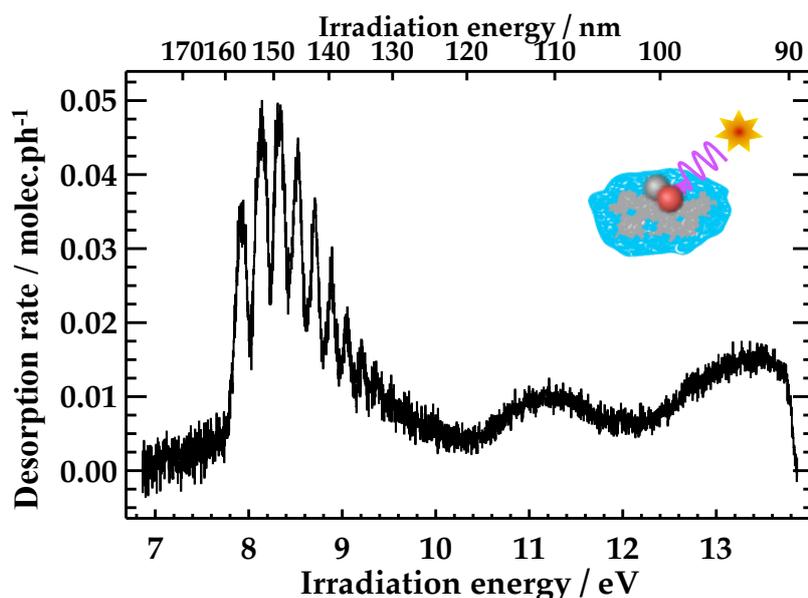


FIGURE 8.9: Spectre de photodésorption d'une glace de CO de 10 ML à 18 K. La progression vibrationnelle sous 10 eV correspond à l'excitation électronique vers l'état non-dissociatif $A^1\Pi$ de CO.

La ligne de lumière DESIRS du synchrotron SOLEIL (Saint-Aubin, France) fournit des photons dans la gamme d'énergie 7 - 14 eV intéressante pour l'astrophysique et à des flux et résolutions suffisants pour sonder la photodésorption en fonction de l'énergie d'irradiation. Ces études permettent d'obtenir des taux de photodésorption sur une large gamme d'énergie, ce qui permet de calculer l'efficacité de photodésorption pour une variété de régions de l'espace ayant différents profils spectraux dans l'UV. Mais l'avantage principal de ces études en fonction de l'énergie d'irradiation est l'obtention d'informations sur le mécanisme de photodésorption, ce qui permet de l'incorporer de façon détaillée dans les simulations astrochimiques d'interaction gaz-grains.

Les premières études résolues en énergie ont porté sur la photodésorption de CO puisque c'est une molécule dont la spectroscopie est connue et que des glaces riches en CO sont communément observées dans le milieu interstellaire. Des échantillons de glace de CO ont été formés sous ultra-vide à 18 K, puis irradiés par des photons dont l'énergie est comprise entre 7 et 14 eV. Les molécules qui désorbent sont sondées par spectrométrie de masse en fonction de l'énergie des photons incidents, ce qui permet d'obtenir un spectre de photodésorption (voir figure 8.9). La nette dépendance de la photodésorption avec la longueur d'onde reflète la structure électronique de la glace de CO; il s'agit donc d'un processus de Désorption Induite par Transition Electronique (DIET, voir chapitre 3). En utilisant des couches de glaces marquées grâce aux isotopologues $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ et en se servant de la différence de fréquences propres des niveaux vibrationnels du premier état excité de ces deux molécules, il est possible de comprendre comme jamais auparavant le mécanisme de photodésorption dans ce domaine de longueur d'onde. Il a ainsi été montré que c'est l'excitation électronique des molécules en sous-couches qui induit de manière indirecte la désorption des molécules de surface

(voir chapitre 4). La photodésorption de N_2 , très efficace au dessus de 12 eV, se produit de façon analogue à celle démontrée pour CO aux énergies inférieures à 10 eV. Dans le cas de O_2 , l'irradiation VUV provoque la dissociation des molécules, ce qui complique le mécanisme de photodésorption puisque les atomes d'oxygène peuvent éjecter d'autres molécules de la glace, se recombiner, ou induire de la chimie (chapitre 5).

La photodésorption de molécules dans cette gamme d'énergie a été étudié dans le cas de deux espèces chimiques mélangées : CO et N_2 . Comprendre le processus de photodésorption pour des mélanges de glace est nécessaire puisque la plupart des glaces interstellaires ne sont pas pures. Les glaces de CO et N_2 ont des spectres d'absorption très distincts. Cependant, en présence d'un mélange de CO : N_2 (1 : 1), les spectres de photodésorption de ces deux espèces sont identiques. Ces profils comparables viennent de l'excitation électronique d'un type de molécule et de la redistribution de l'énergie à toutes les molécules voisines, indépendamment de leur nature (voir chapitre 6). Ces observations ont d'importantes conséquences astrophysiques puisque les taux de photodésorption ne sont pas seulement dus à la nature de l'espèce chimique qui absorbe le rayonnement, mais également à celle de son environnement. La nature du transfert énergétique reste encore une question ouverte mais devrait trouver une réponse prochainement grâce à l'analyse par spectroscopie laser des molécules photodésorbées ainsi que par l'étude de la lumière émise (fluorescence) au cours de l'irradiation. Les expériences de photodésorption devront aussi être étendues à des molécules organiques plus complexes. La photodésorption de ces molécules est encore méconnue étant donné le rôle complexe que jouent les radicaux formés pendant l'irradiation VUV, mais sa quantification expérimentale ainsi que son observation dans le milieu interstellaire constituent un outil formidable pour sonder la complexité chimique des glaces interstellaires.