

Composition et structure des silicates âgés

Les objets protostellaires sont constitués d'une étoile très jeune venant juste de commencer à émettre un rayonnement, enfouie dans un cocon de poussière issu d'un nuage moléculaire en cours d'effondrement gravitationnel. La poussière sondée dans ce type d'objets a séjourné plusieurs centaines de millions d'années dans le milieu interstellaire où elle a été soumise à divers mécanismes d'évolution physico-chimique (interaction avec les photons et les rayons cosmiques, collisions gaz-grain, grain-grain, etc.). Elle n'a par contre pas subi les processus violents opérant dans les disques (proto) planétaires. La poussière de ces objets représente donc une classe de poussière interstellaire "âgée", particulièrement précieuse pour apporter des contraintes sur le cycle de la poussière dans la galaxie. Ce chapitre présente l'étude de trois objets protostellaires : RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS 23151+5912. La composition de la poussière silicatée de ces objets est d'abord modélisée en utilisant les théories exposées au Chapitre 2. Ces résultats sont ensuite utilisés pour modéliser le transfert de rayonnement dans ces objets et contraindre l'abondance de la composante d'olivine amorphe et de silicates cristallins présents dans cette poussière.

4.1 Les protoétoiles massives

Les trois objets étudiés, RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS 23151+5912 (nommées IRAS 19110 et IRAS 23151 par la suite) sont des protoétoiles massives. Ces étoiles émettent un puissant rayonnement dans l'UV ($T_* \sim 30\,000 - 40\,000$ K) qui chauffe la poussière proche de l'étoile. Celle-ci réémet le rayonnement de l'étoile dans l'infrarouge et illumine la poussière froide située dans les zones externes du cocon entourant l'étoile. La Figure 4.1 présente les spectres ISO combinés SWS et LWS pour RAFGL7009S et IRAS 19110 et le spectre SWS pour IRAS 23151. Ces trois objets sont profondément enfouis dans un nuage de poussières comme le montrent les spectres dominés par les fortes bandes des silicates en absorption à ~ 9.6 et $18\ \mu\text{m}$, dues, respectivement, au mode d'élongation et de déformation de la liaison O-Si-O dans des silicates amorphes.

De nombreuses bandes d'absorption sont aussi présentes dans les spectres entre 3 et $16\ \mu\text{m}$. Ces bandes sont dues aux vibrations des molécules volatiles condensées à la surface des grains et constituant un manteau de glaces. La composition de ces manteaux varie d'une source à l'autre, essentiellement en raison de la température des grains et de la chimie qui a lieu dans les manteaux. Dans RAFGL7009S, H_2O ($3.1, 6.02, 13.5, 44\ \mu\text{m}$), CO ($4.67\ \mu\text{m}$), CO_2 ($4.27, 15.2\ \mu\text{m}$), CH_3OH ($3.54, 3.84, 3.94, 6.84\ \mu\text{m}$) et CH_4 ($7.7\ \mu\text{m}$) ont été détectés (d'Hendecourt et al., 1996, Dartois et al., 1999). La poussière autour de IRAS 19110 et IRAS 23151 est légèrement plus chaude que celle de RAFGL7009S et les glaces ne contiennent pas de CO et de CH_4 ; CH_3OH est également absent (Dartois et al., 1998). On remarque que les vibrations des molécules de CO_2 et H_2O à 15.2 et $\sim 13\ \mu\text{m}$ respectivement, présentes dans les trois sources, ainsi que de CH_3OH à $8.85, 9.74$ et $14.4\ \mu\text{m}$ dans RAFGL7009S, se superposent à l'absorption des silicates et il est nécessaire d'en tenir compte lors de l'analyse des bandes dues aux silicates.

4.2 Méthode d'analyse adoptée

Les protoétoiles sont des objets dont la poussière, sondée en absorption, est très froide. La présence de molécules volatiles condensées à leur surface indique que la plupart des grains ont une température inférieure ou de l'ordre de 30 ou 40 K. Ceci est confirmé par des calculs de la distribution de masse en fonction de la température (Dartois, 1998). A ces températures, les grains silicatés émettent principalement vers $70-100\ \mu\text{m}$. On peut ainsi supposer qu'entre 10 et $30\ \mu\text{m}$ l'émission de la poussière est négligeable, ce qui revient à négliger les effets du transfert de rayonnement. On

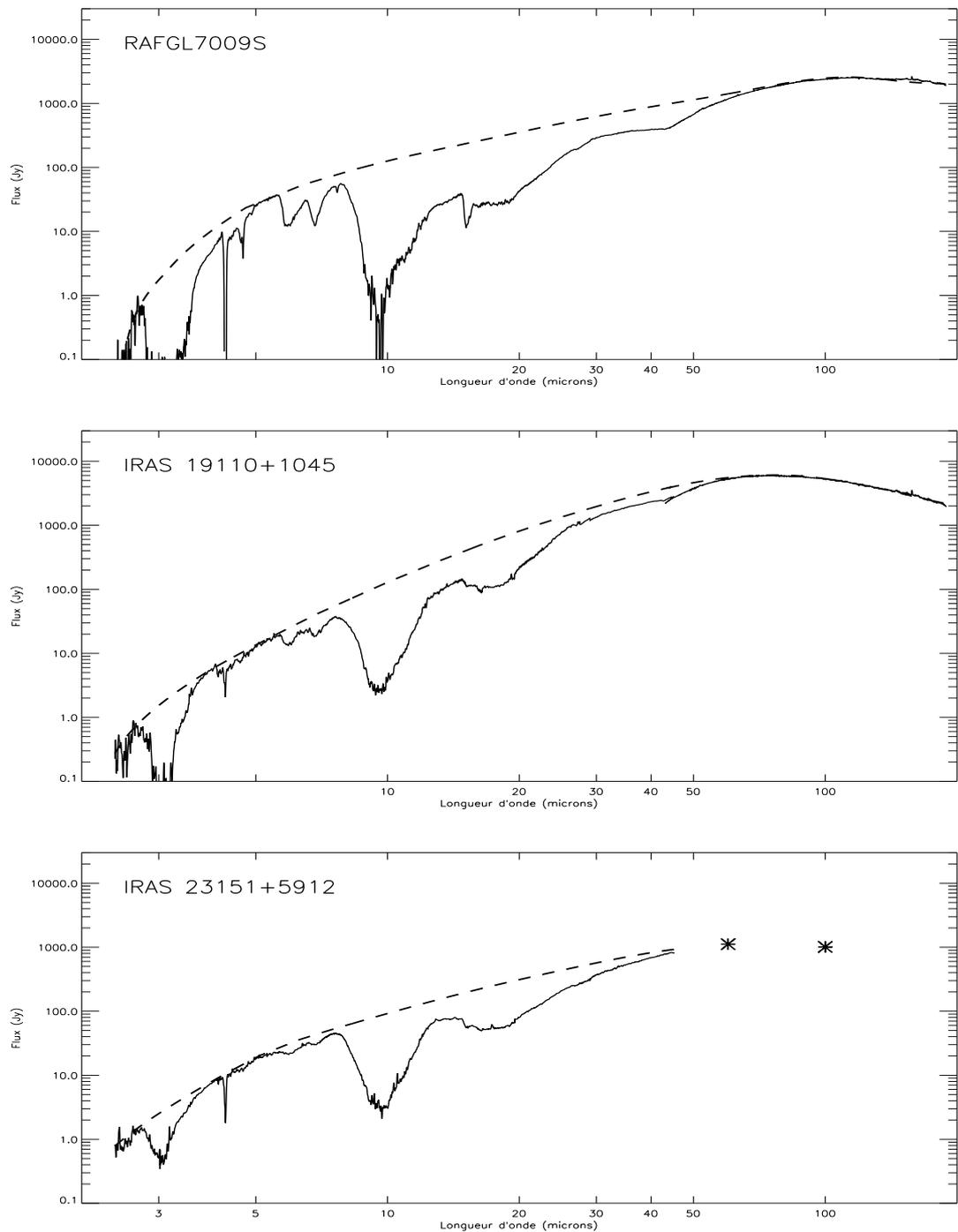


FIG. 4.1: Spectres combinés ISO-SWS et ISO-LWS de RAFGL7009S (en haut) et IRAS 19110+1045 (au milieu) et ISO-SWS de IRAS 23151+5912 (en bas). Les courbes en tirets représentent le continuum adopté pour chaque source. Pour IRAS 23151+5912, les étoiles représentent les flux IRAS. Voir le texte pour l'identification des différentes bandes spectrales et la détermination du continuum.

se retrouve alors dans la configuration simple, semblable à celle du laboratoire, où la poussière froide, illuminée par une source infrarouge (la poussière chaude proche de l'étoile), absorbe le rayonnement incident. Cette hypothèse étant posée, il suffit de modéliser le continuum de la source, c'est-à-dire l'émission de la poussière chaude, et de diviser le spectre observé par celui-ci pour obtenir l'efficacité d'extinction des grains silicatés recouverts de leur manteau de glace. Cette efficacité d'extinction est alors directement comparable aux spectres de laboratoire ou aux spectres modélisés à partir des constantes optiques (Paragraphe 2.2).

La Figure 4.1 représente les continuums adoptés pour chacune des trois sources. Ils ont été déterminés à l'aide de fonctions splines cubiques en supposant que les zones spectrales 4 - 5 μm et 50 - 200 μm (40 - 45 μm pour IRAS 23151) représentent le continuum seul. Ces continuums correspondent à l'émission de la poussière chaude proche de l'étoile. Ils auraient pu être estimés à l'aide d'un ou plusieurs corps noirs à la température de la poussière. La division des spectres par un continuum déterminé à l'aide de splines ou de corps noirs n'introduit que des variations de l'efficacité d'extinction inférieures à 10 %, aux longueurs d'ondes inférieures à 8 μm et supérieures à 25 μm . Pour notre étude de la poussière silicatée, effectuée sur la gamme spectrale comprise entre ~ 9 et 30 μm , le choix de la méthode utilisée pour déterminer le continuum est donc indifférent.

Après avoir soustrait le continuum, il est nécessaire de tenir compte de l'absorption des glaces qui se superpose à celle des silicates. Pour cela nous avons choisi d'ajouter aux spectres des silicates modélisés, l'absorption d'un mélange de glaces mesurée en laboratoire. On a vu au Paragraphe 2.8.1 que cette procédure introduit des erreurs par rapport au calcul exact considérant l'extinction de grains de silicates recouverts d'un manteau de glace. Cependant nous montrerons par la suite que ces erreurs sont négligeables et que l'utilisation de l'une ou l'autre méthode ne change pas les conclusions de cette étude (Paragraphe 4.6.1).

4.3 Modélisation de l'extinction de la poussière

Afin de modéliser et de reproduire l'extinction de la poussière présente autour des trois protoétoiles, nous pouvons agir sur les paramètres libres suivants, qui caractérisent cette poussière (Chapitre 2) : taille, forme et composition des grains. Nous avons considéré des grains de composition hétérogène, constitués d'une matrice silicatée contenant des inclusions et pouvant être poreux. Le choix de la taille et de la

forme des grains, de la composition de la matrice et des inclusions ainsi que le degré de porosité des grains sont discutés ci-après. Les effets sur l’extinction de la porosité et de la présence d’inclusions sont rappelés.

L’extinction a été calculée en utilisant les diverses théories exposées au Chapitre 2. Les constantes optiques de silicates amorphes et d’oxydes intervenant dans cette étude sont disponibles sur la base de données du groupe de Jena¹.

Taille des grains

Nous avons utilisé pour la modélisation des bandes des silicates, des grains de $0.1 \mu\text{m}$ de rayon. On a vu au Chapitre 2 que lorsque la gamme spectrale étudiée est telle que $\lambda \geq 8 \mu\text{m}$, les conditions définissant la limite de Rayleigh sont remplies pour des grains de taille inférieure à $\sim 0.85 \mu\text{m}$ (Somsikov & Voshchinnikov, 1999). Or, la modélisation de la bande de la glace d’eau, observée dans le spectre ISO-SWS de RAFGL7009S à $3.1 \mu\text{m}$ montre que la taille maximale des grains dans cet objet est de l’ordre de $0.5 \mu\text{m}$ (Dartois & d’Hendecourt, 2000). Partant de l’hypothèse que la taille maximale des grains est similaire dans IRAS 23151 et IRAS 19110, on peut donc considérer que notre étude s’effectue dans la limite de Rayleigh. Comme on l’a vu aux Paragraphes 2.5 et 2.7, dans la limite de Rayleigh, la forme des bandes ne dépend pas de la taille des grains et il n’est pas nécessaire de prendre en compte une distribution de taille. Il est donc justifié, pour étudier la poussière silicatée dans ces trois protoétoiles, de choisir une taille de grain unique, inférieure à $0.85 \mu\text{m}$, comme par exemple $0.1 \mu\text{m}$.

Composition des grains silicatés

La composition globale des silicates interstellaires est contrainte par les observations du déficit des éléments dans la phase gazeuse par rapport aux abondances de référence. Les silicates sont donc composés, outre le fer, le magnésium et le silicium, d’éléments comme l’aluminium et le calcium. Ces différents éléments peuvent être présents dans les grains, dans la structure même du minéral et/ou sous forme d’inclusions d’oxydes. La présence d’inclusions d’oxydes d’aluminium dans les grains est prédite par les théories de nucléation des grains (Sedlmayr, 1989, Kozasa & Hasegawa, 1987). L’oxyde d’aluminium a également été proposé pour expliquer la bande à $13 \mu\text{m}$ observée dans les spectres d’étoiles riches en oxygène (Stencel et al., 1990, Bege-mann et al., 1997). Cette identification est remise en cause par Posch et al. (1999) mais ces derniers proposent que la bande soit toujours due à un oxyde d’aluminium, le spinelle, MgAl_2O_4 . Les oxydes de fer tels que l’hématite (Fe_2O_3) ou la magnétite

¹<http://www.astro.uni-jena.de/Group/Subgroups/Labor/Labor/odata.html>

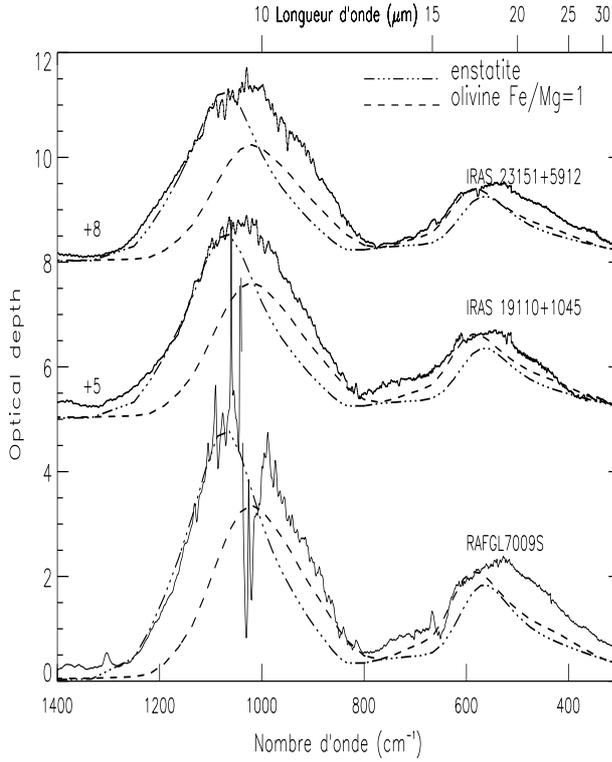


FIG. 4.2: Comparaison des bandes des silicates dans RAFGL7009S (en bas), IRAS 19110 (au milieu) et IRAS 23151 (en haut) avec des modèles de grains sphériques d'olivine (MgFeSiO_4 , tirets) et d'enstatite (MgSiO_3 , pointillé-tirets) amorphe. Le continuum et l'absorption des glaces ont été soustraits. Le fort bruit à $\sim 9 \mu\text{m}$ dans RAFGL7009S est dû à la saturation de la bande d'élongation des silicates, la "bande" à 650 cm^{-1} est due à un léger décalage entre le spectre de laboratoire de CO_2 et les observations. Les spectres ont été décalés par souci de clarté.

(Fe_3O_4), formés autour des étoiles évoluées riches en oxygène, pourraient être incorporés dans les grains de silicate (Savage & Sembach, 1996). Nous avons utilisé, pour la modélisation des grains, l'oxyde de fer le plus simple, FeO , et l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 .

La comparaison de l'extinction des grains silicatés protostellaires, l'absorption des glaces étant soustraite, avec l'extinction calculée de grains sphériques, compacts et homogènes d'olivine et de pyroxène amorphes montre qu'il est impossible de reproduire les bandes observées (Figure 4.2). Si l'on considère des grains d'olivines, on constate que le mode d'élongation, à $9.8 \mu\text{m}$, est décalé de $0.2 \mu\text{m}$ par rapport aux observations ($9.6 \mu\text{m}$). De plus, l'aile rouge du mode de déformation à $18 \mu\text{m}$ est mal reproduite et le rapport des deux bandes est trop faible ($\tau_{9.6}/\tau_{18} \sim 1.6$, à comparer à plus de 2.1 pour les observations). Concernant les grains de pyroxènes, il est possible de reproduire correctement l'aile bleue de la bande protostellaire à $9.6 \mu\text{m}$ et de plus, le rapport des bandes du spectre simulé est semblable à celui des observations. La largeur des bandes n'est cependant pas correctement reproduite. Un mélange de grains d'olivine et de pyroxène amorphe permet de reproduire la bande à $9.6 \mu\text{m}$, mais pas celle à $18 \mu\text{m}$ (le pic de la bande est à trop courte longueur d'onde, son aile à grande longueur d'onde n'est pas reproduite et le rapport $\tau_{9.6}/\tau_{18} \sim$ est trop faible).

La comparaison des spectres observés avec les spectres de grains d’olivine (même si ceux-ci sont poreux et contiennent des inclusions), montre que l’olivine est une composante mineure de la poussière car aucun accord spectral satisfaisant ne peut être obtenu. Ceci est d’ailleurs en accord avec les études de Jäger et al. (1994) et Dorschner et al. (1995) qui montrent que la position et la forme des bandes des silicates autour des objets protostellaires sont compatibles avec des pyroxènes amorphes contenant du fer et des traces de calcium. Un autre type de verre de silicate contenant de l’aluminium en plus du fer et du magnésium, les aluminosilicates, a récemment été proposé par Mutschke et al. (1998) pour reproduire les spectres des deux étoiles Mira IK Tauri et EP Aquarii. La position des bandes de ces aluminosilicates est semblable à celle des observations. Nous avons donc par la suite utilisé des pyroxènes et des aluminosilicates amorphes. La quantité d’olivine maximale pouvant être présente dans la poussière autour des ces trois objets sera déterminée par la suite (Paragraphe 4.6.3).

Les écarts entre les spectres modélisés de grains compacts de composition homogène et les spectres observés, dus principalement au problème de largeur des bandes (Figure 4.2), peuvent être liés à plusieurs facteurs : la forme des particules, la porosité et la présence d’inclusions. Nous rappelons ci-dessous les effets sur l’extinction de chacun de ces paramètres.

Forme des grains

Nous avons utilisé dans cette étude des grains sphériques. Cependant, les grains interstellaires ne sont sûrement pas strictement sphériques mais ont plus probablement une distribution de formes quelconque. Or, nous avons vu au Paragraphe 2.6 que la forme des grains modifie leur extinction (forme des bandes) et cela, indépendamment de leur taille. Toutefois, les modifications des bandes induites si l’on utilise non plus des grains sphériques mais une distribution d’ellipsoïdes de type CDE, ne sont pas suffisantes pour changer les résultats de nos modélisations.

Effet de la porosité

Dans les nuages denses, similaires à ceux qui vont s’effondrer pour former de nouvelles étoiles, on s’attend à ce que les petits grains coagulent et forment des grains plus gros présentant une structure poreuse, voire fractale (Dominik & Tielens, 1997). Nous avons donc cherché à évaluer le rôle de la porosité en modélisant l’extinction de grains de porosité variable. Il existe plusieurs façons de calculer l’extinction d’un grain contenant une certaine fraction volumique de vide (par exemple Stognienko et al. (1995)). Ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents, mais uniquement lorsque la fraction volumique de vide, f_{vide} , excède environ 50 % du volume

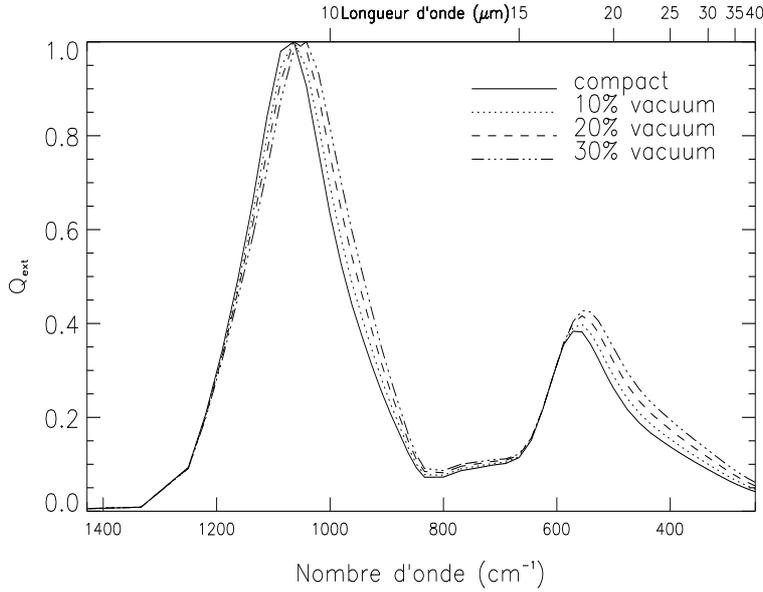


FIG. 4.3: Influence de la porosité sur l'extinction d'un grain d'enstatite (MgSiO_3) amorphe. Les spectres ont été normalisés à 1 pour la comparaison. La porosité décale la position des modes d'élongation et de déformation vers les grandes longueurs d'onde et élargit les bandes.

du grain (Ossenkopf, 1991). Dans cette étude, nous avons considéré des grains non fractals et relativement peu poreux ($f_{vide} \leq 25\%$) dont l'extinction a été modélisée à l'aide du formalisme de Maxwell-Garnet (Paragraphe 2.8.2). Les résultats des calculs montrent que la porosité a les effets recherchés sur l'extinction : elle élargit les bandes, les décale vers les grandes longueurs d'onde et augmente le rapport $\tau_{9.6}/\tau_{18}$ (Figure 4.3).

Effets des inclusions

L'extinction d'un grain peut également être modifiée si celui-ci contient des inclusions de divers matériaux (Paragraphe 2.8.2). En particulier, la présence d'inclusions de FeO ou de Al_2O_3 dans un grain de silicate amorphe élargit les bandes et modifie le rapport $\tau_{9.6}/\tau_{18}$. Les oxydes de fer décalent les bandes vers les courtes longueurs d'onde, alors que l'oxyde d'aluminium les décale vers les grandes longueurs d'onde (Figure 4.4). D'autre part, l'oxyde de fer élargit la bande à $18\ \mu\text{m}$.

On peut noter qu'il est possible, dans le cas du fer, de distinguer s'il est présent dans le grain dans la structure du silicate ou sous forme d'inclusions de FeO . En effet, l'extinction résultante n'est pas la même dans les deux cas. Pour le fer on constate que la bande due à la vibration de la liaison Fe-O dans les silicates est beaucoup moins prononcée que dans le cas d'inclusion de FeO dans le grain de silicate (voir Figure 4.4, en haut). De plus, la position du mode d'élongation des pyroxènes est décalée vers les courtes longueurs d'onde quand la teneur en fer augmente.

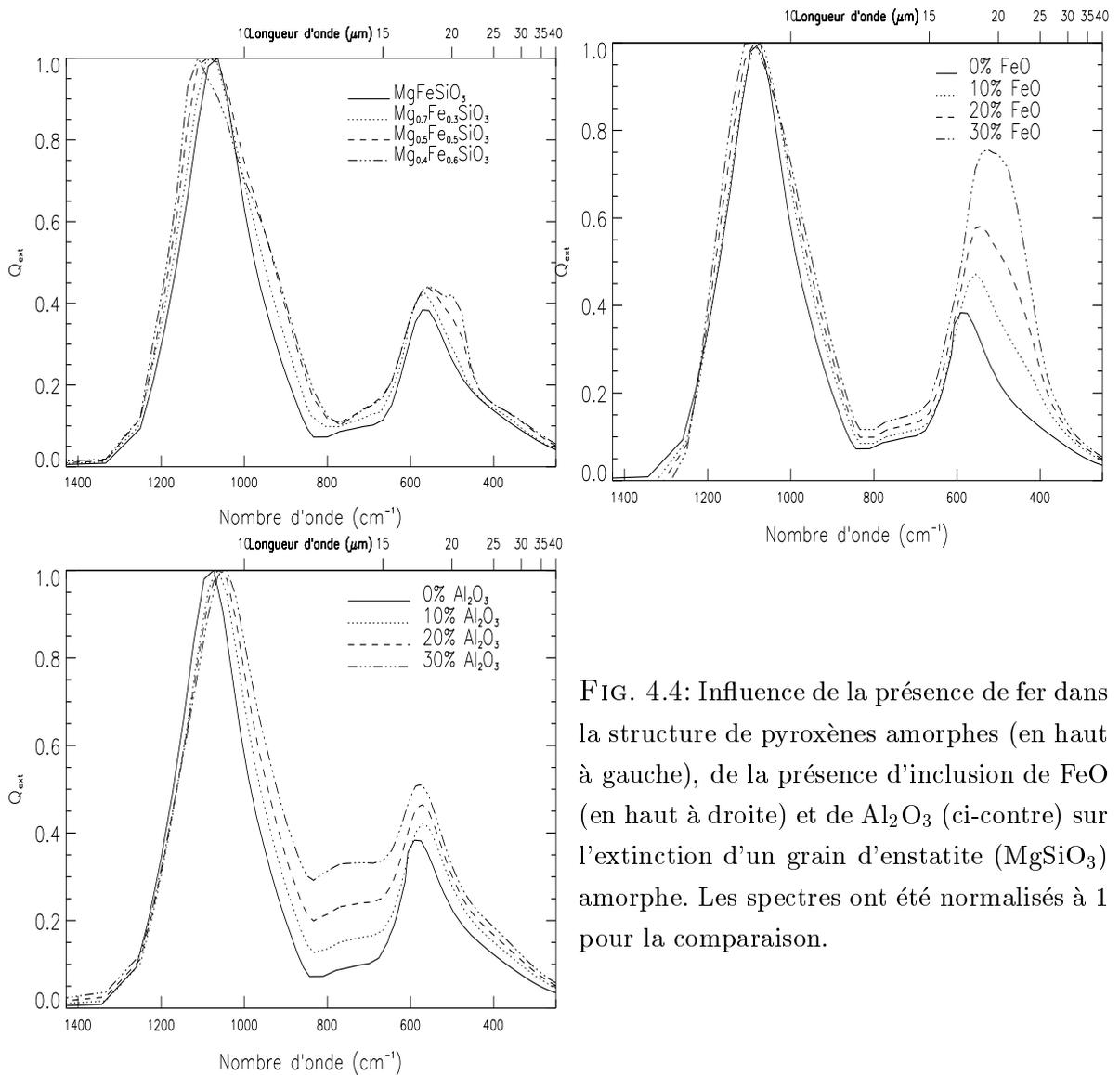


FIG. 4.4: Influence de la présence de fer dans la structure de pyroxènes amorphes (en haut à gauche), de la présence d'inclusion de FeO (en haut à droite) et de Al_2O_3 (ci-contre) sur l'extinction d'un grain d'enstatite (MgSiO_3) amorphe. Les spectres ont été normalisés à 1 pour la comparaison.

4.4 Résultats

La reproduction des bandes de vibration des minéraux amorphes, larges et sans structure, n'est en général pas univoque. Nous avons donc trouvé, pour chaque protoétoile étudiée, plusieurs ajustements possibles aux spectres. Il n'est possible de discriminer parmi les différentes populations de grains dont l'extinction permet de reproduire correctement les spectres, que si celles-ci ne satisfont pas les contraintes d'abondances cosmiques. Nous présentons dans ce paragraphe, pour chacun des objets, deux des meilleurs ajustements calculés, qui remplissent ces contraintes et qui représentent donc aussi bien l'un que l'autre la poussière silicatée de ceux-ci. La composition de la poussière de chacun de ces ajustement est présentée au Tableau 4.1.

Tableau 4.1: Composition de la poussière silicatée autour des trois protoétoiles RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS 23151+5912.

		composition des silicates	FeO (%)	porosité (%)
RAFGL7009S	a	pyroxène cosmique $\text{Mg}_4\text{Fe}_4\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{27}$	10 5	15 -
	b	pyroxène cosmique	5	15
IRAS 19110	c	pyroxène cosmique $\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$	3 -	15 -
	d	pyroxène cosmique $\text{Mg}_4\text{Fe}_4\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{27}$	3 -	15 15
IRAS 23151	e	pyroxène cosmique $\text{Mg}_9\text{Fe}_9\text{Al}_2\text{Si}_{18}\text{O}_{57}$	5 5	25 10
	f	idem (d)		

Les modèles a, c, d, e et f sont constitués de deux populations de grains. Tous les modèles donnent le meilleur ajustement des spectres tout en satisfaisant aux contraintes sur les abondances cosmiques. Les pyroxènes “cosmiques” ont pour composition :Mg 28.1%, Fe 17.3%, Al 1.1%, Ca 2.2% et Si 51.3% . La quantité de FeO et la porosité sont exprimés en % du volume des grains.

4.4.1 RAFGL7009S

Dans le spectre de RAFGL7009S , le mode d'élongation des silicates, à $9.6 \mu\text{m}$, est très large : la largeur à mi-hauteur, FWHM (Full Width at Half Maximum) est de $\sim 2.35 \mu\text{m}$, après soustraction de l'absorption des glaces. Cette bande étant saturée, on ne peut donner qu'une limite inférieure au rapport des deux bandes : $\tau_{9.6}/\tau_{18} \geq 2.15$.

Les bandes des silicates dans RAFGL7009S sont bien reproduites par des grains de pyroxènes riches en fer et en magnésium, avec un rapport Fe/Mg compris entre 0.4 et 0.65 et contenant $\sim 5 \%$ (% volumique) de FeO et $\sim 15 \%$ de vide (Figure 4.5). Les pyroxènes “cosmiques” (qualifiés de cosmiques car leur composition est proche des abondances élémentaires cosmiques : Mg 28.1%, Fe 17.3%, Al 1.1%, Ca 2.2% et Si 51.3%) permettent de très bien reproduire l'aile à courte longueur d'onde du mode d'élongation des silicates, mieux que des pyroxènes de type $\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_3$ dont la bande est légèrement décalée vers les courtes longueurs d'onde. De plus la bande à

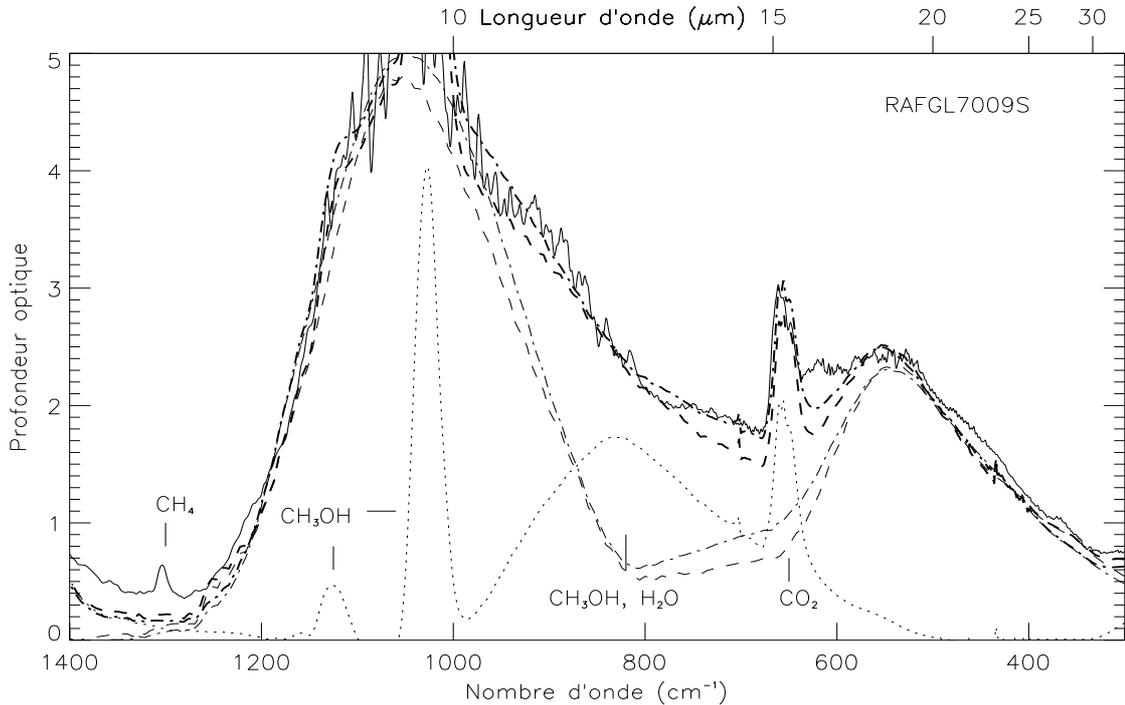


FIG. 4.5: Comparaison du spectre ISO-SWS de RAFGL7009S (le continuum a été soustrait) avec des modèles de grains de silicates sphériques et poreux contenant des oxydes. Pointillés-tirets : (modèle a) mélange de deux populations de grains, une de grains de pyroxène cosmique contenant 15 % de vide et 10 % de FeO et la seconde de grains d'aluminosilicate ($\text{Mg}_4\text{Fe}_4\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{27}$) contenant 5 % de FeO. Tirets longs : (modèle b) grains de pyroxène cosmique contenant 15 % de vide et 5 % de FeO. Les lignes fines représentent les modèles des silicates et les lignes en gras ces mêmes modèles auxquels on a ajouté l'absorption des glaces. Pointillés : le spectre de glaces ajouté aux modèles des silicates.

$9.6 \mu\text{m}$ des pyroxènes cosmiques est plus large et permet donc de mieux reproduire les observations.

Un mélange de deux populations de grains poreux d'aluminosilicate et de pyroxène cosmique, contenant des inclusions d'oxyde de fer, constitue également un bon ajustement des observations. En effet, la présence d'aluminium dans les grains donne lieu à une absorption à $\sim 14 \mu\text{m}$ ($\sim 700 \text{ cm}^{-1}$) qui permet de reproduire la région entre les deux bandes (Figure 4.5). De meilleurs ajustements sont observés lorsque l'aluminium est incorporé dans la structure des silicates plutôt que sous la forme d'inclusions d'oxyde dans les grains de pyroxènes.

On remarque que la zone spectrale aux alentours de $16 \mu\text{m}$ ($\sim 600 \text{ cm}^{-1}$) est mal

reproduite par les modèles. C'est également le cas pour IRAS 19110 et IRAS 23151 (Figures 4.6 et 4.7). Cette zone correspond, dans les spectres ISO, à un changement de "bande", c'est-à-dire de détecteurs (Paragraphe 1.2.2). Or, il peut y avoir, d'une bande à l'autre, des variations de flux et il est alors délicat, lors de la réduction des données, de raccorder les bandes entre elles. Le désaccord entre les observations et les modèles observé à $\sim 16 \mu\text{m}$ dans les trois sources, est dû à un problème de raccordement des bandes ISO-SWS.

4.4.2 IRAS 19110+1045

Le mode d'élongation de la liaison Si-O des silicates dans IRAS 19110 est très semblable à celui de RAFGL7009S (même position et FWHM, une fois l'absorption des glaces soustraite). En revanche, le plateau entre les deux bandes à 9.6 et $18 \mu\text{m}$ ainsi que le mode de déformation à $18 \mu\text{m}$ sont différents dans les deux sources. Le plateau entre 12 et $16 \mu\text{m}$ est plus prononcé, et la bande à $18 \mu\text{m}$ est moins large dans IRAS 19110. Le rapport des bandes est $\tau_{9.6}/\tau_{18} \sim 2.2$, semblable à celui de RAFGL7009S.

Il est possible de trouver plusieurs ajustements au spectre de IRAS 19110 mais, afin de reproduire le plateau entre les deux bandes des silicates, la plupart contiennent trop d'aluminium par rapport aux abondances cosmiques. Le spectre est bien reproduit par deux modèles constitués chacun de deux populations de grains : la première comprenant, pour les deux modèles, des grains de "pyroxène cosmique" contenant 15% de vide et $\sim 3 \%$ de FeO, et la seconde constituée de grains d'aluminosilicate $\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$ pour le premier modèle et de $\text{Mg}_4\text{Fe}_4\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{27}$ contenant $\sim 15 \%$ de vide pour le second (Figure 4.6).

On remarque dans la Figure 4.6, en plus de la région à $\sim 16 \mu\text{m}$ discutée au paragraphe précédent, deux zones, aux longueurs d'onde inférieures à $\sim 8 \mu\text{m}$ et supérieures à $\sim 20 \mu\text{m}$, pour lesquelles l'accord entre les observations et les modèles n'est pas satisfaisant. Ceci est vraisemblablement dû à la détermination du continuum qui, comme on l'a vu au Paragraphe 4.2 induit une incertitude d'environ 10% sur le flux à ces longueurs d'onde. Il se pourrait également que, pour les courtes longueurs d'onde, le désaccord puisse s'expliquer par la présence dans la poussière d'une espèce non considérée dans les modèles. SiO_2 pourrait être candidat, mais son spectre présente, en plus d'une bande à $\sim 9.3 \mu\text{m}$, une bande à $\sim 22 \mu\text{m}$ (Morioka et al., 1998) et une modélisation détaillée est nécessaire afin de déterminer si cette

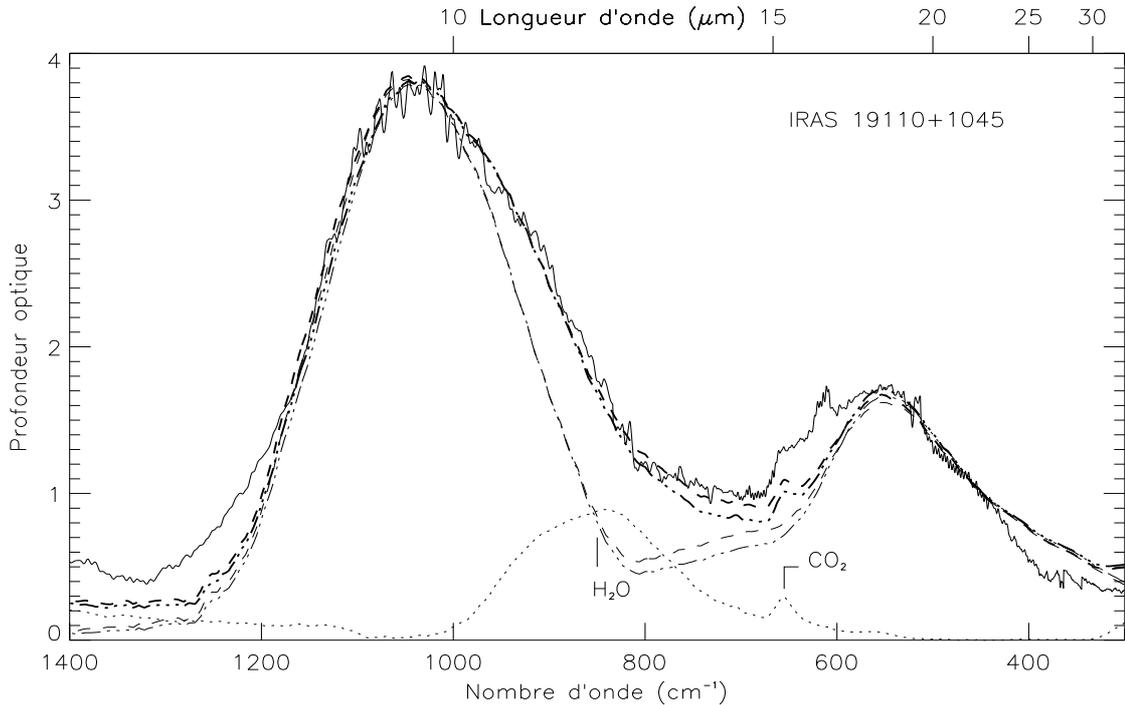


FIG. 4.6: Comparaison du spectre ISO-SWS de IRAS 19110+1045 (le continuum a été soustrait) avec des modèles de grains de silicates sphériques et poreux contenant des oxydes. Tirets longs : (modèle c) mélange de deux populations de grains, une de grains de pyroxène cosmique contenant 15 % de vide et 3 % de FeO et la seconde de grains d'aluminosilicate ($\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{15}$). Pointillés-tirets : (modèle d) mélange de deux populations de grains, une de grains de pyroxène cosmique contenant 15 % de vide et 3 % de FeO et la seconde de grains d'aluminosilicate ($\text{Mg}_4\text{Fe}_4\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{27}$) contenant 15 % de vide. Les lignes fines représentent les modèles des silicates et les lignes en gras ces mêmes modèles auxquels on a ajouté l'absorption des glaces. Pointillés : le spectre de glaces ajouté aux modèles des silicates.

espèce pourrait être présente dans la poussière.

4.4.3 IRAS 23151+5912

Dans IRAS 23151, le rapport des bandes des silicates est $\tau_{9.6}/\tau_{18} \sim 2.2$, identique à celui de RAFGL7009S et IRAS 19110. La bande à $9.6 \mu\text{m}$ est à la même position que dans les deux autres sources mais elle est plus large : sa FWHM est de $2.65 \mu\text{m}$, une fois l'absorption des glaces soustraite, à comparer à $2.35 \mu\text{m}$ pour les deux autres sources. D'autre part, le plateau à $12 - 16 \mu\text{m}$, entre les deux bandes, est moins

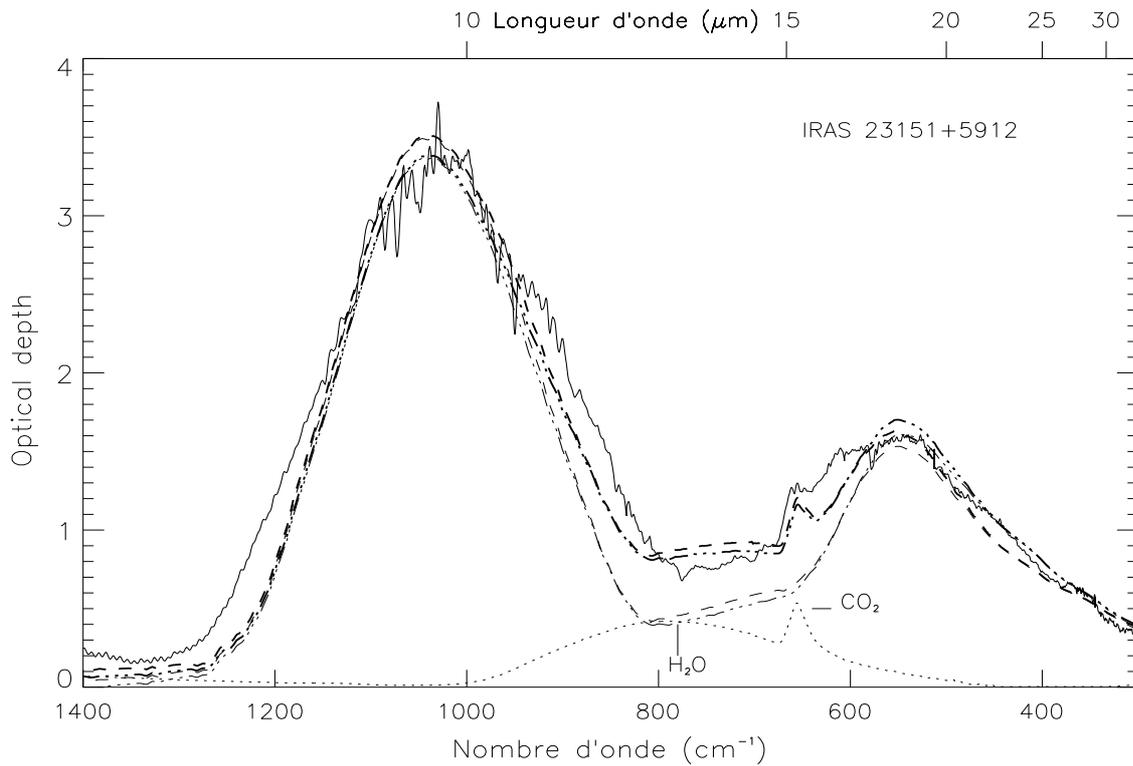


FIG. 4.7: Comparaison du spectre ISO-SWS de IRAS 23151+5912 (le continuum a été soustrait) avec des modèles de grains de silicates sphériques et poreux contenant des oxydes. Tirets longs : (modèle e) mélange de deux populations de grains, une de grains de pyroxène cosmique contenant 25 % de vide et 5 % de FeO et la seconde de grains d'aluminosilicate ($\text{Mg}_9\text{Fe}_9\text{Al}_2\text{Si}_{18}\text{O}_{57}$) contenant 10 % de vide et 5 % de FeO. Pointillés-tirets : (modèle f, idem modèle (d)) mélange de deux populations de grains, une de grains de pyroxène cosmique contenant 15 % de vide et 3 % de FeO et la seconde de grains d'aluminosilicate ($\text{Mg}_4\text{Fe}_4\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{27}$) contenant 15 % de vide. Les lignes fines représentent les modèles des silicates et les lignes en gras ces mêmes modèles auxquels on a ajouté l'absorption des glaces. Pointillés : le spectre de glaces ajouté aux modèles des silicates.

prononcé que dans les deux autres spectres et la largeur de la bande à $18 \mu\text{m}$ est comprise entre celle de RAFGL7009S et de IRAS 19110. Il faut toutefois noter que l'absence de spectre LWS introduit une incertitude plus grande sur la détermination du continuum que pour IRAS 19110 et RAFGL7009S. Or, ceci pourrait entraîner une sous-estimation de l'importance du plateau entre les deux bandes, ainsi que de la largeur de la bande à $18 \mu\text{m}$. La bande à $9.6 \mu\text{m}$ doit cependant moins souffrir de cette incertitude sur le continuum.

Du fait de la forte largeur de la bande à $9.6 \mu\text{m}$ dans IRAS 23151, il est difficile de trouver un bon ajustement à cette source. La largeur de la bande est augmentée

par l'adjonction d'inclusions d'oxydes et par l'augmentation de la porosité mais simultanément le rapport $\tau_{9.6}/\tau_{18}$ est réduit. Toutefois, si l'on considère que ce dernier est sous-estimé en raison des incertitudes sur le continuum, la contrainte est relâchée, et il est alors plus facile de reproduire le spectre.

Deux exemples d'ajustement sont montrés à la Figure 4.7. Il s'agit d'un mélange de grains de pyroxène cosmique contenant 25 % de vide et 5 % de FeO et de grains d'aluminosilicate ($\text{Mg}_9\text{Fe}_9\text{Al}_2\text{Si}_{18}\text{O}_{57}$) contenant 10 % de vide et 5 % de FeO. Le deuxième modèle est le même que celui employé pour l'un des deux ajustements de IRAS 19110 (voir Tableau 4.1). On observe qu'à courte longueur d'onde, l'aile de la bande à 9.6 μm est mal reproduite par les deux ajustements. Ce désaccord pourrait être dû à l'absorption d'une espèce non prise en compte dans le modèle, comme par exemple SiO_2 . Cependant, comme pour le cas de IRAS 19110, seule une modélisation détaillée pourrait permettre de conclure sur la présence de cette espèce dans la poussière autour de cette protoétoile.

4.5 Abondances élémentaires de la phase solide réfractaire

Afin de vérifier la validité des ajustements par rapport aux contraintes imposées par le respect des abondances cosmiques, on peut calculer l'abondance du silicium et des autres éléments contenus dans chaque modèle reproduisant les observations. La densité de colonne d'une espèce i est donnée par :

$$N_i = \frac{\int_{\nu_2}^{\nu_1} \tau_\nu d\nu}{\mathcal{A}_i} \quad (4.1)$$

où $\int_{\nu_2}^{\nu_1} \tau_\nu d\nu$ est l'intégrale de la profondeur optique d'une bande d'absorption de l'espèce i (ν est le nombre d'onde en cm^{-1}) et \mathcal{A}_x (cm^{-1}) est sa section efficace d'absorption intégrée. Cette dernière peut être calculée à partir des constantes optiques de l'espèce en question. Pour la bande à 9.6 μm des silicates on a par exemple :

$$\mathcal{A}_i = \int_{9.6\mu\text{m}} \frac{M}{\mathcal{N}} \kappa d\lambda = \int_{9.6\mu\text{m}} \frac{3Q_{abs}}{4a\rho} \frac{M}{\mathcal{N}} d\lambda \quad (4.2)$$

où \mathcal{N} est le nombre d'Avogadro, M la masse molaire de l'espèce i , ρ sa masse volumique, $\kappa = \frac{3Q_{abs}}{4a\rho}$ le coefficient d'absorption de masse (en g/cm^2) et Q_{abs} est l'efficacité d'absorption calculée à partir des indices optiques. Dans notre cas où les grains sont hétérogènes (contenant des inclusions et de la porosité), on définit les propriétés

Tableau 4.2: Abondance des éléments de la poussière réfractaire dans RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS 23151+5912.

	Composition de la poussière			Résultats des modèles					
	déduite des observations			RAFGL		IRAS		IRAS	
	de la phase gazeuse			7009S		19110		23151	
	(1a)	(1b)	(2)	a	b	c	d	e	f
Si/ 10^6 H	36	23	18.6	3-16	5-32	4	3.5		
Si	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fe	94	86	158	68	51	56	51	51	51
Mg	108	104	111	52	55	60	53	53	53
Al	$\sim 10^{(3)}$	$\sim 10^{(3)}$	$\sim 10^{(3)}$	13	0	17	10	8	10
O	1323	809	741	346	317	367	311	322	311
Ca	-	-	-	2	4	3	2	2	2

(1) : Savage & Sembach (1996) a : par rapport aux abondances solaires, b : par rapport aux abondances des étoiles B. (2) : Snow & Witt (1996). (3) : Mutschke et al. (1998). Voir le Tableau 4.1 pour la composition de la poussière des modèles (a) à (f).

moyennes d'un matériau fictif de densité $\rho_{mol} = \rho_{sil}f_{sil} + \rho_{oxydes}f_{oxydes}$ et de masse molaire $M = (1 - f_{vide} - f_{oxydes})M_{sil} + f_{oxydes}M_{oxydes}$, où f_i est la fraction volumique occupée par le vide ou les oxydes et ρ_i et M_i sont respectivement la densité et la masse molaire des silicates et des oxydes composant le grain.

La densité de colonne du silicium des modèles reproduisant les observations, calculée à l'aide de la méthode décrite ci-dessus, est $5.7-11.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ pour RAFGL7009S, $5.1-5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ pour IRAS 19110 et $5.1-9.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ pour IRAS 23151. L'incertitude élevée pour RAFGL7009S est due à la saturation de la bande à $9.6 \mu\text{m}$.

Connaissant la densité de colonne de l'hydrogène moléculaire dans RAFGL7009S et IRAS 19110, il est possible, pour ces deux sources de calculer le rapport Si/H afin d'évaluer si la quantité de silicium des modèles reproduisant les bandes des silicates est en accord avec les modèles d'abondance de la phase solide. La densité de colonne de H_2 dans IRAS 19110, déduite par la modélisation de sa distribution spectrale d'énergie, est $N_{\text{H}_2} \sim 7.0 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ (Hunter, 1997, Hunter et al., 1997). Le rapport atomique Si/H des meilleurs ajustements est donc de l'ordre de 4×10^{-6} , bien inférieur aux valeurs prédites quelles que soient les abondances de référence adoptées (Tableau 4.2).

La situation est plus confuse pour RAFGL7009S car la densité de H_2 est déterminée avec une plus grande incertitude : $N_{H_2} \sim 1.7 - 9.8 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ (McCutcheon et al., 1995). Le rapport Si/H est donc compris entre 3 et 32×10^{-6} . La limite supérieure est en accord avec les abondances cosmiques si l'on choisit pour référence les abondances solaires mais elle est trop élevée si on prend comme référence les abondances des étoiles B ou celles de Snow & Witt (1996). Cependant ce désaccord disparaît si l'on prend la moyenne des densités de H_2 données. Les modèles contiennent donc une quantité de silicium en accord avec les abondances de la phase solide présentées au Tableau 4.2.

Si on suppose que tout le silicium de la phase solide est sous forme de silicates, on peut comparer les abondances des autres éléments de la phase solide réfractaire à celle du silicium. On constate que, indépendamment des abondances de référence choisies, ces éléments (Mg, Fe, O, Al, Ca) respectent également les abondances cosmiques (Tableau 4.2). Le modèle (c) contient légèrement trop d'aluminium par rapport aux abondances de la phase solide et est, de ce point de vue moins satisfaisant que les autres. On note aussi que la poussière dans les modèles contient des quantités de fer et de magnésium plus faibles que ce qui est attendu pour la phase solide. Ceci suggère que ces éléments pourraient être présents sous une autre forme solide, sans transition observable dans l'infrarouge, comme par exemple des inclusions de fer métallique dans les grains.

4.6 Contraintes sur les abondances des silicates

Nous avons effectué, dans les trois protoétoiles, une étude détaillée de la composition des grains de silicates amorphes. Ceux-ci sont principalement constitués de pyroxènes et éventuellement d'aluminosilicates. Or les résultats du chapitre précédent montrent qu'à leur formation, les silicates sont essentiellement composés d'olivine et qu'une fraction de ces silicates est cristalline. Il est donc intéressant de déterminer la quantité de silicates cristallins et d'olivine amorphe qui pourraient être présents, autour des trois protoétoiles étudiées, tout en restant indétectables dans le spectre.

L'étude de la composition de la poussière silicatée des objets protostellaires, réalisée précédemment repose sur l'hypothèse que les grains dans ces objets sont suffisamment froids pour que l'on puisse négliger le transfert de rayonnement. Pour obtenir une information quantitative fiable, il est cependant préférable de tenir compte de la distribution de température des grains et donc de prendre en compte les effets

Tableau 4.3: Paramètres de la modélisation du transfert radiatif des trois protoétoiles RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS23151+5912.

	T_* (K)	T_{cav} (K)	β
RAFGL7009S	40000	600	1.4
IRAS 19110+1045	43000	600	0
IRAS23151+5912	43000	700	1.4

T_* est la température de l'étoile centrale, T_{cav} , la température de la cavité interne et β détermine la loi de densité de l'enveloppe de poussière ($\propto r^{-\beta}$). Pour RAFGL7009S, T_* et β sont en accord avec Dartois et al. (1998), pour IRAS 19110, T_* et β sont en accord avec Faison et al. (1998). Les valeurs de T_{cav} ont été déterminées de façon à ce que le flux observé aux courtes longueurs d'onde soit reproduit par les modèles.

du transfert de rayonnement. L'utilisation d'un programme de transfert radiatif pour modéliser les trois protoétoiles, qui nous permet de déterminer l'abondance relative des différentes composantes de la poussière, permet en outre de confirmer que l'approche utilisée au paragraphe précédent pour étudier la composition de la poussière est valide puisque les modèles de poussière déterminés permettent de reproduire correctement les spectres.

4.6.1 Modélisation du transfert radiatif

Le modèle utilisé pour l'étude des trois protoétoiles est le même que celui utilisé pour l'étude des étoiles OH/IR, voir le Paragraphe 3.3.2 pour la description de celui-ci. Dans ce paragraphe, nous présentons la modélisation des spectres réalisée en utilisant un des jeux de constantes optiques déterminées précédemment pour chacune des protoétoiles. Cette démarche nous permet de vérifier que ces constantes optiques, qui ont été déterminées en négligeant le transfert de rayonnement, permettent néanmoins de reproduire correctement les bandes des silicates des trois objets. Les paramètres du modèle sont la température de l'étoile centrale, T_* , la température de la cavité interne de l'enveloppe de poussière, T_{cav} , et la loi de densité de l'enveloppe de poussière ($\propto r^{-\beta}$) (Tableau 4.3).

La Figure 4.8 présente les résultats de la modélisation avec les paramètres indiqués au Tableau 4.3 pour chacune des sources, et les constantes optiques des modèles de silicates calculés précédemment (modèles (b), (c) et (f) pour, respectivement,

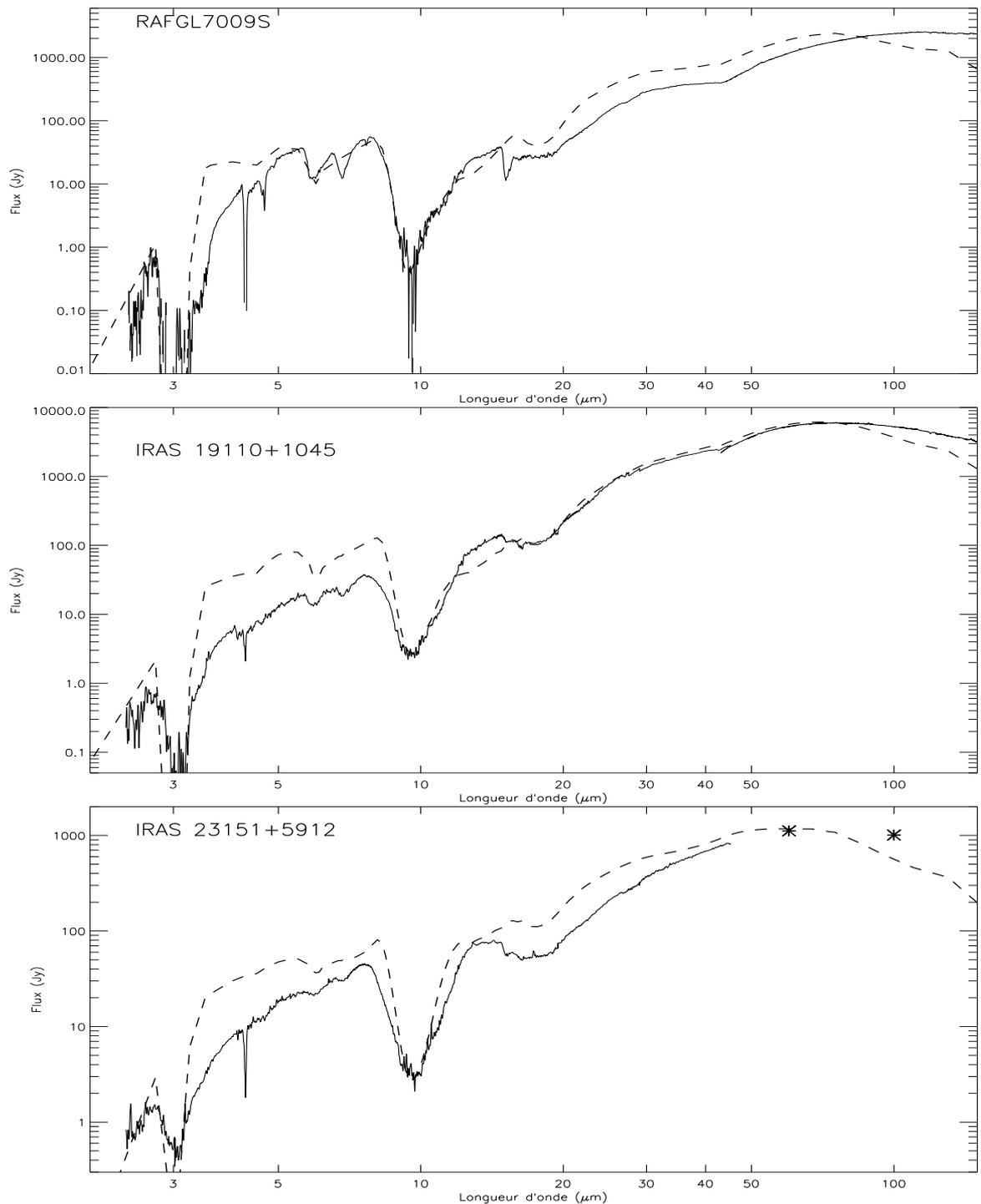


FIG. 4.8: Modélisation de la distribution spectrale d'énergie de RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS 23151+5912. Les constantes optiques utilisées pour la modélisation correspondent aux modèles du tableau 4.2 : (b) pour RAFGL7009S, (c) pour IRAS 19110 et (f) pour IRAS 23151. Tirets : résultats de la modélisation ; traits pleins : observations ISO, voir texte pour la comparaison des deux.

RAFGL7009S, IRAS 19110 et IRAS23151). Pour tenir compte de la composante de matière carbonée de la poussière interstellaire, environ 40 % de graphite (par rapport à la masse des silicates amorphes) ont été ajoutés aux silicates (les constantes optiques sont tirées de Draine & Lee (1984)). La comparaison des observations et des spectres modélisés montre que la forme des bandes des silicates est bien reproduite par le modèle. Il y a toutefois plusieurs zones de désaccords, notamment aux longueurs d'onde inférieures à $8 \mu\text{m}$ et supérieures $20 \mu\text{m}$.

Tout d'abord on constate que le problème du flux entre 3 et $8 \mu\text{m}$ rencontré pour les étoiles OH/IR se pose également pour les protoétoiles. Comme précédemment, ce problème pourrait être dû à la diffusion qui n'est pas prise en compte dans le calcul de transfert (Paragraphe 3.3.4). La diffusion est également en partie à l'origine de la mauvaise reproduction de l'aile rouge de la bande de la glace d'eau à $\sim 3 \mu\text{m}$. La forme de celle-ci est en effet due à la diffusion de la lumière par des grains de taille de l'ordre de $0.5 \mu\text{m}$ ainsi qu'à la possible présence d'autres molécules absorbantes dans les manteaux (Dartois & d'Hendecourt, 2000). Or, dans les modèles, les grains ont une taille unique de $0.1 \mu\text{m}$.

Ce problème de l'opacité entre 3 et $8 \mu\text{m}$ pourrait en partie expliquer la mauvaise reproduction de l'aile courte longueur d'onde du mode d'élongation des silicates dans IRAS 23151 et IRAS 19110. En effet pour RAFGL7009S il n'y a pas de problème entre 3 et $8 \mu\text{m}$ et l'aile bleue de la bande des silicates est bien reproduite. Cependant, la comparaison des bandes dans les trois sources montre que la forme de l'aile bleue du mode d'élongation est différente dans RAFGL7009S et dans les deux autres sources. Ceci a déjà été remarqué lors de l'étude qualitative (Paragraphe 4.4) et il est donc également possible que la mauvaise reproduction de la bande soit due à une composante de la poussière non prise en compte dans la modélisation.

La reproduction des spectres aux longueurs d'onde supérieures à $\sim 15 \mu\text{m}$ n'est pas satisfaisante : la forme des spectres est bien reproduite mais le flux des modèles est trop élevé. Il peut y avoir à cela plusieurs raisons. *(i)* : il est possible qu'un affinement des paramètres du modèle permette d'améliorer l'ajustement entre les spectres. *(ii)* : le problème pourrait aussi venir des constantes optiques déterminées au Paragraphe 4.4. En effet, dans la méthode décrite à ce paragraphe, une mauvaise détermination du continuum peut induire une sous-estimation de la profondeur de la bande à $18 \mu\text{m}$ et donc une détermination faussée de la composition de la poussière, c'est-à-dire de ses constantes optiques. Cette explication semble d'autant plus valable pour IRAS 23151 car l'incertitude sur la détermination du continuum est plus importante que pour

les deux autres sources. *(iii)* : ce problème pourrait également provenir de la façon dont sont modélisés les manteaux de glaces. En effet, dans le modèle, les efficacités d'extinction sont simplement additionnées. Or, on a vu que cette méthode entraînait une sous-estimation du flux dans l'aile grande longueur d'onde de la bande à $18 \mu\text{m}$ (Paragraphe 2.8.3, Figure 2.11). Il est donc possible que la modélisation des manteaux de glace avec des grains entourés d'un manteau permette de reproduire plus correctement les observations. *(iv)* : finalement, la forme des grains pourrait également expliquer le désaccord observé. En effet, adopter une distribution de formes de type CDE et non plus des grains sphériques aura pour effet d'élargir les deux bandes des silicates (Paragraphe 2.7) et pourrait donc améliorer la reproduction des bandes et de la région aux longueurs d'onde supérieures à $\sim 15 \mu\text{m}$.

La prise en compte du transfert de rayonnement, qui nécessite l'utilisation d'un modèle, dépend d'un certain nombre de paramètres intervenant dans la modélisation (température de l'étoile, de la cavité interne de la coquille de poussière, distribution de densité de la poussière, géométrie de la source). Ces paramètres s'ajoutent à ceux de l'étude de la composition de la poussière (taille, forme, hétérogénéité, porosité des grains). Du fait de l'augmentation du nombre de paramètres, la reproduction des spectres, obtenus en modélisant le transfert de rayonnement, paraît moins satisfaisante que lorsque l'on négligeait le transfert de rayonnement (Figures 4.8, 4.5, 4.6 et 4.7). D'autre part, l'augmentation du nombre de paramètres a aussi pour effet de relâcher les contraintes sur le choix de la forme des grains et des méthodes de modélisation des grains eux-mêmes (porosité, manteaux). En effet, on constate que les modifications introduites par chacun de ces paramètres restent compatibles avec, et pourraient même améliorer, l'accord entre les spectres modélisés en prenant en compte le transfert de rayonnement et les spectres observés. Or, ces modifications ne semblent pas compatibles au vu de l'accord entre les observations et les spectres modélisés en négligeant le transfert de rayonnement. Finalement, l'accord raisonnable entre les modèles et les observations confirme qu'il était bien justifié de négliger le transfert de rayonnement, et donc de réduire le nombre de paramètres libres, pour étudier la composition de la poussière.

4.6.2 Composante cristalline de la poussière

Aucune bande caractéristique des silicates cristallins n'est détectée dans les spectres des trois protoétoiles, que ce soit en émission ou en absorption. Afin d'établir une limite supérieure de la quantité de silicates cristallins présents dans la poussière au-

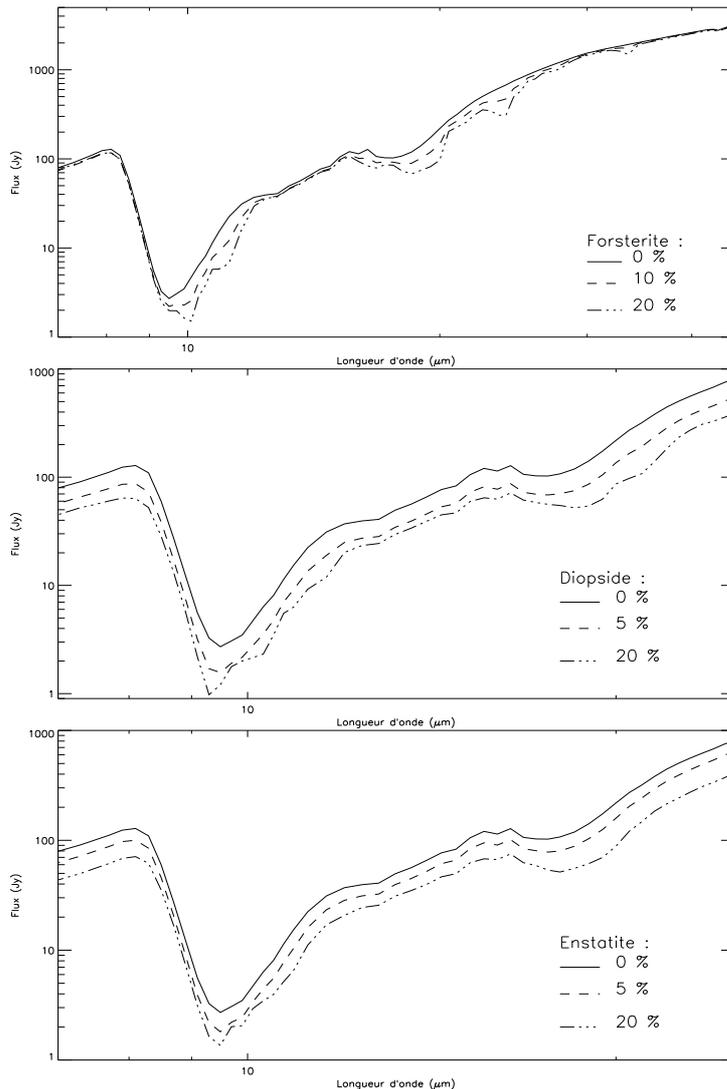


FIG. 4.9: Effet de la cristallinité de la poussière sur un spectre caractéristique des protoétoiles. Les paramètres du modèles sont ceux de IRAS 19110+1045. Pour le diopside et l'enstatite, les spectres ont été décalés par souci de clarté. La poussière autour des protoétoiles étant très froide, les bandes des espèces cristallines apparaissent dans les spectres en absorption entre 8 et 50 μm .

tour de ces trois objets, les espèces cristallines identifiées autour des étoiles évoluées (forstérite, enstatite et diopside) ont été ajoutées à la poussière dans les modèles présentés à la Figure 4.8.

La Figure 4.9 montre de quelle manière les bandes des silicates cristallins apparaissent dans les spectres modélisés de protoétoiles massives (les paramètres du modèle sont ceux de IRAS 19110). On remarque que dans ce type d'environnement toutes les bandes des silicates apparaissent dans les spectres en absorption, et non en émission comme c'est le cas dans les spectres des étoiles OH/IR, traduisant ainsi le fait que la poussière silicatée est plus froide autour des protoétoiles qu' autour des étoiles OH/IR. Les bandes de la forstérite sont plus contrastées que celle des pyroxènes (diopside et

enstatite), ce qui permet de la détecter dans les spectres pour des abondances plus faibles que pour les pyroxènes. La quantité de forstérite est contrainte par l'apparition des bandes à ~ 10.0 et $23.8 \mu\text{m}$. La quantité de pyroxènes (enstatite et diopside) est quant à elle contrainte par l'apparition de la bande à $\sim 9.3 - 9.6 \mu\text{m}$, présente dans les spectres des deux minéraux, et par le décalage du mode de déformation vers les grandes longueurs d'onde.

La comparaison des simulations avec les observations montre que la quantité maximale de silicates cristallins qui pourraient être présents dans les trois sources est de $\sim 7 \%$ de la masse totale des silicates pour IRAS 19110 et de $\sim 13 \%$ pour RAFGL7009S et IRAS 23151. Une quantité non négligeable de silicates cristallins pourrait donc être présente dans la poussière tout en restant indétectable. Ces quantités sont sensiblement supérieures aux estimations de $\sim 1 - 2 \%$ réalisées sans prendre en compte le transfert de rayonnement (Demyk et al., 1999). Ceci souligne donc la nécessité de modéliser le transfert de rayonnement pour déterminer les abondances relatives des différentes composantes de la poussière.

4.6.3 Composante d'olivine amorphe

L'étude des silicates menée pour les étoiles OH/IR nous a permis de montrer que les silicates amorphes y sont majoritairement composés d'olivine (à plus de 90 %). Les résultats de la modélisation des grains pour les trois protoétoiles montrent que les pyroxènes et les aluminosilicates donnent un meilleur ajustement des bandes des silicates amorphes. Nous avons donc entrepris de quantifier la proportion d'olivine amorphe de la poussière autour des trois protoétoiles. Pour ce faire, de l'olivine amorphe (MgFeSiO_4) a été ajoutée à la poussière dans le modèle.

La Figure 4.10 montre les résultats des modèles avec différentes quantités d'olivine amorphe. La présence de l'olivine se traduit par le décalage du mode d'élongation des silicates vers les grandes longueurs d'onde et la diminution du rapport $\tau_{9.6}/\tau_{18}$. Si la teneur en olivine est trop forte, le décalage de la bande à $9.6 \mu\text{m}$ est tel qu'il ne permet plus de reproduire les observations. On peut ainsi estimer que la quantité d'olivine présente dans la poussière autour des trois protoétoiles n'excède pas $\sim 20 \%$ de la masse des silicates amorphes.

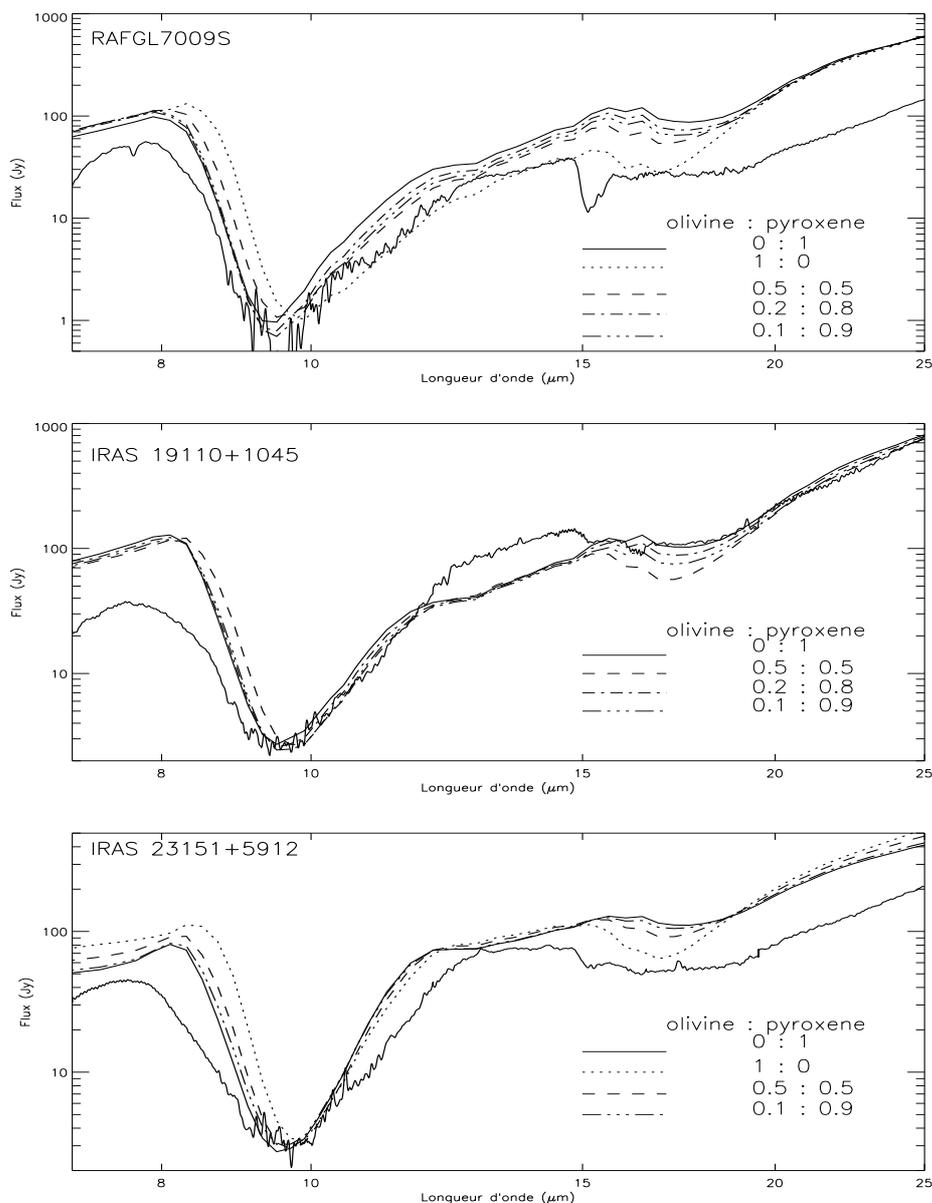


FIG. 4.10: Détermination de la quantité d'olivine amorphe présente dans la poussière autour des trois protoétoiles RAFGL7009S, IRAS 19110 et IRAS 23151. Les modèles contiennent différentes quantités d'olivine. Trait plein : meilleur ajustement pour chaque source (voir légende Figure 4.8). Quantités respectives d'olivine et de pyroxène amorphe : 1 - 0 (pointillés), 0.5 - 0.5 (tirets), 0.2 - 0.8 (tirets- triple pointillés), 0.1 - 0.9 (pointillés-tirets).

4.7 Conclusion

Dans un premier temps nous avons déterminé la composition de la poussière autour des trois protoétoiles RAFGL7009S, IRAS 19110+1045 et IRAS 23151+5912 en

modélisant les bandes des silicates à 9.6 et 18 μm et en faisant l'hypothèse que le transfert de rayonnement peut être négligé car les grains sont froids. Dans un deuxième temps, la distribution de température des grains a été prise en compte afin de déterminer quantitativement la proportion relative de différentes composantes des silicates (silicates cristallins, olivine amorphe) présents dans les sources.

La prise en compte du transfert de rayonnement montre que l'hypothèse, selon laquelle le transfert peut être négligé dans ces sources car les grains sont froids, est pertinente puisque les compositions qualitatives proposées pour chacune des sources ne sont pas remises en cause. D'autre part, l'utilisation du modèle de transfert, en augmentant le nombre de paramètres libres de la modélisation, relaxe les contraintes sur un certain nombre de paramètres de la modélisation de la poussière (forme des grains et méthode de modélisation des manteaux).

L'étude de la composition de la poussière montre que les bandes observées sont, dans les trois sources, le mieux reproduites par des grains de pyroxènes et d'aluminosilicates amorphes plutôt que par des grains d'olivine amorphe. La quantité d'olivine amorphe maximale pouvant être présente dans la poussière, estimée à l'aide du modèle de transfert, est de $\sim 20\%$ pour les trois protoétoiles. D'autre part, la grande largeur des bandes observée ne peut être reproduite qu'avec des grains poreux contenant des inclusions d'oxydes de fer (FeO). En particulier, la porosité des grains permet de reproduire la largeur du mode d'élongation à 9.6 μm et l'oxyde de fer, FeO, l'aile à grande longueur d'onde du mode de déformation à $\sim 18\ \mu\text{m}$. L'aluminium présent dans les aluminosilicates permet de reproduire le plateau entre ces deux bandes.

Dans ces trois sources protostellaires, les bandes des silicates sont parfaitement lisses et sans structure. D'autre part, les bandes à grandes longueurs d'onde caractéristiques des silicates cristallins ne sont pas détectées dans leurs spectres. **Les silicates dans ces trois sources sont donc principalement amorphes. La quantité maximale de silicates cristallins qui pourraient être présents dans les sources sans être détectables s'élèvent à $\sim 7\%$, par rapport à la masse totale des silicates, pour IRAS 19110 et $\sim 13\%$ pour IRAS 23151 et RAFGL7009S.** Ces résultats indiquent que la composition chimique et la structure des grains silicatés sont différentes dans les objets protostellaires et dans les étoiles évoluées, où ils sont formés (Chapitre 3).