

## PROJETS DE RECHERCHE

### **Théorie des Atmosphères Froides Stellaires et Substellaires: Étoiles évoluées, Étoiles de Faible Masse, Naines Brunes, et Planètes Extrasolaires.**

#### **Introduction**

La recherche d'objets substellaires au bas et en dessous de la séquence principale, connaît depuis peu un essor unique, avec la découverte et l'**identification de plusieurs naines brunes**, soit comme compagnons binaires (Gliese 229B), soit du champ (Kelu1, DENIS), et les découvertes successives de **nombreuses planètes extrasolaires** de dimensions joviennes par vélocimétrie radiale, dont la première fût 51 PegB. Les objets substellaires, naines brunes et planètes extrasolaires, existent donc bel et bien, et leur recherche ouvre un pan nouveau en astrophysique, avec des implications à diverses échelles: propriétés de la matière dans ces conditions de haute densité, formation d'objets de type stellaire versus type planétaire, contribution à la masse cachée dans la Galaxie. De nombreux projets observationnels sont actuellement en cours ou en préparation, soit sur Terre soit dans l'espace, qui permettront dans un avenir proche de découvrir nombre de ces objets. Des modèles d'atmosphère sont nécessaires à plusieurs titres. Tout d'abord du point de vue spectral et photométrique afin de caractériser les **propriétés atmosphériques observationnelles** et la composition chimique de ces objets; d'autre part pour être couplés aux modèles de structure interne afin d'en caractériser leurs propriétés intrinsèques. Ils sont donc le point de passage obligé pour faire le lien entre propriétés observationnelles (couleur, magnitude) et propriétés intrinsèques (température effective, masse, luminosité et âge).

La physique des atmosphères froides est rendue particulièrement difficile du fait d'une part de la présence de molécules ( $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $TiO$ ,  $VO$ ,  $CO$ , ...), d'où une distribution spectrale totalement différente de celle du corps noir, d'autre part du fait de la présence d'instabilités convectives en milieu transparent ( $\tau < 1$ ). Enfin, pour les objets les plus denses, naines-M, naines brunes, naines blanches, planètes géantes, dont la gravité de surface est telle que  $Log GM/R^2 \geq 5$ , les effets collisionnels dans l'atmosphère ajoutent un degré de complexité supplémentaire dans les calculs au niveau d'une part de l'équation d'état, et donc de l'équilibre chimique, d'autre part au niveau des opacités proprement dites du fait de l'élargissement des raies spectrales et de l'importance accrue de nouvelles sources d'opacité dues, par exemple, aux effets de dipôles induits. Enfin, la genèse et la présence de **grains dans leurs atmosphères** doivent être prises en compte car elles affectent de façon significative la signature spectrale et photométrique des objets à la limite de la séquence principale et des objets substellaires ( $T_{eff} < 2000K$ ).

J'ai développé, au cours de mes recherches, les outils théoriques et numériques permettant de calculer les propriétés atmosphériques des objets froids sus-cités. Ces calculs s'appliquent également à l'étude d'autres objets astrophysiques tels les **étoiles géantes rouges**, les **étoiles jeunes**, le **milieu interstellaire et interplanétaire** (en particulier au niveau des opacités des molécules et des grains), et les phases d'expansion de la matière ejectée par les **novae**.

## Les Projets de Recherches

À mesure que des objets de plus en plus froids sont découverts, leur nature et propriétés physiques deviennent de plus en plus difficile à déterminer sur la base de méthodes empiriques. Leur atmosphère est le site de **recombinaison moléculaire** et de **formation de grains de poussière** encore jamais rencontré dans les photosphères stellaires. Pour le soutien et l'interprétation de ces nouvelles découvertes, il est donc primordial de développer des modèles d'atmosphère d'objets froids qui incluent ces processus chimiques et physiques. Mon programme de recherche se concentre donc autour des grands axes suivants:

### ★★★Physique des Atmosphères Froides★★★

1. L'amélioration des **opacités pour atmosphères froides** ( $T_{\text{eff}} < 5000\text{K}$ ), notamment des molécules et des grains, le traitement hors-ETL des atomes, ions et molécules, ainsi que l'inclusion des effets non-idéaux sur l'équilibre chimique.

### ★★★Applications Astrophysiques★★★

2. La **modélisation des propriétés spectrales et photométriques des étoiles faibles masses**, c.-à-d.  $0.6 M_{\odot} \geq M \geq 0.075 M_{\odot}$ , dans le but d'établir l'échelle de température, de corrections bolométriques, et la fonction de luminosité du bas de la séquence principale, tant du disque que du halo galactique, c.-à-d. pour des populations stellaires avec métallicité variant de  $+0.3 \geq [M/H] \geq -4.0$ .

3. La modélisation des **propriétés spectrales et photométriques et de l'évolution des naines brunes** dans le but de guider 1) la détermination de la nature stellaire ou substellaire des objets définissant la limite observationnelle de la séquence principale des amas stellaires jeunes et globulaires, ainsi que du disque et du halo galactique, et 2) la recherche de naines brunes froides et évoluées par les méthodes observationnelles actuelles et planifiées.

4. La modélisation des **propriétés spectrales et photométriques intrinsèques aux planètes extrasolaires** récemment découvertes dans le but de déterminer leur spectre émis (intrinsèque) et réfléchi (albédo) en fonction de la distribution et de la nature de la couverture nuageuse dans leur atmosphère, ainsi que du type spectral et de la position de l'étoile parente.

5. La modélisation des **propriétés spectrales et photométriques des étoiles géantes rouges** (de la phase AGB à celle des étoiles carbonées). L'étude des effets hors-ETL sur la formation des bandes de TiO, ainsi que du rôle de la formation de grains de poussière à la base de leurs chromosphères.

Dans les sections numérotées suivantes, je donnerai en un bref résumé la description de chacun de ces cinq grands axes de recherche.

## Les Outils Numériques

Depuis l'obtention de mon diplôme de doctorat en 1990, j'ai construit un code de transfert radiatif pour le calcul d'atmosphères stellaires. Ce code nommé **Phoenix**, a acquis depuis une réputation internationale pour sa polyvalence à modéliser adéquatement les spectres d'objets astronomiques aussi variés que des *novae*, des *supernovae*, des *étoiles massives chaudes*, des *étoiles géantes rouges* (AGB et carbonées), des *étoiles T Tauris*, des *étoiles de faible masse*, ainsi que des *naines brunes* jeunes et évoluées. D'intérêt particulier pour les atmosphères froides, **Phoenix** résoud **l'équation de transfert radiatif en géométrie sphérique**, une **irradiation incidente par un compagnon** plus chaud, et permet même une **expansion radiale relativiste** du milieu radiatif (Hauschildt, Baron & Allard 1997). Les *effets de la convection sur le profil atmosphérique* y sont inclus par la théorie de la longueur de mélange (MLT). De plus, les atomes de l'hydrogène au fer y sont traités hors-ETL (équilibre thermodynamique local). L'équilibre thermochimique y est résolu pour plus de 600 atomes, ions et molécules dans la phase gazeuse, et 1000 espèces de condensés liquides et cristallins. **Phoenix** bénéficie aussi d'une banque d'opacités continues, atomiques, et moléculaires des plus complètes au monde. C'est ainsi que **Phoenix** constitue aujourd'hui un outil de choix pour l'étude des atmosphères des planètes extrasolaires, telle 51 PegB, pour lesquelles une **confirmation directe de leur existence et de leur aptitude à soutenir la vie devra passer par une mesure monochromatique de leurs émissions spectrales** (projet DARWIN, ESA, 2005).

### ★★★Physique des Atmosphères Froides★★★

#### 1. Opacités de Faible Température

L'étude du transfert radiatif dans la matière est un des problèmes fondamentaux de l'astrophysique. Ses applications s'étendent à l'étude de la structure et de l'évolution stellaire, l'interprétation de spectres stellaires, des processus physiques et composantes du milieu interstellaire, ainsi que de la formation stellaire et planétaire, pour n'en nommer que quelques unes. Dès que l'énergie est transportée par processus radiatifs, l'opacité du milieu est requise pour calculer la structure thermique du matériel. C'est ainsi que la compréhension de phénomènes astrophysiques est souvent liée à une meilleure détermination des opacités.

Au cours des 30 dernières années, les chercheurs du Los Alamos Laboratory ont assemblé des opacités requises pour les modèles stellaires (voir e.g. Cox & Stewart 1965, Cox & Tabor 1976, et Weiss, Keady, & Magee 1990). Plus récemment, Rogers & Iglesias (1992) et Seaton et al. (1994) ont revu en profondeur le calcul d'opacités. Cependant, tout ces projets n'adressent que les conditions prévalant dans les *enveloppes et intérieurs stellaires*. Aucun n'englobe les conditions du gaz rencontrées dans les *atmosphères d'étoiles froides (naines et géantes), de planètes, ou dans les milieux de formation stellaire*. Le calcul d'opacités à des températures inférieures à 5000K est compliqué par la **formation de molécules** et les myriades de raies spectrales qu'elles possèdent. À des températures inférieures à 1700K, l'équilibre chimique et les processus d'absorption complexes des **grains** doivent aussi être inclus.

C'est ce domaine de conditions qui forme le coeur du projet que je mène depuis un an en collaboration avec David R. Alexander (WSU). À la riche banque d'opacités moléculaires que j'avais déjà assemblée (Allard et al. 1990, 1992, 1994) pour modéliser les atmosphères stellaires de **mélanges riches en oxygène** (e.g. TiO, H<sub>2</sub>O, OH, CO), s'ajoutent donc maintenant les opacités moléculaires assemblées par Alexander & Ferguson (1994) pour la modélisation d'**étoiles géantes rouges enrichies en carbone** (e.g. ZrO, YO, CN, C<sub>2</sub>, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). Alexander & Ferguson (1994) ont aussi exploré l'effet des opacités des grains aux basses températures. Leur calcul est cependant limité aux gaz froids de faibles densités, et reste inapplicable aux conditions prévalant dans les atmosphères plus denses des étoiles de faibles masses, et des naines brunes jeunes. J'ai donc récemment entrepris d'étendre mon code d'équation d'état pour permettre le calcul d'**équilibre de grains liquides et cristallins dans un milieu moléculaire gazeux** (Allard 1997, Allard, Alexander, Tamanai, & Hauschildt 1997). La sortie prochaine, en 1998, d'une nouvelle table de constantes thermochimiques JANAF (Joint Army Navy Air Force), émise par le National Bureau of Standards américain, nous permettra de *repréciser l'équilibre chimique moléculaire et des grains pour la première fois depuis 1986*. Parallèlement, j'assemble les profils d'absorption de grains se formant dans ces conditions, tels le corundum Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et le pérovskite CaTiO<sub>3</sub> à partir des constantes diélectriques des cristaux, publiées dans la littérature scientifique (Allard, Alexander, Tamanai, & Hauschildt 1997). Je projète également d'étendre ces calculs de condensation et d'opacité sous le point de congélation de l'eau afin de permettre la modélisation des **atmosphères et des milieux de formation planétaire**.

### ★★★Applications Astrophysiques★★★

## 2. Étoiles de Faible Masse

Les étoiles de masses inférieures à 0.6 M<sub>☉</sub>, c.-à-d. naines rouges ou M, sont les plus nombreuses mais aussi les moins bien comprises. Aucun des modèles classiques d'évolution, basés sur des atmosphères grises, n'a pu reproduire leur positions dans les diagrammes couleur-magnitude observés, et l'échelle de températures des étoiles du bas de la séquence principale demeure affectée d'incertitudes de plus de 200K. Il est donc déterminant pour une dérivation adéquate de la fonction de luminosité, et donc la fonction de masse initiale du disque galactique, de pouvoir résoudre ces incertitudes sur les paramètres stellaires et atmosphériques des étoiles de faible masse.

Ceci tient à la complexité de leurs atmosphères dans lesquelles prédominent les **opacités moléculaires** de H<sub>2</sub>, TiO, H<sub>2</sub>O, et CO qui définissent entièrement par des myriades de raies d'absorption le spectre de ces objets, ne laissant aucune fenêtre sur le continu. Elles sont également dominées par un **transfert convectif** qui peut rester efficace jusque dans les couches externes et optiquement minces de la photosphère ( $\tau_{1.2\mu\text{m}} \approx 10^{-3}$ ). Ces éléments combinés donnent à la photosphère un rôle accru de régulateur thermique de la structure interne de l'étoile qui *ne saurait être approximé par une atmosphère grise traditionnelle pendant les calculs d'évolution stellaire*. De plus, l'usage d'un simple corps noir pour dériver la température atmosphérique des objets observés à partir de leurs couleurs, devient inapplicable. Des modèles d'atmosphères traitant correctement cette physique sont donc nécessaires à la fois pour placer les étoiles observées dans le diagramme H.-R., et donc permettre une comparaison aux modèles

d'intérieur et d'évolution, et pour fournir des *conditions de surface correctes à ces derniers*.

Depuis mon doctorat en 1990, j'ai construit plusieurs grilles de modèles d'atmosphères d'étoiles de faible masse caractéristiques de plusieurs types de populations stellaires c.-à-d. pour des métallicités variant de  $[M/H] = +0.3$  à  $-4.0$  (Allard & Hauschildt 1995, Allard & Hauschildt 1997). Ce travail m'a amené à rédiger une revue générale des progrès récents effectués dans ce domaine (Allard, Hauschildt, Alexander, & Ferguson, ARA&A 1997). Ces grilles de modèles ont permis d'une part l'amélioration de l'**échelle de température des naines rouges du disque** (Kirkpatrick et al. 1993, Leggett et al. 1996, Leggett, Allard, & Hauschildt 1997). D'autres part, elles ont permis le calcul d'une toute *nouvelle génération de modèles d'intérieur et d'évolution stellaire* qui réussissent pour la première fois à **reproduire les séquences principales d'amas stellaires jusqu'à la masse minimum du brûlage de l'hydrogène** (Baraffe et al. 1995, Baraffe et al. 1997, 1998). Ces modèles, qui reproduisent correctement les propriétés photométriques des étoiles observées, fournissent aujourd'hui une fonction de luminosité et de masse adoptée internationalement (Chabrier & Méra, 1997).

Malgré ces progrès, les observations des naines rouges riches en métaux du disque galactique ne sont toujours pas reproduites correctement. Ceci est dû surtout à des bandes d'absorption manquantes dans certaines régions spectrales telles la bande passante **V** centrée à  $0.55 \mu\text{m}$ , et la bande **H** à  $1.6 \mu\text{m}$ . Les opacités des grains commencent aussi à affecter les propriétés spectrales et photométriques des naines rouges plus tardives que M6, et doivent donc être incluses dans les modèles (Tsuji et al. 1996, Allard et al. 1996, Allard 1997). *L'inclusion adéquate des effets de la formation de grains et de leurs opacités, ainsi que la recherche d'opacités moléculaires manquantes feront donc l'objet de mes projets en ce domaine.*

### 3. Naines Brunes Jeunes et Évoluées

Un recensement exact du nombre de naines brunes (objets substellaires de masse inférieure à  $0.075 M_{\odot}$ ) est essentiel pour comprendre comment étoiles et planètes se forment, et déterminer le contenu massique de la galaxie. Cependant les naines brunes sont des proies évasives. Lorsqu'elles sont jeunes et encore lumineuses, elles peuvent être aussi chaudes que des étoiles de faible masse ( $T_{\text{eff}} \approx 3000\text{K}$ ). Les naines brunes jeunes du disque sont donc difficiles à distinguer puisqu'on ne connaît pas leur distance, donc leur âge. D'autre part, les naines brunes évoluées sont plus froides que la moins massive des étoiles, donc plus facilement identifiables, mais leur faible luminosité intrinsèque ( $L < 10^{-4} L_{\odot}$ ) les rend difficilement détectables. **L'étude des propriétés spectrales des naines brunes fournit alors des indices essentiels à l'identification et la détection de naines brunes.**

#### Les naines brunes jeunes

La seule distinction que puisse offrir une naine brune jeune comparée à une étoile de faible masse de même température est bien sûr sa masse. L'une des conséquences sur l'atmosphère en est une de gravité de surface plus faible. L'autre concerne le brûlage efficace du réservoir d'éléments légers tel le lithium et le béryllium dans les étoiles de faible masse pleinement convectives, alors que les naines brunes, plus froides, ne brûlent pas ces éléments. Dans les deux cas, des modèles

d'atmosphères qui puissent adéquatement reproduire les spectres substellaires sont requis pour **identifier les effets de la gravité** et **mesurer les abondances de lithium détectées** récemment chez plusieurs naines brunes des Pléiades et du disque galactique (Ruiz, Leggett & Allard 1997, Basri et al. 1997 avec DENIS). Ces objets sont également affectés par la **formation de grains**, de leurs opacités, et par les opacités manquantes mentionnées précédemment. Alors que les modèles sans grains n'ont montré, par le passé, qu'une sensibilité négligeable à la gravité (Allard & Hauschildt 1995, Jones et al. 1995, 1996, Schweitzer et al. 1997), la présence de grains pourrait changer ce résultat et permettre d'expliquer les *différences systématiques qui commencent à apparaître dans l'étude observationnelle des naines brunes des Pléiades et du disque* (Rebolo et al. 1996). Une fois le spectre des naines rouges et brunes reproduit, il sera possible de déterminer précisément avec *Phoenix* la gravité et l'abondance de lithium en tenant compte des effets hors ETL, et donc la masse des naines brunes détectées dans le disque et dans les Pléiades. Depuis les tout débuts du projet, j'ai établi une solide collaboration avec l'équipe DENIS (Forveille & Delfosse à Grenoble) qui amena à un *choix judicieux des filtres pour le survey qui soient idéalement sensibles à l'identification des naines brunes du champ*. Nous projetons prochainement l'analyse spectrale des candidates observées, tant dans l'**optique** avec la mesure d'abondance en lithium, que dans l'**infrarouge** pour la recherche de méthane et de profils d'absorption des grains avec ISO.

### **Naines brunes évoluées**

Il n'existe qu'une seule naine brune de ce type, c.-à-d. ni jeune, ni massive, qui soit connue à ce jour. Il s'agit de Gliese 229B, le compagnon d'une naine rouge M0, découverte lors d'un "survey" coronographique des étoiles du voisinage solaire (Oppenheimer et al. 1995, Nakajima et al. 1995, Allard 1995). Une étude spectrale à partir de mes modèles permis pour la première fois une détermination préliminaire de sa température (900–1000K), et de contraindre sa masse ( $<50 M_{\text{Jup}}$ ) (Allard et al. 1996). Cette étude fut corroborée ultérieurement par des études indépendantes (Tsuji et al. 1996, Marley et al. 1996). Le spectre optique de Gliese 229B, récemment obtenu avec STIS/HST (Schultz et al. 1997), pourrait révéler la présence de grains en suspension dans la photosphère, contrairement aux conclusions jusqu'alors adoptées par Marley et al. (1996). Une prédiction des propriétés spectrales et photométriques des naines brunes froides qui pourraient orienter la recherche de ces objets, devra donc tenir compte des **effets de condensation et de sédimentation des grains**. J'ai également caractérisé les signatures photométriques des naines brunes, *prédites* comme étant très bleues (J-K < 0.0) dans les bandes infrarouges (Allard et al. 1996, Baraffe et al. 1997). Ces prédictions viennent d'être vérifiées avec succès par les observations de Pulone et al. (1997) avec la caméra NICMOS de HST.

#### 4. Les Planètes Extrasolaires

Les planètes géantes se distinguent des naines brunes par plusieurs critères: (1) la présence d'un coeur de roche, (2) une sous-abondance d'éléments lourds dans l'atmosphère, (3) la présence d'un système multiple avec des objets ayant des orbites co-planaires circulaires. Le terme "planète" s'applique donc aux objets ayant une masse de moins de 10 à 20  $M_{Jup}$ . La découverte récente de planètes géantes extrasolaires en orbite autour de 70 Vir, (Marcy & Butler 1996) et 47 U Ma (Butler & Marcy 1996) marquent, avec la découverte antérieure de 51 PegB par Mayor & Quéloz (1995), un point tournant dans la recherche de systèmes planétaires autres que le nôtre. Pour la première fois dans l'histoire, des planètes étaient découvertes en orbite autour d'étoiles normales! Leurs masses et rayons orbitaux sont estimés de 0.5  $M_{Jup}$  (51 PegB) à 9  $M_{Jup}$  (70 VirB), et 0.05 AU (51 PegB) à environ 2 AU (47 U Ma B) et suggèrent que les planètes géantes peuvent exister en grandes variétés.

La controverse récente soulevée par Gray et al. (*Nature* **385**, 1997) au sujet d'une variabilité intrinsèque de 51 Peg ne fait que souligner l'importance d'une éventuelle détection directe de la lumière émise et réfléchiée par les planètes elles-mêmes. C'est ainsi que l'Agence Spatiale Européenne a fait de son projet prioritaire pour 2005 celui de construire un interféromètre spatial (DARWIN) destiné à la **recherche et l'étude monochromatique de planètes extrasolaires et autres objets substellaires**. Ceci souligne l'importance de modèles d'atmosphères non-gris qui permettent la **détermination des propriétés spectrales, des paramètres atmosphériques, et des corrections bolométriques des planètes extrasolaires**. Avec la banque d'opacité décrite en section 1, mes modèles seront idéalement préparés à l'étude des atmosphères de planètes extrasolaires. Par exemple, les *couches nuageuses (grains) et leur impact sur le spectre d'albédo sera un aspect essentiel de la détection des planètes extrasolaires*. J'ai l'intention de calculer des modèles d'atmosphères et spectres synthétiques de planètes géantes qui incluent les effets de condensation, de sédimentation, de stratification des abondances, de formation de nuages, et d'irradiance par l'étoile mère de façon consistante. Ces modèles s'étendront du régime des naines brunes (section 3) au régime des planètes joviennes de notre système solaire, et permettront d'améliorer les conditions de surface des modèles d'intérieur et d'évolution et leur fonction de luminosité théorique, et aider à déterminer les processus de formation stellaires et planétaires.

#### 5. Étoiles Géantes Rouges: des AGB aux étoiles carbonées

Les étoiles géantes rouges sont caractérisées par des températures effectives comparables à celles des naines rouges mentionnées aux sections précédentes. Elles sont cependant beaucoup plus étendues, leur rayon étant supérieur à quelques dizaines de rayons solaires, et sont dans une phase avancée de leur évolution suivant la phase de combustion centrale de l'hydrogène. Leur intérêt est multiple que ce soit sur le plan galactique ou stellaire. Leur luminosité extrêmement élevée leur confère un rôle important dans l'étude des populations galactiques et extragalactiques. Elles sont en effet souvent utilisées comme traceur de métallicité grâce à l'analyse de leur composition chimique par le biais d'observations spectroscopiques. D'autre part, les géantes rouges sont le siège de processus nucléosynthétiques importants ainsi que de phénomènes de perte de masse

significative, contribuant ainsi à l'enrichissement du milieu interstellaire et à l'évolution chimique galactique.

L'étude des géantes rouges et leur implication au niveau galactique nécessite des **modèles d'atmosphère et spectres synthétiques** précis permettant la détermination de leur **propriétés thermiques et leur composition chimique**. Le travail énorme d'archivage de près de 70 million de raies atomiques et moléculaires que j'ai effectué pour la modélisation des atmosphères de naines m'a permis d'étendre facilement cette tâche aux domaines des géantes. Nous sommes en train, en collaboration avec David R. Alexander (WSU), de construire une **grille de modèles de température effective comprise entre 2000 et 4000K, et de gravité  $\log g = -1$  à  $+3$ , en tenant compte d'une variation du rapport carbone sur oxygène C/O**. Ce dernier paramètre est essentiel pour étudier de façon précise la transition des étoiles riches en oxygène vers une composition riche en carbone. Cette grille de modèles permettra donc de couvrir les phases d'évolution d'étoiles sur la branche des géantes rouges, comprenant la branche asymptotique des géantes (AGB) qui caractérise l'évolution d'étoiles de masses intermédiaires après la combustion complète de l'hélium central.

Des calculs préliminaires nous ont déjà permis de comparer nos modèles de géantes rouges à une séquence spectrale d'étoiles observées ainsi qu'à des modèles d'autres sources tels ATLAS12. Ces résultats sont très positifs et révèlent la fiabilité de notre code Phoenix à reproduire les objets froids de toutes densités, et seront publiés prochainement. Les modèles peuvent y être construits dans l'approximation plan parallèle mais également en **géométrie sphérique**, ce dernier effet devenant important dans le cas des luminosités les plus élevées de la phase AGB. Nous avons aussi étudié avec *Phoenix* les **effets hors-ETL du titane** (Hauschildt, Allard, Alexander & Baron, 1997) qui pourraient affecter l'abondance photosphérique de TiO sur lequel se base l'estimation des paramètres de ces étoiles. Nos études se poursuivent à ce sujet avec l'inclusion prochaine d'un modèle hors-ETL de la molécule TiO elle-même (Schweitzer, MPIA), ainsi que de la **formation de gains atmosphériques**. De plus je considère actuellement, dans le cadre d'une implantation au CRAL, une collaboration avec l'équipe de Renaud Foy (CRAL) qui est à la recherche de modèles théoriques permettant d'interpréter ses observations de haute résolution angulaire **d'objets de type Mira** dans la phase AGB. Une vaste grille de modèles et spectres synthétiques telle que nous le projetons n'existe pas encore dans la littérature et permettra, d'une part, d'affiner les calibrations  $T_{\text{eff}}$ -couleur pour les étoiles des nuages de Magellan et du champ; d'autre part, ils permettront un couplage de la structure interne et des atmosphères afin d'obtenir une évolution cohérente dans la phase géante rouge (incluant la phase AGB), comme nous l'avons fait dans le cas des étoiles naines rouges (Baraffe et al. 1995, 1997, 1998).

**En Résumé**

Je projète, au cours des années à venir:

1. L'amélioration des **opacités pour atmosphères froides** ( $T_{\text{eff}} < 5000\text{K}$ ), notamment des **molécules** et des **grains**, le traitement hors-ETL des atomes, ions et molécules, ainsi que l'inclusion des effets non-idéaux sur l'équilibre chimique.
2. La **modélisation des propriétés spectrales et photométriques des étoiles de faibles masses**, c.-à-d.  $0.6 M_{\odot} \geq M \geq 0.075 M_{\odot}$ , dans le but d'établir l'échelle de température, de corrections bolométriques, et la fonction de luminosité du bas de la séquence principale, tant du disque que du halo galactique, c.-à-d. pour des populations stellaires avec métallicité variant de  $+0.3 \geq [M/H] \geq -4.0$ .
3. La modélisation des **propriétés spectrales et photométriques et de l'évolution des naines brunes** dans le but de guider 1) la détermination de la nature stellaire ou substellaire des objets définissant la limite observationnelle de la séquence principale des amas stellaires jeunes et globulaires, ainsi que du disque et du halo galactique, et 2) la recherche de naines brunes froides et évoluées par les méthodes observationnelles actuelles et planifiées.
4. La modélisation des **propriétés spectrales et photométriques intrinsèques aux planètes extrasolaires** récemment découvertes dans le but de déterminer leur spectre émis (intrinsèque) et réfléchi (albédo) en fonction de la distribution et de la nature de la couverture nuageuse dans leur atmosphère, ainsi que du type spectral et de la position de l'étoile parente.
5. La modélisation des **propriétés spectrales et photométriques des étoiles géantes rouges** (de la phase AGB à celle des étoiles carbonées) ainsi que des **étoiles jeunes** (TTauris) et **protoétoiles**. L'étude des effets hors-ETL sur la formation des bandes de TiO, ainsi que du rôle de la formation de grains de poussière dans leurs atmosphères.

Ces projets et ceux que je mène en parallèle sur les objets chauds (Novae, Dwarf Novae, Supernovae, Wolf Rayet, étoiles O-A, etc.) avec P.H. Hauschildt, sauront assurer la pleine exploitation et le développement de nos calculs, ainsi que l'avancement de nos connaissances des **atmosphères stellaires et substellaires** et de l'**évolution chimique galactique**.

<b>Références</b>
-------------------

- Alexander, D.R. & Ferguson, J.W., 1994, *ApJ* **437**, 879.
- Allard, F., 1990, *Ph.D. dissertation*, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Allard, F., 1995, *Brown Dwarfs: A Very Cool Customer*, *Nature* **378**, 441.
- Allard, F., 1996, *Model Atmospheres: Brown Dwarfs from the Stellar Perspective*, in *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*, (ed) Rebolo, *PASP Conference Series*, in press.
- Allard, F. 1997, *Model Atmospheres of Very Low Mass Stars and Brown Dwarfs*, in *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, (ed) A. Dupree, *PASP Conference Series*, in press.
- Allard, F., Alexander, D.R., et al., 1996, Photospheric Dust Grain Formation in Brown Dwarfs, in *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*, (ed) R. Rebolo, *PASP Conference Series*, in press.
- Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1994, *Rosseland Mean Opacities for Low Temperatures*, in *Newsletter on Analysis of Astronomical Spectra*, (ed) C.S. Jeffery, p.9.
- Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1995, *ApJ* **445**, 433.
- Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1997, *ApJ*, submitted.
- Allard, F., Hauschildt, P.H., Alexander, D.R., & Starrfield, S., 1997, *A&A Rev.* **35**, 137.
- Allard, F., Hauschildt, P.H., Baraffe, I., & Hauschildt, P.H., 1996, *ApJ* **465**, L123.
- Allard, F., Hauschildt, P.H., Miller, S., & Tennyson, J., 1994, *ApJ* **426**, L39.
- Allard, F., Scholz, M., & Wehrse, R., 1992, *Rev. Mexicana Astron. Astrof.* **23**, 643.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1995, *ApJ* **466**, L35.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1997, *A&A* **327**, 1054.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1998, *A&A*, in press.
- Basri, G., Martín, E., Ruiz, M., Delfosse, X., Forveille, T, Epchtein, 1997, *ApJ*, submitted.
- Cox, A.N., & Stewart, J.N., 1965, *ApJS* **19**, 243.
- Cox, A.N., & Tabor, J.E., 1976, *ApJS* **31**, 271.
- Hauschildt, P.H., Allard, F., Alexander, D.R., & Baron, E., 1997, *ApJ* **488**, 428.
- Hauschildt, P.H., Baron, E., & Allard, F., 1997, *ApJ* **483**, 390.
- Jones, H.R.A., Longmore, A.J., Allard, F., & Hauschildt, P.H., 1996, *MNRAS* **280**, 77.
- Jones, H.R.A., Longmore, A.J., Hauschildt, P.H., Allard, F., Miller, S., & Tennyson, J., 1995, *MNRAS* **277**, 767.
- Kirkpatrick, JD, Kelly, D, Rieke, J, Liebert, J, Allard, F, & Wehrse, 1993, *ApJ* **402**, 643.
- Leggett, S.K., Allard, F., Hauschildt, P.H., Berriman, G& Dahn, C., 1996, *ApJS* **104**, 117.
- Leggett, S.K., Allard, F., Hauschildt, P.H., 1997, *ApJ*, submitted.
- Marcy, G.W. & Butler, R.P., 1996, *ApJ* **464**, L147, **464**, L151.
- Mayor, M. & Queloz, D., 1995, *Nature* **378**, 355.
- Nakajima, T., Oppenheimer, B.R., et al., 1995, *Nature* **378**, 463.
- Oppenheimer, B.R., Kulkarni, S.R., Matthews, K., Nakajima, 1995, *Science* **270**, 1478.
- Pulone, L., De Marchi, G., Paresce, F., & Allard, F., 1998, *ApJ* **492**, L41.
- Rogers, F.J. & Iglesias, C.A., 1992, *ApJS* **79**, 507.
- Ruiz, M.T., Leggett, S.K., & Allard, F., 1997, *ApJ* **491**, L107.
- Schultz, A.B., Allard, F., et al., 1997, *ApJ*, in press.
- Schweitzer, A., Hauschildt, P.H., Allard, F., & Basri, G., 1997, *MNRAS* **283**, 821.
- Seaton, M.J., Yan, Y., Mihalas, D., & Pradhan, A.K., 1994, *MNRAS* **266**, 805.
- Tsuji, T., Ohnaka, K., & Aoki, W., 1996, *A&A* **305**, L1.