



**Production des courbes de lumières des  $\gamma$  Doradus pour le  
champ exoplanète du satellite COROT**

**Elie Matar**

7 juillet 2005

Encadrant : Philippe Mathias

## Remerciements

Je voudrais en cette occasion remercier Philippe Mathias mon encadrant durant ce stage de Master 2 qui, grâce à son esprit rénovateur et créatif, m'a guidé de près dans mon travail de recherche. Merci pour ta patience, tes conseils et pour le temps que tu m'as consacré.

Je m'adresse en l'occurrence à tous mes professeurs qui ont été là, pour moi, dans mon trajet universitaire, ainsi que mon jury : Mr Gonzalez, Mr Emsellem et Mr Devriendt.

Finalement je désire remercier chacun dans l'observatoire de la côte d'azur, en particulier les neuf autres Chevaliers de la Table Rectangulaire du resto de l'OCA, Jean-Pierre, les deux Michael, les deux Yves et les autres pour les plus beaux et inoubliables moments autour des fabuleux repas du chef.

## RESUMÉ

Les étoiles variables  $\gamma$  Doradus ont été découvertes récemment (1995) et sont encore assez mal comprises. D'où l'importance du satellite COROT qui va être lancé au second semestre de l'an 2006. Un des buts de COROT est d'observer un grand nombre d'étoiles variables, y compris des  $\gamma$  Doradus.

Pour cela nous avons initié un code (SIMCOROT) qui génère des courbes de lumière de quelques types d'étoiles pulsantes ( $\beta$  Céphéides, SPBs,  $\delta$  Scuti,  $\gamma$  Doradus, Hybrides, Longues Périodes et Céphéides). Puis, par une simple analyse de fréquence par la méthode de Fourier, nous avons obtenu les différentes fréquences de chacune de ces étoiles.

Sachant qu'il reste un peu de modification concernant SIMCOROT, ce code est maintenant prêt à simuler les courbes de lumière des étoiles qui seront observées par COROT dans le champ exo.

Ce travail nous aidera à mieux étudier les étoiles  $\gamma$  Doradus, à mieux comprendre leurs caractéristiques (mécanisme d'opacité, ...) à l'aide des spectres que nous allons observer.

Mots clé :  $\gamma$  Doradus, étoiles pulsantes, courbes de lumière, COROT, champ exoplanète.

---

## ABSTRACT

The  $\gamma$  Doradus variable stars recently discovered (1995) are still not very well known. Here comes the importance of the satellite COROT that will be launched in the second semester of the year 2006.

One of the objectives of COROT is to observe a large number of variable stars, including the  $\gamma$  Doradus. Therefore we have initiated a code (SIMCOROT) that simulates light curves of some types of pulsating stars ( $\beta$  Cepheid, SPBs,  $\delta$  Scuti,  $\gamma$  Doradus, Hybrids, Long Periods and Cepheid). Then with a simple frequency analysis using the Fourier method, we have obtained the different pulsation frequencies of each of those stars.

Knowing that we still have some modifications to do concerning SIMCOROT, the code is now ready for simulating the light curves of the stars that will be observed by COROT.

This work will help us to better study the  $\gamma$  Doradus variables and to better comprehend their characteristics (opacity mechanism,...) using the spectra that we will observe.

Key words:  $\gamma$  Doradus, pulsating stars, light curves, COROT, exoplanet field.

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Chapitre I : Les étoiles variables.....  | 6  |
| 1 Qu'est-ce qu'une étoile variable ?.....  | 6  |
| 2 Les différents types d'étoiles variables.....                                    | 6  |
| 2.1 Les variables extrinsèques.....  | 6  |
| 2.1.1 Les variables cataclysmiques.....  | 6  |
| 2.1.2 Les variables à éclipses.....  | 7  |
| 2.2 Les variables intrinsèques.....  | 7  |
| 2.2.1 Les étoiles éruptives.....   | 7  |
| 2.2.2 Les variables par rotation.....  | 7  |
| 2.2.3 Les variables pulsantes.....   | 7  |
| 3 Les variables pulsantes dans le diagramme HR.....                                | 7  |
| 4 Astérosismologie.....  | 8  |
| 4.1 Les modes propres d'oscillation d'une étoile.....                              | 8  |
| 4.1.1 Pulsations radiales et non-radiales.....                                     | 10 |
| 4.1.2 Modes de pression et de gravité.....   | 12 |
| 4.2 Les $\gamma$ Doradus.....  | 13 |
| Chapitre II : COROT : CONvectio ROTation et Transits planétaires.....              | 15 |
| 1 Objectifs.....   | 15 |
| 2 Présentation scientifique.....   | 15 |
| 3 Description de la mission.....   | 16 |
| Chapitre III : COROTSKY, COROTLUX et le modèle de Besançon.....                    | 18 |
| 1 COROTSKY.....  | 18 |
| 1.1 Base de données sismologique.....  | 18 |
| 1.2 Base de données pour la recherche des exoplanètes.....                         | 18 |
| 2 Description des CCD.....   | 20 |
| 3 COROTLUX : le code pour produire des courbes de lumière.....                     | 20 |
| 4 Le modèle de Besançon de synthèse de populations stellaires dans la Galaxie..... | 22 |
| Chapitre IV : Production des courbes de lumière.....                               | 23 |
| 1 Choix des coordonnées.....   | 23 |
| 1.1 Dans la direction de l'anti-centre.....  | 23 |

|   |        |
|---|--------|
| 1.2 Dans la direction du centre.....                          | 23     |
| 2 SIMCOROT.....   | 23     |
| 2.1 Classement des variables.....                             | 23     |
| 2.2 Création du champ d'étoiles.....                          | 26     |
| 2.3 Générer les fréquences, les amplitudes et les phases..... | 26     |
| 3 Problèmes de COROTLUX.....                                  | 28     |
| 4 Production des courbes de lumière.....                      | 28     |
| 4.1 Création du masque.....                                   | 28     |
| 4.2 Simuler les courbes de lumière.....                       | 28     |
| 4.3 Les premières courbes de lumière.....                     | 29     |
| 4.4 Vérification de l'analyse.....                            | 32     |
| 5 Futures modifications.....                                  | 32     |
| <br>Conclusion.....   | <br>33 |
| Références.....   | 35     |
| ANNEXES.....  | 36     |
| 1 Analyse de Fourier.....                                     | 37     |
| 2 SIMCOROT.....   | 39     |

# Chapitre I

## Les étoiles variables

### 1- Qu'est-ce qu'une étoile variable?

Une étoile variable possède une luminosité qui change dans le temps. Il existe une très grande variété d'étoiles variables et dépendant du seuil de détecteurs, toutes les étoiles sont variables. La variabilité peut être mise en évidence par :

- Interférométrie: on détecte alors une variation du diamètre angulaire de l'étoile.
- Photométrie : on détecte alors une variation dans l'éclat de l'étoile.
- Spectroscopie : on détecte alors une variation de la position et de la forme des raies spectrales de l'étoile.
- Polarimétrie : On détecte une variation du champ magnétique.

Que ce soit du point de vue interférométrique, photométrique, spectroscopique, ou polarimétrique, les observations doivent présenter une résolution temporelle suffisante pour que la variabilité soit détectée. De plus la variabilité observée dépendra de la longueur d'onde à laquelle se font les observations.

Cette variabilité peut être régulière ou irrégulière, sur des laps de temps court (quelques ms : Pulsars) ou très long (dizaines d'années : étoiles binaires).

### 2- Les différents types d'étoiles variables :

Les étoiles variables sont rangées en deux grandes familles définies par la cause de la variabilité : les variables extrinsèques et les variables intrinsèques.

#### 2.1- Les variables extrinsèques :

La variation de luminosité des étoiles variables extrinsèques est due à une cause externe à l'étoile et non pas à une modification de ses propriétés. Ce type de variables est divisé en deux groupes :

##### 2.1.1- Les variables cataclysmiques (explosives et 'novae-like'):

Ce sont des étoiles montrant des explosions causées par des réactions thermonucléaires soit dans leurs couches superficielles (novae), soit dans leurs couches profondes (supernovae). Toutes les étoiles variables montrant des crises analogues à celles des variables explosives par leurs caractéristiques spectrales sont appelées des novae-like. La plupart des variables cataclysmiques sont des systèmes binaires serrés.

### **2.1.2- Les variables à éclipses (variables géométriques) :**

Leurs variations lumineuses ne sont apparentes que depuis l'observateur, à cause de l'alignement entre les diverses composantes d'une étoile multiple ou à cause de leur forme (étoile elliptique)

### **2.2- Les variables intrinsèques :**

Une étoile variable intrinsèque peut-être rattachée à différents types suivant son comportement. On a :

#### **2.2.1- Les étoiles éruptives :**

Une étoile variable éruptive connaît une activité magnétique soutenue dans sa chromosphère ou sa couronne qui provoque des variations de luminosité impossibles à prévoir. On parle ainsi de taches stellaires, causées par l'activité du champ magnétique variable des étoiles.

#### **2.2.2- Les variables par rotation :**

Sont appelées variables par rotation les étoiles dont la luminosité de surface n'est pas uniforme, la variabilité étant causée par leur rotation par rapport à l'observateur. Cette non uniformité de la luminosité peut être causée par la présence des taches stellaires dues à l'instabilité du champ magnétique et/ou par la présence des cellules convectives à la surface de l'étoile (granulation).

#### **2.2.3- Les variables pulsantes :**

On appelle variables pulsantes les étoiles montrant une alternance périodique d'expansion et de contraction de leurs couches superficielles. La pulsation peut être radiale ou non radiale. Une étoile pulsant radialement reste de forme sphérique. Par contre, en cas de pulsation non radiale la forme de l'étoile s'écarte périodiquement d'une sphère, et des zones voisines de sa surface peuvent ainsi avoir des phases de pulsation opposées. Exemple d'étoiles pulsantes : Céphéides,  $\beta$  Céphéides,  $\delta$  Scuti,  $\gamma$  Doradus, RR Lyrae, Mira... Après avoir cité les différents types de variables, nous allons nous intéresser ici à l'étude des variables pulsantes, en particulier les  $\gamma$  Doradus.

### **3- Les variables pulsantes dans le diagramme HR :**

Au cours de leur évolution, les étoiles procèdent à des réarrangements de structure qui vont perturber leur équilibre hydrostatique. Ces perturbations peuvent être rapidement amorties, mais peuvent aussi être entretenues avec une grande régularité: l'étoile devient alors pulsante, c'est-à-dire qu'elle se gonfle et se dégonfle au cours du temps. Les pulsations stellaires sont, dans la plupart des cas, gouvernées par un mécanisme d'opacité ( $\kappa$ -mécanisme) dont le bilan énergétique dans une zone

dite de transition fournit au total un travail positif, dans l'enveloppe. Ce bilan énergétique détermine les régions du diagramme HR où l'on rencontre les étoiles pulsantes (Fig.I.1).

Les éléments responsables du mécanisme d'opacité sont H, He I, He II, ou le Fer. Au centre de la phase de contraction, l'énergie gravitationnelle est convertie en énergie thermique et en rayonnement. Lorsque la température est suffisante, l'énergie thermique permet d'exciter/ioniser les éléments à l'intérieur de l'étoile. Cette énergie ainsi stockée sera restituée sous forme de rayonnement lorsque la pression et la température auront suffisamment baissé (expansion) pour que la désexcitation/recombinaison soit possible.

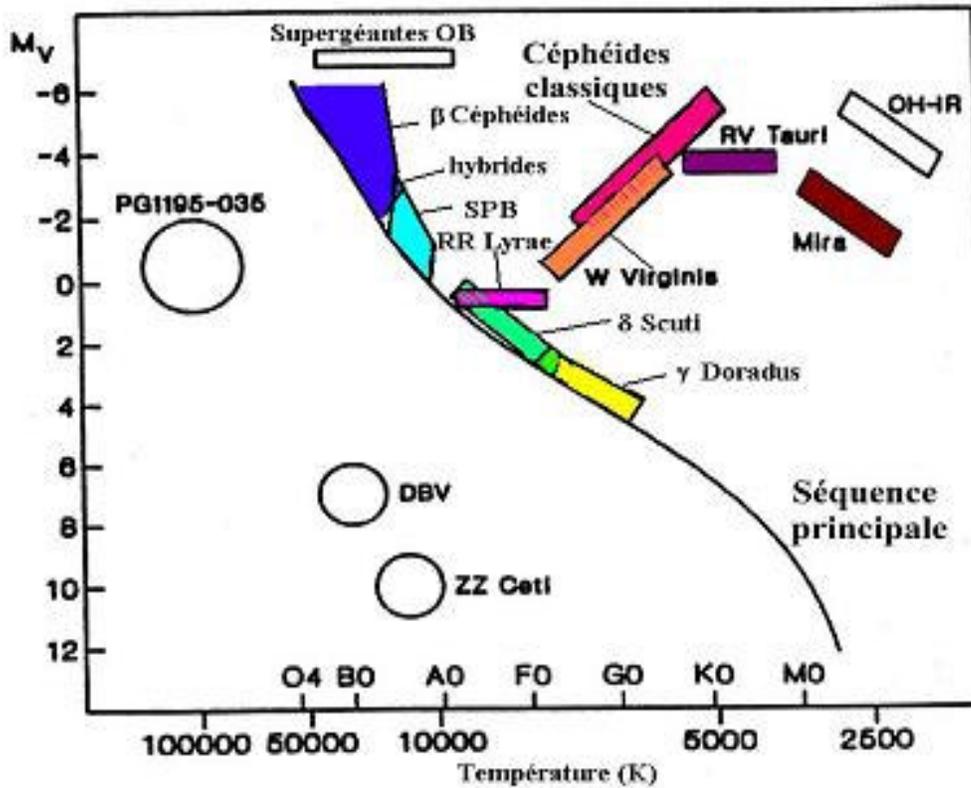


Fig.I.1 : Diagramme de Hertzsprung-Russel des variables pulsantes.

Si l'on porte ces étoiles sur le diagramme de Hertzsprung- Russel (Fig.I.1), on s'aperçoit qu'elles sont réparties dans des domaines bien définis :

- La bande d'instabilité contient les étoiles les plus régulières (Pop I : Céphéides classiques,  $\delta$  Scuti par exemple ; Pop II : RR Lyrae, et W Virginis par exemple).
- La séquence rouge, située à droite des bandes d'instabilité et à peu près parallèle à la séquence principale, contient des étoiles froides ( $T_{\text{eff}} < 5500\text{K}$ ) montrant différents types de variabilités à longues périodes (Miras, semi régulières et irrégulières).
- La séquence bleue regroupant les  $\beta$  Céphéides et les SPBs.

- La séquence des naines blanches en cours de refroidissement (par exemple les ZZ Ceti) située en bas du diagramme HR.
- Les étoiles de type solaire (type G) ayant un spectre très riche en raies métalliques. Entre les solar-like et les  $\delta$  Scuti on trouve les étoiles pulsantes  $\gamma$  Doradus.

#### 4- Astérosismologie :

La sismologie est l'outil idéal pour sonder l'intérieur des étoiles. Il s'agit de détecter et de mesurer les caractéristiques des modes propres d'oscillation des étoiles, et d'utiliser leurs propriétés pour comprendre la structure de leur intérieur.

Par exemple, l'héliosismologie fournit de très bons résultats sur le soleil, où des millions de modes sont détectés. Cependant, les résultats sont moins précis pour les autres étoiles, où seulement un nombre limité de modes peut être détecté.

##### 4.1- Les modes propres d'oscillation d'une étoile :

Les oscillations stellaires se traduisent par des ondes qui se propagent à travers l'étoile. Ce sont les modes propres de l'objet en équilibre, sphère de gaz autogravitante, éventuellement en rotation.

La structure de chaque mode peut se représenter comme le produit d'une fonction purement radiale et d'une harmonique sphérique prenant en compte sa structure horizontale.

Si  $X$  est le déplacement solutions des équations de la structure hydrostatique perturbée, il s'écrit en coordonnées sphériques :

$$X_{nlm}(r, \theta, \varphi, t) = K_{nlm}(r) Y_l^m(\theta, \varphi) \exp(2\pi i \nu_{nlm} t)$$

Où  $\nu_{nlm}$  correspond à la fréquence propre du mode.

La fonction radiale  $K(r)$ , appelée le noyau du mode, présente un nombre  $n$  de noeuds à travers l'étoile. Ce nombre  $n$  est appelé ordre radial du mode. Les 2 autres quantités caractérisent la structure horizontale du mode: le degré  $l$  et l'ordre azimutal  $m$ .

L'harmonique sphérique  $Y_l^m(\theta, \varphi)$  est elle-même produit de deux fonctions indépendantes de  $\theta$  et  $\varphi$  :

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = N_l^m P_l^{|m|}(\mu) e^{im\varphi}$$

Avec :

$$m = -l, \dots, -1, 0, 1, \dots, l$$

$$\mu = \cos \theta$$

$$N_l^m = (-1)^{\frac{m+|m|}{2}} \left[ \frac{2l+1}{2\pi} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!} \right]^{1/2} \text{ le facteur de normalisation.}$$

$P_l^m$  étant le polynôme de Legendre, dont l'expression est de la forme suivante :

$$P_l^m(z) \equiv \frac{(l-m)!}{2^l (l!)^2} (1-z^2)^{m/2} \frac{d^{l+m}}{dz^{l+m}} (z^2-1)^l.$$

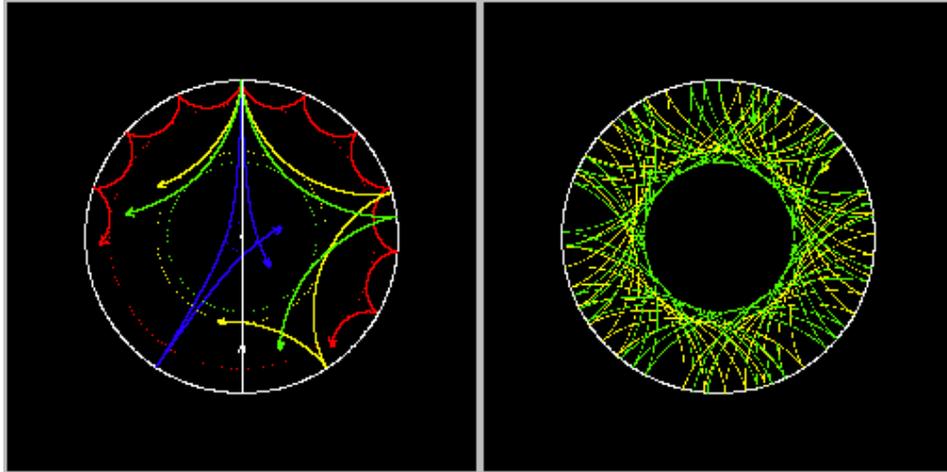


Fig.1.2 : (Figure à gauche) Réfraction de quelques ondes sonores par le gradient de température (vitesse du son) à l'intérieur d'une étoile de type solaire. (Figure à droite) Quelques ondes vont résonner à l'intérieur de cavités acoustiques semblables à celle-ci.

#### 4.1.1- Pulsations radiale et non-radiale :

Le type de pulsation stellaire le plus simple est la pulsation radiale. Une surface nodale est une surface fixe dans l'intérieur stellaire, situé entre deux régions se déplaçant dans des directions radiales opposées. Un mode radial est donc entièrement caractérisé par son ordre radial  $n$ , qui dénote le nombre de ces surfaces nodales concentriques entre le centre stellaire et la surface stellaire. Selon la valeur de  $n$ , nous parlons "du mode fondamental" pour  $n = 0$ , "du premier harmonique" pour  $n=1$ , etc...

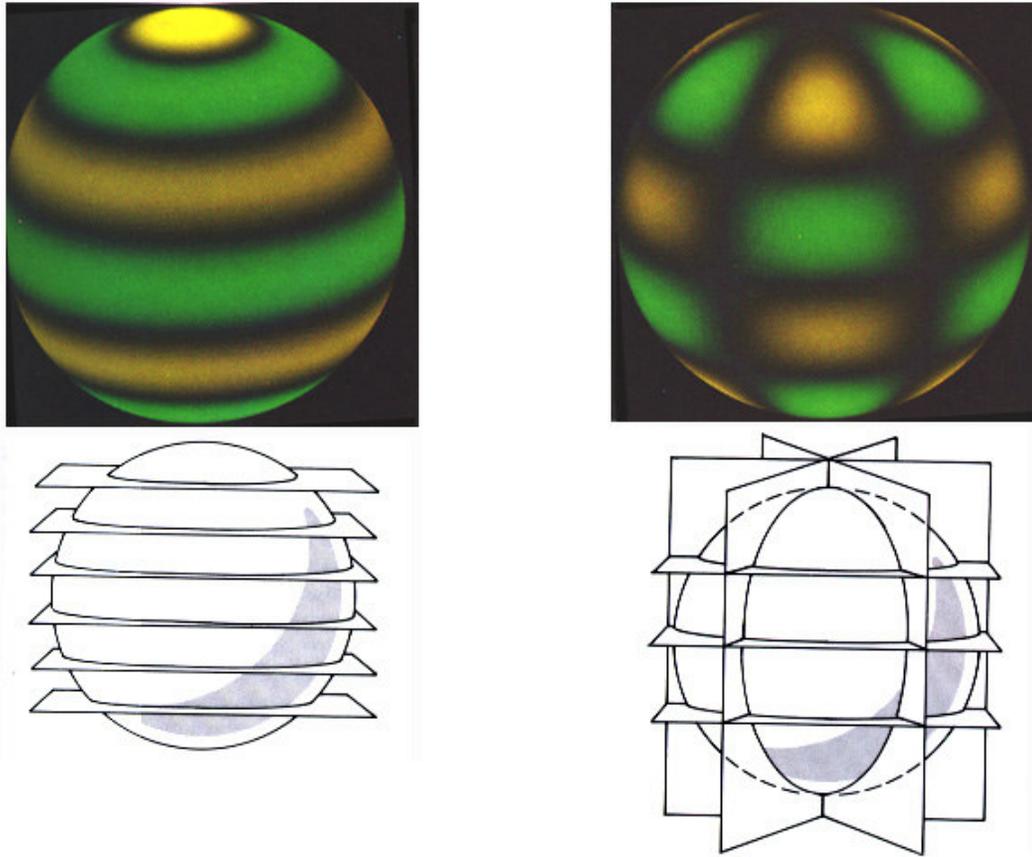


Fig.1.3 : La figure à gauche représente un mode  $l = 6$  et  $m = 0$ . Les régions foncées sont les frontières nodales, les couleurs vertes dénotent des secteurs se déplaçant radialement vers l'extérieur, et les couleurs jaunes montrent les parties se déplaçant radialement vers l'intérieur. Ayant les mêmes conventions de couleurs, la figure à droite représente un mode  $l = 6$  et  $m = 3$ .

La classification des pulsations radiales et non radiales dépend des valeurs des nombres d'onde sphériques de  $l$  et de  $m$ . Les modes ayant  $l = 0$ , et par conséquent  $m = 0$ , correspondent à des pulsations radiales puisqu'ils n'ont pas de lignes nodales sur la surface stellaire. Les modes avec  $l > 0$  correspondent à des pulsations non radiales, puisqu'ils ont au moins une ligne nodale sur leur surface. Les modes ayant  $m = 0$  sont appelés axisymétriques. Les modes non radiaux ayant  $l = |m|$  ont seulement des lignes nodales qui croisent l'axe de symétrie et s'appellent modes "sectoriels". Les modes "tesseraux", avec  $0 \neq m < l$  sont les situations entre ces deux cas extrêmes, ayant les deux types de lignes nodales, parallèles et méridiennes (Fig.1.3).

#### 4.1.2- Modes de pression et de gravité :

Pour les pulsations stellaires, la partie dépendante de temps du comportement oscillatoire est décrite par le facteur  $\exp(2\pi i \nu_{nlm} t)$  où le terme  $\nu_{nlm}$  dénote la fréquence de pulsation du mode propre considéré. Cette fréquence dépend des nombres quantiques caractérisant le mode (nlm). Cependant pour une étoile à symétrie sphérique, cette fréquence ne dépend pas de m mais seulement de n et l. Tout écart à la symétrie sphérique, par exemple la rotation, entraîne une levée de dégénérescence, et les fréquences dépendent alors de m également. Les modes propres sont classés suivant leur fréquence par comparaison avec deux fréquences caractéristiques :

$$L_l^2 = \frac{[l(l+1)]c^2}{r^2}$$

est la fréquence de Lamb. Elle est la limite supérieure de la fréquence locale

des ondes de pression.

$$N^2 = -g \left( \frac{g}{c^2} + \frac{d \ln \rho}{dr} \right)$$

la fréquence de Brunt-Väisälä. Elle est la limite inférieure de la

fréquence locale des ondes de gravité.

Avec

c = la vitesse du son.

$$\Gamma_1 = \left( \frac{\partial \ln p}{\partial \ln \rho} \right)_s$$

coefficient adiabatique.

p étant la pression locale,  $\rho$  la densité locale et g la gravité locale.

Les forces de rappel de l'oscillateur sont la pression, la gravité et la force de Coriolis, si l'objet est en rotation. Selon le type de mode, l'un des deux processus, pression ou gravité, prédomine. A haute fréquence, les modes sont analogues à des ondes sonores, dominés par la pression : on les appelle "modes de pression" ou modes p. Ces modes se situent dans la région supérieure à N et  $L_l$ .

A plus basse fréquence c'est la gravité qui l'emporte : on appelle ces modes les "modes de gravité" ou modes g. Ces modes se situent dans la région inférieure à N et  $L_l$ .

Pour des modes non radiaux, les spectres de fréquence des modes p et g sont séparés par ce qu'on appelle le mode f, radial fondamental. La différence la plus importante entre les modes p et les modes g est que les modes g ont toujours une grande amplitude près du centre de l'étoile tandis que les modes p sont plutôt contraints aux couches externes de l'étoile (Fig.I.4).

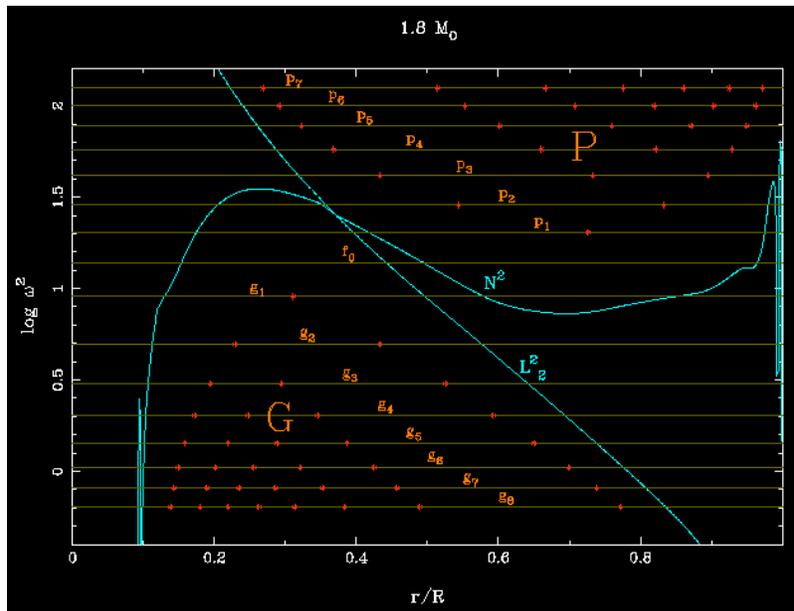


Fig.I.4 : Cette figure indique les modes de gravité (g-modes) qui sont en dessous des courbes de  $L_g^2$  et  $N^2$ , et les modes de pression (p-modes) qui sont en dessus de  $L_g^2$  et  $N^2$ .

#### 4.2- Les $\gamma$ Doradus :

Les étoiles  $\gamma$  Doradus sont des pulsateurs généralement multi périodiques avec des périodes typiques dans l'intervalle [0.3-3] jours.

Découvertes en 1995, ces étoiles ayant des oscillations de mode g se situent près de l'intersection du bord rouge de la bande d'instabilité avec la séquence principale. Les  $\gamma$  Doradus résident dans la région qui se situe approximativement entre 7200 et 7550 K (ZAMS)\* et entre 6900 et 7400 K (TAMS)\*, entre la bande d'instabilité des  $\delta$  Scuti et les étoiles de type solaire (Fig.I.5), ces deux familles ayant des oscillations de mode p.

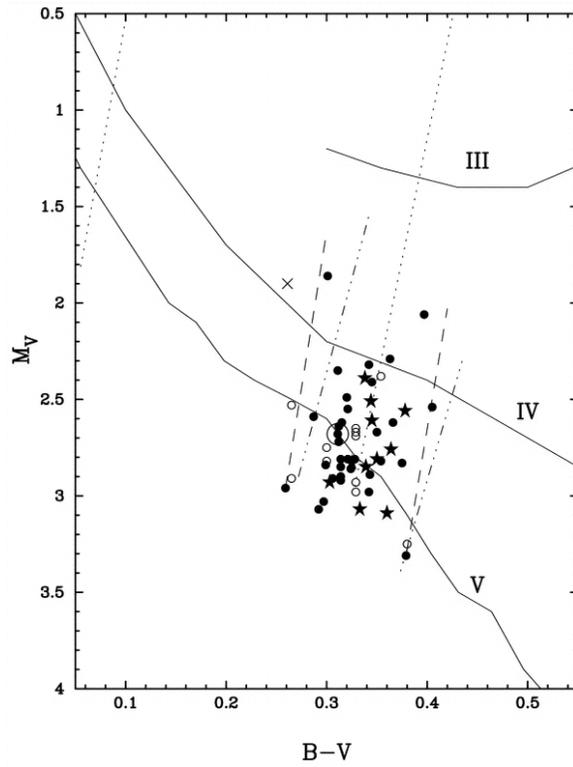
\* ZAMS = Zero Age Main Sequence et TAMS = Terminal Age Main Sequence.

\* Les  $\delta$  Scuti peuvent avoir des oscillations de mode g aussi.

Citons quelques caractéristiques des  $\gamma$  Doradus (d'après Zerbi et al. 1997) :

- Type spectral : A7 – F5
- Classe de luminosité : V – III
- Période : 0.3 – 3 jours
- Amplitude : 30 mmag
- $3.9 < \text{Log } g < 4.2$
- $2.6 < M_v < 4.7$  mag
- Metallicité : solaire
- $1 < R < 2R_{\odot}$
- Binarité : 50%

Fig.1.5 : La figure ci-contre indique la bande d'instabilité des  $\gamma$  Doradus dans le diagramme HR (Fekel et al. 2005).



## Chapitre II

### COROT: CONvection, ROTation et Transits planétaires

#### 1- Objectifs :

COROT est une mission spatiale de photométrie stellaire de très haute précision, qui mesurera les variations temporelles du rayonnement des étoiles dans le domaine visible. Cette expérience vise deux objectifs scientifiques:

- l'étude des intérieurs stellaires par astérosismologie, c'est-à-dire l'observation des modes d'oscillation des étoiles, et la mesure de leurs fréquences, amplitudes et durées de vie.
- la recherche de planètes extrasolaires, par la détection de leurs transits devant l'étoile autour de laquelle elles orbitent (Fig.II.1).

#### 2- Présentation scientifique :

La mission COROT est organisée autour de deux programmes d'observation:

- un programme central, poursuivant à la fois les objectifs de l'astérosismologie et de la recherche d'exo-planètes (runs de ~ 150 jours).

Le programme central d'astérosismologie est plutôt dédié à l'étude des processus hydrodynamiques (convection, rotation, transport de moment angulaire, taille de la zone d'ionisation de l'Hélium, etc.) dans les intérieurs stellaires.

La composante recherche d'exo-planètes de la mission devrait permettre de détecter plusieurs dizaines de planètes légèrement plus grandes et plus chaudes que la Terre, mais aussi un grand nombre de Jupiters chauds.

- un programme exploratoire, dédié à la sismologie des étoiles (runs de ~ 20 jours) :

Le programme exploratoire vise à observer continûment un grand nombre d'étoiles (30 à 40) plus brillantes que  $V = 9$  pendant 20 jours chacune. La précision attendue sur les fréquences d'oscillation de ces étoiles sera suffisante pour une étude astérosismologique bien détaillée sur divers types de variables à travers le diagramme HR.

L'étude des processus hydrodynamiques dans les intérieurs stellaires sera possible grâce à une très grande précision de mesure des fréquences d'oscillation et des profils des modes dans les spectres de Fourier (Voir annexe I), pour des étoiles suffisamment bien connues par ailleurs.

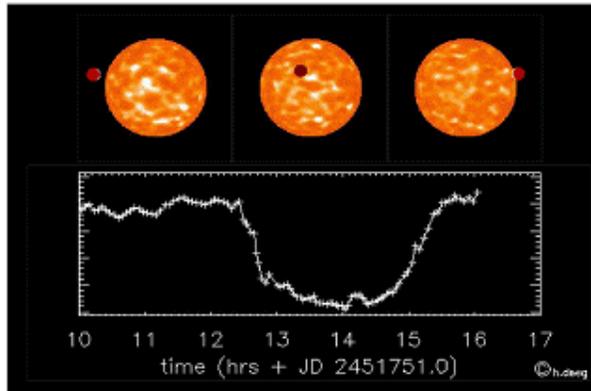


Fig.II.1 : Recherche de la diminution du signal lumineux due au passage de la planète devant l'étoile. Observations simultanées de 12000 étoiles pendant 150 jours d'affilés, au total 60000 étoiles pendant la mission. Précision suffisante pour observer des transits de planètes telluriques. Quelques dizaines de détections attendues.

Outre ces deux objectifs scientifiques principaux, on attend de COROT un grand nombre de retombées scientifiques annexes, en particulier grâce à la surveillance continue de plusieurs milliers d'étoiles sur la voie exo-planètes, par exemple dans les domaines de l'activité et de la rotation stellaires, ou dans la recherche systématique d'objets variables et plus précisément les variables pulsantes auxquelles nous nous sommes intéressés dans ce rapport, etc...

### 3- Description de la mission :

Le concept instrumental de COROT est basé sur un photomètre en lumière blanche, de 27cm de pupille, utilisant des CCDs comme détecteurs. Le plan focal de l'instrument couvrira un champ d'environ 4 degrés carrés pour chacun des deux programmes (astérosismologie et recherche d'exo-planètes). Sur la voie exo-planètes, un prisme formera un spectre à très basse résolution de chaque étoile sur le CCD. Le grand champ de l'instrument permettra de surveiller une dizaine d'étoiles brillantes simultanément sur la voie astérosismologie, et plusieurs milliers d'étoiles jusqu'à la magnitude 16 environ sur la voie exo-planètes.

Dans la voie astérosismologie, l'instrument atteindra un niveau de bruit plus bas que 0.6 ppm en 5 jours dans le spectre de Fourier, jusqu'à la magnitude 6, et donc sera capable de mesurer les fréquences, amplitudes et durées de vie pour des oscillations stellaires aussi faibles que celles du soleil pour  $V = 6$ . Des niveaux de bruit de 2.5 ppm en 5 jours dans le spectre de Fourier seront atteints pour  $V = 9$ , et permettront d'étudier les oscillations stellaires d'amplitudes plus élevées que celles du soleil.

En ce qui concerne la voie exo-planètes, COROT sera capable de détecter des transits planétaires d'un contraste de quelques  $10^{-4}$  sur des étoiles plus brillantes que  $V = 16$ .

La stratégie d'observation de COROT sera de surveiller continûment des champs d'étoiles pendant 5 mois chacun, ce qui constituera le programme central de la mission. Ces champs seront choisis pour contenir une ou plusieurs étoiles ayant  $V = 6$ , de type spectral A, F ou G, près de la

séquence principale. Des étoiles plus brillantes que  $V = 9$  contenues dans ces champs seront aussi suivies en continu (cibles secondaires). La durée de l'observation de 5 mois fournira une précision meilleure que  $0.1 \mu\text{Hz}$  pour les mesures des fréquences d'oscillation.

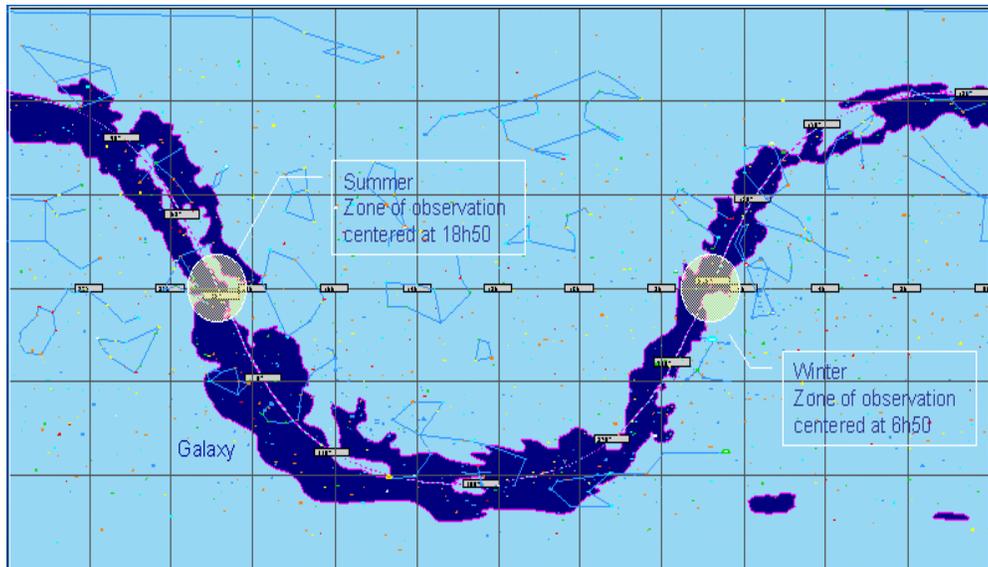


Fig.II.2 : Le ciel observé par le satellite CoRoT. Les deux cercles sont appelés les yeux de CoRoT.

Les régions observables du ciel sont limitées par le globe terrestre. L'angle acceptable maximal est autour de  $10^\circ$ . Ces régions (Fig.II.2) sont approximativement deux cercles de rayon  $10^\circ$  dans des directions opposées. Leurs positions ont été fixées pour observer le plus grand nombre de cibles possible pour les deux programmes de la mission.

## Chapitre III

### 1- COROTSKY : Bases de données pour l'astérosismologie et la recherche d'exoplanètes.

COROTSKY est un outil utilisé pour avoir accès aux bases de données de sismologie et d'exoplanètes. Ces bases collectent les informations obtenues par les observations sols et par les analyses dédiées à la préparation de COROT pour ses deux programmes SISMO et EXO. En d'autres termes, l'objectif de COROTSKY aide à choisir les étoiles cibles qui seront observées.

Ces fonctionnalités principales sont :

- a- La sélection de la position et de l'orientation des CCDs pour chaque observation.
- b- La sélection des cibles dans les CCDs pour la sismologie et la recherche d'exoplanètes.
- c- La construction du plan global d'observation.

Pour les étoiles qui n'ont pas d'informations suffisantes, des données ont été reprises des catalogues existant comme SIMBAD (CDS Strasbourg) pour la base de données de la sismologie ou du catalogue de USNO-A2 pour la base de données d'exoplanètes.

#### 1.1- Base de données sismologique :

La base de données sismologique de COROT contient toutes les étoiles existant dans SIMBAD (11921 objets) plus brillantes que  $V = 9.5^*$ . Toutes ces étoiles sont a priori des cibles pour le programme astérosismologique de COROT sachant que seulement un petit nombre des ces étoiles seront sélectionnées comme cibles principales, soit dans les runs longs (150 jours) ou les runs courts (20-30 jours).

#### 1.2- Base de données pour la recherche d'exoplanètes :

Cette base de données est formée de deux parties. La première et la plus importante a été prise de la base de données EXODAT fournie par le ECOWG (Exo Complementary Observation Working Group). Elle contient des données dérivées de plusieurs observations. Ces données devront couvrir toutes les régions du ciel accessible aux CCD du champ exoplanètes.

COROTSKY fournit une fonction appelée "view populated regions" (observer les régions peuplées) qui permet de visualiser quelles régions du ciel sont effectivement couvertes par les données d'EXODAT.

\* 7443 objets dans la direction de l'anti-centre et 4468 objets dans la direction du centre de la galaxie.

En complément, dans les régions où il n'existe pas de données EXODAT, une partie de la base de données est fournie par le catalogue USNO-A2 et couvre tout le domaine accessible à COROT allant jusqu'à la magnitude  $V = 19$ .

## 2- Description des CCDs :

On a mentionné dans le chapitre précédent que le satellite COROT contient quatre CCDs jouant le rôle des détecteurs, deux CCDs consacrés au champ astérosismologie et deux autres au champ exoplanète.

La position du plan focal de ces CCDs est définie dans COROTSKY par trois coordonnées (Fig.III.1) :

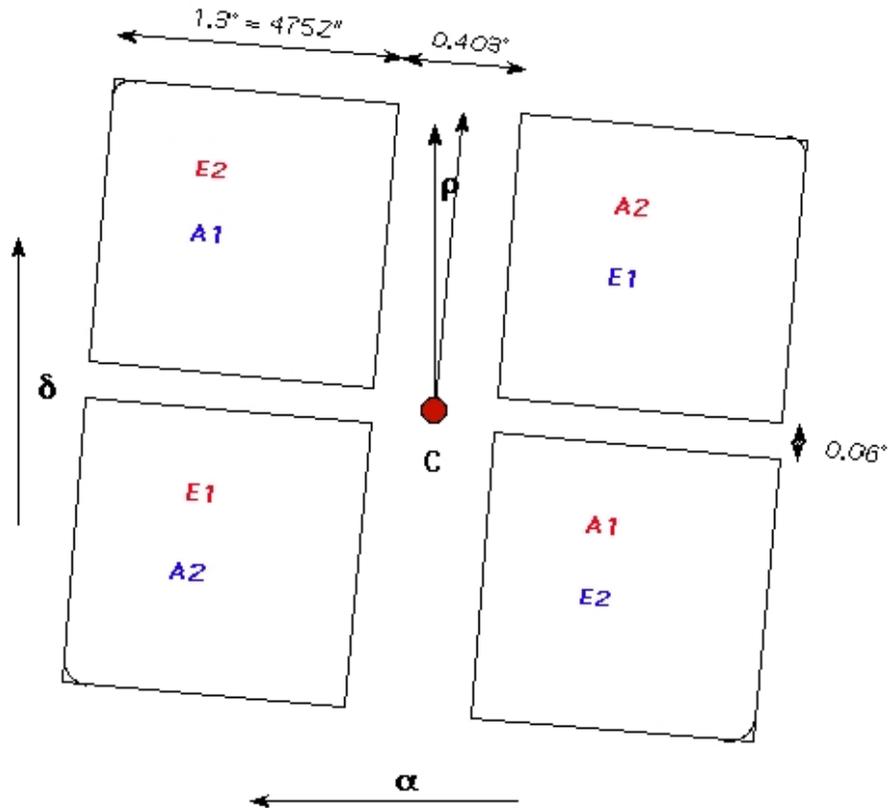
a-  $\alpha$  ( $\alpha$ ) et  $\delta$  ( $\delta$ ) sont les coordonnées du centre C du plan focal. On a :

$$\alpha = 101.7^\circ \text{ et } \delta = -0.19^\circ \text{ (Pour le premier run en hiver 2006)}$$

b-  $\rho$  ( $\rho$ ) est l'angle d'inclinaison des CCDs. Il est défini comme suit : les colonnes de chaque CCD sont presque alignés avec  $\alpha$  et les lignes avec  $\delta$ .

$$\rho = 7.3^\circ$$

Une rotation limitée du satellite autour du centre du plan focal est possible. Son amplitude maximale étant de  $\pm 20^\circ$  autour d'une position médiane presque parallèle à l'axe des  $\delta$ .



CCD name in red for a pointing in the galactic centre direction  
 CCD name in blue for a pointing in the galactic anticentre direction

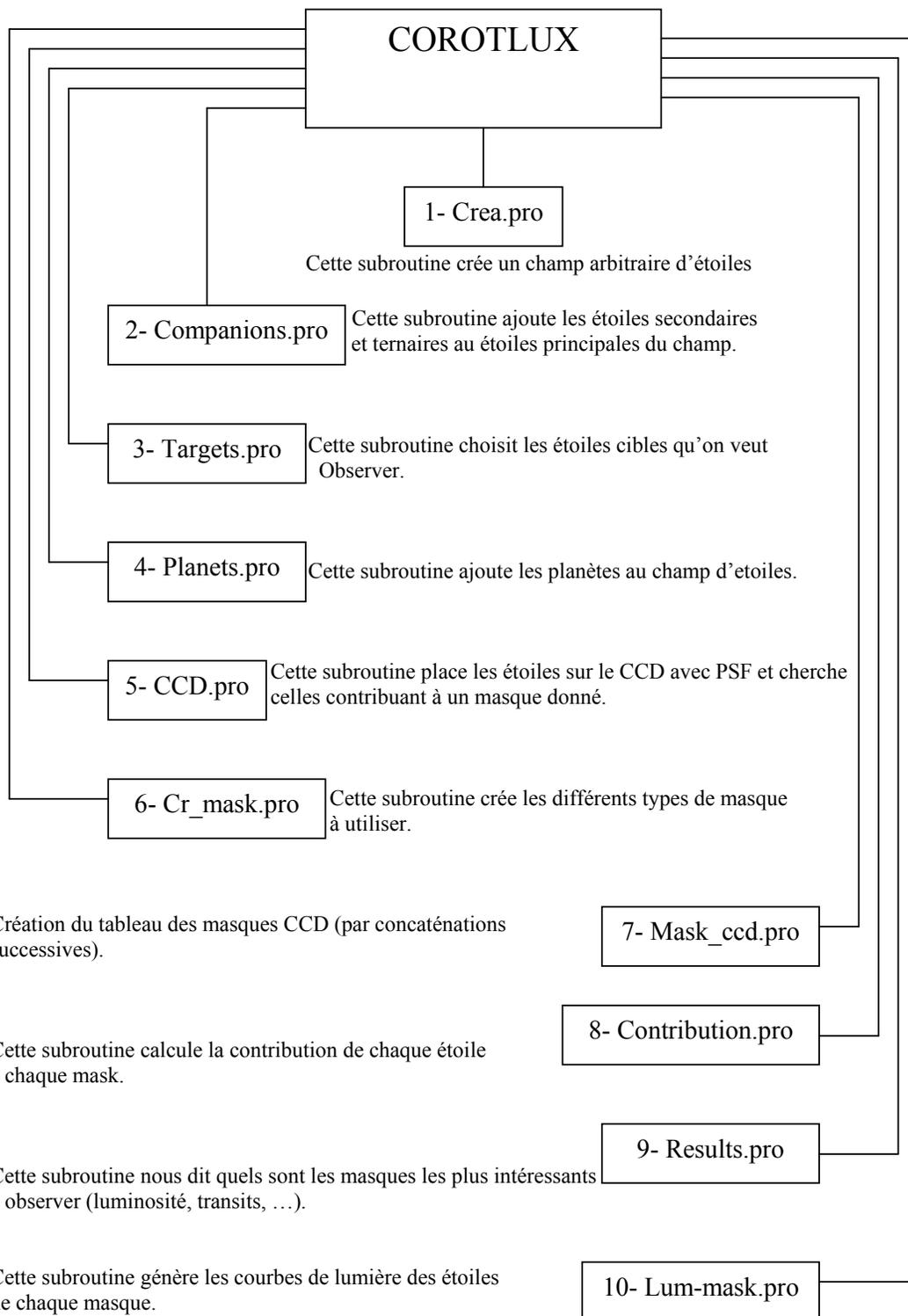
Fig.III.1 La représentation des quatre CCDs du satellite COROT. C est le centre du plan focal.

### 3- COROTLUX : Le code pour produire des courbes de lumière :

COROTLUX est un code pour simuler des courbes de lumières obtenues par le satellite COROT dans le champ EXO afin de simuler des transits. Il crée plusieurs fichiers qui servent à donner les positions des différents masques et étoiles sur les CCDs, il sert aussi à donner des informations sur les compagnons binaires et ternaires des étoiles ainsi que des informations sur les étoiles avec des planètes (si celles-ci sont détectées).

Ce code écrit en langage IDL a été initié par Tristan GUILLOT (OCA).

Je présente ici un petit organigramme qui décrit l'objectif des sous-routines qui se trouvent dans COROTLUX :



#### 4- Le modèle de Besançon : Modèle de synthèse de populations stellaires dans la Galaxie.

Plutôt que de partir d'une distribution aléatoire d'étoiles, nous avons utilisé un modèle de synthèse de population.

Le modèle de la synthèse de populations stellaires établi par l'équipe de Besançon permet d'avoir une vue globale de la Galaxie comprenant des aspects dynamiques et évolutionnaires (Robin et al. A&A 2003). Les scénarios de la formation et de l'évolution stellaires produisent des fonctions de distribution théoriques qui sont directement comparées aux observations de différents types (photométrie, cinématique, distributions d'abondance). La distribution d'âge dans le voisinage solaire est dérivée d'un modèle d'évolution galactique. Les populations stellaires du disque galactique sont auto-contraintes par les équations de Boltzmann et de Poisson par le potentiel du modèle de masse. Ainsi on dérive directement des prédictions d'observation d'après une description globale de structure et d'évolution galactiques.

Le modèle prend en considération la population des quatre parties de la galaxie : le disque mince, le disque épais, le sphéroïde et le bulbe. Chaque population est décrite par un historique du taux de formation stellaire (SFR = Stellar Formation Rate), une fonction de masse initiale ou IMF (Initial Mass Function), un âge, un ensemble de voies évolutionnaires, une cinématique, des caractéristiques de métallicité et inclut une population de naines blanches.

Les lois de densité dans le disque mince sont contraintes par le potentiel par l'intermédiaire de l'équation de Boltzmann et sont dépendantes de l'âge. L'extinction est modélisée par un disque mince diffus. L'utilisateur peut inclure une distribution d'extinction suivant sa propre ligne de visée.

Le modèle résultant peut être utilisé pour les simulations des populations stellaires dans la galaxie dans toutes les directions et dans toutes les bandes photométriques aussi bien que les distributions des vitesses radiales.

Les simulations du modèle sont produites sous forme de :  
Catalogues de pseudo-étoiles à partir des simulations de Monte-Carlo. Pour chaque étoile, les paramètres observables (grandeurs, couleurs, vitesses radiales,...) et intrinsèques (distance, type spectral, âge, magnitude absolue,...) sont donnés. En total dix huit paramètres sont donnés par le modèle de Besançon : la classe de luminosité, le type spectral, la magnitude absolue,  $\log g$ , le rayon, la distance, les bandes de couleurs, la température effective, la magnitude apparente, la magnitude bolométrique ...

## Chapitre IV

### Production des courbes de lumière : Les étapes du travail de A à Z

#### 1- Choix des coordonnées :

Puisque le satellite COROT va observer dans deux directions (centre et anti-centre de la Galaxie), nous avons choisi deux étoiles, une dans chaque direction.

##### 1.1- Dans la direction de l'anti-centre :

Champ de HD 49933 (solar like) qui contient HD 49434, candidate  $\gamma$  Doradus.

Coordonnées galactiques de HD 49434 d'après SIMBAD sont :

- i- La longitude  $L = 213,7503^\circ$ .
- ii- La latitude  $B = -1,2955^\circ$ .

##### 1.2- Dans la direction du centre :

HD 181555 : ses coordonnées galactiques d'après SIMBAD sont :

- iii- La longitude  $L = 37,13^\circ$ .
- iv- La latitude  $B = -6,14^\circ$ .

Dans ce rapport de stage nous nous sommes limités à l'étude dans la direction de l'anti-centre, c'est-à-dire suivant HD 49434 pour le champ exoplanète.

#### 2- SIMCOROT :

##### 2.1- Classement des variables :

Le modèle de Besançon nous a généré 26510 étoiles dans la direction de l'anti-centre de la Galaxie ayant des magnitudes allant jusqu'à  $V < 19$  (Fig.IV.1). Puis suivant leurs classes de luminosité (CL), leurs types spectraux (St) et leurs magnitudes absolues (Mv), nous avons classé ces étoiles dans sept différentes classes de variables pulsantes :  $\beta$  Céphéides, SPBs,  $\delta$  Scuti,  $\gamma$  Doradus, Hybrides, Longues Périodes (essentiellement les Miras) et Céphéides.

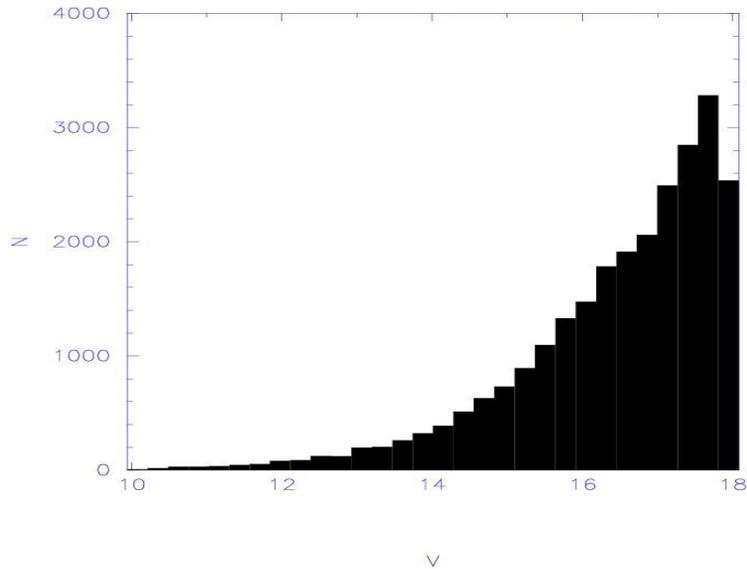


Fig.IV.1 : Cet histogramme nous donne la distribution des étoiles obtenues par le modèle de Besançon suivant leurs magnitudes V.

Puisque nous ne savons pas quel est le taux de variabilité des étoiles dans la Galaxie, nous avons arbitrairement estimé que 30% des étoiles des différents types sont variables avec le seuil COROT.

Les critères de choix des différentes variables sont donnés dans le tableau suivant :

|                  | CL              | St        | Mv            |
|------------------|-----------------|-----------|---------------|
| B Céphéides      | [3-5] = [III-V] | [B0 – B3] | [-6.0 ; -2.0] |
| SPBs             | =               | [B3 – B7] | [-2.0 ; 0.0]  |
| $\delta$ Scuti   | =               | [A0 – F3] | [0,5 ; 3.0]   |
| $\gamma$ Doradus | =               | [A8 – F6] | [2.6 ; 4.7]   |
| Longues Périodes | [1-2] = [I-II]  | [G0 – M6] | [-3.4 ; -0.7] |
| Céphéides        | =               | [A0 – F6] | [-6.1 ; -2.0] |

Tableau IV.1 : Classification utilisée pour les différents types de variables.

Hybrides : Toutes les étoiles présentant à la fois les caractéristiques d'une  $\delta$  Scuti et d'une  $\gamma$  Doradus sont considérées comme étant des hybrides (intersection des deux bandes d'instabilité).

Suivant ces critères de choix, nous avons obtenu le diagramme HR suivant :

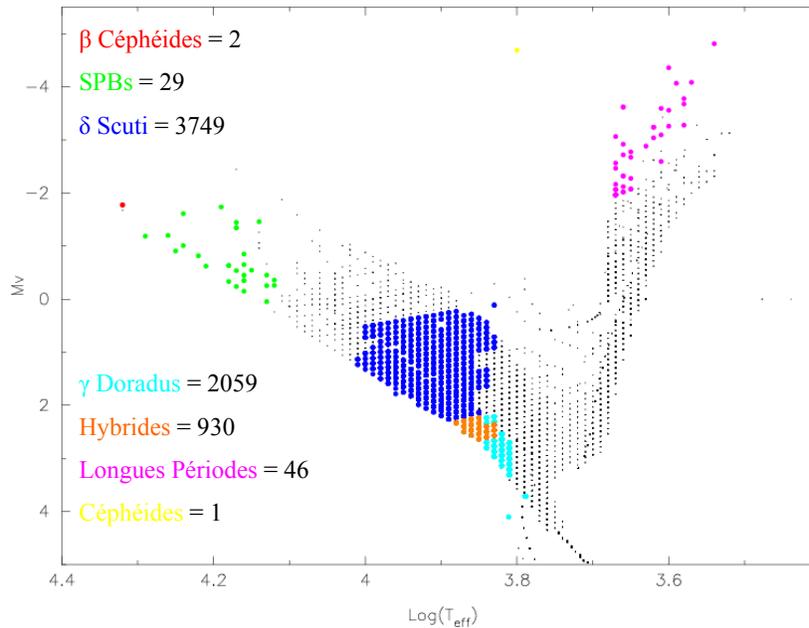


Fig.IV.1 : Le diagramme HR de différentes classes d'étoiles pulsantes. Toutes les étoiles non variables sont représentées par des points noirs.

Après la multiplication par un taux de variabilité de 30%, nous avons obtenu les populations suivantes :

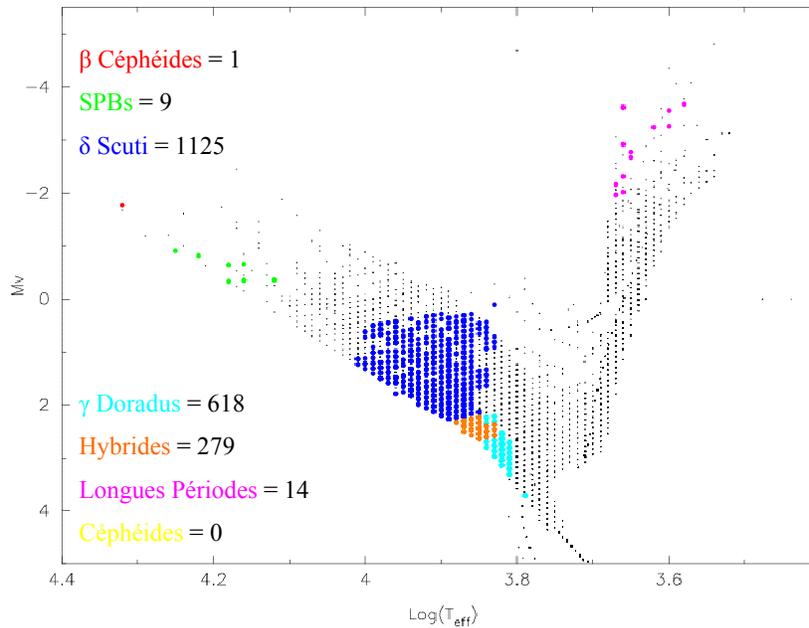


Fig.IV.2 : Le diagramme HR de différentes classes d'étoiles pulsantes (avec un seuil de variabilité de 30%).

## 2.2- Création du champ d'étoiles :

Les dimensions de chaque CCD du satellite COROT sont 2048 pixels x 2048 pixels. Pour cela dans le code SIMCOROT nous avons créé un champ qui a les mêmes dimensions que les CCDs, sur lequel nous avons placé aléatoirement les étoiles obtenues.

Nous avons eu le champ d'étoiles suivant :

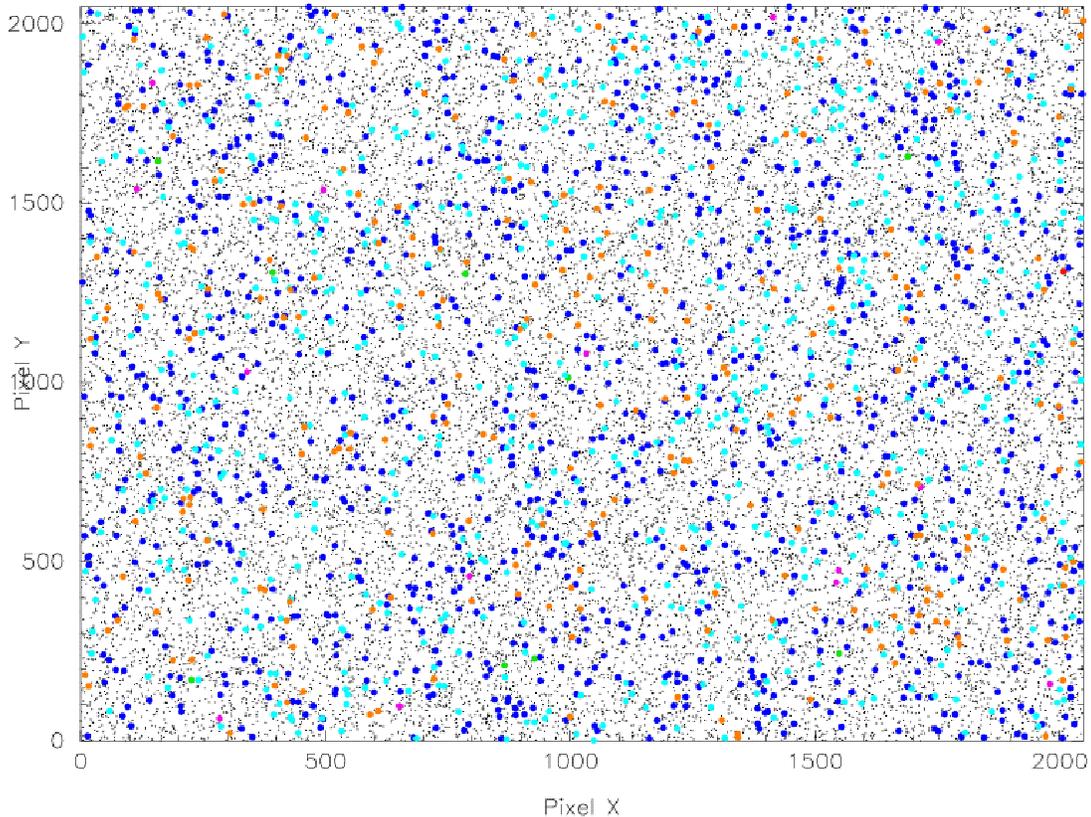


Fig.IV.3 : Le champ d'observation représentant un CCD du satellite COROT de dimension 2048 x 2048 pixels et contenant toutes les étoiles issues du modèle de Besançon. Nous avons utilisé la même convention de couleurs que dans la figure Fig.IV.2.

## 2.3- Générer les fréquences, les amplitudes et les phases :

Suivant sa classe de variabilité, nous avons généré dans SIMCOROT pour chaque étoile : un nombre de fréquences, une fréquence, une amplitude et une phase aléatoires pour chacune d'elles. Ces quatre valeurs ont été choisies pour chaque classe de variable comme suit :

| Classe           | fréquences | f [d <sup>-1</sup> ] | A [mmag]   |
|------------------|------------|----------------------|------------|
| β Céphéides      | [1 ; 10]   | [4 ; 9]              | [0 ; 300]  |
| SPBs             | [1 ; 10]   | [0.3 ; 3]            | [0 ; 30]   |
| δ Scuti          | [1 ; 50]   | [3 ; 50]             | [0 ; 50]   |
| γ Doradus        | [1 ; 10]   | [0.3 ; 3]            | [0 ; 30]   |
| Hybrides         | [1 ; 20]   | [0.3 ; 50]           | [0 ; 30]   |
| Céphéides        | 1          | [0.01 ; 1]           | [0 ; 1200] |
| Longues Périodes | 1          | [0.001 ; 0.01]       | [0 ; 2000] |

Tableau IV.2 : Dans ce tableau nous dressons les caractéristiques de chaque classe de variables pulsantes considérées dans le code SIMCOROT.

Les fréquences et les amplitudes générées aléatoirement dans SIMCOROT sont issues de distributions typiques telles que celle indiquée données ci-dessous pour les  $\gamma$  Doradus.

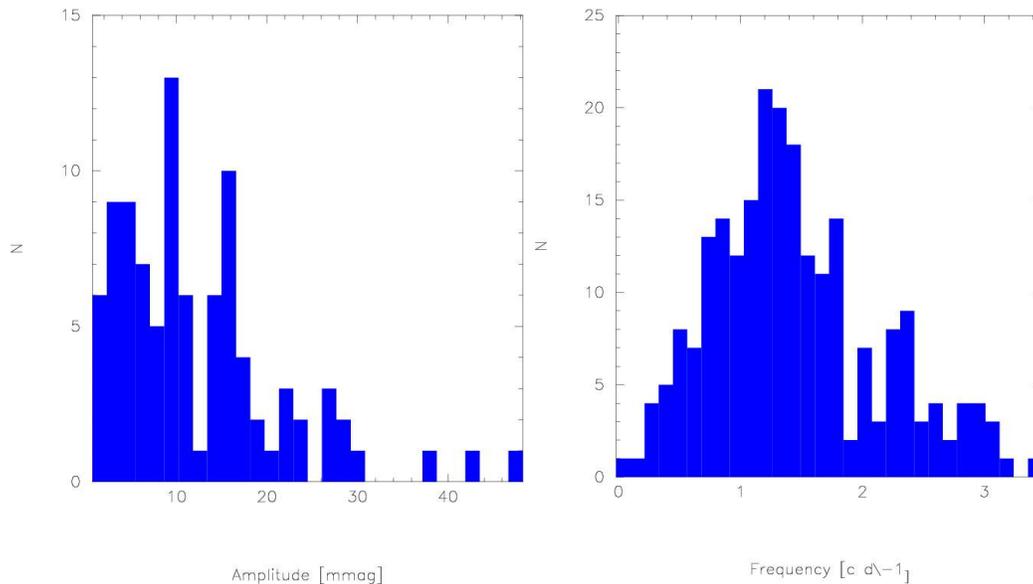


Fig.IV.4: L'histogramme à gauche représente la distribution des amplitudes des  $\gamma$  Doradus connues. L'histogramme à droite représente la distribution de ces mêmes étoiles suivant leurs fréquences.

### 3- Problèmes de COROTLUX :

Avant tout, nous voulions utiliser le programme COROTLUX parce qu'il contenait des sous-routines censées à faciliter notre travail et que nous pouvions utiliser immédiatement après avoir mis les différentes classes de variables que nous avons obtenu. La facilité incluait la création du champ d'étoiles, le calcul de la PSF (Point Spread Fonction), le choix des étoiles cibles et dire lesquelles contribuent à un masque donné... et enfin produire la courbe de lumière pour chaque masque. Toutes ses sous-routines existent dans COROTLUX.

Mais il s'est avéré difficile de rentrer dans la philosophie du langage et du programme, et en particulier, nous avons eu beaucoup de difficulté à convertir SIMCOROT en IDL. Pour cela, et après avoir perdu quasiment un mois sur la connaissance d'IDL et sur la conversion du code, nous avons décidé de le laisser en FORTRAN et de continuer le travail.

### 4- Production des courbes de lumière :

#### 4.1- Création du masque :

Nous avons créé un masque rectangulaire de dimensions 100pixels x 50 pixels suivant les axes X et Y respectivement suivant la forme globale des masques qui sont réellement utilisés (l'aspect rectangulaire est lié à la dispersion des spectres suivant X). Ce masque doit contenir en moyenne 32 étoiles (nous avons fait le rapport entre les surfaces du masque et du CCD puis nous avons multiplié par le nombre total d'étoiles, nous aurons  $\frac{26510}{(2048)^2} \times (50 \times 100) \approx 32$  étoiles/masque). Les informations sur ces étoiles (type de pulsante, amplitudes, fréquences et phases) seront données dans un fichier qui s'appelle **four.dat**. Les informations qui servent à tracer la courbe de lumière de chaque masque (ou chaque étoile) seront données par un fichier qui s'appelle **lcurve.dat**.

#### 4.2- Simuler les courbes de lumière :

Les courbes de lumière sont la représentation graphique de la formule suivante :

$$f_i(t) = V_i + \sum_{j=1}^{nbfi} A_{ij} \cos(2\pi\nu_{ij}t + \varphi_{ij})$$

Où  $nbfi$  est le nombre de fréquence de l'étoile.

Avec  $V_i$  est la magnitude apparente moyenne de l'étoile  $i$ ,  $\nu_{ij}$  la  $j^{\text{ème}}$  fréquence de l'étoile  $i$ ,  $A_{ij}$  son amplitude et  $\varphi_{ij}$  sa  $j^{\text{ème}}$  phase (toujours comprise  $[0; 2\pi]$ ).

Cette équation est évidemment dépendante du temps.

Nous avons déjà généré avec SIMCOROT les fréquences, les amplitudes et les phases de chaque étoile pulsante dans le masque. Il ne reste alors qu'à boucler sur le temps. Nous savons que les runs longs du satellite COROT dureront 150 jours chacun, c'est la durée d'observation des étoiles.

Une information sur les étoiles du masque va être donnée chaque 16 minutes en allant de  $t = 0$  jusqu'à  $t = 150$  jours. En d'autres termes, nous aurons 13500 informations pour chaque masque durant 150 jours. D'où le flux total :

$$f(t) = \sum_i V_i + \sum_i \sum_j A_{ij} \cos(2\pi\nu_{ij}t + \varphi_{ij}) = V + \sum_{ij} A_{ij} \cos(2\pi\nu_{ij}t + \varphi_{ij})$$

$i = 1 \rightarrow$  nombre d'étoiles dans le masque.

Nous voulions tracer les courbes de lumière avec le temps suivant l'axe des X et la magnitude bolométrique apparente suivant l'axe des Y. Pour cela nous avons fait la conversion de la magnitude apparente en magnitude bolométrique apparente  $m_{bol}$  à l'aide de la relation :

$$M_{bol} - M_v = m_{bol} - V$$

Où  $M_{bol}$ ,  $M_v$  et  $V$  sont la magnitude bolométrique absolue, la magnitude absolue et la magnitude apparente respectivement. Notons que ces trois observables sont données par le modèle de Besançon.

Puisque seuls les flux s'additionnent, il était nécessaire de convertir les magnitudes en flux. Puis après avoir fait la somme, nous avons ajouté le bruit des photons, et nous avons reconverti le flux total en magnitude bolométrique apparente.

Pour faire cette conversion nous avons utilisé la relation suivante :

$$f = 2,52 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{2}{5}m_{bol}}$$

D'où 
$$m_{bol} = \log_{10} \left[ \frac{f}{2,52} \cdot 10^5 \right] = 5 + \log_{10} \left[ \frac{f}{2,52} \right]$$

#### 4.3- Les premières courbes de lumière :

Comme premier essai, nous avons placé le centre du masque sur le point (400 ; 175). Après compilation de SIMCOROT nous avons vu que le masque contenait deux  $\delta$  Scuti (la première ayant 3 fréquences et la seconde 34 fréquences), deux  $\gamma$  Doradus (la première ayant 3 fréquences et la seconde ayant deux fréquences), une seule hybride ayant 10 fréquences et 25 autres étoiles non variables.

Nous avons tracé les courbes de lumière des deux  $\gamma$  Doradus (Fig.IV.5.a et Fig.IV.6.a), la courbe de lumière de l'hybride (Fig.IV.7.a) et celle de toutes les étoiles pulsantes du masque (Fig.IV.8.a).

Notons que la résolution en fréquence (largeur du pic) est égale à 0.032.

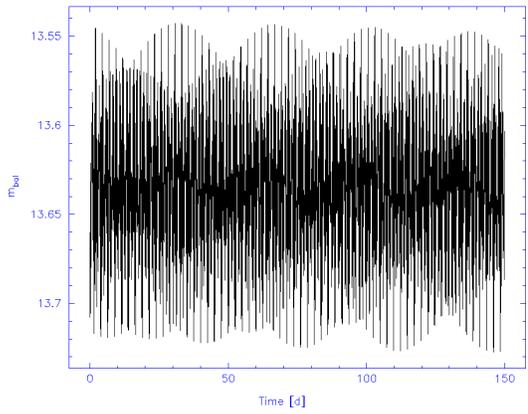
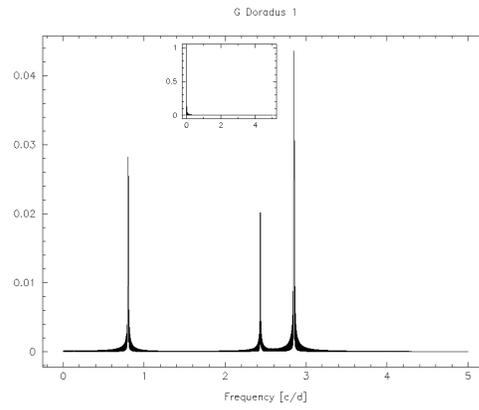


Fig.IV.5 (a) : La courbe de lumiere de la première  $\gamma$  Doradus sur une durée de 150 jours.



(b) : Les trois fréquences de la  $\gamma$  Doradus :  $0.802734c/d$ ,  $2.434772c/d$  et  $2.851161c/d$ .

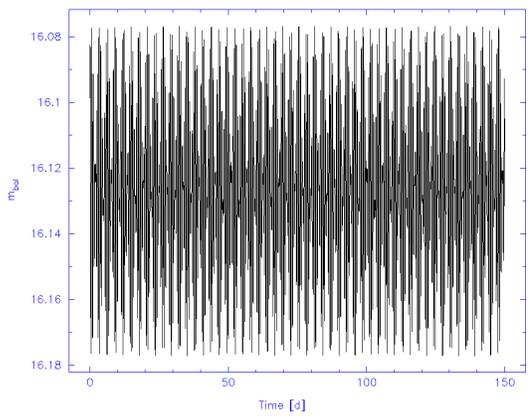
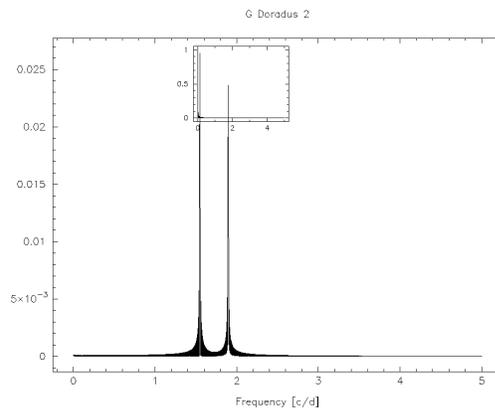


Fig.IV.6 (a) : La courbe de lumiere de la seconde  $\gamma$  Doradus sur une durée de 150 jours.



(b) : Les deux fréquences de la  $\gamma$  Doradus :  $1.549421c/d$ ,  $1.895903c/d$ .

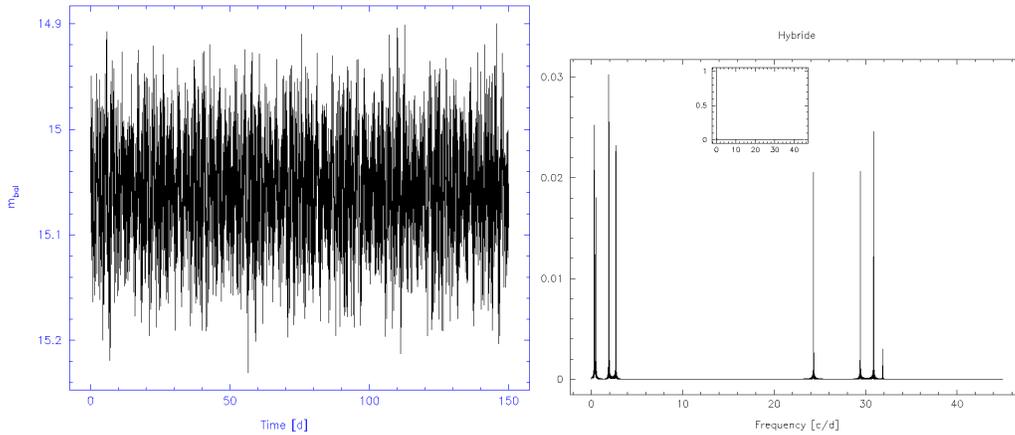


Fig.IV.7 (a) : La courbe de lumière de l'étoile l'hybride sur une durée de 150 jours.

(b) : Les dix fréquences de l'hybride : 0.343912c/d, 0.421001c/d, 0.543767c/d, 1.915387c/d, 1.973566c/d, 2.704258c/d, 24.318325c/d, 29.419654c/d, 30.878151c/d et 31,880205c/d.

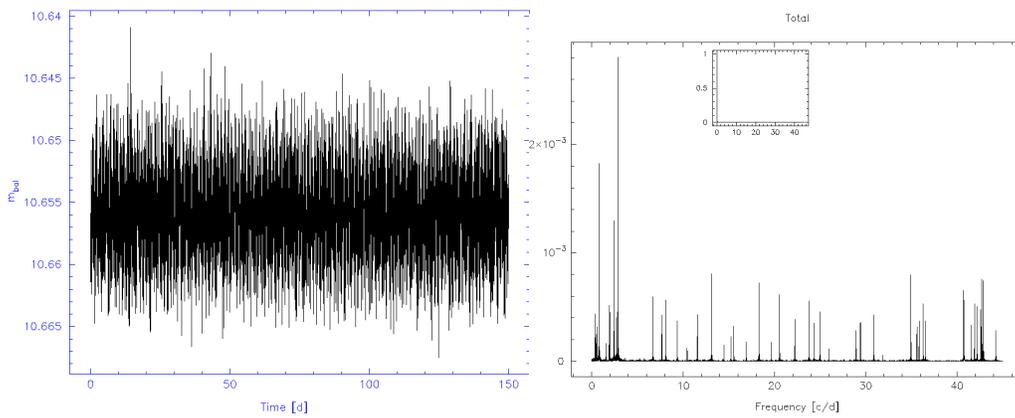


Fig.IV.7 (a) : La courbe de lumière de toutes les étoiles pulsantes dans le masque sur une durée de 150 jours.

(b) : Les fréquences de toutes les étoiles pulsantes dans le masque, soit 52 fréquences au total. Notons que le seuil de détection est  $10^{-4}$ .

Après la production des différentes courbes de lumière, nous avons fait une analyse de leurs fréquences à l'aide d'un code déjà existant qui s'appelle **freq.prc**. Pour les deux  $\gamma$  Doradus l'analyse de fréquence est représentée par les figures Fig.IV.5 (b) et Fig.IV.6 (b), pour l'hybride c'est la figure Fig.IV.6 (b) et pour toutes les étoiles contenues dans le masque, l'analyse de fréquence est représentée par la figure Fig.IV.7 (b).

#### 4.4- Vérification de l'analyse :

Parmi les fichiers créés par SIMCOROT, le fichier **four.dat** nous donne les informations sur toutes les étoiles du masque choisi, le type de chacune d'elles ( $\gamma$  Doradus, hybride, ...), ses fréquences, ses amplitudes et ses phases.

Donc après l'analyse du fichier **lcurve.dat** par **freq.prc**, on peut très facilement faire la comparaison entre les fréquences obtenues par SIMCOROT et les fréquences obtenues par l'analyse. Les fréquences sont tout à fait les mêmes.

#### 5- Futures modifications :

Pour le moment le positionnement du masque sur le champ d'étoiles se fait manuellement. La première modification consiste alors à faire varier cette position aléatoirement autour des étoiles les plus brillantes dans le champ d'observation.

Nous avons fait un masque très normal de forme rectangulaire, il nous reste à créer plusieurs formes.

Dans les simulations des courbes de lumière nous avons ajouté un bruit qui varie entre  $-10^{-4}$  et  $+10^{-4}$ . Il nous reste à ajouter le bruit de fond.

# Conclusion

## Résumé :

Mon travail de Master 2 consiste en la production des courbes de lumière des étoiles pulsantes, en particulier les  $\gamma$  Doradus, comme préparation du satellite COROT qui va être lancé l'été prochain.

Ce rapport de stage est formé de quatre chapitres :

- Dans le chapitre I je donne la définition des étoiles variables en général : les différents types, leurs positions dans le diagramme HR, ...
- Le second chapitre contient des informations sur le satellite COROT (mission, objectifs,...).
- Dans le chapitre III je présente les différents outils que j'ai utilisés au cours de mon stage (modèle de Besançon, COROTLUX).
- Et enfin le dernier chapitre est aussi le plus important. Dans le chapitre IV j'ai présenté de quoi est formé mon code SIMCOROT et comment il fonctionne. Puis j'ai présenté les différents résultats que j'ai obtenus. Ces résultats présentent la courbe de lumière des étoiles d'un masque donné ainsi que leur analyse de fréquence.

Pour le moment mon travail durant ce stage s'est déroulée dans un cadre quasiment idéal puisque je n'ai ajoutée aux courbes de lumière qu'un bruit de photons ( $\pm 10^{-4}$  photoélectrons / sec). Je peux rendre ces simulations de plus en plus réelles tout en ajoutant d'autres types de bruits (bruits de fond, bruit de lecture ou d'instrumentation,...). En n'oubliant pas qu'il faut aussi créer différents modèles de masques (ceux utilisés dans COROTLUX).

## Futur travail : identification des modes d'oscillation

L'identification des modes par la méthode des amplitudes photométriques est basée sur les variations temporelles des amplitudes stellaires mesurées avec différents filtres d'un système photométrique.

Pour appliquer cette méthode, on doit en premier déterminer les fréquences d'oscillation à l'aide de l'analyse des périodes. C'est ce que nous avons fait.

Pour une oscillation stellaire, les fréquences ne dépendent pas des filtres considérés. Les amplitudes, par contre, diffèrent d'un filtre à l'autre. Cette différence dépend du mode d'oscillation, plus particulièrement du degré  $l$  du mode. Ceci implique que, pour certains modes d'oscillation pour lesquels la fréquence est détectée dans tous les filtres du système utilisé, la comparaison des amplitudes des différents filtres nous permet de dériver le degré  $l$  du mode.

Pour réaliser l'identification d'un mode, une expression théorique de l'amplitude photométrique d'une étoile pulsante est dérivée comme étant une fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  et du degré  $l$  du mode de pulsation (C. Aerts: ASTEROSEISMOLOGY 'Lecture notes by Conny Aerts, Catholic University of Leuven) :

$$\begin{aligned} \bar{A}_{l,R}(\lambda) = & \bar{A}b_{l\lambda} \left\{ -(l-1)(l+2) + [l(l+1)K - 4 - K^{-1}] \right. \\ & \times \left[ S \frac{\Gamma_2 - 1}{\Gamma_2} \left( \left( \frac{\partial \log F_{\lambda}^+}{\partial \log T_{eff}} \right)_g + \left( \frac{\partial \log b_{l\lambda}}{\partial \log T_{eff}} \right)_g \right) \right. \\ & \left. \left. + \left( \frac{\partial \log g}{\partial \log p} \right)_{\tau=1} \left( \left( \frac{\partial \log F_{\lambda}^+}{\partial \log g} \right)_{T_{eff}} + \left( \frac{\partial \log b_{l\lambda}}{\partial \log g} \right)_{T_{eff}} \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

Dans cette expression,  $F_{\lambda}^+$  est le flux stellaire émergent,  $g$  la gravité stellaire,  $A$  est une fonction indépendante de  $\lambda$  et déterminée par le genre du mode et par l'angle d'inclinaison de l'étoile.

$K = \frac{GM}{\omega^2 R^3}$ .  $S \in [0,1]$  dépend des effets adiabatiques ( $S=1$  : pulsation adiabatique).  $\Gamma_2$  est le

troisième coefficient adiabatique généralisé. Finalement  $b_{l\lambda} = \int_0^1 h_{\lambda} \mu P_l(\mu) d\mu$  avec

$h_{\lambda}(\theta) = 1 - u_{\lambda} + u_{\lambda} \cos \theta$  où  $u_{\lambda} \in [0,1]$  est le coefficient du limb-darkening.

La constante  $A$  ne dépend pas de  $\lambda$ . Par conséquent, en calculant l'expression ci-dessus pour des différentes valeurs de  $l$  et  $\lambda$ , et en comparant les résultats avec les amplitudes photométriques observées aux mêmes longueurs d'onde, on peut déterminer la valeur du degré  $l$  qui s'ajuste au mieux aux observations. Ceci est réalisé en considérant le rapport des amplitudes des différentes valeurs de  $l$ , de façon à éliminer  $\bar{A}$ .

## Références

- 1-** C. Aerts: ASTEROSEISMOLOGY ‘Lecture notes by Conny Aerts, Catholic University of Leuven, Academic year 2003 – 2004’.
- 2-** S. Agrain et al.: ‘Characterizing stellar micro-variability for planetary transit searches – Astronomy & Astrophysics 414, 1139–1152 (2004)’.
- 3-** A. Baglin: ‘Minutes of the 4th scientific committee’ – 22 March 2005.
- 4-** L.A. Balona et al.: ‘ $\gamma$  Doradus : evidence for a new class of pulsating star – Mon. Not. R. Astron. Soc. 270, 905–913 (1994)’.
- 5-** M. Berger et F. Beichbuchner: ‘ $\gamma$  Doradus and  $\delta$  Scuti stars: cousins or twins? – Astronomy and Astrophysics, 313, 851–856 (1996)’.
- 6-** P. De Cat: ‘An observational study of bright southern slowly pulsating B stars – Thesis – Catholic University of Leuven 2001’.
- 7-** J.P. Cox: ‘Theory of stellar pulsation, Princeton series in astrophysics (1980)’.
- 8-** L. Eyer: ‘First thoughts about variable star analysis – Baltic Astronomy, Vol. 8, 321–324 (1999)’.
- 9-** G. Handler: ‘Mon. Not. R. Astron. Soc. 309, L19–L23 (1999)’.
- 10-** A.B. Kaye et al.: ‘Publications of the astronomical Soc. Of the Pacific, 111: 840–844 (1999)’.
- 11-** K. R. Lang: ‘Astrophysical Formulae – Second Edition 1980’.
- 12-** P. Mathias: ‘Une approche des mouvements atmosphériques non-linéaires dans les étoiles variables  $\beta$  Céphéides de forte amplitude – Thèse Université paris VII (1992)’.
- 13-** P. Mathias et al.: ‘Spectroscopic study of  $\gamma$  Doradus stars in potential COROT fields – Proc. 4<sup>th</sup> COROT week, Marseille, 2–6 June 2003’.
- 14-** P. Mathias et al.: ‘Multi-site, multi-technique survey of  $\gamma$  Doradus candidates – Astronomy and Astrophysics 417, 189–199 (2004)’.
- 15-** E. Poretti et al.: ‘Preparing the COROT space mission: new variable stars in the galactic Anticenter direction’.
- 16-** A.C. Robin et al.: ‘A synthetic view on structure and evolution of the Milky Way – Astronomy & Astrophysics, 409, 523–540 (2003)’.
- 17-** W.W. Weiss et al.: ‘Additional science potential for COROT – Proc. 2<sup>nd</sup> Eddington workshop ‘Stellar structure and habitable planet finding’, Palermo, 9–11 April 2003’.

# ANNEXES

## I- Analyse des périodes basée sur l'analyse de Fourier :

Dans l'analyse des périodes par la méthode de Fourier, on essaye de définir une fonction de fréquences testes d'une telle manière qu'elle aura un extremum pour la fréquence teste la plus proche de la vraie fréquence présente dans les données. Le graphe de cette fonction s'appelle le périodogramme (Fig.1). Nous allons ici rappeler quelques propriétés utiles de l'analyse de Fourier.

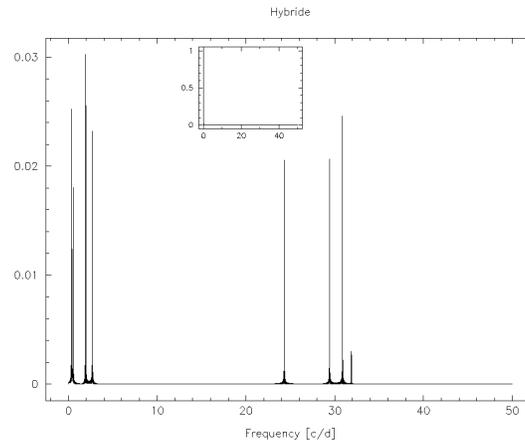


Fig.1

La transformée de Fourier d'une fonction  $x(t)$  qui respecte les conditions nécessaires de continuité et de dérivabilité, est donnée par :

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(2\pi i \nu t) dt$$

Toutefois, quand nous exécutons cette transformation, nous nous déplaçons du domaine de temps (Fig.2) au domaine de fréquence (Fig.3). La transformée de Fourier de la fonction constante 1 étant la fonction delta de Dirac ou encore le Dirac :

$$\delta(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(2\pi i \nu t) dt ,$$

qui a les propriétés suivantes :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\nu) d\nu = 1 , \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\nu - \xi) g(\nu) d\nu = g(\xi).$$

la détermination de période à partir de l'analyse de Fourier est basée sur le fait que la transformée de Fourier  $F(\nu)$  d'une fonction  $x(t)$ , qui peut être écrite en termes de somme de fonctions harmoniques avec des fréquences  $\nu_1, \dots, \nu_n$  et des amplitudes  $\bar{A}_1, \dots, \bar{A}_n$  est donné par :

$$x(t) = \sum_{k=1}^n \bar{A}_k \exp(2\pi i \nu_k t),$$

$$F(\nu) = \sum_{k=1}^n \bar{A}_k \delta(\nu - \nu_k).$$

Toutefois, la fonction  $x(t)$  est sinusoïdale avec une fréquence  $\nu_1$ , la transformée de Fourier de  $x$  est seulement différente de zéro pour  $\nu = \nu_1$  et  $\nu = -\nu_1$ . La transformée de Fourier d'une fonction  $x(t)$  multipériodique, qui est la somme de  $n$  fonctions harmoniques avec des fréquences  $\nu_1, \dots, \nu_n$ , est une somme de fonctions  $\delta$  qui sont différentes de zéro pour les fréquences  $\pm \nu_1, \dots, \pm \nu_n$ .

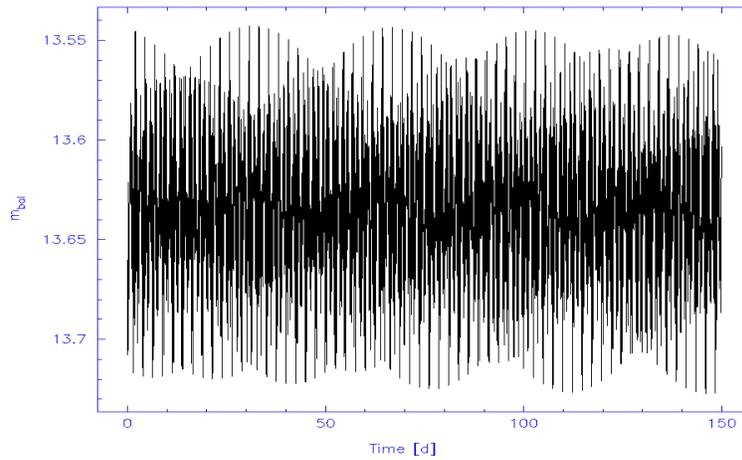


Fig.2

G Doradus 1

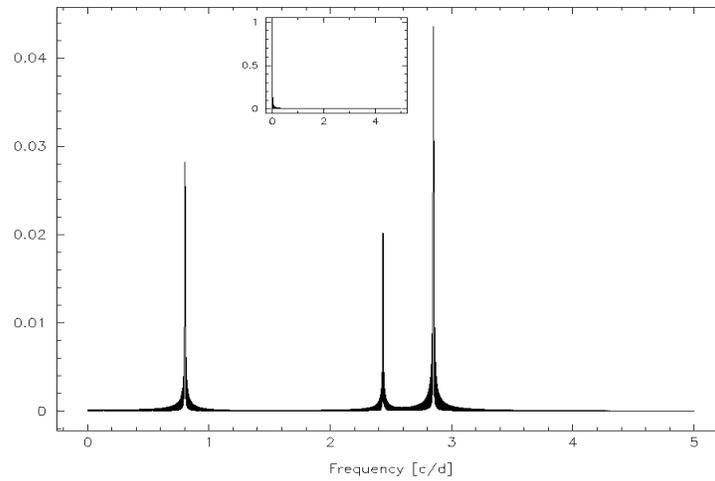


Fig.3

## II- SIMCOROT :

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C                                                                 C
C                               SIMCOROT.FOR                       C
C Ce code est écrit en FORTRAN 77, il classe les étoiles obtenue  C
C par le modèle de Besançon suivant leurs classes de luminosité   C
C (CL), leurs types spectraux (st) et leurs magnitudes absolues  C
C (Mv). Puis il les met aléatoirement sur un champ ayant les mêmes C
C dimensions des CCDs du satellite COROT. Il donne des valeurs   C
C aléatoires des fréquences, des amplitudes et des phases de chaque C
C étoile variable et enfin il simule des courbes de lumière des  C
C étoiles se trouvant dans un masque choisi.                       C
C                                                                 C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```
PROGRAM SIMCOROT
```

```

    Implicit None
    Integer*4 i, j, dime, dimp, nc, nb, np
    Parameter (nc=8, dime=30000, dimp=20)
    Real*4 STAR(dime, dimp), ISTAR(nc, dime, dimp)

```

```

    nb=dime
    np=dimp
    Call Lecture (nc, nb, np, STAR, ISTAR)
    Call RepPuls (np)
    Call Mask (np)
    Call Light

```

```
End
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```
Subroutine Light
```

```

    Implicit None
    Integer*4 i, j, k, ii, nb, dime, jsdflt, nbf, dimt
    Parameter (dime=100, dimt=13500)
    Integer*4 NF(dime)
    Real*4 A(dime, dime), F(dime, dime), P(dime, dime), ALEA(4), mb(dime),
    &      AA(dime), FF(dime), PP(dime), V(dime), T(dimt), FLUX(dimt),
    &      time, dpi, som, xmin, xmax, ymin, ymax, et, mbol, fact, somf,
    &      xx, bruit

```

```
801 Format (1x, i2, 1x, f7.3, 1x, f7.3)
```

```
802 Format (1x, f11.6, 1x, f11.6)
```

```
    dpi=4.*Acos(0.)
```

```
    jsdflt=15695
```

```
    i=1
```

```
    xmin=1.e10
```

```
    xmax=-xmin
```

```
    ymin=1.e10
```

```
    ymax=-ymin
```

```
    Open (Unit=11, File='mstars.dat', Status='unknown')
```

```
    Open (Unit=12, File='four.dat', Status='unknown')
```

```
99 Read (11, 801, End=1099) k, V(i), mb(i)
```

```
    Call Ranlux(ALEA, 1, jsdflt)
```

```
    If (k.eq.1) Then
```

```
        nbf=Int(ALEA(1)*9.)+1
```

```
        Do j=1, nbf
```

```
            jsdflt=jsdflt+1
```

```
            Call Ranlux(ALEA, 3, jsdflt)
```

```
            AA(j)=ALEA(1)*30.
```

```

        FF(j)=ALEA(2)*10.
        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.2) Then
    nbf=Int(ALEA(1)*9.)+1
    Do j=1,nbf
        jsdflt=jsdflt+1
        Call Ranlux(ALEA,3,jsdflt)
        AA(j)=ALEA(1)*30.
        FF(j)=(ALEA(2)*(3.-0.3))+0.3
        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.3) Then
    nbf=Int(ALEA(1)*49.)+1
    Do j=1,nbf
        jsdflt=jsdflt+1
        Call Ranlux(ALEA,3,jsdflt)
        AA(j)=(ALEA(1)*(50.-1.))+1
        FF(j)=(ALEA(2)*(50.-3.))+3
        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.4) Then
    nbf=Int(ALEA(1)*9.)+1
    Do j=1,nbf
        jsdflt=jsdflt+1
        Call Ranlux(ALEA,3,jsdflt)
        AA(j)=ALEA(1)*50.
        FF(j)=(ALEA(2)*(3.-0.3))+0.3
        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.7) Then
    nbf=Int(ALEA(1)*19.)+1
    Do j=1,nbf
        jsdflt=jsdflt+1
        Call Ranlux(ALEA,3,jsdflt)
        AA(j)=ALEA(1)*30.
        FF(j)=(ALEA(2)*(50.-0.3))+0.3
        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.6) Then
    nbf=Int(ALEA(1)*1.)+1
    Do j=1,nbf
        jsdflt=jsdflt+1
        Call Ranlux(ALEA,3,jsdflt)
        AA(j)=ALEA(1)*1200.
        FF(j)=(ALEA(2)*(1.-0.01))+0.01
        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.5) Then
    nbf=Int(ALEA(1)*1.)+1
    Do j=1,nbf
        jsdflt=jsdflt+1
        Call Ranlux(ALEA,3,jsdflt)
        AA(j)=ALEA(1)*2000.
        FF(j)=(ALEA(2)*(0.01-0.001))+0.001

```

```

        PP(j)=ALEA(3)*dpi
    End Do
End If
If (k.eq.8) nbf=0
Write (12,801) k,V(i),mb(i)
Do j=1,nbf
    Write (12,*) j,AA(j),FF(j),PP(j)
End Do
NF(i)=nbf
Do j=1,nbf
    A(i,j)=AA(j)
    F(i,j)=FF(j)
    P(i,j)=PP(j)
End Do
i=i+1
Go To 99
1099 Continue
Close (12)
Close (11)
nb=i-1
Open (Unit=10,File='lcurve.dat',Status='unknown')
Do ii=1,dimt
    time=Float(ii-1)/Float(dimt-1)
    time=time*150.
    somf=0.
    Do i=1,nb
        som=0.
        Call RanLux(ALEA,1,jsdflt)
        jsdflt=jsdflt+1
        bruit=(ALEA(1)-0.5)*2.e-4
        Do j=1,NF(i)
            som=som+A(i,j)*Cos(dpi*F(i,j)*time + P(i,j))
        End Do
        mbol=mb(i)+som*1.e-3+bruit
        fact=2.52e-5*10.**(-0.4*mbol)
        somf=somf+fact
    End Do
    somf=-2.5*Log10(somf/2.52e-5)
    Write (10,802) time,somf
    xmin=Min(xmin,time)
    xmax=Max(xmax,time)
    ymin=Min(ymin,somf)
    ymax=Max(ymax,somf)
    T(ii)=time
    FLUX(ii)=somf
End Do
Close (10)
et=xmax-xmin
xmin=xmin-0.05*et
xmax=xmax+0.05*et
et=ymax-ymin
ymin=ymin-0.05*et
ymax=ymax+0.05*et
Call pgbegin (0,'/cps',1,1)
Call pgsci(4)
Call pgvport (0.10,0.90,0.10,0.90)
Call pglable ('Time [d]','m\|dbol\|u','')
Call pgvport (0.15,0.90,0.10,0.90)
Call pgwindow (xmin,xmax,ymax,ymin)
Call pgbox ('BCTSN',0.0,0,'BCTSNV',0.0,0)
Call pgsci(1)

```

```

Call pglne (dimt,T,FLUX)
Call pgend

Return
End
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
Subroutine Mask (np)
Implicit None
Integer*4 i,j,k,n,nb,np,dime,
&      ix1,ix2,iy1,iy2
Parameter (dime=30000)
Real*4 STAR(dime,np),
&      x1,x2,y1,y2,xs,ys,mb
Character rep*1
Character*20 NOM(8)

NOM(1)='BetaCep.dat'
NOM(2)='SPB.dat'
NOM(3)='DeltaScuti.dat'
NOM(4)='GamDor.dat'
NOM(5)='LongP.dat'
NOM(6)='Cepheid.dat'
NOM(7)='Hybrid.dat'
NOM(8)='Rest.dat'
801 Format (f7.3,f6.2,f3.0,f5.2,f6.3,f6.2,f3.0,f5.2,5(f7.3),
&      f6.2,2(f10.5),2(f7.3),2(f9.3))
802 Format (1x,i2,1x,f7.3,1x,f7.3)
ix1=1300
ix2=ix1+100
iy1=0
iy2=iy1+50
x1=Float(ix1)
x2=Float(ix2)
y1=Float(iy1)
y2=Float(iy2)
Open (Unit=10,File='mstars.dat',Status='unknown')
Do k=1,8
i=1
Open (Unit=10+k,File=NOM(k),Status='old')
99 Read (10+k,801,End=1099) (STAR(i,j),j=1,np)
xs=STAR(i,19)
ys=STAR(i,20)
If ((xs.ge.x1).And.(xs.le.x2).And.
&      (ys.ge.y1).And.(ys.le.y2)) Then
mb=STAR(i,18)-STAR(i,2)+STAR(i,13)
Write (10,802) k,STAR(i,13),mb
End If
i=i+1
Go To 99
1099 Continue
Close (10+k)
End Do
Close (10)

Return
End
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
Subroutine RepPuls (np)
Implicit None
Integer*4 i,j,k,n,nb,np,dime,nccd
Parameter (dime=30000,nccd=2048)

```

```

Real*4 STARK(dime,np),X(dime),Y(dime)
Character rep*1
Character*20 NOM(8)

NOM(1)='Rest.dat'
NOM(2)='BetaCep.dat'
NOM(3)='SPB.dat'
NOM(4)='DeltaScuti.dat'
NOM(5)='GamDor.dat'
NOM(6)='LongP.dat'
NOM(7)='Cepheid.dat'
NOM(8)='Hybrid.dat'
801 Format (f7.3,f6.2,f3.0,f5.2,f6.3,f6.2,f3.0,f5.2,5(f7.3),
&         f6.2,2(f10.5),2(f7.3),2(f9.3))
Call pgbegin (0, '/cps',1,1)
Call pgvport (0.10,0.90,0.10,0.90)
Call pglabel ('Pixel X','Pixel Y','')
Call pgwindow (0.,Float(nccd),0.,Float(nccd))
Call pgbox ('BCTSN',0.0,0,'BCTSNV',0.0,0)
Do k=1,8
    Open (Unit=11,File=NOM(k),Status='old')
    i=1
99    Read (11,801,End=1099) (STARK(i,j),j=1,np)
        X(i)=STARK(i,19)
        Y(i)=STARK(i,20)
        i=i+1
        Go To 99
1099  Continue
    Close (11)
    n=i-1
    Call pgsci(k)
    If (k.eq.1) Then
        Call pgpoint (n,X,Y,1)
    Else
        Call pgpoint (n,X,Y,17)
    End If
End Do
Call pgend
Call pgbegin (0, '/cps',1,1)
Call pgvport (0.10,0.90,0.10,0.90)
Call pglabel ('Log(T\deff\u)', 'Mv', '')
Call pgwindow (4.4,3.4,5.,-5.5)
Call pgbox ('BCTSN',0.0,0,'BCTSNV',0.0,0)
Do k=1,8
    Open (Unit=11,File=NOM(k),Status='old')
    i=1
98    Read (11,801,End=1098) (STARK(i,j),j=1,np)
        X(i)=STARK(i,5)
        Y(i)=STARK(i,18)
        i=i+1
        Go To 98
1098  Continue
    Close (11)
    n=i-1
    Call pgsci(k)
    If (k.eq.1) Then
        Call pgpoint (n,X,Y,1)
    Else
        Call pgpoint (n,X,Y,17)
    End If
End Do

```



```

End If
If ((st.ge.3.8).And.(st.lt.4.6)) Then
  If ((Mv.ge.2.6).And.(Mv.le.4.7)) Then
    Do j=1,np
      ISTAR(4,NGFT(4)+1,j)=STAR(i,j)
    End Do
    flag=1
    flaggd=1
    NGFT(4)=NGFT(4)+1
  End If
End If
If ((st.ge.3.).And.(st.lt.4.3)) Then
  If ((Mv.ge..5).And.(Mv.le.3.)) Then
    Do j=1,np
      ISTAR(3,NGFT(3)+1,j)=STAR(i,j)
    End Do
    flag=1
    flagds=1
    NGFT(3)=NGFT(3)+1
  End If
End If
If ((st.ge.2.3).And.(st.lt.2.7)) Then
  If ((Mv.ge.-2.).And.(Mv.le.0.)) Then
    Do j=1,np
      ISTAR(2,NGFT(2)+1,j)=STAR(i,j)
    End Do
    flag=1
    NGFT(2)=NGFT(2)+1
  End If
End If
End If
If ((cl.le.2.).And.(cl.ge.1.)) Then
  If ((st.ge.5.).And.(st.lt.7.6)) Then
    If ((Mv.ge.-3.4).And.(Mv.le.-.7)) Then
      Do j=1,np
        ISTAR(7,NGFT(7)+1,j)=STAR(i,j)
      End Do
      flag=1
      NGFT(7)=NGFT(7)+1
    End If
  End If
End If
If ((st.ge.3.).And.(st.lt.4.6)) Then
  If ((Mv.ge.-6.1).And.(Mv.le.-2.)) Then
    Do j=1,np
      ISTAR(6,NGFT(6)+1,j)=STAR(i,j)
    End Do
    flag=1
    NGFT(6)=NGFT(6)+1
  End If
End If
End If
If ((flagds.eq.1).And.(flaggd.eq.1)) Then
  Do j=1,np
    ISTAR(5,NGFT(5)+1,j)=STAR(i,j)
  End Do
  flag=1
  NGFT(5)=NGFT(5)+1
  NGFT(3)=NGFT(3)-1
  NGFT(4)=NGFT(4)-1
End If
If (flag.eq.0) Then

```

```

        Do j=1,np
            ISTAR(8,NGFT(8)+1,j)=STAR(i,j)
        End Do
        NGFT(8)=NGFT(8)+1
    End If
End Do
Do k=1,7
    UT(k)=10+k
    st=Float(NGFT(k))*0.3 - Float(Int(Float(NGFT(k))*0.3))
    NGF(k)=Int(Float(NGFT(k))*0.3)
    If (st.ge.0.5) NGF(k)=NGF(k)+1
End Do
Write (*,901) NGFT(1),NGF(1)
Write (*,902) NGFT(2),NGF(2)
Write (*,903) NGFT(3),NGF(3)
Write (*,904) NGFT(4),NGF(4)
Write (*,907) NGFT(5),NGF(5)
Write (*,905) NGFT(6),NGF(6)
Write (*,906) NGFT(7),NGF(7)
NAME(1)='BetaCep.dat'
NAME(2)='SPB.dat'
NAME(3)='DeltaScuti.dat'
NAME(4)='GamDor.dat'
NAME(5)='Hybrid.dat'
NAME(6)='Cepheid.dat'
NAME(7)='LongP.dat'
Open (Unit=10,File='Rest.dat',Status='unknown')
Write (*,*) NGFT(8)
Do i=1,NGFT(8)
    Write (10,803) (ISTAR(8,i,j),j=1,np)
End Do
Do k=1,7
    Open (Unit=UT(k),File=NAME(k),Status='unknown')
    Do i=1,NGF(k)
        Write (UT(k),803) (ISTAR(k,i,j),j=1,np)
    End Do
    Do i=NGF(k)+1,NGFT(k)
        Write (10,803) (ISTAR(k,i,j),j=1,np)
        nrst=nrst+1
    End Do
    Close (UT(k))
End Do
Close (10)

Return
End
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   SUBROUTINE RANLUX(RVEC,LENV,JSDFLT)
C       Subtract-and-borrow random number generator proposed by
C       Marsaglia and Zaman, implemented by F. James with the name
C       RCARRY in 1991, and later improved by Martin Luescher
C       in 1993 to produce "Luxury Pseudorandom Numbers".
C       Fortran 77 coded by F. James, 1993
C
C       references:
C   M. Luscher, Computer Physics Communications 79 (1994) 100
C   F. James, Computer Physics Communications 79 (1994) 111
C
C   LUXURY LEVELS.
C   -----
C       The available luxury levels are:
C
C   level 0 (p=24): equivalent to the original RCARRY of Marsaglia
C                   and Zaman, very long period, but fails many tests.

```

```

C level 1 (p=48): considerable improvement in quality over level 0,
C now passes the gap test, but still fails spectral test.
C level 2 (p=97): passes all known tests, but theoretically still
C defective.
C level 3 (p=223): DEFAULT VALUE. Any theoretically possible
C correlations have very small chance of being observed.
C level 4 (p=389): highest possible luxury, all 24 bits chaotic.
C
C!!! ++++++
C!!! Calling sequences for RANLUX: ++
C!!! CALL RANLUX (RVEC, LEN) returns a vector RVEC of LEN ++
C!!! 32-bit random floating point numbers between ++
C!!! zero (not included) and one (also not incl.). ++
C!!! CALL RLUXGO(LUX,INT,K1,K2) initializes the generator from ++
C!!! one 32-bit integer INT and sets Luxury Level LUX ++
C!!! which is integer between zero and MAXLEV, or if ++
C!!! LUX .GT. 24, it sets p=LUX directly. K1 and K2 ++
C!!! should be set to zero unless restarting at a break++
C!!! point given by output of RLUXAT (see RLUXAT). ++
C!!! CALL RLUXAT(LUX,INT,K1,K2) gets the values of four integers++
C!!! which can be used to restart the RANLUX generator ++
C!!! at the current point by calling RLUXGO. K1 and K2++
C!!! specify how many numbers were generated since the ++
C!!! initialization with LUX and INT. The restarting ++
C!!! skips over K1+K2*E9 numbers, so it can be long.++
C!!! A more efficient but less convenient way of restarting is by: ++
C!!! CALL RLUXIN(ISVEC) restarts the generator from vector ++
C!!! ISVEC of 25 32-bit integers (see RLUXUT) ++
C!!! CALL RLUXUT(ISVEC) outputs the current values of the 25 ++
C!!! 32-bit integer seeds, to be used for restarting ++
C!!! ISVEC must be dimensioned 25 in the calling program ++
C!!! ++++++
DIMENSION RVEC(LENV)
DIMENSION SEEDS(24), ISEEDS(24), ISDEXT(25)
PARAMETER (MAXLEV=4, LXDFLT=4)
DIMENSION NDSKIP(0:MAXLEV)
DIMENSION NEXT(24)
PARAMETER (TWOP12=4096., IGIGA=1000000000)
PARAMETER (ITWO24=2**24, ICONS=2147483563)
SAVE NOTYET, I24, J24, CARRY, SEEDS, TWOM24, TWOM12, LUXLEV
SAVE NSKIP, NDSKIP, IN24, NEXT, KOUNT, MKOUNT, INSEED
INTEGER LUXLEV
LOGICAL NOTYET
DATA NOTYET, LUXLEV, IN24, KOUNT, MKOUNT /.TRUE., LXDFLT, 0,0,0/
DATA I24,J24,CARRY/24,10,0./

C
C default
C Luxury Level 0 1 2 *3* 4
DATA NDSKIP/0, 24, 73, 199, 365 /
Corresponds to p=24 48 97 223 389
C time factor 1 2 3 6 10 on slow workstation
C 1 1.5 2 3 5 on fast mainframe
C
C NOTYET is .TRUE. if no initialization has been performed yet.
C Default Initialization by Multiplicative Congruential
IF (NOTYET) THEN
NOTYET = .FALSE.
JSEED = JSDFLT
INSEED = JSEED
c WRITE(6,'(A,I12)') 'RANLUX DEFAULT INITIALIZATION: ',JSEED
LUXLEV = LXDFLT
NSKIP = NDSKIP(LUXLEV)
LP = NSKIP + 24
IN24 = 0
KOUNT = 0
MKOUNT = 0
c WRITE(6,'(A,I2,A,I4)') 'DEFAULT LEVEL = ',LUXLEV,' p =',LP
TWOM24 = 1.

```

```

DO 25 I= 1, 24
    TWOM24 = TWOM24 * 0.5
    K = JSEED/53668
    JSEED = 40014*(JSEED-K*53668) -K*12211
    IF (JSEED .LT. 0) JSEED = JSEED+ICONS
    ISEEDS(I) = MOD(JSEED,ITWO24)
25 CONTINUE
    TWOM12 = TWOM24 * 4096.
    DO 50 I= 1,24
    SEEDS(I) = REAL(ISEEDS(I))*TWOM24
    NEXT(I) = I-1
50 CONTINUE
    NEXT(1) = 24
    I24 = 24
    J24 = 10
    CARRY = 0.
    IF (SEEDS(24) .EQ. 0.) CARRY = TWOM24
ENDIF
C
C     The Generator proper: "Subtract-with-borrow",
C     as proposed by Marsaglia and Zaman,
C     Florida State University, March, 1989
C
DO 100 IVEC= 1, LENV
UNI = SEEDS(J24) - SEEDS(I24) - CARRY
IF (UNI .LT. 0.) THEN
    UNI = UNI + 1.0
    CARRY = TWOM24
ELSE
    CARRY = 0.
ENDIF
SEEDS(I24) = UNI
I24 = NEXT(I24)
J24 = NEXT(J24)
RVEC(IVEC) = UNI
C small numbers (with less than 12 "significant" bits) are "padded".
IF (UNI .LT. TWOM12) THEN
    RVEC(IVEC) = RVEC(IVEC) + TWOM24*SEEDS(J24)
C and zero is forbidden in case someone takes a logarithm
IF (RVEC(IVEC) .EQ. 0.) RVEC(IVEC) = TWOM24*TWOM24
ENDIF
C Skipping to luxury. As proposed by Martin Luscher.
IN24 = IN24 + 1
IF (IN24 .EQ. 24) THEN
    IN24 = 0
    KOUNT = KOUNT + NSKIP
    DO 90 ISK= 1, NSKIP
    UNI = SEEDS(J24) - SEEDS(I24) - CARRY
    IF (UNI .LT. 0.) THEN
        UNI = UNI + 1.0
        CARRY = TWOM24
    ELSE
        CARRY = 0.
    ENDIF
    SEEDS(I24) = UNI
    I24 = NEXT(I24)
    J24 = NEXT(J24)
90 CONTINUE
ENDIF
100 CONTINUE
KOUNT = KOUNT + LENV
IF (KOUNT .GE. IGIGA) THEN
    MKOUNT = MKOUNT + 1
    KOUNT = KOUNT - IGIGA
ENDIF
RETURN
C
C     Entry to input and float integer seeds from previous run

```

```

ENTRY RLUXIN(ISDEXT)
C-----added to fix `bug'-----
  IF (NOTYET) THEN
*****$#--1--_--2--_--3--_--4--_--5--_--6--_--7--
  WRITE(6, '(A)') ' PROPER RESULTS ONLY WITH INITIALISATION FROM
$25 INTEGERS OBTAINED WITH RLUXUT'
  NOTYET = .FALSE.
C-----
  ENDIF
  TWOM24 = 1.
  DO 195 I= 1, 24
  NEXT(I) = I-1
195  TWOM24 = TWOM24 * 0.5
  NEXT(1) = 24
  TWOM12 = TWOM24 * 4096.
  WRITE(6, '(A)') ' FULL INITIALIZATION OF RANLUX WITH 25 INTEGERS:'
  WRITE(6, '(5X,5I12)') ISDEXT
  DO 200 I= 1, 24
  SEEDS(I) = REAL(ISDEXT(I))*TWOM24
200  CONTINUE
  CARRY = 0.
  IF (ISDEXT(25) .LT. 0) CARRY = TWOM24
  ISD = IABS(ISDEXT(25))
  I24 = MOD(ISD,100)
  ISD = ISD/100
  J24 = MOD(ISD,100)
  ISD = ISD/100
  IN24 = MOD(ISD,100)
  ISD = ISD/100
  LUXLEV = ISD
  IF (LUXLEV .LE. MAXLEV) THEN
    NSKIP = NDSKIP(LUXLEV)
    WRITE (6, '(A,I2)') ' RANLUX LUXURY LEVEL SET BY RLUXIN TO: ',
+      LUXLEV
  ELSE IF (LUXLEV .GE. 24) THEN
    NSKIP = LUXLEV - 24
    WRITE (6, '(A,I5)') ' RANLUX P-VALUE SET BY RLUXIN TO:',LUXLEV
  ELSE
    NSKIP = NDSKIP(MAXLEV)
    WRITE (6, '(A,I5)') ' RANLUX ILLEGAL LUXURY RLUXIN: ',LUXLEV
    LUXLEV = MAXLEV
  ENDIF
  INSEED = -1
  RETURN
C
C      Entry to ouput seeds as integers
ENTRY RLUXUT(ISDEXT)
DO 300 I= 1, 24
  ISDEXT(I) = INT(SEEDS(I)*TWOP12*TWOP12)
300  CONTINUE
  ISDEXT(25) = I24 + 100*J24 + 10000*IN24 + 1000000*LUXLEV
  IF (CARRY .GT. 0.) ISDEXT(25) = -ISDEXT(25)
  RETURN
C
C      Entry to output the "convenient" restart point
ENTRY RLUXAT(LOUT,INOUT,K1,K2)
LOUT = LUXLEV
INOUT = INSEED
K1 = KOUNT
K2 = MKOUNT
RETURN
C
C      Entry to initialize from one or three integers
ENTRY RLUXGO(LUX,INS,K1,K2)
IF (LUX .LT. 0) THEN
  LUXLEV = LXDFLT
ELSE IF (LUX .LE. MAXLEV) THEN
  LUXLEV = LUX

```

```

ELSE IF (LUX .LT. 24 .OR. LUX .GT. 2000) THEN
  LUXLEV = MAXLEV
  WRITE (6, '(A,I7)') ' RANLUX ILLEGAL LUXURY RLUXGO: ',LUX
ELSE
  LUXLEV = LUX
  DO 310 ILX= 0, MAXLEV
    IF (LUX .EQ. NDSKIP(ILX)+24) LUXLEV = ILX
310  CONTINUE
  ENDIF
  IF (LUXLEV .LE. MAXLEV) THEN
    NSKIP = NDSKIP(LUXLEV)
    WRITE(6, '(A,I2,A,I4)') ' RANLUX LUXURY LEVEL SET BY RLUXGO :',
+     LUXLEV, ' P=', NSKIP+24
  ELSE
    NSKIP = LUXLEV - 24
    WRITE (6, '(A,I5)') ' RANLUX P-VALUE SET BY RLUXGO TO:',LUXLEV
  ENDIF
  IN24 = 0
  IF (INS .LT. 0) WRITE (6, '(A)')
+ ' Illegal initialization by RLUXGO, negative input seed'
  IF (INS .GT. 0) THEN
    JSEED = INS
    WRITE(6, '(A,3I12)') ' RANLUX INITIALIZED BY RLUXGO FROM SEEDS',
+     JSEED, K1,K2
  ELSE
    JSEED = JSDFLT
    WRITE(6, '(A)') ' RANLUX INITIALIZED BY RLUXGO FROM DEFAULT SEED'
  ENDIF
  INSEED = JSEED
  NOTYET = .FALSE.
  TWOM24 = 1.
  DO 325 I= 1, 24
    TWOM24 = TWOM24 * 0.5
    K = JSEED/53668
    JSEED = 40014*(JSEED-K*53668) -K*12211
    IF (JSEED .LT. 0) JSEED = JSEED+ICONS
    ISEEDS(I) = MOD(JSEED,ITWO24)
325  CONTINUE
  TWOM12 = TWOM24 * 4096.
  DO 350 I= 1,24
    SEEDS(I) = REAL(ISEEDS(I))*TWOM24
    NEXT(I) = I-1
350  CONTINUE
  NEXT(1) = 24
  I24 = 24
  J24 = 10
  CARRY = 0.
  IF (SEEDS(24) .EQ. 0.) CARRY = TWOM24
C   If restarting at a break point, skip K1 + IGIGA*K2
C   Note that this is the number of numbers delivered to
C   the user PLUS the number skipped (if luxury .GT. 0).
  KOUNT = K1
  MKOUNT = K2
  IF (K1+K2 .NE. 0) THEN
    DO 500 IOUTER= 1, K2+1
      INNER = IGIGA
      IF (IOUTER .EQ. K2+1) INNER = K1
      DO 450 ISK= 1, INNER
        UNI = SEEDS(J24) - SEEDS(I24) - CARRY
        IF (UNI .LT. 0.) THEN
          UNI = UNI + 1.0
          CARRY = TWOM24
        ELSE
          CARRY = 0.
        ENDIF
        SEEDS(I24) = UNI
        I24 = NEXT(I24)
        J24 = NEXT(J24)
      END DO
    END DO
  END IF

```

```

450     CONTINUE
500     CONTINUE
C       Get the right value of IN24 by direct calculation
        IN24 = MOD(KOUNT, NSKIP+24)
        IF (MKOUNT .GT. 0) THEN
            IZIP = MOD(IGIGA, NSKIP+24)
            IZIP2 = MKOUNT*IZIP + IN24
            IN24 = MOD(IZIP2, NSKIP+24)
        ENDIF
C       Now IN24 had better be between zero and 23 inclusive
        IF (IN24 .GT. 23) THEN
            WRITE (6, '(A/A,3I11,A,I5)')
+       ' Error in RESTARTING with RLUXGO:', ' The values', INS,
+       K1, K2, ' cannot occur at luxury level', LUXLEV
            IN24 = 0
        ENDIF
        ENDIF
        RETURN
        END

```