

RD-3 RTIGE-OPM-YB-03.15 Étoiles de champ

Yannick Boissel

19 avril 2013

Table des matières

I	Introduction	2
0.1	Ajouts depuis la version 14	3
0.2	Ajouts depuis la version 13	3
0.3	Ajouts depuis la version 12	3
0.4	Ajouts depuis la version 11	3
0.5	Ajouts depuis la version 10	3
0.6	Ajouts depuis la version 9	3
0.7	Ajouts depuis la version 8	3
0.8	Ajouts depuis la version 7	3
0.9	Ajouts depuis la version 6	3
0.10	Ajouts depuis la version 5	3
0.11	Ajouts depuis la version 4	4
0.12	Ajouts depuis la version 3	4
0.13	Introduction	4
II	Méthode	5
0.14	Etoiles indiscernables	6
0.14.1	Méthode de calcul de la luminosité	6
0.14.2	Afficher une galaxie moins évoluée (remonter dans le temps)	9
0.14.3	Voyager plus amont dans le temps	9
0.15	Etoiles discernables (éclater une particule)	10
0.15.1	En utilisant l'âge moyen des particules	10
0.15.2	En donnant un âge différent à chaque étoile	12
0.16	Montrer l'évolution des étoiles	13
0.17	Autres domaines de longueur d'onde	13

Première partie

Introduction

0.1 Ajouts depuis la version 14

- Passage à 2999 bandes de 1nm dans les spectres.
- Mise à jour des noms de fichiers dans le texte.

0.2 Ajouts depuis la version 13

- Ajout de l'historique des modifications

0.3 Ajouts depuis la version 12

- Réorganisation des fichiers pdf et des contenus. Le journal de bord se trouve maintenant dans un pdf à part : 09.01 "Journal de bord".
- Les informations concernant la loi d'extinction se trouvent dans le contenu 04.12 "Milieu inter-stellaire".
- Les données ont été transférées dans le contenu 10 : "Base de données astrophysiques".

0.4 Ajouts depuis la version 11

- Réorganisation de la base de données de filtres. La loi d'extinction est maintenant dans le dossier 'Spectres', et la base de données de filtres se trouve dans l'archive "Simulation d'instruments".
- **Erreur corrigée dans les cubes de diagramme HR : il y a 353 âges de 6.60 à 10.12, et non 354.**

0.5 Ajouts depuis la version 10

Passage des bandes photométriques aux spectres continus et filtres.

0.6 Ajouts depuis la version 9

Une correction de la position et des vitesses du centre de gravité de la Galaxie a été apportée. Par conséquent toutes les particules ont vu leurs positions et vitesses modifiées légèrement, et les âges donnés aux particules étoiles du disque ont été recalculés.

0.7 Ajouts depuis la version 8

Nouveau modèle dynamique de la librairie GaLMeR, avec 30 millions de particules, et 1.21 Gyr d'évolution (contre 80000 particules et 500Myr d'évolution pour le précédent)

0.8 Ajouts depuis la version 7

Quelques erreurs corrigées dans la description du format des fichiers de données.

0.9 Ajouts depuis la version 6

On utilise maintenant le modèle de Galaxie de Françoise Combes et Paola DiMatteo.

0.10 Ajouts depuis la version 5

Naines brunes.

0.11 Ajouts depuis la version 4

- J’ai corrigé une erreur dans l’algorithme qui compte les étoiles mortes.
- J’ai ajouté la normalisation dans le calcul des couleurs moyennes, comme l’a proposé Mikael Lemercier.
- J’ai élargi l’intervalle de luminosité en bande V pour les cubes de données (-4.0 ; 6.5).

0.12 Ajouts depuis la version 3

J’ai corrigé des erreurs dans la normalisation des diagrammes HR, et les données sont en ASCII et non plus en FITS. J’ai aussi augmenté le nombre (de 10^6 à 10^8) d’étoiles utilisées pour calculer la carte d’âge, afin de pouvoir voir les étoiles très jeunes ($\log_{10}(\text{age}) < 7.22$).

0.13 Introduction

Ce document explique comment simuler les étoiles qui ne sont pas dans des amas, autrement appelées ”étoiles de champ”.

Le format des données a été choisi pour maximiser la précision des informations scientifiques tout en minimisant la mémoire utilisée et le temps de calcul nécessaire. Egalement, il tient compte de l’avenir du projet, puisqu’il permet de faire vieillir ou rajeunir les étoiles. Ce format de données permet à la fois de voir la Galaxie de loin, sans discerner les étoiles, ou bien de près en discernant les étoiles, et ces deux approches sont indépendantes.

En utilisant des histogrammes de diagrammes HR calculés à des âges différents et des cartes de paramètres stellaires, calculés à partir d’isochrones, on réduit d’un facteur 40 la mémoire utilisée. Ces fichiers d’isochrones pèsent dans les 300 Mo s’ils incluent les étoiles mortes, et les cubes de données que j’ai construits pèsent dans les 7 Mo, et ils incluent les étoiles mortes.

Ce format est également utilisé pour les amas d’étoiles, afin d’uniformiser et de simplifier les formats de données scientifiques.

Les données permettent de simuler le disque (étoiles de tous âges mais surtout vieilles), le bulbe (vieux) et le halo. Les étoiles jeunes, la formation stellaire et les gaz et poussières seront traitées dans le document 04 ”Milieu interstellaire”.

Il se présente deux cas de figure pour la simulation des étoiles de champ : Le cas où l’on ne discerne pas d’étoiles, le cas où l’on discerne des étoiles.

Ce document fait référence aux données présentes dans les dossiers suivants :

- **’Modele_galaxie\Bulbe’** : le modèle GALMER pour la partie bulbe, composé de particules-étoiles.
- **’Modele_galaxie\Disque’** : le modèle GALMER pour la partie disque, composé de particules-étoiles.
- **’Modele_galaxie\Carte_ages’** : la carte d’âges des étoiles en fonction de l’altitude au plan du disque.
- **’Parametres_stellaires** : les trois sous-dossiers pour les métallicités $Z = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.04$.
- **’Filtres’** : les filtres instrumentaux.

Deuxième partie

Méthode

0.14 Etoiles indiscernables

Les particules étoiles du disque ont un âge de plus en plus jeune lorsqu'on se rapproche du plan. J'ai attribué ces âges selon des lois exponentielles de la hauteur au plan. Ces lois se chevauchent, si bien que l'on trouve des étoiles vieilles à toutes hauteurs, mais des étoiles jeunes seulement près du plan. J'ai construit une carte d'âge obéissant à ces lois, afin d'attribuer les âges. Elle se trouve dans le fichier : 'RTIGE_2011_agemap.dat'. L'âge minimal des particules étoiles est de 6.60 en $\log_{10}(\text{années})$ (et non pas 0, car les âges des isochrones commencent à 6.60 (en $\log_{10}(\text{années})$), et l'âge maximal est de 10.00 en $\log_{10}(\text{années})$ (soit 10 Gyr).

0.14.1 Méthode de calcul de la luminosité

La méthode qui suit explique comment obtenir la luminosité globale de chaque particule.

1) Choisir l'un des modèles GALMER de galaxie : cela revient à choisir la durée d'évolution de la Galaxie entre 11.79 et 13 Gyr. Autrement dit, cela revient à définir quel est l'instant présent, le modèle GALMER qui contient les étoiles d'âge 0 (dans cette autre formulation, le temps est inversé : c'est celle-ci qui nous est utile). Prenons comme instant présent le modèle 25, le plus évolué. Lire alors les deux fichiers 'RTIGE_2013_GALMER_stars_bulb_out25.dat' et 'RTIGE_2013_GALMER_stars_disc_out25.dat'

2) Mettre en mémoire les fichiers 'RTIGE_2012_HRcube_z#.dat' et 'RTIGE_18042013_spectracube_z#.dat'.

3) Calcul de la luminosité :

– nombre total initial d'étoiles d'une particule :

Le nombre total initial d'étoiles N_{ini} pour chaque particule est donnée dans les fichiers 'RTIGE_2013_GALMER_stars_bulb_out25.dat' et 'RTIGE_2013_GALMER_stars_disc_out25.dat'. C'est le nombre total d'étoiles calculé pour le cas où une particule aurait un âge de 0. Autrement dit, c'est le nombre total d'étoiles à la naissance de la particule.

Pour chaque particule, je l'ai calculé à partir du premier diagramme HR du cube correspondant à la métallicité de la particule. Ce nombre d'étoiles ne change pas avec le temps. Par contre, le nombre total d'étoiles *émettrices de lumière* diminue avec le temps, car les étoiles les plus massives deviennent des trous noirs ou des étoiles à neutrons, qui n'apparaissent pas dans les diagrammes HR.

Les diagrammes HR fournis incluent cette perte de nombre d'étoiles avec le temps. Chaque case est calculée comme étant la fraction des 1 millions d'étoiles mises au départ qui a les paramètres ($\log_{10}(L_{bol}), \log_{10}(Te)$). Une fois normalisés, ils donnent donc la probabilité qu'une étoile tirée tombe dans une case, ou bien en dehors du diagramme. Ainsi, on pourrait avoir le nombre d'étoiles "émettrices de lumière" N_{em} en faisant la somme des valeurs des cases, multipliée par N_{ini} . Mais N_{em} est une variable intermédiaire dont on n'aura pas besoin : on va utiliser N_{ini} pour tous les âges de particules, grâce à cette propriété des diagrammes HR fournis.

Pour information, voici comment est calculé N_{ini} pour une particule (**ce calcul n'a pas besoin d'être refait**) :

a) Le programme lit le diagramme HR d'âge 0 et de la métallicité Z de la particule

b) Il faut "normaliser" le diagramme HR. Les diagrammes sont calculés à partir d'un ensemble de 10^6 étoiles, et les proportions d'étoiles sont données en \log_{10} , puis multipliées par 1000. On a donc :

$$Iso_{norm} = \frac{10^{Iso/1000}}{10^6} \quad (1)$$

Cette modification est faite uniquement pour les cases non-vides. (Les autres doivent afficher 0).

c) La masse moyenne d'une étoile de la particule se calcule ainsi :

$$M_{moy} = \left[\sum_{j=0}^{nb_c^*} \frac{10^{n_j/1000}}{10^6} \times m_j \right] \quad (2)$$

nb_c^* est le nombre de cases non vides du diagramme isochrone Iso_i . n_j est la valeur de la case j du diagramme isochrone Iso_i non normalisé. m_j est la valeur de la case j de la carte de masse de métallicité Z_{Iso_i} . Cette carte de masse est présente dans le fichier 'RTIGE_2012_star_params_z#.dat' correspondant à la métallicité Z de la particule.

d) Le nombre total d'étoiles de cette particule est :

$$N_{ini} = \frac{M_{tot_{ini}}}{M_{moy}} \quad (3)$$

$M_{tot_{ini}}$ est la masse totale initiale de la particule (celle donnée par le fichier de modèle GALMER).

– **Âge d'une particule :**

L'âge a de chaque particule est donnée dans les fichiers 'RTIGE_2013_GALMER_stars_bulb_out25.dat' et 'RTIGE_2013_GALMER_stars_disc_out25.dat'. Il est donné en \log_{10} (années) avec une précision de 0.01. On peut le convertir ici en un indice $i_{HR} = (a - 6.6)/0.01$. On en aura besoin par la suite. Dans un premier temps, on fait la grosse approximation suivante : toutes les étoiles d'une particule ont le même âge.

– **Spectre d'une particule :**

Pour calculer le spectre d'une particule, on va avoir besoin de trois choses : N_{ini} , l'âge a de la particule (ou plutôt son indice i_{HR}), et sa métallicité Z qui est donnée dans les fichiers du modèle GALMER.

a) D'abord il faut lire le diagramme HR correspondant à a et Z . Pour l'âge a , il faut lire la tranche i_{HR} du cube de diagrammes HR.

b) Repérer les cases non-vides de ce diagramme et leurs coordonnées.

c) "Normaliser" le diagramme HR (appelons-le iso_a pour "isochrone" d'âge a). Ils sont calculés à partir d'un ensemble de 10^6 étoiles, et les proportions d'étoiles sont données en \log_{10} , puis multipliées par 1000. On a donc :

$$Iso_{a_{norm}} = \frac{10^{Iso_a/1000}}{10^6} \quad (4)$$

Faire attention à faire cette modification uniquement pour les cases non-vides. (Les cases qui étaient vides au départ doivent afficher 0. En effet, la puissance de 10 leur donnerait une valeur > 0).

d) Lire le cube de spectres correspondant à Z (fichier 'RTIGE_18042013_spectracube_z#.dat').

e) Multiplier chaque spectre par la valeur de la case correspondante du diagramme HR. Le spectre s'annule alors pour les cases vides du diagramme HR.

f) Faire la somme des spectres du cube ainsi modifié, et la multiplier par N_{ini} . On obtient alors le spectre global de la particule.

On peut résumer ces trois dernières étapes par :

$$L_{\lambda_{tot}} = \left[\sum_{j=0}^{nb_c} Iso_{a_{norm}_j} \times L_{\lambda_j} \right] \times N_{ini} \quad (5)$$

nb_c est le nombre de cases du diagramme HR $Iso_{a_{norm}}$ d'âge a . L_{λ_j} est le spectre associé à la case j de $Iso_{a_{norm}}$, notée $Iso_{a_{norm}_j}$. Enfin $L_{\lambda_{tot}}$ est le spectre global de la particule.

– **Extinction :**

Le calcul de l’extinction sur la ligne de visée est expliqué dans le document 04 ”Milieu inter-stellaire”. Il conduit à obtenir le coefficient $k_{ext\lambda}$, qui est fonction de la longueur d’onde λ . Les valeurs sont entre 0 et 1. Ce ”filtre” donne la proportion de flux lumineux qui parvient à l’observateur pour des petites bandes $\Delta\lambda$ de longueur d’onde de 1 nm entre 1 et 2999 nm.

Il faut multiplier $L_{\lambda_{tot}}$ par $k_{ext\lambda}$ pour appliquer l’extinction au spectre global de la particule.

– **Choix de l’instrument :**

a) On choisit ensuite un instrument d’observation. La méthode décrite ici concerne la simulation de la vision humaine, mais on peut la transposer à Hubble ou à un instrument travaillant dans l’infrarouge ou l’ultraviolet. (Voir document 08.01 ”Simulation d’instruments”). Les couleurs sont perçues par l’être humain à l’aide des cellules cônes de la rétine. On connaît leur bande passante. Il s’agit de trois pics, un dans le bleu, le filtre ’RTIGE_18042013_Eye_S_filter.dat’, un dans le vert, le filtre ’RTIGE_18042013_Eye_M_filter.dat’, et un dans le rouge, le filtre ’RTIGE_18042013_Eye_L_filter.dat’. Ces fichiers comportent deux colonnes, la première étant la longueur d’onde dans le format habituel, la seconde la transmission allant de 0 à 1. Soit les transmissions τ_S , τ_M et τ_L de ces filtres. La luminosité globale dans les trois couleurs, pour la particule est alors :

$$L_{rouge_{tot}} = \left[\sum_{\lambda=1}^{\lambda=2999} L_{\lambda_{tot}} \times k_{ext\lambda} \right] \times \tau_L \quad (6)$$

$$L_{vert_{tot}} = \left[\sum_{\lambda=1}^{\lambda=2999} L_{\lambda_{tot}} \times k_{ext\lambda} \right] \times \tau_M \quad (7)$$

$$L_{bleu_{tot}} = \left[\sum_{\lambda=1}^{\lambda=2999} L_{\lambda_{tot}} \times k_{ext\lambda} \right] \times \tau_S \quad (8)$$

Enfin, il faut convertir ces luminosités qui sont en L_{\odot} , en flux lumineux reçu par l’observateur en $W.m^{-2}$ ou ADU. On a alors pour un observateur placé à la distance d de l’objet, et en prenant celle-ci en m et la luminosité en W ($1L_{\odot} = 3.826 \times 10^{26}W$) :

$$F_{rouge_{tot}} = \frac{L_{rouge_{tot}}}{4\pi d^2} \quad (9)$$

$$F_{vert_{tot}} = \frac{L_{vert_{tot}}}{4\pi d^2} \quad (10)$$

$$F_{bleu_{tot}} = \frac{L_{bleu_{tot}}}{4\pi d^2} \quad (11)$$

b) Le choix de l’instrument peut comporter également un choix de temps de pose dans chaque filtre. (Voir document 08.01 ”Simulation d’instruments”). Le flux lumineux reçu est l’énergie reçue par seconde et par m^2 de récepteur. Pour une pose de 10 secondes, il faut alors multiplier ce flux par 10 pour avoir l’énergie reçue par m^2 . Une fois décidé du temps de pose pour chaque filtre, il suffit donc de faire :

$$F_{rouge_{tot_{pose}}} = F_{rouge_{tot}} \times T_{rouge} \quad (12)$$

$$F_{vert_{tot_{pose}}} = F_{vert_{tot}} \times T_{vert} \quad (13)$$

$$F_{bleu_{tot_{pose}}} = F_{bleu_{tot}} \times T_{bleu} \quad (14)$$

c) Enfin le choix de l’instrument peut faire intervenir un choix de résolution spatiale. En supposant la résolution du logiciel infinie, il suffit de multiplier l’image finale dans chaque filtre par la fonction sinus cardinal correspondant à l’ouverture de l’instrument. (Voir document 08 ”Simulation d’instruments”).

4) Tout est maintenant en place pour afficher le modèle GALMER correspondant à une galaxie âgée de 13 Gyr (modèle 25).

0.14.2 Afficher une galaxie moins évoluée (remonter dans le temps)

Problématique

Les modèles GALMER numérotés de 01 à 25 sont espacés de 50 Myr pour couvrir 1.21 Gyr d'évolution, et aboutir à une galaxie âgée de 13 Gyr. On a vu comment afficher cette dernière dans la section précédente.

Maintenant, si on veut remonter le temps et voir une galaxie moins évoluée, il faut redéfinir l'instant présent. Affichons par exemple une galaxie de 50 millions d'années plus jeune. Le modèle 24 est alors le présent. Il faut afficher uniquement le modèle 24. Il faut donc retrancher 50 Myr à l'âge de chaque particule. C'est ce qui a été fait, et les âges donnés par le modèle 24 présentent 50 Myr de moins (en $\log_{10}(\text{années})$) que ceux du modèle 25.

Mais alors, les particules qui avaient un âge de 0 (en pratique, 6.6 en $\log_{10}(\text{années})$) dans le modèle 25 se retrouvent avec un âge négatif. C'est qu'en fait ces étoiles n'existent pas encore au modèle 24 : il faut convertir la masse de ces particules en une masse de gaz. Les particules qui se retrouvent à avoir un âge de 0 au modèle 24 ont un âge de 6.6 en $\log_{10}(\text{années})$.

Particules étoiles

Les particules contenant des étoiles sont à traiter de la même façon que pour le cas où le modèle 25 est le présent : il faut juste faire attention à lire la bonne tranche de diagramme HR.

Particules de gaz

Les particules d'âge négatif doivent être converties en gaz. Le plus pratique est peut-être de créer un second ensemble de particules ne contenant que les particules de gaz, et les traiter séparément, de la même façon que l'on a traité la partie gaz des particules hybrides dans le document 04 "Milieu interstellaire". Donner au gaz de ces particules la métallicité qu'ont ces particules dans le modèle 24. Il n'a en effet pas été prévu dans GALMER d'évolution de la métallicité ni de gestion de la formation stellaire dans les 10 millions de particules-étoiles du disque. Il s'agit donc de faire une modification ad-hoc pour avoir un minimum de réalisme pour ces particules.

Il faut faire attention à afficher le modèle 24 de particules hybrides uniquement, pour le reste du gaz de la galaxie (voir document 04 "Milieu interstellaire").

Amas ouverts

Il faut aussi penser à ne pas afficher les amas de classe d'âge 25, qui n'existent pas encore. Il faut afficher tous les amas de classe d'âge ≤ 24 en décalant leurs âges d'un cran (50 Myr), comme expliqué dans le document 02 "Amas ouverts".

0.14.3 Voyager plus amont dans le temps

Plus on remonte le temps, plus de particules seront converties en gaz. A ce rythme, si on veut afficher le modèle 01, on aura pratiquement que du gaz à afficher.

Il faut également afficher le modèle de particules hybrides correspondant à l'instant présent que l'on a défini, pour le reste de gaz de la galaxie. Enfin, il faut n'afficher que les amas dont la classe d'âge est inférieure ou égale au numéro de modèle défini comme étant l'instant présent, et décaler leur âges d'autant de crans que nécessaire.

0.15 Étoiles discernables (éclater une particule)

0.15.1 En utilisant l'âge moyen des particules

Pour l'instant, considérons que l'âge des étoiles dans une particule est identique pour toutes les étoiles, soit l'âge moyen de la particule. On fera dans tous les cas cette approximation pour le sphéroïde (bulbe et halo, fichiers "bulb"). Voici la marche à suivre pour afficher les étoiles à l'intérieur d'une particule :

1) Nombre effectif d'étoiles : Avant toute chose, il faut calculer le nombre effectif d'étoiles N_{eff} présentes dans la particule. C'est la portion du nombre initial d'étoiles N_{ini} qui est constitué d'étoiles encore allumées à l'âge a (les autres sont devenues trous noirs et étoiles à neutrons et sont sorties du diagramme HR, bien qu'elles soient comptabilisées dans le calcul de la valeur des cases). Soit une particule d'âge a , correspondant à un indice i_{HR} , et ayant une métallicité Z . Lire le diagramme HR correspondant à ces paramètres. Le nombre effectif d'étoiles s'écrit comme :

$$N_{eff} = \left[\sum_j^{nb_c} Iso_{a_{norm}_j} \right] \times N_{ini} \quad (15)$$

$Iso_{a_{norm}}$ est le diagramme HR d'âge a . $Iso_{a_{norm}_j}$ est la valeur de la case j de $Iso_{a_{norm}}$.

2) Algorithme : Soit un cube de volume $V < V_{particule}$ et de côté d , contenant N de ces N_{eff} étoiles. Ce cube peut par exemple être un cube de la grille 3D utilisée dans le logiciel de RSA cosmos. Soient dN une variable représentant les valeurs du diagramme isochrone (correspondant à l'âge moyen de la particule), $\log(L_{bol})$, les valeurs de luminosité (bolométrique, en log décimal, et en L_{\odot}), et $\log(Te)$ les valeurs de température (en log décimal).

On va éclater ce groupe d'étoiles dans V en respectant les proportions données par le diagramme isochrone correspondant, selon l'algorithme suivant :

```
nb = 0
i = 0
while nb < N :
    x[i] = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et d.
    y[i] = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et d.
    z[i] = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et d.
    j = 0
    while j < 1 :
        log(lbol) = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme
            entre log(Lbol)min et log(Lbol)max.
        log(te) = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme
            entre log(Temin) et log(Temax).
        dn = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et dNmax.
        dNtmp = valeur de dN pour le couple (log(Lbol), log(Te)) le plus proche de (log(lbol), log(te))
            dans le diagramme isochrone.
        if dn <= dNtmp :
            On retient les valeurs log(lbol) et log(te), créant ainsi une nouvelle étoile.
            On retient également les valeurs des autres paramètres donnés par
            le modèle pour le couple (log(Lbol), log(Te)), ainsi que le spectre associé.
        j+ = 1
    i+ = 1
    nb+ = 1
```

Les variables indiquées en minuscules sont temporaires, les variables indiquées en majuscule sont liées au diagramme isochrone utilisé comme référence.

3) Luminosité : Maintenant que l'on connaît la case de diagramme isochrone correspondant à chaque étoile créée, on peut calculer leur luminosité à partir de leur spectre, de l'extinction et des

filtres simulant l'instrument d'observation, comme on l'a fait précédemment pour une particule, mais pour une seule case, on ne fait pas la somme pondérée des spectres des cases. Pour la case j , cela se traduit par cela :

$$L_{\lambda_{tot}} = \left[Iso_{a_{norm_j}} \times L_{\lambda_j} \right] \times N_{ini} \quad (16)$$

ATTENTION : pour les sommes sur un diagramme HR, il faut pondérer par N_{ini} , car les valeurs des cases donnent la proportion des étoiles initialement présentes qui sont encore allumées à l'âge a , et non pas N_{eff} , qui lui est le nombre d'étoiles à tirer pour l'âge a .

$Iso_{a_{norm}}$ est le diagramme HR d'âge a . L_{λ_j} est le spectre associé à la case j de $Iso_{a_{norm}}$, notée $Iso_{a_{norm_j}}$. Enfin $L_{\lambda_{tot}}$ est le spectre global de la particule.

0.15.2 En donnant un âge différent à chaque étoile

On peut aussi apporter de la précision à l'âge des étoiles dans une particule, au moment où on entre dedans. L'algorithme sera un peu différent si l'on donne un âge différent à chaque étoile, pour une particule qui est dans le disque. Pour une particule qui est dans le sphéroïde (bulbe et halo, fichiers "bulb"), on prend un âge identique pour chaque étoile, celui de la particule, et on utilise l'algorithme précédent.

1) Nombre effectif d'étoiles : Avant toute chose, il faut calculer le nombre effectif d'étoiles N_{eff} présentes dans la particule, comme on l'a fait précédemment.

2) Altitude : Prenons une particule du disque, d'altitude z au plan du disque. Dans la carte d'âges, que l'on trouve dans le fichier 'RTIGE_2011_agemap.dat', repérer la boîte dans laquelle se situe l'altitude z , et sélectionner la ligne correspondante en âges. Soit $dN_{age_{max}}$ la valeur maximale de cette ligne d'histogramme. Soit $dN_{HR_{max}}$ la valeur maximale du diagramme isochrone correspondant à l'âge de l'étoile tirée.

3) Algorithme : Soit un cube de volume $V < V_{particule}$ et de côté d , contenant N de ces N_{eff} étoiles. Ce cube peut par exemple être un cube de la grille 3D utilisée dans le logiciel de RSA cosmos. Soient dN une variable représentant les valeurs du diagramme isochrone (correspondant à l'âge moyen de la particule), $\log(L_{bol})$, les valeurs de luminosité (bolométrique, en log décimal, et en L_{\odot}), et $\log(Te)$ les valeurs de température (en log décimal).

On va éclater ce groupe d'étoiles dans V en respectant les proportions données par le diagramme isochrone correspondant, selon l'algorithme suivant :

```

nb = 0
i = 0
while nb < N :
    x[i] = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et d.
    y[i] = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et d.
    z[i] = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et d.
    j = 0
    while j < 1 :
        a = âge tiré aléatoirement selon une distribution uniforme entre 6.60 et 10.00 (unité : log10(années)).
        dn_age = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et dN_age_max.
        dN_age = valeur de la carte d'âges pour l'âge a.
        if dn_age <= dN_age :
            On retient l'âge a.
            Lire le diagramme isochrone correspondant à l'âge a.
            k = 0
            while k < 1 :
                log(l_bol) = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme
                    entre log(L_bol)_min et log(L_bol)_max.
                log(te) = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme
                    entre log(Te_min) et log(Te_max).
                dn_HR = valeur tirée aléatoirement selon une distribution uniforme entre 0 et dN_HR_max
                dN_HR = valeur du diagramme isochrone pour le couple (log(L_bol), log(Te)) le
                    plus proche de (log(l_bol), log(te)) dans le diagramme isochrone
                if dn_HR <= dN_HR :
                    On retient les valeurs log(l_bol) et log(te), créant ainsi une nouvelle étoile.
                    On retient également les valeurs des autres paramètres donnés par
                    le modèle pour le couple (log(L_bol), log(Te)), ainsi que le spectre associé.
                    k+ = 1
            j+ = 1
        i+ = 1
    nb+ = 1

```

Les variables indiquées en minuscules sont temporaires, les variables indiquées en majuscule sont liées au diagramme isochrone utilisé comme référence.

Maintenant que l'on connaît la case de diagramme isochrone correspondant à chaque étoile créée, on peut calculer leur luminosité à partir de leur spectre, de l'extinction et des filtres simulant l'instrument

d'observation, comme on l'a fait précédemment pour une particule, mais pour une seule case, comme on l'a vu plus haut.

0.16 Montrer l'évolution des étoiles

Avec le contenu fourni, il est possible de simuler la galaxie ou un ensemble d'étoiles avec un certain âge. On peut aussi faire évoluer des particules dans le temps en sautant d'un diagramme isochrone à l'autre. On peut également faire vieillir ou rajeunir des étoiles individuelles.

Voici la méthode pour faire passer une étoile d'un âge a_1 à un âge a_2 :

- 1) Simuler un ensemble d'étoiles avec l'un des algorithmes donnés dans la section précédente.
- 2) Soit une étoile ayant pour âge a_1 . On connaît sa masse grâce à la carte de masse. Lire le diagramme isochrone correspondant à l'âge a_2 .
- 3) Trouver les cases non-vides dans cet histogramme. Lire les cases correspondantes dans la carte de masse.
- 4) Chercher dans les masses sélectionnées la masse la plus proche de celle de l'étoile choisie. Retenir les $\log_{10}(L_{bol})$ et $\log_{10}(Te)$ correspondant à cette masse dans le diagramme isochrone associé à l'âge a_2 , ainsi que les autres paramètres stellaires correspondant à cette case dans les autres cartes si nécessaire, et calculer sa luminosité à partir de son spectre, de l'extinction et des filtres simulant l'instrument d'observation.

0.17 Autres domaines de longueur d'onde

Il est possible de représenter un objet céleste composé d'étoiles et de gaz et/ou poussière dans n'importe quel domaine de longueur d'onde entre 1 nm et 2999 nm. Il suffit pour cela de simuler le bon instrument en choisissant les filtres adaptés (voir document 08 "Simulation d'instruments"). Les couleurs seront alors de fausses couleurs, à choisir de façon esthétique et/ou de façon à ce que l'aspect à mettre en valeur par ce changement de domaine de longueur d'onde soit bien visible.