

# MANUEL D'UTILISATEUR

## C2D2E : Transfert radiatif hors ETL dans les structures cylindriques éclairées de l'extérieur (hydrogène + hélium)

Martine Chane-Yook

`martine.chane-yook@ias.u-psud.fr`

Avec la collaboration de :

Jean-Claude Vial  
Pierre Gouttebroze  
Jacques Dubau

Accès Web :

[https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative transfer codes](https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative%20transfer%20codes)

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Descriptif du programme</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Algorithme</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Modélisation</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Transitions Bound-Free (lié-libre) et Bound-Bound (lié-lié)</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Physique atomique détaillée de l'atome</b>	<b>5</b>
6.1	Hydrogène (modèle de Johnson, [20] ) . . . . .	5
6.2	Hélium (modèle de Benjamin, [5]) . . . . .	6
<b>7</b>	<b>Equations de populations et de transfert radiatif</b>	<b>6</b>
<b>8</b>	<b>Méthode utilisée pour traiter le transfert radiatif</b>	<b>8</b>
<b>9</b>	<b>Explications des sous-routines</b>	<b>9</b>
9.1	Liste de variables utilisées dans le programme C2D2E . . . . .	10
9.2	Parties H (modèle de Johnson, [20] ) et He (modèle de Benjamin, [5]) . . . . .	11
<b>10</b>	<b>Résultats pour l'hydrogène et l'hélium</b>	<b>13</b>
<b>11</b>	<b>Exécution de C2D2E</b>	<b>20</b>
<b>12</b>	<b>Temps de calcul</b>	<b>20</b>
<b>13</b>	<b>Remerciements</b>	<b>20</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>21</b>

# 1 Introduction

C2D2E est un code écrit en Fortran 77 par P. Gouttebroze ([16]) décrivant le transfert radiatif en 2D hors ETL pour l'atome d'hydrogène et d'hélium, dans un cylindre éclairé de l'extérieur se trouvant dans la couronne solaire, avec redistribution complète des fréquences. On suppose que le cylindre est rempli d'un mélange d'hydrogène et d'hélium. On traite le transfert radiatif hors ETL et l'équilibre statistique des populations des niveaux pour ces 2 atomes en 2D. Ces équations (de transfert radiatif et d'équilibre statistique) sont résolues en utilisant les coordonnées cylindriques. La densité électronique est obtenue par l'équilibre d'ionisation de ces 2 atomes.

Ces raies de l'hydrogène et de l'hélium (intensité, profil) servent au diagnostic des protubérances pour comparaison avec les observations.

Le modèle d'atmosphère que l'on considère est le même que celui du programme CYMA2DV (transfert radiatif 2D hors ETL pour l'atome d'hydrogène dans un cylindre avec champ de vitesse, [13]). Pour plus de détails, se référer à la documentation de CYMA2DV.

Le code dans sa version originale, adaptée pour le compilateur **gfortran** est accessible depuis le site MEDOC :

[https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative transfer codes](https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative%20transfer%20codes)

Dans la suite, je détaillerai ce programme C2D2E (hydrogène + hélium) : compréhension détaillée des codes, équations implémentées, algorithme, méthodes numériques utilisées, etc.

## 2 Descriptif du programme

*Nature du problème physique* : Transfert radiatif (2D) hors ETL dans une structure cylindrique avec rayonnement incident (hydrogène + hélium)

*Méthode de résolution* : Méthode  $\Lambda$ -itération + préconditionnement (MALI)

*Autre information* : \* Deux types de modèles :

- modèle à propriétés constantes défini par DIAM, TMOD, PGMOD, ALDEG, HAL (diamètre du cylindre (km), température ( $^{\circ}$ K), pression gazeuse ( $\text{dyn.cm}^{-2}$ ), angle d'inclinaison du cylindre (en degrés), altitude du cylindre par rapport à la surface du soleil (km))

- modèle à propriétés variables défini par PGMOD, ALDEG, HAL, R0KM, R1KM, T0, T1 (pression gazeuse ( $\text{dyn.cm}^{-2}$ ), angle d'inclinaison du cylindre (en degrés), altitude du cylindre par rapport à la surface du soleil (km)), rayon interne (km), rayon externe (km), température à l'intérieur du rayon interne ( $^{\circ}$ K), température entre R0KM et R1KM ( $^{\circ}$ K))

\* On utilise la redistribution complète des fréquences (CRD) pour les raies et continus de l'hydrogène et de l'hélium

*Auteur* : P. Gouttebroze

*Programmes disponibles à partir de :*

[https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative transfer codes](https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative%20transfer%20codes)

*Machines sur lesquelles le programme a été testé :* PC avec 4 processeurs Intel de 2.67GHz chacun

*Operating System pour lequel le programme a été testé :* Linux

*Langage de programmation :* Adapté en Fortran 90 pour le compilateur **gfortran**

*Etat :* Stable

*Accessibilité :* Groupe solaire et extérieur (MEDOC)

*Nombre de lignes :* c2d2e.f90 (~ 4000 lignes), visu.f90 (~ 2000 lignes)

*Temps de calcul :* 1h30 pour un modèle à propriétés variables

*Références :*

- P. Gouttebroze, “Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. VI : A hydrogen plus helium system”, A&A 503, 663-671, 2009
- P. Gouttebroze, “Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. III : Hydrogen spectrum”, A&A, 448, 367-374, 2006

### 3 Algorithme

La figure 1 représente l’algorithme du programme C2D2E.

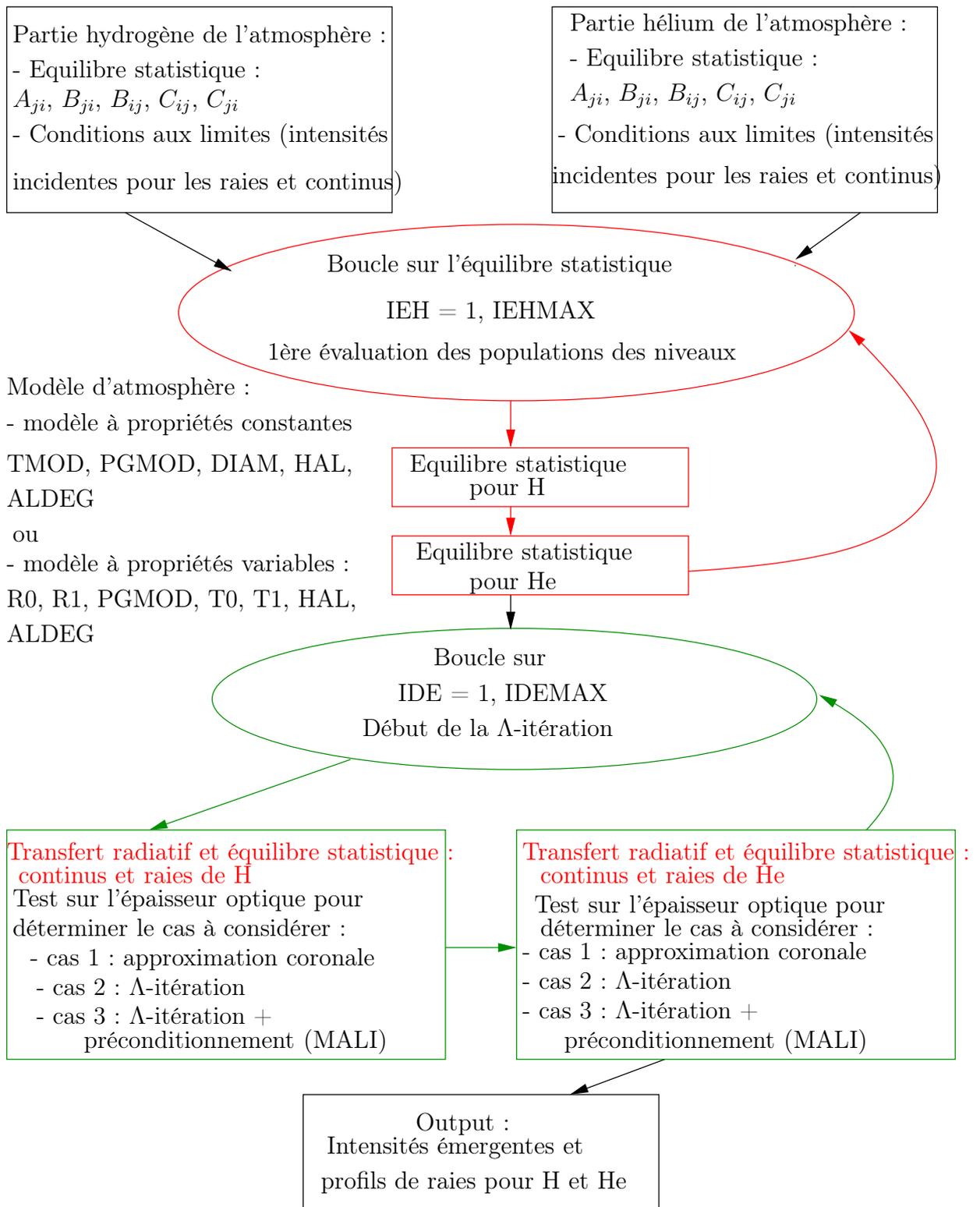


FIGURE 1 – Algorithme de C2D2E

## 4 Modélisation

La modélisation est la même que celle du programme CYMA2DV ([13]) excepté qu'il n'y a pas de champ de vitesse et que l'on traite en plus l'atome de l'hélium et ses états d'ionisation. Pour plus de détails, se référer à la documentation de CYMA2DV.

## 5 Transitions Bound-Free (lié-libre) et Bound-Bound (lié-lié)

Les transitions prises en compte dans C2D2E sont les transitions Bound-Free et Bound-Bound, qui sont représentées sur la figure 2. Les Bound-Free sont les transitions qui vont d'un état (lié)  $i$  vers le continu et qui produisent un électron libre d'énergie  $\epsilon$ . Cela commence à la limite infinie des états excités ( $\epsilon = 0$ ). Les Bound-Bound sont les transitions qui vont d'un niveau  $i$  vers un niveau  $j$ .

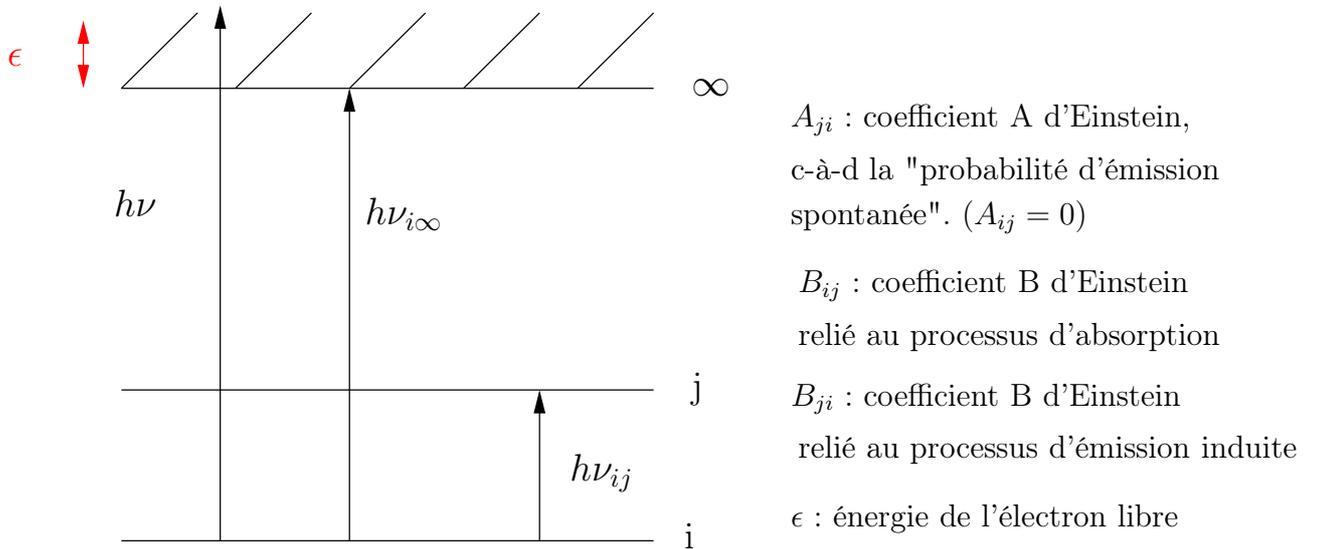


FIGURE 2 – Types de transitions considérées dans C2D2E

## 6 Physique atomique détaillée de l'atome

Il s'agit ici de décrire la physique atomique des atomes suivants : hydrogène et hélium.

### 6.1 Hydrogène (modèle de Johnson, [20] )

Les transitions pour l'hydrogène sont résumées dans la Table 1.  $NN$  est le nombre de niveaux d'énergie (y compris le continu),  $NTT = NN \times (NN - 1)/2$  le nombre total de

transitions,  $NTRC = NN - 1$  le nombre de transitions lié-libre et  $NTAR = NTT - NTAC$  le nombre de raies. Dans C2D2E,  $NN = 6$  (5 niveaux et 1 continu).

Transition	Niveau inférieur	Niveau supérieur	Nom des transitions	Longueur d'onde $\lambda(\text{Å})$
1	1	2	$Ly - \alpha$	1215
2	1	3	$Ly - \beta$	1025
3	2	3	$H - \alpha$	6564
4	1	4	$Ly - \gamma$	972
5	2	4	$H - \beta$	4862
6	3	4	$Pa - \alpha$	18756
7	1	5	$Ly - \delta$	949
8	2	5	$H - \gamma$	4341
9	3	5	$Pa - \beta$	12821
10	4	5	$Br - \alpha$	6563
11	1	6	$Ly - \epsilon$	973
12	2	6	$H - \delta$	4102
13	3	6	$Pa - \gamma$	10935
14	4	6	$Br - \beta$	4861
15	5	6	$Pf - \alpha$	7460
16	1	7	$Ly - 6$	931
17	2	7	$H - \epsilon$	3971
...	...	...	...	...
$NTAR + 1$	1	$NN$	Lyman Continu	911
$NTAR + 2$	2	$NN$	Balmer continu	3645
...	...	...	...	...
$NTT =$	$NN - 1$	$NN$		

TABLE 1 – Principales transitions pour l'hydrogène

## 6.2 Hélium (modèle de Benjamin, [5])

On considère 34 niveaux pour l'hélium : 29 pour He I, 4 pour He II et 1 pour He III ([22]). On utilise ici le modèle de Benjamin ([5]).

## 7 Equations de populations et de transfert radiatif

Considérons le niveau  $j$  de la figure 2. On introduit les équations de populations pour ce niveau qui donnent l'équilibre entre les processus de peuplement et de dépeuplement du niveau  $j$  à partir des autres niveaux  $i$  :

$$N_j \sum_{j \neq i}^n P_{ji} = \sum_{j \neq i}^n N_i P_{ij} \quad (7.1)$$

Le taux de transition du niveau  $j$  (dépeuplement de  $j$ ) s'écrit :

$$P_{ji} = A_{ji} + B_{ji}\bar{J}_{ij} + C_{ji} = R_{ji} + C_{ji} \quad (7.2)$$

où  $C_{ji}$  est le taux de désexcitation par collisions et est proportionnel à la densité électronique.  $R_{ji}$  est la probabilité de désexcitation par rayonnement.  $A_{ji}$  et  $B_{ji}$  sont les coefficients d'Einstein (voir figure 2).

Le taux de transition du niveau  $i$  (peuplement de  $j$ ) s'écrit :

$$P_{ij} = B_{ij}\bar{J}_{ij} + C_{ij} = R_{ij} + C_{ij},$$

$R_{ij}$  étant la probabilité d'excitation par rayonnement et  $C_{ij}$  le taux d'excitation par collisions. Ici,  $A_{ij} = 0$ .

Le terme de gauche dans les équations de populations (7.1) représente tous les processus qui vont dépeupler le niveau  $j$  et le terme de droite correspond à tous les niveaux qui vont peupler le niveau  $j$ . Pour fermer le système d'équations de population, il suffit d'utiliser l'équation de conservation de l'élément (c'est-à-dire l'atome considéré : hydrogène ou hélium) :

$$\sum_{j=1}^n N_j = N_T \quad (7.3)$$

où  $N_T$  est la population totale de l'élément.

Ces équations de populations (7.1) qui contiennent les intensités moyennes par l'intermédiaire de  $\bar{J}_{ij}$  sont couplées avec l'équation de transfert radiatif (7.4).

L'intensité spécifique  $I$  dans la transition considérée s'obtient en résolvant l'équation de transfert :

$$\frac{dI(\Delta\nu, \mathbf{n})}{ds} = k_{ij}(\Delta\nu, \mathbf{n})[S_{ij} - I(\Delta\nu, \mathbf{n})] \quad (7.4)$$

$s$  est l'abscisse le long du rayonnement,  $\mathbf{n}$  est la direction du rayonnement,  $\Delta\nu$  est la différence de fréquence avec la fréquence centrale de la raie  $\nu_{ji}$ ,  $S_{ij}$  est la fonction source (indépendant de la fréquence et de la direction, sous l'hypothèse de la redistribution complète) :

$$S_{ij} = \frac{N_j A_{ji}}{N_i B_{ij} - N_j B_{ji}} \quad (7.5)$$

$k_{ij}(\Delta\nu, \mathbf{n})$  est le coefficient d'absorption de la raie :

$$k_{ij}(\Delta\nu, \mathbf{n}) = k_{ij}^M \phi(\Delta\nu, \mathbf{n}), \quad (7.6)$$

avec

$$k_{ij}^M = \frac{h \nu_{ji}}{4\pi} (N_i B_{ij} - N_j B_{ji}) \quad (7.7)$$

$\phi$  est le profil d'absorption normalisé (qui est aussi le profil d'émission sous l'hypothèse de la redistribution complète) :

$$\phi(\Delta\nu, \mathbf{n}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_D} H \left[ a, \frac{1}{\Delta\nu_D} \Delta\nu \right], \quad (7.8)$$

où  $H$  est la fonction de Voigt,  $c$  la vitesse de la lumière,  $\Delta\nu_D$  la largeur Doppler,  $a$  le facteur d'amortissement (élargissement naturel + élargissement collisionnel + ...).

L'expression de l'intensité moyenne  $\bar{J}_{ij}$  est donnée par :

$$\bar{J}_{ij} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d(\Delta\nu) \oint I(\Delta\nu, \mathbf{n}) \phi(\Delta\nu, \mathbf{n}) d\Omega, \quad (7.9)$$

où  $\Omega$  est l'angle solide.

On obtient à la fin un système d'équations matricielles que l'on résout numériquement par la méthode  $\Lambda$ -itération accélérée (MALI, [26], [24]). Pour plus de détails sur le problème, voir les deux chapitres suivants.

## 8 Méthode utilisée pour traiter le transfert radiatif

On commence par une initialisation : populations des niveaux, champ de rayonnement, densité électronique, paramètres atomiques (coefficients  $A$  et  $B$  d'Einstein, coefficients de taux de collision), lecture du modèle, intensités incidentes pour les raies et les continus, conditions aux limites. Ensuite, on entre dans les processus itératifs :

- La première boucle  $IEH$ , indépendante des autres boucles, concerne le calcul de l'équilibre statistique sous l'hypothèse d'un milieu optiquement mince pour toutes les transitions (c-à-d qu'il n'y a pas de transfert radiatif).
- La seconde boucle  $IDE$  (début de la  $\Lambda$ -itération) concerne le transfert radiatif pour les transitions continues et les transitions discrètes.  $IDE$  contient deux boucles : H et He. Dans chacune de ces boucles, on traite à la fois l'équilibre statistique et le transfert radiatif. Après ces deux boucles, on recalcule la densité électronique en tenant compte de l'ionisation à la fois de l'hydrogène et de l'hélium. La boucle  $IDE$  se termine par un test de convergence. Puis on recalcule les nouveaux paramètres radiatifs ( $P_{ji}$ ).

L'équilibre statistique (7.1, 7.3) consiste en la résolution d'un système linéaire (par les méthodes d'élimination) dont les termes sont obtenus à partir des coefficients de peuplement et de dépeuplement  $P_{ji}$  (7.2). Les inconnues sont les populations des niveaux.

Le transfert radiatif (7.4) consiste à calculer les intensités dans les raies ou les continus à partir de la connaissance de la fonction source (7.5) et des intensités aux limites. On utilise la méthode  $\Lambda$ -itérative ([29], [26]), méthode de résolution d'un système linéaire aboutissant à une matrice tridiagonale. On considère trois cas : le cas optiquement mince où l'on applique l'approximation coronale, le cas de la  $\Lambda$ -itération simple, et le cas de la  $\Lambda$ -itération avec préconditionnement (MALI, [26], [24]). La  $\Lambda$ -itération simple consiste à introduire un

opérateur  $\Lambda$  dans l'expression de la fonction source en omettant d'explicitier les dépendances avec la profondeur optique. Il est bien connu que cette méthode est très lente à converger dès que l'épaisseur optique devient significative. Pour accélérer la  $\Lambda$ -itération simple, on utilise la méthode MALI qui consiste à choisir pour l'opérateur approché  $\Lambda^*$  la diagonale exacte de l'opérateur complet  $\Lambda$ .

À la sortie, on obtient les intensités moyennées (7.9) sur toutes les directions à partir desquelles on peut recalculer de nouvelles fonctions sources (7.5) et de nouveaux taux de transition. Les fonctions sources seront utilisées ultérieurement pour calculer les intensités émergentes et les profils de raies.

Pour les raies et les continus, on utilise la redistribution complète en fréquence qui consiste à supposer qu'il n'y a aucune relation entre la fréquence du photon absorbé et la fréquence du photon réémis.

Dans tout le problème, on néglige l'absorption continue.

Les sous-routines appelées dans C2D2E vont être détaillées dans le chapitre suivant.

## 9 Explications des sous-routines

Le programme C2D2E commence par la lecture des paramètres d'atmosphère "paramod.dat" suivie de la définition de la géométrie (maillage) de la structure considérée.

Les fichiers en entrée pour C2D2E sont :

- hydrog.com : déclaration de variables communes pour l'hydrogène
- helium.com : déclaration de variables communes pour l'hélium
- param.com : déclaration de paramètres communs
- intinc.dat : intensités incidentes pour l'hydrogène
- intinc\_He.dat : intensités incidentes pour l'hélium
- paramod.dat : modèle à traiter défini par les paramètres suivants :  
DIAM, TMOD, PGMOD, ALDEG, HAL, R0KM, R1KM, T0, T1, TREF (diamètre du cylindre (km), température (°K), pression gazeuse ( $\text{dyn.cm}^{-2}$ ), angle d'inclinaison du cylindre (en degrés), altitude du cylindre par rapport à la surface du soleil (km), rayon interne (km), rayon externe (km), température à l'intérieur du rayon interne (°K), température entre R0KM et R1KM (°K), température de référence (°K)).

Deux types de modèles :

- ★ Si ITVAR=0, modèle à propriétés constantes, défini par ALDEG, HAL, DIAM, TMOD, PGMOD
- ★ Si ITVAR=1, modèle à propriétés variables, défini par ALDEG, HAL, R0KM, R1KM, T0, T1, PGMOD, TREF. Les autres variables inutiles sont mises à zéro.

Les fichiers en sortie sont :

- resu2d.dat : fichier incluant les intensités émergentes. Il est utilisé par le programme

de visualisation “visu.f90”. Output : cosbou.ps (profils des raies de l’hydrogène et de l’hélium)

- fort.20 : densité des électrons
- fort.23 : populations des niveaux de l’hydrogène
- fort.25 : populations des niveaux de l’hélium

Dans les paragraphes suivants, je détaillerai les parties hydrogène et hélium, les sous-routines appelées ainsi qu’une liste de variables utilisées dans le programme principal C2D2E.

## 9.1 Liste de variables utilisées dans le programme C2D2E

- ITVAR = 0 : modèle à propriétés constantes, ITVAR = 1 : modèle à propriétés variables
- NPSI : nombre de points pour la variable angulaire  $PSI$  ( $\Psi$ )
- RR (de dimension NR) : rayon des couches successives à partir du centre
- TAU : épaisseur optique (entre deux points)
- NZETA : nombre de coordonnées polaires  $\zeta$
- NTHET : nombre de coordonnées polaires  $\theta$
- NFR : nombre de fréquences dans chaque raie
- NTAB : taille du tableau de températures  $TAB$  (pour le calcul des coefficients de taux de collision OIS)
- NINF : niveau inférieur de la transition considérée
- NSUP : niveau supérieur de la transition considérée
- AJI : coefficient A d’Einstein pour l’émission spontanée
- BJI, BIJ : coefficients B d’Einstein pour l’émission induite et l’absorption
- CIJ, CJI : taux d’excitation/désexcitation par électrons
- CPOL : coefficients polynomiaux de degré 5 intervenant dans le calcul des facteurs de dilution (de dimension NCMX)
- RIJ, RJI : taux de transitions radiatifs
- FRR : fréquence dans la raie
- Paramètres atmosphériques (dimension  $NPSI \times NR$ ) : TE (température), PG (pression gazeuse), VT (vitesse de microturbulence), HNH (densité de l’hydrogène (nombre d’atomes par unité de volume)), HNE (densité des électrons)
- HN : populations des niveaux de l’hydrogène
- FRN : fréquence des niveaux
- XFR et XFRC : modèles de découpage en fréquence pour les raies et les continus
- PHIL : profil d’absorption
- SF : fonction source
- CAFR : coefficient d’absorption
- ITRC et ITRD : indices de contrôle pour les continus et les raies
- OIS : coefficient de taux d’ionisation collisionnelle

## 9.2 Parties H (modèle de Johnson, [20] ) et He (modèle de Benjamin, [5])

Le programme principal C2D2E se décompose d'après le schéma suivant :

- Lecture des paramètres d'atmosphère "paramod.dat" (fichier input)
- Définition de la géométrie (maillage) du cylindrique (grille en  $r$ , grille en  $\Psi$ )
- Initialisation des paramètres atmosphériques : température (TE), pression (PG), vitesse de microturbulence (VT)
- MATIPSP : calcul des matrices d'interpolation en  $\Psi$
- Définition de la grille en  $\zeta$  et  $\theta$
- DPAHYD : définition des paramètres atomiques pour l'hydrogène
- DPAHEL : définition des paramètres atomiques pour l'hélium
- *do IEH = 1, IEHMAX* : boucle sur l'équilibre statistique pour déterminer la densité électronique (limite optiquement mince)
  - ★ OPMIHYD : résolution de l'équilibre statistique pour l'hydrogène dans le cas optiquement mince
  - ★ OPMIHEL : résolution de l'équilibre statistique pour l'hélium dans le cas optiquement mince
  - ★ POPHYD : écriture des populations pour l'hydrogène
  - ★ POPHEL : écriture des populations pour l'hélium
  - ★ Test de convergence
- *enddo (IEH)*
- *do IDE = 1, IDEMAX* : boucle sur la  $\Lambda$ -itération (Transfert Radiatif)
  - ★ *do ICR = 1, ICRMAX* : boucle interne
    - ▷ C2DHYD : calcul des taux de transition par collisions et résolution de l'équation de transfert pour l'hydrogène (raies + continus)
    - ▷ PRFHEL : recalcul des profils des coefficients d'absorption en tenant compte de l'élargissement collisionnel
    - ▷ C2DHEL : équivalent de la subroutine C2DHYD pour l'hélium
    - ▷ POPHYD : écriture des populations pour l'hydrogène
    - ▷ POPHEL : écriture des populations pour l'hélium
  - ★ *enddo (ICR)*
  - ★ Test de convergence
- *enddo (IDE)*
- RESUHYD : écriture dans le fichier de sortie "resu2d.dat" de  $r$ ,  $\Psi$ ,  $k$  (coefficient d'absorption),  $S$  (fonction source de l'hydrogène)
- RESUHEL : écriture dans le fichier de sortie "resu2d.dat" des coefficients d'émission et d'absorption pour les principales raies de l'hélium

On va maintenant décrire les sous-routines appelées.

## **MATIPSP**

Calcul des matrices d'interpolation en  $\Psi$ . En effet, les points ne se trouvent pas forcément sur un noeud de la grille ou à l'intérieur de la grille. D'où la nécessité d'interpoler ces points.

## **DPAHYD**

Définition des paramètres atomiques pour l'hydrogène et des quantités indépendantes des densités de particules :

- calcul des coefficients d'excitation et d'ionisation par collisions OIS, des probabilités d'émission spontanée AJI, BJI, BIJ : on utilise le modèle de L.C. Johnson ([20]). Pour plus de détails, se référer à la documentation du code CYMA2DV
- définition des niveaux d'énergie de l'hydrogène
- découpage en fréquences pour les raies et les continus
- définition des constantes d'élargissement naturel
- calcul des intensités incidentes pour les raies et les continus
- calcul des intensités moyennes pour les raies et du coefficient  $RIJ$  dans le cas optiquement mince.

## **DPAHEL**

Définition des paramètres atomiques pour l'hélium. On utilise le modèle de Benjamin ([5]).

## **OPMIHYD**

Résolution de l'équilibre statistique pour l'hydrogène. On calcule d'abord les taux de transition par collisions, les taux de transition radiatifs dans les continus puis on résout un système linéaire afin d'obtenir les populations des niveaux de H.

Inputs :  $TE, HNE, HNH$

Output :  $HNHII$

## **OPMIHEL**

Equivalent de la subroutine OPMIHYD pour l'hélium.

Inputs :  $TE, HNE, HETOT$

Outputs :  $HEII, HEIII$

## C2DHYD

Résolution de l'équation de transfert pour les raies et les continus de l'hydrogène. 3 cas :

- cas 1 : approximation coronale
- cas 2 :  $\Lambda$ -itération simple
- cas 3 :  $\Lambda$ -itération + préconditionnement (MALI)

La subroutine C2DHYD fait appel à la subroutine STYC2D qui calcule l'intensité le long d'un rayon traversant le cylindre connaissant les coefficients d'absorption (7.6), les fonctions source (7.5) et les intensités incidentes à chaque extrémité du cylindre. C2DHYD fait appel aussi à la subroutine DZTC2DV qui calcule la contribution à la diagonale de l'opérateur  $\Lambda$  pour un cylindre, connaissant le coefficient d'absorption le long de la trajectoire.

## PRFHEL

Calcul des profils des coefficients d'absorption en tenant compte de l'élargissement collisionnel.

## C2DHEL

Equivalent de la subroutine C2DHYD pour l'hélium.

# 10 Résultats pour l'hydrogène et l'hélium

On considère le modèle "paramod.dat" (à paramètres variables dans le cylindre) avec les paramètres suivants :

IDEMAX = 10, ICRMAX = 4, IVI = 0, TMOD = 0, PGMOD = 0.1, DIAM = 0, ALDEG = 0, HAL = 0 km, ITVAR = 1, R0KM = 500, R1KM = 1000, T0 = 6000, T1 =  $10^5$ , TREF = 10000.

Les courbes pour l'hydrogène et pour l'hélium se trouvent dans le répertoire **results** du package C2D2E.tgz à télécharger sur le site MEDOC.

La figure 3 ( resp. figure 6) représente une coupe de l'intensité relative (haut) et absolue (bas, en  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ ) pour les raies de l'hydrogène (resp. l'hélium) en fonction d'une position le long d'un axe perpendiculaire au cylindre.

La figure 4 (resp. figure 7) représente les variations d'intensité ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ , en ordonnées) à travers le bas de la boucle (cylindre vertical) pour 10 positions équidistantes de 200 km pour l'hydrogène (resp. l'hélium). Les longueurs d'ondes relatives sont en abscisses ( $\text{\AA}$ ).

La figure 5 (resp. figure 8) représente les profils de raies pour H (resp. pour He).

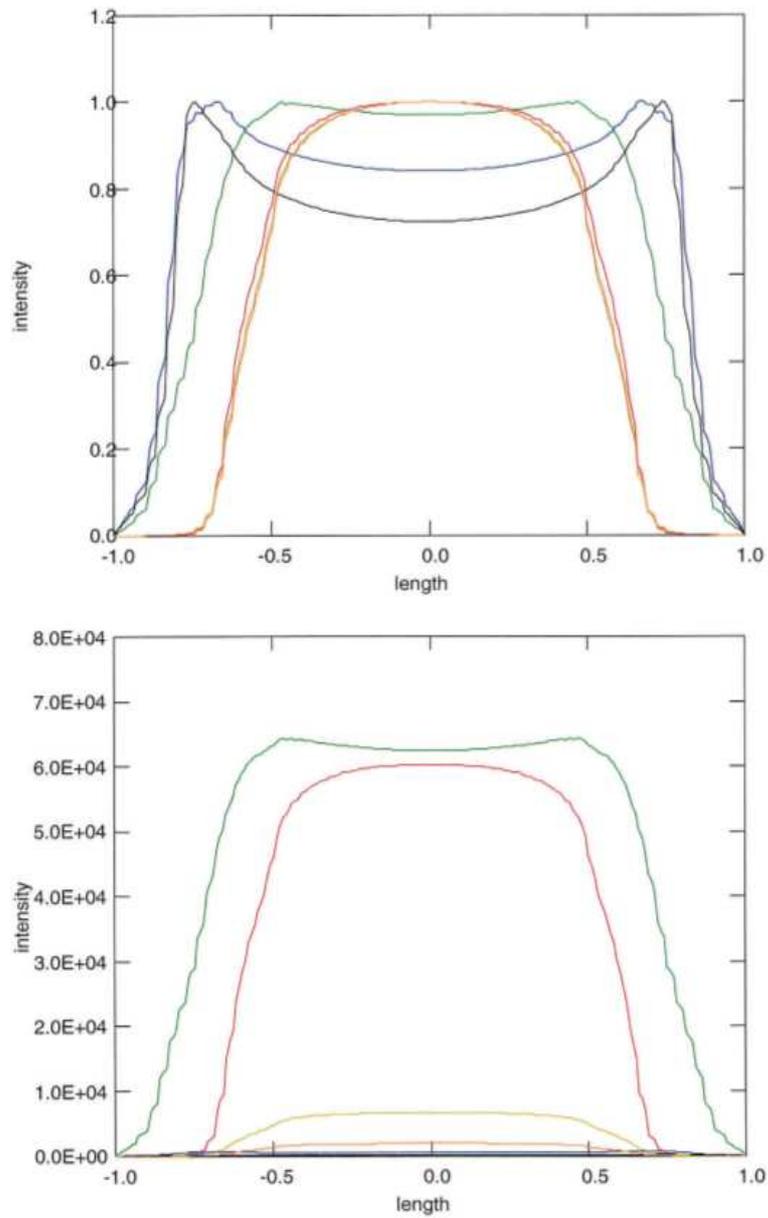


FIGURE 3 – Coupes de l'intensité relative (haut) et absolue (bas, en  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ ) pour  $L\alpha$  (vert),  $L\beta$  (bleu),  $H\alpha$  (rouge),  $L\gamma$  (noir),  $H\beta$  (jaune),  $P\alpha$  (orange) en fonction d'une position le long d'un axe perpendiculaire au cylindre

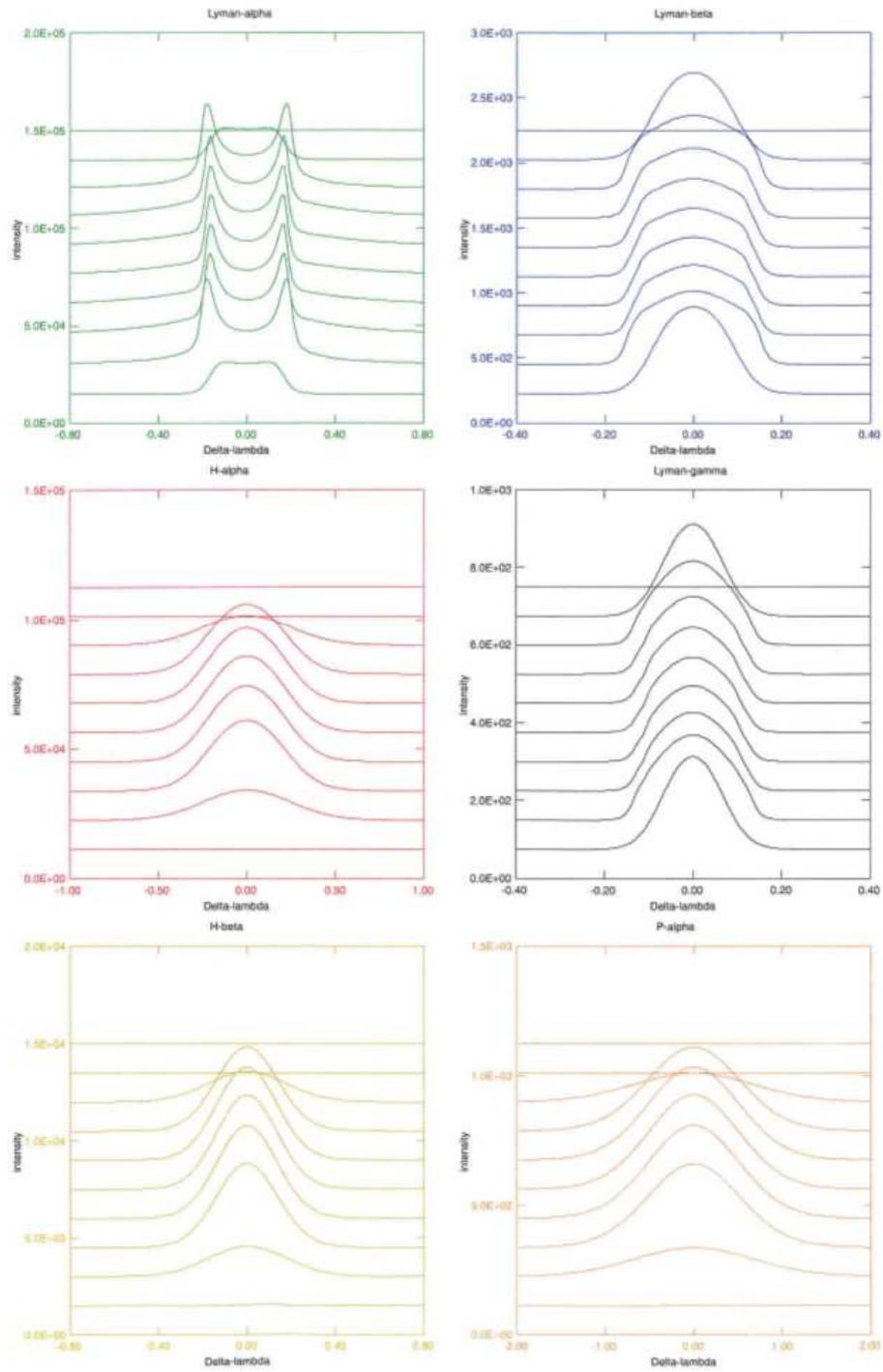


FIGURE 4 – Variations d'intensité  $L\alpha$  ( $1215\text{\AA}$ ),  $L\beta$  ( $1025\text{\AA}$ ),  $H\alpha$  ( $6564\text{\AA}$ ),  $L\gamma$  ( $972\text{\AA}$ ),  $H\beta$  ( $4862\text{\AA}$ ),  $P\alpha$  ( $18756\text{\AA}$ ). Abscisse ( $\text{\AA}$ ), ordonnée ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ )

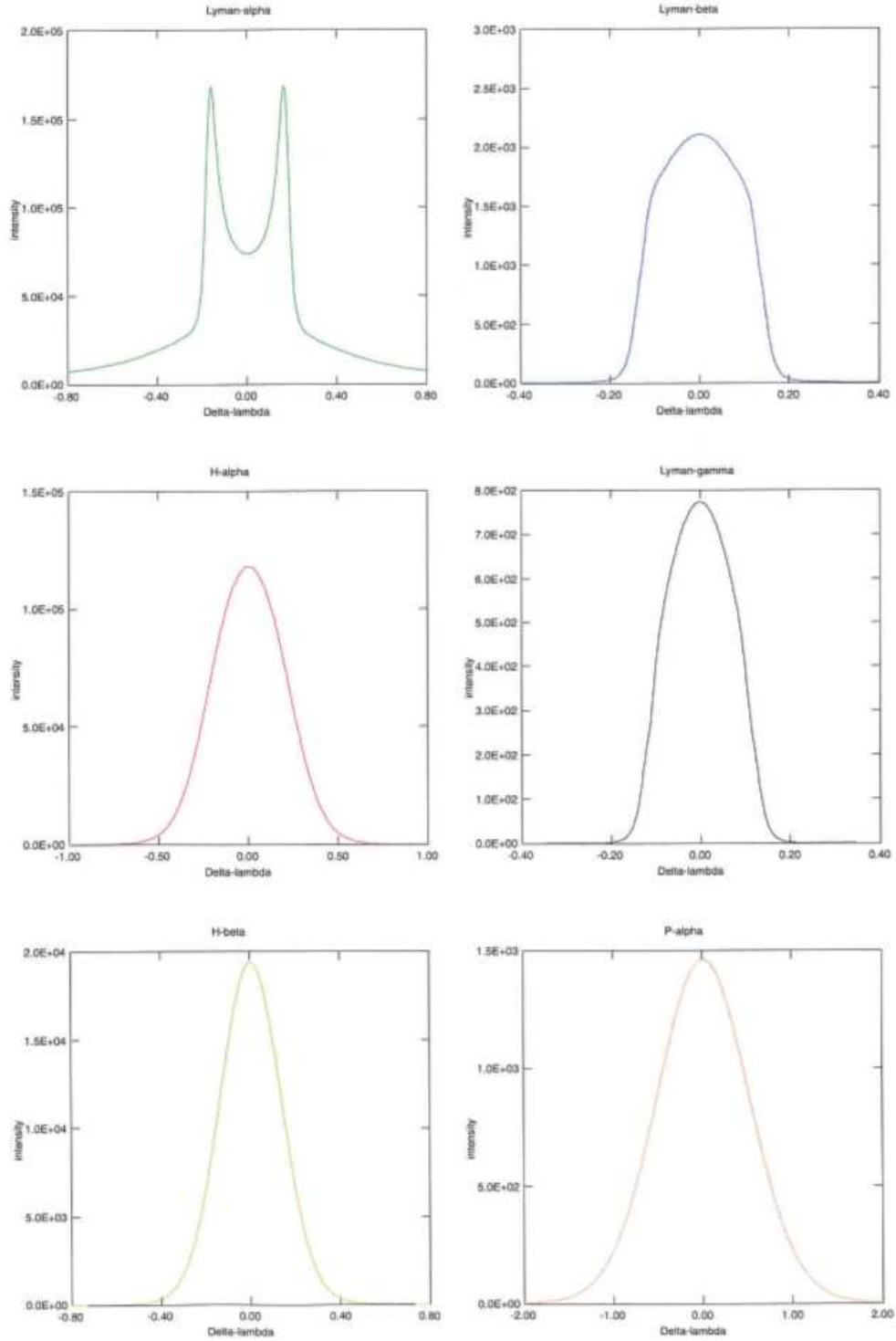


FIGURE 5 – Profils des raies  $L\alpha$  ( $1215\text{Å}$ ),  $L\beta$  ( $1025\text{Å}$ ),  $H\alpha$  ( $6564\text{Å}$ ),  $L\gamma$  ( $972\text{Å}$ ),  $H\beta$  ( $4862\text{Å}$ ),  $P\alpha$  ( $18756\text{Å}$ ). Abscisse ( $\text{Å}$ ), ordonnée ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{Å}^{-1}$ )

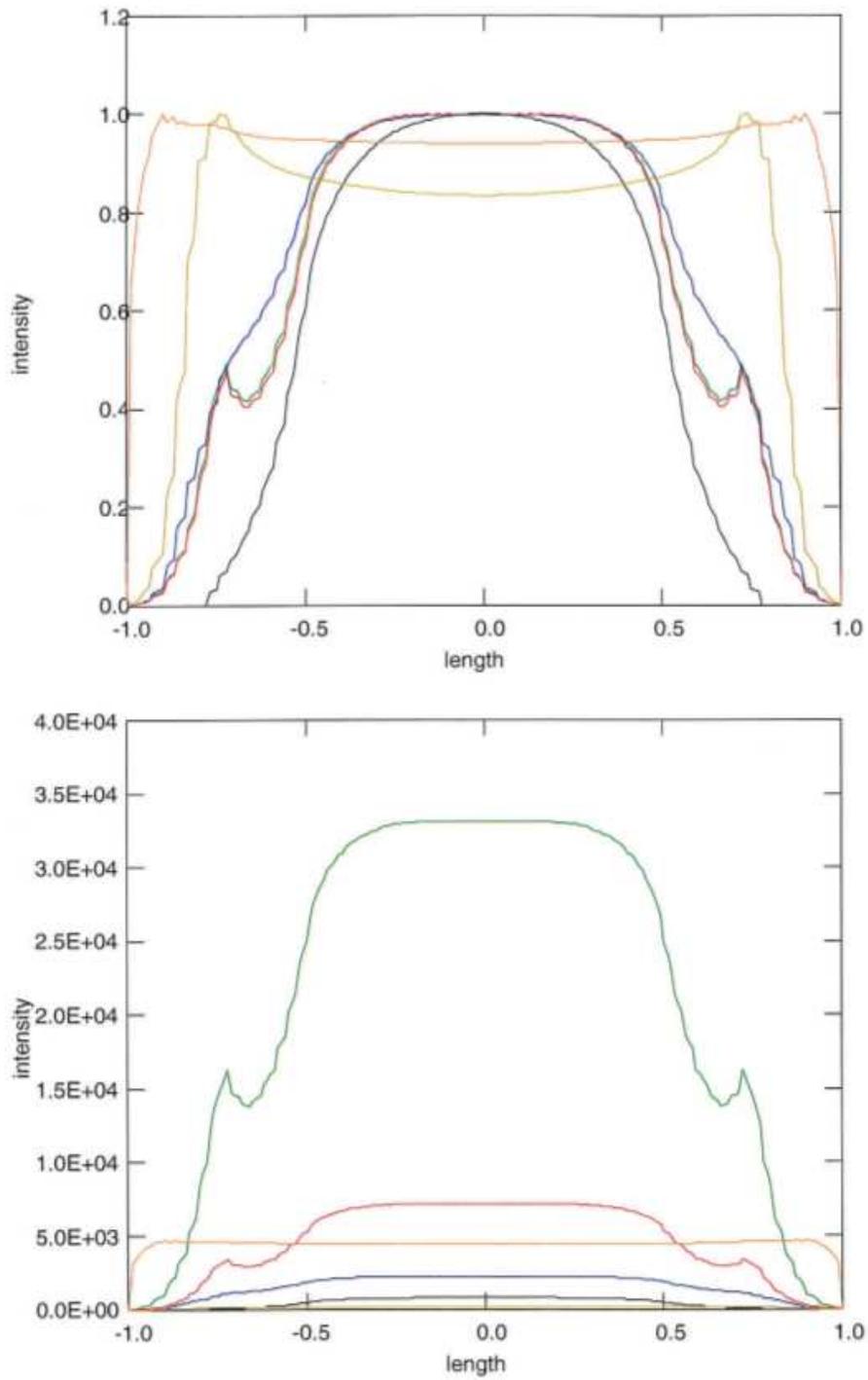


FIGURE 6 – Coupes de l'intensité relative (haut) et absolue (bas,  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ ) pour *He I* (10830Å, vert), *He I* (584Å, bleu), *He I D3* (rouge), *He I* (6878Å, noir), *He I* (537Å, jaune), *He II* (304Å, orange) en fonction d'une position le long d'un axe perpendiculaire au cylindre

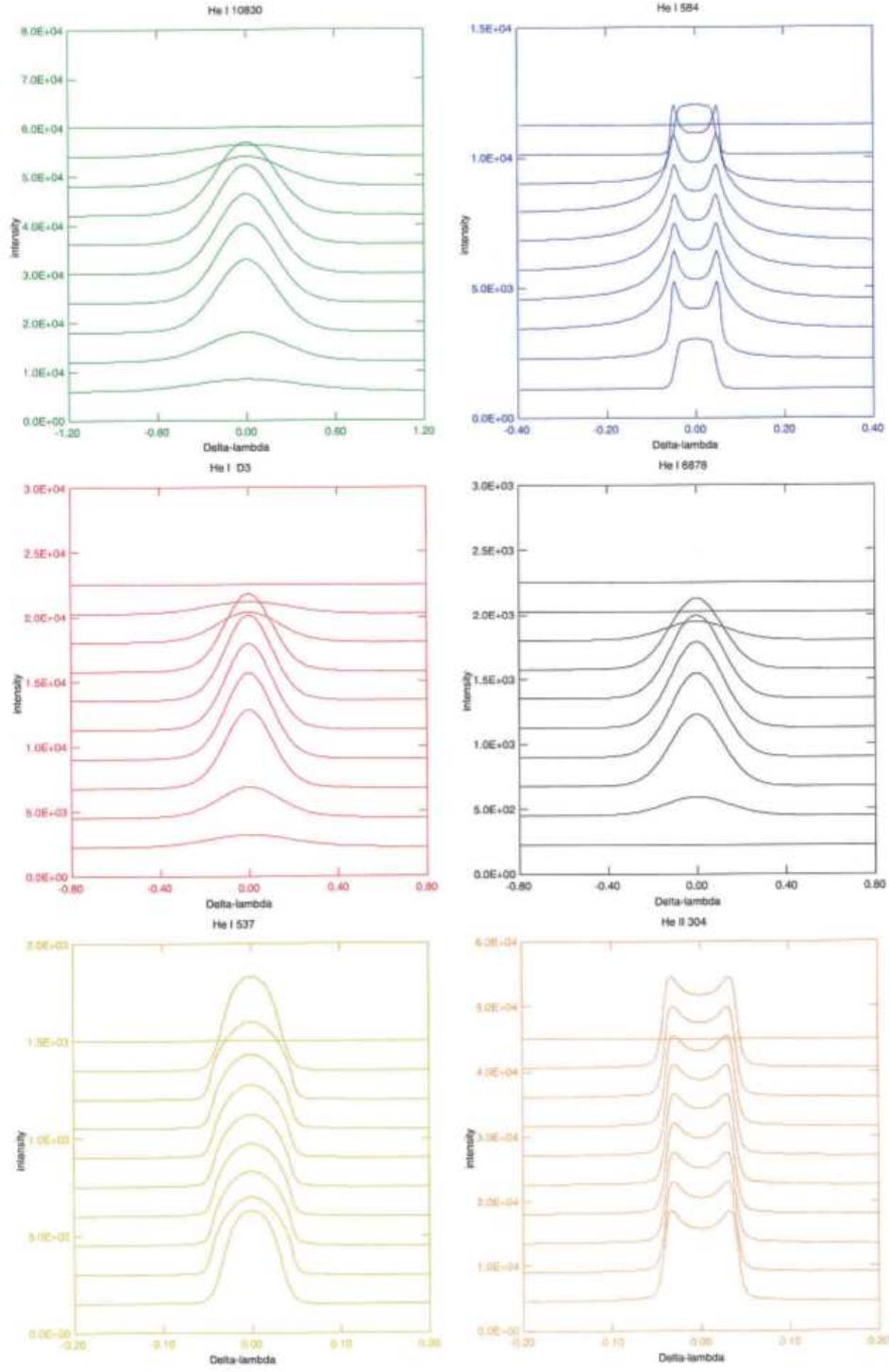


FIGURE 7 – Variations d'intensité pour *He I* (10830Å), *He I* (584Å), *He I D3* (6564Å), *He I* (6878Å), *He I* (537Å), *He II* (304Å). Abscisse (Å), ordonnée ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ )

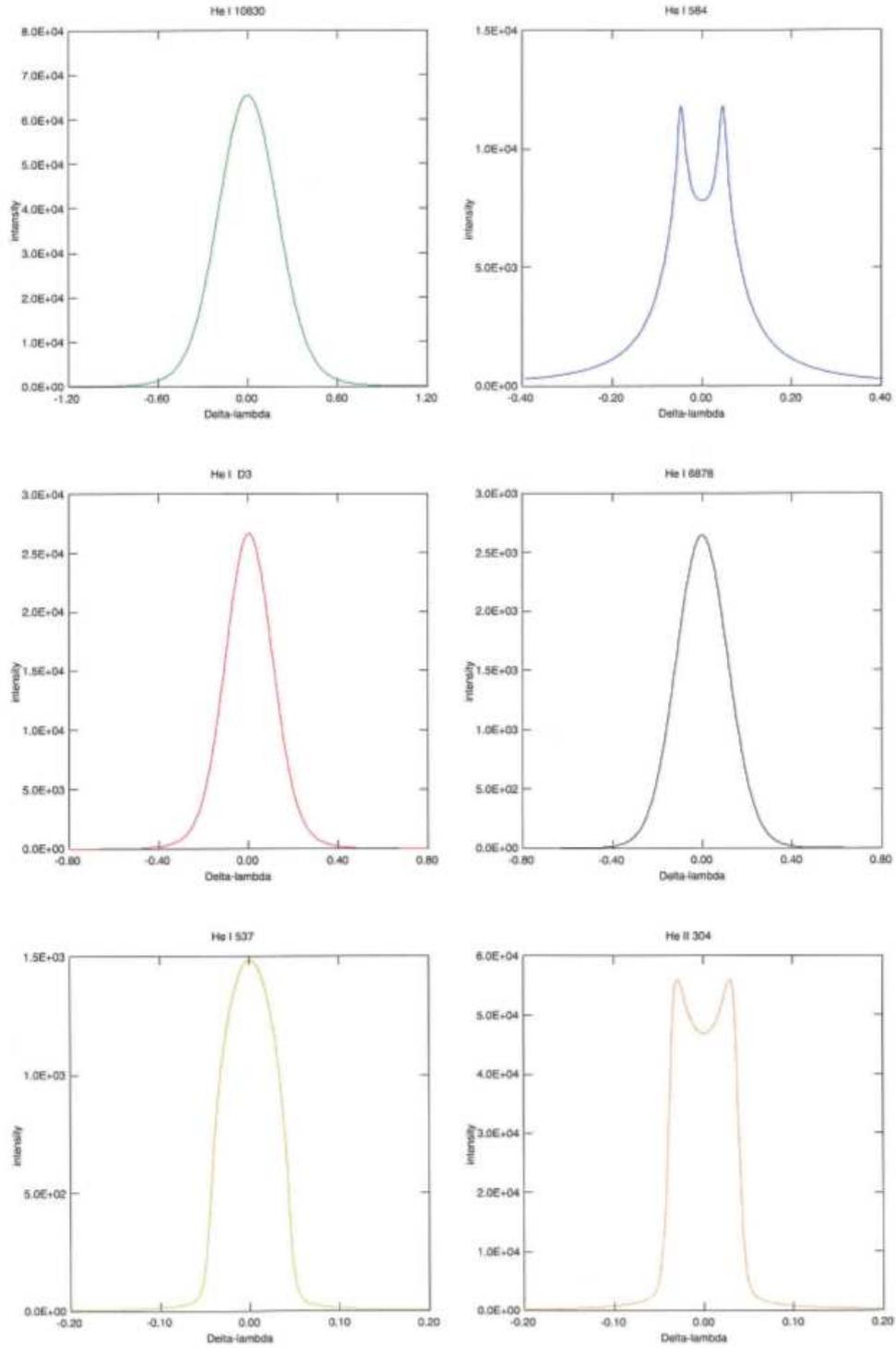


FIGURE 8 – Profils des raies *He I* (10830Å), *He I* (584Å), *He I D3* (6564Å), *He I* (6878Å), *He I* (537Å), *He II* (304Å). Abscisse (Å), ordonnée ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{Å}^{-1}$ )

## 11 Exécution de C2D2E

- Télécharger le package C2D2E.tgz sur le site MEDOC :  
[https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative transfer codes](https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative%20transfer%20codes)
- Le compilateur gfortran est nécessaire. Taper les commandes suivantes dans un terminal :
- **tar -xvzf C2D2E.tgz**
- **cd C2D2E**
- Le répertoire contient les fichiers suivants : helium.com, hydrog.com, intinc.dat, intinc\_He.dat, param.com, paramod.dat, c2d2e.f90, visu.f90, makefile
- Le fichier à rectifier est “paramod.dat”
- **make**
- **./c2d2e**
- Les fichiers de sortie sont : resu2d.dat (intensités émergentes pour le tracé des profils), fort.20 (densité des électrons), fort.23 (populations des niveaux de l’hydrogène), fort.25 (populations des niveaux de l’hélium)
- Le répertoire **results** contient les outputs correspondant à un cas test afin de vérifier si les résultats obtenus sont les mêmes
- Pour visualiser les résultats, on utilise le programme de visualisation “visu.f90” en tapant les commandes suivantes :  
gfortran -o visu visu.f90  
./visu  
Le fichier de sortie est “cosbou.eps”

## 12 Temps de calcul

On considère le modèle “paramod.dat” (à paramètres variables dans le cylindre) avec les paramètres suivants :

IDEMAX = 10, ICRMAX = 4, IVI = 0, TMOD = 0, PGMOD = 0.1, DIAM = 0, ALDEG = 0, HAL = 0 km, ITVAR = 1, R0KM = 500, R1KM = 1000, T0 = 6000, T1 =  $10^5$ , TREF = 10000.

Le temps CPU sur un PC avec 4 processeurs Intel de 2.67 GHz chacun est de 5428.123 s, soit environ 1h30.

## 13 Remerciements

Je tiens à remercier les directeurs de MEDOC : Eric Buchlin (actuel) et Frédéric Baudin (précédent).

Le 28 septembre 2015

M. C-Y

## Références

- [1] C.W. Allen. *Astrophysical quantities*. The Athlone Press, University of London, 1973.
- [2] M. Arnaud and R. Rothenflug. An updated evaluation of recombination and ionization rates. *A&A suppl. Ser.*, 60 :425–457, 1985.
- [3] L.H. Auer and D. Mihalas. On the use of variable Eddington factors in Non-LTE stellar atmospheres computations. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 149 :65–74, 1970.
- [4] Eugene H. Avrett. *Introduction to Non-LTE radiative transfer and atmospheric modeling*. Lecture notes, 2008.
- [5] R.A. Benjamin, E. D. Skillman, and D.P. Smits. Improving predictions for Helium emission lines. *ApJ*, 514 :307–324, 1999.
- [6] S. Chandrasekhar. *Radiative transfer*. Dover Publications, 1960.
- [7] CHIANTI Database. George Mason University (USA) and University of Michigan (USA) and University of Cambridge (UK). <http://www.chiantidatabase.org/>, Mai 2014.
- [8] K.P. Dere, E. Landi, H.E. Mason, B.C. Monsignori Fossi, and P.R. Young. CHIANTI - an atomic database for emission lines : I. Wavelengths greater than 50a. *A&A suppl. Ser.*, 125 :149–173, 1997.
- [9] O. Gingerich. Review of Opacity Calculations. *Proceedings of the First Harvard-Smithsonian Conference on Stellar Atmospheres*, 167 :1–25, 1964.
- [10] P. Gouttebroze. Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. *A&A*, 413 :733–743, 2004.
- [11] P. Gouttebroze. Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. II : 2D azimuth-dependent case. *A&A*, 434 :1165–1171, 2005.
- [12] P. Gouttebroze. Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. III : Hydrogen spectrum. *A&A*, 448 :367–374, 2006.
- [13] P. Gouttebroze. Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. V : 2D transfer with 3D velocity fields. *A&A*, 487 :805–813, 2008.
- [14] P. Gouttebroze, P. Heinzel, and J.-C. Vial. The hydrogen spectrum of model prominences. *A&A Suppl. Ser.*, 99 :513–543, 1993.
- [15] P. Gouttebroze and N. Labrosse. A ready-made code for the computation of prominence NLTE models. *Solar Physics*, 196 :349–355, 2000.
- [16] P. Gouttebroze and N. Labrosse. Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. VI : A hydrogen plus helium system. *A&A*, 503 :663–671, 2009.
- [17] Pierre Gouttebroze. *Formation des raies spectrales et oscillations dans la chromosphère solaire*. Thèse d’Etat, Université Paris 7, 1980.
- [18] I. Hubeny and D. Mihalas. *Theory of Stellar Atmospheres : An introduction to Astrophysical Non-equilibrium Quantitative Spectroscopic Analysis*. Princeton University Press, 2015.

- [19] J.T. Jefferies. *Spectral line formation*. Blaisdell, 1968.
- [20] L.C. Johnson. Approximation for collisional and radiative transition rates in atomic hydrogen. *A&A*, 174 :227–236, 1972.
- [21] N. Labrosse and P. Gouttebroze. Formation of helium spectrum in solar quiescent prominences. *A&A*, 380 :323–340, 2001.
- [22] Nicolas Labrosse. *Modélisation du spectre de l'hélium dans les protubérances solaires*. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 2001.
- [23] P. Lemaire, P. Gouttebroze, J.-C. Vial, and G. E. Artzner. Physical properties of the solar chromosphere deduced from optically thick lines : I. Observations, data reduction, and modelling of an average plage. *A&A*, 103 :160–176, 1981.
- [24] G. L. Olson, L. H. Auer, and J. R. Buchler. A rapidly convergent iterative solution of the non-lte line radiation transfer problem. *JQSRT*, 35 :431–442, 1986.
- [25] J. Oxenius. *Kinetic Theory of Particles and Photons. Theoretical Foundations of Non-LTE Plasma Spectroscopy*. Springer-Verlag, 1986.
- [26] F. Paletou. Transfert de rayonnement : méthodes itératives. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 2, Série IV :885–898, 2001.
- [27] G. Peach. A general formula for the calculation of absorption cross sections for free-free transitions in the field of positive ions. *Royal Astronomical Society*, 130 :361–377, 1964.
- [28] C. Pecker-Wimel. *Introduction à la spectroscopie des plasmas*. Gordon and Breach, 1966.
- [29] R.J. Rutten. *Radiative transfer in stellar atmospheres*. 2003.
- [30] G. B. Rybicki and D. G. Hummer. An accelerated lambda iteration method for multilevel radiative transfer. I - Non-overlapping lines with background continuum. *A&A*, 245 :171–181, 1991.
- [31] E. Schatzman. *Astrophysique*. Masson et Cie, 1963.
- [32] J.E. Vernazza, E. H. Avrett, and R. Loeser. Structure of the Solar chromosphere ; ii. The underlying photosphere and temperature-minimum region. *ApJS*, 30 :1–60, 1976.
- [33] K. Werner and D. Husfeld. Multi-level non-LTE line formation calculations using approximate Lambda-operators. *A&A*, 148 :417–422, 1985.