

MANUEL D'UTILISATEUR

PRODOP : Transfert radiatif hors ETL dans les protubérances et filaments solaires (transfert 1D avec champ de vitesse vertical)

Martine Chane-Yook

`martine.chane-yook@universite-paris-saclay.fr`

Avec la collaboration de :

Pierre Gouttebroze

Jacques Dubau

Accès Web :

<https://idoc.osups.universite-paris-saclay.fr/medoc/tools/radiative-transfer-codes/>

Table des matières

1	Introduction	3
2	Descriptif du programme PRODOP	4
3	Algorithme	5
4	Modélisation d'une protubérance	7
5	Transitions Bound-Free (lié-libre) et Bound-Bound (lié-lié)	10
6	Physique atomique détaillée de l'atome	10
6.1	Hydrogène	10
6.2	Calcium	11
6.3	Magnésium	13
6.4	Hélium	15
7	Equations de populations et transfert radiatif	16
8	Méthode utilisée pour traiter le transfert radiatif	17
9	Explications des sousroutines	18
9.1	Liste de variables utilisées dans la sousroutine P5EXE	20
9.2	Partie Hydrogène (modèle de Johnson, [13])	22
9.3	Partie Calcium	31
9.4	Partie Hélium	34
9.5	Partie Magnésium	35
9.5.1	Physique atomique de l'atome du magnésium	35
9.5.2	Transfert radiatif hors ETL dans les 4 raies du Mg II	37
10	Résultats	38
10.1	Hydrogène	38
10.2	Calcium	42
10.3	Hélium	45
10.4	Magnésium	48
11	Exécution de PRODOP	51
12	Temps de calcul	53
13	Remerciements	53

14 Annexes	54
14.1 Données de PANDORA ([2]) du Mg I	54
14.2 Données de PANDORA ([2]) du Mg II	57

Bibliographie	64
----------------------	-----------

1 Introduction

La version originale du code PRODOP, écrite en Fortran 77/90 par P. Gouttebroze ([5], [6], [7], [9]), décrit le transfert radiatif hors ETL (1D) dans les protubérances et filaments solaires, avec redistribution partielle des fréquences pour les raies de résonance de l'hydrogène, du calcium et de l'hélium. Le code inclut un champ de vitesse vertical. Le problème consiste à résoudre un système d'équations comprenant l'équilibre d'ionisation des éléments les plus abondants, l'équilibre statistique des populations des niveaux (pour l'atome d'hydrogène et éventuellement d'autres atomes, ici le calcium, l'hélium), le transfert de rayonnement hors ETL dans les transitions étudiées.

Les protubérances et les filaments sont un même phénomène physique mais observé sous un angle différent. Le filament est observé sur le disque solaire et la protubérance est observée à l'extérieur du disque.

Les modèles d'atmosphère que l'on considère ici :

- sont isothermes et isobares définis par une température T , une pression P , une vitesse de microturbulence V_T , une épaisseur e , une hauteur h et une vitesse V (vitesse de la matière, qui se déplace en bloc de manière verticale),
- ou bien, ont des paramètres (définis ci-dessus) variables à travers la structure solaire.

Pour chaque modèle d'atmosphère, la partie hydrogène est d'abord traitée. On obtient ainsi la densité électronique et les intensités émergentes pour les raies de l'hydrogène. La densité électronique est ensuite utilisée dans le traitement du calcium (resp. hélium) afin d'obtenir les intensités émergentes pour les raies Ca II (resp. He I, He II) et les populations des niveaux du calcium (resp. hélium). Ces raies (intensité, profil) servent au diagnostic des protubérances et des filaments.

Le traitement des raies de résonance du Mg II (2796Å et 2803Å, appelées k et h) et des raies subordonnées (2791Å et 2798Å) a été rajouté dans la version originale de PRODOP.

Le code PRODOP, adapté pour le compilateur **gfortran**, est accessible depuis le site MEDOC d'IDOC (1D) :

<https://idoc.osups.universite-paris-saclay.fr/medoc/tools/radiative-transfer-codes/>

Dans la suite, je détaillerai le programme PRODOP (hydrogène, calcium, hélium et magnésium) : compréhension détaillée des codes, équations implémentées, algorithme, méthodes numériques utilisées, etc.

2 Descriptif du programme PRODOP

Nature du problème physique : Transfert radiatif (1D) hors ETL dans les protubérances et filaments solaires (raies HI, CaII, HeI, HeII, MgII), avec champ de vitesse vertical

Méthode de résolution : Méthode de Feautrier + Facteurs d'Eddington variables

Autre information :

- 2 options possibles pour les modèles d'atmosphère considérés ici : a/ ils sont isothermes et isobares définis par T, P, V_T , e, h, V (température, pression, vitesse de microturbulence, épaisseur, hauteur, vitesse de la matière); b/ leurs paramètres sont variables à travers la structure solaire

- On utilise la redistribution partielle des fréquences (PRD) pour les raies de résonnances de l'hydrogène, du calcium, de l'hélium et du magnésium et la redistribution complète des fréquences (CRD) pour les autres raies

Auteur : P. Gouttebroze

Programmes disponibles à partir de :

<https://idoc.osups.universite-paris-saclay.fr/medoc/tools/radiative-transfer-codes/>

Machines sur lesquelles le programme a été testé : PC

OS : Linux

Langage de programmation : Adapté en Fortran 90 pour le compilateur **gfortran** et testé (M. Chane-Yook)

Etat : Stable

Accessibilité : Groupe solaire et extérieur (MEDOC)

Nombre de lignes : $\sim 10\,000$

Temps de calcul : < 1 min (PC avec 4 processeurs de 2.67 GHz chacun) pour 2 modèles (à paramètres fixes) de protubérances

Références :

- P. Gouttebroze, P. Heinzel and J.-C. Vial, "The hydrogen spectrum of model prominences", A&A Sppl. Ser., 99, 513-543, 1993
- P. Gouttebroze and P. Heinzel, "Calcium to hydrogen line ratios in solar prominences", A&A, 385, 273-280, 2002

- N. Labrosse, P. Gouttebroze and J.-C. Vial, “Effect of motions in prominences on the helium resonance lines in the extreme ultraviolet”, A&A, 463, 1171-1179, 2007
- N. Labrosse, P. Gouttebroze and J.-C. Vial, “Diagnostics of active prominences”, The Physics of Chromospheric Plasmas ASP Conference Series, Vol. 368, 2007

3 Algorithmme

La figure 1 représente l’algorithme du programme PRODOP.

Il commence par une initialisation des paramètres physiques pour l’hydrogène :

- Equilibre statistique (voir figure 5) : A_{ji} (coefficient A d’Einstein), B_{ij} et B_{ji} (coefficients B d’Einstein), C_{ij} et C_{ji} (coefficients (de taux) d’excitation et de désexcitation collisionnelle)
- Intensités incidentes dans les raies et continus de l’hydrogène
- Température de rayonnement

La première étape de PRODOP est de calculer la densité des électrons qui sera utilisée dans le traitement du calcium, de l’hélium et du magnésium. Comment sont obtenus ces électrons libres ? Par ionisation de l’hydrogène et des autres éléments (He, métaux, etc), représentée par la boucle en rouge sur la figure 1. A l’intérieur de cette boucle générale pour l’hydrogène, on traite l’équilibre statistique de manière itérative, c-à-d on calcule les populations des niveaux de H en commençant par une densité électronique N_e égale à $1/2 N_H$, où N_H est la densité de l’hydrogène. Par itération, on obtient N_e et le modèle d’atmosphère de l’hydrogène, celui-ci étant l’élément dominant dans la protubérance ou le filament. Le spectre émergent pour H est calculé pour 3 valeurs de l’angle θ que fait le rayon lumineux avec la normale à la surface.

Maintenant qu’on a modélisé notre atmosphère en supposant que c’est essentiellement 90% d’hydrogène, on va l’appliquer à une impureté, par exemple le calcium dont on observe les raies du $CaII$. Pour étudier une raie du $CaII$, il faut connaître tous les états électroniques des ions du calcium. A la température considérée (dans la protubérance ou filament), il n’y a que du CaI , $CaII$ et $CaIII$, les autres étant négligeables. On pourra alors faire du transfert radiatif dans les raies du $CaII$. A la fin, on obtient ainsi le spectre émergent du $CaII$ pour 3 valeurs de l’angle d’incidence θ ainsi que les populations des niveaux du CaI , $CaII$ et $CaIII$.

Le même procédé est appliqué pour l’hélium et le magnésium.

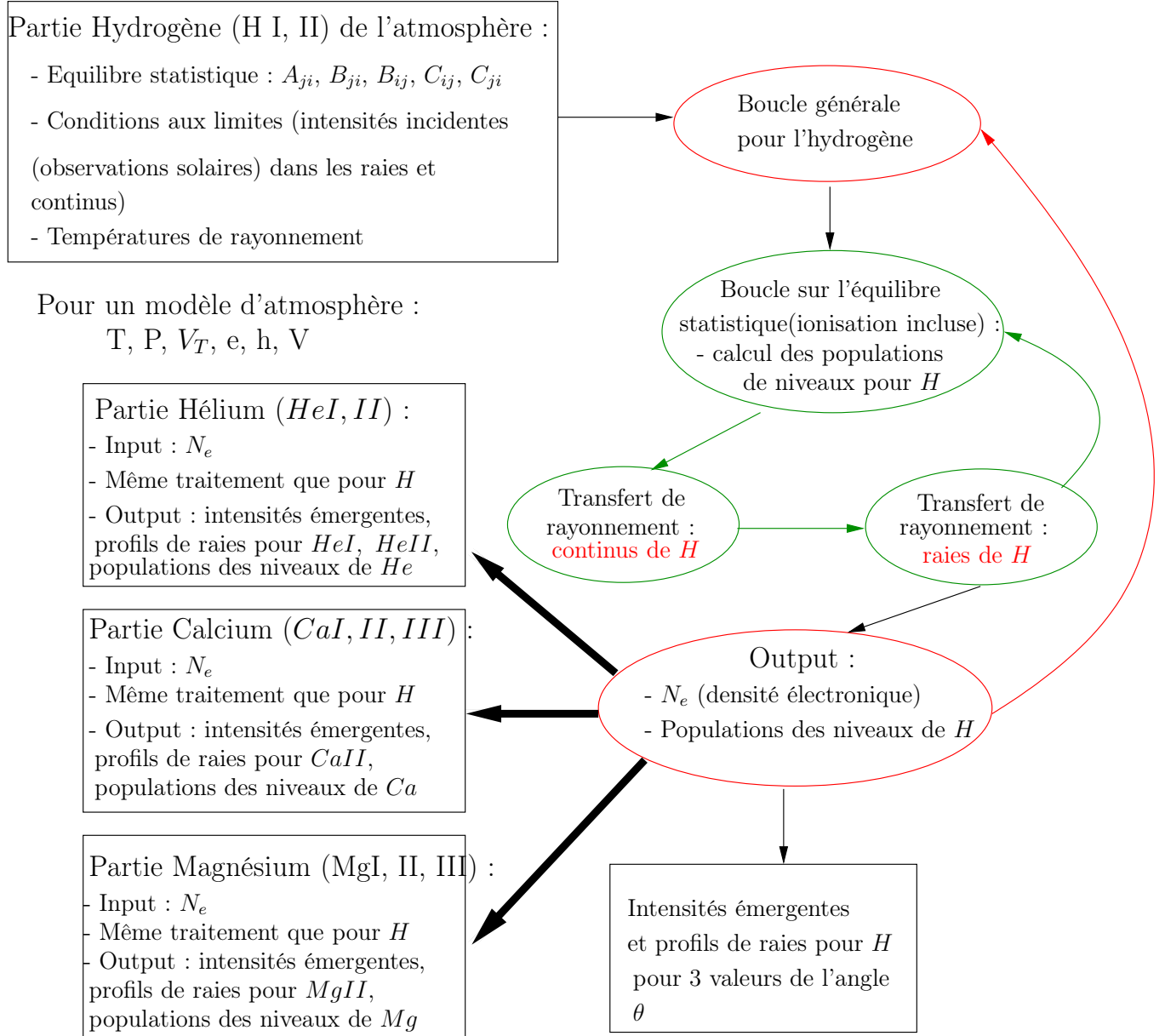


FIGURE 1 – Algorithme de PRODOP



FIGURE 2 – Protubérance solaire éruptive observée par SDO/AIA, à 304\AA et 171\AA , le 30/08/2012

4 Modélisation d'une protubérance

La figure 2 représente l'image d'une protubérance en éruption prise le 30/08/2012 par SDO/AIA aux longueurs d'onde 304\AA et 171\AA .

Dans la modélisation (voir figure 3), la protubérance est représentée par une couche plan-parallèle verticale, d'épaisseur e , située au-dessus de la surface du soleil à la hauteur h . Il s'agit ici d'une représentation $1D$. Chaque face de ce modèle symétrique est illuminée par le rayonnement incident provenant de la photosphère, de la chromosphère et de la couronne solaire. Ce champ de rayonnement est très important puisqu'il détermine les conditions aux limites pour la résolution des équations de transfert (voir paragraphe 7). A l'intérieur de la protubérance, on définit comme condition initiale 3 paramètres physiques : la température électronique T , la pression P , la vitesse de microturbulence V_T . La protubérance se déplace en bloc de manière verticale à la vitesse V . En raison de la symétrie du problème, les calculs sont effectués sur une demi couche seulement.

Sur la figure 4 sont représentées les positions de la protubérance et du filament par rapport au soleil et à l'observateur. Il y a une symétrie dans le modèle de protubérance (voir figure 3) mais pas dans le modèle de filament.

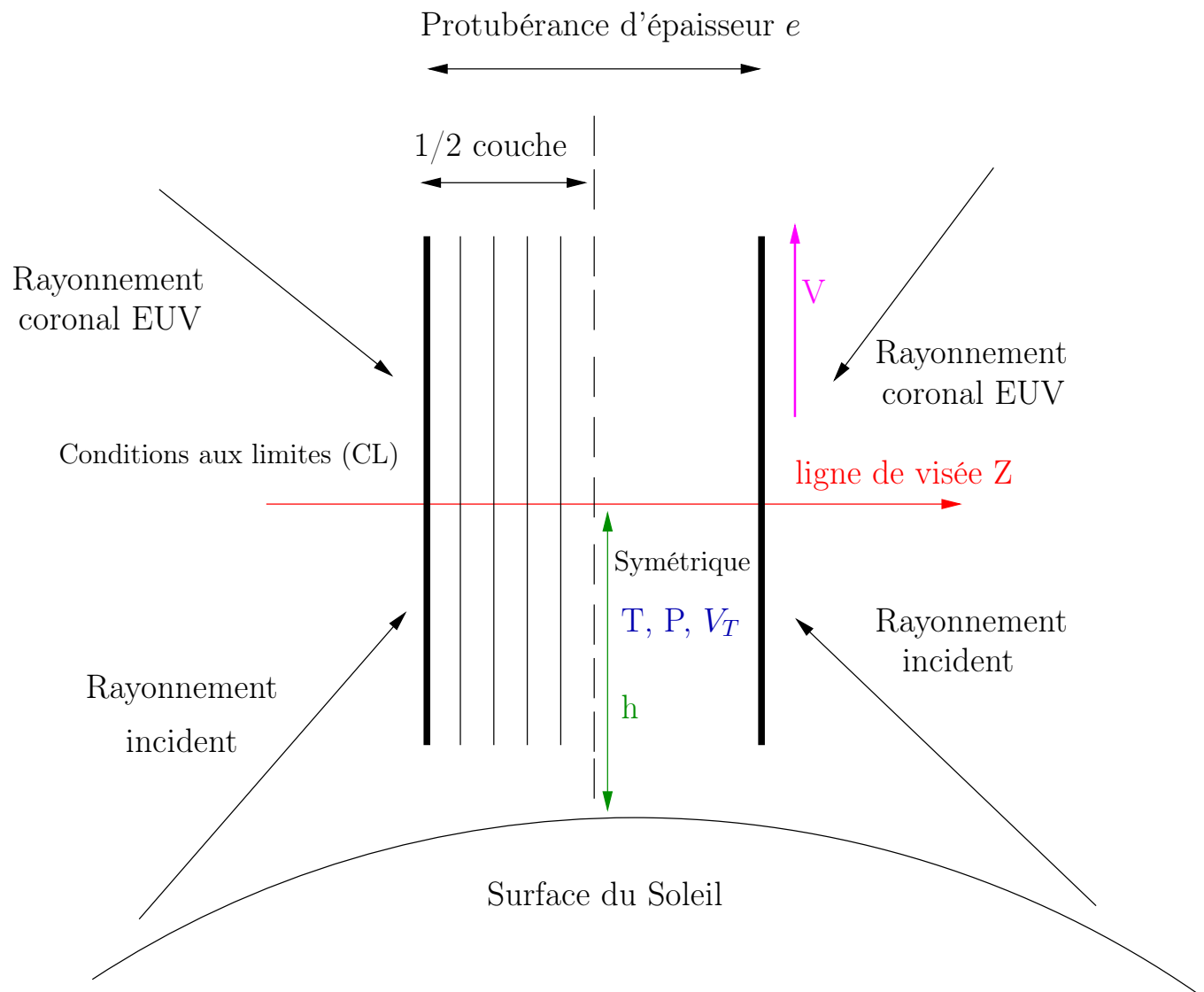
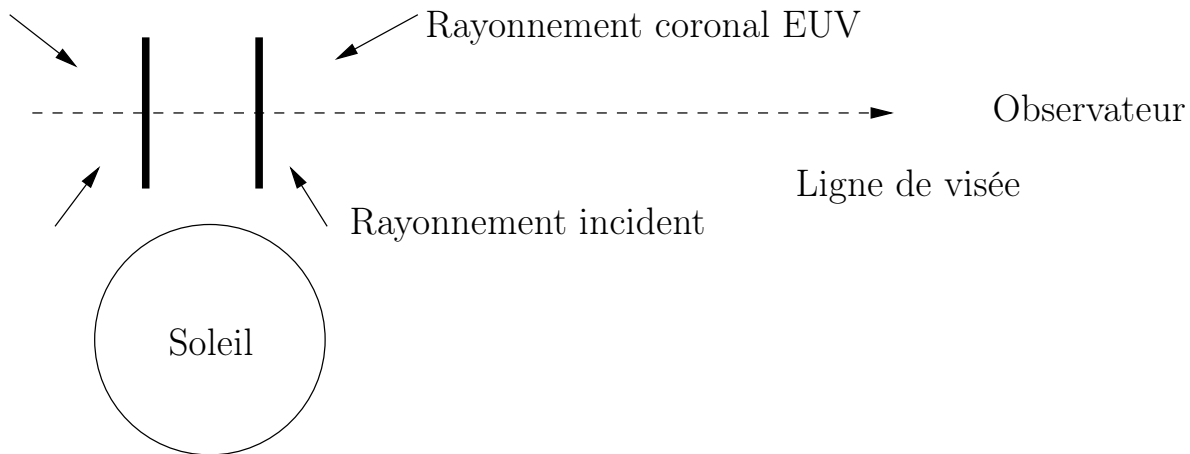
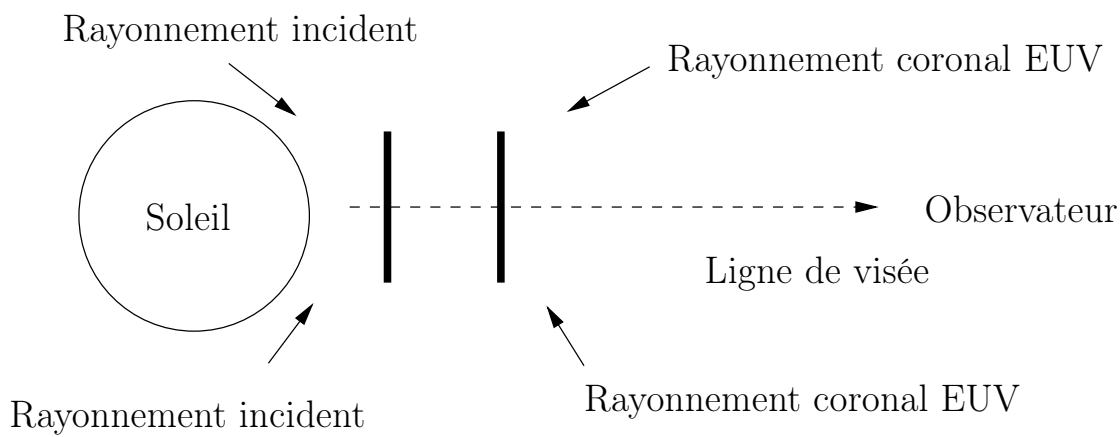


FIGURE 3 – Modélisation d'une protubérance



Position de la protubérance par rapport au soleil et à l'observateur



Position du filament par rapport au soleil et à l'observateur

FIGURE 4 – Positions d'une protubérance (en haut) et d'un filament (en bas) par rapport au soleil et à l'observateur

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

Les transitions prises en compte dans PRODOP sont les transitions Bound-Free et Bound-Bound, qui sont représentées sur la figure 5. Les Bound-Free sont les transitions qui vont d'un état (lié) i vers le continu et qui produisent un électron libre d'énergie ϵ . Cela commence à la limite infinie des états excités ($\epsilon = 0$). Les Bound-Bound sont les transitions qui vont du niveau i vers le niveau j par exemple.

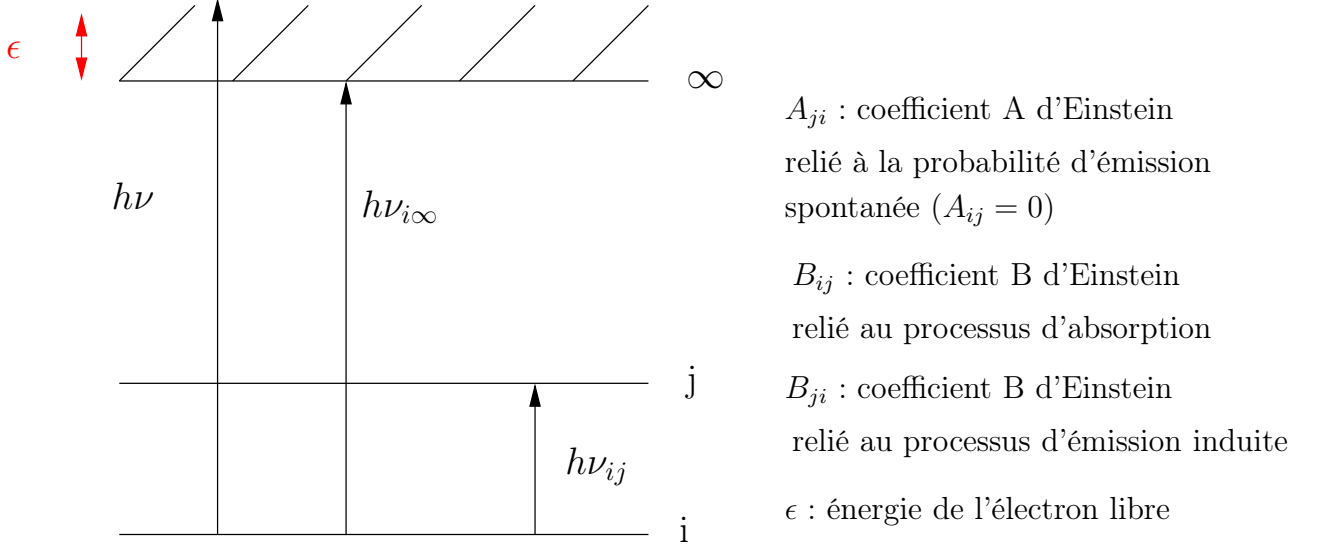


FIGURE 5 – Types de transitions considérées dans PRODOP

6 Physique atomique détaillée de l'atome

Il s'agit ici de décrire la physique atomique des atomes suivants : hydrogène, calcium, hélium et magnésium. Pour chaque élément, on définit NN comme le nombre de niveaux d'énergie (y compris le continu), $NTT = NN \times (NN - 1)/2$ le nombre total de transitions, $NTAC = NN - 1$ le nombre de "continus" (c-à-d transitions lié-libre) et $NTAR = NTT - NTAC$ le nombre de raies.

6.1 Hydrogène

Les transitions pour l'hydrogène sont résumées dans le tableau 1. Dans PRODOP, $NN = 21$ (20 niveaux et 1 continu), $NTAC = 20$, $NTT = 210$, $NTAR = 190$.

Transition NT	Niveau inférieur NI	Niveau supérieur NS	Nom des transitions	Longueur d'onde $\lambda(\text{\AA})$
1	1	2	<i>Ly</i> α	1215
2	1	3	<i>Ly</i> β	1025
3	2	3	<i>H</i> α	6564
4	1	4	<i>Ly</i> γ	972
5	2	4	<i>H</i> β	4862
6	3	4	<i>Pa</i> α	18756
7	1	5	<i>Ly</i> δ	949
8	2	5	<i>H</i> γ	4341
9	3	5	<i>Pa</i> β	12821
10	4	5	<i>Br</i> α	40522
11	1	6	<i>Ly</i> ϵ	937
12	2	6	<i>H</i> δ	4102
13	3	6	<i>Pa</i> γ	10935
14	4	6	<i>Br</i> β	26259
15	5	6	<i>Pf</i> α	7460
16	1	7	<i>Ly</i> 7	931
17	2	7	<i>H</i> ϵ	3971
...
<i>NTAR</i> + 1	1	<i>NN</i>	Lyman Continu	911
<i>NTAR</i> + 2	2	<i>NN</i>	Balmer continu	3645
...
<i>NTT</i>	<i>NN</i> - 1	<i>NN</i>		

TABLE 1 – Principales transitions pour l'hydrogène

6.2 Calcium

On considère 7 niveaux pour le calcium et 5 transitions radiatives (voir figure 6). Plus particulièrement, il s'agit des transitions d'absorption et d'émission décrites dans la table 2. Dans PRODOP, $NN = 7$ (5 niveaux du Ca II, 1 niveau du Ca I (fondamental), 1 niveau du Ca III (fondamental)), $NTT = 21$ (nombre total de transitions), $NTC = 16$ (nombre de transitions collisionnelles), $NTRC = 6$ (nombre de “continus” c-à-d transitions bound-free), $NTRD = 5$ (nombre de raies).

Pour plus de détails, voir la description de la subroutine CAIIP dans la section 9.3.

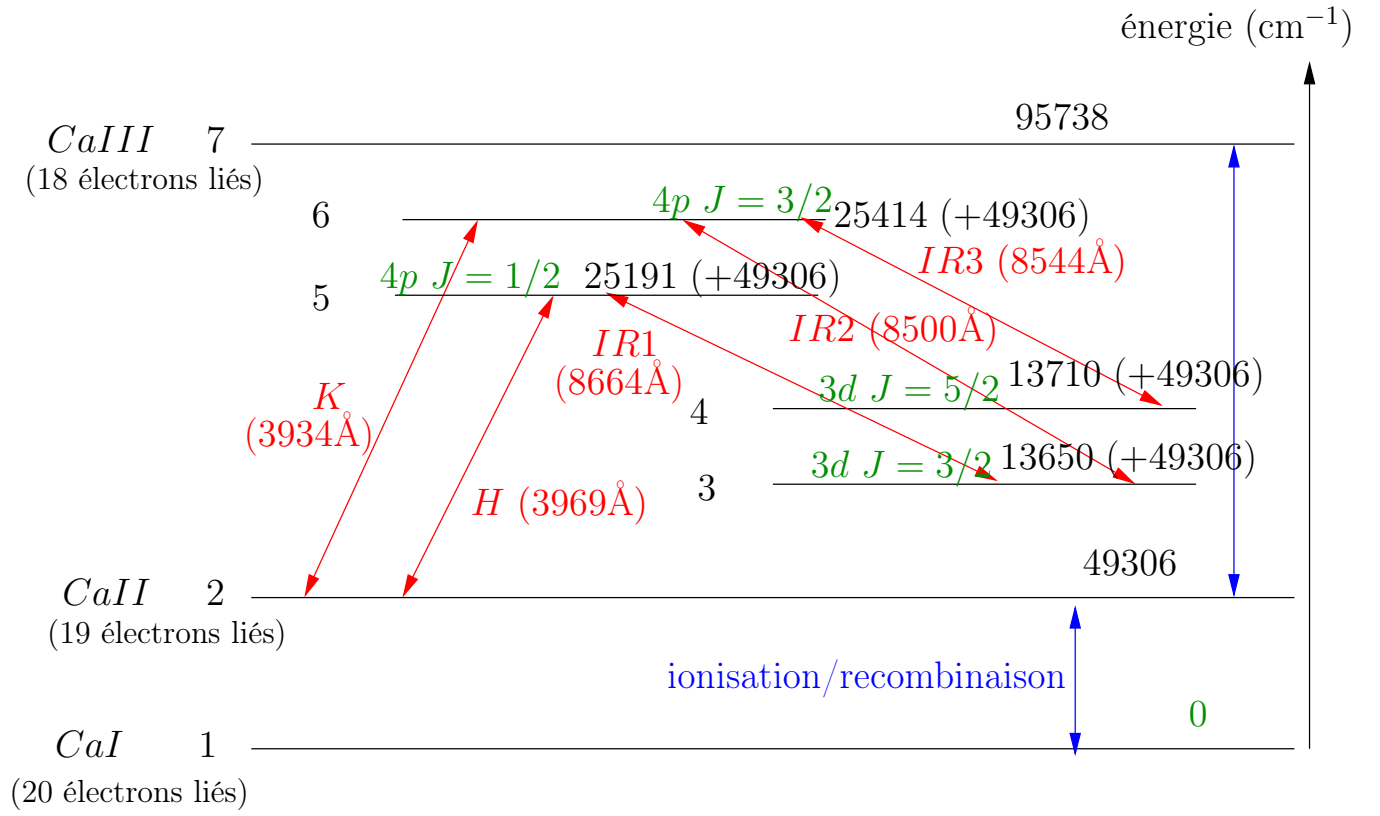


FIGURE 6 – Description des niveaux du calcium (la figure n'est pas à l'échelle) - 5 transitions radiatives (en rouge). $\omega = 2J + 1$ est le poids statistique du niveau concerné

Transition NT	Niveau inférieur NI	Niveau supérieur NS	Nom des transitions
1	1	2	1er continu : ionisation du fondamental du <i>CaI</i> vers le fondamental du <i>CaII</i>
2	1	3	ionisation : <i>ignorée</i>
3	2	3	excitation
4	1	4	ionisation : <i>ignorée</i>
5	2	4	excitation
6	3	4	excitation
7	1	5	ionisation : <i>ignorée</i>
8	2	5	raie <i>H</i> ($\lambda = 3969\text{\AA}$) : excitation
9	3	5	<i>IR1</i> ($\lambda = 8664\text{\AA}$) : excitation
10	4	5	excitation : raie interdite
11	1	6	ionisation : <i>ignorée</i>
12	2	6	raie <i>K</i> ($\lambda = 3934\text{\AA}$) : excitation
13	3	6	<i>IR2</i> ($\lambda = 8500\text{\AA}$) : excitation
14	4	6	<i>IR3</i> ($\lambda = 8544\text{\AA}$) : excitation
15	5	6	excitation
16	1	7	double ionisation : <i>ignorée</i>
17	2	7	2ème continu : ionisation de <i>CaII</i> vers <i>CaIII</i> (entre les fondamentaux du <i>CaII</i> et du <i>CaIII</i>)
18	3	7	3ème continu : ionisation
19	4	7	4ème continu : ionisation
20	5	7	5ème continu : ionisation
21	6	7	6ème continu : ionisation

TABLE 2 – Principales transitions pour le calcium

6.3 Magnésium

On considère 4 raies : h (2803Å), k (2796Å), 2791Å et 2798Å.

Dans ce cas, on considère 6 niveaux (selon les données atomiques de PANDORA, [2]) pour le magnésium et 4 transitions radiatives (voir figure 7). Les transitions considérées sont décrites dans la table 3.

Dans PRODOP, $NN = 6$ (4 niveaux du Mg II, 1 niveau du Mg I (fondamental), 1 niveau du Mg III (fondamental)), $NTT = 15$ (nombre total de transitions), $NTC = 9$ (nombre de transitions collisionnelles), $NTRC = 5$ (nombre de “continus” c-à-d transitions bound-free), $NTRD = 4$ (nombre de raies).

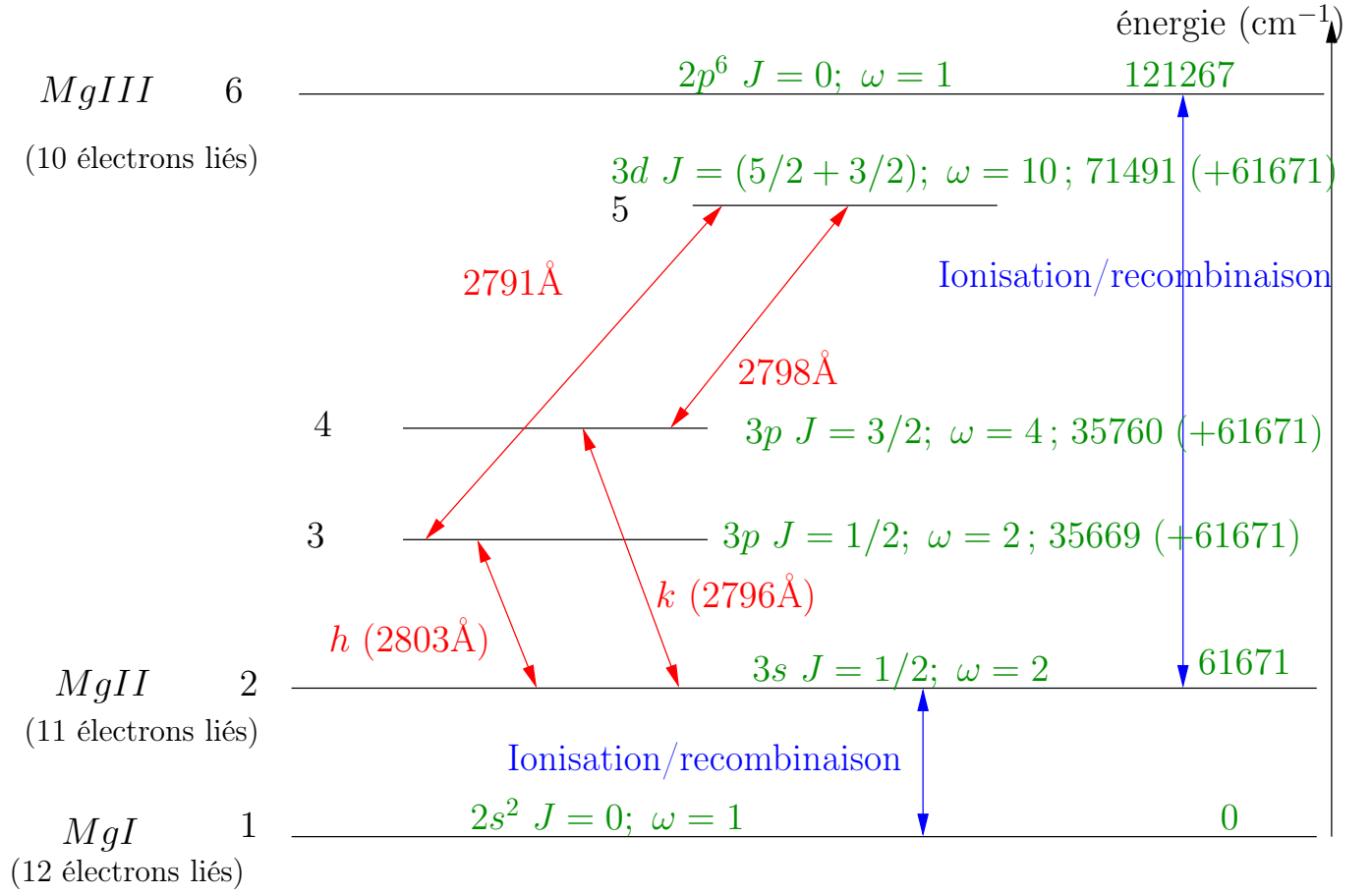


FIGURE 7 – Description des niveaux du magnésium (la figure n'est pas à l'échelle) - 4 transitions radiatives (en rouge). $\omega = 2J + 1$ est le poids statistique du niveau concerné

Transition NT	Niveau inférieur NI	Niveau supérieur NS	Nom des transitions
1	1	2	1er continu : ionisation du fondamental du <i>MgI</i> vers le fondamental du <i>MgII</i>
2	1	3	ionisation : ignorée
3	2	3	raie <i>h</i> ($\lambda = 2803\text{\AA}$) : excitation
4	1	4	ionisation : ignorée
5	2	4	raie <i>k</i> ($\lambda = 2796\text{\AA}$) : excitation
6	3	4	excitation : ignorée
7	1	5	ionisation : ignorée
8	2	5	excitation : ignorée
9	3	5	raie (subordonnée) à 2791\AA : excitation
10	4	5	raie (subordonnée) à 2798\AA : excitation
11	1	6	double ionisation : ignorée
12	2	6	2ème continu : ionisation de <i>MgII</i> vers <i>MgIII</i> (entre les fondamentaux du <i>MgII</i> et du <i>MgIII</i>)
13	3	6	3ème continu : ionisation
14	4	6	4ème continu : ionisation
15	5	6	5ème continu : ionisation

TABLE 3 – Principales transitions pour le magnésium

Pour plus de détails, voir la description de la subroutine MGIIP dans la section 9.5.1.

6.4 Hélium

Dans PRODOP, on considère :

- $NN = NN1 + NN2 + 1 = 34$ niveaux d'énergie (y compris le continu) avec $NN1 = 29$ et $NN2 = 4$
- $NTC = NTCE1 + NTCE2 + NN - 1$ transitions collisionnelles avec $NTCE1 = NN1 * (NN1 - 1)/2 - 7$ et $NTCE2 = NN2 * (NN2 - 1)/2$
- $NTRD = 76$ raies
- $NTRC = NN - 1$ “continus” c-à-d transitions bound-free

Pour plus de détails, voir la thèse de N. Labrosse : “Modélisation du spectre de l'hélium dans les protubérances solaires” [18].

7 Equations de populations et transfert radiatif

Considérons le niveau j de la figure 5. 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 :

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

Pour le calcium (figure 6), $n = 7$. Pour le magnésium (figure 7), $n = 6$.
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" (c-à-d taux) de désexcitation par rayonnement. A_{ji} et B_{ji} sont les coefficients d'Einstein (voir figure 5).

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" (c-à-d taux) d'excitation par rayonnement et C_{ij} le taux d'excitation par collisions. Ici, $A_{ij} = 0$.

L'expression de \bar{J}_{ij} est donnée par :

$$\bar{J}_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} J_\nu \Phi_\nu d\nu \quad (7.3)$$

où J_ν est l'intensité moyennée sur la direction $\mu = \cos \theta$, θ étant l'angle que fait le rayon lumineux avec la normale à la surface :

$$J_\nu = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I_\nu(\mu) d\mu \quad (7.4)$$

et Φ_ν le profil normalisé du coefficient d'absorption $\left(\int \Phi_\nu d\nu = 1 \right)$.

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 : calcium ou magnésium ou hydrogène ou hélium) :

$$\sum_{j=1}^n N_j = N_T \quad (7.5)$$

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} (c-à-d intégrées sur le profil de la raie centrée en ν_0) sont couplées avec l'équation de transfert radiatif (7.6).

L'intensité dans la transition considérée s'obtient en résolvant l'équation de transfert par la méthode de Feautrier :

$$\mu \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - S_\nu \quad (7.6)$$

τ_ν est la profondeur optique à la fréquence ν , et S_ν est la fonction source définie par :

$$S_\nu = \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu},$$

où κ_ν est le coefficient d'absorption et ϵ_ν le coefficient d'émission.

On obtient à la fin un système d'équations matricielles que l'on résout numériquement par la méthode de Feautrier ([12]). Pour plus de détails, 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, conditions aux limites. Ensuite, on entre dans les processus itératifs :

- La première boucle externe (*ITG*) concerne le calcul de l'équilibre statistique, le calcul des fonctions de redistribution pour les raies, le calcul des facteurs d'Eddington variables, sous l'hypothèse d'un milieu optiquement mince (c-à-d qu'il n'y a pas de transfert radiatif).
- La seconde boucle interne (*ICR*) concerne le transfert radiatif pour les transitions continues et les transitions discrètes. Elle se termine par un test de convergence. Puis on recalcule les nouveaux paramètres radiatifs (P_{ji}) ainsi que les températures de rayonnement pour les continus.

Ce résumé est valable pour l'hydrogène. Pour le calcium, l'hélium et le magnésium, on se contente de traiter le transfert radiatif et l'équilibre statistique sans recalculer la densité électronique.

L'équilibre statistique (7.1, 7.5) 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 (7.6) consiste à calculer les intensités dans les raies ou les continus à partir de la connaissance de la fonction source et des intensités aux limites. On utilise la méthode dite de Feautrier ([12, 22]), méthode de résolution d'un système linéaire aboutissant à une matrice tridiagonale, dont chaque élément est une matrice carrée (direction-fréquence).

Cependant, pour diminuer la taille des matrices, on réalise une intégration sur la direction à l'aide des facteurs d'Eddington variables (technique proposée par L.H. Auer et D. Mihalas, [1]). La méthode de Feautrier originale aurait produit des matrices carrées d'ordre 60, alors qu'ici on obtient des matrices d'ordre 20, ce qui réduit considérablement le temps de calcul. A la sortie, on obtient les intensités J_ν (7.4) moyennées sur toutes les directions à partir desquelles on peut recalculer de nouvelles fonctions sources 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, on utilise deux processus de redistribution en fréquence. La redistribution partielle ne concerne que les photons absorbés et réémis dans la même raie. La redistribution complète consiste à supposer qu'il n'y a aucune relation entre la fréquence du photon absorbé et la fréquence du photon réémis. C'est en général ce qu'on utilise pour les raies de Paschen, Balmer et les raies de Lyman formées à partir de niveaux élevés. Pour l'hydrogène, la redistribution partielle ne concerne que les raies $Ly\ \alpha$ et $Ly\ \beta$.

Tandis que pour les continus, il n'y a pas de problème de redistribution en fréquence.

Les sousroutines appelées dans PRODOP vont être détaillées dans le chapitre suivant.

9 Explications des sousroutines

Le programme PRODOP commence par la lecture des premiers paramètres du modèle (fichier input "model.dat", détaillé plus loin). Ensuite il traite l'abondance des métaux relative à l'hydrogène (sousroutine INIMET, détaillée dans le paragraphe 9.2). Enfin le programme met en place le maillage de la couche plan-parallèle représentant la protubérance ou le filament. La demi-couche d'épaisseur $1/2\ e$ (voir la figure 3) est divisée en $NXMOD = 46$ mailles. Dans le cas d'une protubérance définie par le paramètre $IVERT = 1$, on considère que le nombre total de mailles est $NZ = NXMOD = 46$ (demi-couche) à cause de la symétrie du problème. Dans le cas d'un filament ($IVERT = 0$), on considère que $NZ = 2\ NXMOD - 1 = 91$ (couche entière). Le programme termine par la sousroutine principale P5EXE.

La sousroutine principale P5EXE se décompose selon le schéma suivant :

- définition du maillage en espace (XMOD) et en fréquence (XFR)
 - définition des options générales du code (critère de convergence, ...)
 - définition des transitions permises (au-delà du niveau 5 pour H)
 - *do imdl = 1, ndml* : boucle sur chaque modèle d'atmosphère
 - I. Partie Hydrogène
 - II. Partie Calcium
 - III. Partie Hélium
 - IV. Partie Magnésium
- enddo*

Les fichiers en **input** pour PRODOP sont :

- ★ `intinc_H.dat` : intensités incidentes (demi-profil) pour l'hydrogène (1ère colonne : longueurs d'onde en Å, 2ème colonne : intensités en $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$)
- ★ `intica.dat` : intensités incidentes (demi-profil) pour le calcium (données d'Heinzel, 1ère colonne : fréquences en Hz, 2ème colonne : intensités en $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$)
- ★ `intinc_He.dat` : intensités incidentes (demi-profil) pour l'hélium (1ère colonne : fréquences en Hz, 2ème colonne : intensités en $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$)
- ★ `intimg.dat` : intensités incidentes (demi-profil) pour le magnésium (raies h et k : données d'Heinzel, [11]). La 1ère colonne correspond aux fréquences en Hz, la 2ème colonne aux intensités en $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$
- ★ `tembri.dat` : températures de brillance pour le flux solaire, sur le disque entier (1ère colonne : longueur d'onde en microns, 2ème colonne : température en K)
- ★ `model.dat` : fichier incluant le nombre de modèles à traiter et pour chaque modèle, une ligne contenant 6 paramètres (température (K), pression (dyn/cm^2), épaisseur (km), vitesse de microturbulence (km/s), altitude (km) à partir de la surface du soleil, vitesse de la matière (km/s)). Le fichier commence par des options :
 - IOEL : éléments à traiter (0 : H, 1 : H+He, 2 : H+He+Ca+Mg, 3 : H+Ca, 4 : H+Mg)
 - IOPCAC : absorption continue (=3) ou pas (=0)
 - IOPEAC : écriture des coefficients d'absorption continue (=1) ou pas (=0) dans le fichier de sortie fort.66
 - IVHYD : écriture de la liste des raies de H (=1) ou pas (=0) dans fort.66
 - IWRCR : écriture du taux de refroidissement radiatif (=1) ou pas (=0) dans fort.66
 - IVERT (1 : protubérance, 0 : filament), IPCI (0 : modèle isotherme et isobare, 1 : modèle à paramètres variables à l'intérieur de la structure solaire)
 - NZMOD : nombre de couches (mailles) dans la demi-structure solaire
 - NMDL : nombre de modèles à traiter

Les fichiers en **output** sont :

- ★ `resume.dat` : résumé des itérations
- ★ fort.66 (liste des transitions), fort.10 (`resume.dat` i.e résumé des itérations), fort.21 (`profilh.dat` i.e le profil de H sous forme numérique), fort.51 (`profihe.dat` i.e le profil de He sous forme numérique), fort.81 (`profica.dat` i.e le profil de Ca sous forme numérique), fort.91 (`profimg.dat` i.e le profil de Mg sous forme numérique), fort.20 (`fisuphy.dat` i.e intensités incidentes de H)

Après avoir exécuté le programme de visualisation (voir section 11), on obtient donc les fichiers suivants en format postscript : `profica.ps` (profil émergent pour Ca), `profihe.ps` (profil émergent pour He), `profilh.ps` (profil émergent pour H), `proinc.ps` (profil incident pour H), `profimg.ps` (profil émergent pour Mg), `pincmg.ps` (profil incident pour Mg), `pinche.ps` (profil incident pour He), `pinca.ps` (profil incident pour Ca).

Dans les paragraphes suivants, je détaillerai la partie hydrogène, calcium, hélium et ma-

gnésium, les sousroutines appelées ainsi qu’une liste de variables utilisées dans la sousroutine principale P5EXE.

9.1 Liste de variables utilisées dans la sousroutine P5EXE

- IVERT : 0 (cas filament : couche horizontale), 1 (cas protubérance : couche verticale)
- NMDL : nombre de modèles d’atmosphère à traiter
- NXMOD : nombre de mailles (ou subdivisions) dans la demi-couche (ou demi-structure solaire)
- NZ : nombre total de mailles
- NFR : nombre de fréquences dans chaque raie
- NMU : nombre de directions $\mu = \cos \theta$, où θ est l’angle d’incidence
- NPSOR : nombre de points pour la visualisation (profils de raies)
- NFRC : nombre de fréquences dans chaque continu
- NTAB : taille du tableau de températures TAB (voir sousroutine CAIP : pour le calcul des coefficients (de taux) d’ionisation et d’excitation collisionnelle OIS)
- NINF : niveau inférieur de la transition considérée
- NSUP : niveau supérieur de la transition considérée
- ITP : définit une transition permise ou non
- IOPRN : 1 (redistribution complète CRD), 3 (redistribution partielle PRD), 4 (PRD avec coefficient de cohérence dépendant de la fréquence : cas particulier pour $Ly \alpha$)
- IOPERA : 1 (on sort les profils de raies), 0 (on ne sort pas les profils de raies). IOPERA est lié à DL2 (voir plus loin)
- DL1 : représentation graphique (abscisse des profils de raies) pour les premières longueurs d’onde
- DL2 : représentation graphique (abscisse des profils de raies) pour les dernières longueurs d’onde
- IOPMRU : 1 (on calcule une seule matrice de redistribution par transition, commune à toutes les mailles), 0 (on calcule toutes les matrices de redistribution par transition, commune à toutes les mailles)
- XMOD : tableau qui définit la géométrie de la demi couche
- EPS et BEN : coefficients de couplage pour les raies
- CSI0 et ETA0 : paramètres qui sont pour les continus les équivalents de EPS et EPSxBEN pour les raies
- GIBAR : intensité moyenne pondérée par le profil d’absorption
- IOPECO : équivalent pour les continus de IOPERA (pour les raies)
- IOPFEV : option pour calculer les facteurs d’Eddington variables
- IPROF : 1 (on imprime les profondeurs optiques), 0 (sinon)
- IOPMIC : 1 (on tient compte de la pression microturbulente), 0 (sinon)
- NVLI : nombre de raies à visualiser
- IVHYD : option de visualisation pour l’hydrogène
- INIDLD : option pour initialiser automatiquement les largeurs Doppler à partir d’une température de référence TEREf (pour la représentation graphique)

- IOPCAC : 0 (pas d'absorption continue), 3 (absorption continue incluse dans les calculs)
- IOPEAC : écriture de l'absorption continue dans le fichier de sortie fort.66
- IOPATM : écriture des paramètres atmosphériques dans le fichier de sortie fort.66
- IOPTTC : écriture des taux de transitions continues
- PMU : valeurs de $\mu = \cos \theta$ ($\mu = 1$ correspond au tracé continu sur les profils de raies, $\mu = 0.6$ correspond au tracé en tiret, et $\mu = 0.2$ correspond au tracé en pointillé). θ est l'angle que fait le rayon lumineux avec la normale à la surface
- IVTR : indice pour la visualisation dans le transfert radiatif
- ETOT : énergie totale émise par la structure dans une raie donnée (protubérance ou filament)
- RDMAT : matrices de redistribution
- 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
- CAC : coefficient d'absorption continue
- TR : température de rayonnement pour une transition lié-libre
- FADIR : facteur de dilution pour les raies
- FADIC : facteur de dilution pour les continus
- CPOL : coefficients polynomiaux de degré 5 intervenant dans le calcul des facteurs de dilution (de dimension NCMX)
- FEVK et FEVL, FKTC et FLTC : facteurs d'Eddington variables (resp. raies et continus)
- HIEMC : intensité émise dans le continu (pour la sortie)
- RIK, RKI : taux de transitions radiatifs
- FIIR, FISR : flux incident inférieur et supérieur dans la raie
- FRR : fréquence dans la raie
- Paramètres atmosphériques (dimension NZ) : XM (masse-colonne), Z (position dans la couche), 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)
- NTR et NTC : numérotations des transitions discrètes et continues
- ICTR et ICTC : indices de contrôle pour les raies et les continus
- FRN : fréquence des niveaux
- XFR et XFRC : modèle de découpage en fréquence pour les raies et les continus
- BRN et BRP : bilan radiatif net avant et après les calculs (pour la convergence)
- SR et SC : fonctions source pour la raie et le continu
- STR : fonction source totale (raie + continu)
- CARR : coefficient d'absorption dans la raie
- COHER : coefficient de cohérence
- RXRO : paramètre de relaxation pour assurer la convergence
- CRITR : critère de convergence

- HN : population des niveaux de l'hydrogène en cm^{-3} (le nombre d'atomes dans l'état en question par cm^3)

9.2 Partie Hydrogène (modèle de Johnson, [13])

La partie hydrogène se décompose en 4 sous-parties suivantes :

1. Initialisation des paramètres atmosphériques :
 - Lecture des paramètres atmosphériques (model.dat)
 - INIFEV : initialisation des facteurs d'Eddington pour les transitions permises (raies + continus)
 - INIHYV3 : initialisation des paramètres atomiques pour l'équilibre statistique (AJI coefficient A d'Einstein, BIJ et BJI coefficients B d'Einstein, coefficients (de taux) d'ionisation et d'excitation S_i et S_e)
 - SOLINH (subroutine appelée une seule fois pour imdl=1) : on lit les intensités incidentes (fichier input "intinc_H.dat") et les températures de brillance (fichier input "tembri.dat"). On calcule les intensités pour les raies non définies dans "intinc_H.dat" grâce à "tembri.dat"
 - INTALT : calcul des facteurs de dilution (raies et continus) en tenant compte de l'assombrissement au bord du disque et de l'altitude de la protubérance/filament ($FADIR$ pour les raies et $FADIC$ pour les continus)
 - COLIDH : conditions aux limites pour H (intensités) pour une couche plan-parallèle verticale en mouvement
 - On calcule l'intégrale sur le profil de raie $HJBAR = \int_{-\infty}^{+\infty} J_\nu \Phi_\nu d\nu$
 - WRITFIS : écriture des conditions aux limites (ou intensités incidentes) DLA et FTLA sur des fichiers de sortie pour chaque élément (H, He, Mg, Ca)
 - INITR1 : initialisation des températures de rayonnement (correspondant au rayonnement d'un corps noir) pour les transitions bound-free à partir des facteurs de dilution et des températures de rayonnement incident
2. Boucle générale pour l'hydrogène :
 do $ITG = 1, ITGMAX$:
 - HYESV3 : résolution de l'équilibre statistique et d'ionisation (calcul des populations des niveaux de H et de la densité électronique)
 - ABSCON (si IOPCAC=3) : calcul de l'absorption continue au voisinage des raies étudiées
 - do $IT = 1, NTAR$: boucle sur les transitions discrètes
 RPCDEH : calcul des matrices de redistribution partielles et complètes
 enddo
 - Si $IOPFEV \geq 3$, on imprime les facteurs d'Eddington pour les raies et les continus via la subroutine ECRFEV
 - Sauvegarde des paramètres pour les raies ($HJBAR$ et BRN (bilan radiatif net)) et pour les continus (probabilités d'excitation/d'ionisation par rayonnement RIK)

- et *RKI*) ainsi que pour *HN* (populations de niveaux de l'hydrogène)
- *do icr = 1, ICRMAX* : boucle (interne) sur l'équilibre de pression
L'ionisation de l'hydrogène détermine la densité des électrons libres.
- EQSTHV3 : résolution des équations de l'équilibre statistique pour les populations des niveaux excités de l'hydrogène (*HN*). Plus précisément, on recalcule l'équilibre statistique car une partie des coefficients de transition P_{ji} donnés par (7.2) a changé (continus + raies)
- Transitions Bound-Free :
 - ★ *do itac = 1, NTAC* : boucle sur les continus
 - HCONTI : Transfert radiatif hors ETL pour les continus. On calcule les intensités et les probabilités de transitions P_{ji} données par (7.2)
 - ★ *enddo* (pour *itac*)
 - ★ COMPACH : comparaison pour la convergence (continus)
- Transitions Bound-Bound :
 - ★ *do itar = 1, NTAR* : boucle sur les raies
 - RPRHV3 : Transfert radiatif hors ETL pour les raies
 - ★ *enddo* (pour *itar*)
 - ★ COMPARH : comparaison pour la convergence (raies)
 - ★ Préparation pour l'itération suivante (définition de ECMX) : on calcule les coefficients de transition radiative *RIK* à partir de la température de rayonnement *TR* calculée précédemment,
NOVRIK : pour les continus
NOVBRV3 : pour les raies.
- *enddo* (pour *icr*)
- NOVTR2 : on recalcule la température du rayonnement pour les transitions Bound-Free (continus)
- Convergence et procédure de sauvegarde pour *HJBAR*, *HN*, *BRN*, *RIK*, *RKI*
enddo (pour *ITG*)
- 3. Ecriture des facteurs d'Eddington (*FEVK* pour les raies et *FKTC* pour les continus)
- 4. Sortie des résultats : on recalcule une fois encore les quantités pour avoir les résultats de la convergence à la dernière itération. Puis on calcule les profils de raies avec les résultats de cette dernière itération.
 - ABSCON : calcul de l'absorption continue due aux différents éléments (définis dans la subroutine INIMET)
 - EQSTHV3
 - ECRIPOP : écriture des populations de niveaux pour H sur le fichier de sortie fort.66
 - Pour les raies
 - RPCDEH
 - RPRHV3
 - SUMRA (si IOPRA=1) : écriture des longueurs d'onde *AMBDA*, etc
 - PROFLI : profil de raies

- Pour les continus
 - HCONTI
- COMPARH
- COMPACH
- RADCOV3 (si IWRCR=1)
- If ICV = 0 then (si le 1er modèle d'atmosphère a bien été traité)
 - ★ NMDLC = NMDLC+1 (incrémentation sur les modèles)
 - ★ définition de FR et BJ pour les niveaux (I=1,NN-1)
 - ★ POP31 : écriture des populations *HN*
 - ★ RESUME_H : écriture des différentes quantités (énergie totale *ETOT*, longueurs d'onde *AMBDA*, etc)
 - ★ SFTEST
 - ★ If IOEL=1 ou 2 (partie Hélium) : HTOHE (transition de l'hydrogène vers l'hélium) et FHELs (transfert radiatif hors ETL pour l'hélium)
 - ★ If IOEL=2 ou 3 (partie Calcium) : HYTOCA (transition de l'hydrogène vers le calcium) et CAIIP (transfert radiatif hors ETL pour le calcium)
 - ★ If IOEL=2 ou 4 (partie Magnésium) : HYTOMG (transition de l'hydrogène vers le magnésium) et MGIIP (transfert radiatif hors ETL pour le magnésium)
- endif (ICV=0)

On va maintenant décrire les sousroutines appelées ci-dessus.

INIMET

Cette sousroutine calcule le poids total des éléments C_1 et l'abondance totale C_2 relative à l'hydrogène des $NEL = 20$ éléments suivants : He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ar, K, Ca, Cr, Mn, Fe, CO, Ni, H.

Output : C_1 et C_2

INIFEV

Initialisation des facteurs d'Eddington pour les raies (*FEVK* et *FEVL*) et les continus (*FKTC* et *FLTC*) à chaque fréquence et pour chaque maille.

Input : NZ (nombre de mailles), $NTAR$ (nombre de raies), $NTAC$ (nombre de continus), NFR (nombre de fréquences dans une raie), $NFRC$ (nombre de fréquences dans un continu)

Output : *FEVK*, *FEVL*, *FKTC* et *FLTC*

INIHV3

Calcul des paramètres atomiques pour l'équilibre statistique pour l'hydrogène : coefficients A et B d'Einstein pour les photons (*AJI*, *BIJ*, *BJI* qui sont indépendants de la

température des électrons), coefficients (de taux) d'excitation collisionnelle et coefficients (de taux) d'ionisation collisionnelle (*OIS* dans PRODOP) pour les électrons, appelés S_e et S_i dans les formules ci-dessous. Ces coefficients sont indépendants de la densité électronique. Le modèle utilisé pour l'hydrogène est le modèle de L.C. Johnson ([13]).

AJI est obtenue par la fonction AEMS (dans PRODOP) qui est calculée à partir des “facteurs de Gaunt” (Table 1 de [13]).

BJI est obtenu à partir de AJI et BIJ est tel que $\omega_i B_{ij} = \omega_j B_{ji}$, où ω_i est le poids statistique associé au niveau i .

Calcul des coefficients (de taux) d'excitation collisionnelle (fonction *CECH* dans PRODOP) :

Soient n et n' deux niveaux ($n < n'$). Le coefficient (de taux) d'excitation est donné par la formule suivante (Johnson, [13]) implémentée dans PRODOP :

$$S_e(n, n') = (8kT/\pi m)^{1/2} \frac{2n^2}{x} \pi a_0^2 y^2 \left(A_{nn'} \left[\left(\frac{1}{y} + \frac{1}{2} \right) E_1(y) - \left(\frac{1}{z} + \frac{1}{2} \right) E_1(z) \right] \right) \\ + (8kT/\pi m)^{1/2} \frac{2n^2}{x} \pi a_0^2 y^2 \left(\left[B_{nn'} - A_{nn'} \ln \frac{2n^2}{x} \right] \left[\frac{1}{y} E_2(y) - \frac{1}{z} E_2(z) \right] \right) \quad (9.1)$$

$E_i(z) = \int_1^\infty e^{-zt} t^{-i} dt$ s'appelle dans la littérature l'Intégrale Exponentielle d'ordre i ($i = 0, 1, 2, \dots$).

m est la masse de l'électron, $a_0 = 0.5292 \cdot 10^{-8}$ cm est le rayon de Bohr.

Dans ce qui suit, E_n est l'énergie du niveau n de l'hydrogène et on a :

$$y = (E_{n'} - E_n)/kT, \\ z = r_{nn'} + y, \\ x = 1 - (n/n')^2, \\ B_{nn'} = \frac{4n^4}{n'^3} x^{-2} \left(1 + \frac{4}{3} x^{-1} + b_n x^{-2} \right), \\ b_n = n^{-1} (4 - 18.63n^{-1} + 36.24n^{-2} - 28.09n^{-3}), \quad n \geq 2, \\ A_{nn'} = 2n^2 x^{-1} f_{nn'}, \\ f_{nn'} = \frac{32}{3\sqrt{3}} \frac{n}{\pi n'^3} x^{-3} g(n, x), \\ g(n, x) = g_0(n) + g_1(n) x^{-1} + g_2(n) x^{-2}, \\ r_{nn'} = r_n x, \\ r_n = 1.94n^{-1.57}$$

avec g_0 , g_1 , g_2 : facteurs de Gaunt pour les transitions Bound-Free et sont donnés par la table suivante (table 1 de [13]) :

	$n = 1$	$n = 2$	$n \geq 3$
$g_0(n)$	1.11330	1.0785	$0.9935 + 0.2328n^{-1} - 0.1296n^{-2}$
$g_1(n)$	-0.4059	-0.2319	$-n^{-1}(0.6282 - 0.5598n^{-1} + 0.5299n^{-2})$
$g_2(n)$	0.07014	0.02947	$n^{-2}(0.3887 - 1.181n^{-1} + 1.470n^{-2})$

TABLE 4 – Facteurs de Gaunt

Calcul des coefficients (de taux) d’ionisation collisionnelle (fonction CICH dans PRODOP) :

On considère ici le niveau n . Le coefficient (de taux) d’ionisation est donné par la formule suivante (Johnson, [13]) implémentée dans PRODOP :

$$\begin{aligned}
S_i(n) = & (8kT/\pi m)^{1/2} 2n^2 \pi a_0^2 y_n^2 A_n \left[\frac{1}{y_n} E_1(y) - \frac{1}{z_n} E_1(z_n) \right] \\
& + (8kT/\pi m)^{1/2} 2n^2 \pi a_0^2 y_n^2 (B_n - A_n \ln 2n^2) [\zeta(y_n) - \zeta(z_n)],
\end{aligned} \tag{9.2}$$

où m est la masse de l’électron et

$$\begin{aligned}
y_n &= I_n/kT, \\
z_n &= r_n + I_n/kT,
\end{aligned}$$

$$\zeta(t) = E_0(t) - 2E_1(t) + E_2(t)$$

avec I_n qui est l’énergie d’ionisation du niveau n de l’hydrogène.

Output : *AJI*, *BIJ*, *BJI*, *OIS*, *DLDREF* en fréquence et *DNDREF* en longueur d’onde (largeurs Doppler pour les transitions Bound-Free).

SOLINH

Définition des intensités incidentes pour les raies de H dans le but de fournir des conditions aux limites pour la résolution des équations de Transfert radiatif.

Le fichier input “intinc_H.dat” contient les intensités incidentes pour $NLI = 17$ raies de H (1ère colonne : longueurs d’onde en Å, 2ème colonne : intensités en erg/cm²/s/sr/Hz). Le fichier input “tembri.dat” qui est une table de température de brillance est utilisée pour calculer les intensités *FINT* pour les autres raies de l’hydrogène qui ne se trouvent pas dans “intinc_H.dat”.

Input : *NN*, *NTT*, *NTAR*, *NFIMX*, *NCMX*, *NINF*, *NSUP*, *NFR*, *NTR*, *ICTR*, *NFINT*

Output : *FINT*

INTALT

Calcul des facteurs de dilution en tenant compte de l’assombrissement au bord du disque (“limb darkening”) et de l’altitude de la structure solaire. Il n’y a pas de “limb darkening” pour les raies de Lyman.

Input : *ALTI*, *NTAR*, *NTAC*, *NCMX*, *CPOL*

Output : *FADIR* (pour les raies) et *FADIC* (pour les continus).

COLIDH

Conditions aux limites (CL) pour H (intensités) pour une couche plan-parallèle verticale en mouvement (pour les raies et les continus)

Input : *VKMS*, *HKM*, *NCMX*, *CPOL*, *NZ*, *NN*, *NTT*, *NTRD*, *NTRC*, *NFR*, *NFRC*, *NFIMX*, *ITRD*, *ICTR*, *NINF*, *NSUP*, *FRN*, *DN*

Output : conditions aux limites inférieures et supérieures pour les continus (FIIC, FISC) et pour les raies (FIIR, FISR), GIOM

WRITFIS

Ecriture des conditions aux limites dans un fichier de sortie fort.LU où LU est un entier.
Output : *FILA*, *DLA*

INITR1

Initialisation de la température de rayonnement (*TR*) correspondant aux taux de photoionisation dans les transitions Bound-Free de H à partir des températures de rayonnement incidente et du facteur de dilution *FADIC*. On suppose au départ que la structure est optiquement mince.

La section efficace de photoionisation *SEP* pour l’hydrogène est obtenue à l’aide des facteurs de Gaunt ([4]).

La température de rayonnement va changer au cours des itérations.

Input : *NZ*, *NN*, *NTT*, *NTAC*, *NFRC*, *NTC*, *NINF*, *FRN*, *XFRC*, *FADIC*, *RIK*, *TE*

Output : *TR*

HYESV3

Résolution de l’équilibre statistique et d’ionisation pour des températures et pressions données : on calcule les populations des niveaux de H et la densité électronique.

Dans le cas des filaments, on inclut dans le calcul de la pression un terme dû à la microturbulence.

La sous-routine HYESV3 fait appel aux 4 sous-routines suivantes :

TXCOLL : on calcule les “probabilités” (c-à-d taux) de transition collisionnelle (*CIJ* et *CJI*). On a besoin de la densité des électrons.

INIRIKH : on calcule les “probabilités” (c-à-d taux) de photoionisation *RIK* (photoionisation) et *RKI* (recombinaison radiative). On utilise la densité électronique pour la recombinaison mais pas pour la photoionisation.

EQSTHV3 : résolution des équations statistiques pour les populations des niveaux de H de manière itérative. On obtient à la fin un système linéaire à résoudre. Output : *HN* pour chaque niveau et chaque maille.

SAHARA : calcul de la densité électronique *HNE* et de la densité des autres éléments *HNION*. La loi de Saha à l'ETL donne le degré d'ionisation de chaque ion. On utilise ici *HNH* (et non *HN*).

Input pour HYESV3 : *NZ, NN, NTT, NTAR, NTAC, NFRC, C1, C2, ITP, NINF, NSUP, NTC, FRN, POM, XFRC, Z, XM, TE, VT, HNH, HNE, HN, NTAB, TAB*

Output pour HYESV3 : *CIJ, CJI, RIK, RKI, HNE, HNION*

ABSCON

Cette sous-routine est appelée lorsque *IOPCAC* = 3 (elle n'entre pas dans le transfert radiatif). Elle calcule l'absorption continue au voisinage des raies et fait appel à la sous-routine PROFSC.

PROFSC : calcule la profondeur optique *TAUC* à l'extérieur de la couche, la fonction source continue *FSC*, le taux de diffusion cohérente *CSCAT* pour une fréquence donnée ainsi que le coefficient d'absorption continu *CABCO*.

Pour calculer *CABCO*, on a besoin de l'absorption continue (LTE) par les ions négatifs de H, par l'aluminium, par l'hydrogène (la section efficace de photoionisation *SEPION* est calculée à partir des facteurs de Gaunt ([4])), par le carbone, par le magnésium, par le silicium et par le fer.

Input : *IVISU, NZ, NN, NTT, NTRD, NNHYD, TE, Z, HNH, HNE, XNHYD, ITRD, NINF, NSUP, FRN, SC, DCAC, CAC*

Output pour ABSCON : *TAUC, FSC, CSCAT, CABCO*

RPCDEH (pour les raies de résonance)

Redistribution partielle pour H. On calcule aussi les constantes d'élargissement des raies (naturel et collisionnel).

RPCDEH fait appel aux sous-routines suivantes :

ELCOH1 : calcul de l'élargissement collisionnel *DFRCO* pour les raies de l'hydrogène
COHEVB : calcul du coefficient de cohérence pour différentes fréquences de la raie *Ly α* de l'hydrogène (version pour une grille de fréquence bilatérale)
MRDBLYA : calcul de la matrice de redistribution pour la raie *Ly α* de l'hydrogène
MRDBIL : calcul de la matrice de redistribution pour les raies autres que *Ly α*, version générale (cas des raies avec "a frequency-independent coherence coefficient")

Input pour RPCDEH : *IRS, IOPMRU, NZ, NN, NTT, NTRD, NFR, IVISU, IOP, ITRD, NINF, NSUP, FRN, AE, TE, VT, HNE, HN, DND, AM, COHE, FR, PHIX*

Output pour RPCDEH : RDMAT (matrice de redistribution)

ECRFEV

Ecriture des facteurs d'Eddington variables *FEVK*

HCONTI

Résolution des équations de transfert radiatif hors ETL pour les transitions Bound-Free de l'hydrogène afin de calculer les intensités et les probabilités de transition (P_{ji} est proportionnel aux intensités et sert à l'équilibre statistique).

HCONTI fait appel aux sousroutines suivantes :

CSIETAH : calcule les paramètres *CSI0* et *ETA0* qui sont, pour les continus, les équivalents de ϵ et $\epsilon \times B$ pour les raies (coefficients de couplage)

PROFSC : voir plus haut dans la sousroutine ABSCON

TFCFEV : résolution des équations de transfert radiatif pour les continus, avec des sources d'absorption externes (output : intensité à l'intérieur de la couche *GI* et intensité moyenne *GIBAR*) et les fonctions sources *S*. On utilise la méthode de Feautrier (différences finies) et les facteurs d'Eddington variables

NOVFEV : calcule les nouveaux facteurs d'Eddington (output : *FEVK* et *FEVL*) à partir des fonctions sources ([1]). Cette sousroutine est valable pour les transitions discrètes et Bound-Free

TFCOM : est l'équivalent de la sousroutine TFCFEV mais dans le cas optiquement mince (output : *GI*, *GIBAR* et *S*)

TRALA : calcule l'intensité émergente *HIEMC* (intégrale de la fonction source) à l'aide des probabilités de transition

Input pour HCONTI : *IT, IVERT, NZ, NN, NTT, NTAR, NTAC, NFRC, NMU, NMUV, IOPECO, IOPFEV, ITP, NTC, NINF, FRN, FRC, POM, TE, HNH, HNE, Z*

Output pour HCONTI : *HIEMC* (intensité émergente) et *RIKP* (probabilités de transition pour les continus)

COMPACH

Comparaison pour la convergence : on compare RIK (paramètre de transition radiative pour l'hydrogène à l'itération précédente) avec $RIKP$ (paramètre à l'itération finale)

RPRHCV3

On calcule tout le transfert radiatif pour les raies de l'hydrogène.

RPRHCF fait appel aux sousroutines suivantes :

EPSBHV3 (préparation pour le transfert radiatif) : calcul des coefficients de couplage BEN pour un modèle d'atome à deux niveaux pour l'hydrogène (output : BEN). BEN sert à transformer l'intensité en la fonction source qui sert à calculer l'intensité émergente.

TFRFEV : résolution des équations de transfert radiatif NLTE pour les raies par la méthode de Feautrier (différences finies) et des facteurs d'Eddington variables. On calcule les intensités à l'intérieur des mailles et les fonctions sources (output : intensité moyenne $GIBAR$ et intensité à l'intérieur de la couche GI). On en déduit alors la fonction source dans la raie elle-même SR et la fonction source totale STR)

NOVFEV : calcule les nouveaux facteurs d'Eddington $FEVK$ et $FEVL$ (voir ci-dessus la sousroutine HCONTI)

Input pour RPRHCF : $IRS, NZ, NN, NTT, NTRD, NTRC, NFR, NMU, IVERT, Z, TE, NTR, NINF, NSUP, AJI, BIJ, BJI, HJBAR$

Output pour RPRHCF : BEN (coefficient de couplage pour les raies), SR et STR (fonctions sources), GI et $GIBAR$ (intensité à l'intérieur de la couche et intensité moyenne), $BRN1$ (Net Radiative Bracket)

COMPARH

Comparaison pour la convergence : on compare les bilans radiatifs nets BRN (à l'itération précédente) et BRP (à l'itération finale). BRN est en rapport avec l'équilibre statistique et est calculé en fonction des intensités.

NOVRIK

Calcul des coefficients de transition radiative pour les continus.

Input : $NZ, NTAC, ICTC, RXIK, RIKP$

Output : RIK

NOVBRV3

Calcul des coefficients de transition radiative pour les raies.

Input : NZ , $NTRD$, $ICTR$, $RXRO$

Output : BRN

NOVTR2

Mise à jour de la température de rayonnement (TR) pour les transitions Bound-Free de l'hydrogène.

Input : ITG , $IVTR$, $RXTR$, NZ , NN , NTT , $NTAC$, $NFRC$, $ICTC$, NTC , $NINF$, FRN , $XFRC$, $RIKP$, TE

Output : TR

PROFLI

Calcul des profils de raies émergentes pour différentes valeurs de $\mu = \cos \theta$.

Input : IRS , NZ , NN , NTT , $NTRD$, NFR , $NMUV$, $NPSOR$, $ITRD$, $NINF$, $NSUP$, FRN , $DL1$, $DL2$, PMU , FR , STR , DND , AM , CAR , CAC , TO , $NFINT$, $FRFI$, $FINT$, $TOTO$, $ETOT$, $FWHM$

Output : XX (écart en longueur d'onde), YY (intensité émergente)

SFTEST

Ecriture des fonctions sources à la surface de la structure $SPOPS$ (calculée à partir de HN) et au centre de la couche $SRADS$ (calculée à partir des intensités GI à l'intérieur de la couche).

9.3 Partie Calcium

La partie calcium se résume aux 4 appels de sous-routines suivants :

- HYTOCA : sous-routine qui fait la transition de H vers Ca. On prépare les données pour Ca : on calcule l'intensité moyenne en fonction de la longueur d'onde, les coefficients d'absorption et d'émission liés aux continus et à la diffusion pure. On recalcule tout le spectre solaire (intensité, profil de raies H, ...)
- POP31 : écriture de la position Z des mailles, des populations de niveaux de H (HN), de la densité électronique (HNE), de la densité totale d'hydrogène (HNH)

- **RESUME_H** : écriture des paramètres d'atmosphère (*TSLAB*, *PSLAB*, *EPST*, *VTUR*, *HKM*), de la masse colonne, de l'épaisseur optique pour le continu de Lyman et de Balmer, de la densité de H et des électrons à la surface de la couche, de la densité de H et des électrons au milieu de la couche. Calcul de la densité électronique moyenne *HNEM* et de la mesure d'émission *EMEU*
- **CAIIP** : traitement du calcium. On ne recalcule plus la densité des électrons. On fait le même traitement pour H, à savoir : on calcule les intensités émergentes pour les raies du Ca II, on fait du transfert radiatif pour ces raies et on calcule les populations des niveaux du calcium.

On va maintenant décrire les sousroutines appelées ci-dessus.

HYTOCA

Transition de H vers Ca. On calcule les coefficients d'absorption et d'émission liées aux continus et à la diffusion pure. HYTOCA fait appel aux sousroutines suivantes :

PROFSC : voir plus haut la sousroutine ABSCON

SERLYM2 : calcul des coefficients d'absorption (*CAB*) et d'émission (*CEM*) dus aux raies Lyman à la fréquence *FREQ*. On additionne les différentes composantes (raies Lyman). On n'utilise pas les populations *HN*.

FONSOC4 : calcul de l'intensité moyenne interne $GINU = J_\nu = \frac{1}{4\pi} \oint I_\nu d\omega$ (ω est l'angle solide) à partir de la fonction source *SF*, des intensités incidentes (*HIINF*, *HISUP*) et de la profondeur optique *TAUC* via la sousroutine SF2JNU

Input pour HYTOCA : *LYLI*, *IVERT*, *NZ*, *NN*, *NTAR*, *NFR*, *HKM*, *TE*, *Z*, *HNH*, *HNE*, *HN*, *FRN*, *FRR*, *DNDR*, *AMR*, *SR*, *CARR*, *NNHYD*, *NLAMX*, *NLA*, *XNHYD*, *XLA*, *GINU*

Output pour HYTOCA : *CABF* et *CEBF* (coefficients d'absorption et d'émission pour les continus), *CADP* (pour la diffusion pure)

CAIIP

La sousroutine CAIIP traite les raies du Ca II.

Dans PRODOP, *NN* = 7 (5 niveaux du Ca II, 1 niveau du Ca I (fondamental), 1 niveau du Ca III (fondamental)), *NTT* = 21 (nombre total de transitions), *NTC* = 16 (nombre de transitions collisionnelles), *NTRC* = 6 (nombre de transitions bound-free), *NTRD* = 5 (nombre de raies).

Voici quelques définitions des variables utilisées dans la sousroutine CAIIP (se référer à la figure 6 et à la table 2) :

- NUMAT : numéro atomique du Ca
- HMA : masse atomique du Ca
- ABOND : abondance de Ca relative à H
- INF : tableau de dimension NN, contenant 1 (si c'est un niveau fondamental) et 0 (si c'est un niveau intermédiaire). INF=/1,1,0,0,0,0,1/
- POM : tableau de taille NN contenant les poids statistiques de chaque niveau pour Ca. POM=/1,2,4,6,2,4,1/
- FRN : tableau de taille NN représentant la fréquence des niveaux. CL est la vitesse de la lumière en cm/s.
 - ★ $FRN(1) = 0$
 - ★ $FRN(2) = 49306 \times CL$ où 49306 est l'énergie d'ionisation du Ca I
 - ★ $FRN(3) = FRN(2) + 13650.21 \times CL$
 - ★ ...
 pour plus de détails, se référer à la figure 6
- ITC : tableau de dimension NTC correspondant au numéro des transitions collisionnelles (voir table 2). ITC=/1,3,5,6,8,9,10,12,13,14,15,17,18,19,20,21/
- TAB : tableau de taille *NTAB* contenant les températures électroniques, qui sert de référence au tableau *OIS*
- OIS : tableau de dimension (NTAB,NTC) contenant les coefficients d'ionisation et d'excitation collisionnelle pour chaque transition et pour chaque température TAB
- ITRD : tableau de dimension NTRD correspondant au numéro des raies (voir table 2). ITRD=/8,9,12,13,14/
- ICTR : tableau de dimension NTRD, rempli de 1 (si c'est une transition permise). ICTR=/1,1,1,1,1/
- AJI : tableau de dimension NTRD correspondant aux probabilités d'émission spontanée (données provenant de NIST)
- IOPRN : tableau de dimension NTRD, rempli de 1 (si on traite la raie en CRD) et de 3 (si on traite la raie en PRD, c'est le cas des raies de résonance)
- FADI : tableau de dimension NTRD correspondant aux facteurs de dilution
- ITRC : tableau de dimension NTRC correspondant au numéro des transitions bound-free. ITRC=/1,17,18,19,20,21/
- OREF : tableau dimension (NFRC,NTRC) correspondant aux longueurs d'onde (Å) pour chaque transition continue
- ALP : tableau de dimension (NFRC,NTRC) contenant les sections efficaces de photoionisation pour le continu

CAIIP fait appel aux sous-routines suivantes :

SOLICA : on lit le fichier input "intica.dat" (intensités incidentes correspondant aux longueurs d'onde pour les raies du Ca II)

INIFEVCA : Initialisation des facteurs d'Eddington variables

INTESCA : classification des transitions pour le calcium. Il y a 7 niveaux pour le calcium

(NN). Il y a $NTT = 21$ transitions. Parmi les transitions permises, il n'y a que 5 raies et 2 continus qui sont traités. On calcule la densité totale de l'élément Ca (HNT) et l'absorption continue (voir plus haut dans la partie H la sous-routine **ABSCON**). Output : $BRN2$, $BRN1$, HN , $DNDREF$, $DLDFREF$, CAC .

INIRIK2 : calcul des probabilités de transitions radiatives pour les continus (transitions bound-free) du calcium à partir de $GINU$ obtenu par la sous-routine **HYTOCA**. Output : RIK , RKI

TXCOLL : voir plus haut la partie H

COLIDCA : conditions aux limites pour une couche plan parallèle verticale en mouvement. $VDOP$ est la vitesse doppler (nombre sans dimension). GAM représentent les directions. $FRDOP$ est la fréquence doppler.

WRITFIS : écriture des conditions aux limites dans un fichier de sortie fort.LU, où LU est un entier

RPCDCA : équivalent à la sous-routine **RPCDEH** pour l'hydrogène.

Elle calcule la matrice de redistribution et fait appel aux sous-routines **ELCOCA** (calcul de l'élargissement collisionnel pour les raies Ca II) et **MRDBIL** (voir plus haut la partie H)

EQSTGV3 : équivalent à la sous-routine **EQSTHV3** pour l'hydrogène. Il s'agit de la résolution des équations d'équilibre statistique pour les populations des niveaux du calcium. Output : HN

RPRGV3 : équivalent à la sous-routine **RPRHV3** pour l'hydrogène. Il s'agit du transfert radiatif hors ETL pour les raies

COMPAR : équivalent à la sous-routine **COMPARH** pour l'hydrogène.

NOVBRV3 : voir la partie hydrogène

SUMRA : écriture sur le fichier de sortie fort.66 des quantités TO, BEN, GIBAR, COHE, EPS

PROFCAL : calcul des profils émergents des raies du Ca II

POP31 : voir la partie hydrogène

SFTEST : voir la partie hydrogène

ELCOCA : calcul de l'élargissement collisionnel pour les raies du Ca II

La sous-routine **CAIIP** se termine comme pour l'hydrogène, c-à-d on recalcule une nouvelle fois les quantités pour avoir les résultats de la convergence à la dernière itération et on sort les profils de raies (hydrogène et calcium). Plus précisément, pour les raies Ca II, on appelle les sous-routines suivantes vues plus haut : **RPRGCF**, **ECRFEV**, **SUMRA**, **PROFLI**, **PROEM2**, **POP31**, **SFTEST**.

9.4 Partie Hélium

La partie Hélium se résume en 2 appels de sous-routines suivants :

HYTOHE : transition de H vers He

FHELS : transfert radiatif hors ETL pour l'hélium.

Pour plus de détails, voir la thèse de N. Labrosse : "Modélisation du spectre de l'hélium dans

les protubérances solaires” ([18]).

9.5 Partie Magnésium

La partie magnésium (transfert radiatif hors ETL pour les 4 raies du MgII : h (2803 Å), k (2796 Å), 2791 Å et 2798 Å) se résume en 2 appels de sous-routines suivants :

HYTOMG : transition de l’hydrogène vers le magnésium. On calcule les coefficients d’absorption et d’émission liés aux continus et à la diffusion pure (même principe que pour le calcium, voir la sous-routine HYTOCA). On considère pour l’hydrogène les populations des 5 premiers niveaux ainsi que le continu.

MGIIP : cette sous-routine est divisée en deux parties. La première concerne les paramètres atomiques, décrite dans le paragraphe 9.5.1 et la seconde le transfert hors ETL pour les raies du MgII, décrite dans le paragraphe 9.5.2.

Le fichier **input** contenant (**demi-profil**) les intensités incidentes des 4 raies du magnésium est “intimg.dat” (raies h et k : données d’Heinzel, [11]). Il est structuré de la manière suivante :

- 1ère ligne : numéro de la raie, nombre de points
- les autres lignes : fréquence en Hz (1ère colonne), intensité en $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$ (2ème colonne)

Cette structure s’applique pour les 4 raies du magnésium dans l’ordre suivant :

- raie n°1 : raie h
- raie n°2 : raie k
- raie n°3 : 2791 Å
- raie n°4 : 2798 Å

9.5.1 Physique atomique de l’atome du magnésium

Dans le cas du magnésium, on prend $NN = 6$ niveaux, $NTC = 9$ transitions collisionnelles, $NTRD = 4$ raies, $NTRC = 5$ transitions bound-free, $NTAB = 3$ (dimension du tableau TAB de température correspondant aux coefficients de transition (voir ci-dessous OIS) provenant des données de PANDORA, voir l’annexe 14). Voici quelques définitions des variables utilisées dans la sous-routine MGIIP. Se référer à la figure 7 et à la table 3 pour les valeurs des tableaux définis ci-dessous et ci-dessus.

- NUMAT=12 : numéro atomique du Mg
- HMA=24.305 : masse atomique du Mg
- ABOND= 3.388×10^{-5} : abondance du Magnésium relative à H (données de PANDORA : [2], annexe 14)

- INF : tableau de dimension NN, rempli de 1 (si c'est un niveau fondamental) et de 0 (si c'est un niveau intermédiaire). INF=/1,1,0,0,0,1/
- POM : tableau de taille NN correspondant aux poids statistiques de chaque niveau (selon les données de PANDORA et la description des niveaux du magnésium de la figure 7). POM=/1,2,2,4,10,1/
- FRN : tableau de taille NN correspondant à la fréquence des niveaux. CL est la vitesse de la lumière en cm/s.
 - ★ FRN(1) = 0
 - ★ FRN(2) = 61671×CL où 61671 est l'énergie d'ionisation du Mg II
 - ★ FRN(3) = FRN(2)+35669.31×CL
 - ★ ...
 pour plus de détails, se référer à la figure 7
- ITC : tableau de dimension NTC correspondant au numéro des transitions collisionnelles (voir table 3). ITC=/1,3,5,9,10,12,13,14,15/
- TAB : tableau de dimension NTAB correspondant aux températures données pour les OIS (voir ci-dessous). TAB=/ 4.E3, 8.E3, 16.E3 /
- OIS : tableau de dimension (NTAB,NTC) correspondant aux coefficients d'ionisation (CI de l'annexe 14 sur les données de PANDORA) et d'excitation collisionnelle (CE de l'annexe 14 sur les données de PANDORA) pour chaque transition et pour chaque température TAB. Se référer à la table 3 et l'annexe 14.

(OIS(J,1),J=1,3)=/ 6.4E-8, 9.5E-8, 1.43E-7 / : données CI de la table de Mg I, Pandora

(OIS(J,2),J=1,3)=/ 3.578E-7, 2.663E-7, 2.048E-7 / : données CE pour la raie h de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,3),J=1,3)=/ 7.152E-7, 5.327E-7, 4.097E-7 / : données CE pour la raie k de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,4),J=1,3)=/ 1.028E-6, 7.632E-7, 5.805E-7 / : données CE pour la raie 2791 Å de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,5),J=1,3)=/ 8.246E-7, 6.088E-7, 4.54E-7 / : données CE pour la raie 2798 Å de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,6),J=1,3)=/ 1.328E-8, 1.138E-8, 1.245E-8 / : données CI pour le 2ème continu de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,7),J=1,3)=/ 2.321E-8, 3.103E-8, 3.989E-8 / : données CI pour le 3ème continu de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,8),J=1,3)=/ 2.326E-8, 3.109E-8, 3.997E-8 / : données CI pour le 4ème continu de la table de Mg II, Pandora

(OIS(J,9),J=1,3)=/ 7.868E-8, 1.017E-7, 1.247E-7 / : données CI pour le 5ème continu de la table de Mg II, Pandora

- ITRD : tableau de dimension NTRD correspondant au numéro des raies (voir table 3). ITRD=/3,5,9,10/

- **ICTR** : tableau de dimension NTRD, rempli de 1 (si c'est une transition permise). ICTR=/1,1,1,1/
- **AJI** : tableau de dimension NTRD correspondant aux probabilités d'émission spontanée (données provenant de NIST)
- **IOPRN** : tableau de dimension NTRD, rempli de 1 (si on traite la raie en CRD) et de 3 (si on traite la raie en PRD, c'est le cas des raies de résonnance)
- **FADI** : tableau de dimension NTRD correspondant aux facteurs de dilution
- **ALP** : tableau de dimension (NFRC,NTRC) correspondant aux sections efficaces de photoionisation
- **OREF** : tableau de dimension (NFRC,NTRC) correspondant aux longueurs d'onde (Å) pour chaque transition continue
- **ITRC** : tableau de dimension NTRC correspondant au numéro des transitions bound-free. ITRC=/1,12,13,14,15/

Les valeurs des tableaux OIS, POM proviennent des données de PANDORA (annexes, [2]).

Si ICVAL = 1, on entre les tableaux TAB et OIS. Si ICVAL = 0, on entre le tableau SIGM (de taille NTC) qui est la section efficace de ionisation par collision au lieu de TAB et OIS.

9.5.2 Transfert radiatif hors ETL dans les 4 raies du Mg II

La seconde partie de la subroutine MGIIP concerne la formation des raies du magnésium dans les protubérances solaires (est identique à l'hydrogène, au calcium et à l'hélium). Elle se résume par les appels de sousroutines suivantes.

- **SOLIMG** : lecture des intensités incidentes du magnésium (fichier "intimg.dat").
- **INIFEVCA** : initialisation des facteurs d'Eddington
- **INITESCA** : classification des transitions pour le magnésium
- **TXCOLL** : voir la partie hydrogène
- **COLIDMG** : conditions aux limites pour une couche plan parallèle verticale en mouvement. VDOP est la vitesse Doppler (nombre sans dimension). GAM représentent les directions. FRDOP est la fréquence doppler. C'est dans cette subroutine que l'on symétrise le demi-profil "intimg.dat" des intensités incidentes du Mg
- **WRITFIS** : écriture des conditions aux limites dans un fichier de sortie fort.LU, où LU est un entier
- **RPCDMG** : équivalent à la subroutine **RPCDEH** pour l'hydrogène. Elle calcule la matrice de redistribution et fait appel aux sousroutines *ELCOMG* (calcul de l'élargissement collisionnel pour les raies Mg II) et *MRDBIL* (voir plus haut la partie H)
- **EQSTGV3** : équivalent à la subroutine **EQSTHV3** pour l'hydrogène. Il s'agit de la résolution des équations de l'équilibre statistique pour les populations des niveaux excités du magnésium

- **RPRGV3** : équivalent à la subroutine **RPRHV3** pour l'hydrogène. Il s'agit du transfert radiatif hors ETL pour les raies du magnésium
- **COMPAR** : équivalent à la subroutine **COMPARH** pour l'hydrogène.
- **NOVBRV3** : voir la partie hydrogène
- **SUMRA** : écriture sur le fichier de sortie fort.66 des quantités TO, BEN, GIBAR, COHE, EPS
- **PROFMG** : calcul des profils émergents des raies du Mg II
- **POP31_Mg** : voir la partie hydrogène
- **SFTEST** : voir la partie hydrogène
- **ELCOMG** : calcul de l'élargissement collisionnel pour les raies du Mg II

10 Résultats

Dans les paragraphes 10.1, 10.2, 10.3 et 10.4, on va donner les profils émergents des raies de l'hydrogène, de *CaII*, de *HeI*, *HeII* et de *MgII* obtenus par le programme PRODOP correspondant à un modèle d'atmosphère isotherme et isobare donné (cas d'une protubérance).

Les profils émergents sont donnés pour $\mu = \cos \theta = 1$.

10.1 Hydrogène

La figure 8 représente le rapport des intensités intégrées ($E(V)/E(V=0)$) en fonction de la vitesse (km/s) pour le modèle suivant, avec de l'absorption continue :

$T = 6500$ K, $p = 0.1$ dyn cm⁻², épaisseur = 650 km, $VT = 5$ km/s, altitude = 10000 km.

Les profils émergents des raies de l'hydrogène pour $V = 0$ km/s et $V = 100$ km/s sont représentés sur les figures 9 et 10.

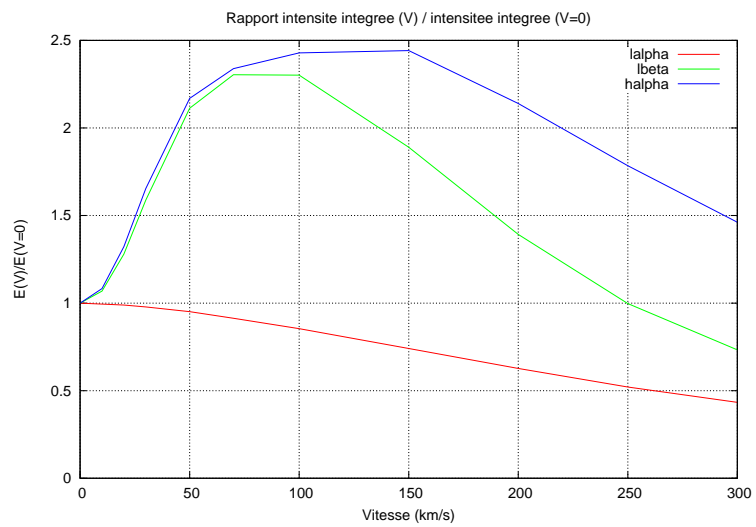


FIGURE 8 – Rapport des intensités intégrées ($E(V)/E(V=0)$) en fonction de la vitesse pour les raies $L\alpha$, $L\beta$ et $H\alpha$ de l'hydrogène

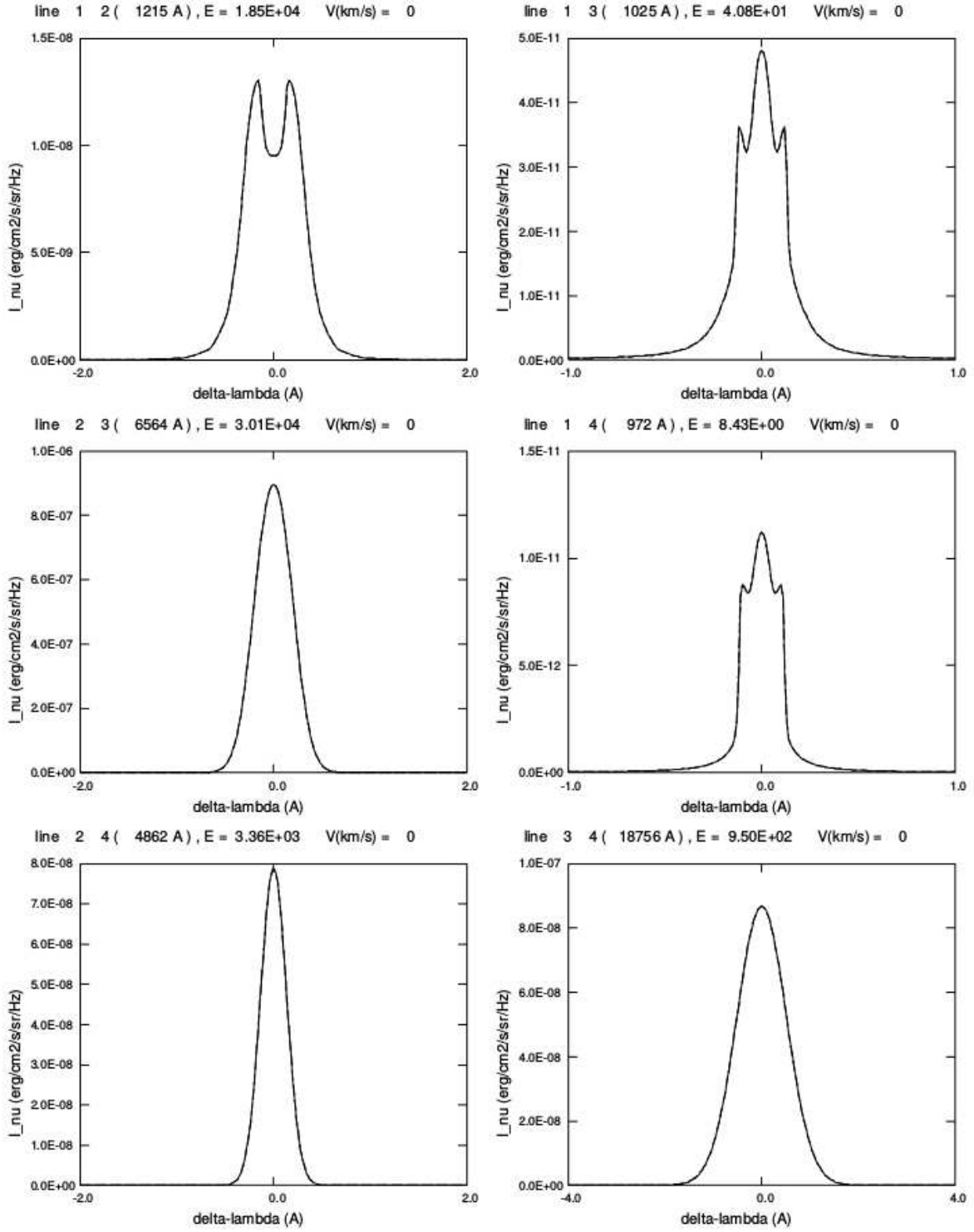


FIGURE 9 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) $L\alpha$, $L\beta$, $H\alpha$, $L\gamma$, $H\beta$, $P\alpha$ de l'hydrogène, pour $V = 0$ km/s, avec de l'absorption continue, pour $\mu = \cos \theta = 1$. Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

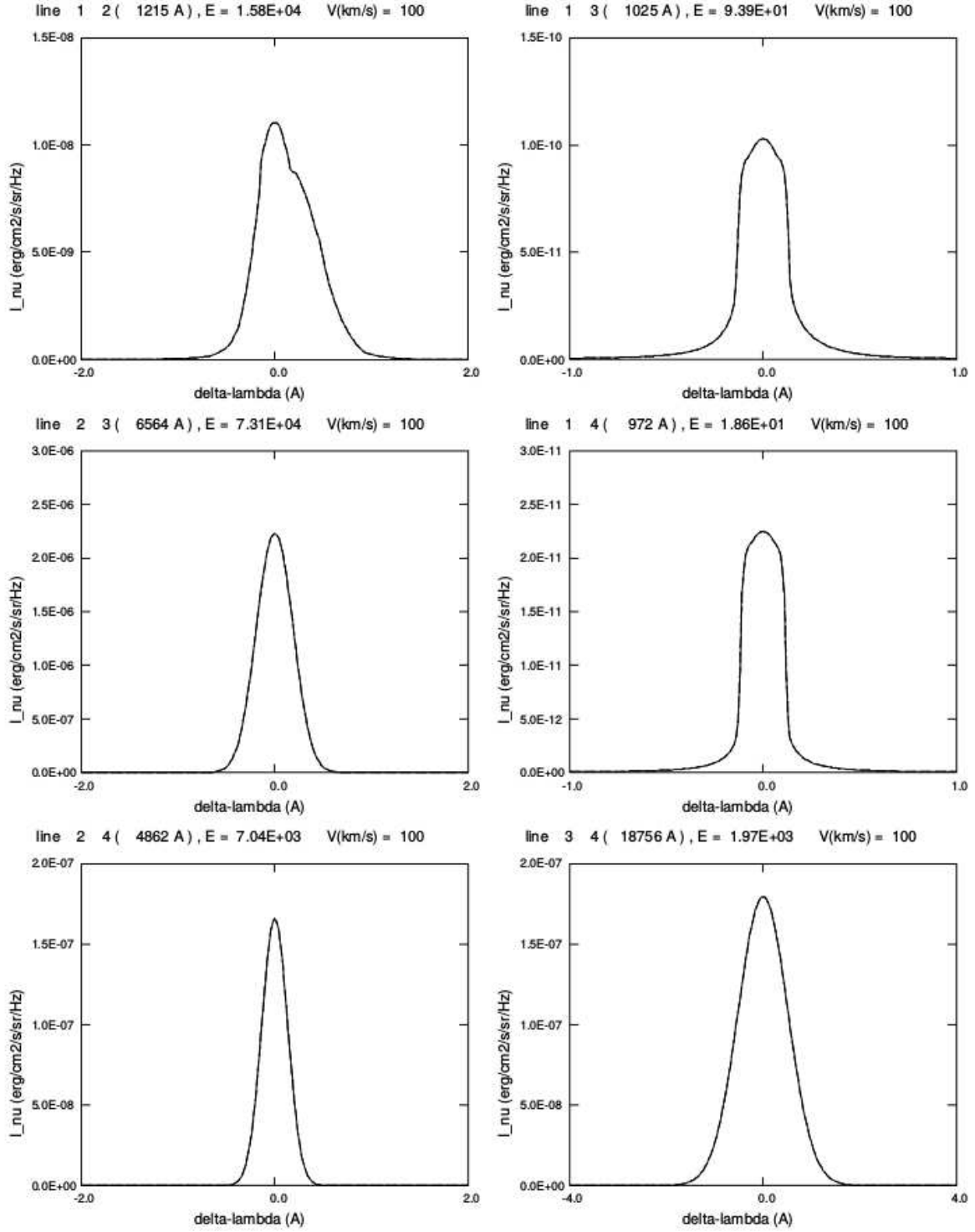


FIGURE 10 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) $L\alpha$, $L\beta$, $H\alpha$, $L\gamma$, $H\beta$, $P\alpha$ de l'hydrogène, pour $V = 100$ km/s, avec de l'absorption continue, pour $\mu = \cos \theta = 1$. Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

10.2 Calcium

Les figures 12 et 13 représentent les profils émergents des raies du Ca II pour $V = 0$ km/s et $V = 120$ km/s. Le modèle considéré est le suivant, en incluant de l'absorption continue : $T = 8000$ K, $p = 0.1$ dyn cm $^{-2}$, épaisseur = 1000 km, $VT = 5$ km/s, altitude = 10000 km.

La figure 11 représente le rapport des intensités intégrées ($E(V)/E(V=0)$) en fonction de la vitesse.

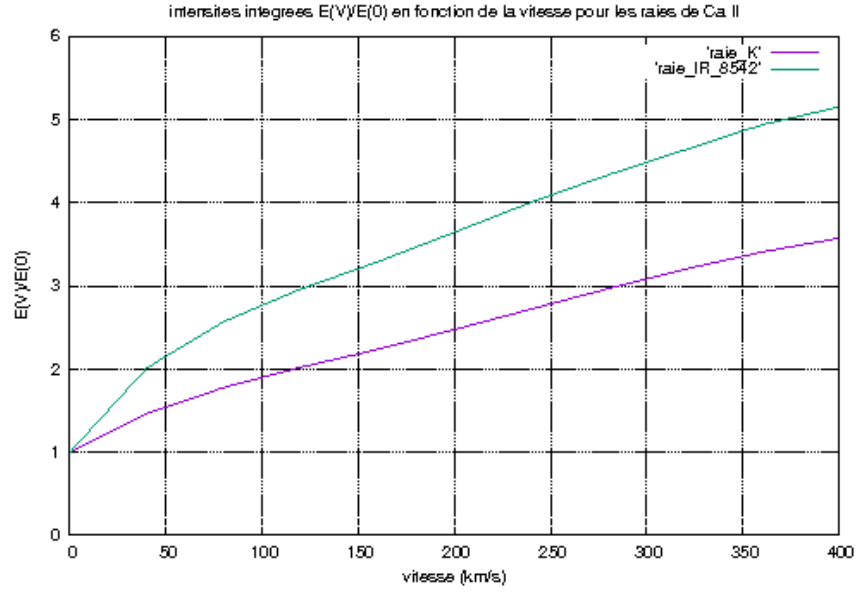


FIGURE 11 – Rapport des intensités intégrées ($E(V)/E(V=0)$) en fonction de la vitesse pour les raies K et IR3 de Ca II, obtenu par le code PRODOP.

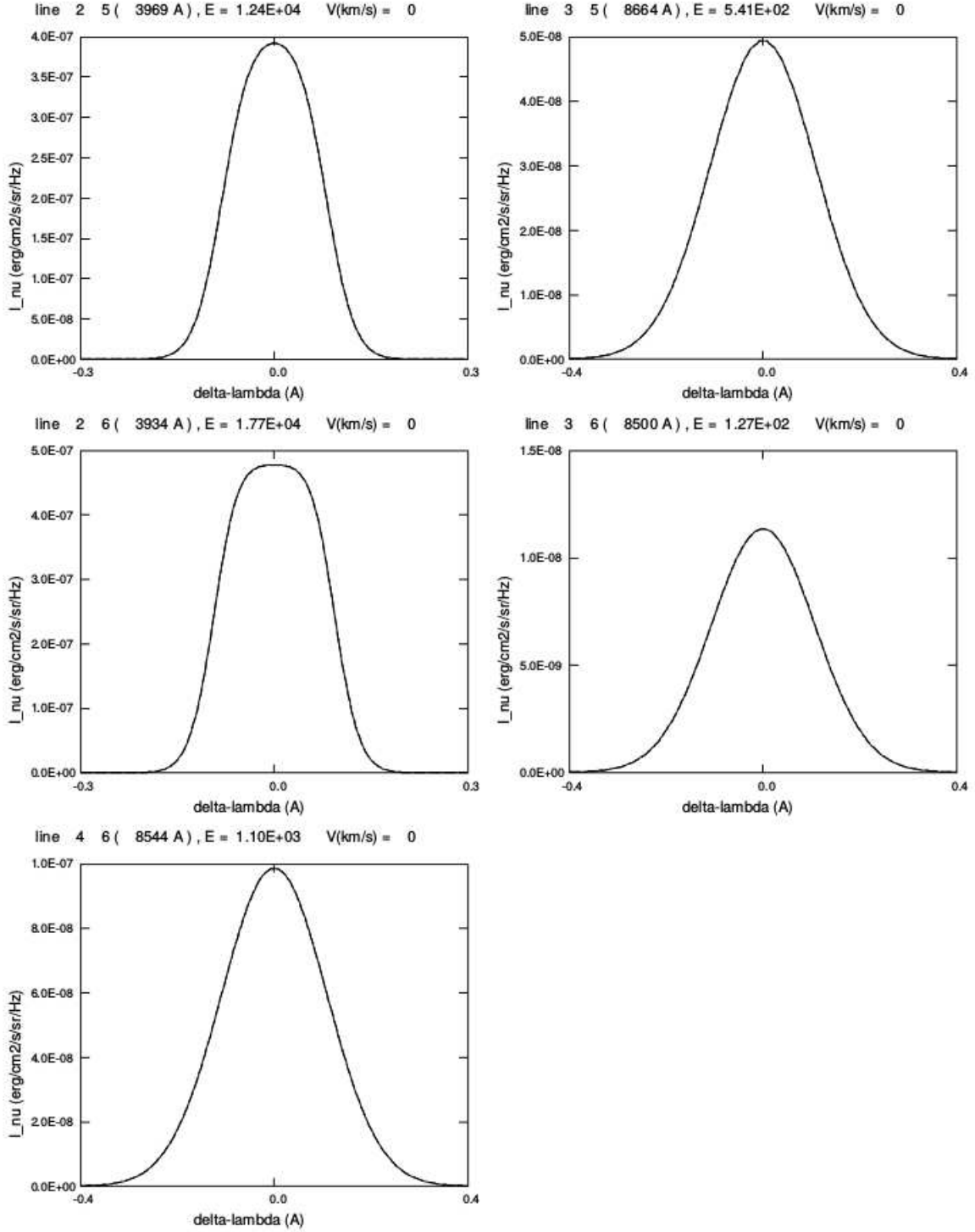


FIGURE 12 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) H, IR1, K, IR2, IR3 du calcium, pour $V = 0$ km/s, avec de l'absorption continue, pour $\mu = \cos \theta = 1$, obtenus par le code PRODOP. Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

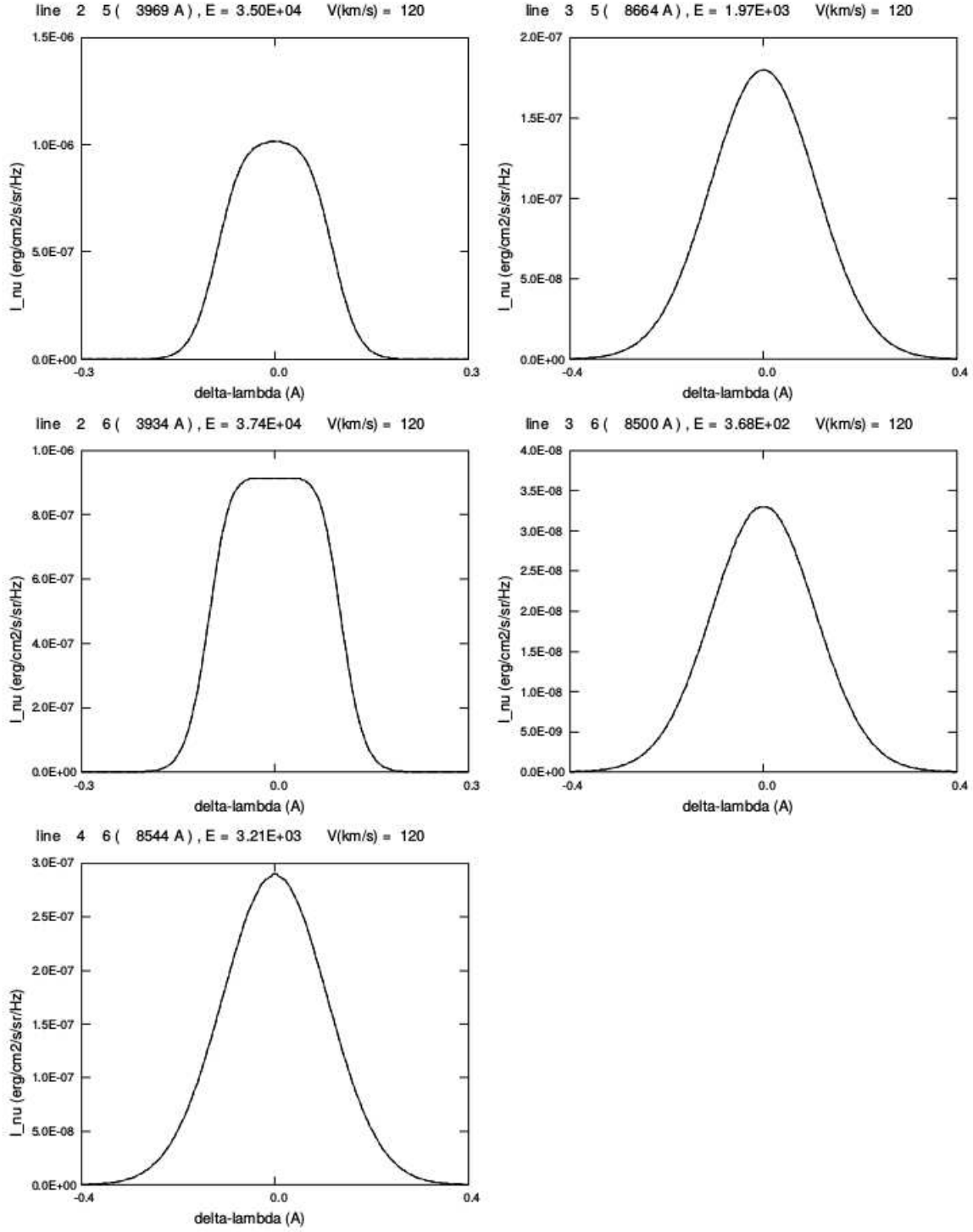


FIGURE 13 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) H, IR1, K, IR2, IR3 du calcium, pour $V = 120$ km/s, avec de l'absorption continue, pour $\mu = \cos \theta = 1$, obtenus par le code PRODOP. Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

10.3 Hélium

Les figures 14 et 15 représentent les profils des raies de He I et He II pour $V = 0$ km/s et $V = 120$ km/s. Ici, il n'y a pas d'absorption continue et le modèle considéré est celui de Labrosse ([15], [17]) :

$T = 8000$ K, $p = 0.1$ dyn cm⁻², épaisseur = 2000 km, $V_T = 0$ km/s, altitude = 50000 km.

On a tracé les profils émergents pour 3 valeurs de μ :

- $\mu = 1$: courbe en trait continu
- $\mu = 0.6$: courbe en tirets
- $\mu = 0.2$: courbe en pointillés

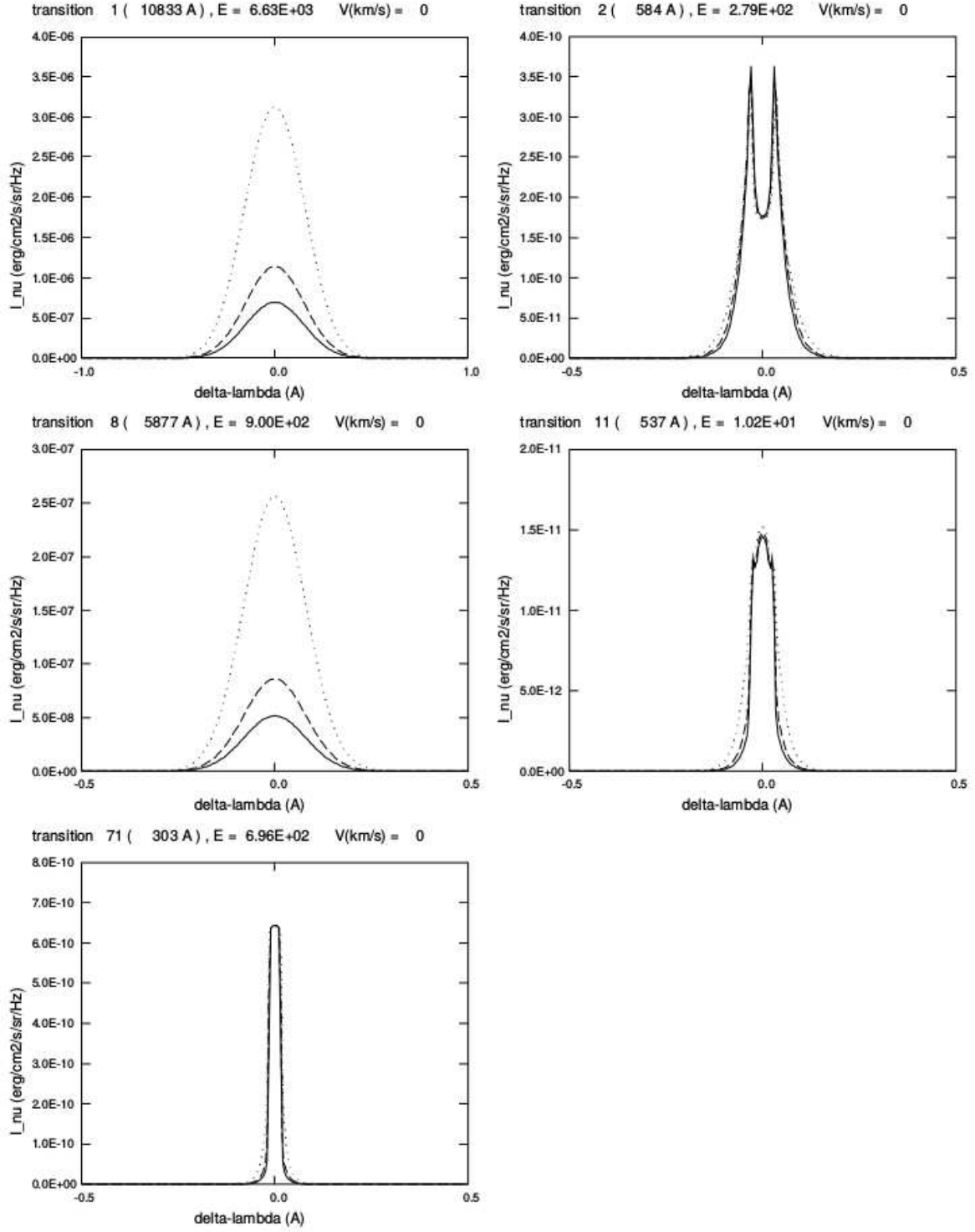


FIGURE 14 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) HeI(10833Å), HeI(584Å), HeI(5877Å), HeI(537Å), HeII(303Å) de l'hélium, pour $V = 0$ km/s, sans absorption continue, pour 3 valeurs de $\mu = \cos\theta$ (1 ; 0.2 ; 0.6). Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

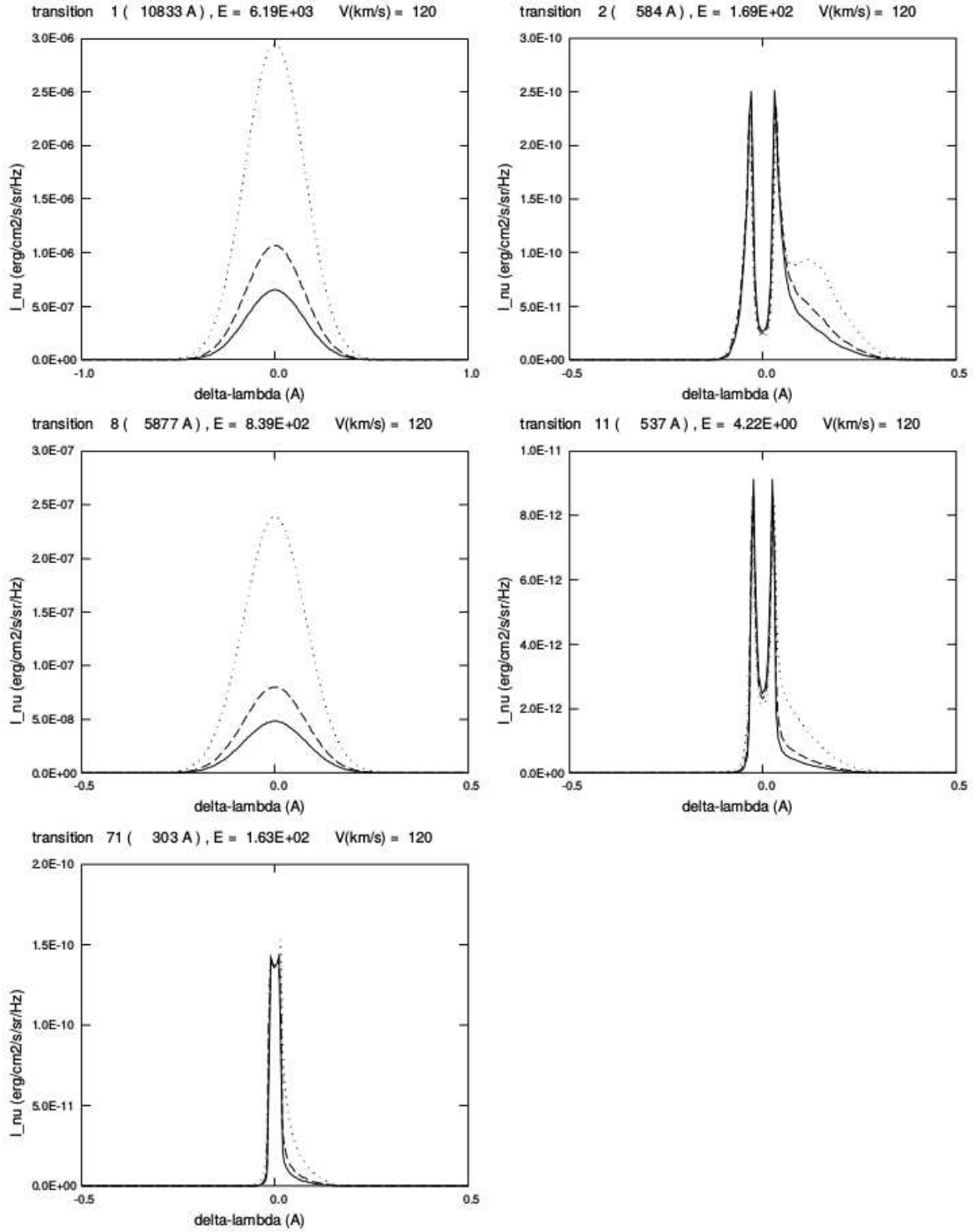


FIGURE 15 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) HeI(10833Å), HeI(584Å), HeI(5877Å), HeI(537Å), HeII(303Å) de l'hélium, pour $V = 120$ km/s, sans absorption continue, pour 3 valeurs de μ (1 ; 0.2 ; 0.6). Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

10.4 Magnésium

Les intensités incidentes (Heinzel, [11]) des raies h et k sont représentées sur les figures 16 et 17.

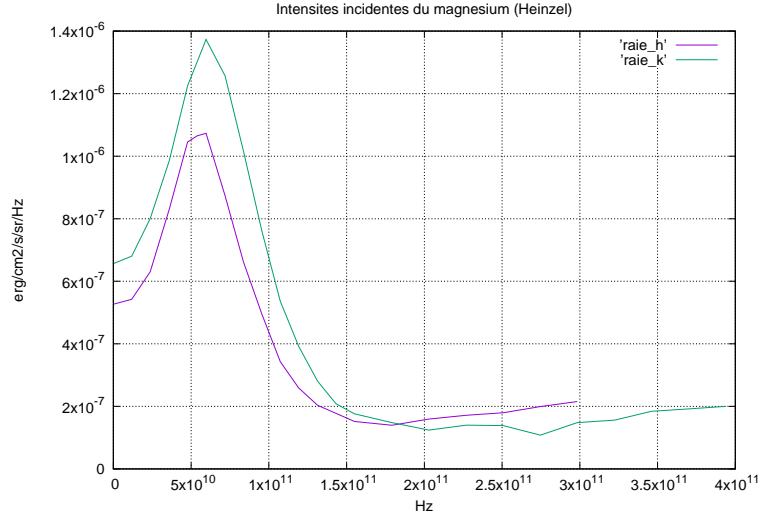


FIGURE 16 – Intensités incidentes (Heinzel) des raies h (2803 Å) et k (2796 Å) du Mg II. Abscisse (Hz), ordonnée ($\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$)

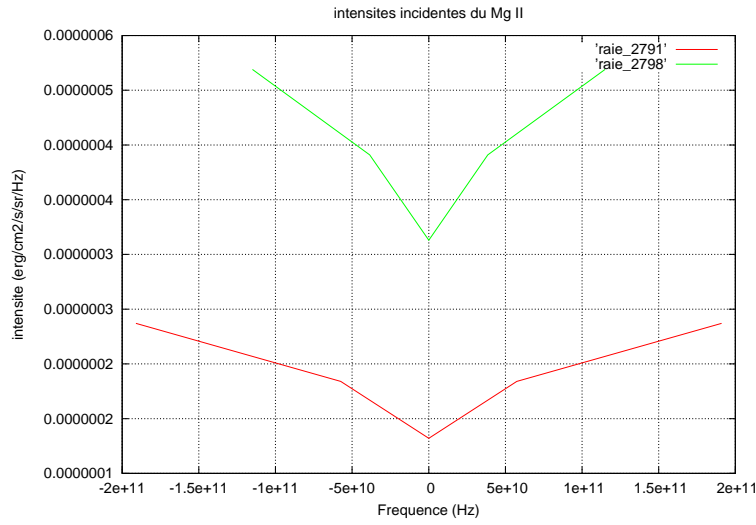


FIGURE 17 – Intensités incidentes des raies subordonnées du Mg II (2791 Å et 2798 Å). Abscisse (Hz), ordonnée ($\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$)

Les résultats pour les raies h, k ainsi que pour les 2 raies subordonnées du Mg II (2791 Å et 2798 Å) sont représentés sur les figures 18 et 19. Le modèle considéré est :

$T = 8000$ K, $p = 0.1$ dyn cm $^{-2}$, épaisseur = 1000 km, $V_T = 5$ km/s, altitude = 10000 km.

On considère ici $V = 0$ km/s et $V = 120$ km/s. $\mu = \cos \theta = 1$. Il n'y a pas d'absorption continue.

La figure 20 représente les profils émergents pour les 4 raies considérées en échelle logarithmique, pour $V = 0$ km/s.

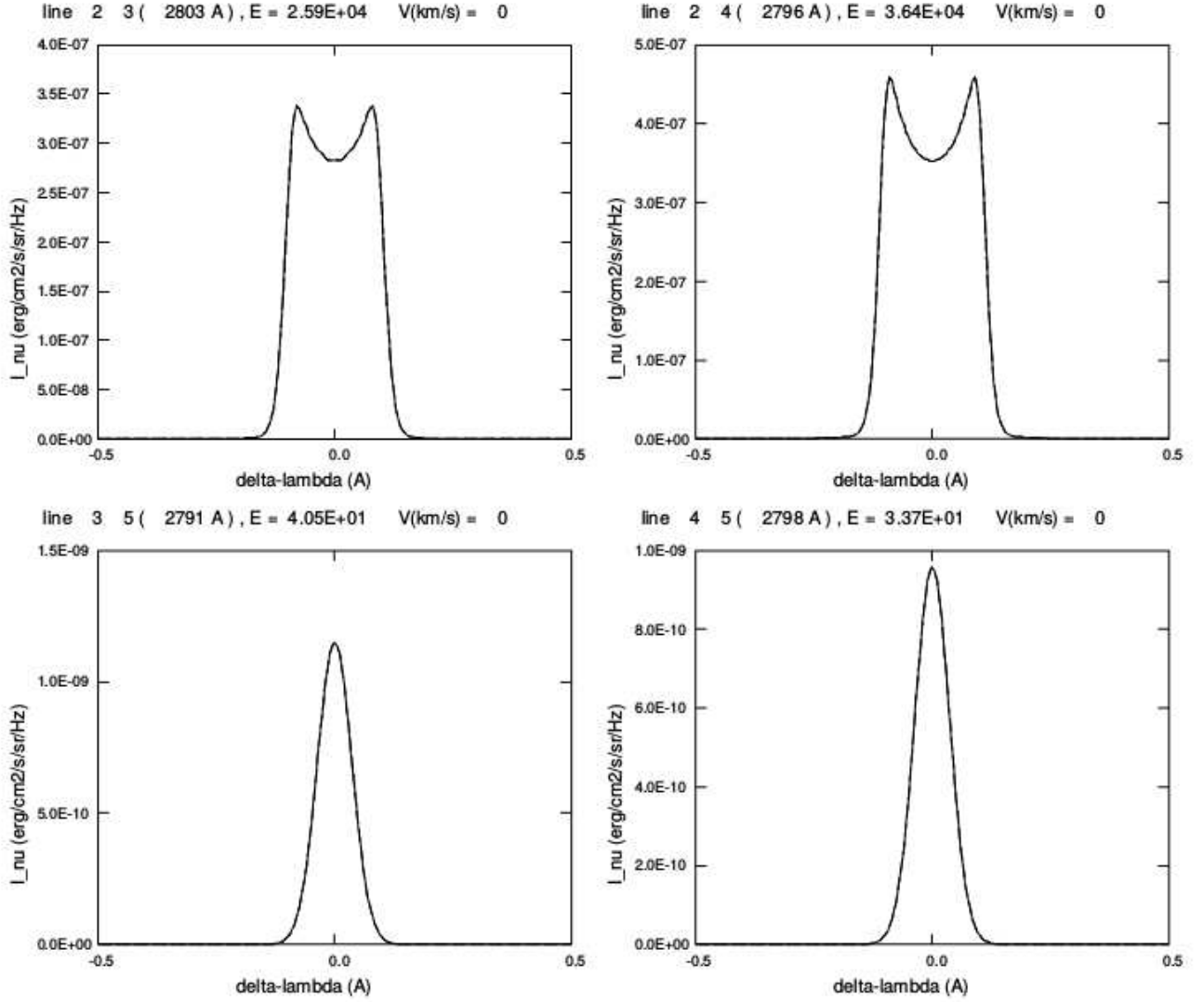


FIGURE 18 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) h (2803 Å), k (2796 Å), 2791 Å, 2798 Å du Mg II, pour $V = 0$ km/s, sans absorption continue, pour $\mu = 1$. Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm 2 /s/sr/Hz)

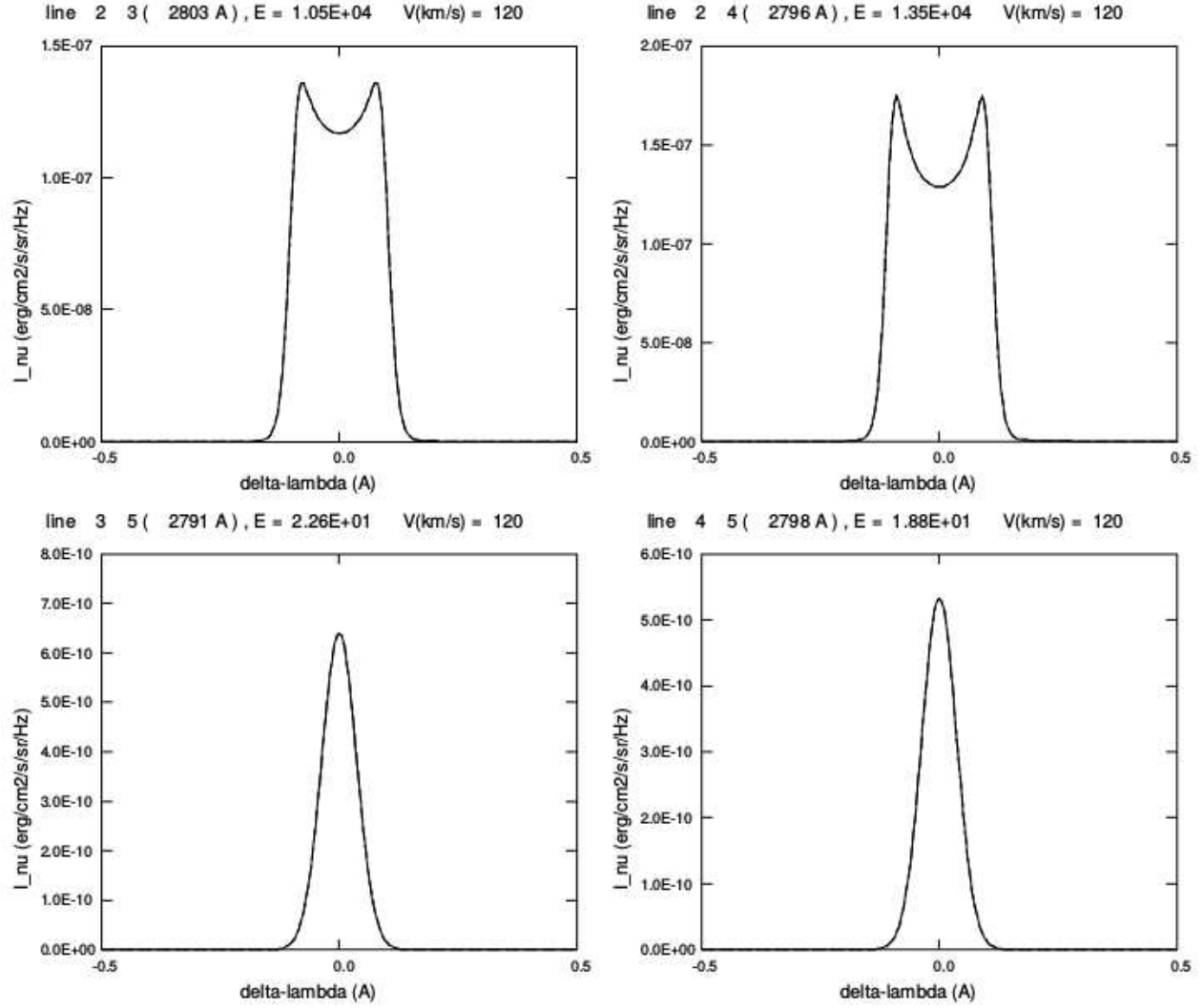


FIGURE 19 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) h (2803 Å), k (2796 Å), 2791 Å, 2798 Å du Mg II, pour $V = 120$ km/s, sans absorption continue, pour $\mu = 1$. Abscisse (Å), ordonnée (erg/cm²/s/sr/Hz)

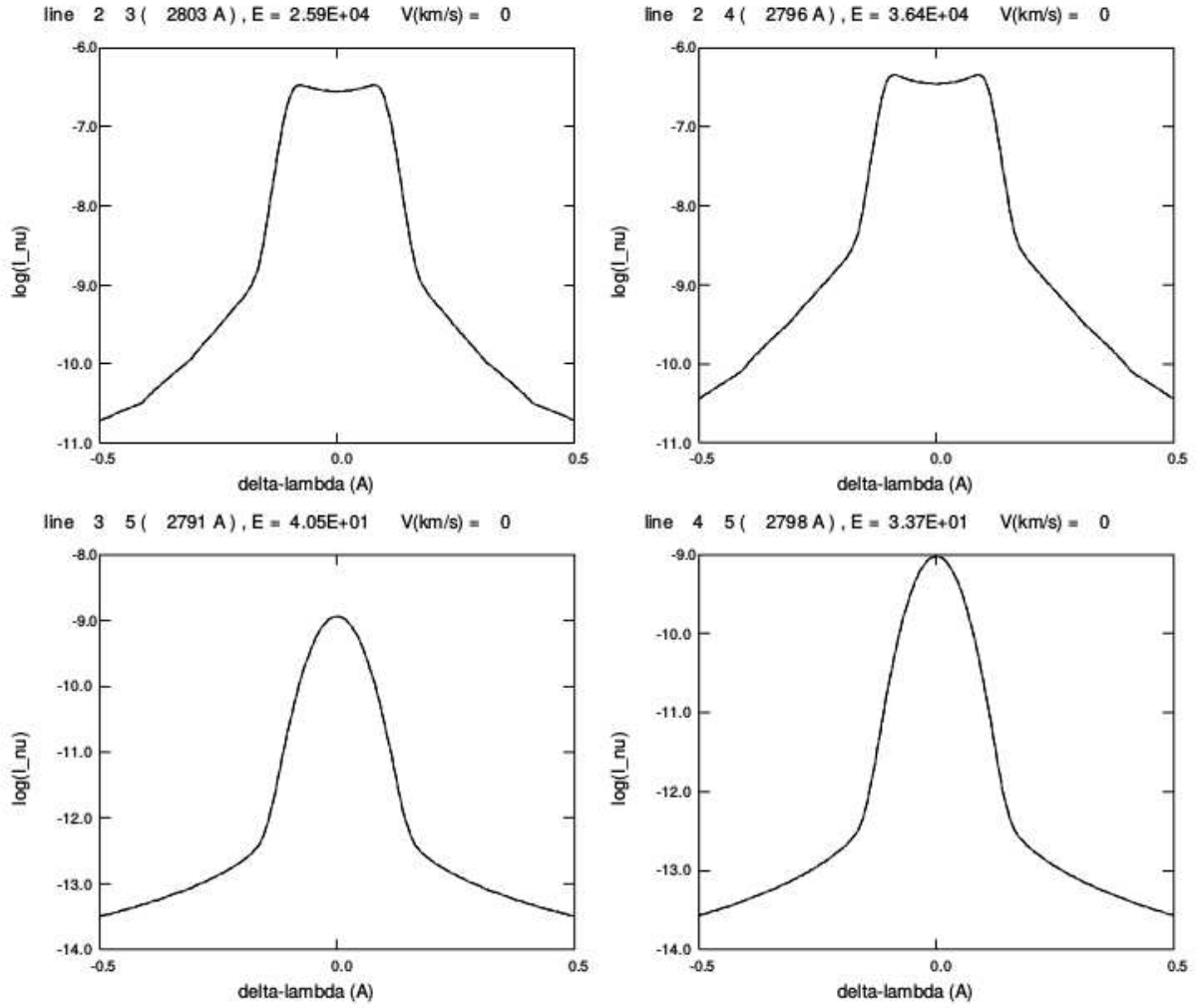


FIGURE 20 – Profils des raies (de gauche à droite, de haut en bas) h (2803 Å), k (2796 Å), 2791 Å, 2798 Å du Mg II, pour $V = 0$ km/s en échelle logarithmique, sans absorption continue, pour $\mu = 1$. Abscisse (Å), ordonnée ($\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$)

11 Exécution de PRODOP

- Télécharger le package PRODOP.tgz sur le site MEDOC/TOOLS :
<https://idoc.osups.universite-paris-saclay.fr/medoc/tools/radiative-transfer-codes/>
- Le compilateur gfortran est nécessaire. Taper les commandes suivantes dans un terminal :
- **tar -xvzf PRODOP.tgz**

- **cd PRODOP**
- Le répertoire contient les fichiers suivants : intica.dat (intensités incidentes (demi-profil) du calcium. 1ère colonne : fréquences en Hz, 2ème colonne : intensités en $\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$), intinc_H.dat (intensités incidentes (demi-profil) de l'hydrogène. 1ère colonne : longueurs d'onde en Å, 2ème colonne : intensités en $\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$), intinc_He.dat (intensités incidentes (semi-profil) de l'hélium. 1ère colonne : fréquences en Hz, 2ème colonne : intensités en $\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$), intimg.dat (intensités incidentes (demi-profil) du magnésium. 1ère colonne : fréquences en Hz, 2ème colonne : intensités en $\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{Hz}$), model.dat, tembri.dat (1ère colonne : longueur d'onde en microns, 2ème colonne : températures de brillance pour le flux solaire, sur le disque entier, en K), makefile, prodop.f90, VIPRF.f90
- Le fichier à rectifier est "model.dat" : le fichier contient 2 modèles définis par la température (K), la pression (dyn/cm^2), l'épaisseur de la structure (km), la vitesse de microturbulence (km/s), l'altitude de la structure par rapport à la surface du soleil (km) et la vitesse de la matière (km/s). Suivant la valeur de IOEL (i.e. de l'élément atomique considéré), il faudra adapter les copies des fichiers de sortie fort.* et commenter l'élément atomique non utilisé dans le programme de visualisation VIPRF.f90
- **make**
- **./prodop**
- Les fichiers de sortie sont, pour IOEL=2 : fort.10 (resume.dat), fort.21 (profilh.dat : profil de H), fort.51 (profihe.dat : profil de He), fort.81 (profica.dat : profil de Ca), fort.91 (profimg.dat : profil de Mg), fort.20 (fisuphy.dat : intensités incidentes de H), fort.101 (fisupmg.dat : intensités incidentes de Mg)
- cp fort.10 resume.dat
- cp fort.21 profilh.dat
- cp fort.51 profihe.dat
- cp fort.81 profica.dat
- cp fort.91 profimg.dat
- cp fort.20 fisuphy.dat
- cp fort.101 fisupmg.dat
- Le répertoire **results** contient les outputs correspondant à des cas test afin de vérifier si les résultats obtenus sont les mêmes
- Avant d'exécuter à nouveau PRODOP, taper la commande **make clean**
- Pour visualiser les profils de raies, on utilise un programme de visualisation VIPRF.f90 en tapant les commandes suivantes (changer dans VIPRF.f90 la valeur de NMDL qui est le nombre de modèles traités dans model.dat) :
 - gfortran -o visu VIPRF.f90
 - ./visu
- Les fichiers de sortie sont : profica.ps (profil émergent pour Ca), profihe.ps (profil émergent pour He), profilh.ps (profil émergent pour H), proinc.ps (profil incident pour H), profimg.ps (profil émergent pour Mg), pincmg.ps (profil incident de Mg)

12 Temps de calcul

Pour deux modèles d'atmosphère à paramètres fixes :

- $T = 8000$ K, $V = 5$ km.s⁻¹, $h = 10000$ km, $e = 1000$ km, $P = 0.01$ dyn.cm⁻², $V = 0$ km.s⁻¹
- $T = 8000$ K, $V = 5$ km.s⁻¹, $h = 10000$ km, $e = 1000$ km, $P = 0.01$ dyn.cm⁻², $V = 120$ km.s⁻¹

avec les options suivantes :

- IOEL = 4 (H+Mg)
- IOPCAC = 0 (sans absorption continue)
- IOPEAC = 0 (pas d'écriture des coefficients d'absorption continue sur le fichier de sortie fort.66)
- IVHYD = 0 (pas d'écriture de la liste des raies de H sur le fichier de sortie fort.66)
- IWRCCR = 0 (pas d'écriture des taux de refroidissement radiatif)

Sur un PC avec 4 processeurs de 2.67 GHz chacun :

- Temps CPU pour le code traitant les 2 modèles de protubérances cités ci-dessus :
 $50\text{ s} < 1\text{ min}$

13 Remerciements

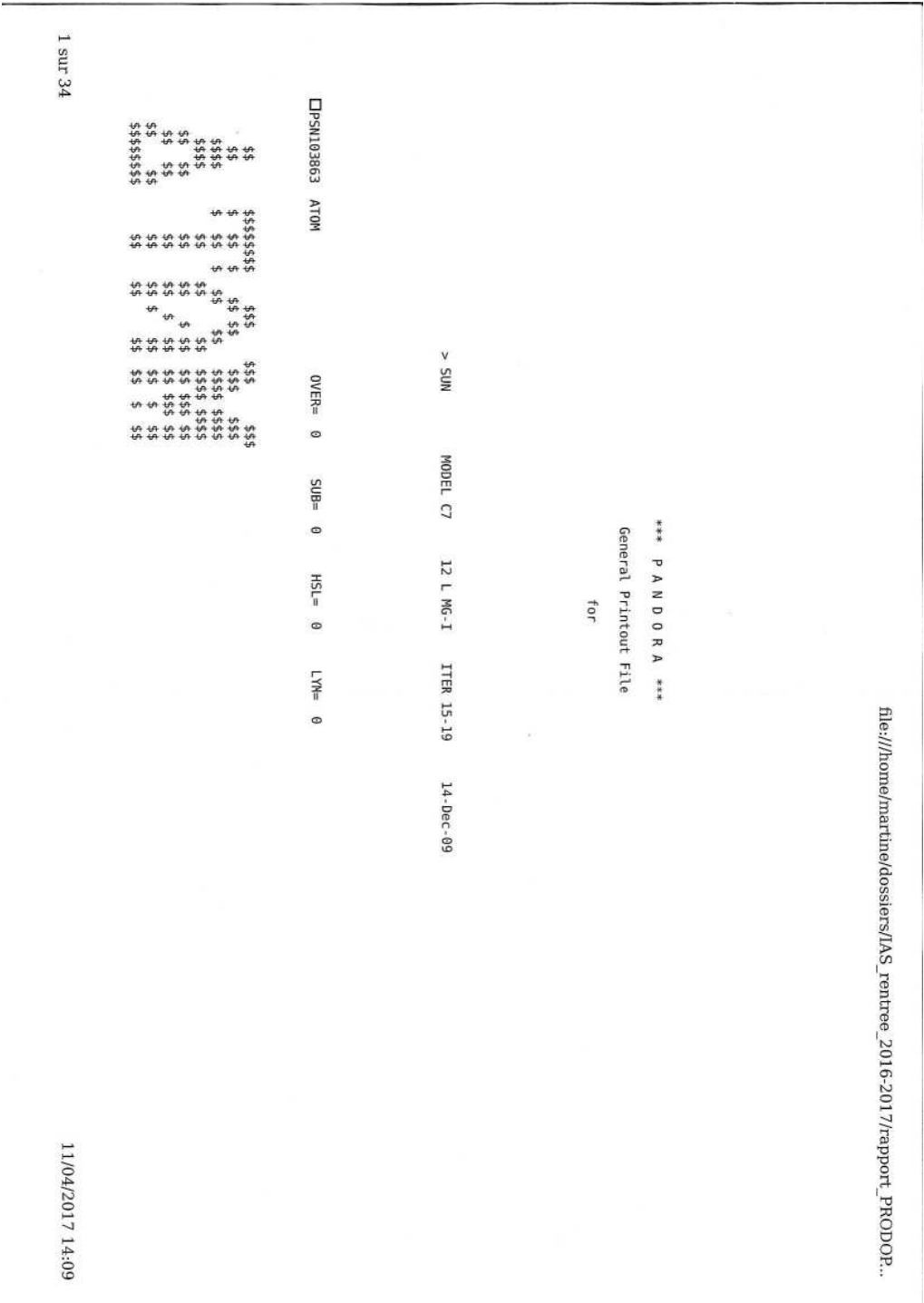
Je tiens à remercier les directeurs de MEDOC : Eric Buchlin (actuel) et Frédéric Baudin (précédent).

Le 31 octobre 2025

M. C-Y

14 Annexes

14.1 Données de PANDORA ([2]) du Mg I



Ion model "name"	MG112
MAGNESM	MG-I
Atomic Mass	24.12
Abundance relative to Hydrogen	3.386E-05

Levels.....	1	2	3	4	5	6	7
-------------	---	---	---	---	---	---	---

Principal quantum number n
Rotational quantum number l
Number of "nl" electrons

 $\text{DREF}(I, 1)$

ALP

162.15

ϵ -level energy (cm^{-1})

Statistical Weight

CI: collisional ioniz. coefficient

OT5 (200 MG IF routine)

LCH: collisions-with-hydrogen code

Temperature

Levels.....

Principal quantum number n
Rotational quantum number l
Number of "nl" electrons

$$T_{AB} = (4 \cdot 10^3, 8 \cdot 10^3, 16 \cdot 10^3)$$

Frequency Interval (peta-Hz)	1.437715	1.479377	1.624643	1.757291	1.781631
Wavenumber (/cm)	47957	49346	54192	58616	59428
Threshold wavelength (nm)	729.183	811.4056	1.337E+03	3.274E+03	4.46E+03
Statistical Weight	15.	3.	15.	22.	26.
CP: Photoioniz. cross-section (cm**2)	3.E+03	3.42E-17	8.27E-18	4.19E-17	1.E-16
CI: Collisional ioniz. coefficient (as function of temperature)	5.E+03	2.18E-07	2.7E-07	7.33E-07	1.E-06
	7.E+03	2.81E-07	3.48E-07	9.46E-07	1.E-06
	9.E+03	3.33E-07	4.12E-07	1.12E-06	1.E-06
	1.2E+04	3.77E-07	4.67E-07	1.27E-06	1.E-06
	1.5E+04	4.87E-07	6.03E-07	1.64E-06	1.E-06
LCH: collisions-with-hydrogen code	1	1	1	1	1
Continuum Frequency Interval (peta-Hz)	1.84885				
Continuum Wavenumber (/cm)	61671				

N O T E S

Parameter values = 0, and lines of all = 0, are normally omitted; to show them, set input parameter JZATOM = 1.

* The photoionization cross-section CP is the threshold value at the head of the continuum; for integrations over frequency, a nu**3 variation is assumed if explicit RRCP values (below) are not given. If the input value CP(1) = 0, then a default value is computed using Verner et al. (1996), ApJ 465, 487.

List of ions with CP(1) and/or RRCP(1) data:

HE1 HE2 B1 C1 C2 C3 C4 N1 N2 O1 O2 O3 O4 O5 O6 NA1 MG1 MG2 AL1 AL2
 SI1 SI2 SI3 SI4 S1 CA1 CA2 FE1 C5 N3 N4 NE1 NE2 NE3 NE4 NE5 NE6 NE7 NE8 NE9
 NA2 S2 S3 S4

* RKMULT is used only when option RKINCR = on; in this run RKINCR = off.

* CI-values are obtained as needed by interpolation in the tables printed above.

* This run does not use any computed default values of CI.

* Collisional ionization rates are computed from CI(T)*NE*exp(-h*NU/(k*T)), where NU is the threshold value at the head of the continuum.

* Added to these rates for collisions with electrons are rates for collisions with hydrogen atoms, provided that ICHSW = 1 (here ICHSW = 1). For levels 2 and higher for which LCH = 1 the added rates are from B. Kaulakys, 1985, J.Phys.B, 18, L167. LCH(1), the LCH value for level 1, is an index explained in the

14.2 Données de PANDORA ([2]) du Mg II

file:///home/martine/dossiers/LAS_rentree_2016-2017/rapport_PRODOP...

**** P A N D O R A ****
General Printout File
for

> SUN	MODEL C7	9 L MG-II	ITER 64-68	14-Dec-09
-------	----------	-----------	------------	-----------

□PSN154742 ATOM OVER= 0 SUB= 0 HSL= 0 LVM= 0

1 sur 41

11/04/2017 14:09

\$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$
 \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$
 \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$ \$\$\$

Ion model "name"
 Mg29L
 Mg-II
 Atomic Mass
 24.3
 Abundance relative to Hydrogen
 3.38E-05

Levels.....	1	2	3	4	5	6	7
Principal quantum number n	3	3	3	4	3	4	5
Rotational quantum number l	0	1	1	0	2	1	0
Number of "nl" electrons	1	1	1	1	1	1	1

ALP
 Frequency Interval (peta-Hz)
 Wavenumber (/cm)
 Threshold wavelength (nm)
 82.46452 116.8293 116.9542 194.3283 200.9115 246.2197 351.2008

CP: Photoioniz. cross-section (cm**2)
 CI: Collisional ioniz. coefficient
 (as function of temperature)
 Statistical Weight
 1.E+03 5.263E-08 1.219E-08 1.221E-08 2.768E-08 4.265E-08 5.199E-08 9.027E-08
 1.26E+03 3.893E-08 1.562E-08 1.355E-08 3.087E-08 4.753E-08 5.785E-08 1.001E-07
 1.58E+03 2.953E-08 1.517E-08 1.521E-08 3.428E-08 5.275E-08 6.41E-08 1.105E-07
 2.E+03 2.274E-08 1.696E-08 1.7E-08 3.817E-08 5.867E-08 7.116E-08 1.221E-07
 2.51E+03 1.827E-08 1.885E-08 1.889E-08 4.223E-08 6.484E-08 7.846E-08 1.34E-07
 3.16E+03 1.524E-08 2.094E-08 2.098E-08 4.666E-08 7.155E-08 8.633E-08 1.466E-07
 3.98E+03 1.328E-08 2.321E-08 2.326E-08 5.14E-08 7.868E-08 9.464E-08 1.596E-07
 5.01E+03 1.212E-08 2.566E-08 2.571E-08 5.64E-08 8.615E-08 1.032E-07 1.728E-07
 6.31E+03 1.154E-08 2.827E-08 2.833E-08 6.162E-08 9.389E-08 1.121E-07 1.88E-07
 7.94E+03 1.138E-08 3.103E-08 3.109E-08 6.698E-08 1.017E-07 1.209E-07 1.99E-07
 1.E+04 1.153E-08 3.392E-08 3.399E-08 7.243E-08 1.096E-07 1.297E-07 2.114E-07
 1.259E+04 1.191E-08 3.689E-08 3.696E-08 7.784E-08 1.173E-07 1.381E-07 2.23E-07
 1.585E+04 1.245E-08 3.989E-08 3.997E-08 8.312E-08 1.246E-07 1.46E-07 2.33E-07

OIS for bound-free
 kraushova

OIS(6) OIS(7) OIS(8)
 OIS(9)

Temperature
 $T_{\text{RB}} = 6 \cdot 10^3, 8 \cdot 10^3, 16 \cdot 10^3$

level
 Venergety from MgII 3542

1.995E+04	1.311E-08	4.288E-08	4.296E-08	8.816E-08	1.314E-07	1.532E-07	2.428E-07
2.512E+04	1.384E-08	4.579E-08	4.538E-08	9.285E-08	1.375E-07	1.596E-07	2.506E-07
3.162E+04	1.46E-08	4.855E-08	4.854E-08	9.708E-08	1.426E-07	1.649E-07	2.567E-07
3.981E+04	1.537E-08	5.11E-08	5.119E-08	1.008E-07	1.468E-07	1.691E-07	2.611E-07
5.012E+04	1.611E-08	5.337E-08	5.346E-08	1.038E-07	1.498E-07	1.721E-07	2.639E-07
6.31E+04	1.679E-08	5.531E-08	5.541E-08	1.063E-07	1.516E-07	1.738E-07	2.649E-07
7.943E+04	1.74E-08	5.688E-08	5.697E-08	1.08E-07	1.523E-07	1.744E-07	2.643E-07
1.E+05	1.793E-08	5.804E-08	5.814E-08	1.09E-07	1.518E-07	1.737E-07	2.622E-07
1.259E+05	1.836E-08	5.879E-08	5.899E-08	1.093E-07	1.503E-07	1.72E-07	2.587E-07
1.585E+05	1.87E-08	5.912E-08	5.922E-08	1.09E-07	1.477E-07	1.693E-07	2.539E-07
1.995E+05	1.899E-08	5.904E-08	5.914E-08	1.08E-07	1.444E-07	1.658E-07	2.48E-07
2.512E+05	1.926E-08	5.859E-08	5.858E-08	1.065E-07	1.402E-07	1.615E-07	2.412E-07
3.162E+05	1.959E-08	5.778E-08	5.786E-08	1.045E-07	1.35E-07	1.565E-07	2.335E-07
3.981E+05	2.002E-08	5.665E-08	5.673E-08	1.02E-07	1.303E-07	1.51E-07	2.252E-07
5.012E+05	2.061E-08	5.525E-08	5.533E-08	9.912E-08	1.247E-07	1.451E-07	2.163E-07
6.31E+05	2.138E-08	5.362E-08	5.359E-08	9.592E-08	1.189E-07	1.389E-07	2.071E-07
7.943E+05	2.232E-08	5.179E-08	5.187E-08	9.244E-08	1.129E-07	1.326E-07	1.976E-07
1.E+06	2.339E-08	4.981E-08	4.988E-08	8.876E-08	1.068E-07	1.26E-07	1.879E-07
1.259E+06	2.454E-08	4.772E-08	4.779E-08	8.492E-08	1.008E-07	1.195E-07	1.782E-07
1.585E+06	2.57E-08	4.555E-08	4.551E-08	8.098E-08	9.484E-08	1.129E-07	1.685E-07
1.995E+06	2.68E-08	4.333E-08	4.339E-08	7.697E-08	8.899E-08	1.065E-07	1.59E-07
2.512E+06	2.779E-08	4.109E-08	4.114E-08	7.295E-08	8.33E-08	1.001E-07	1.496E-07
3.162E+06	2.861E-08	3.884E-08	3.89E-08	6.895E-08	7.781E-08	9.394E-08	1.404E-07
3.981E+06	2.925E-08	3.662E-08	3.667E-08	6.5E-08	7.253E-08	8.795E-08	1.315E-07
5.012E+06	2.969E-08	3.444E-08	3.449E-08	6.113E-08	6.748E-08	8.217E-08	1.229E-07
6.31E+06	2.995E-08	3.232E-08	3.236E-08	5.735E-08	6.267E-08	7.663E-08	1.147E-07
7.943E+06	3.005E-08	3.026E-08	3.029E-08	5.369E-08	5.812E-08	7.133E-08	1.068E-07
1.E+07	3.003E-08	2.827E-08	2.83E-08	5.017E-08	5.381E-08	6.629E-08	9.933E-08

Levels.....

89

Principal quantum number n	4	4
Rotational quantum number l	2	3
Number of "nl" electrons	1	1

Frequency Interval (peta-Hz)	2.79739	2.81284
Wavenumber (/cm) ^o	93310	93799
Threshold wavelength (nm)	357.7385	364.1036

Statistical Weight

10.14.

1.E-171.E-17

CP: Photoioniz. cross-section (cm**2)

1.E+031.244E-071.456E-07

CI: Collisional ioniz. coefficient

1.26E+031.379E-071.613E-07

(as function of temperature)

1.58E+03	1.521E-07	1.778E-07
2.E+03	1.679E-07	1.961E-07
2.51E+03	1.839E-07	2.147E-07
3.16E+03	2.008E-07	2.342E-07
3.98E+03	2.182E-07	2.542E-07
5.01E+03	2.357E-07	2.742E-07
6.31E+03	2.531E-07	2.938E-07
7.94E+03	2.697E-07	3.126E-07
1.E+04	2.854E-07	3.3E-07
1.259E+04	2.996E-07	3.456E-07
1.585E+04	3.121E-07	3.589E-07
1.995E+04	3.224E-07	3.696E-07
2.512E+04	3.303E-07	3.774E-07
3.162E+04	3.358E-07	3.821E-07
3.981E+04	3.386E-07	3.838E-07
5.012E+04	3.39E-07	3.825E-07
6.31E+04	3.369E-07	3.783E-07
7.943E+04	3.326E-07	3.716E-07
1.E+05	3.262E-07	3.627E-07
1.259E+05	3.182E-07	3.518E-07
1.585E+05	3.086E-07	3.394E-07
1.995E+05	2.979E-07	3.257E-07
2.512E+05	2.862E-07	3.112E-07
3.162E+05	2.738E-07	2.961E-07
3.981E+05	2.61E-07	2.806E-07
5.012E+05	2.479E-07	2.651E-07
6.31E+05	2.346E-07	2.496E-07
7.943E+05	2.215E-07	2.343E-07
1.E+06	2.085E-07	2.194E-07
1.259E+06	1.957E-07	2.05E-07
1.585E+06	1.833E-07	1.911E-07
1.995E+06	1.714E-07	1.778E-07
2.512E+06	1.599E-07	1.652E-07
3.162E+06	1.488E-07	1.531E-07
3.981E+06	1.384E-07	1.418E-07
5.012E+06	1.284E-07	1.311E-07
6.31E+06	1.19E-07	1.21E-07
7.943E+06	1.101E-07	1.116E-07
1.E+07	1.017E-07	1.028E-07

Continuum Frequency Interval (peta-Hz)

Continuum wavenumber (/cm)

3.635411

121264

.....

NOTES

Parameter values = 0, and lines of all = 0, are normally omitted; to show them, set input parameter JZATOM = 1.

* The photoionization cross-section CP is the threshold value at the head of the continuum; for integrations over frequency, a nu**3 variation is assumed if explicit RRCP values (below) are not given. If the input value CP(1) = 0, then a default value is computed using Verner et al. (1996), ApJ 465, 487. List of ions with CP(1) and/or RRCP(1) data:
HE1 HE2 B1 C1 C2 C3 C4 N1 N2 01 02 03 04 05 06 NA1 MG1 MG2 AL1 AL2
S11 S12 S13 S14 S1 CA1 CA2 FE1 C5 N3 N4 NE1 NE2 NE3 NE4 NE5 NE6 NE7 NE8 NE9
NA2 S2 S3 S4

* RKMULT is used only when option RKINCR = on; in this run RKINCR = off.

* Values of CI(T) not specified in the input are computed by the program. Several methods are available for this purpose, as chosen by the user with the CIMETHOD input statement. Some or all of the CI-values of this run were computed using:
- Clark et al. 1991, ApJ 381, 597
- M. Arnaud & R. Rothenflug 1985, A&A 60, 425

level 1 only

* CI-values are obtained as needed by interpolation in the tables printed above.

* Collisional ionization rates are computed from $CI(T) \cdot NE \cdot \exp(-h \cdot \nu / (k \cdot T))$, where NU is the threshold value at the head of the continuum.

* Collisions with hydrogen are controlled with input parameters LCH and ICHSW. See also "About PANDORA," Section 5, Note 136.

* The raw computed default values of CI can be adjusted with MCI and ACI such that $CI(adjusted) = CI(raw) \cdot MCI + ACI$
The default values are: MCI = 1 and ACI = 0; only values differing from these are printed. Finally, all CI(adjusted) have been multiplied by the Reduction Factor for All Collisions, RFAC, such that $CI(final\ default) = RFAC \cdot CI(adjusted)$; in this run RFAC = 1.098E+00.

>> More options and information for CI are given in Section 19 of "About PANDORA".
The relevant control switch settings were printed in INPUT NOTES , above.

* To save the computed default parameter values in file .msc, turn option ATOMSAV on.

Transitions.....	2/ 1	3/ 1	3/ 2	4/ 1	4/ 2	4/ 3	5/ 1
Line components							
Wavelength (nm-m)	280.3527	279.6362			292.9491	293.7356	
Wavenumber (/cm)	35669	35760			34135	34044	
Einstein A Value	2.575E+08	2.598E+08	[2.8E+01]	[3.3E+07]	1.173E+08	2.334E+08	[6.8E+06]
Oscillator strength	.3034203	.6091354			.1509177	.150953	

CE: Collisional Excitation Coefficient
(as function of temperature)

↑
OIS for lines

	1. E+03	6. 868E-07	1. 374E-06	1. 374E-06	2. 62E-07	2. 62E-07	1. 31E-07	4. 424E-07
1.26E+03	6.142E-07	1.228E-06	1.228E-06	2.289E-07	2.289E-07	1.134E-07	3.972E-07	
1.58E+03	5.498E-07	1.099E-06	1.099E-06	1.954E-07	1.954E-07	9.771E-08	3.57E-07	
2. E+03	4.926E-07	9.847E-07	9.847E-07	1.674E-07	1.674E-07	8.371E-08	3.211E-07	
2.51E+03	4.42E-07	8.834E-07	8.834E-07	1.428E-07	1.428E-07	7.139E-08	2.891E-07	
3.16E+03	3.973E-07	7.939E-07	7.939E-07	1.215E-07	1.215E-07	6.074E-08	2.604E-07	
3.98E+03	3.578E-07	7.152E-07	7.152E-07	1.034E-07	1.034E-07	5.172E-08	2.347E-07	
5.01E+03	3.232E-07	6.461E-07	6.461E-07	8.835E-08	8.835E-08	4.417E-08	2.115E-07	
6.31E+03	2.928E-07	5.856E-07	5.856E-07	7.575E-08	7.575E-08	3.787E-08	1.906E-07	
7.94E+03	2.663E-07	5.327E-07	5.327E-07	6.515E-08	6.515E-08	3.258E-08	1.718E-07	
1. E+04	2.43E-07	4.863E-07	4.863E-07	5.608E-08	5.608E-08	2.804E-08	1.548E-07	
1.259E+04	2.227E-07	4.455E-07	4.455E-07	4.823E-08	4.823E-08	2.412E-08	1.394E-07	
1.585E+04	2.048E-07	4.097E-07	4.097E-07	4.149E-08	4.149E-08	2.074E-08	1.253E-07	
1.995E+04	1.894E-07	3.788E-07	3.788E-07	3.575E-08	3.575E-08	1.787E-08	1.125E-07	
2.512E+04	1.763E-07	3.527E-07	3.527E-07	3.088E-08	3.088E-08	1.544E-08	1.009E-07	
3.162E+04	1.654E-07	3.31E-07	3.31E-07	2.677E-08	2.677E-08	1.338E-08	9.036E-08	
3.981E+04	1.563E-07	3.13E-07	3.13E-07	2.329E-08	2.329E-08	1.164E-08	8.084E-08	
5.012E+04	1.488E-07	2.982E-07	2.982E-07	2.033E-08	2.033E-08	1.016E-08	7.228E-08	
6.31E+04	1.425E-07	2.857E-07	2.857E-07	1.78E-08	1.78E-08	8.898E-09	6.458E-08	
7.943E+04	1.372E-07	2.749E-07	2.749E-07	1.562E-08	1.562E-08	7.812E-09	5.767E-08	
1. E+05	1.324E-07	2.654E-07	2.654E-07	1.375E-08	1.375E-08	6.876E-09	5.140E-08	
1.259E+05	1.241E-07	2.568E-07	2.568E-07	1.213E-08	1.213E-08	6.065E-09	4.594E-08	
1.585E+05	1.241E-07	2.488E-07	2.488E-07	1.072E-08	1.072E-08	5.359E-09	4.099E-08	
1.995E+05	1.204E-07	2.412E-07	2.412E-07	9.485E-09	9.485E-09	4.743E-09	3.656E-08	
2.512E+05	1.167E-07	2.337E-07	2.337E-07	8.406E-09	8.406E-09	4.203E-09	3.261E-08	
3.162E+05	1.13E-07	2.263E-07	2.263E-07	7.457E-09	7.457E-09	3.728E-09	2.908E-08	
3.981E+05	1.092E-07	2.188E-07	2.188E-07	6.621E-09	6.621E-09	3.31E-09	2.593E-08	
5.012E+05	1.054E-07	2.111E-07	2.111E-07	5.883E-09	5.883E-09	2.942E-09	2.312E-08	
6.31E+05	1.014E-07	2.031E-07	2.031E-07	5.231E-09	5.231E-09	2.615E-09	2.061E-08	
7.943E+05	9.737E-08	1.95E-07	1.95E-07	4.653E-09	4.653E-09	2.326E-09	1.837E-08	

↑
OIS(1,2) OIS(1,3)

6 sur 41

11/04/2017 14:09

Temperature
TAB = (4.10³, 8.10³, 16.10³)

Radiative half width (A)
van der Waals half width (A)
Stark half width (A)
Damping component selector
Frequency Redistribution
GWWA for P.R.D.

Transitions.....

5/ 2 5/ 3 5/ 4 6/ 1 6/ 2 6/ 3 6/ 4

Line components
Wavelength (nm/cm)
Wavenumber (/cm)
Einstein A Value
Oscillator strength

Radiative Radiative
Single Blend(2)
279.1597 279.8738
35821 35730

Radiative (Thin) (Thin) (Thin)
Blend(2)
123.9923 222.3171 222.7697 922.6695
80650 44980 44889 10845
141.2 420.1 2.427E+07
8.519E-04 3.139E-07 4.688E-07 .9280599

CE: Collisional Excitation Coefficient
(as function of temperature)

↑
OIS for lines

1.E+03 1.934E-06 1.554E-06 2.67E-06 5.593E-08 2.131E-07 1.973E-07 3.043E-06
1.26E+03 1.735E-06 1.394E-06 2.326E-06 5.094E-08 1.955E-07 1.789E-07 2.764E-06
1.58E+03 1.559E-06 1.251E-06 2.026E-06 4.666E-08 1.789E-07 1.628E-07 2.526E-06
2.E+03 1.403E-06 1.125E-06 1.77E-06 4.295E-08 1.632E-07 1.486E-07 2.323E-06
3.51E+03 1.263E-06 1.013E-06 1.588E-06 3.969E-08 1.485E-07 1.358E-07 2.152E-06
3.16E+03 1.139E-06 9.134E-07 1.382E-06 3.674E-08 1.35E-07 1.24E-07 2.066E-06
3.98E+03 1.028E-06 8.246E-07 1.233E-06 3.396E-08 1.228E-07 1.129E-07 1.884E-06
5.01E+03 9.295E-07 7.45E-07 1.103E-06 3.121E-08 1.113E-07 1.021E-07 1.782E-06
6.31E+03 8.415E-07 6.734E-07 9.83E-07 2.842E-08 1.002E-07 9.166E-08 1.697E-06
7.94E+03 7.632E-07 6.088E-07 8.694E-07 2.56E-08 8.951E-08 8.161E-08 1.628E-06
1.E+04 6.938E-07 5.509E-07 7.627E-07 2.279E-08 7.919E-08 7.205E-08 1.576E-06
1.259E+04 6.33E-07 4.993E-07 6.639E-07 2.009E-08 6.947E-08 6.315E-08 1.541E-06
1.585E+04 5.805E-07 4.54E-07 5.742E-07 1.759E-08 6.061E-08 5.504E-08 1.524E-06
1.995E+04 5.36E-07 4.149E-07 4.941E-07 1.533E-08 5.275E-08 4.781E-08 1.523E-06

DISC(14) DISC(15)

Temperature
 $T_{H\alpha} = (4.10^3, 8.10^3, 16.10^3)$

Références

- [1] 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.
- [2] E.H. Avrett and R. Loeser. Pandora : general-purpose non-lte computer program for calculating stellar atmosphere models and detailed line and continuum spectra. <https://www.cfa.harvard.edu/~avrett/pandora/>.
- [3] CHIANTI Database. George Mason University (USA) and University of Michigan (USA) and University of Cambridge (UK). <http://www.chiantidatabase.org/>, Mai 2014.
- [4] O. Gingerich. Review of Opacity Calculations. *Proceedings of the First Harvard-Smithsonian Conference on Stellar Atmospheres*, 167 :1–25, 1964.
- [5] P. Gouttebroze and P. Heinzel. Calcium to hydrogen line ratios in solar prominences. *A&A*, 385 :273–280, 2002.
- [6] P. Gouttebroze, P. Heinzel, and J.-C. Vial. The hydrogen spectrum of model prominences. *A&A Suppl. Ser.*, 99 :513–543, 1993.
- [7] P. Gouttebroze and N. Labrosse. A ready-made code for the computation of prominence NLTE medels. *Solar Physics*, 196 :349–355, 2000.
- [8] P. Gouttebroze, P. Lemaire, J. C. Vial, and G. Artzner. The solar hydrogen Lyman-beta and Lyman-alpha lines - Disk center observations from OSO 8 compared with theoretical profiles. *Astrophys. J.*, 225 :655–664, October 1978.
- [9] Pierre Gouttebroze. *Formation des raies spectrales et oscillations dans la chromosphère solaire*. Thèse d’Etat, Université Paris 7, 1980.
- [10] P. Heinzel and B. Rompolt. Hydrogen emission from moving solar prominences. *Solar Phys.*, 110 :171–189, March 1987.
- [11] P. Heinzel, J.-C. Vial, and U. Anzer. On the formation of Mg II h and k lines in solar prominences. *Astron. Astrophys.*, 564, April 2014.
- [12] I. Hubeny and D. Mihalas. *Theory of Stellar Atmospheres : An introduction to Astrophysical Non-equilibrium Quantitative Spectroscopic Analysis*. Princeton University Press, 2015.
- [13] L.C. Johnson. Approximation for collisional and radiative transition rates in atomic hydrogen. *A&A*, 174 :227–236, 1972.
- [14] N. Labrosse and P. Gouttebroze. Formation of helium spectrum in solar quiescent prominences. *A&A*, 380 :323–340, 2001.
- [15] N. Labrosse, P. Gouttebroze, and J.-C. Vial. Effect of motions in prominences on the helium resonance lines in the extreme ultraviolet. *Astron. Astrophys.*, 463 :1171–1179, March 2007.
- [16] N. Labrosse, P. Gouttebroze, and J.-C. Vial. Spectral Diagnostics of Active Prominences. In P. Heinzel, I. Dorotović, and R. J. Rutten, editors, *The Physics of Chromospheric Plasmas*, volume 368 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, May 2007.

- [17] N. Labrosse, J.-C. Vial, and P. Gouttebroze. Diagnostics of active and eruptive prominences through hydrogen and helium lines modelling. *Ann. Geophys.*, 26 :2961–2965, October 2008.
- [18] Nicolas Labrosse. *Modélisation du spectre de l’hélium dans les protubérances solaires*. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 2001.
- [19] P. Lemaire and P. Gouttebroze. Magnesium II line formation : the contribution of high atomic levels to the resonance lines. *A&A*, 125 :241–245, 1983.
- [20] 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.
- [21] C. Pecker-Wimel. *Introduction à la spectroscopie des plasmas*. Gordon and Breach, 1966.
- [22] R.J. Rutten. *Radiative transfer in stellar atmospheres*. 2003.
- [23] T.A.A. Sigut and A.K. Pradhan. Electron-impact excitation of Mg II : collision strengths and rate coefficients. *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.*, 28 :4879–4893, 1995.