

MANUEL D'UTILISATEUR

PROM7 : Transfert radiatif hors ETL dans les protubérances et filaments solaires

Martine Chane-Yook

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

Corrigé par :

Jean-Claude Vial
Pierre Gouttebroze
Jacques Dubau

Accès Web :

<https://idoc.osups.universite-paris-saclay.fr/medoc/tools/radiative-transfer-codes/>
https://sol-stel.ias.u-psud.fr/doku.php/outils:transfert_radiatif

Table des matières

1	Introduction	3
2	Descriptif du programme (original) PROM7	4
3	Descriptif du “nouveau” programme NEW_ PROM7	5
4	Algorithme	5
5	Modélisation d’une protubérance	7
6	Transitions Bound-Free (lié-libre) et Bound-Bound (lié-lié)	8
7	Physique atomique détaillée de l’atome	11
7.1	Hydrogène	11
7.2	Calcium	12
7.3	Magnésium	13
8	Equations de populations et de transfert radiatif	14
9	Méthode utilisée pour traiter le transfert radiatif	16
10	Explications des sousroutines	17
10.1	Liste de variables utilisées dans la sousroutine PROHYD	17
10.2	I. Partie H (modèle de Johnson, [15])	19
10.3	II. Partie Ca	29
10.4	III. Partie Mg	32
11	Nouveau code NEW_ PROM7 et résultats	32
11.1	Cas des protubérances	32
11.1.1	Hydrogène	33
11.1.2	Calcium	39
11.1.3	Magnésium	42
11.2	Cas de la couronne solaire (PCTR Prominence Corona Transition Region) .	43
12	Exécution de PROM7	49
13	Exécution de NEW_ PROM7	49
14	Temps de calcul	50
15	Remerciements	50

1 Introduction

PROM7 est un code écrit en Fortran 77 par P. Gouttebroze ([9], [10], [11], [12]) décrivant le transfert radiatif hors ETL (1D) dans les protubérances et filaments solaires, avec redistribution partielle des fréquences pour les raies de la série de Lyman. 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), le transfert de rayonnement hors ETL dans les transitions étudiées. Les contributions des autres constituants que l'hydrogène sont prises à l'ETL.

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 sont isothermes et isobares définis par une température T , une pression P , une vitesse de microturbulence V , une épaisseur e et une hauteur h .

Pour chaque modèle d'atmosphère (T , P , V , e , et h qui sont des paramètres constants), 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 afin d'obtenir les intensités émergentes pour les raies Ca II et les populations des niveaux du calcium. Ces raies (intensité, profil) servent au diagnostic des protubérances et des filaments.

Le code dans sa version originale est accessible depuis le site MEDOC d'IDOC (1D) :
<https://idoc.osups.universite-paris-saclay.fr/medoc/tools/radiative-transfer-codes/>

On s'intéresse aussi au code PROM5 qui se trouve sur le site MEDOC. Dans PROM5, les paramètres du modèle d'atmosphère sont variables à travers la protubérance ou le filament. Mais PROM5 ne traite que l'hydrogène dans les protubérances.

Dans la suite, je détaillerai le programme original PROM7 (hydrogène + calcium) : compréhension détaillée des codes, équations implémentées, algorithme, méthodes numériques utilisées, etc. Ensuite, j'introduirai les transformations apportées dans cette nouvelle version du programme qu'on appellera **NEW_PROM7** :

- Traitement des raies de résonance du Mg II (2796Å et 2803Å, appelées k et h) pour un modèle d'atmosphère dont les paramètres sont fixes
- Injection du code PROM5 dans PROM7 : on étend ainsi les propriétés de PROM5 aux filaments, au calcium et au magnésium et on met à jour les intensités incidentes. Autrement dit, **NEW_PROM7** prend en compte non seulement les atmosphères isothermes et isobares mais aussi les atmosphères dont les paramètres sont variables à travers la protubérance ou le filament

- Validation du code **NEW PROM7** pour la couronne solaire (l'atmosphère ne contenant pas de protubérance) : le transfert radiatif se réduit à la somme d'émissions.

2 Descriptif du programme (original) PROM7

Nature du problème physique : Transfert radiatif (1D) hors ETL dans les protubérances et filaments solaires (raies *HI* et *CaII*)

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

Autre information : Les modèles d'atmosphère considérés sont isothermes et isobares définis par T, P, V, e, h (Température, Pression, Vitesse de microturbulence, épaisseur, hauteur)

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 : inf-martine *Installation* : IAS

OS : Linux

Langage de programmation : Fortran 77

Etat : Stable

Accessibilité : Groupe solaire et extérieur (MEDOC)

Nombre de lignes : 7741

Temps de calcul : < 1 min pour 3 modèles d'atmosphère (cas protubérance) et < 13 mins pour 3 modèles d'atmosphère (cas filament)

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

3 Descriptif du “nouveau” programme NEW_ PROM7

Nature du problème physique : Idem que PROM7 + raies du $MgII$ + paramètres du modèle d’atmosphère variables à travers la protubérance ou le filament

Méthode de résolution : méthode de Feautrier + Facteurs d’Ediington variables

Auteur : M. Chane-Yook et P. Gouttebroze

Programmes disponibles à partir de :

https://sol-stel.ias.u-psud.fr/doku.php/outils:transfert_radiatif

Machines sur lesquelles le programme a été testé : inf-martine *Installation* : IAS

OS : Linux

Langage de programmation : Fortran 95/2003

Etat : Stable

Accessibilité : groupe solaire (Wiki Sol-Stel)

Nombre de lignes : -

Temps de calcul : -

4 Algorithme

La figure 1 représente l’algorithme du programme PROM7.

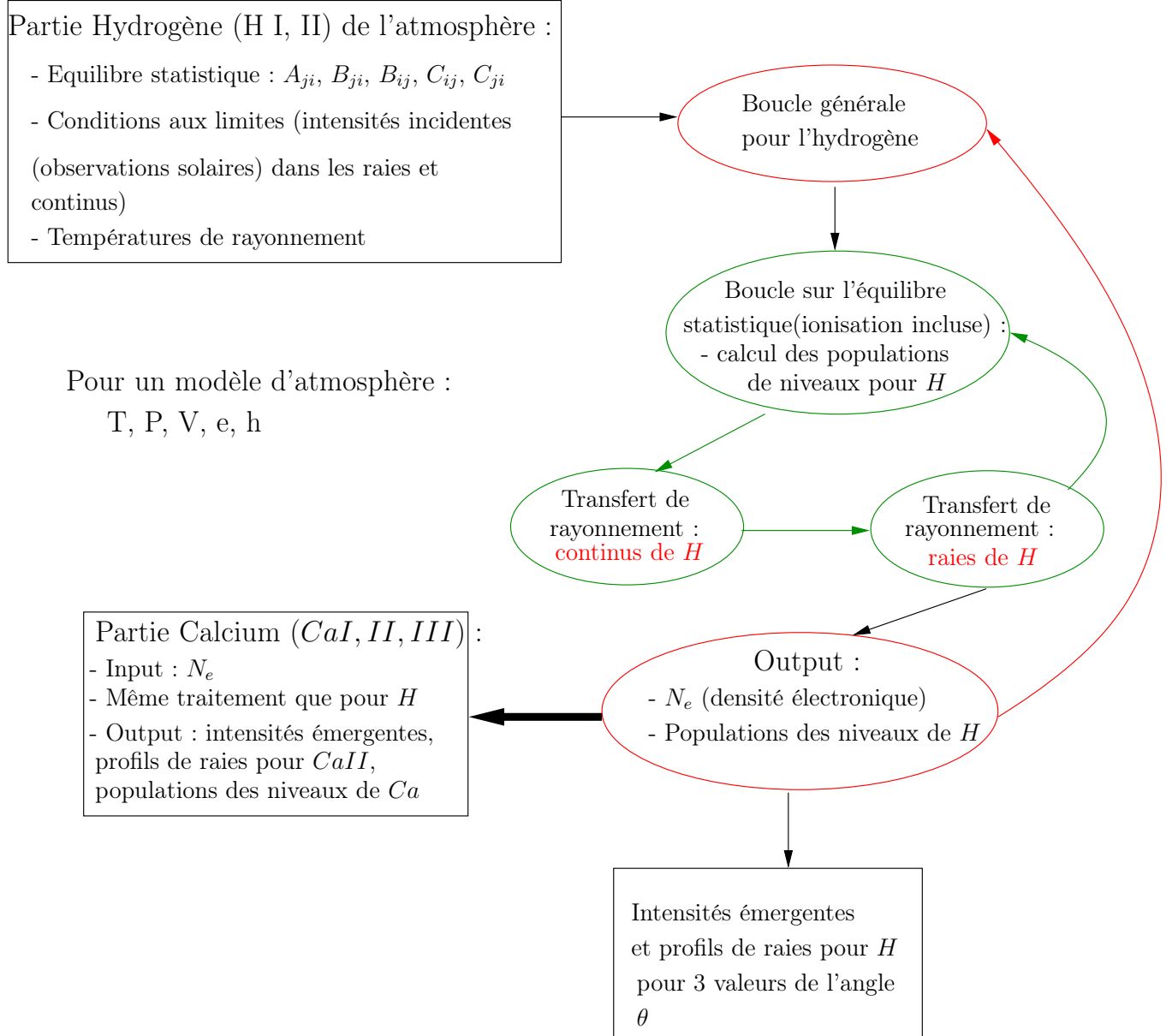


FIGURE 1 – Algorithme de PROM7

Il commence par une initialisation des paramètres physiques :

- Equilibre statistique (voir figure 5) : A_{ji} (coefficient A d'Einstein), B_{ij} et B_{ji} (coefficient B d'Einstein), C_{ij} et C_{ji} (coefficients d'excitation et de désexcitation collisionnelles)
- Conditions aux limites (intensités incidentes dans les raies et continus de l'hydrogène)
- Température de rayonnement

Le premier but de PROM7 est de calculer la densité des électrons qui sera utilisée dans le traitement du calcium. 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, 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 plusieurs valeurs (ici 3 valeurs) de l'angle d'incidence θ ainsi que les populations des niveaux du CaI , $CaII$ et $CaIII$.

Dans le chapitre suivant, on ne considèrera que le cas des protubérances.

5 Modélisation d'une protubérance

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

Dans la modélisation (voir figure 3), la protubérance est représentée par une couche 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 8). A l'intérieur de la protubérance, on définit comme condition initiale 3 paramètres physiques constants : la température électronique T , la pression P et la vitesse de microturbulence 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. On voit qu'il y a une symétrie dans le modèle de protubérance (voir figure 3) et pas dans le modèle de filament.



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

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

Les transitions prises en compte dans PROM7 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 d'un niveau i vers un niveau j .

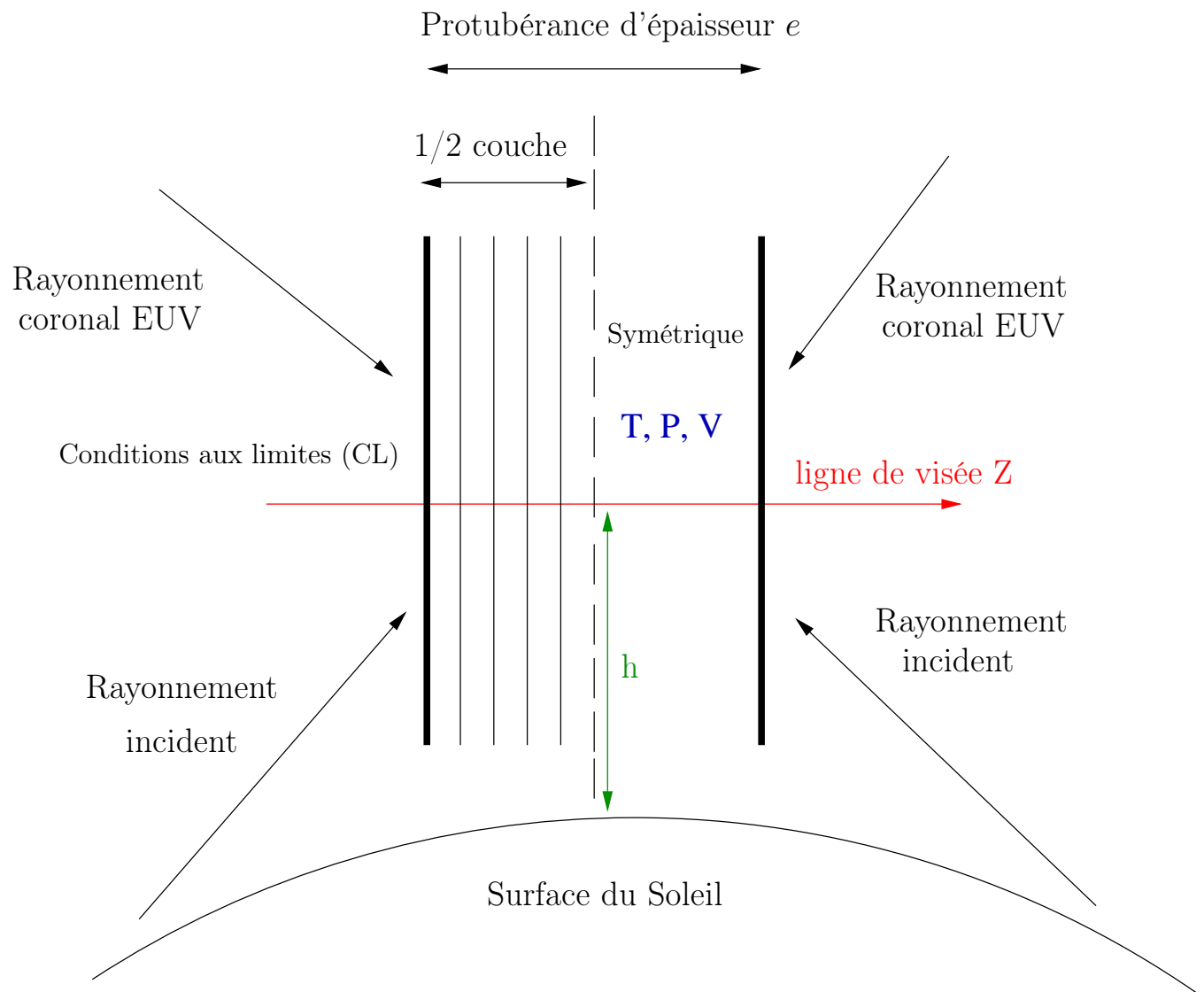
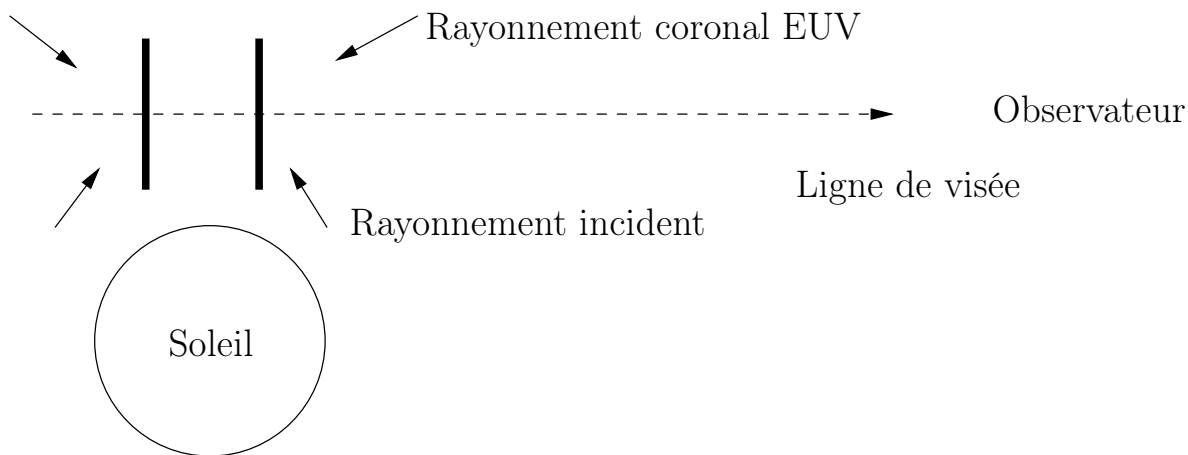
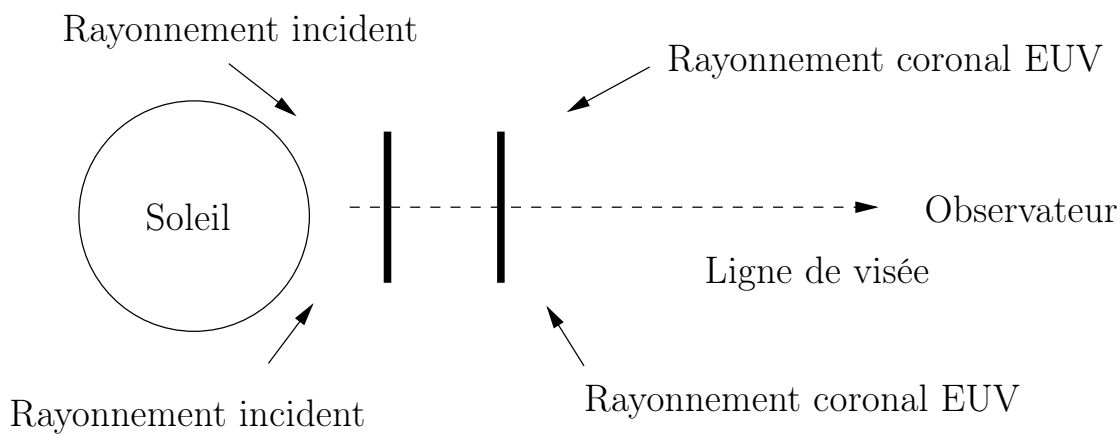


FIGURE 3 – Modélisation d'une protubérance



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 (qui est sur la Terre)

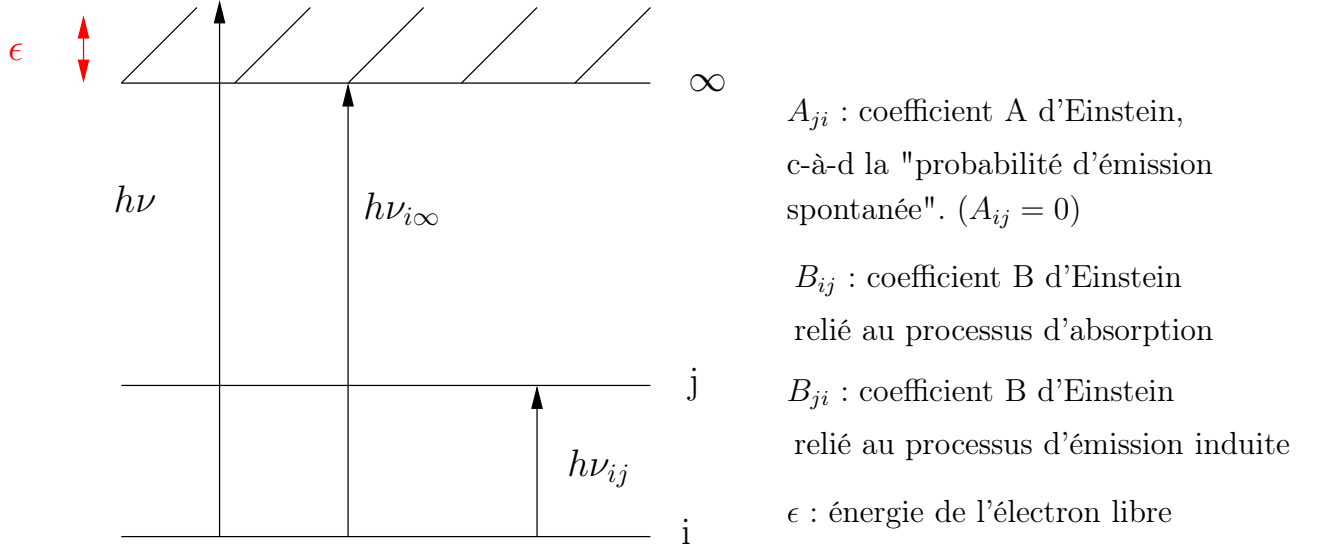


FIGURE 5 – Types de transitions considérées dans PROM7

7 Physique atomique détaillée de l'atome

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

7.1 Hydrogène

Les transitions pour l'hydrogène sont résumées dans le tableau 1. NN est 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 et $NTAR = NTT - NTAC$ le nombre de raies. Dans PROM7, $NN = 21$ (20 niveaux et 1 continu).

Transition	Niveau inférieur	Niveau supérieur	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	6563
11	1	6	<i>Ly</i> ϵ	973
12	2	6	<i>H</i> δ	4102
13	3	6	<i>Pa</i> γ	10935
14	4	6	<i>Br</i> β	4861
15	5	6	<i>Pf</i> α	7460
16	1	7	<i>Ly</i> 6	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 H

7.2 Calcium

On considère 7 niveaux pour le calcium et 7 transitions radiatives (voir figure 6). Plus particulièrement, il s'agit des transitions d'absorption et d'émission :

- 1 vers 2 : ionisation du fondamental du *CaI* vers le fondamental du *CaII*
- 2 vers 5 : raie *H* ($\lambda = 3969\text{\AA}$)
- 3 vers 5 : *IR1* ($\lambda = 8664\text{\AA}$)
- 2 vers 6 : raie *K* ($\lambda = 3934\text{\AA}$)
- 3 vers 6 : *IR2* ($\lambda = 8500\text{\AA}$)
- 4 vers 6 : *IR3* ($\lambda = 8544\text{\AA}$)
- 2 vers 7 : ionisation de *CaII* vers *CaIII* (entre les fondamentaux du *CaII* et du *CaIII*)

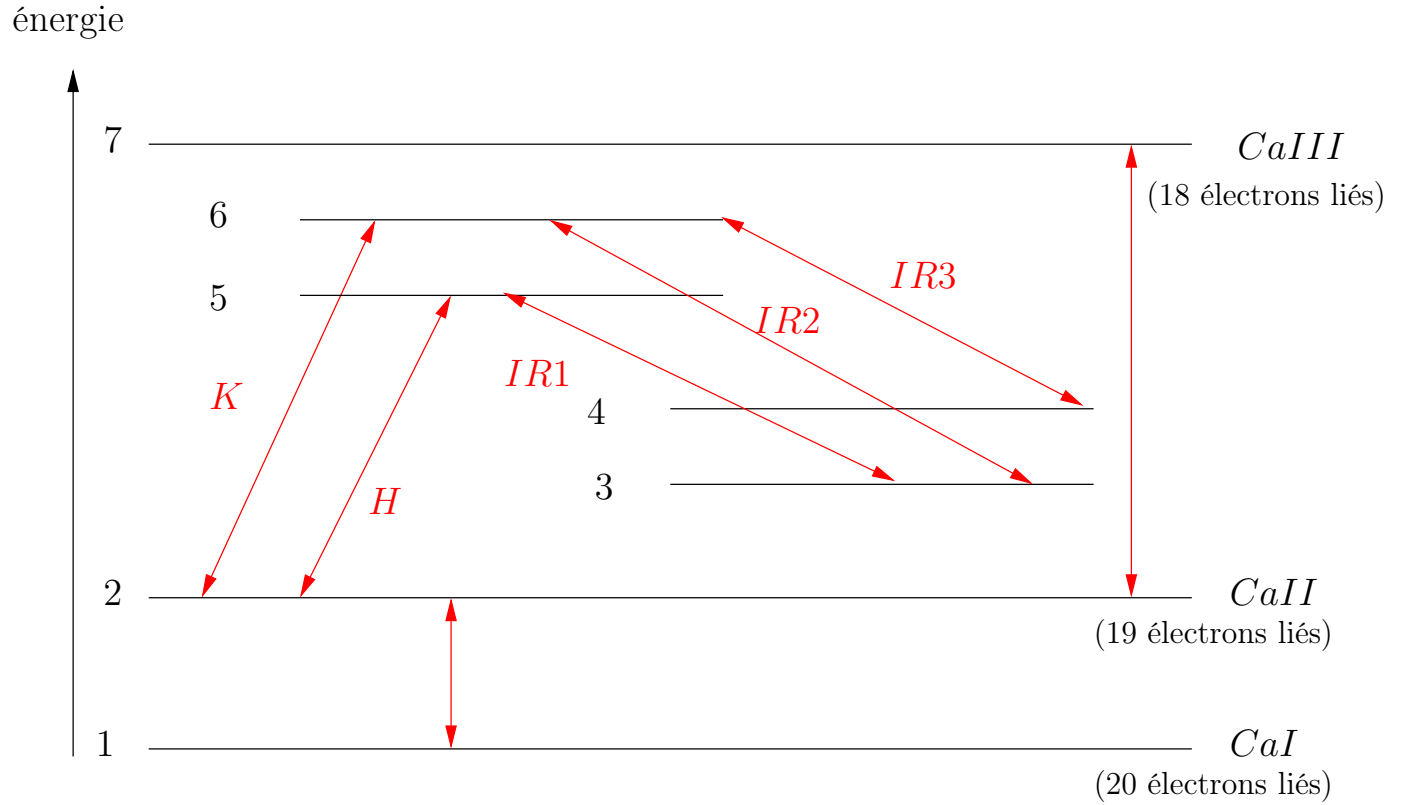


FIGURE 6 – Diagramme d'énergie du calcium (la figure n'est pas à l'échelle) - 7 transitions radiatives (en rouge)

7.3 Magnésium

On considère 5 niveaux pour le magnésium et 4 transitions radiatives (voir figure 7) :

- 1 vers 2 : ionisation du fondamental du MgI vers le fondamental du $MgII$
- 2 vers 3 : raie h ($\lambda = 2803\text{\AA}$)
- 2 vers 4 : raie k ($\lambda = 2796\text{\AA}$)
- 2 vers 5 : ionisation du fondamental du $MgII$ vers le fondamental du $MgIII$

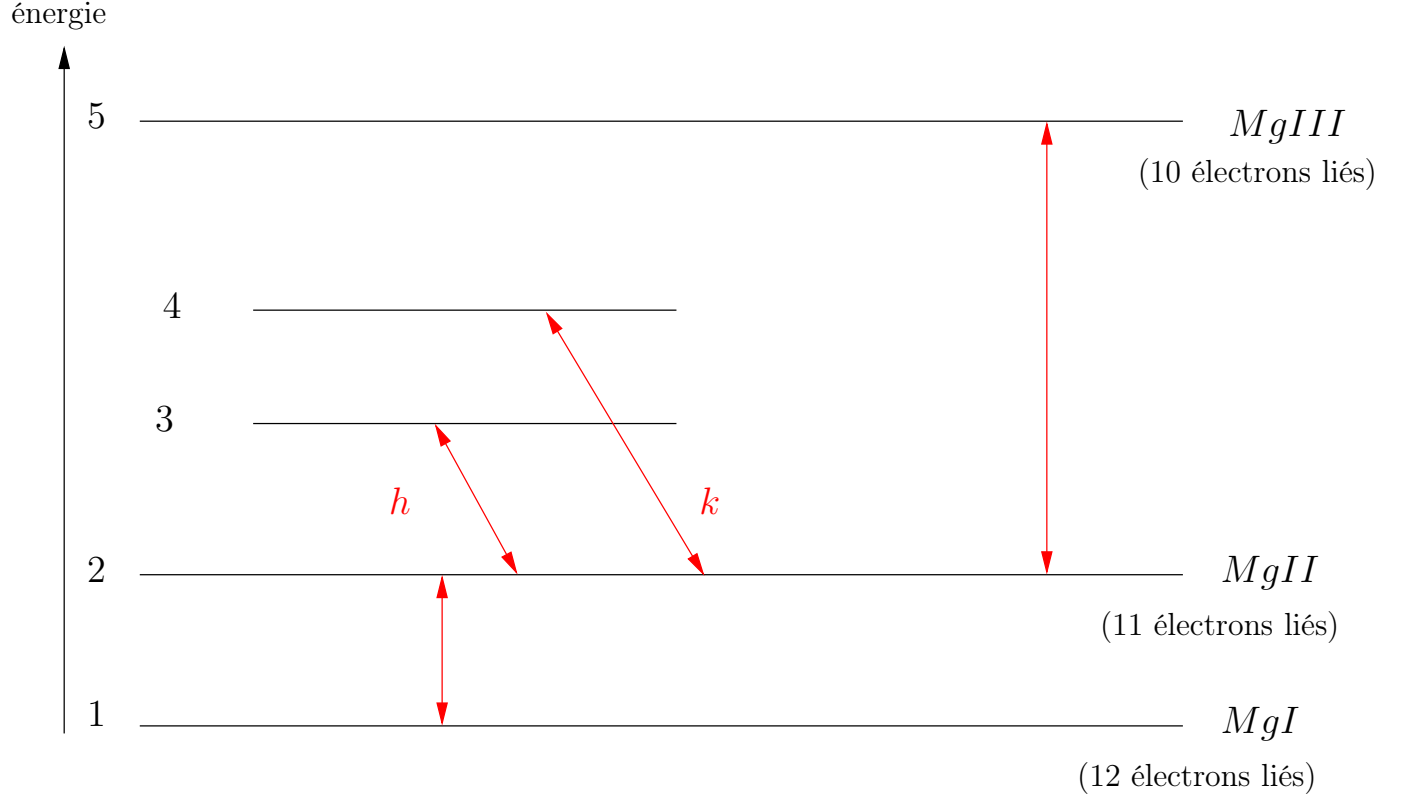


FIGURE 7 – Diagramme d'énergie du magnésium (la figure n'est pas à l'échelle) - 4 transitions radiatives (en rouge)

8 Equations de populations et de 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 :

$$N_j \sum_{j \neq i}^n P_{ji} = \sum_{j \neq i}^n N_i P_{ij} \quad (8.1)$$

Pour le calcium (figure 6), $n = 7$. Pour le magnésium (figure 7), $n = 5$.
Le taux de transition de l'état j vers $i < j$ s'écrit :

$$P_{ji} = A_{ji} + B_{ji} \bar{J}_{ij} + C_{ji} = R_{ji} + C_{ji} \quad (8.2)$$

où C_{ji} est le taux de désexcitation, C_{ij} est le taux d'excitation par collisions. C_{ji} est proportionnel à la densité électronique. R_{ji} (resp. R_{ij}) est la probabilité de désexcitation par

rayonnement (resp. probabilité d'excitation par rayonnement). A_{ji} est lié à l'émission spontanée d'un photon et B_{ji} à l'émission induite.

Le taux de transition de l'état i vers $j > i$ s'écrit :

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

B_{ij} représentant l'absorption d'un photon.

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

$$\bar{J}_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} J_{\nu} \Phi_{\nu} d\nu \quad (8.3)$$

où J_{ν} est l'intensité moyennée sur la direction $\mu = \cos \theta$, θ étant l'angle d'incidence et Φ_{ν} le profil normalisé du coefficient d'absorption.

$$J_{\nu} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I_{\nu}(\mu) d\mu \quad (8.4)$$

Le terme de gauche dans les équations de populations (8.1) 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) :

$$\sum_{j=1}^n N_j = N_T \quad (8.5)$$

où N_T est la population totale de l'élément.

Ces équations de populations 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.

L'intensité dans la transition considérée s'obtient en résolvant l'équation de transfert (comme s'il s'agissait d'un atome à deux niveaux) par la méthode de Feautrier :

$$\mu \frac{dI_{\nu}}{d\tau_{\nu}} = I_{\nu} - S_{\nu} \quad (8.6)$$

τ_{ν} est la profondeur optique à la fréquence ν , et S_{ν} est la fonction source totale 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. Pour plus de détails, voir les deux chapitres suivants.

9 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.
- 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}). On recalcule aussi les températures de rayonnement pour les continus.

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

L'équilibre statistique (8.1, 8.5) 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} (8.2). Les inconnues sont les populations des niveaux.

Le transfert radiatif (8.6) 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 ([13], [21]), 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, [3]). 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 (8.4) 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 le cas général 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 sous-routines appelées dans PROM7 vont être détaillées dans le chapitre suivant.

10 Explications des sousroutines

Le programme PROM7 commence par 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. Pour un modèle de protubérance donné ($IVERT = 1$), 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 toute entière). Puis on appelle la sousroutine PROHYD.

La principale sousroutine PROHYD se décompose selon le schéma suivant :

- INIMET : traite l'abondance des métaux, relative à l'hydrogène
- Lecture des paramètres d'atmosphère isotherme et isobare "model.dat"
- Mise en place des indices pour les transitions, les niveaux d'énergie inférieurs et supérieurs
- *do imdl = 1, ndml* : boucle sur chaque modèle d'atmosphère isotherme et isobare

I. Partie H

II. Partie Ca

enddo

- Sortie des profils de raies sous forme numérique ("profil.dat")
- PSDEB, VISU21P, VISU21L : programmes de visualisation (sortie des intensités émergentes "profil.ps").

Les fichiers en input pour PROM7 sont :

- ★ intinc.dat : intensités incidentes pour l'hydrogène
- ★ intica.dat : intensités incidentes pour le calcium
- ★ tembri.dat : pour le reste du spectre (températures de brillance)
- ★ model.dat : fichier incluant le nombre de modèles à traiter et pour chaque modèle, une ligne contenant 5 paramètres (température (K), pression (dyn.cm^{-2}), épaisseur (km), vitesse de microturbulence (km.s^{-1}), altitude à partir de la surface du soleil (km))

Les fichiers en output sont :

- ★ resume.dat : résumé des itérations
- ★ profil.dat : profils de raies sous forme numérique
- ★ profil.ps : profils de raies
- ★ fort.66 : liste des transitions

Dans les paragraphes suivants, je détaillerai la partie hydrogène et calcium, les sousroutines appelées ainsi qu'une liste de variables utilisées dans la sousroutine principale PROHYD.

10.1 Liste de variables utilisées dans la sousroutine PROHYD

- IVERT : 0 (cas filament : couche horizontale), 1 (cas protubérance : couche verticale)

- NMDL : nombre de modèles d'atmosphère traités (isothermes et isobares)
- NXMOD : nombre de mailles (ou subdivisions) dans la demi couche
- 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 subroutine CAIIP : pour le calcul des coefficients de taux de collision)
- 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 α*)
- IOPERA : 1 (on sort les profils de raies), 0 (on ne sort pas les profils de raies). IOPERA est lié à DL2
- 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
- CSIO 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 μ ($\mu = 1$ 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)

- 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/déexcitation 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 continus
- 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
- OIS : coefficient de taux d'ionisation collisionnelle
- LYLI : nombre de raies (de Lyman) à calculer dans la sous-routine HYTOCA

10.2 I. Partie H (modèle de Johnson, [15])

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

1. Initialisation des paramètres atmosphériques :
 - Calcul de la position Z des mailles
 - INIFEVH : initialisation des facteurs d'Eddington (raies + continus)

- INIHYV3 : initialisation des paramètres atomiques pour l'équilibre statistique (AJI coefficient A d'Einstein, BIJ et BJI coefficients B d'Einstein, coefficients d'ionisation et d'excitation S_i et S_e)
 - SOLINH (concerne le modèle d'atmosphère isobare et isotherme) : on lit les intensités incidentes (fichier input "intinc.dat") et les températures de brillance (fichier input "tembri.dat"). On calcule les intensités pour les raies non définies dans "intinc.dat" grâce à "tembri.dat"
 - INTALT : calcul des facteurs de dilution (raies + continus) qui dépendent de l'altitude ($FADIR$ pour les raies et $FADIC$ pour les continus)
 - COLHCF : conditions aux limites pour H (intensités)
 - On calcule l'intégrale sur le profil de raie $HJBAR = \int_{-\infty}^{+\infty} J_\nu \Phi_\nu d\nu$
 - INITR1 : initialisation des températures de rayonnement (correspondant au rayonnement d'un corps noir) à l'intérieur de la couche pour H à partir des intensités calculées précédemment
2. Boucle générale pour l'hydrogène :
- do $ITG = 1$, $ITGMAX$:
- HYESV3 : calcul des populations des niveaux de H et de la densité électronique
 - 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 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 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 (8.2) a changé (continus + raies)
 - Transitions Bound-Free :
 - ★ do $itac = 1$, $NTAC$: boucle sur les continus
 - HCONTI : Transfert radiatif NLTE pour les continus. On calcule les intensités et les probabilités de transitions P_{ji} données par (8.2)
 - ★ enddo (pour $itac$)
 - ★ COMPACH : comparaison pour la convergence
 - Transitions Bound-Bound :
 - ★ do $itar = 1$, $NTAR$: boucle sur les raies
 - RPRHCF : Transfert radiatif NLTE pour les raies
 - ★ enddo (pour $itar$)

- ★ COMPARCH : comparaison pour la convergence
- ★ Préparation pour l'itération suivante : 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.
 - EXOATM : écriture des paramètres d'atmosphère (pression, altitude, température électronique, densité de l'hydrogène, etc)
 - ABSCON : calcul de l'absorption continue due aux différents éléments (définis dans la subroutine INIMET)
 - EQSTHV3
 - Pour les raies
 - RPCDEH
 - RPRHCF
 - SUMRA : écriture des longueurs d'onde $AMBDA$, etc
 - PROFLI : profil de raies (cas des protubérances)
 - PROEM2 : profil de raies (cas des filaments)
 - Pour les continus
 - HCONTI
 - COMPARH
 - COMPACH
 - SFTEST

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

INIFEVH

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 PROM7) 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 ([15]).

AJI est obtenue par la fonction AEMS (dans PROM7) qui est calculée à partir des "facteurs de Gaunt" (Table 1 de [15]).

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 PROM7) :

Soient n et n' deux niveaux ($n < n'$). Le coefficient taux d'excitation est donné par la formule suivante (Johnson, [15]) implémentée dans PROM7 :

$$S_e(n, n') = (8kT/\pi m)^{1/2} \frac{2n^2}{x} \pi a_0^2 y^2 \left(A_{nn'} \left[\left(\frac{1}{y} + \frac{1}{2} \right) E_1(y) - \left(\frac{1}{z} + \frac{1}{2} \right) E_1(z) \right] \right) \\ + (8kT/\pi m)^{1/2} \frac{2n^2}{x} \pi a_0^2 y^2 \left(\left[B_{nn'} - A_{nn'} \ln \frac{2n^2}{x} \right] \left[\frac{1}{y} E_2(y) - \frac{1}{z} E_2(z) \right] \right) \quad (10.1)$$

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

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

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

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

avec g_0 , g_1 , g_2 : facteurs de Gaunt pour les transitions Bound-Free et sont donnés par la table 2 (table 1 de [15]) :

	$n = 1$	$n = 2$	$n \geq 3$
$g_0(n)$	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 2 – Facteurs de Gaunt

Calcul des coefficients de taux d'ionisation collisionnelle (fonction CICH dans PROM7) :

On considère ici le niveau n . Le coefficient du taux d'ionisation est donné par la formule suivante (Johnson, [15]) implémentée dans PROM7 :

$$\begin{aligned}
S_i(n) &= (8kT/\pi m)^{1/2} 2n^2 \pi a_0^2 y_n^2 A_n \left[\frac{1}{y_n} E_1(y) - \frac{1}{z_n} E_1(z_n) \right] \\
&+ (8kT/\pi m)^{1/2} 2n^2 \pi a_0^2 y_n^2 (B_n - A_n \ln 2n^2) [\zeta(y_n) - \zeta(z_n)],
\end{aligned} \tag{10.2}$$

où m est la masse de l'électron et

$$\begin{aligned}
y_n &= I_n/kT, \\
z_n &= r_n + I_n/kT, \\
\zeta(t) &= E_0(t) - 2E_1(t) + E_2(t)
\end{aligned}$$

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

Input : $NZ, NN, NTT, NTAR, NTAC, NFRC, NTAB, INIDLD, ICTR, VTUR, TSLAB, NTR, NTC, TAB, IVISU$

Output : $AJI, BIJ, BJI, OIS, DLDREF$ en fréquence et $DNDREF$ en longueur d'onde (largeurs Doppler pour les transitions Bound-Free). Initialisation de $BRP, BRN, FPES, CAC, SC, DCAC$

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.dat" contient les intensités incidentes pour $NLI = 17$ raies de H. 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.dat".

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

Output : $FINT, CPOL, FRFI$

INTALT

Calcul des facteurs de dilution en tenant compte de l'assombrissement au bord du disque ("limb darkening") et de l'altitude de la protubérance. 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).

COLHCF

Conditions aux limites (CL) pour H pour les Bound-Free (continus) et Bound-Bound (raies) transitions.

Pour les raies : la CL inférieure $FIIR$ est nulle dans le cas des protubérances et est égale à $2 FADIR \times FLJ$ dans le cas des filaments. FLJ est le flux solaire (intensité) et $FADIR$ est le facteur de dilution (voir subroutine **INTALT**). La CL supérieure $FISR$ est égale à $FADIR \times FLJ$ dans le cas des protubérances et est nulle dans le cas des filaments.

De plus, on calcule l'élargissement naturel (lié à la durée de vie des niveaux) pour les raies

permises en additionnant les *AJI* concernés (inverse de la durée de vie des niveaux). Cet élargissement permet de calculer le profil Φ_ν . Puis on renormalise le profil de raie (intensité)

$$GIOM = \int J_\nu \phi_\nu d\nu.$$

Input : *IVERT, NZ, NN, NTT, NTRD, NTRC, NFR, NFRC, NFIMX, ITRD, ICTR, NINF, NSUP, FRN, DNDREF, XFR*

Output : *GIOM*

Pour les continus : la CL inférieure *FIIC* est nulle dans le cas des protubérances et est égale à $2 B_\nu \times FADIC$ dans le cas filament. *FADIC* est le facteur de dilution (voir subroutine **INTALT**) et B_ν la fonction de Planck. La CL supérieure *FISC* est égale à $B_\nu \times FADIC$ pour les protubérances et est nulle pour les filaments.

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 incident 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 ([8]).

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 subroutine HYESV3 fait appel aux 4 subroutines suivantes :

TXCOLL : on calcule les probabilités de transition collisionnelle (*CIJ* et *CJI*). On a besoin de la densité des électrons.

INIRIKH : on calcule les probabilités 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 subroutine 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 subroutine PROFSC.

PROFSC : calcule la profondeur optique additionnelle $TAUC$ (due aux processus d'absorption continue), 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 (ETL) par les ions négatifs de H, l'aluminium, l'hydrogène (la section efficace de photoionisation $SEPION$ est calculée à partir des facteurs de Gaunt ([8])), le carbone, le magnésium, le silicium et 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 sousroutines suivantes :

ELCOH1 : calcul de l'élargissement collisionnel $DFRCO$ pour les raies de l'hydrogène

COHEVA : calcul du coefficient de cohérence pour différentes fréquences de la raie $Ly \alpha$ de l'hydrogène

MARALA : calcul de la matrice de redistribution pour la raie $Ly \alpha$ de l'hydrogène

MAREDI : calcul de la matrice de redistribution pour les raies autres que $Ly \alpha$, 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 :

CSIETA : calcul des 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 ([3]). 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)

RPRHCF

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 subroutine 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 *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 : *BRN0*

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 $\mu = \cos \theta$ dans le cas des filaments.

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)

PROEM2

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

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

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).

10.3 II. Partie Ca

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*)

- **RESUMH** : 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 Ca II, on fait du transfert radiatif pour les raies du Ca II 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

Traitement pour les raies du Ca II. CAIIP fait appel aux sousroutines suivantes :

INIMET : voir plus haut la partie H.

Voici quelques définitions des variables utilisées dans la sousroutine CAIIP :

- **ABOND** : abondance de Ca relative à H
- **INF** : tableau contenant 1 (si c'est un niveau fondamental) et 0 (si c'est un niveau intermédiaire)
- **POM** : tableau contenant les poids de chaque niveau pour Ca
- **FRN** : tableau représentant la fréquence des niveaux
- **ITC** : numéro de transition pour laquelle on calcule les coefficients de taux de collisions

- **TAB** : tableau de taille $NTAB$ contenant les températures électroniques qui sert de référence au tableau OIS
- **OIS** : tableau contenant les paramètres de collisions par ionisation pour chaque transition et pour chaque température **TAB**
- **OREF** : tableau de longueurs d'onde (\AA) pour chaque transition continue
- **ALP** : tableau contenant les sections efficaces de photoionisation pour le continu

SOLICA : on lit le fichier input “intica.dat” (intensités incidentes correspondant aux longueurs d'onde pour Ca II)

INIFEV : voir plus haut la partie H

INITES : 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 .

EXOATM : voir plus haut la partie hydrogène

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

TXCOLL : voir plus haut la partie H

ECRITAU : écriture des taux de transitions collisionnelles (CIJ , CJI), des “net radiative brackets” ($BRN1$, $BRN2$) pour les raies Ca II

COLIMI : conditions aux limites (CL) pour Ca pour les Bound-Bound transitions. La CL inférieure $FIINF$ est nulle dans le cas des protubérances et est égale à $2 FADI \times FLJ$ dans le cas des filaments. $FADIC$ est le facteur de dilution et FLJ le flux solaire (intensité). La CL supérieure $FISUP$ est nulle dans le cas des protubérances et est égale à $FADI \times FLJ$ dans le cas des filaments.

Pas de transfert radiatif pour les continus du calcium.

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

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

EQSTGV3 : équivalent à la sous-routine **EQSTHYV3** pour l'hydrogène

RPRGCF : équivalent à la sous-routine **RPRHCF** pour l'hydrogène

COMPAR : comparaison pour la convergence. On compare $BRN1$ avec $BRN2$

NOVBRN : calcul de $BRN1$

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**.

10.4 III. Partie Mg

La partie magnésium est identique à la partie calcium sauf qu'on appelle la subroutine MGIIP (données atomiques) au lieu de CAIIP et la subroutine ELCO_MG (calcul de l'élargissement collisionnel pour les raies MgII) au lieu de ELCO appelée par RPCDEF.

MGIIP : dans le cas du magnésium, on prend $NN = 5$, $NTC = 6$, $NTRD = 2$, $NTRC = 4$, $NTAB = 3$. On doit changer les données atomiques et sortie graphique à travers les paramètres suivants : ABOND, INF, POM, FRN, ITC, TAB, OIS, AJI, IOPRN, RXRO, DL1, DL2, OREF et ALP.

11 Nouveau code NEW_PROM7 et résultats

11.1 Cas des protubérances

On prend ici comme exemple d'atmosphère isotherme et isobare les valeurs suivantes :

$$T = 10000K, V = 5 \text{ km.s}^{-1}, h = 10000 \text{ km}, e = 200 \text{ km}, P = 0.5 \text{ dyn.cm}^{-2}$$

Dans les paragraphes 11.1.1, 11.1.2, 11.1.3, on va donner des résultats de demi-profils de raies de l'hydrogène, de raies *CaII* et de raies *MgII* obtenus par le programme NEW_PROM7 correspond au modèle d'atmosphère décrit ci-dessus.

Les demi-profils sont donnés pour trois valeurs de $\mu = \cos \theta$.

La courbe pour $\mu = 1$ est représentée par un trait continu. La courbe pour $\mu = 0.6$ est représentée par des tirets et la courbe pour $\mu = 0.2$ par des pointillés.

11.1.1.1 Hydrogène

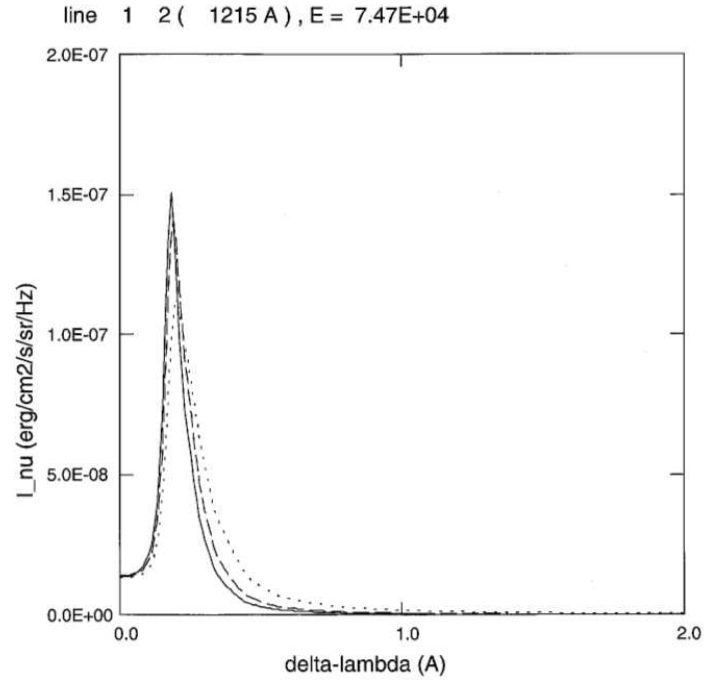


FIGURE 8 – Demi-profil de la raie $Ly\ \alpha$ à 1215Å de l'hydrogène

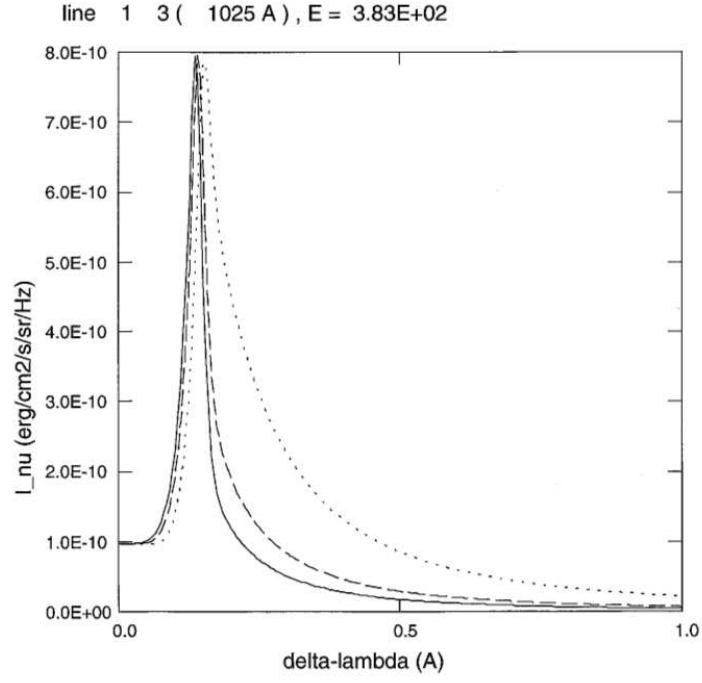


FIGURE 9 – Demi-profil de la raie $Ly \beta$ à 1025Å de l'hydrogène

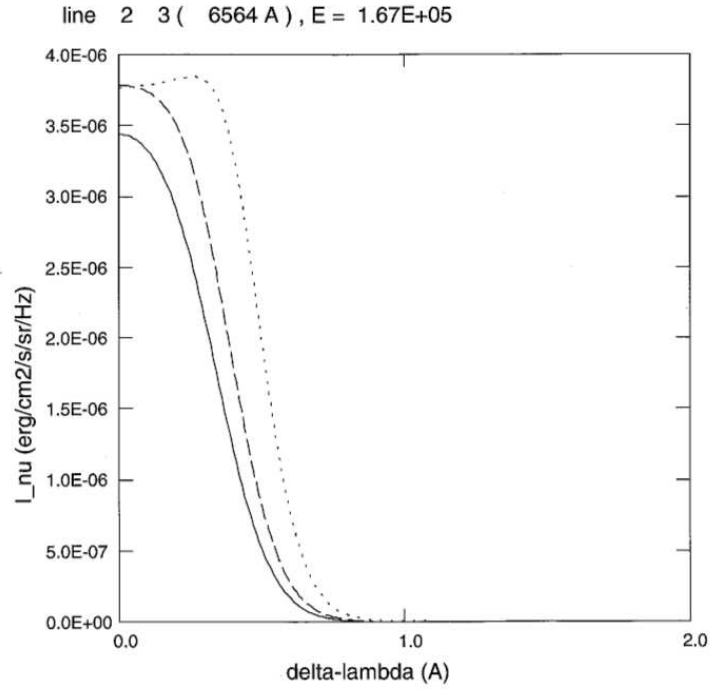


FIGURE 10 – Demi-profil de la raie $H \alpha$ à 6564Å de l'hydrogène

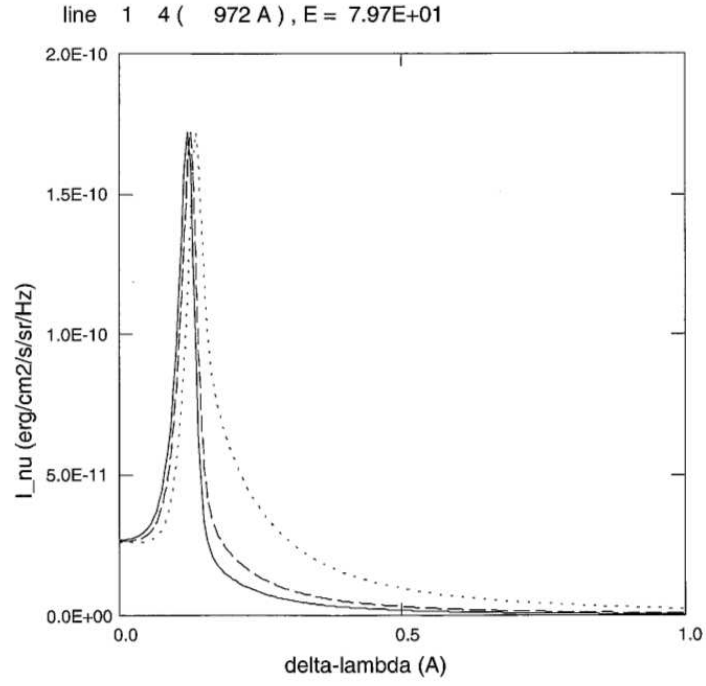


FIGURE 11 – Demi-profil de la raie $Ly \gamma$ à 972Å de l'hydrogène

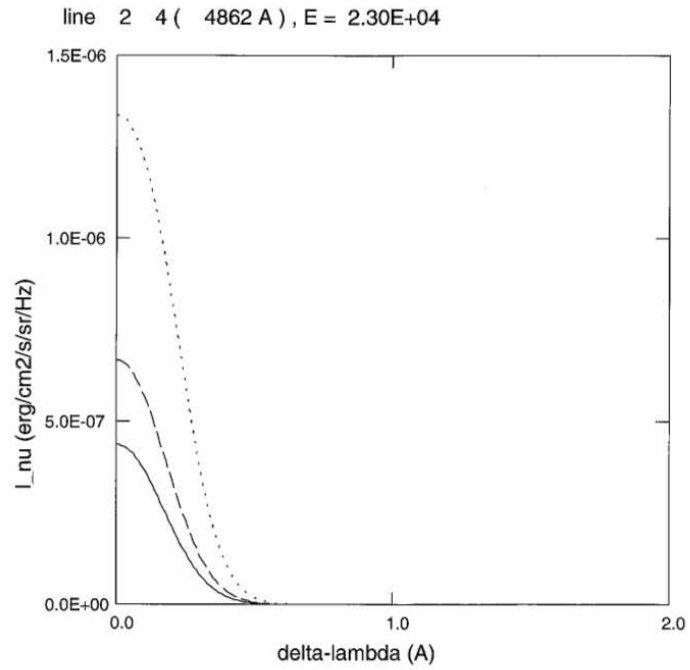


FIGURE 12 – Demi-profil de la raie $H \beta$ à 4862Å de l'hydrogène

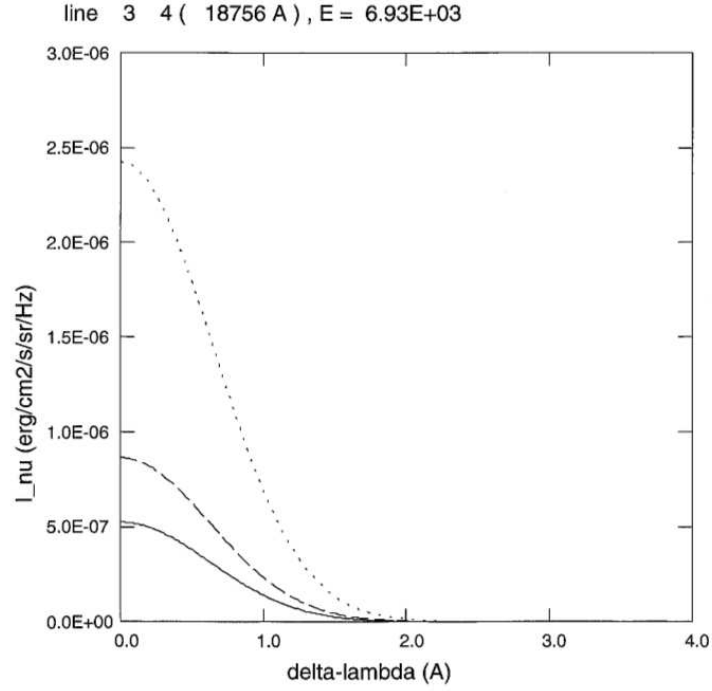


FIGURE 13 – Demi-profil de la raie $Pa \alpha$ à 18756Å de l'hydrogène

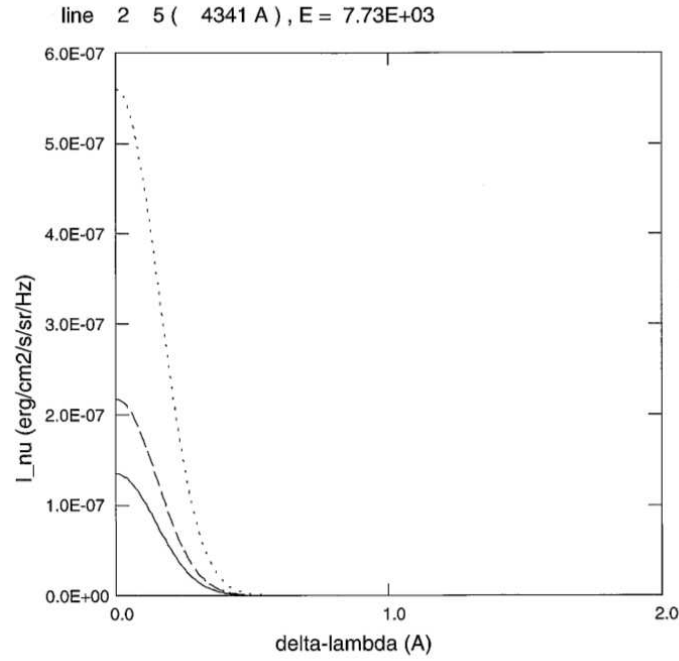


FIGURE 14 – Demi-profil de la raie $H \gamma$ à 4341Å de l'hydrogène

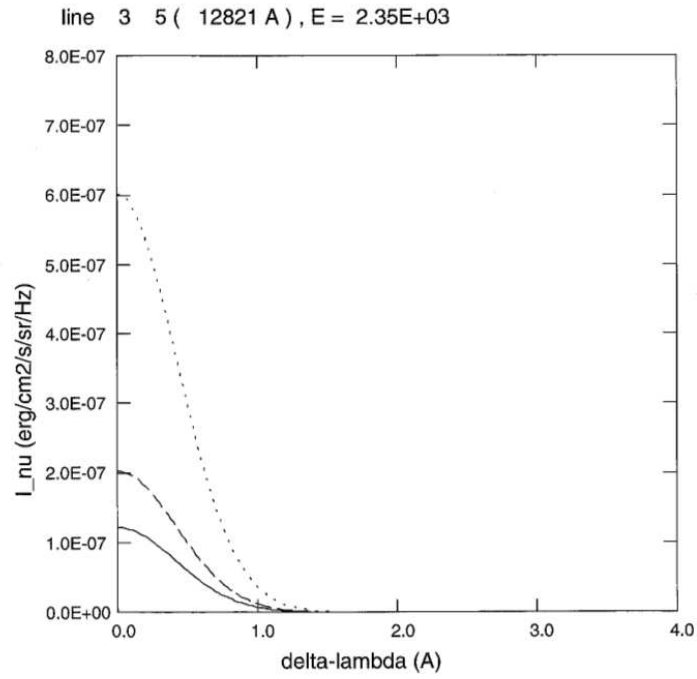


FIGURE 15 – Demi-profil de la raie $Pa\ \beta$ à 12821Å de l'hydrogène

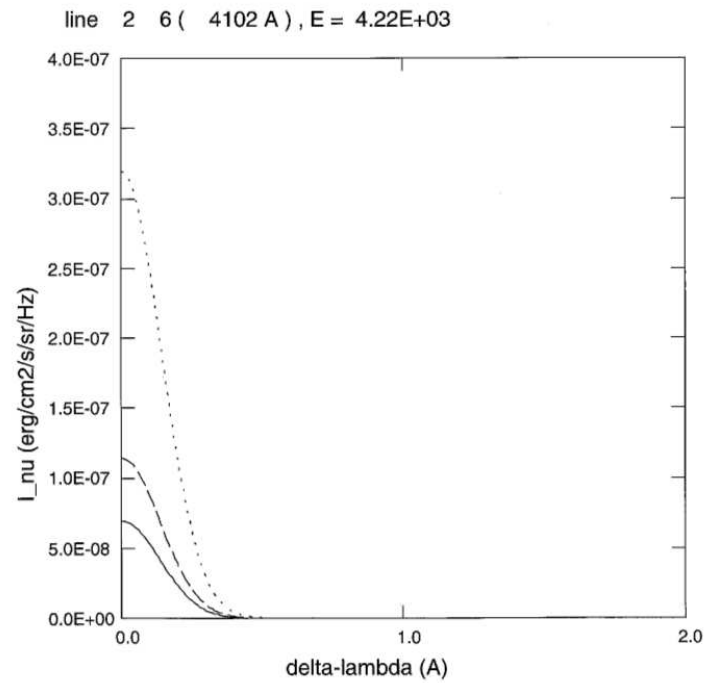


FIGURE 16 – Demi-profil de la raie $H\ \delta$ à 4102Å de l'hydrogène

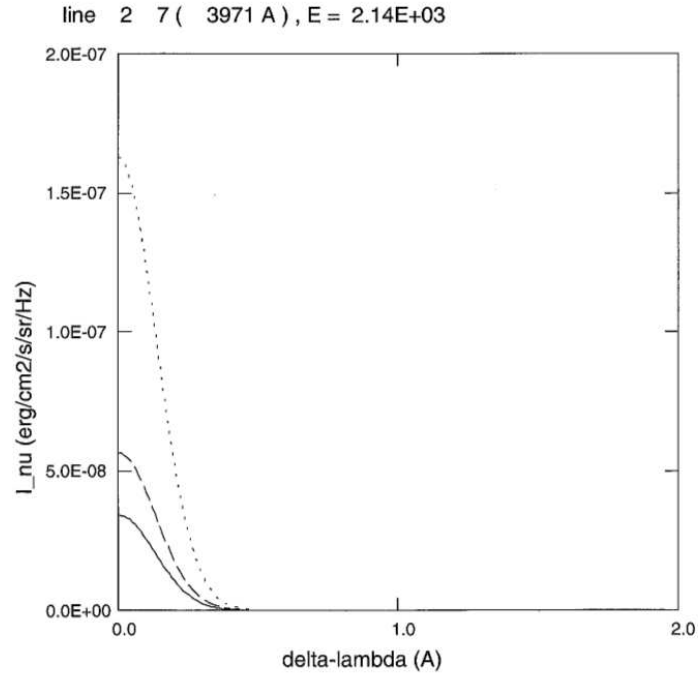


FIGURE 17 – Demi-profil de la raie $H \epsilon$ à 3971Å de l'hydrogène

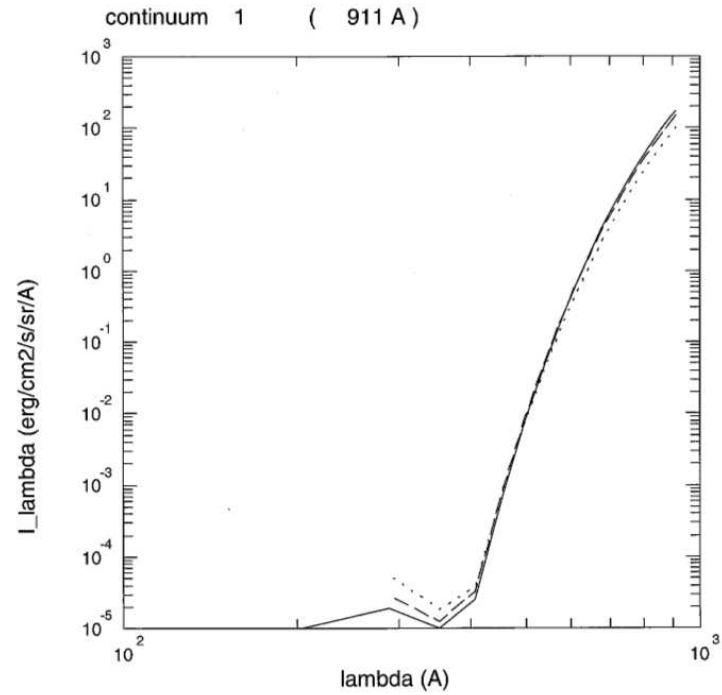


FIGURE 18 – Demi-profil du continu à 911Å de l'hydrogène

11.1.2 Calcium

Les demi-profil sont donnés pour trois valeurs de $\mu = \cos \theta$. La courbe pour $\mu = 1$ est représentée par un trait continu. La courbe pour $\mu = 0.6$ est représentée par des tirets et la courbe pour $\mu = 0.2$ par des pointillés.

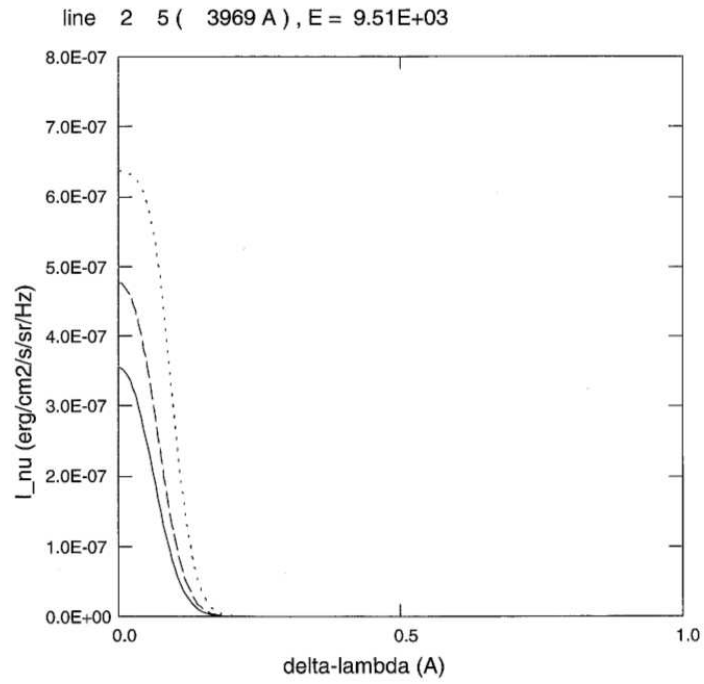


FIGURE 19 – Demi-profil de la raie H à 3969Å du $CaII$

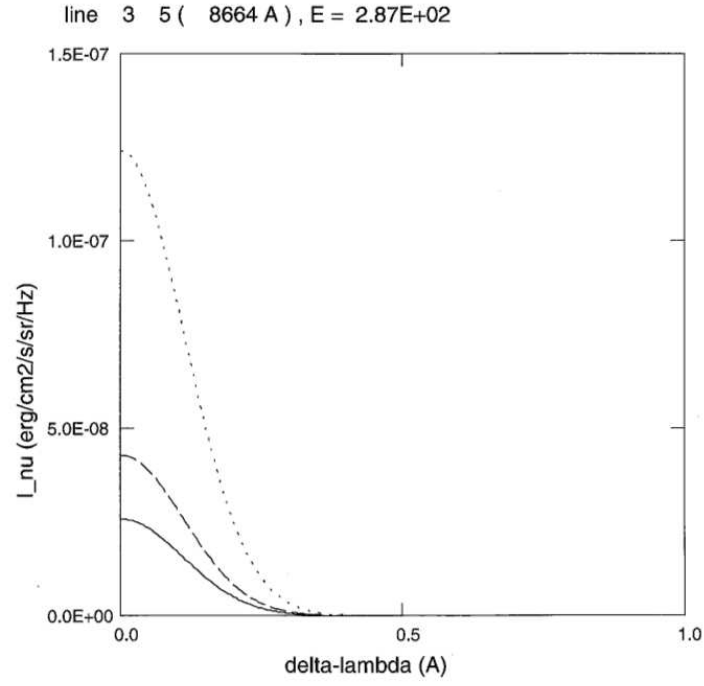


FIGURE 20 – Demi-profil de la raie *IR1* à 8664Å du *CaII*

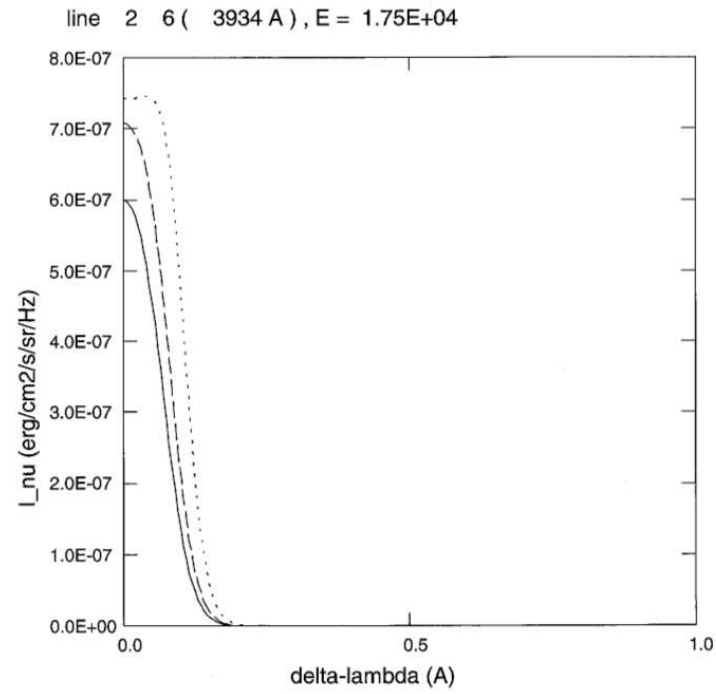


FIGURE 21 – Demi-profil de la raie *K* à 3934Å du *CaII*

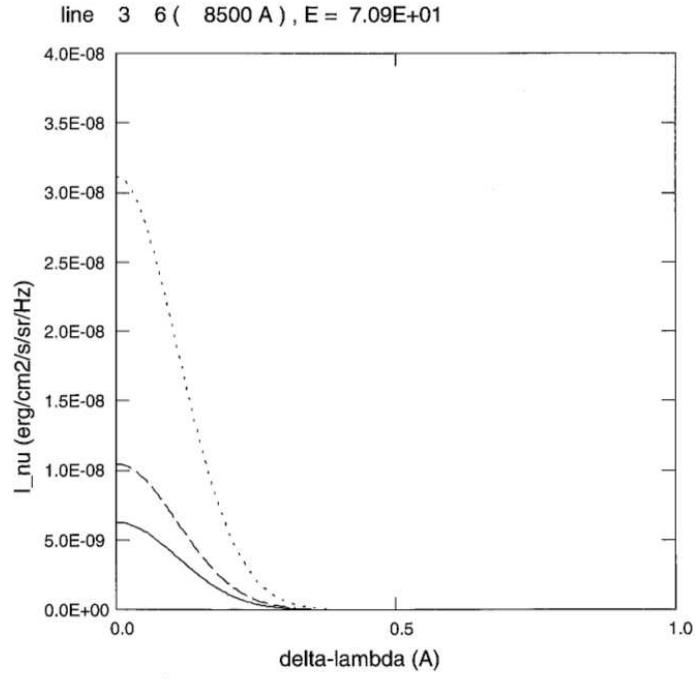


FIGURE 22 – Demi-profil de la raie *IR2* à 8500Å du *CaII*

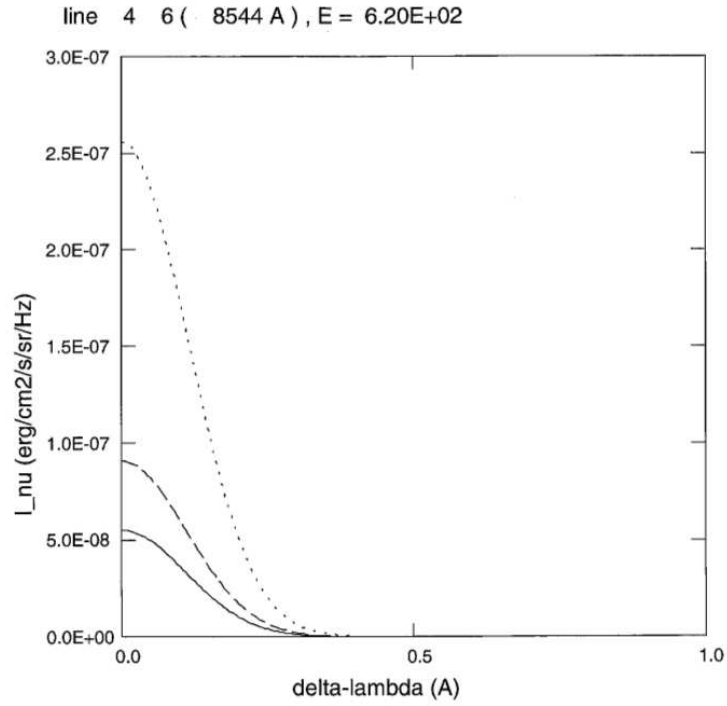


FIGURE 23 – Demi-profil de la raie *IR3* à 8544Å du *CaII*

11.1.3 Magnésium

Les demi-profil sont donnés pour trois valeurs de $\mu = \cos \theta$. La courbe pour $\mu = 1$ est représentée par un trait continu. La courbe pour $\mu = 0.6$ est représentée par des tirets et la courbe pour $\mu = 0.2$ par des pointillés.

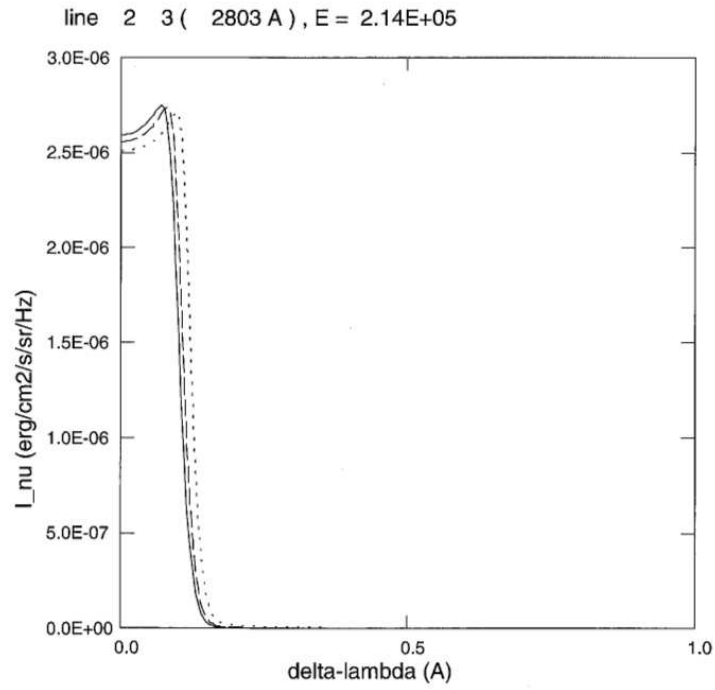


FIGURE 24 – Demi-profil de la raie h à 2803Å et de la raie k à 2796Å du Mg II

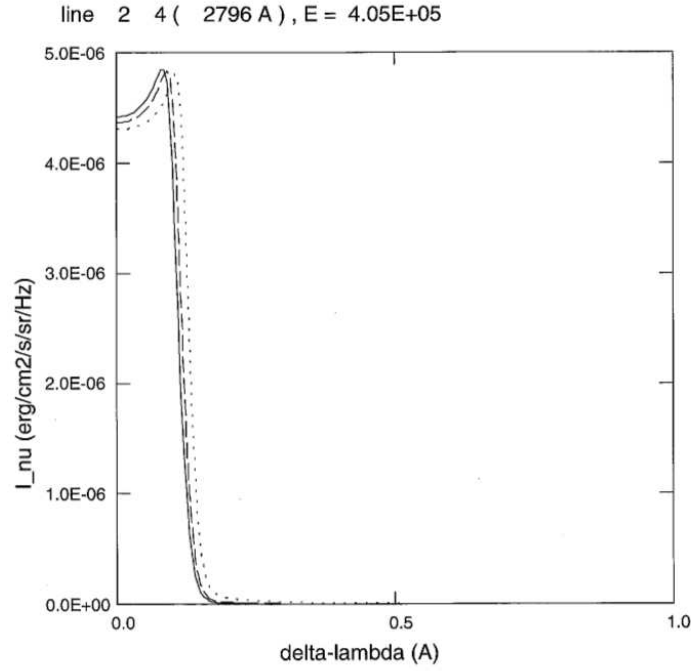


FIGURE 25 – Demi-profil de la raie k à 2796Å du Mg II

11.2 Cas de la couronne solaire (PCTR Prominence Corona Transition Region)

Le modèle d'atmosphère considéré est un modèle dont la température est variable le long de la ligne de visée (modèle d'Allen, [1]), ainsi que la pression. La hauteur de la ligne de visée par rapport à la surface du soleil est $h = 2 R_{\odot}$. L'atmosphère ne contient pas de protubérance et le transfert radiatif se réduit à la somme d'émissions. Les figures suivantes représentent les demi-profil de raies de l'hydrogène pour trois valeurs de $\mu = \cos \theta$, sans absorption continue.

La courbe pour $\mu = 1$ est représentée par un trait continu. La courbe pour $\mu = 0.6$ est représentée par des tirets et la courbe pour $\mu = 0.2$ par des pointillés.

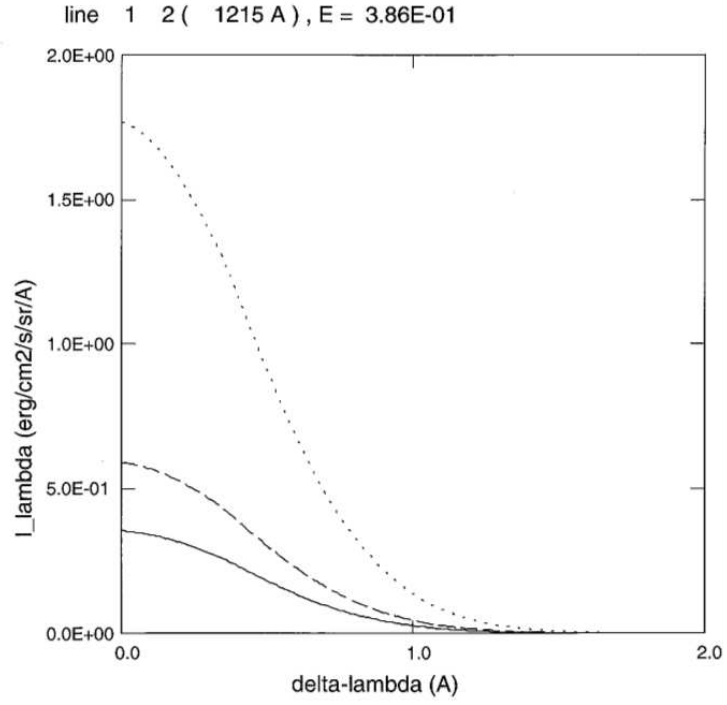


FIGURE 26 – Demi-profil de la raie $Ly \alpha$ à 1215Å de l'hydrogène

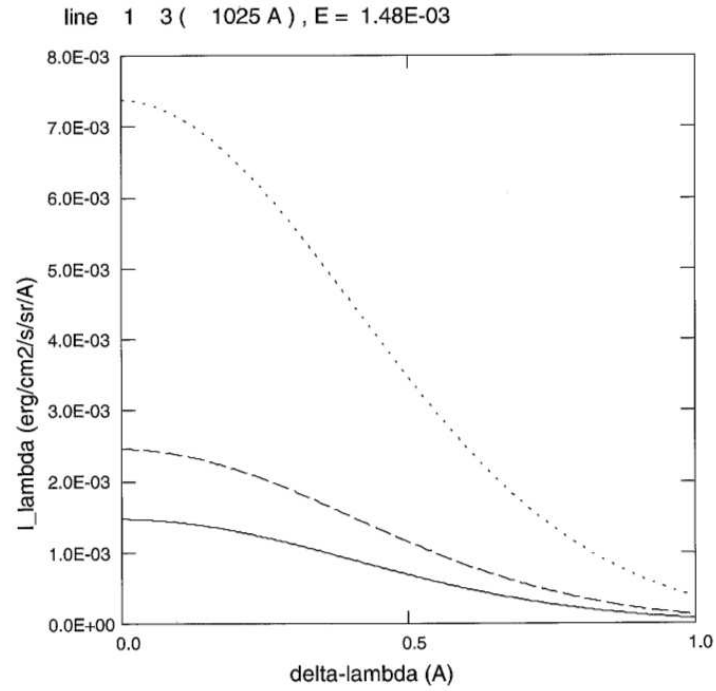


FIGURE 27 – Demi-profil de la raie $Ly \beta$ à 1025Å de l'hydrogène

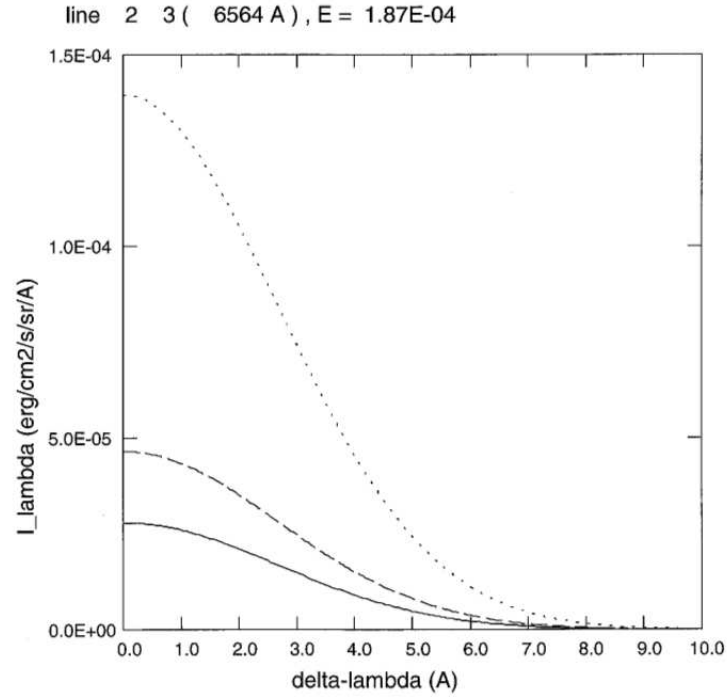


FIGURE 28 – Demi-profil de la raie $H\alpha$ à 6564Å de l'hydrogène

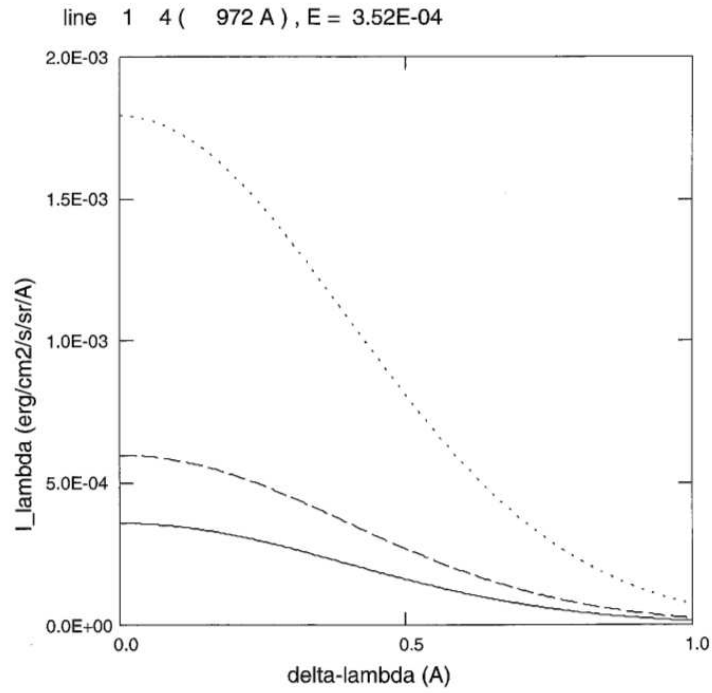


FIGURE 29 – Demi-profil de la raie $Ly\ \gamma$ à 972Å de l'hydrogène

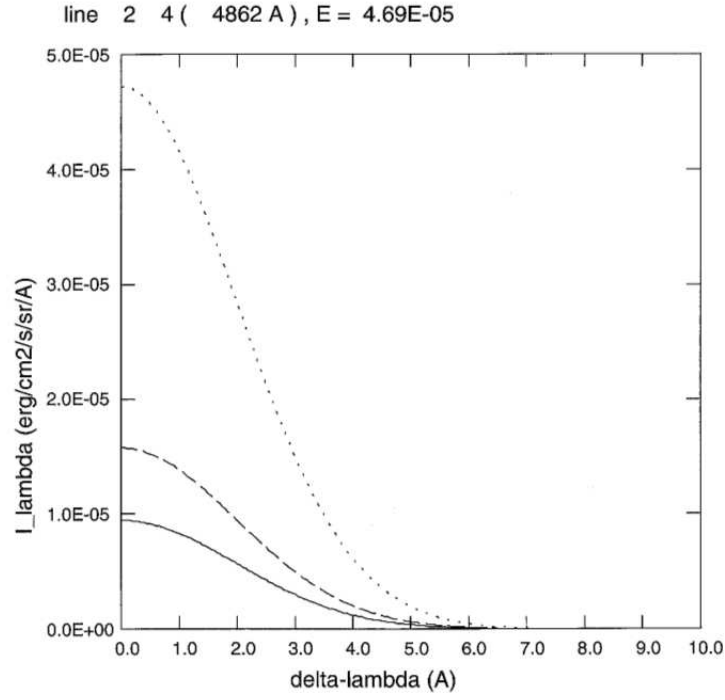


FIGURE 30 – Demi-profil de la raie $H \beta$ à 4862Å de l'hydrogène

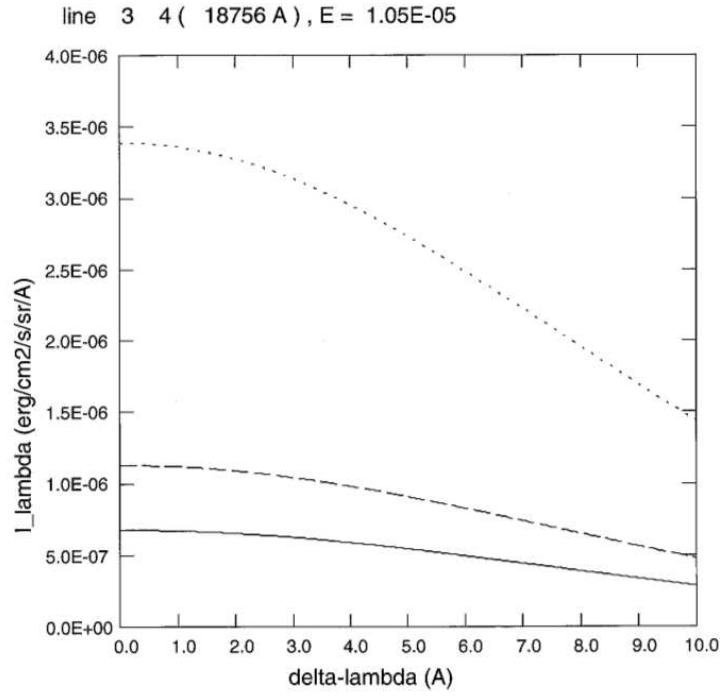


FIGURE 31 – Demi-profil de la raie $Pa \alpha$ à 18756Å de l'hydrogène

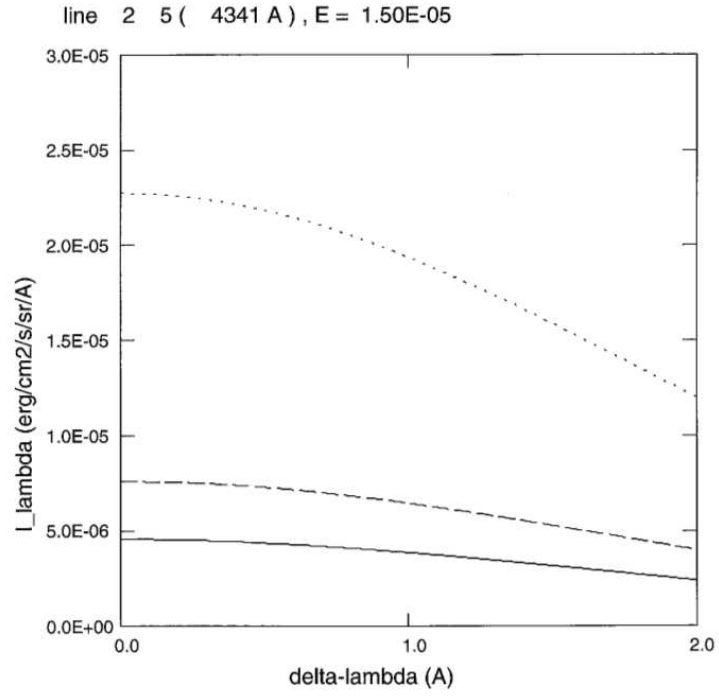


FIGURE 32 – Demi-profil de la raie $H \gamma$ à 4341Å de l'hydrogène

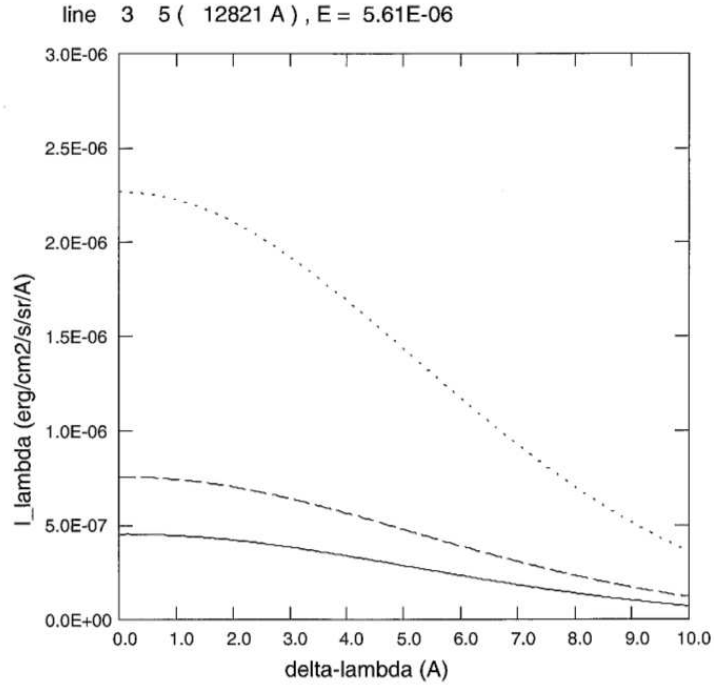


FIGURE 33 – Demi-profil de la raie $Pa \beta$ à 12821Å de l'hydrogène

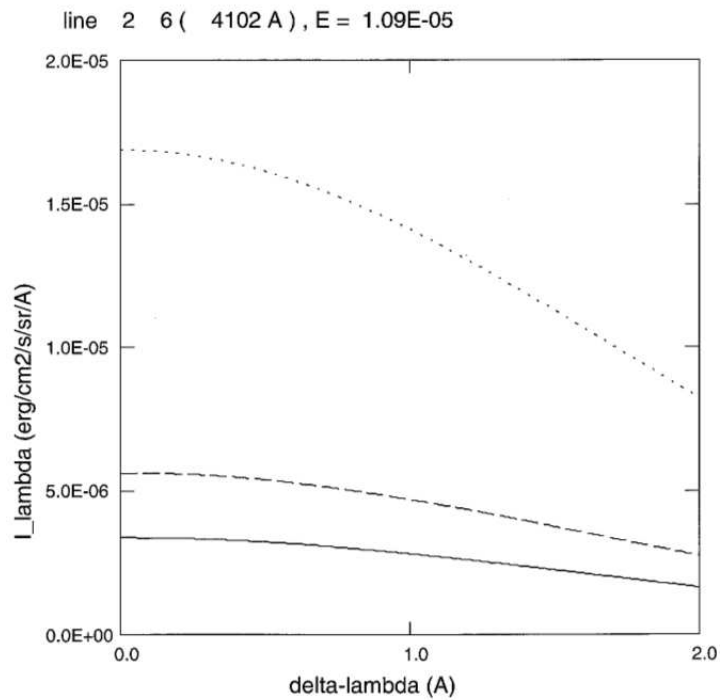


FIGURE 34 – Demi-profil de la raie $H \delta$ à 4102Å de l'hydrogène

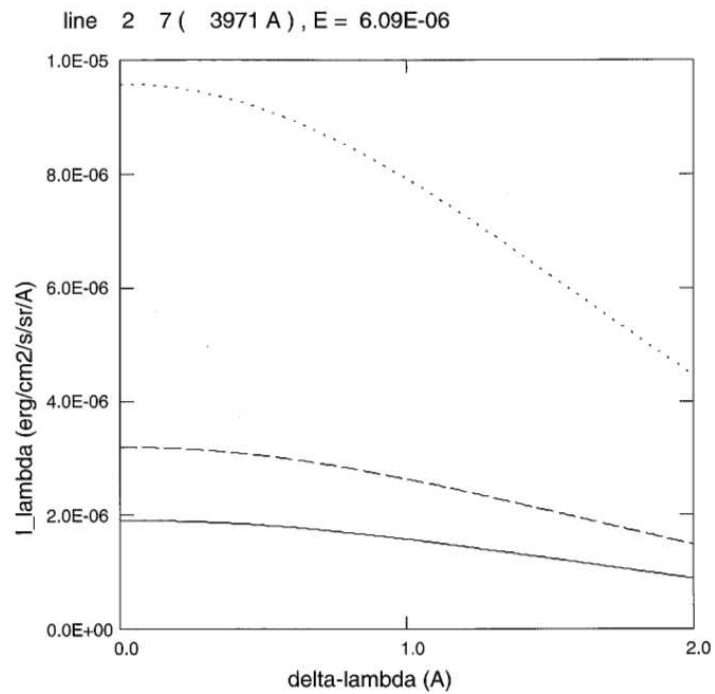


FIGURE 35 – Demi-profil de la raie $H \epsilon$ à 3971Å de l'hydrogène

12 Exécution de PROM7

- Télécharger le package PROM7_PRD.tgz sur MEDOC/TOOLS. Le compilateur gfortran est nécessaire. Taper les commandes suivantes dans un terminal :
- **tar -xvzf PROM7_PRD.tgz**
- **cd PROM7_PRD**
- Le répertoire contient les fichiers suivants : intica.dat, intinc.dat, model.dat, tembri.dat, makefile, pr7prd.f90
- Le fichier à rectifier est “model.dat” : le premier paramètre correspond à l’option protubérance (= 1) ou filament (= 0) et le second paramètre représente le nombre de modèles à traiter. Ces modèles se trouvant en dessous sont définis par la température, la pression, l’épaisseur de la structure, la vitesse de microturbulence et l’altitude de la structure par rapport à la surface du soleil
- **make**
- **./pr7prd**
- Les fichiers de sortie sont : resume.dat, profil.dat, profil.ps, fort.66 (liste des transitions)
- Le répertoire **results** contient les outputs correspondant à un cas test afin de vérifier si les résultats obtenus sont les mêmes

13 Exécution de NEW_PROM7

- Télécharger le package NEW_PROM7.tgz. Le compilateur gfortran est nécessaire. Taper les commandes suivantes dans un terminal :
- **tar -xvzf NEW_PROM7.tgz**
- **cd NEW_PROM7**
- Le répertoire contient les fichiers suivants : intica.dat, intinc.dat, model7.dat, model5.dat, tembri.dat, makefile, prom57.f90
- Les fichiers à rectifier sont “model5.dat” et/ou “model7.dat” :
 - ★ Le premier paramètre de ces fichiers correspond à l’option protubérance (= 1) ou filament (= 0)
 - ★ Le deuxième paramètre de “model7.dat” correspond au nombre de modèles à traiter. Ces modèles se trouvant en dessous sont définis par la température, la pression, l’épaisseur de la structure, la vitesse de microturbulence et l’altitude de la structure par rapport à la surface du soleil
- **make**
- **./prom57**
- Les fichiers de sortie sont : resume.dat, profil.dat, profil.ps, fort.8 (résumé des itérations), fort.18 (convergence), fort.31 (N_H, N_e), fort.60 (niveaux supérieurs et inférieurs), fort.61 (paramètres atmosphériques), fort.66 (liste des transitions), fort.67 (probabilités d’excitation et de désexcitation par rayonnement), fort.69 (J_ν), fort.70 (facteurs de dilution pour les raies)

- Le répertoire **results** contient les outputs correspondant à un cas test afin de vérifier si les résultats obtenus sont les mêmes

14 Temps de calcul

Pour 3 modèles d'atmosphère à paramètres fixes :

- $T = 6000K$, $V = 5 \text{ km.s}^{-1}$, $h = 10000 \text{ km}$, $e = 200 \text{ km}$, $P = 0.01 \text{ dyn.cm}^{-2}$
- $T = 8000K$, $V = 5 \text{ km.s}^{-1}$, $h = 10000 \text{ km}$, $e = 200 \text{ km}$, $P = 0.1 \text{ dyn.cm}^{-2}$
- $T = 10000K$, $V = 5 \text{ km.s}^{-1}$, $h = 10000 \text{ km}$, $e = 200 \text{ km}$, $P = 0.5 \text{ dyn.cm}^{-2}$

Sur inf-martine (PC de 2010, 4 processeurs de 2.67 GHz chacun) :

- Temps CPU pour le code traitant les 3 modèles de protubérances cités ci-dessus : $53.662 \text{ s} < 1 \text{ min}$
- Temps CPU pour le code traitant les 3 modèles de filaments cités ci-dessus : $781.313 \text{ s} \sim 13 \text{ mins}$ car pour le cas des filaments, on considère non pas une demi-couche mais la couche toute entière.

15 Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Pierre Gouttebroze pour ses précieuses explications qui m'ont permis d'élaborer ce document, ainsi que Jacques Solomon, Frédéric Marcadon, les directeurs de MEDOC actuel (Eric Buchlin) et ancien (Frédéric Baudin).

Le 31 octobre 2025

M. C-Y

Références

- [1] C.W. Allen. *Astrophysical quantities*. The Athlone Press, University of London, 1973.
- [2] M. Arnaud and R. Rothenflug. An updated evaluation of recombination and ionization rates. *A&A suppl. Ser.*, 60 :425–457, 1985.
- [3] L.H. Auer and D. Mihalas. On the use of variable Eddington factors in Non-LTE stellar atmospheres computations. *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 149 :65–74, 1970.
- [4] Eugene H. Avrett. *Introduction to Non-LTE radiative transfer and atmospheric modeling*. Lecture notes, 2008.
- [5] S. Chandrasekhar. *Radiative transfer*. Dover Publications, 1960.
- [6] CHIANTI Database. George Mason University (USA) and University of Michigan (USA) and University of Cambridge (UK). <http://www.chiantidatabase.org/>, Mai 2014.
- [7] K.P. Dere, E. Landi, H.E. Mason, B.C. Monsignori Fossi, and P.R. Young. CHIANTI - an atomic database for emission lines : I. Wavelengths greater than 50a. *A&A suppl. Ser.*, 125 :149–173, 1997.
- [8] O. Gingerich. Review of Opacity Calculations. *Proceedings of the First Harvard-Smithsonian Conference on Stellar Atmospheres*, 167 :1–25, 1964.
- [9] P. Gouttebroze and P. Heinzel. Calcium to hydrogen line ratios in solar prominences. *A&A*, 385 :273–280, 2002.
- [10] P. Gouttebroze, P. Heinzel, and J.-C. Vial. The hydrogen spectrum of model prominences. *A&A Suppl. Ser.*, 99 :513–543, 1993.
- [11] P. Gouttebroze and N. Labrosse. A ready-made code for the computation of prominence NLTE medels. *Solar Physics*, 196 :349–355, 2000.
- [12] Pierre Gouttebroze. *Formation des raies spectrales et oscillations dans la chromosphère solaire*. Thèse d’Etat, Université Paris 7, 1980.
- [13] I. Hubeny and D. Mihalas. *Theory of Stellar Atmospheres : An introduction to Astrophysical Non-equilibrium Quantitative Spectroscopic Analysis*. Princeton University Press, 2015.
- [14] J.T. Jefferies. *Spectral line formation*. Blaisdell, 1968.
- [15] L.C. Johnson. Approximation for collisional and radiative transition rates in atomic hydrogen. *A&A*, 174 :227–236, 1972.
- [16] Nicolas Labrosse. *Modélisation du spectre de l’hélium dans les protubérances solaires*. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 2001.
- [17] P. Lemaire, P. Gouttebroze, J.-C. Vial, and G. E. Artzner. Physical properties of the solar chromosphere deduced from optically thick lines : I. Observations, data reduction, and modelling of an average plage. *A&A*, 103 :160–176, 1981.
- [18] J. Oxenius. *Kinetic Theory of Particles and Photons. Theoretical Foundations of Non-LTE Plasma Spectroscopy*. Springer-Verlag, 1986.

- [19] 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.
- [20] C. Pecker-Wimel. *Introduction à la spectroscopie des plasmas*. Gordon and Breach, 1966.
- [21] R.J. Rutten. *Radiative transfer in stellar atmospheres*. 2003.
- [22] E. Schatzman. *Astrophysique*. Masson et Cie, 1963.
- [23] J.E. Vernazza, E. H. Avrett, and R. Loeser. Structure of the Solar chromosphere; ii. The underlying photosphere and temperature-minimum region. *ApJS*, 30 :1–60, 1976.