

Code d'évolution stellaire CESAM2*k*

Aide mémoire : Installation, Utilisation

Pierre Morel
OCA Observatoire de Nice, BP. 4229, 06304 Nice Cedex 4
UMR CNRS 6529

Version V3.2, 15 Octobre 2007.

*Quand un jour, tôt ou tard, il faut qu'on disparaisse,
Quand on a plus ou moins vécu, souffert, aimé
Il ne reste de soi que les enfants qu'on laisse
Et le champ de l'Effort où l'on aura semé.*

Ch. De Gaulle

Table des matières

1	Installation	1
1.1	CESAM2 <i>k</i>	1
1.1.1	PGPLOT	2
1.2	Contenu de la distribution	2
1.3	Installation	2
1.4	Adaptation de la source	3
1.5	Création du module exécutable	4
1.5.1	Utilisation d'un MAKEFILE	4
1.5.2	Fonctions des modules	5
1.6	Test de fonctionnement	5
1.7	Mise en forme des données physiques	9
1.7.1	Opacités "Yveline"	9
1.7.2	Opacités pour $Z > 0.1$	10
1.7.3	Opacités HOUDEK	10
1.7.3.1	Implantation simplifiée de B.Pichon	11
1.7.4	Equation d'état OPAL	12
1.7.4.1	OPAL 1991	12
1.7.4.2	OPAL 2001	14
1.7.5	Equation d'état MHD	15
2	Exploitation	19
2.1	Conseils pour l'exploitation	19
2.2	Le fichier de données : <code>mon_modele.don</code>	19
2.3	Exemple de fichier de données	20
2.4	Arguments de la NAMELIST <code>NL_CESAM</code>	22
2.5	Arguments de la NAMELIST <code>NL_MASS</code>	23
2.6	Arguments de la NAMELIST <code>NL_EVOL</code>	25
2.6.1	Caractérisation des types de modèles	25
2.7	Arguments de la NAMELIST <code>NL_CHIM</code>	25
2.7.1	Alternative : conservation métal/H ou métal/Z	27
2.8	Arguments de la NAMELIST <code>NL_CONV</code>	27
2.9	Arguments de la NAMELIST <code>NL_DIFF</code>	28
2.10	Arguments de la NAMELIST <code>NL_ROT</code>	29
2.11	Arguments de la NAMELIST <code>NL_ETAT</code>	30
2.12	Arguments de la NAMELIST <code>NL_OPA</code>	31
2.13	Arguments de la NAMELIST <code>NL_NUC</code>	31
2.14	Arguments de la NAMELIST <code>NL_ATM</code>	32

2.15	Exploitation sous UNIX & LINUX	33
2.15.1	Limitation des sorties	33
2.16	Programmes d'exploitation	34
2.17	Scripts d'exploitation	34
3	Personnalisation	37
3.1	Langue	37
3.2	Mixture	38
3.3	Rapports isotopiques	39
3.4	Personnalisation des rapports d'abondances	40
3.5	Personnalisation de la composition chimique du vent.	40
3.6	Chute de planètes	41
3.7	Ascii	42
3.8	Réglages	43
3.9	Zoom	45
3.10	Device	47
3.10.1	Limitation des écritures	48
4	Extensions	49
4.1	Ajout d'une chaîne de réactions thermonucléaires	49
4.2	Ajout d'une mixture initiale	50
5	Debug	53
5.1	Debug	53
A	Installation sous LINUX	55
A.1	Création de la bibliothèque avec <code>ifc</code>	55
A.2	Installation de PGPLOT	56
A.2.1	Installation intégrale avec <code>ifc</code>	56
A.2.2	Installations sans larme	57
A.2.3	CESAM2k sans PGPLOT	57
A.3	Exemple de MAKEFILE	57
B	Liste des fichiers ASCII	67
B.1	Fichiers pour oscillations	67
B.1.1	Fichier pour oscillations adiabatiques	67
B.1.2	Fichier pour oscillations non adiabatiques	69
B.1.3	Fichier pour inversions	70
B.1.4	Utilisation du nombre maximum de couches	71
B.2	Fichier pour diagramme HR	72
B.3	Fichier ASCII des variables de la diffusion du moment cinétique	73

Table des figures

- 1.1 Schéma de l'organigramme général de CESAM2*k*. Le programme `cesam2k`, compilé une fois pour toutes, fait appel à la routine `cesam` qui constitue en fait, le programme principal. Dans `cesam`, après des initialisations, on sépare le traitement des 3 possibilités : poursuite d'une évolution, initialisation sur la ZAMS homogène, initialisation d'une PMS. Le calcul se poursuit par des opérations de gestion de l'évolution, listing, création de fichiers de sortie, dessin, etc... Est ensuite fait appel à `resout`, où les équations de l'équilibre quasi-statique sont résolues en alternance avec celles de l'évolution du moment cinétique et de la composition chimique. Ces dernières sont résolues séparément dans `evol`. Une fois la convergence obtenue, il y a retour vers les algorithmes de gestion de l'évolution de `cesam` et, de là, poursuite de l'évolution ou retour à `cesam` pour sortie. Les routines d'analyse numérique et de physique sont sollicitées à différents niveaux de calcul. 16
- 1.2 Tracés évolutifs incluant la pré-séquence principale pour des étoiles de $0.5M_{\odot}$ à $15M_{\odot}$. Le flash de l'hélium a été dépassé pour les masses supérieures à $3M_{\odot}$. Pour les modèles de $3M_{\odot}$ et de $5M_{\odot}$ les calculs ont été arrêtés après la disparition du carbone au centre. La phase de destruction de l'oxygène a été atteinte pour les modèles de $7M_{\odot}$ et de $10M_{\odot}$. Avec la disparition de l'oxygène dans le noyau, la limite de validité de l'hypothèse d'équilibre quasi-statique a été atteinte pour le modèle de $15M_{\odot}$. Ces tracés ont été obtenus avec le fichier de données du § 2.3 (Page 20). 17

Liste des tableaux

- 2.1 Valeurs des paramètres numériques suivant les diverses options de précision prévues. Les valeurs de ces paramètres peuvent être adaptées au type d'évolution, en utilisant l'option '**rg**', *cf.* § 3.8 (Page 43) ; on utilise alors les paramètres indiqués dans le fichier de nom **reglages** placé dans l'environnement. Les dénominations s'interprètent de la façon suivante : **pr** : précision réaliste, **sp** : super précision, **lm** : pour petites masses (low mass), **av** : pour modèles pouvant atteindre les stades avancés, **np** : pour modèles de précision normale, **co** : pour modèles destinés à l'exploitation des résultats du satellite CoRoT, **sa** : pour modèles solaires. La signification des différents paramètres numériques est explicitée au § 3.8 (Page 43) et dans la routine **cesam** du sous-directory **SOURCE**, lignes 741-766. Les paramètres par défaut sont ceux de la précision réaliste **pr**. D'autres options de précision sont prévues ; elles ne sont pas détaillées ici. 24

Index

ab_ini, 45
ab_min, 45
abondance d'hélium, 40
abondances, 40
abondances initiales, 26, 40
add_Al, 40
add_Ar, 40
add_B, 40
add_Be, 40
add_C, 40
add_Ca, 40
add_Cl, 40
add_Co, 40
add_Cr, 40
add_F, 40
add_Fe, 40
add_K, 40
add_Li, 40
add_Mg, 40
add_Mn, 40
add_N, 40
add_Na, 40
add_Ne, 40
add_Ni, 40
add_O, 40
add_P, 40
add_S, 40
add_Sc, 40
add_Si, 40
add_Ti, 40
add_V, 40
add_Z, 40
Adelb, 32
agemax, 25
aide mémoire, 2
ajout de mixture, 50
ajout isotope, 49
alecian1.f, 28
alecian2.f, 28
all_adia, 22
all_ascii, 22
all_invers, 22
all_iter, 30
all_mod, 30
all_nadia, 22
ALLOCATABLE, 2, 55
alpha, 27
anglais, 37
arret, 25
ascii.f, 42
ascii2bin_opa.f, 9
av, 23

baratine, 33, 48
bashrc, 3
blabla, 33, 48

C-shell, 2
calib2k_pms, 34
calib2k_pms.f, 34
calib2k_zams, 34
calib2k_zams.f, 34
calibration solaire, 27
Cau-Fow, 32
cesam2k.out, 1, 5, 33
coca, 25
cohe, 25
compilateur ifc, 55, 56
compilateur INTEL, 56
compilateurs, 1
compilation, 2
compile2k, 34
compile2k-dbg, 34
compile2k-dbg_list, 34
compile2k_list, 34
cons_glob_mnt_cin, 29
cons_loc_mnt_cin, 29
conseils, 19
coox, 25

- cpturb, 27
- cshrc, 2, 57
- ctel, 43
- ctem, 43
- ctep, 43
- cter, 43
- ctes_85.f, 22
- ctes_94.f, 22
- ctes_94m.f, 22
- ctet, 43

- d_grav, 43
- d_turb, 28
- Debian, 57
- dell, 9
- des.f, 2
- des2k_abon.f, 34
- des2k_abontc.f, 34
- des2k_abonts.f, 34
- des2k_bin.f, 34
- des2k_dhve.f, 34
- des2k_diff_spl.f, 34
- des2k_grad.f, 34
- des2k_hr.f, 34
- des2k_opa.f, 34
- des2k_osc.f, 34
- des2k_ZC.f, 34
- des_m.f, 3, 22
- des_r.f, 2, 3, 22
- dessin, 9
- device, 47
- diff_mz04, 29
- diff_tz97, 29
- diffm_0, 28
- diffm_br.f, 28
- diffm_mp.f, 28
- diff_t_gab.f, 28
- diff_t_nu.f, 28
- diff_t_smc.f, 28
- diffusion, 28
- diffusion microscopique, 28
- diffusion turbulente, 28
- diffw_0.f, 29
- diffw_mpz.f, 29
- diffw_p03.f, 29
- discon, 43
- dlntc, 43, 45

- dn_fixe, 43
- données, 1, 9
- dpsi, 43
- dt0, 43
- dtlist, 25
- dtmax, 43
- dws, 29

- edding.f, 32
- en_masse, 43
- end_evol, 30
- end_mod, 30
- enhan_al, 26
- enhan_cha, 26
- enhan_w, 26
- equation d'état, 31
- etat_eff.f, 31
- etat_gong1.f, 31
- etat_gong2.f, 31
- etat_mhd.f, 15, 31
- etat_opal.f, 12, 14, 31
- etat_opalX.f, 14, 31
- etat_opalZ.f, 14, 31
- evol2k_pms, 34
- evol2k_zams, 34
- exe2k, 2, 34
- exe2k_dbg, 34
- EXPLOIT, 1
- extension .mix, 38

- f037_2k.f, 34
- f_eos, 30
- f_opa, 31
- fichier de données, 20
- fichier de sorties ASCII, 22
- fichier_vent.f, 34
- fichiers d'oscillations, 67
- fmin_abon, 45
- FORTTRAN95, 1

- gain de masse, 40
- garde_xish, 25, 27
- genere_cesam2k, 2, 34
- genere_cesam2k_dbg, 34
- Gnome, 57
- grille_fixe, 25

- he_core, 25

hopf.f, 32
ifc, 56
ini0, 43
iter_qs, 45

journal, 1
jours, 29
jpz, 27

k5750.f, 32
k5777.f, 32
kind, 5
kipp, 43
kms/s, 29
Kubuntu, 57

l0, 45
langue, 37
Ledoux, 27
lib_del_repl, 34
lib_repl, 34
libcesam2k.a, 4
lim_atm.f, 32
lim_gong1.f, 32
lim_jpz, 29
lim_ro, 32, 33
lim_tau1.f, 32
limitation des écritures, 48
limitation des sorties, 33, 48
link, 10
LINUX, 1, 2, 33
list_cesam, 4
lm, 24
loc_zc, 43
log_teff, 25

météorites, 26
métal/H, 27
métal/Z, 27
m_ch, 43
m_ptm, 43
m_qs, 43
m_tds, 43
makefile, 57
Mandrake, 57
mdot, 23
mitler, 31
mixture, 38, 50

mod_atm.f, 5
mod_cesam.f, 2, 5
mod_conv.f, 5
mod_donnees.f, 5
mod_etat.f, 5
mod_evol.f, 5
mod_exploit.f, 5
mod_kind.f, 5
mod_nuc.f, 5
mod_numerique.f, 5
mod_opa.f, 5
mod_static.f, 5
mod_variables.f, 5
modif_mix, 25
modif_xish, 40
mon_modele-ad.osc, 22, 67
mon_modele-ascii, 22
mon_modele-inv.osc, 22, 70
mon_modele-nad.osc, 22, 69
mon_modele.don, 1, 19
mon_modele.HR, 72
mtot, 23
mu_saha, 45
mvt_dis, 43
mx, 23

n_atm, 43
n_max, 22
NACRE, 32
nb_max_modeles, 25
new_bv, 45
NL_ATM, 20, 32
NL_CESAM, 19, 22
NL_CHIM, 20, 25
NL_CONV, 20, 27
NL_DIFF, 20
NL_ETAT, 20, 30
NL_EVOL, 25
NL_MASS, 20, 23
NL_MODIF_MIX, 40
NL_NOMS, 22
NL_NUC, 20, 31
NL_OPA, 20, 31
NL_RLG, 43
NL_ROT, 20, 29
NL_TEMPS, 20
no_des, 22, 30

- no_frad, 28
- no_output, 22
- nom_abon, 20, 26
- nom_atm, 20, 32
- nom_chemin, 20, 22
- nom_conv, 20
- nom_ctes, 20, 22
- nom_des, 20
- nom_des_rot, 30
- nom_diffm, 20, 28
- nom_diff, 20, 28
- nom_diffw, 30
- nom_etat, 20, 31
- nom_frad, 28
- nom_nuc, 20, 31
- nom_nuc_cpl, 31, 32
- nom_opa, 20, 31
- nom_output, 22
- nom_perte, 20
- nom_pertm, 23
- nom_pertw, 30
- nom_tdetau, 20, 32
- nom_thw, 29
- nombre de couches, 71
- NOTICE, 1, 2
- np, 24
- nr, 24
- numéro de version, 1
- numérotation des modèles, 22, 25
- object module, 4
- opa_gong.f, 31
- opa_houdek9.f, 10, 31
- opa_int_zsx.f, 31
- opa_opal2_cno, 31
- opa_opal2_co, 31
- opa_opalCO.f, 31
- opa_yveline.f, 31
- opa_yveline_lisse.f, 31
- opacité, 9, 31
- opalX_ascii_bin.f, 14
- opalZ_ascii_bin.f, 14
- option mixture, 38
- ordre, 43
- osc_adia.f, 22
- osc_invers.f, 22
- osc_nadia.f, 22
- ovshti, 27
- ovshts, 27
- p_pertw, 30
- perte de masse, 40
- pertm_ext.f, 23
- pertm_msol.f, 23
- pertm_tot.f, 23
- pertm_waldron.f, 23
- pertw_0, 30
- pertw_loc.f, 30
- pertw_ptm.f, 30
- pertw_sch.f, 30
- PGPLOT, 2, 56, 57
- pgplot_factice, 57
- planétoïdes, 41
- POINTER, 2, 55
- post, 25
- pp1.f, 31
- pp3.f, 31
- ppcno10.f, 31
- ppcno10BeBFe.f, 31
- ppcno10Fe.f, 31
- ppcno10K.f, 31
- ppcno11.f, 31
- ppcno12.f, 31
- ppcno12Be.f, 31
- ppcno12BeBFe.f, 31
- ppcno12Li.f, 31
- ppcno3a12Ne.f, 31
- ppcno3a9.f, 31
- ppcno3aco.f, 31
- ppcno9.f, 31
- ppcno9Fe.f, 31
- precision, 23
- precit, 43
- precix, 43
- psi0, 43
- q0, 45
- réactions thermonucléaires, 31, 49
- réglages, 43
- rad/s, 29
- rapport des abondances, 40
- rapports isotopiques, 39
- re_nu, 28
- RedHat, 57

rempl2k_mod, 34
rempl2k_mod-dbg, 34
restitution de l'atmosphère, 32
rg, 24, 43
ro_test, 43
roger00.f, 32
roger02.f, 32
roger05.f, 32
roger10a.f, 32
rot_0, 29
rot_cte, 29
routine de dessin, 22
routine de sorties ASCII, 22
routines disponibles, 22
RPM, 57

sa, 24
SCRIPTS, 1
semi_convection, 28
solaire_gn, 26
solaire_gs, 26
sorties ASCII, 22
SOURCE, 1
sp, 24
sr, 24
SUN_STAR_DATA, 1, 9
SuSE, 57

t_stop, 25
tau_max, 32, 33
TESTS, 1

unit, 29
UNIX, 1, 2, 33

vent.f, 40

w_form, 45
w_rot, 29
WINDOWS, 1

x0, 25
x_stop, 25

y0, 25

zams, 25
zoom, 45
zsx0, 25

Chapitre 1

Installation

*On n'exécute pas tout ce qui se propose
Et le chemin est long du projet à la chose.*

Le Tartuffe.

1.1 CESAM2*k*

Le principe de l'exploitation de CESAM2*k* est différent de celui utilisé dans les versions précédentes de CESAM. L'exécutable, `cesam2k.out`, est créé une fois pour toutes. C'est dans le fichier de données, `mon_modele.don`, que la physique à utiliser est indiquée conjointement aux principaux paramètres définissant le modèle à calculer. Il n'y a donc plus à créer d'exécutable adapté à chaque utilisation, comme c'était le cas avec les versions précédentes de CESAM. Il est toutefois possible de modifier la plupart des options retenues dans la source, grâce à des fichiers de "réglage" décrits au § 3 (Page 37), qui permettent d'adapter CESAM aux moyens de calcul dont on dispose et, dans une large mesure, aux particularités des modèles à calculer.

CESAM2*k* est programmé en **FORTRAN95**, ce qui permet un dimensionnement dynamique des tableaux adapté à chaque cas particulier. Les compilateurs suivants ont été utilisés avec succès :

- sous LINUX : `ifc` de INTEL, Lahey-Fujitsu `lf95`,
- sous UNIX : compilateur UNIX des machines ALPHA
- sous WINDOWS : Compact Visual Fortran

La signification du numéro de version `CESAM2k_Vi.j.k` est la suivante :

- i** augmente d'une unité à chaque modification du contenu des fichiers binaires de reprise `*.pms`, `*.rep`, `*.dat`, *etc...* les indices suivants **j** et **k** étant remis à 0.
- j** augmente d'une unité à chaque modification du contenu d'un des fichier ASCII de données `*.don` ou de personnalisation, l'indice suivant **k** est remis à 0.
- k** augmente d'une unité à chaque modification notable.

Dans le sous-directory **SOURCE**, le fichier "**journal**" contient une description succincte de la chronologie des aménagements effectués.

1.1.1 PGPLOT

CESAM2*k* utilise le logiciel de dessin PGPLOT dont le fichier de configuration n'est pas prévu pour le compilateur `ifc`. Thierry Corbard, Observatoire de la Côte d'Azur, a construit les procédures nécessaires que l'on trouvera dans le sous-directory `SCRIPTS`. Il est possible d'éviter l'emploi de ce logiciel, *cf.* § A.2.3 (Page 57)

1.2 Contenu de la distribution

Le package `CESAM2k`¹ contient les sous-directory :

- `EXPLOIT` : ensemble de programmes et d'exemples de fichiers pour l'exploitation.
- `NOTICE` : sources `LATEX` et fichiers postscript de la notice d'utilisation et de l'aide-mémoire.
- `SCRIPTS` : ensemble de procédures `UNIX/LINUX` pour l'installation et l'exploitation avec les shells `csh` et `bash`, et un `makefile`.
- `SOURCE` : ensemble des routines, modules et programmes de la source.
- `SUN_STAR_DATA` : ensemble de données physiques, tables d'EOS par exemple.
- `TESTS` : programmes de test².

1.3 Installation

On décrit l'installation sous `UNIX/LINUX` en utilisant le `C-shell`.

PB Avec un compilateur dont la version n'est pas à jour de la norme F95, (comme certaines versions du compilateur d'INTEL³) il y aura refus d'effectuer une allocation dans une routine autre que celle où est déclarée l'allocation. Il y a lieu de remplacer dans les routines concernées, les instructions `ALLOCATABLE` par `POINTER` pour les tableaux incriminés *cf.* § A.1 (Page 55).

- Détarer la distribution :

```
tar -xzf CESAM2k.tar.gz
```

Le sous-directory `CESAM2k` est créé⁴. Il contient 6 sous-directory tarés et compressés :

```
EXPLOIT.tar.gz
NOTICE.tar.gz
SCRIPTS.tar.gz
SOURCE.tar.gz
SUN_STAR_DATA.tar.gz
TESTS.tar.gz
```

Il convient de les détarder au fur et à mesure des besoins. Cette disposition permet de placer ces sous-directory aux endroits les mieux adaptés et ainsi

¹2k pour "2000".

²Certains de ces programmes sont à adapter à la présente version de `CESAM2k`.

³Contrairement aux idées reçues, ce compilateur n'est pas gratuit, *cf.* le contrat de licence.

⁴Dans cette notice les numéros de version et les indications de date sont volontairement ignorés.

de faciliter les mises à jour qui, la plupart du temps, n'affectent que le seul sous-directory `SOURCE`.

- Dans le sous-directory `SCRIPT`, adapter au compilateur F95 utilisé, les paramètres des procédures de compilation `compile2k` et d'exécution `exe2k`; y indiquer aussi les chemins de la source et des bibliothèques de données physiques qui seront utilisées. Rendre les procédures exécutables : `chmod 700 *`.

- Pour une utilisation avec le shell `csh` ou `tcsh`, dans le fichier `.cshrc` ajouter les chemins de la bibliothèque et des exécutables, par exemple :

```
set mypath=(.... ~/CESAM2k/SOURCE ~/CESAM2k/EXPLOIT ....)
set path=(. ~ ~/SCRIPTS $path $mypath) .....
```

Avec le shell `bash`, dans le fichier `.bashrc`, ces instructions deviennent :

```
export
```

```
PATH="$PATH :~/CESAM2k/SCRIPTS :~/CESAM2k/EXPLOIT :~/CESAM2k/SOURCE"
```

- Si ce n'est déjà fait, installer le logiciel de dessin `PGPLOT`⁵, et indiquer le chemin de sa bibliothèque dans le fichier `.cshrc` :

```
LD_LIBRARY_PATH **** :/usr/lib/pgplot
```

et définir la variable d'environnement⁶ :

```
setenv PGPLOT_DIR /usr/lib/pgplot.
```

On donne au § A.2.1 (Page 56) un supplément d'informations concernant l'installation de ce logiciel.

A défaut, de ce logiciel de dessin, dans le sous-directory `SOURCE` :

- Supprimer `boite`, `box`, `des_r`, `des_m` de la liste des `INCLUDE` du module `mod_numerique`.
- Dans la subroutine `des`, ne conserver que `CASE ('no_des')` et, éventuellement, `CASE DEFAULT`.
- Dans la subroutine `sortie`, supprimer `CALL pgend`.

PB La liste de ces corrections est peut être incomplète.

1.4 Adaptation de la source

Avant de créer le module exécutable, il convient d'adapter certains paramètres libres de la source à l'installation dont on dispose.

- Dans la routine `des_m`, ligne 105, adapter le nom du "device" : `device='/xw'`, éventuellement coder `device='?'` de façon à obtenir la liste des devices disponibles.
- Faire de même dans la routine `des_r`, ligne 89.

Dans les routines `des_m` et `des_r` il conviendra, par la suite, d'adapter la hauteur et la largeur des cadres, de façon à optimiser leur centrage dans la fenêtre dont on dispose, ou encore de personnaliser le dessin *cf.* § 3.10 (Page 47).

⁵Avec son mode d'emploi, le logiciel `PGPLOT` est téléchargeable via `anonymous ftp` à l'adresse <http://astro.caltech.edu/~tpj/pgplot/>.

⁶Une de ces instructions est peut être redondante. L'avis d'experts est accepté.

1.5 Création du module exécutable

Se placer dans le sous-directory **SOURCE**, y lancer la procédure⁷ `genere_cesam2k`. Après la compilation, on obtient la liste des "object module" de la bibliothèque `libcesam2k.a` et le menu d'entrée de CESAM :

```
mod_kind.o
mod_numerique.o
mod_donnees.o
mod_variables.o
mod_etat.o
mod_opa.o
mod_conv.o
mod_atm.o
mod_nuc.o
mod_bp_for_alecian.o
mod_evol.o
mod_static.o
mod_cesam.o
mod_exploit.o
Encountered 0 errors, 0 warnings in file cesam2k.f.
```

CESAM speaks a bit of english if you include in the working directory a file named `langue` with the statements :

```
&NL_LANGUE
langue='english'
/
cf. aide_mem2k, chapter Personnalisation
```

```
Pour arrêter : taper 0 puis RETURN
Pour poursuivre une évolution : taper 1 puis RETURN
Pour initialiser un modèle de ZAMS : taper 2 puis RETURN
Pour initialiser un modèle de PMS : taper 3 puis RETURN
ARRET
```

Suivant l'installation et les paramètres de compilation retenus, la création de la bibliothèque et du module exécutable nécessitent de l'ordre de 3 à 10 minutes. De façon similaire, on peut créer un exécutable de debug avec la procédure `genere_cesam2k-dbg` du sous-directory **SCRIPTS**.

1.5.1 Utilisation d'un MAKEFILE

Il est évidemment possible d'exploiter CESAM2k via un **MAKEFILE**. Th. Corbard a construit celui placé dans le sous directory **SCRIPT** et donné en exemple au § A.3 (Page 57). Pour l'utiliser placer le fichier `makefile` dans le sous-directory **SOURCE**. Adapter les arguments au compilateur utilisé et les divers chemins. Enfin, saisir la commande `make`, le module exécutable `cesam2k.out` se construit automatiquement.

⁷Dans la suite le symbole `<==` indique une instruction à saisir.

1.5.2 Fonctions des modules

Les modules de CESAM2*k* ont les fonctionnalités suivantes :

- Module `mod_kind` : regroupe les types des variables.
- Module `mod_numerique` : regroupe les routines purement numériques et les routines d'exploitation.
- Module `mod_donnees` : regroupe la plupart des quantités fixes au cours de l'évolution.
- Module `mod_variables` : regroupe la plupart des quantités variables au cours de l'évolution.
- Module `mod_etat` : regroupe les routines concernant l'équation d'état.
- Module `mod_opa` : regroupe les routines concernant le calcul de l'opacité.
- Module `mod_conv` : regroupe les routines concernant la convection.
- Module `mod_atm` : regroupe les routines de restitution de l'atmosphère.
- Module `mod_nuc` : regroupe les routines concernant les réactions thermo-nucléaires.
- Module `mod_bp_for_alecian` : regroupe les routines concernant le calcul des accélérations radiatives, suivant le formalisme de G.Alécian.
- Module `mod_evol` : regroupe les routines concernant l'évolution temporelle de la composition chimique.
- Module `mod_static` : regroupe les routines concernées par la résolution de l'équilibre quasi-statique.
- Module `mod_cesam` : regroupe les routines concernant la gestion du calcul.
- Module `mod_exploit` : regroupe des routines concernées par l'exploitation des résultats.

On trouvera §1.1 (Page 16) un organigramme général du code. Chaque routine PRIVATE et/ou PUBLIC est introduite sous la forme d'INCLUDE dans son module d'appartenance, le nom de ce dernier indiqué dans des commentaires au début de chaque routine.

1.6 Test de fonctionnement

Toutes les donnée physiques utilisées dans ce test de fonctionnement sont implantées dans la SOURCE.

Copier les fichiers `mon_modele.don` et `m010.zams` du sous-directory EXPLOIT dans le sous-directory TESTS dans lequel on se placera. Editer le fichier `mon_modele.don`.

- Remplacer "`des_m`" par "`no_des`" si PGLOT n'est pas opérationnel.
- Adapter "`nom_chemin`" au chemin du sous-directory SUN_STAR_DATA de votre installation.
- Rétablir les instructions suivantes :

```
&NL_CESAM
NOM_CHEMIN='~/SUN_STAR_DATA/',    <==== à adapter
NOM_CTES='ctes_94',
NOM_DES='des_m',    <==== à adapter
NOM_OUTPUT='no_output',
```

```

N_MAX=2000,
PRECISION='np'
/
&NL_MASS
MTOT=1.d0,
NOM_PERTM='pertm_ext',
MDOT=0.d0
/
&NL_EVOL
AGEMAX=1.d2,
ARRET='else',
DTLIST=1.d10,
LOG_TEFF=10.d0,
NB_MAX_MODELES=200,
HE_CORE=-1.d0,
T_STOP=5.d7,
X_STOP=-0.1d0
/
&NL_CHIM
GRILLE_FIXE=.FALSE.,
NOM_ABON='solaire_gn',
MODIF_CHIM=.FALSE.,
GARDE_XISH=.FALSE.,
X0=0.70d0,
Y0=0.28d0,
ZSX0=0.d0
/
&NL_CONV
NOM_CONV='conv_jmj',
ALPHA=1.8d0,
OVSHTS=0.d0,
OVSHTI=0.d0,
JPZ=.FALSE.,
CPTURB=0.d0,
LEDOUX=.FALSE.
/
&NL_DIFF
DIFFUSION=.FALSE.,
NOM_DIFFM='diffm_mp',
NOM_DIFFT='diftt_nu',
D_TURB=10.d0,
RE_NU=1.d0,
NOM_FRAD='no_frad'
/
&NL_ROT
W_ROT=0.d0,
UNIT='jours',

```

```

NOM_DIFFW='diffw_0',
NOM_THW='rot_0',
NOM_PERTW='pertw_0',
P_PERTW=0.d0,
LIM_JPZ=.TRUE.,
NOM_DES_ROT='no_des'
/
&NL_ETAT
NOM_ETAT='etat_eff',
F_EOS='eos_opal_250.bin',7*' '
/
&NL_OPA
NOM_OPA='opa_gong',
F_OPA='opa_yveline.bin',7*' '
/
&NL_NUC
NOM_NUC='ppcno9',
NOM_NUC_CPL='NACRE',
MITLER=F
/
&NL_ATM
NOM_ATM='lim_atm',
NOM_TDETAU='hopf',
TAU_MAX=10.d0,
LIM_RO=.TRUE.
/

```

Lancer cesam2k.out

cesam2k.out <==

 CESAM speaks a bit of english if you include in
 the working directory a file named langue with the statements :

```

&NL_LANGUE
langue='english'
/
cf. aide_mem2k, chapter Personnalisation
-----

```

Pour arrêter : taper 0 puis RETURN
 Pour poursuivre une évolution : taper 1 puis RETURN
 Pour initialiser un modèle de ZAMS : taper 2 puis RETURN
 Pour initialiser un modèle de PMS : taper 3 puis RETURN
 2 <==
 le modèle initial de ZAMS est-il donné en binaire ? o/n
 n <==
 entrer le nom du fichier ASCII du modèle initial

Exemples: m010.zams, m020.zams, m050.zams

m010.zams <==

CESAM utilise le modèle m010.zams

entrer l'identificateur du modèle

Exemple: mon_modele, modele_euler

mon_modele <==

identificateur des fichiers du modèle : mon_modele

MODELE DE STRUCTURE INTERNE calculé par CESAM2k version V1.1.14

```
.....
.....
.....
```

----- Restitution de l'atmosphère (fin) -----

âge= 1.000E+02, LogTeff= 3.778E+00, LogL/Lsol=-5.073E-02, LogR/Rsol=-5.764E-02
 Log g= 4.553E+00, Pc= 1.723E+17, Tc= 1.376E+07, Roc= 9.415E+01, Xc= 6.915E-01
 en. PP= 97%, en. CNO= 2%, en. 3 alpha= 0%, en. grav= 0%, Yc= 2.879E-01
 Var. rel. de masse : 0.000E+00, M*= 1.000E+00Msol, modèle de la série principale

Fin d'évolution avec CESAM2k version : V1.1.14

Sortie car agemax atteint

```
.....
.....
.....
```

nom du fichier du modèle d'atmosphère en binaire : mon_modele_B.atm

Le code d'évolution stellaire CESAM a été élaboré

dans le cadre du Groupement de Recherche Structure Interne

des Etoiles et des Planètes Géantes. Si son utilisation

vous a donné satisfaction, le but poursuivi par tous

ceux qui y ont contribué aura été atteint.

P.Morel, ON. Décembre 1989, CESAM1

P.Morel, OCA. Octobre 1991, CESAM2

P.Morel, OCA. Avril 1993, CESAM3

P.Morel, OCA. Décembre 1997, CESAM4

P.Morel, OCA. Décembre 2002, CESAM5

P.Morel, B.Pichon OCA. Septembre 2003, CESAM2k

P.Morel, OCA, Y.Lebreton, MJo Goupil OBSPM, Février 2004, Version anglaise

P.Morel, OCA, A.Moya, OBSPM, Mars 2005, diffusion du moment cinétique

Type <RETURN> for next page:

Le test de fonctionnement est terminé.

Lorsque le dessin "on line" est effectué, suivant la définition de l'écran utilisé, il arrive que les cadres soient tronqués et/ou n'utilisent pas la surface disponible de façon satisfaisante. Il y a lieu d'adapter les dimensions des cadres dans les routines `des_m` et `des_r` du sous directory `SOURCE`, cf. § 1.4 (Page 3). On recherchera les valeurs optimales en utilisant le fichier "device" qui permet de personnaliser le dessin, cf. § 3.10 (Page 47).

1.7 Mise en forme des données physiques

CESAM2k utilise les données physiques tabulées *i.e.* EOS, opacités *etc...* sous forme de fichiers binaires qu'il faut créer à partir des données ASCII du sous-directory `SUN_STAR_DATA` dans lequel on se placera.// Il est bien évident qu'il n'y a lieu de créer ces fichiers binaires que si les calculs à effectuer les utilise.

Les fichiers binaires de données créés pour une version précédente de CESAM ou de CESAM2k ne sont pas utilisables.

PB Il est incontournable, de devoir effectuer des calculs avec des tables d'opacité ou d'équation d'état, dont les abondances en éléments lourds Z ne correspondent aux valeurs utilisées dans le modèle.

1.7.1 Opacités "Yveline"

Décompresser les fichiers `opa_yveline.data.gz` et `ascii2bin_opa.f.gz` :

```
gunzip opa_yveline.data.gz ascii2bin_opa.f.gz
```

Effectuer la transformation ASCII ==> binaire, en exécutant⁸ le programme `ascii2bin_opa` :

```
exe2k ascii2bin_opa
```

A la question :

```
traduction ASCII ---> binaire (o/n?)
o <==
```

on obtient :

⁸Avec F95 il est pratique d'utiliser les procédures du sous-directory `SCRIPTS`.

ASCII ---> binaire

enter the name of the existing ASCII opacity table: opa_yveline.data

répondre :

opa_yveline.data <==

on obtient :

enter the name of the binary table: opa_yveline.bin

répondre :

opa_yveline.bin <==

à la question suivante répondre c, éventuellement recompresser le fichier en ASCII et supprimer l'exécutable. On obtient :

PAUSE: OK c'est fait

pour arreter entrer q, poursuivre entrer c

c <==

Recompresser les données ASCII : `gzip opa_yveline.data <==` et effacer l'exécutable : `rm ascii2bin_opa.out <==`

On trouve un complément d'information dans le fichier `extract_opa_yveline_explik`.

1.7.2 Opacités pour $Z > 0.1$

Les opacités OPAL de type 1 n'existent que pour une abondance des métaux inférieure à $Z < 0.1$. Le package `z14xcotrin21` d'Arnold I. Boothroyd qui, gérant les opacités OPAL de type 2, permet de tenir compte de la nucléosynthèse des éléments lourds. Bien que son implantation dans `CESAM2k` ne recouvre pas toutes les situations envisagées, son *USAGE est DELICAT*. Lors de la première utilisation, le système peut demander de décompresser des routines du sous-directory `SUN_STAR_DATA`.

PB L'utilisation de cette routine n'est nécessaire que si la température locale est inférieure à 7Kev, au delà, le milieu est supposé totalement ionisé et l'opacité Rosseland se réduit à la diffusion Compton (Cox & Giuli, 1968, par. 16.6).

1.7.3 Opacités HOUDEK

Package de calcul de l'opacité OPAL, (Iglesias & Rogers, 1991), par les routines d'interpolation par splines birationnelles de Houdek & Rogl (1996); il est exploité par la routine externe `opa_houdek9`. Ce package, de nom `opint_v9f.tar.gz` peut être obtenu "via anonymous ftp from ftp.ast.cam.ac.uk in the sub-dir pub/hg/".

Il est constitué du fichier `opint_v9f.tar.gz` du sous-directory `SUN_STAR_DATA` qu'il faut décompresser et détarer :

```
gunzip opint_v9f.tar.gz <==
tar -xvf opint_v9f.tar <==
v9/
v9/.make.state
v9/.nse_depinfo
v9/.sbinit
v9/Makefile
v9/OPINTPATH_92
v9/OPINTPATH_95
v9/README
v9/Release_history
v9/a2b95.f
```

.....

```
v9/rksuite/Makefile
v9/rksuite/chkfl.f
v9/rksuite/.make.state
v9/alex94bext.f
v9/dopdalex94.f
v9/OPINTPATH_AX
v9/exakop95.f
```

Il est prudent de recompresser le fichier `opint_v9f.tar`. En suivant les instructions du README, éditer le makefile du directory `v9` et adapter le compilateur et l'optimiseur à la machine UNIX dont on dispose.

Exécuter le MAKEFILE : `make`.

Dans le fichier `v9/OPINTPATH_AX`, remplacer les `"/` par les chemins `./v9/opal95/opal95e.bin`, par exemple :

```
/home/bilou/SUN_STAR_DATA/v9/opal95/opal95e.bin
```

faire de même pour `v9/OPINTPATH_91` et `v9/OPINTPATH_95`.

PB Dans la routine d'appel `opa_houdek9`, le chemin d'accès aux données : `tabnam=TRIM(nom_chemin)//TRIM(f_opa(2))` fait appel au second fichier `f_opa(2)` d'opacité, ainsi qu'il est codé dans la NAMELIST `NL_OPA` du test du § 2.3 (Page 20).

Définir les paramètres `iorder` et `imode` en se référant à la notice constituée par le fichier `./doc/notes.ps` du directory `v9`. Dans le script `exe2k` indiquer au LINK le chemin d'accès à la bibliothèque `libopint.a`.

PB L'implantation de `opa_houdek9` est informatiquement délicate.

1.7.3.1 Implantation simplifiée de B.Pichon

B.Pichon de l'OCA a simplifié, et surtout sécurisé, l'installation du package original de Houdek. Se placer dans le sous-directory `HOUDEK`, exécuter successivement les procédures :

1. `build_libopint.`

2. `exebin_alex`.
3. `exebin_opal`.
4. `exebin_opal_alex`.

Amenager les fichiers `OPINPATH` ainsi qu'il est décrit ci-dessus.

1.7.4 Equation d'état OPAL

1.7.4.1 OPAL 1991

L'équation d'état OPAL (Iglesias & Rogers, 1991) est appelée par la routine `etat_opal`. La source et les tables d'équation d'état ont été reprises du site WEB `ftp://www-phys.llnl.gov/pub/opal/eos/`, où l'on trouve un "README" expliquant la marche à suivre pour construire une table ASCII d'équation d'état pour une valeur de Z fixée. On transforme ensuite cette table ASCII en fichier binaire.

PB Certains des sous-programmes du package original d'OPAL ont été modifiés pour l'exploitation avec `CESAM2k`; en particulier, le `blockdata` a été supprimé.

Les fichiers ASCII compressés `peos*.gz` contiennent les données pour l'équation d'état OPAL. Se placer dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, décompresser ces fichiers : `gunzip peos*`.

Exécuter le programme `ZFSinterppeos` après en avoir décompressé la source : `ZFSinterppeos.f.gz`

```
exe2k ZFSinterppeos <==
Encountered 0 errors, 0 warnings in file ZFSinterppeos.f.
type Z:
0.02 <==
```

entrer la valeur de Z , fraction de masse de l'abondance des métaux; on obtient :

	0.020		
0.0000	0.0000	3.0000000	4.0036974
0.0000	0.0200	3.0301077	4.0629535
0.0000	0.0400	3.0611377	4.1251554
0.2000	0.0000	2.5018048	2.5114787
0.2000	0.0200	2.5158978	2.5350964
0.2000	0.0400	2.5302570	2.5591605
0.4000	0.0000	2.2741616	1.8296305
0.4000	0.0200	2.2828465	1.8421309
0.4000	0.0400	2.2916493	1.8548033
0.6000	0.0000	2.1437435	1.4389958
0.6000	0.0200	2.1498623	1.4467140
0.6000	0.0400	2.1560483	1.4545176
0.8000	0.0000	2.0592246	1.1858406
0.8000	0.0200	2.0638888	1.1910768
0.8000	0.0400	2.0685947	1.1963595

Le fichier ASCII EOSdata occupant environ 9Mo a été créé.

Editer la source du programme opal_ascii_bin, et donner au fichier binaire le nom désiré, par exemple :

```
.....

        CLOSE(unit=60)    <===   ligne 117 de opal_ascii_bin.f

c    f_eos='eos_opal_190.bin'
      f_eos='eos_opal_195.bin'
c    f_eos='eos_opal_330.bin'
c    f_eos='eos_opal_180.bin'
c    f_eos='eos_opal_170.bin'
c    f_eos='eos_opal_130.bin'
c    f_eos='eos_opal_050.bin'

      WRITE(*,6)f_eos
6    FORMAT('debut ecriture sur le fichier binaire: ',a50)
      CLOSE(unit=60)

.....
```

Exécuter le programme opal_ascii_bin ainsi modifié :

```
exe2k opal_ascii_bin <==
Encountered 0 errors, 0 warnings in file opal_ASCII_bin.f.
donnees prises dans le fichier: EOSdata
lecture, et c'est long, de ce fichier
fin de lecture des tables OPAL
debut ecriture sur le fichier binaire: eos_opal_195.bin
fin ecriture sur le fichier binaire
donnees prises dans le fichier binaire: eos_opal_195.bin
lecture, des donnees EOS opal, et c'est long
fin de lecture des donnees EOS opal en binaire
test relecture effectue
```

Supprimer les modules exécutables :

```
rm *.out <==
rm: remove regular file 'ZFSinterppeos.out'? y <==
rm: remove regular file 'opal_ascii_bin.out'? y <==
```

Enfin, recompresser les fichiers ASCII, et supprimer les fichiers EOSdata et fort.2 désormais inutiles :

```
gzip peos* <==
rm EOSdata <==
rm: remove regular file 'EOSdata'? y <==
rm fort.2 <==
rm: remove regular file 'fort.2'? y <==
```

1.7.4.2 OPAL 2001

Les équations d'état 2001 offrent une alternative pour la métallicité : ou bien, comme dans la version 1991, on crée une table pour une métallicité donnée, et l'abondance d'hydrogène doit être dans l'intervalle $X \in [0, 0.8]$, ou bien $X \in [0, 1]$ mais $Z = 0$, cf. § 2.7 (Page 25).

- Avec $Z \neq 0$, se placer dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, et y créer le fichier d'équation d'état correspondant à la métallicité requise en exécutant le programme `Z_interp_IEOS` :

```
bilou@port-morel% exe2k Z_interp_IEOS
Encountered 0 errors, 0 warnings in file Z_interp_IEOS.f.
type Z:  0.025  <===== entrer la valeur de Z
          0.025000000
```

```
bilou@port-morel%
```

Il y a création d'un fichier ASCII compressé de nom `EOSdata.gz`. Transformer ce fichier en binaire, en lui donnant le nom avec lequel il sera identifié par la suite. Pour ce faire, entrer ce nom dans le programme `opalZ_ascii_bin` (vers la ligne 135) :

```
c f_eos='eos_opal_190.bin'
c f_eos='eos_opal_195.bin'
f_eos='eos_opal_250.bin'  <=====
c f_eos='eos_opal_330.bin'
c f_eos='eos_opal_180.bin'
puis exécuter ce programme qui comporte un test de lecture :
bilou@port-morel% exe2k opalZ_ascii_bin
Encountered 0 errors, 0 warnings in file opalZ_ascii_bin.f.
Fichier de données inconnu : EOSdata
décompression du fichier ASCII de données : EOSdata.gz
données ASCII prises dans le fichier: EOSdata
lecture, et c'est long, de ce fichier
  fin de lecture des tables OPAL
début des écritures sur le fichier binaire: eos_opal_250.bin
fin des écritures en binaire, test de relecture
  données prises dans le fichier binaire: eos_opal_250.bin
  décompression du fichier
  lecture, des données EOS opal, et c'est long
recompression du fichier binaire eos_opal_250.bin
  fin de lecture des données EOS opal en binaire
  test de relecture réussi
bilou@port-morel%
Eventuellement supprimer EOSdata.gz :
  rm EOSdata.gz
```

- Avec $Z = 0$, l'interpolation utilise le fichier `EOSdata_H-He` qu'il suffit de transformer en binaire en exécutant le programme `opalX_ascii_bin` du sous-directory `SUN_STAR_DATA`.

1.7.5 Equation d'état MHD

Package de l'équation d'état MHD (Mihalas et al., 1988) appelé par la routine `etat_mhd`. Ce package a été fourni par W. Däppen. Les 8 tables `mhd1_oc_tau.tab` ... `mhd8_oc_tau.tab` qui se trouvent sur le serveur anonyme `usc.edu`, dans le répertoire `pub/astro-physics/mhd-oc-tau/wd-evo`, sont disposées dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA` sous les noms `mhd1.tab.gz` ... `mhd8.tab.gz`. Se placer dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, décompresser ces tables en ASCII : `gzip mhd* <==` et la source du programme `fmttob` : `gzip fmttob.f.gz`. Transformer les tables en binaire en exécutant `fmttob <==`

```
exe2k fmttob
```

```
Encountered 0 errors, 0 warnings in file fmttob.f.
decompression
```

```
Press Enter to Continue. <==
```

```
enter main
```

```
ZAMS-type: filename of input (formatted) table # 1
```

```
enter filename of output (unformatted) table # 1
```

```
ZAMS-type: filename of input (formatted) table # 2
```

```
enter filename of output (unformatted) table # 2
```

```
ZAMS-type: filename of input (formatted) table # 3
```

```
enter filename of output (unformatted) table # 3
```

```
center-type: filename of input (formatted) table # 4
```

```
.....
```

```
4.002600      7.7222100E-02   0.2299999
```

```
12.01100      4.2665000E-04   3.8132454E-03
```

```
14.00670      1.0717000E-04   1.1169993E-03
```

```
15.99940      9.1215000E-04   1.0859599E-02
```

```
20.17900      2.8039000E-04   4.2102317E-03
```

```
mean molecular weight =      1.2455340
```

```
bilou@port-morel%
```

```
Supprimer les exécutables :
```

```
rm *.out <==
```

```
rm: remove regular file fmttob.out ? y <==
```

ORGANIGRAMME GÉNÉRAL

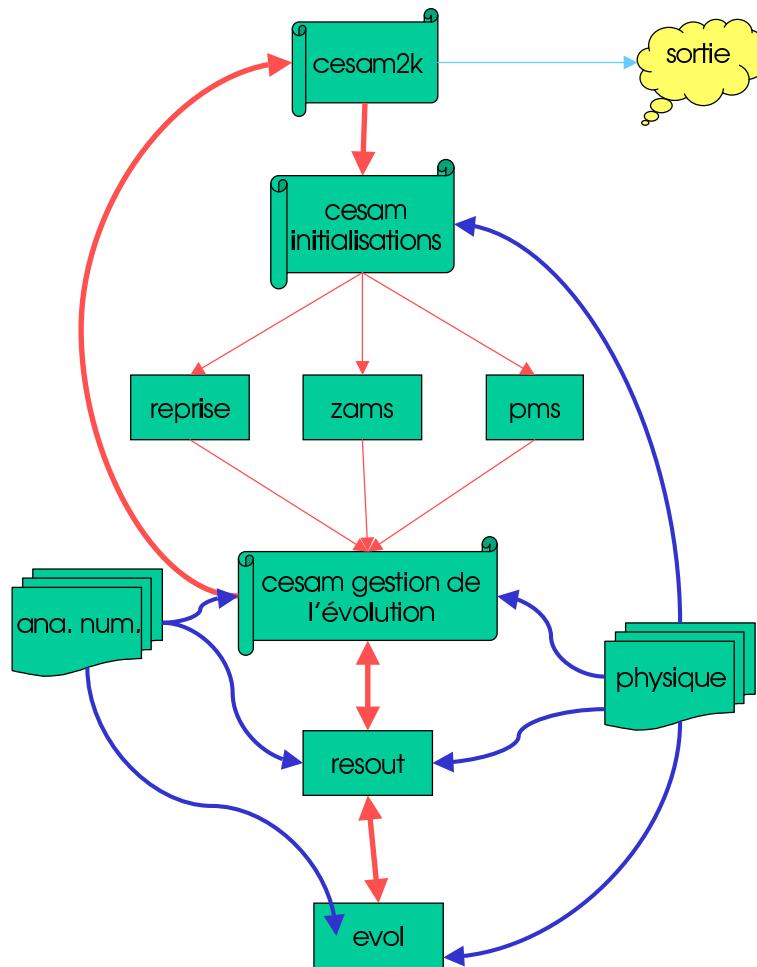


FIG. 1.1 – Schéma de l'organigramme général de CESAM2k. Le programme **cesam2k**, compilé une fois pour toutes, fait appel à la routine **cesam** qui constitue en fait, le programme principal. Dans **cesam**, après des initialisations, on sépare le traitement des 3 possibilités : poursuite d'une évolution, initialisation sur la ZAMS homogène, initialisation d'une PMS. Le calcul se poursuit par des opérations de gestion de l'évolution, listing, création de fichiers de sortie, dessin, etc... Est ensuite fait appel à **resout**, où les équations de l'équilibre quasi-statique sont résolues en alternance avec celles de l'évolution du moment cinétique et de la composition chimique. Ces dernières sont résolues séparément dans **evol**. Une fois la convergence obtenue, il y a retour vers les algorithmes de gestion de l'évolution de **cesam** et, de là, poursuite de l'évolution ou retour à **cesam** pour sortie. Les routines d'analyse numérique et de physique sont sollicitées à différents niveaux de calcul.

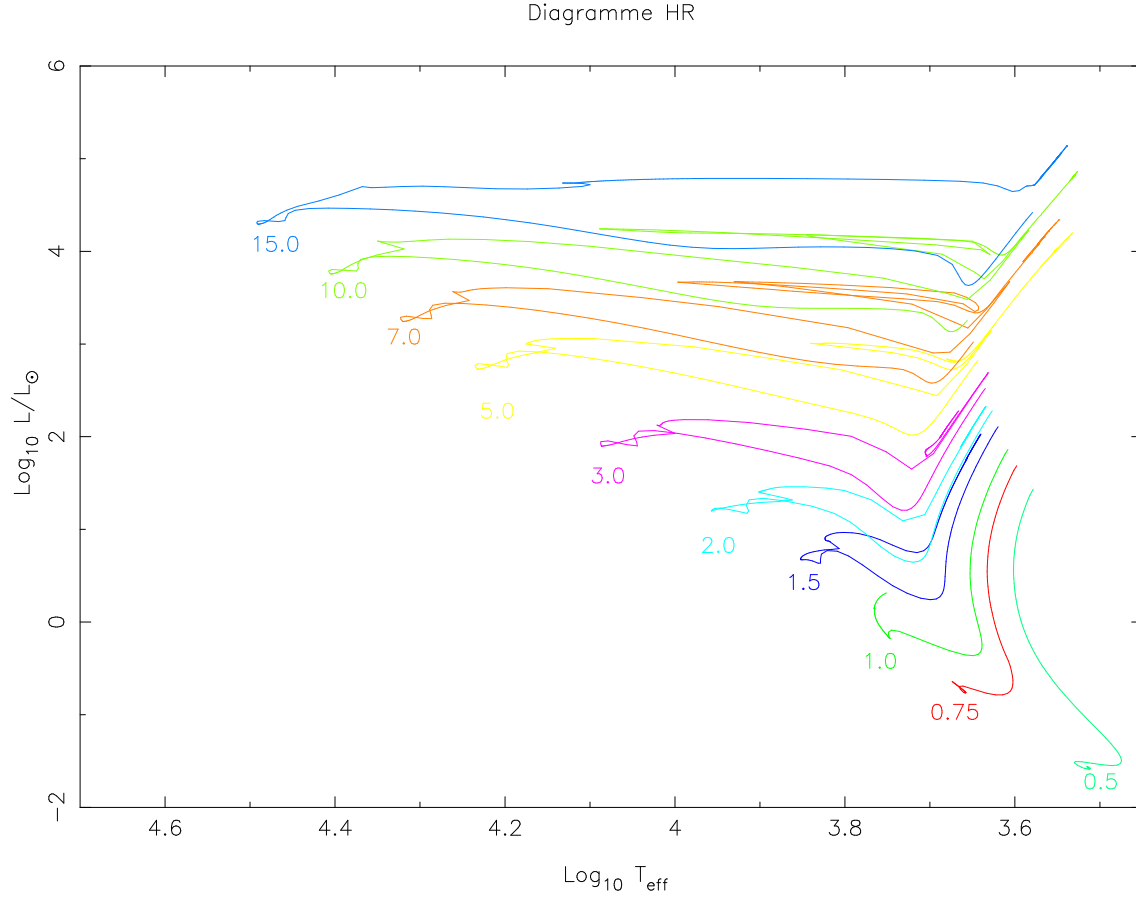


FIG. 1.2 – Tracés évolutifs incluant la pré-séquence principale pour des étoiles de $0.5M_{\odot}$ à $15M_{\odot}$. Le flash de l'hélium a été dépassé pour les masses supérieures à $3M_{\odot}$. Pour les modèles de $3M_{\odot}$ et de $5M_{\odot}$ les calculs ont été arrêtés après la disparition du carbone au centre. La phase de destruction de l'oxygène a été atteinte pour les modèles de $7M_{\odot}$ et de $10M_{\odot}$. Avec la disparition de l'oxygène dans le noyau, la limite de validité de l'hypothèse d'équilibre quasi-statique a été atteinte pour le modèle de $15M_{\odot}$. Ces tracés ont été obtenus avec le fichier de données du § 2.3 (Page 20).

Chapitre 2

Exploitation

Va despacio, estoy de prisa.
Proverbe Mexicain.

2.1 Conseils pour l’exploitation

Un code numérique, aussi bien fait soit-il, ne peut être ”clefs en mains”. Pour entamer une exploitation, on doit toujours être guidé par la remarque triviale :

*Un programme qui ne fonctionne pas, ou mal, pour des cas simples
ne fonctionnera pas, ou encore plus mal, pour des cas compliqués.*

Un code de structure interne n’échappe, hélas pas, à cette règle. A cet effet, bien que CESAM2*k* ait prévu différents types de “précision” standard, il est presque toujours nécessaire, à l’aide de “réglages”, d’optimiser les paramètres numériques en fonction des conditions rencontrées au cours du calcul. Aborder un problème en introduisant *ad initio* toute la complexité que l’on désire atteindre est une perte de temps. Afin d’acquérir une expérience sur la façon dont l’évolution se déroule, il faudra très rapidement reprendre des cas simples. Il est conseillé de “dégrossir” le problème en utilisant des options numériques et physiques robustes et efficaces, afin d’apprécier rapidement “ce qui se passe”, puis d’introduire progressivement la complexité souhaitée.

PB Les descriptions des routines données plus avant ne sont que succinctes, se reporter aux commentaires des routines pour plus d’informations.

2.2 Le fichier de données : `mon_modele.don`

Les options physiques à utiliser et les données sont transmises au programme principal par des NAMELIST regroupées dans un fichier en ASCII dont le nom a **nécessairement** l’extension `.don`, par exemple : `mon_modele.don`. On a disposé un exemple de ce fichier dans le sous-directory `EXPLOIT`.

- & NL_CESAM : regroupe les conditions générales du calcul.

- & NL_MASS : regroupe les paramètres physiques relatifs à la variable spatiale.
- & NL_EVOL : regroupe les paramètres physiques relatifs à la variable temporelle.
- & NL_CHIM : regroupe les paramètres physiques relatifs à la composition chimique.
- & NL_CONV : regroupe les paramètres physiques relatifs à la convection.
- & NL_DIFF : regroupe les paramètres physiques relatifs à la diffusion.
- & NL_ROT : regroupe les paramètres physiques relatifs à la rotation.
- & NL_ETAT : regroupe les noms des fichiers, *d'accès externe*, éventuellement nécessaires au calcul de l'équation d'état.
- & NL_OPA : regroupe les noms des fichiers, *d'accès externe*, éventuellement nécessaires au calcul de l'opacité.
- & NL_NUC : définit des options relatives au calcul des taux de réactions thermonucléaires.
- & NL_ATM : regroupe les paramètres physiques relatifs à la restitution de l'atmosphère.

2.3 Exemple de fichier de données

Cet exemple est volontairement différent de celui utilisé au § 1.6 (Page 5).

```
&NL_CESAM
NOM_CHEMIN='~/SUN_STAR_DATA/',
NOM_CTES='ctes_94',
NOM_DES='des_m',
NOM_OUTPUT='no_output',
N_MAX=6000,
PRECISION='av'
/
&NL_MASS
MTOT=2.d0,
NOM_PERTM='pertm_ext',
MDOT=0.d0
/
&NL_EVOL
AGEMAX=12.d3,
ARRET='else',
DTLIST=1.d10,
LOG_TEFF=10.d0,
NB_MAX_MODELES=700,
HE_CORE=-0.1d0,
T_STOP=2.0d9,
X_STOP=-0.1d0
/
&NL_CHIM
GRILLE_FIXE=.FALSE.,
NOM_ABON='solaire_gs',
MODIF_CHIM=.FALSE.,
```



```

GARDE_XISH=.FALSE.,
X0=0.70,
Y0=0.28,
ZSX0=0.0d0
/
&NL_CONV
NOM_CONV='conv_jmj',
ALPHA=1.8d0,
OVSHTS=0.d0,
OVSHTI=0.d0,
JPZ=F,
CPTURB=0.d0,
LEDOUX=F
/
&NL_DIFF
DIFFUSION=.TRUE.,
NOM_DIFFM='diffm_mp',
NOM_DIFFT='diff_t_nu',
D_TURB=10.d0,
RE_NU=1.d0,
NOM_FRAD='no_frad'
/
&NL_ROT
W_ROT=0.d0,
UNIT='kms/s',
NOM_DIFFW='diffw_mpz',
NOM_THW='cons_loc_mnt_cin',
NOM_PERTW='pertw_0',
LIM_JPZ=.TRUE.,
NOM_DES_ROT='end_mod'
/
&NL_ETAT
NOM_ETAT='etat_eff',
F_EOS='eos_opal_250.bin',7* ' '
/
&NL_OPA
NOM_OPA='opa_houdek9',
F_OPA='opa_yveline.bin','v9/OPINTPATH_AX',6* ' '
/
&NL_NUC
NOM_NUC='ppcno3aco',
NOM_NUC_CPL='NACRE',
MITLER=F
/
&NL_ATM
NOM_ATM='lim_atm',
NOM_TDETAU='hopf',

```

```
TAU_MAX=30.d0,
LIM_RO=.TRUE.
/
```

PB Les noms de routines sont *case sensitive*, par exemple, il faut coder "NACRE" et non "nacre".

2.4 Arguments de la NAMELIST NL_CESAM

- NOM_CHEMIN='~/SUN_STAR_DATA/' : chemin et nom du répertoire où sont disposées les données physiques, les tables d'opacité par exemple.
- NOM_CTES : indique le nom de la routine d'initialisation des principales constantes de physique à utiliser :
 - ctes_85 : constantes de physique proposées par GONG,
 - ctes_94 : constantes de physique plus récentes.
 - ctes_94m : identique à ctes_94 avec des valeurs des masses des noyaux posées égales aux valeurs entières les plus proches.
- NOM_DES : nom de la routine de dessin à utiliser :
 - des_m : dessin en fonction de la masse, utilise PGPLOT,
 - des_r : dessin en fonction du rayon, utilise PGPLOT,
 - no_des : sans dessin *on line*, à utiliser si on ne dispose pas du logiciel PGPLOT, voir § 1.3 (Page 2),
 - zoom : forme personnalisée du dessin décrite au § 3.9 (Page 45), pratique lorsqu'on désire atteindre des conditions particulières, par exemple une localisation dans le diagramme HR.
- NOM_OUTPUT : type de fichier ASCII à générer à l'issue du calcul :
 - osc_adia : génération du fichier ASCII de nom `mon_modele-ad.osc` pour le calcul des oscillations adiabatiques et la réalisation de certains dessins,
 - all_adia : génération des fichiers ASCII, pour le calcul des oscillations adiabatiques et des dessins, pour **TOUS** les modèles. Ces fichiers ont pour dénomination `nnnn-mon_modele-ad.osc`, `nnnn` est le numéro du modèle,
 - osc_invers : génération des fichier ASCII de nom `mon_modele-inv.osc` pour les inversions,
 - all_invers : génération de **TOUS** les fichiers ASCII de noms `nnnn-mon_modele-inv.osc` pour les inversions,
 - osc_nadia : génération du fichier ASCII de nom `mon_modele-nad.osc` pour le calcul des oscillations non adiabatiques,
 - all_nadia : génération de **TOUS** les fichiers ASCII de noms `nnnn-mon_modele-nad.osc` pour le calcul des oscillations non adiabatiques, `nnnn` étant le numéro du modèle,
 - no_output : il n'y a pas de génération de fichier ASCII,
 - ascii : forme personnalisée du fichier ASCII `mon_modele-ascii` décrite au § 3.7 (Page 42),
 - all_ascii : génération de **TOUS** les fichiers ASCII de forme personnalisée `nnnn-mon_modele-ascii`, `nnnn` étant le numéro du modèle.

- **N_MAX=1000** : le nombre maximum de couches¹ est défini par **MAX(N_MAX,nnnn)**, **nnnn** est un nombre maximal de couches fixé dans la routine **cesam** suivant le niveau de précision requis; parallèlement, un nombre minimal de couches est fixé à 300. A condition que la formation d'un fichier ASCII soit requise, une valeur négative de **N_MAX** permet de calculer le dernier modèle de l'évolution avec un nombre de couches égal à **|N_MAX|**.
- **PRECISION='av'** : niveau de précision requis. On trouve dans la Table 2.1 (Page 24), les valeurs des paramètres numériques utilisées suivant les différentes options définies dans la routine **cesam**. Les valeurs conseillées sont :
 - **'np'** (précision normale) utile pour se donner l'idée générale d'une évolution,
 - **'pr'** (précision réaliste) pour une évolution sans une recherche particulière de précision,
 - **'sp'** (super précision) et **'sa'** (précision solaire) si on recherche une précision extrême. Avec **'sa'**, à condition que la formation d'un fichier ASCII soit requise, les derniers modèles d'une évolution sont calculés avec le nombre maximum de couches **N_MAX**,
 - **'av'** (stades avancés) pour une évolution vers les stades avancés sans une recherche particulière de précision,
 - **'mx'** (maximum de couches) identique à **'sp'** le calcul se faisant avec un nombre *fixe* de couches, égal à **N_MAX**;

Les constantes de répartition sont fixées suivant le type de précision. Les valeurs les plus utilisées sont : **ctel=0**, **ctep=-1**, **ctem=15**, **cter=0**, **ctet=-1**. Pour utiliser des paramètres différents cf. § 3.8 (Page 43).

2.5 Arguments de la NAMELIST NL_MASS

- **MTOT=1.d0** : masse totale initiale, en M_{\odot} ,
- **NOM_PERTM** : nom de la routine de perte de masse :
 - **pertm_ext** : perte/gain de masse externe linéaire en fonction du temps.
 - **pertm_msol** : perte/gain de masse externe linéaire en fonction du temps, la masse de l'étoile restant au moins égale à $1 M_{\odot}$,
 - **pertm_tot** : perte/gain de masse externe, linéaire en fonction du temps et tenant compte de la perte de masse due aux réactions thermonucléaires ($E = mc^2$),
 - **pertm_waldron** : perte de masse empirique de Waldron (1985).
- **MDOT=1.d-14** : taux de perte/gain de masse, en M_{\odot}/an , ce taux est positif pour un gain de masse, négatif pour une perte de masse. Dans le cas standard, la composition chimique de l'apport/retrait de masse est celle de la couche la plus externe du modèle. Voir § 3.5 (Page 40) comment personnaliser, si besoin, cette composition chimique.

¹La nature des paramètres numériques et logiques est identifiable par les valeurs données à titre indicatif.

TAB. 2.1 – Valeurs des paramètres numériques suivant les diverses options de précision prévues. Les valeurs de ces paramètres peuvent être adaptées au type d'évolution, en utilisant l'option 'rg', cf. § 3.8 (Page 43); on utilise alors les paramètres indiqués dans le fichier de nom **reglages** placé dans l'environnement. Les dénominations s'interprètent de la façon suivante : **pr** : précision réaliste, **sp** : super précision, **lm** : pour petites masses (low mass), **av** : pour modèles pouvant atteindre les stades avancés, **np** : pour modèles de précision normale, **co** : pour modèles destinés à l'exploitation des résultats du satellite CoRoT, **sa** : pour modèles solaires. La signification des différents paramètres numériques est explicitée au § 3.8 (Page 43) et dans la routine **cesam** du sous-directory **SOURCE**, lignes 741-766. Les paramètres par défaut sont ceux de la précision réaliste **pr**. D'autres options de précision sont prévues; elles ne sont pas détaillées ici.

	pr	sp	lm	av	np	co	sa
m_qs	2				1		
m_ch	2						
m_rot	3				2		
m_tds	2						
m_ptm	2						
ordre	2				1		
precix	10 ⁻³	10 ⁻⁴			0.005	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
precit	0.15	0.05	0.2		0.3	0.05	0.02
ro_test	0.1						
psi0	0.08	0.06			0.1	0.06	0.06
d_grav	0.5			50	1.0		
loc_zc	10 ⁻³	10 ⁻⁴			0.005	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
dtmax	200	50	300		300	50	50
ini0	4	5	5		3	5	5
n_atm	75	100			50	100	100
kipp	.FALSE.		.TRUE.	.TRUE.	.TRUE.		
en_masse	.TRUE.						
ctel	0.						
ctep	-1.						
ctem	15.						
cter	0.						
ctet=	-1.						
mvt_dis	.TRUE.						
dn_fixe	0.05						
dpsi	0.05						
mu_saha	.TRUE.		.FALSE.	.FALSE.	.FALSE.		
n_max	1000					3000	
ajuste	.TRUE.			.FALSE.	.FALSE.		
lisse	.FALSE.			.TRUE.	.TRUE.		
q0	0.05					0.01	0.01
l0	0					5	5
new_bv	.TRUE.						.FALSE.
fmin_abon	0.05	0.01				0.01	0.01
dlntc	0.07	0.05			0.1	0.05	0.05

2.6 Arguments de la NAMELIST NL_EVOL

- AGEMAX=4.5d4 : âge maximal à atteindre en million d’années,
- ARRET='post' : arrêt sur la ZAMS ('zams'), à la fin de la ZAMS ('post'), au début de la combustion de l’hélium ('cohe') ou du carbone ('coca') ou de l’oxygène ('coox') ou autre ('else').
- DTLIST=1.d3 : intervalle de temps minimum, en million d’années, séparant deux listes détaillées du modèle (fichier `mon_modele.lis`),
- LOG_TEFF=-3.7d0 : arrêt si cette valeur de $\log_{10} T_{\text{eff}}$ est traversée, dans le sens croissant si `log_teff` est positif, dans le sens décroissant si `log_teff` est négatif,
- NB_MAX_MODELES=500 : arrêt après avoir calculé le nombre de modèles indiqué, éventuellement 0 ; avec `NB_MAX_MODELES < 0`, **tous** les fichiers binaires seront écrits dans l’environnement, leurs noms `mon_modelennnn.B.***` comportant le numéro du modèle et l’extension d’identification, `.hom`, `.rep`, *etc...* . Le numéro 0000 est affecté aux modèles d’initialisation de séquence principale d’âge zéro ou de pré-séquence principale ; en cas de reprise, les numéros reprennent à partir de celui du modèle repris.
- HE_CORE=0.1d0 : arrêt, dès que la masse du cœur d’hélium atteint la valeur `he_core` (M_{\odot}),
- T_STOP=1.d7 : arrêt, si au centre, la température dépasse cette valeur,
- X_STOP=0.1d0 : arrêt si cette valeur de X, au centre, est traversée.

2.6.1 Caractérisation des types de modèles

- 'zams' : Un modèle décrivant la pré-séquence principale est identifié à un modèle de ZAMS dès que le débit d’énergie d’origine nucléaire surpasse celui d’origine gravipique.
- 'post' : Un modèle décrivant la séquence principale est identifié à un modèle de post-main séquence dès que l’abondance centrale d’hydrogène devient inférieure à 0.01.
- 'cohe' : Un modèle décrivant la post-séquence principale est identifié à un modèle avec combustion d’hélium dès que la température centrale dépasse $1\ 10^8\text{K}$.
- 'coca' : Un modèle décrivant la séquence de combustion de l’hélium est identifié à un modèle avec combustion du carbone dès que la température centrale dépasse $6\ 10^8\text{K}$.
- 'coox' : Un modèle décrivant la séquence de combustion du carbone est identifié à un modèle avec combustion de l’oxygène dès que la température centrale dépasse $1\ 10^9\text{K}$.

2.7 Arguments de la NAMELIST NL_CHIM

- GRILLE_FIXE=.TRUE. : on utilisera une grille fixe pour la composition chimique et la diffusion du moment cinétique,

- `NOM_ABON` : nom de la mixture initiale² :
 - `enhan_al` : abondances α -enhanced de Allard,
 - `enhan_cha` : abondances α -enhanced de Chaboyer,
 - `enhan_w` : abondances α -enhanced de Weiss,
 - `meteorites_ag` : abondances météoritiques de Anders & Grevesse (1989),
 - `meteorites_gs` : abondances météoritiques de Grevesse & Sauval (1998),
 - `mixture` : forme personnalisée de la compilation d’abondances décrite au § 3.2 (Page 38),
 - `solaire_gn` : mixture solaire de Grevesse & Noels (1993),
 - `solaire_gs` : mixture solaire de Grevesse & Sauval (1998).

Ces abondances sont initialisées dans la routine `abon_ini`.

- `MODIF_CHIM=.FALSE.` : si, dans l’environnement, existent des fichiers des types `modif_mix`, `rap_iso`, `planet` ou `vent` qui permettent, respectivement, de modifier la composition chimique initiale, *cf.* § 3.4 (Page 40), les rapports isotopiques, *cf.* § 3.3 (Page 39), la composition chimique des planétoïdes, *cf.* § 3.6 (Page 41) ou celle du vent, *cf.* § 3.5 (Page 40), CESAM2*k* invitera à supprimer ces fichiers avant d’effectuer les calculs. Cette disposition **à but sécuritaire** a pour fin d’éviter de prendre en compte des fichiers qui, par mégarde, n’auraient pas été soustraits de l’environnement. Il convient de coder `MODIF_CHIM=.TRUE.` pour tenir compte des dispositions offertes par la présence de ces fichiers.
- `GARDE_XISH=.FALSE.` : ce paramètre fait l’objet du paragraphe suivant,
- `X0=0.7` : abondance initiale, par unité de masse, de H,
- `Y0=0.28` : abondance initiale, par unité de masse, de He,
- `ZSX0=0.d0` : valeur initiale de Z/X ,
 - Les abondances du modèle initial sont déterminées à partir des quantités `X0`, `Y0` et `ZSX0`; en raison de la relation $1 = X + Y + Z$, seulement 2 de ces 3 quantités sont à prendre en considération. La valeur initiale de Y utilisée dans le calcul est **toujours** `Y0`; elle est fractionnée en les divers isotopes retenus pour décrire l’évolution de l’hélium,
 - si `ZSX0 ≤ 0`, l’abondance initiale d’hydrogène est initialisée à `X0`, $Z = 1 - X - Y$ est déduit de `X0` et `Y0`,
 - sinon, *i.e.* `ZSX0 > 0`, l’abondance initiale d’hydrogène est déduite de `Y0` et de `ZSX0`, la valeur indiquée pour `X0` est ignorée.

La valeur initiale de X utilisée dans le calcul est fractionnée en les divers isotopes retenus pour décrire l’évolution de l’hydrogène.

Avec diffusion et/ou après un premier dredge-up, la composition chimique des couches extérieures, *i.e.* celle observée, diffère de la composition chimique initiale. Il y a lieu d’ajuster la valeur initiale de la composition chimique, afin d’obtenir celle observée à l’issue d’une évolution. Les observations portant sur les rapports métal/H, ou encore $[Fe/H]$, à l’initiative de F.Thévenin, CESAM2*k* offre divers outils pour réaliser cet ajustement :

- Conserver le rapport Z/X de la mixture initiale, au lieu de `ZSX0`, objet du § 2.7.1 (Page 27),
- utiliser une mixture originale, *cf.* § 3.2 (Page 38),
- modifier les rapports isotopiques, *cf.* § 3.3 (Page 39),

²*cf.* équation d’état OPAL : WEB site <http://www-phys.llnl.gov/VDiv/OPAL/opal.html>.

- modifier les rapports d’abondances de la mixture initiale, *cf.* § 3.4 (Page 40).

2.7.1 Alternative : conservation métal/H ou métal/Z

Pour une mixture initiale, éventuellement modifiée ou non, *cf.* § 3.4 (Page 40), l’alternative `GARDE_XISH=.TRUE.` (*respt.* `GARDE_XISH=.FALSE.`) permet de fixer la valeur initiale de Z (*respt.* X) de façon à conserver le rapport métal/H (*respt.* métal/Z). La valeur initiale de Y est **TOUJOURS** la valeur lue dans le fichier de données, *i.e.* Y0.

Ainsi, en codant³ `GARDE_XISH=.TRUE.`, la valeur de Z/X utilisée sera déduite des rapports d’abondances métal/H de la mixture et non pas celle, `ZSX0`, lue dans le fichier de données⁴. Les rapports d’abondances métal/H, seront ceux de la mixture, les rapports métal/Z seront différents de ceux de la mixture.

A l’inverse, en codant `GARDE_XISH=.FALSE.`, la valeur `ZSX0` lue dans le fichier de données, sera utilisée. Les rapports métal/Z seront ceux de la mixture⁵, les rapports métal/H seront différents de ceux de la mixture. Pour une **calibration solaire**, pour laquelle on vise à atteindre une valeur fixée de Z/X, en conservant les rapports métal/Z initiaux, il convient de coder `garde_xish=.FALSE.`

PB L’utilisation de `GARDE_XISH=.TRUE.` **EST DÉLICATE**, il est conseillé de bien vérifier, dans le fichier `mon_modele.lis`, que les valeurs des abondances utilisées correspondent bien à ce que l’on désire.

PB Il faut être conscient que les modifications de la mixture ne seront pas prises en compte, ni dans les opacités, ni dans l’équation d’état.

2.8 Arguments de la NAMELIST NL_CONV

- `NOM_CONV` : nom de la routine calculant le gradient de température dans les zones convectives.
- `conv_a0` : convection MLT, avec longueur de mélange $l \rightarrow 0$ aux limites ZR/ZC,
- `conv_cgm_reza` : convection suivant Canuto & Mazitelli (1991), avec $l = \alpha H_p$, tient compte de la prescription de Bernkopf,
- `conv_cm` : convection suivant Canuto & Mazitelli (1991), avec $l = \alpha H_p$,
- `conv_cm_reza` : convection suivant Canuto & Mazitelli (1991), avec $l = \alpha H_p$, tient compte de δ ,
- `conv_jmj` : convection MLT avec $l = \alpha H_p$ (Böhm-Vitense, 1958).
- `alpha=1.7d0` : longueur de mélange,

³De meilleures dénominations seraient, par exemple : `GARDE_XISH_MIX`, `GARDE_XISH_MIX_INI`, `GARDE_ZSX` ou encore `GARDE_ZSX_MIX_INI`, etc...

⁴Sauf dans le cas particulier où les valeurs de Y0 et `ZSX0` du fichier de données correspondent **exactement** à celles de la mixture.

⁵De façon cohérente avec les tables d’opacités.

- `ovshts=0.05d0` : coefficient d’overshoot supérieur, une valeur positive affecte le gradient adiabatique à la partie overshootée, une valeur négative affecte le gradient radiatif,
- `ovshti=0.1d0` : coefficient d’overshoot inférieur, une valeur positive affecte le gradient adiabatique à la partie overshootée, une valeur négative affecte le gradient radiatif,
- `jpz=.FALSE.` : utilisation des prescriptions de JpZ,
- `cpturb=0.d0` : coefficient de pression turbulente,
- `ledoux=.FALSE.` : utilisation du critère de Ledoux⁶. Le critère de Ledoux ne peut être utilisé avec semi-convection.

PB L’utilisation d’un paramètre de pression turbulente non nul est délicate.

2.9 Arguments de la NAMELIST NL_DIFF

- `DIFFUSION=.TRUE.` : on tiendra compte de la diffusion microscopique des éléments chimiques, éventuellement de la diffusion du moment cinétique,
- `NOM_DIFFM` : nom de la routine calculant les coefficients de diffusion microscopique :
 - `diffm_br` : calcul des coefficients de diffusion microscopique suivant le formalisme de Burgers en tenant compte, éventuellement, des accélérations radiatives,
 - `diffm_mp` : calcul des coefficients de diffusion microscopique suivant le formalisme simplifié de Michaud & Proffitt,
 - `diffm_0` : coefficients de diffusion microscopique nuls.
- `NOM_DIFFT` : nom de la routine calculant les coefficients de diffusion turbulente :
 - `diff_t_nu` : calcul des coefficients de diffusion turbulente incluant la diffusivité radiative.
 - `diff_t_gab` : calcul des coefficients de diffusion turbulente selon une prescription simple de M.Gabriel.
 - `diff_t_smc` : calcul des coefficients de diffusion turbulente incluant la semi-convection et la diffusivité radiative.
 - `diff_t_sun` : coefficients de diffusion turbulente, sous la zone convectivesolaire suivant M. Gabriel 1997, A&A 327, 771.
- `D_TURB=1.d1` : coefficient de diffusion turbulente isotrope,
- `RE_NU=1.d0` : coefficient de diffusivité radiative,
- `NOM_FRAD` : nom de la routine de calcul des accélérations radiatives,
 - `alecian1` : calcul des accélérations radiatives suivant le premier formalisme de G.Alécian,
 - `alecian2` : calcul des accélérations radiatives suivant le second formalisme de G.Alécian,
 - `no_frad` : les accélérations radiatives seront ignorées.

⁶A n’utiliser qu’avec précautions.

2.10 Arguments de la NAMELIST NL_ROT

- `W_ROT=50.d0` : vitesse angulaire initiale.
- `UNIT` : unité utilisée pour la vitesse angulaire initiale. différents choix sont proposés de façon à s'adapter facilement aux observations :
 - `jours` : période initiale en jours, correspond à la vitesse angulaire initiale de rotation de la couche externe,
 - `kms/s` : vitesse de la couche externe en kilomètres/seconde, le rayon du modèle d'initialisation étant utilisé pour déterminer la vitesse angulaire initiale, il convient d'ajuster ce rayon en reprenant plusieurs fois le calcul du modèle d'âge 0,
 - `rad/s` : la vitesse angulaire initiale est en radians/seconde.
- `NOM_DIFFW` : nom de la routine du calcul des coefficients de diffusion du moment cinétique :
 - `diffw_p03` : coefficients de diffusion du moment cinétique de Palacios et al.
 - `diffw_mpz` : coefficients de diffusion du moment cinétique de Mathis, Palacios & Zahn.
 - `diffw_0` : coefficients de diffusion du moment cinétique nuls.
 - `diffw_cte` : coefficients de diffusion du moment cinétique constants : ($D_{\text{eff}} = 300$, $D_h = 1\,000\,000$, $D_v = 250$).
- `NOM_THW` : Nom de la théorie utilisée pour l'évolution de la vitesse angulaire :
 - `rot_0` : Vitesse angulaire nulle, le modèle ne tient pas compte de la rotation.
 - `rot_cte` : Vitesse angulaire constante au cours de l'évolution, *i.e.* rotation rigide.
 - `cons_glob_mnt_cin` : Evolution avec rotation rigide, et conservation globale du moment cinétique. A l'issue de chaque pas temporel, la vitesse angulaire, constante dans tout le modèle, est réajustée de façon à conserver le moment cinétique total.
 - `diff_tz97` : Evolution avec diffusion du moment cinétique, suivant la théorie de Talon & Zahn (1997).
 - `diff_mz04` : Evolution avec diffusion du moment cinétique, suivant la théorie de Mathis & Zahn (2004),
 - `cons_loc_mnt_cin` : évolution avec conservation locale du moment cinétique avec rotation rigide des zones convectives.
- `NOM_PERTW` : Nom de la routine de calcul de perte de moment cinétique,
 - `pertw_sch` : variation de vitesse angulaire proportionnelle à Ω^3 (Schumannish),
 - `pertw_loc` : perte de moment cinétique proportionnelle à l'énergie cinétique de rotation locale,
 - `pertw_ptm` : perte de moment cinétique, conséquence d'une perte de masse,
 - `pertw_0` : pas de perte de moment cinétique.
- `P_PERTW=-1.d-9` : paramètre de perte de moment cinétique attaché respectivement à chacune des routines précédentes
- `LIM_JPZ=.TRUE.` : utilisation de la condition limite de Mathis & Zahn (2004) : on suppose que la variation temporelle de moment cinétique dans une zone convective est advectée dans la zone radiative adjacente. `LIM_JPZ=.FALSE.` : on impose la continuité du flux de moment cinétique aux limites zones radiatives

- / zones convectives.
- `NOM_DES_ROT='end_mod'` : Contrôle de la génération de fichiers ASCII des variables de la diffusion du moment cinétique, cf. § B.3 (Page 73). Si le dessin on-line n'est pas requis (`NOM_DES=no_des`), le fichier postscript des dessins des variables de la rotation est automatiquement créé.
- `no_des` : Pas de formation de fichier.
- `end_evol` : Formation du fichier à l'issue de l'évolution, le nom du fichier est `mon_modele_coeff_rota.dat`.
- `all_mod` : Formation du fichier à l'issue de chaque pas temporel, le nom du fichier est `nnnn-mon_modele_coeff_rota.dat`, `nnnn` étant le numéro du modèle. Tous les fichiers ainsi créés sont conservés.
- `end_mod` : Formation du fichier à l'issue de chaque pas temporel, le nom du fichier est `mon_modele_coeff_rota.dat`.
- `all_iter` : Formation du fichier à l'issue de chaque itération de la résolution du système d'équations de la diffusion du moment cinétique ; fichiers destinés aux mises au point.

2.11 Arguments de la NAMELIST NL_ETAT

- `NOM_ETAT` : nom de la routine d'équation d'état :
 - `etat_ceff` : équation d'état de Eggleton et al., avec corrections Coulombiennes (*appel à `etat_eff` en cas de difficulté*).
 - `etat_eff` : équation d'état de Eggleton et al. (*appel à `etat_gong2` en cas de difficulté*).
 - `etat_gong1` : équation d'état de `gong1`, seuls H et He sont pris en compte et supposés totalement ionisés.
 - `etat_gong2` : équation d'état de `gong2`, seuls H et He4 sont pris en compte.
 - `etat_mhd` : équation d'état de Mihalas, Hummer & Dappen (*appel à `etat_eff` en cas de difficulté*) utilise les tables en binaire `mhd1.bin ... mhd7.bin` construites dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, voir § 1.7.5 (Page 15).
 - `etat_opal` : équation d'état `opal` 1991, (*appel à `etat_eff` en cas de difficulté*) utilise les tables en binaire `eos_opal*.bin` construites dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, voir § 1.7.4 (Page 12).
 - `etat_opalZ` : équation d'état de `opal` 2001, (*appel à `etat_eff` en cas de difficulté*) utilise les tables en binaire `eos_opalZ*.bin` construites pour **Z** fixé dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, cf. § 1.7.4 (Page 12). Par rapport à la version 1991, les données de la version 2001 ont été étendues et améliorées, des bugs ont été corrigés. Les données ne permettent pas de dépasser $X = 0.8$. Les fichiers de données 2001 et 1991 sont incompatibles.
 - `etat_opalX` : équation d'état de `opal` 2001, se différenciant de `etat_opalZ` par l'extension du domaine de l'abondance d'hydrogène, $X \in [0, 1]$, dans le but de calculer des modèles sans zone convective externe étendue *avec diffusion*. Le prix à payer est $Z \equiv 0$, ce qui n'est pas très pénalisant, l'équation d'état étant peu sensible à Z . `etat_opalX` utilise la table en binaire `eos_opalX` construite pour **Z=0** fixé dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`,

cf. § 1.7.4 (Page 12).

- `F_EOS='eos_opal_250.bin',7*' '` : noms des fichiers d'équation d'état (au plus 8).

2.12 Arguments de la NAMELIST NL_OPA

- `NOM_OPA` : nom de la routine de calcul des opacités moyennes de Rosseland :
 - `opa_gong` : opacités simplifiées (Kramers amélioré).
 - `opa_houdek9` : opacités de Houdek version 9, (OPAL+Alexander), interpolation par rational B-spline; utilise les tables en binaire construites dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA/V9`, voir § 1.7.3 (Page 10)
 - `opa_int_zsx` : Opacités OPAL93+Kurucz raccord d'Yveline, interpolations linéaires, très utiles pour des tests.
 - `opa_opal2_co`, `opa_opal2_cno` : Opacités OPAL avec corrections pour $Z > 0.1$, *cf.* § 1.7.2 (Page 10)
 - `opa_opalC0` : Opacités OPAL avec corrections pour $Z > 0.1$ ne portant que sur C et O.
 - `opa_yveline` : opacités OPAL+Alexander interpolation et raccord d'Yveline; utilise les tables en binaire `opa_yveline*.bin` construites dans le sous directory `SUN_STAR_DATA`, voir § 1.7.1 (Page 9).
 - `opa_yveline_lisse` : opacités OPAL+Alexander raccord d'Yveline, interpolation linéaire ou lissage; utilise les tables en binaire `opa_yveline*.bin` construites dans le sous-directory `SUN_STAR_DATA`, voir § 1.7.1 (Page 9).
- `F_OPA='opa_yveline.bin', '/HOUDEK/OPINTPATH_AX95',6*' '` : noms des fichiers d'opacité (au plus 8).

A partir d'une température supérieure à $80 \cdot 10^6 \text{K}$ la matière est totalement ionisée, CESAM2*k* simplifie le calcul de l'opacité en utilisant le formalisme free-free de Kramers.

2.13 Arguments de la NAMELIST NL_NUC

- `NOM_NUC` : nom de la routine de calcul des taux des réactions thermonucléaires et d'initialiation de la composition chimique :
 - `pp1` : calcul simplifié du cycle PP (ne permet pas la diffusion microscopique).
 - `pp3` : réactions PP, 3 éléments H, He3, He4 avec H2, Li7, Be7 à l'équilibre; a pour vocation les tests de mise au point, permet la diffusion microscopique, intervalle de tabulation : [1MK,80MK]..
 - `ppcno9` : réactions PP+CNO, 9 éléments, H2, Li7, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation : [1MK,40MK].
 - `ppcno9Fe` : réactions PP+CNO, 9 éléments+Fe, H2, Li7, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation : [1MK,80MK].
 - `ppcno10` : réactions PP+CNO, 10 éléments, H2, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation : [0.5MK,80MK].
 - `ppcno10Fe` : réactions PP+CNO, 10 éléments+Fe, H2, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation : [0.5MK,80MK].

- **ppcno10K** : réactions PP+CNO, 10 éléments+K, H2, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation :[0.5MK,80MK].
 - **ppcno10BeBFe** : réactions PP+CNO, 10 éléments + Li6, Be9, B11, Fe avec H2 et Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation :[0.5MK,80MK].
 - **ppcno11** : réactions PP+CNO, 11 éléments, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation :[0.5MK,80MK].
 - **ppcno12** : réactions PP+CNO, 12 éléments, intervalle de tabulation : [1MK,80MK].
 - **ppcno12Be** : réactions PP+CNO, 12 éléments + Be9, intervalle de tabulation :[0.5MK,80MK].
 - **ppcno12Li** : réactions PP+CNO, 12 éléments + Li6, intervalle de tabulation :[0.5MK,80MK].
 - **ppcno12BeBFe** : réactions PP+CNO, 12 éléments + Li6, Be9, B11, Fe, intervalle de tabulation :[0.5MK,80MK].
 - **ppcno3a9** : réactions PP+CNO+3 α , 9 éléments, H2, Li7, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation :[1MK,80MK].
 - **ppcno3a12Ne** : réactions PP+CNO+3 α +carbone, 12 éléments dont Ne22, H2, Li7, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation :[1MK,800MK].
 - **ppcno3aco** : réactions PP+CNO+3 α +carbone+oxygène, 17 éléments H2, Li7, Be7 à l'équilibre, intervalle de tabulation :[1MK,3GK].
- L'étendue de l'intervalle de tabulation est fixée en fonction de la zone d'efficacité du réseau nucléaire retenu.
- **nom_nuc_cpl** : nom de la compilation des réactions thermonucléaires :
 - **Adelb** : Compilation Adelberger et al. (1998).
 - **Cau-Fow** : Compilation de Caughlan & Fowler (1988).
 - **NACRE** : Compilation de NACRE (Angulo et al., 1999).
 - **MITLER=.FALSE.** : effet d'écran selon Mitler (1997).

2.14 Arguments de la NAMELIST NL_ATM

- **NOM_ATM** : nom de la routine de restitution de l'atmosphère :
 - **lim_atm** : restitution de l'atmosphère à partir d'une loi $T(\tau)$,
 - **lim_gong1** : restitution simplifiée de l'atmosphère, cas de GONG1,
 - **lim_tau1** : restitution simplifiée de l'atmosphère, atmosphère mono-couche.
- **NOM_TDETAU** : nom de la loi $T(\tau)$ utilisée pour la restitution de l'atmosphère :
 - **edding** : loi $T(\tau)$ totalement radiative d'Eddington.
 - **hopf** : loi $T(\tau)$ totalement radiative de Hopf.
 - **K5750** : loi $T(\tau)$ non totalement radiative, dérivée du modèle d'atmosphère solaire de Kurucz, $T_{\text{eff}} = 5750$ K.
 - **K5777** : loi $T(\tau)$ non totalement radiative, dérivée du modèle d'atmosphère solaire de Kurucz, $T_{\text{eff}} = 5777$ K.
 - **roger00** : loi $T(\tau)$ non totalement radiative, dérivée de modèles d'atmosphère de Kurucz, de métallicité $[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}] = 0.0$.
 - **roger02** : loi $T(\tau)$ non totalement radiative, dérivée de modèles d'atmosphère de Kurucz, de métallicité $[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}] = +0.2$.

- `roger05` : loi $T(\tau)$ non totalement radiative, dérivée de modèles d’atmosphère de Kurucz, de métallicité $[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}] = -0.5$.
- `roger10a` : loi $T(\tau)$ non totalement radiative, dérivée de modèles d’atmosphère de Kurucz, de métallicité $[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}] = -1.0$ avec éléments α ”enhanced”.
- `TAU_MAX=10.d0` : profondeur optique du raccord avec l’enveloppe,
- `LIM_RO=.TRUE.` : condition limite externe en densité, sinon en pression.

2.15 Exploitation sous UNIX & LINUX

Sous UNIX/LINUX, il est conseillé de créer et de laisser le module exécutable `cesam2k.out` dans le sous-directory `SOURCE`. Pour l’exploitation, utiliser un sous-directory propre à chaque application dans lequel on disposera les fichiers de données (`mon_modele.don`), les fichiers d’initialisation tels que `m020.zams`, et, si besoin, les fichiers de réglage et de personnalisation.

Par exemple, pour calculer des modèles de ξ Hya ($3M_{\odot}$) de la ZAMS jusqu’à 400 My :

- Créer un sous-directory `KSI_HYA`
- Copier les fichiers `m020.zams`⁷ et `mon_modele.don` du sous-directory `EXPLOIT`.
- Renommer le fichier de données `ksi_hya.don`.
- Adapter la physique et les paramètres de ce fichier au problème de ξ Hya.

Lancer ensuite deux calculs successifs d’un modèle préliminaire de ZAMS (`AGEMAX = 0.d0`) adapté aux paramètres et à la physique adoptés :

1. le premier avec une précision réduite (`PRECISION='np'`) et en utilisant le modèle d’initialisation en ASCII,
2. et le second avec (`PRECISION='pr'`) en utilisant le modèle binaire `ksi_hya.B.hom` obtenu à l’étape précédente.

Conserver le fichier `ksi_hya.B.hom` obtenu à l’issue de cette dernière étape dans le fichier `ksi_hya_ini.B.hom`. C’est avec ce dernier que seront initialisés le calcul des modèles des exploitations.

Dans le fichier `ksi_hya.don` indiquer l’âge à atteindre : (`AGEMAX = 400.d0`) et lancer l’exécution : `cesam2k.out` en l’initialisant avec `ksi_hya_ini.B.hom`.

Pour faire par la suite des modèles en changeant un ou plusieurs paramètres (âge, overshoot, etc...), il suffit d’adapter le fichier `ksi_hya.don` à chaque cas particulier.

2.15.1 Limitation des sorties

Les informations qui apparaissent *on line* sur le moniteur permettent de suivre en détail le déroulement des calculs. Elles peuvent s’avérer non pertinentes pour une exploitation ”batch” et encombrer inutilement. A cet effet, la variable logique `baratine` du module `mod_donnees`, lorsqu’elle est `.FALSE.`, permet de dérouter sur les fichiers `mon_modele_static`, `mon_modele_atmos`, `mon_modele_evol` la plupart des les informations concernant le déroulement des calculs en ce qui concerne, respectivement, la résolution de l’équilibre quasi-statique, la restitution de l’atmosphère, l’évolution de la composition chimique et de la vitesse angulaire. Pour ce faire, il est

⁷Utiliser des fichiers d’initialisation ASCII ou binaire de $3M_{\odot}$ si on en dispose.

nécessaire ce coder `baratine=.FALSE.` dans le module `mod_donnees` et d'effectuer une recompilation partielle de ce module, cf. § 2.17 (Page 34). Quand la nature cette limitation de sorties n'est qu'occasionnelle, il n'est pas nécessaire d'intervenir dans le module `mod_donnees` et de refaire une compilation ; il suffit de disposer, dans l'environnement du calcul, le fichier `blabla` décrit au § 3.10.1 (Page 48).

2.16 Programmes d'exploitation

Des programmes du sous directory `EXPLOIT` permettent une exploitation des fichiers ASCII ou binaires créés par `CESAM2k` :

- `calib2k_pms` : Formation du fichier de données `mon_modele.don` pour calibration d'un modèle solaire avec PMS.
- `calib2k_zams` : Formation du fichier de données `mon_modele.don` pour calibration d'un modèle solaire initialisé sur la ZAMS.
- `des2k_ZC` : Dessin de l'évolution des zones convectives en fonction du temps.
- `des2k_abon` : Dessin des abondances en fonction de la masse ou du rayon.
- `des2k_abontc` : Dessin de l'évolution de X, Y, Z au centre, en fonction du temps.
- `des2k_abonts` : Dessin de l'évolution de X, Y, Z en surface, en fonction du temps.
- `des2k_bin` : Dessin des variables quasi-statiques à partir d'un fichier binaire.
- `des2k_diff_spl` : Dessin des différences entre deux modèles avec interpolation par B-splines.
- `des2k_grad` : Dessins des différents gradients d'un modèle.
- `des2k_hr` : Dessin du diagramme HR.
- `des2k_opa` : Dessin des différences relatives entre deux tables d'opacité.
- `des2k_osc` : Dessin de 1, 2 ou 3 modèles en fonction du rayon, de la masse avec des possibilités de zoom.
- `des2k_rot` : Dessins séparés des variables de la diffusion du moment cinétique.
- `des2k_rot_ext` : Dessin du profil, en fonction du temps, de la vitesse angulaire de la couche externe en km/s ou en rad/sec.
- `des2k_vaiss` : Dessin du profil de la fréquence de Brunt-Väissälä.
- `f037_2k` : Interpolation d'un modèle en des points de masse ou de rayon fixés.
- `fichier_vent` : Programme de construction d'un fichier de composition chimique du vent.

Dans chacun de ces programmes, des informations concernant leur utilisation sont données sous la forme de commentaires.

2.17 Scripts d'exploitation

Les scripts UNIX suivants (en shell `csh`) du sous-directory `SCRIPTS` facilitent l'installation et l'exploitation⁸ de `CESAM2k` :

- `calib2k_pms` : procédure de calibration d'un modèle solaire avec PMS.

⁸Les options de compilation sont celles du compilateur LINUX LF95, il convient de les adapter à celles du compilateur utilisé.

- `calib2k_zams` : procédure de calibration d'un modèle solaire initialisé sur la ZAMS homogène.
- `compile2k` : script de compilation avec optimisation.
- `compile2k-dbg` : script de compilation pour debug.
- `compile2k-dbg_list` : script de compilation pour debug pour un ensemble de routines d'une liste.
- `compile2k_list` : script de compilation avec optimisation pour un ensemble de routines d'une liste, avec création ou mise à jour d'une bibliothèque.
- `evol2k_pms` : procédure pour l'évolution à partir de la PMS homogène.
- `evol2k_zams` : procédure pour l'évolution à partir de la ZAMS homogène.
- `exe2k` : procédure d'exécution d'un programme avec optimisation
- `exe2k-dbg` : procédure d'exécution d'un programme avec debug.
- `genere_cesam2k-dbg` : script créant la bibliothèque et l'exécutable `cesam2k-dbg.out` de debug,
- `genere_cesam2k` : script créant la bibliothèque et l'exécutable `cesam2k.out` d'exploitation,
- `lib_del_repl` : script permettant de supprimer, puis de remplacer, une routine dans une bibliothèque.
- `repl2k_mod` : script permettant de compiler, remplacer dans la bibliothèque, un ou plusieurs modules et de créer le module exécutable `cesam2k.out`.
- `repl2k_mod-dbg` : script permettant de compiler, remplacer dans la bibliothèque, un ou plusieurs modules, et de créer le module de debug exécutable `cesam2k-dbg.out`.
- `makefile` : makefile permettant de générer l'exécutable `cesam2k.out`.

Chapitre 3

Personnalisation

Bien que l'exécutable soit construit un fois pour toutes, il est possible d'adapter de façon externe un certain nombre de paramètres. Ces adaptations s'effectuent, à la demande, par l'intermédiaire de fichiers *ad hoc* à disposer dans le sous-directory où s'effectue le calcul. Ne seront concernés que les modèles calculés dans cet environnement. De façon générale, dans le directory concerné, une personnalisation peut affecter, soit un modèle particulier, soit tous les modèles à calculer dans ce directory. CESAM2*k* recherche d'abord si une personnalisation existe pour le modèle à calculer puis, à défaut, si elle existe pour tous les modèles du directory. Des exemples de tels fichiers de personnalisation se trouvent dans le sous-directory **EXPLOIT** de la distribution. On peut ainsi :

- Avoir des commentaires d'interactivité en une langue différente du français¹.
- Utiliser une mixture initiale différente de celles implémentées.
- Modifier les rapports d'abondances d'une mixture.
- Redéfinir les rapports isotopiques.
- Créer un fichier de sortie en ASCII contenant des quantités en nombre et ordre différents de ce qui est implémenté.
- Utiliser des réglages personnalisés.
- Dessiner des boîtes correspondant à des objectifs à atteindre, et adapter les échelles du diagramme HR tracé "on line".
- Adapter les dimensions des cadres et le nom du device à utiliser.
- Utiliser les fichiers de données d'une version antérieure de CESAM.
- Détourner sur des fichiers en ASCII une partie des informations apparaissant 'on line' sur le moniteur.

Par sécurité, ainsi qu'il est explicité pour chaque cas particulier, certains des fichiers de personnalisation concernant la composition chimique ne seront pris en compte que si le paramètre `modif_chim` de la NAMELIST `nl_chim` du fichier de données est `.TRUE.` cf. § 2.7 (Page 25).

3.1 Langue

Une alternative pour avoir des commentaires d'interactivité en une langue différente du français :

¹Seulement en anglais dans la présente version.

1. Si on désire **toujours** avoir des commentaires en une langue différente du français, **avant** la compilation, dans la routine `cesam` du sous-directory `SOURCE`, commenter ou supprimer les instructions (vers les lignes 270-278) :

```

    INQUIRE(file='langue',exist=ok)
    IF(ok)THEN
        OPEN(unit=30,form='formatted',status='old',file='langue')
        READ(30,nl_langue) ; CLOSE(UNIT=30)
    ELSE
        WRITE(*,30)
30    FORMAT(/,'Sometimes CESAM can speak english','/,
1    'see aide_mem2k, chapter personnalisation ')
        langue='français'
    ENDIF

```

et décommenter l'instruction de la ligne suivante (279) :

```

c        langue='english'

```

Les commentaires en anglais seront désormais utilisés pour toute exploitation.

2. Si on désire n'avoir qu'occasionnellement les commentaires en anglais, introduire dans l'environnement d'exploitation un fichier de nom `langue` dans lequel on codera :

```

&NL_LANGUE
langue='english'
/

```

Dans toutes les exploitations effectuées dans cet environnement les commentaires apparaîtront en anglais.

Par défaut, *i.e.* en l'absence de l'une des dispositions précédentes, les commentaires seront en français.

PB Dans la version actuelle de `CESAM2k`, seulement une partie des principaux commentaires a été traduite en anglais.

PB `Call for man power` : il est facile de transposer dans une autre langue les algorithmes créés pour l'anglais ou encore compléter et/ou améliorer la syntaxe des ces derniers, les volontaires sont bienvenus.

3.2 Mixture

Pour utiliser une mixture initiale différente² de celles implémentées, coder `nom_abon='mixture'` dans le fichier de données et, dans l'environnement, placer un fichier de nom `mixture` contenant la mixture désirée en Dex. `CESAM2k` *refuse* toute mixture dont la normalisation est différente de `H=12`. L'exemple suivant se trouve dans le sous-directory `EXPLOIT` :

²Voir aussi § 4.2 (Page 50).

```
&NL_MIXTURE
ab(1)=12.00d0 , ab(2)=10.d0 , ab(3)=2.69d0 , ab(4)=2.15d0 , ab(5)=2.60d0
ab(6)=4.55d0 , ab(7)=3.97d0 , ab(8)=4.87d0 , ab(9)=1.56d0 , ab(10)=4.08d0
ab(11)=2.33d0 , ab(12)=3.58d0 , ab(13)=2.47d0 , ab(14)=3.55d0 , ab(15)=1.45d0
ab(16)=3.21d0 , ab(17)=1.5d0 , ab(18)=2.52d0 , ab(19)=1.12d0 , ab(20)=2.36d0
ab(21)=-1.17d0 , ab(22)=1.02d0 , ab(23)=0.d0 , ab(24)=1.67d0 , ab(25)=1.39d0
ab(26)=3.5d0 , ab(27)=0.92d0 , ab(28)=2.25d0
/
```

On trouve, dans la routine `abon_ini`, l'ordre et l'identification des éléments par leurs indices, en fait, celle des opacités OPAL. Dès lors, **tous** les modèles calculés dans ce directory, s'ils utilisent l'option `nom_abon='mixture'`, auront des abondances initiales conformes à celles du fichier `mixture`. Une autre possibilité permet de personnaliser davantage; elle consiste à donner au fichier `mixture` le nom générique du modèle avec l'extension `.mix`, Ex : `mon_modele.mix`. Dès lors, **seul** le modèle `mon_modele` aura la composition chimique initiale désirée. Avec l'option `mixture`, CESAM2k cherche **en priorité** à utiliser le fichier `mon_modele.mix`; en son absence, c'est le fichier `mixture` qui est utilisé; le calcul n'est effectué que si l'un de ces deux fichiers existe dans l'environnement.

Cette option nécessite de coder `MODIF_CHIM=.TRUE.`, cf. § 2.7 (Page 25).

PB Avec l'option `nom_abon='mixture'`, les abondances relatives des métaux devraient, en principe, correspondre à celles des opacités, au moins, faute de mieux, pouvoir être prises en charge par la routine d'opacité utilisée.

3.3 Rapports isotopiques

Pour utiliser des rapports isotopiques différents de ceux que CESAM prend par défaut, placer dans l'environnement du calcul, un fichier de nom `mon_modele.rap_iso` dans lequel seront précisés les rapports isotopiques à utiliser. Si **tous** les modèles de l'environnement doivent être calculés avec des rapports modifiés, donner au fichier précédent le nom de `rap_iso`. Exemple :

```
&NL_RAP_ISO
be7sbe9=1.d-25,
be7sz=1.d-29,
c13sc12=1.10d-2,
h2sh1=3.01d-5,
he3she4=1.1d-4,
he3she4z=4.185d-4,
li6sli7=7.5d-2,
mg25smg24=0.0125,
mg26smg25=0.013,
ne22sne20=6.79d-2,
n15sn14=0.366d-2,
o17so16=0.038d-2
o18so16=0.008d-2
/
```

Les noms utilisés pour les variables suggèrent les notations des rapports isotopiques `be7sbe9` : rapport isotopique ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$. `he3she4z` est le rapport isotopique ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$

sur la ZAMS lorsque le deutérium initial a été transformé en ^3He , `be7sz` est l’abondance, quasi nulle, du ^7Be initial dans Z.

Par sécurité, ce fichier ne sera pris en compte, que si le paramètre `modif_chim` de la NAMELIST `n1_chim` du fichier de données est `.TRUE.` cf. § 2.7 (Page 25).

3.4 Personnalisation des rapports d’abondances

La mixture une fois définie, par exemple `solaire_gn` (Grevesse & Noels, 1993), il est possible d’y modifier les abondances. Pour ce faire, créer dans l’environnement du calcul, un fichier de nom `mon_modele.modif_mix`, dans lequel seront indiquées les modifications en DeX à apporter. Si tous les modèles de l’environnement doivent être calculés avec ces modifications, donner au fichier précédent le nom de `modif_mix`. Exemple se trouvant dans le directory EXPLOIT :

```
&n1_modif_mix
add_Li=2.d0 ; add_Be=0.d0 ; add_B=0.d0
add_C=-1.0d0 ; add_N=0.d0 ; add_O=-0.3d0 ; add_F=0.d0 ; add_Ne=0.d0
add_Na=0.d0 ; add_Mg=0.d0 ; add_Al=0.d0 ; add_Si=0.d0 ; add_P=0.d0
add_S=0.d0 ; add_Cl=0.d0 ; add_Ar=0.d0 ; add_K=0.d0 ; add_Ca=0.d0
add_Sc=0.d0 ; add_Ti=0.d0 ; add_V=0.d0 ; add_Cr=0.d0 ; add_Mn=0.d0
add_Fe=0.d0 ; add_Co=0.d0 ; add_Ni=0.d0 ; add_Z=-1.d0
/
```

Les notations suggèrent les quantités à modifier ; ainsi `add_Li=2.d0` est le nombre de DeX à ajouter à l’abondance du lithium. `add_Z=-1.d0` signifie que les abondances **de tous les métaux** seront diminuées d’un DeX. **Par sécurité**, ce fichier ne sera pris en compte que si le paramètre `modif_chim` de la NAMELIST `n1_chim` du fichier de données est `.TRUE.` cf. § 2.3 (Page 20).

Si on a codé `GARDE_XISH=.FALSE.` dans le fichier de données cf. § 2.7.1 (Page 27), le paramètre `add_Z`, qui agit sur les métaux dans leur ensemble, n’a pas d’incidence dans la détermination des rapports métal/Z. A l’opposé, une valeur non nulle de `add_C`, par exemple, aura une incidence sur les rapports métal/Z.

3.5 Personnalisation de la composition chimique du vent.

Dans le cas standard, avec la donnée `mdot` non nulle, cf. § 2.3 (Page 20), la composition chimique de la masse perdue ou gagnée par le vent est celle de la couche la plus externe du modèle. Il est possible de personnaliser cette composition chimique, afin qu’elle diffère de celle de la couche externe. Pour ce faire, placer dans l’environnement du calcul, un fichier de nom `mon_modele.vent` dans lequel seront indiquées les fractions de masse de chaque élément chimique dans l’apport ou la perte de masse. Si tous les modèles de l’environnement doivent être calculés avec ces modifications, donner au fichier précédent le nom de `vent`. Un exemple se trouve dans le sous-directory EXPLOIT :

```
&n1_vent
vt_H=0.7347,vt_He=0.2483,vt_Li=1.033e-08,vt_Be=1.72816e-10,
vt_B=4.859e-09,vt_C=2.899e-03,vt_N=8.493e-04,vt_O=7.885e-03,
vt_F=4.182e-07,vt_Ne=1.768e-03,vt_Na=3.501e-05,vt_Mg=6.736e-04,
vt_Al=6.078e-05,vt_Si=7.434e-04,vt_P=8.198e-06,vt_S=3.704e-04,
```

```
vt_Cl=4.924e-06,vt_Ar=7.315e-05,vt_K=3.845e-06,vt_Ca=6.541e-05,
vt_Sc=4.126e-08,vt_Ti=3.041e-06,vt_V=3.888e-07,vt_Cr=1.856e-05,
vt_Mn=1.357e-05,vt_Fe=1.287e-03,vt_Co=3.492e-06,vt_Ni=7.6092e-05
/
```

Les notations sont suggestives, ainsi `vt_Li=1.033e-08` est la fraction masse du lithium dans le vent. Une renormalisation étant effectuée lors de l'utilisation, il n'est pas nécessaire de normaliser les fractions de masse figurant dans ce fichier, certaines peuvent être nulles et même négatives. Suivant le signe de `MDOT`, la quantité de matière, apportée ou soustraite, est supposée provenir de la zone convective externe qui existe toujours. Le fichier `vent` peut être construit³ par le programme `fichier_vent` du sous-directory `EXPLOIT`.

Par sécurité, ce fichier ne sera pris en compte, que si le paramètre `modif_chim` de la NAMELIST `nl_fdon` du fichier de données est `.TRUE.` cf. § 2.7 (Page 25).

3.6 Chute de planètes

Au cours d'une évolution `CESAM2k` permet de simuler une chute de planètes sur un intervalle de temps limité. Pour ce faire, placer dans l'environnement du calcul, un fichier de nom `mon_modele.planet` dans lequel seront indiquées les fractions de masse de chaque élément de la composition chimique des planètes, le nombre total de planètes qui sera reçu par l'étoile, l'intervalle de temps concerné par la chute et le profil de l'intensité de la chute. Si tous les modèles de l'environnement doivent être calculés avec ces modifications, donner au fichier précédent le nom de `vent`. Un exemple se trouve dans le sous-directory `EXPLOIT` :

```
&nl_planet
vt_H=0.7347,vt_He=0.2483,vt_Li=1.033e-08,vt_Be=1.72816e-10,
vt_B=4.859e-09,vt_C=2.899e-03,vt_N=8.493e-04,vt_O=7.885e-03,
vt_F=4.182e-07,vt_Ne=1.768e-03,vt_Na=3.501e-05,vt_Mg=6.736e-04,
vt_Al=6.078e-05,vt_Si=7.434e-04,vt_P=8.198e-06,vt_S=3.704e-04,
vt_Cl=4.924e-06,vt_Ar=7.315e-05,vt_K=3.845e-06,vt_Ca=6.541e-05,
vt_Sc=4.126e-08,vt_Ti=3.041e-06,vt_V=3.888e-07,vt_Cr=1.856e-05,
vt_Mn=1.357e-05,vt_Fe=1.287e-03,vt_Co=3.492e-06,vt_Ni=7.6092e-05,
ypl=0.d0,zpl=0.9d0,
n_planet=10,profil='rectangle',age_deb=5.d0,age_fin=10.d0,
r_giration=1.d0,t_giration=1.d0
/
```

Les notations sont suggestives. Avec `vt_H` et `vt_He` ***non nuls***, des valeurs non nulles de `ypl` et/ou `zpl` permettent de modifier les fractions de masse de l'hydrogène X , de l'hélium Y et des métaux Z des planètes. Avec le fichier `planet` précédent, l'abondance en masse de l'hélium sera $Y = 0$, celle des métaux $Z = 0.9$ et celle d'hydrogène $X = 1.0 - 0.0 - 0.9 = 0.1$. `age_deb` et `age_fin` sont respectivement les âges, en million d'années, du début et de la fin de la chute. `r_giration` est le rayon de giration en UA et `t_giration` le temps de giration, en années. `CESAM2k` estime la vitesse angulaire des planètes en admettant qu'ils décrivent un arc de $\pi/2$ pendant un temps de giration. Une valeur négative du temps de giration, correspond à un apport négatif de moment cinétique, i.e. rétrograde. Avec une valeur nulle du temps

³La composition chimique de l'exemple est celle de la mixture météoritique de Grevesse & Sauval (1998). Par ailleurs, il n'est pas nécessaire, ici, de respecter la 'case'.

de giration il n'y a pas d'apport de moment cinétique.

Dans la routine `planetoides.f`, `CESAM2k` propose 4 profils :

1. `rectangle` : L'intensité de la chute est constant.
2. `triangle` : Le profil de l'intensité de la chute est triangulaire, le maximum étant centré au milieu de l'intervalle de temps.
3. `parabole` : Le profil de l'intensité de la chute est parabolique, le maximum étant centré au milieu de l'intervalle de temps.
4. `gauss` : Le profil de l'intensité de la chute est une gaussienne limitée à l'intervalle de temps. Le maximum est centré au milieu de l'intervalle de temps. L'écart type est arbitrairement pris égal au tiers de l'intervalle de temps.

Cette option nécessite de coder `MODIF_CHIM=.TRUE.`, cf. § 2.7 (Page 25).

3.7 Ascii

Pour créer un fichier de sortie en ASCII personnalisé, coder `nom_output='ascii'` dans le fichier de données et, dans l'environnement, placer un fichier de nom `sortie_ascii`⁴ dans lequel sont définis les paramètres créant la structure souhaitée. Le codage, *délicat*, est décrit dans la routine `output.f`, les indices des variables sont identifiés dans la routine `ascii.f` du sous-directory `SOURCE`. Dans l'exemple :

```
12 3
1 2 3 4 5 6 9 10 11 12 13 15
1 2 3
.FALSE.
.TRUE.
.TRUE.
```

Fichier pour sortie `ascii`:

les quantités ont les significations suivantes :

- 12 3 → on écrira 12 variables globales et 3 variables locales,
- 1 2 3 4 5 6 9 10 11 12 13 15 → indices des 12 variables globales (`mstar*msol`, `rtot*rsol`, `ltot*lsol`, `z0`, `x0`, `alpha`, `X` dans `ZC`, `Y` dans `ZC`, `d2p`, `d2ro`, `age`, `vsal`, `w_rot` initial).
- 1 2 3 → indices des 3 variables locales : Rayon, $\log(M/M_{\text{tot}})$, Température).
- `.FALSE.` → la masse sera écrite en fraction de la masse totale et non en `DeX`.
- `.TRUE.` → tabulation du centre à la surface.
- `.TRUE.` → on ajoute la composition chimique locale à la suite des variables locales.
- Fichier pour sortie `ascii` : texte d'entête du fichier de sortie.

Le nom générique du fichier de données est repris pour former celui du fichier de sortie en ASCII : avec `mon_modele.don` le nom du fichier de sortie est `mon_modele-ascii`. Avec le fichier cité comme exemple, on a obtenu :

```
Fichier pour sortie ascii: mon_modele-ascii
CESAM2k version 0.0.0.0 lagr colloc 1 2 np no diffus, 06 Juillet 2003 17h46
Physique utilisée: etat_eff, opa_yveline_lisse, conv_jmj, ppcno9, NACRE
solaire_gn, lim_atm, hopf, perte_ext, diffm_mp, diff_tnu, ctes_94
```

⁴Dont un exemple se trouve dans le sous-directory `EXPLOIT`.

```

10  H1  He3  He4  C12  C13  N14  N15  O16  O17  Si28
      541      12      13      10      -1
1.9891900000000E+33  6.010741880620E+10  2.478601588572E+33  2.000000000000E-02  7.000000000000E-01
1.8000000000000E+00  7.000000000000E-01  2.800000000000E-01 -4.241618755712E+01 -2.519592625187E+01
0.0000000000000E+00  0.000000000000E+00
0.0000000000000E+00  0.000000000000E+00  1.359013041915E+07  7.000000000000E-01  8.826927693868E-05
2.799117307231E-01  3.425410508692E-03  4.128413464627E-05  1.059170894932E-03  4.168107978225E-06
9.641655715570E-03  3.903146720978E-06  5.824407491460E-03
1.302042603905E+09  1.175206179724E-08  1.353639070045E+07  7.000000000000E-01  8.826927693868E-05
2.799117307231E-01  3.425410508692E-03  4.128413464627E-05  1.059170894932E-03  4.168107978225E-06
9.641655715570E-03  3.903146720978E-06  5.824407491460E-03
.....

6.014328252162E+10  1.000000000164E+00  4.543950048106E+03  7.000000000000E-01  8.826927693868E-05
2.799117307231E-01  3.425410508692E-03  4.128413464627E-05  1.059170894932E-03  4.168107978225E-06
9.641655715570E-03  3.903146720978E-06  5.824407491460E-03
6.014636429604E+10  0.000000000000E+00  4.543482782113E+03  7.000000000000E-01  8.826927693868E-05
2.799117307231E-01  3.425410508692E-03  4.128413464627E-05  1.059170894932E-03  4.168107978225E-06
9.641655715570E-03  3.903146720978E-06  5.824407491460E-03

```

Comme pour les abondances initiales *cf.* § 3.2 (Page 38), il est possible de ne créer ce fichier de sortie personnalisé, que pour un modèle particulier, en donnant au fichier de sortie `sortie_ascii` le nom du modèle avec l'extension `.ascii`, exemple : `mon_modele.ascii`. S'il existe dans l'environnement, ce seront les paramètres de ce dernier fichier qui seront pris en compte pour *le* modèle de nom `mon_modele`. En son absence, CESAM2*k* cherchera à utiliser ceux du fichier `sortie_ascii`, à défaut de ce dernier, il n'y aura pas de sortie ASCII.

3.8 Réglages

Les réglages, définis dans la routine `cesam.f` en fonction du paramètre `PRECISION` du fichier de données `mon_modele.don`, peuvent être personnalisés en codant : `PRECISION='rg'`, et en disposant dans l'environnement un fichier de nom : `reglages`⁵ comportant les réglages à utiliser. Exemple d'un tel fichier `reglages` :

```

&NL_RLG
m_qs=2,
m_ch=3,
m_rot=2,
m_tds=2,
m_ptm=2,
ordre=1,
precix=1.d-3,
precit=0.15d0,
ro_test=0.1d0,
psi0=0.05d0,
d_grav=0.5d0,
loc_zc=1.d-3,
dtmax=200.d0,
dt0=1.d0,
ini0=5,

```

⁵Dont un exemple se trouve dans le sous-directory `EXPLOIT`.

```

n_atm=75,
kipp=.FALSE.,
en_masse=.TRUE.,
ctel=0.0d0,
ctep=-1.d0,
ctem=15.d0,
cter=0.0d0,
ctet=0.d0,
mvt_dis=.FALSE.,
dn_fixe=0.05d0,
dpsi=0.05d0,
w_form=0.05d0,
mu_saha=.FALSE.,
q0=0.1d0,
l0=4,
new_bv=.TRUE.,
fmin_abon=0.05d0,
dlntc=0.07d0,
iter_qs=0, 0, 3, 0, 0, 0, 7
/

```

Les significations des paramètres sont les suivantes :

m_qs=2 : Ordre des B-splines pour les variables quasi-statiques.

m_ch=3 : Ordre des B-splines pour l'interpolation de la composition chimique.

m_rot=3 : Ordre des B-splines pour l'interpolation du moment cinétique.

m_tds=2 : Ordre des B-splines pour interpolation de l'énergie gravipnique.

m_ptm=2 : Ordre des B-splines pour interpolation de la perte de masse.

ordre=1 : Ordre du schéma d'intégration des réactions nucléaires avec **rkimps**.

precix=1.d-4 : Précision sur les itérations Newton-Raphson des intégrations spatiales.

precit=0.1d0 : Variation relative maximale pour l'intégration temporelle de la composition chimique.

ro_test=0.1d0 : Test de variation de l'énergie gravipnique si **ro** > **ro_test**.

psi0=0.05d0 : Constante de répartition à assurer.

d_grav=0.5d0 : Variation temporelle maximale de l'énergie gravipnique.

loc_zc=5.d-4 : Précision de la localisation des limites zones radiatives / zones convectives.

dtmax=200.d0 : Pas temporel maximum.

ini0=5 : Nombre d'itérations Newton-Raphson avec réestimation de la composition chimique, de la vitesse angulaire et des limites zones radiatives / zones convectives.

n_atm=75 : Nombre de couches dans l'atmosphère restituée.

kipp=.TRUE. : Utilisation de l'approximation de Kippenhahn.

- en_masse=.TRUE.** : Variables quasi-statiques lagrangiennes.
- ctel, ctep, ctem, cter, ctet** : Facteurs de répartition.
- mvt_dis=.TRUE.** : Ajustement de la composition chimique due aux déplacements des discontinuités..
- dn_fixe=0.05d0** : Taux limite de variation du nombre de couches nécessitant un réajustement de la grille fixe pour l'interpolation de la composition chimique.
- dpsi=0.02** : Taux limite de variation de la fonction de répartition nécessitant une modification du nombre de couches.
- w_form=0.05** : Coefficient, de valeur absolue inférieure à l'unité, permettant de modifier le profil de la vitesse angulaire initiale.
- mu_saha=.FALSE.** : on supposera le milieu totalement ionisé pour le calcul du poids moléculaire moyen.
- q0=0.1d0** : Dans les fichiers ASCII de sortie, un point est placé à $q0 > 0$ fois l'espacement entre les deux premiers points.
- l0=4** : Dans les fichiers ASCII de sortie, ajout de $l0+1$ points entre `lim_ZC` et `lim_ZC+1`, de $l0$ points entre `lim_ZC+1` et `lim_ZC+2`..... 1 point entre `lim_ZC+l0` et `lim_ZC+l0+1` et par symétrie entre `lim_ZC` et `lim_ZC-l0`.
- new_bv=.TRUE.** : Calcul de la fréquence de Brunt-Väissälä utilisant $\varphi = \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \mu}$.
- fmin_abon=0.05** : facteur entre `ab_min` et `ab_ini`.
- dlntc=0.07** : coefficient limitant aux environ de 7% la variation relative de la température centrale sur un pas temporel.
- iter_qs=0, 0, 3, 0, 0, 0, 7** : Permet de ne pas tenir compte d'une précision médiocre sur certaines variables quasi-statiques.

L'ajustement des constantes de répartition *est délicat*. Les valeurs par défaut sont `ctel=0`, `ctep=-1`, `ctem=15`, `cter=0`, `ctet=0`. Prendre garde que `ctep` et `ctet` doivent être *négatives*, car elles affectent respectivement la pression et la température, quantités décroissantes du centre à la surface.

Comme pour les abondances initiales cf. § 3.2 (Page 38), il est possible de plus personnaliser ces réglages en donnant au fichier des réglages, celui du modèle avec l'extension `.rg`, exemple : `mon_modele.rg`. S'il existe dans l'environnement, ce seront les paramètres de ce fichier qui seront pris en compte pour *le* modèle de nom `mon_modele`. En son absence, ce seront les quantités du fichier `reglages`, s'il n'existe pas, le calcul ne sera pas effectué.

3.9 Zoom

Il est possible de personnaliser le dessin “on line” du diagramme HR en y dessinant un rectangle cible à atteindre par le trajet évolutif, ainsi que de modifier l'échelle du diagramme, en centrant celui-ci autour de la valeur du point cible à des distances précisées en DeX de $\log T_{\text{eff}}$ et $\log L$. On peut aussi tracer une cible de $[\text{Fe}/\text{H}]$ à atteindre, dans le cadre du dessin des abondances en fonction de la

masse. Pour ce faire, coder `nom_des='zoom'` dans le fichier de données et, dans l'environnement, placer un fichier de nom `zoom`, dans lequel sont introduites les données nécessaires. Exemple d'un tel fichier `zoom`⁶ :

```
&NL_DES
teff_des=6530.,
dteff_des=50., -30.,
zoom_t=0.2, -0.1,
l_des=6.844,
dl_des=0.6, -0.4
zoom_l=0.1, -0.2,
fesh_des=0.05,
dfesh_des=0.03, -0.04,
logteff_max=4.6,
logteff_min=3.5,
logl_max=5.,
logl_min=2.5
/
```

- Il n'y a pas de personnalisation si `teff_des` et/ou `l_des` est négatif ou nul.
- Le zoom n'est effectif qu'avec `zoom_t` et `zoom_l` non nuls.
- Pour ne pas dessiner de cible en métallicité, coder `fesh_des=100`.
- Les valeurs des abscisses et ordonnées maximales *i.e.* `logteff_max` (min), `logl_max` (min) **prévalent** sur celles des cibles; dans l'exemple précédent, les échelles logarithmiques en température effective et en luminosité variront respectivement dans les intervalles [4.6, 3.5] et [2.5, 5.].
- Pour **seulement** adapter les échelles du diagramme HR coder, par exemple :

```
&NL_DES
teff_des=0.,
dteff_des=0., 0.,
zoom_t=0., 0.,
l_des=0.,
dl_des=0., 0.
zoom_l=0., 0.,
fesh_des=0.,
dfesh_des=0., 0.,
logteff_max=3.6,
logteff_min=2.5,
logl_max=2.,
logl_min=-2.5
/
```

- Pour **seulement** cadrer le diagramme HR autour de la cible, coder :

```
&NL_DES
teff_des=6530.,
dteff_des=50., -30.,
```

⁶Exemple se trouvant dans le sous-directory `EXPLOIT`.

```

zoom_t=0.2, -0.1,
l_des=6.844,
dl_des=0.6, -0.4
zoom_l=0.1, -0.2,
fesh_des=100.,
dfesh_des=0., 0.,
logteff_max=0.,
logteff_min=0.,
logl_max=0.,
logl_min=0.
/

```

La signification des variables est la suivante :

teff_des=6530. : Température effective du centre de la cible.

dteff_des=50., -30. : Ecart en température effective.

zoom_t=0.2, -0.1 : Extension en température effective autour de la cible en DeX.

l_des=6.844 : Luminosité du centre de la cible.

dl_des=0.6, -0.4 : Ecart en luminosité.

zoom_l=0.1, -0.2 : Extension en luminosité autour de la cible en DeX.

fesh_des=0.05 : Cible à atteindre en métallicité.

dfesh_des=0.03, -0.04 : Ecart de la cible en métallicité.

logteff_max=4.6 : \log_{10} de l'abscisse maximale du diagramme HR.

logteff_min=3.5 : \log_{10} de l'abscisse minimale du diagramme HR.

logl_max=5. : \log_{10} de l'ordonnée maximale du diagramme HR.

logl_min=2.5 : \log_{10} de l'ordonnée minimale du diagramme HR.

Il est possible de personnaliser davantage, en donnant au fichier `zoom` le nom attaché au modèle avec l'extension `.zoom`, exemple : `mon_modele.zoom`. Dès lors, les dispositions précédentes ne seront effectives *que pour* le modèle `mon_modele`. Avec l'option `zoom`, CESAM cherche à utiliser le fichier `mon_modele.zoom`, en son absence, le fichier `zoom` est utilisé.

3.10 Device

Pour adapter les dimensions des cadres et le nom du device à utiliser, placer dans l'environnement du calcul, un fichier de nom `device`, dans lequel sont introduites les données nécessaires. Exemple d'un tel fichier `device`⁷ :

```

&NL_DEVICE
h=6.5,
dh=1.5,
ld=8.5,
dl=2.,
xleft=1.8,

```

⁷Exemple se trouvant dans le sous-directory `EXPLOIT`.

```
ybot=1.4,
device='/xw'
/
```

La signification des variables est la suivante (unités en cm) :

h=6.5 : Hauteur des cadres.

dh=1.5 : Espace vertical entre les cadres.

ld=8.5 : Largeur des cadres.

dl=2. : Espace horizontal entre les cadres.

xleft=1.8 : Distance du dessin à la limite gauche de l'écran.

ybot=1.4 : Distance du dessin à la limite inférieure de l'écran.

device='/xw' : Nom du device.

On peut aussi modifier directement les valeurs de ces paramètres dans le module `mod_donnees` du sous-directory `SOURCE`.

3.10.1 Limitation des écritures

Des informations permettant de suivre en détail le déroulement des calculs apparaissant "on line" sur le moniteur. Elles peuvent s'avérer non pertinentes pour une exploitation "batch" et encombrer inutilement. CESAM2*k* a la possibilité d'en détourner la plus grande partie vers des fichiers qui pourront, au besoin, lus "off line", cf. § 2.15.1 (Page 33). Quand la nature cette limitation de sorties n'est qu'occasionnelle, il suffit de disposer, dans l'environnement du calcul, le fichier suivant de nom `blabla` :

```
&NL_BLABLA
baratine=.FALSE.
/
```

On trouvera ce fichier dans le sous-directory `EXPLOIT`.

Chapitre 4

Extensions

4.1 Ajout d'une chaîne de réactions thermonucléaires

Pour implanter une nouvelle chaîne de réactions thermonucléaires, il est souvent nécessaire d'ajouter un ou plusieurs isotopes, et aussi une ou plusieurs réactions thermonucléaires.

– *Pour ajouter un isotope*¹ :

1. Dans le module `mod_nuc` augmenter le `PARAMETER niso_tot` d'une unité, Exemple : `niso_tot=28`.
2. Dans la routine `taux_nuc` :
 - (a) Dans les déclarations, ajouter l'excès de masse de l'isotope et son symbole, Exemple : `Fe56=-60.6054d0`.
 - (b) Ajouter la masse de l'isotope, (il est conseillé d'ajouter la masse de l'isotope, dans les routines de constantes physiques `ctes_85` et `ctes_95`, et par suite dans les déclarations du module `mod_donnees` et dans l'instruction de restriction `ONLY` de la routine `taux_nuc`, Exemple : `nucleot(27)=afe56, afe56=55.847d0, afe56, af18...`).
 - (c) Ajouter la charge de l'isotope, Exemple : `zit(28)=11`.
 - (d) Ajouter le nom de l'isotope, Exemple : `'B11 '`. (ces chaînes de 4 caractères sont à cadrer à gauche sauf pour les symboles de 2 caractères qui sont centrés.).
3. Si besoin, dans la routine `abon_ini` :
 - (a) Ajouter un rapport isotopique pour ce nouvel isotope :
 - i. Introduire sa valeur dans la liste disposée à la fin de la routine.
 - ii. Indiquer son nom dans les `NAMELISTS nl_rap_iso` et `nl_modif_mix` dans la partie déclarative de la routine.

¹CESAM2k prévoit la possibilité d'utiliser des éléments chimiques de l'hydrogène ($Z = 1$) jusqu'au nickel ($Z = 28$). Pour introduire des éléments de masse supérieure, les disposer dans la routine `abon_ini` en appliquant une procédure voisine de celle décrite pour l'ajout d'un isotope.

4. Si besoin, dans la routine `saha`, ajouter les potentiels d'ionisation pour ce nouvel élément
- **Pour ajouter une réaction :**
 1. Dans la routine `taux_nuc` :
 - (a) Compléter la liste de commentaires en y indiquant le symbole de la réaction et son indice, Exemple : `réaction 46 : B11(p,g)C12`.
 - (b) Initialiser le nom de la réaction, le défaut de masse, et les charges des noyaux concernés, Exemple : `nom_react(2)='H2(p,g)He3'`
`nuc=H2+p-He3 ; qt(2)=nuc ; izzt(2,1)=1 ; izzt(2,2)=1`.
 - (c) Entrer le taux de la réaction² `rt(i)` en ln et ne pas oublier d'y inclure les 1! ou 2! ou 3! du dénominateur, Exemple : `réaction 8 : C12(p,g)N13(e+ nu)C13 z0=6, z1=1.....` en recalculant, au besoin, les coefficients à partir des $S(0)$, $S'(0)$, $S''(0)$ (Lang, 1968, eq. 4-49).
 2. Créer la routine de réactions thermonucléaires en s'inspirant d'une des routines existantes, `ppcno12BeBFe.f` par exemple.
 3. Dans la routine `tabul_nuc` :
 - (a) Ajouter la nouvelle chaîne Exemple : `CASE('ppcno12')`
 - (b) Entrer les paramètres du calcul des taux, le nombre de réactions, les correspondances d'indices, les isotopes utilisés ..., Exemple : `nreac=30 ; ind(16)=31 ; WRITE(2,6) ; WRITE(*,6)....`
 4. Dans le module `mod_nuc` :
 - (a) Augmenter d'une unité le `PARAMTER nreac_tot`, Exemple : `nreac_tot=46`
 - (b) Introduire par un `INCLUDE` le nom de la routine de la chaîne de réactions, Exemple : `INCLUDE 'ppcno9.f'`
 5. Dans la routine générique `nuc` :
 - (a) Rendre active et faire reconnaître la nouvelle routine.
 6. Tester les algorithmes ainsi modifiés en exploitant les programmes du sous-directory `TEST test_tabul_reac.f` pour vérifier les taux des réactions et `test_jacobien_reac_nuc.f` pour s'assurer de l'exactitude des dérivées.

4.2 Ajout d'une mixture initiale

Ainsi qu'il est décrit au § 3.2 (Page 38), il est possible de personnaliser les abondances initiales à l'aide d'un fichier `mixture`. Quand la mixture initiale est d'intérêt général³ il est préférable et très simple, d'en ajouter la table des abondances dans la

²C'est pour des raisons historiques que ces calculs sont effectués en ln. Les raisons étaient d'éviter d'une part, les erreurs de troncature et d'autre part, les dépassements de capacité avec la limitation à 10^{38} .

³Pour faire profiter la communauté de votre travail, communiquer la routine ainsi transformée aux responsables de la mise à jour de `CESAM2k`.

routine `abon_ini` de la source, en lui donnant un nom d'au plus 20 caractères. Pour refaire ensuite le module exécutable, il suffit d'appliquer le script `repl2k_mod` au module `mod_nuc` : `repl2k_mod mod_nuc`.

Chapitre 5

Debug

5.1 Debug

La structure de CESAM2k en modules permet une vérification efficace de la syntaxe par le compilateur. Le revers de la médaille est que la mise au point et/ou le debug nécessitent de recompiler tout le module auquel appartient la routine dans laquelle le bug est recherché. Lors de l'installation, il est utile de créer, conjointement à la bibliothèque d'exploitation `libcesam2k.a` une bibliothèque de debug `libcesam2k-dbg.a`. Cette bibliothèque est créée automatiquement lors de l'exécution du script `genere_cesam2k-dbg` du sous-directory `SCRIPTS`. Pour ce faire, utiliser les options de debug du compilateur ; la procédure `compile2k-dbg` du sous-directory `SCRIPTS` en est un exemple. Le temps nécessaire à la construction de la bibliothèque de debug est significativement plus court que celui de la construction de la bibliothèque d'exploitation, facteur 5 à 10 par exemple, facteur qui se retrouve, mais dans l'autre sens, lors d'une exécution.

Exemple : un bug a été détecté dans la routine `des_m` du module `mod_cesam`¹. On introduit des instructions de debug dans `des_m`. Dans le sous-directory `TESTS` on exécute le programme `test_cesam` dans lequel on inclut le module `mod_cesam` :

```
INCLUDE ' ../SOURCE/mod_cesam.f'

C*****

PROGRAM test_cesam

USE mod_cesam

IMPLICIT NONE

CALL cesam

STOP
```

¹Les *bons* compilateurs indiquent le nom des routines où ils détectent un bug.

```
END PROGRAM test_cesam
```

Au link, le fichier `mod_cesam.mod` créé dans le sous-directory `TESTS` sera utilisé et non pas celui du sous-directory `SOURCE`. Lors de l'exécution, les instructions de debug, alors prises en compte, permettront de détecter le défaut. Une fois la routine `des_m` corrigée, dans le sous-directory `SOURCE`, l'exécution du script : `mod_repl mod_cesam`, remplacera le module `mod_cesam` dans la bibliothèque et recréera l'exécutable `cesam2k.out`. Ainsi, aucun fichier du sous-directory `SOURCE` n'a été déplacé.

Annexe A

Installation sous LINUX

A.1 Création de la bibliothèque avec ifc

La Norme F95, telle qu'elle a été définie en 1996, est implémentée de façon stricte dans le compilateur¹ ifc. Depuis, on s'est aperçu d'une limitation "idiote" de cette Norme, interdisant de mettre un tableau ALLOCATABLE alors que :

```
REAL(kind=dp), INTENT(out), POINTER, DIMENSION( :)
```

était autorisé. Dans certains contextes, POINTER et ALLOCATABLE sont synonymes. Quelques temps plus tard, un Technical Report qui "corrigeait" et autorisait cette limitation est paru. Les compilateurs de Compaq/Digital (stations Unix, PC Windows) Lahey-Fujitsu (Linux, Windows) ont été corrigés ; INTEL semble n'avoir effectué la correction que dans la dernière version de ifc.

Remède : Remplacer ALLOCATABLE par POINTER, chaque fois que le compilateur manifeste. Par la suite, avec le compilateur ifc à jour, tout rentrera dans l'ordre. Actuellement la Norme Fortran 2003 différencie ALLOCATABLE et POINTER.

Les corrections à apporter sont les suivantes :

1. Routine tabul_nuc.f transformer :

```
REAL (kind=dp), INTENT(out), ALLOCATABLE, DIMENSION(:, :) :: taux_reac
REAL (kind=dp), INTENT(out), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: ar, q0, temp, ttemp
INTEGER, INTENT(out) :: i3al, knot_temp, m_temp, n_temp
CHARACTER (len=20), INTENT(out), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: nom_reac
```

en :

```
REAL (kind=dp), POINTER, DIMENSION(:, :) :: taux_reac
REAL (kind=dp), POINTER, DIMENSION(:) :: ar, q0, temp, ttemp
INTEGER, INTENT(out) :: i3al, knot_temp, m_temp, n_temp
CHARACTER (len=20), POINTER, DIMENSION(:) :: nom_reac
```

2. Routine tabul_nuc, transformer :

```
REAL (kind=dp), ALLOCATABLE, SAVE, DIMENSION(:, :) :: decrx, dzetax, taux_reac
REAL (kind=dp), ALLOCATABLE, SAVE, DIMENSION(:) :: ar, datx, dbidx,
1 dclx, decro, decrt, dfx, df12x, dkx, dnex, dr, dzstarx, ecran,
2 lambda, mz1z2, q0, temp, ttemp, tx, z1z2
```

¹Diagnostic, commentaires et remèdes selon B.Pichon.

```

REAL (kind=dp), SAVE, DIMENSION(2) :: zeta, dzetat, dzetaro
REAL (kind=dp), SAVE :: cte1, cte2, cte3, cte4, cte5, cte6, cte7,
1 cte8, cte9, cte10
REAL (kind=dp) :: zstar, ne, c1, f12, at, k, bid, bid1, df,
1 e0, eps, beta, dnero, dclro, df12t, df12ro, datt, datro, dkt,
2 dkro, dbidt, dbidro, dft, dfro
INTEGER, SAVE :: i3al, knot_temp, l=1, m_temp, n_temp
INTEGER :: i, j
CHARACTER (len=20), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: nom_reac

en :

REAL (kind=dp), POINTER, SAVE, DIMENSION(:, :) :: decrx, dzetax, taux_reac
REAL (kind=dp), POINTER, SAVE, DIMENSION(:) :: ar, datx, dbidx,
1 dc1x, decro, decrt, dfx, df12x, dkx, dnex, dr, dzstarx, ecran,
2 lambda, mz1z2, q0, temp, ttemp, tx, z1z2
REAL (kind=dp), SAVE, DIMENSION(2) :: zeta, dzetat, dzetaro
REAL (kind=dp), SAVE :: cte1, cte2, cte3, cte4, cte5, cte6, cte7,
1 cte8, cte9, cte10
REAL (kind=dp) :: zstar, ne, c1, f12, at, k, bid, bid1, df,
1 e0, eps, beta, dnero, dclro, df12t, df12ro, datt, datro, dkt,
2 dkro, dbidt, dbidro, dft, dfro
INTEGER, SAVE :: i3al, knot_temp, l=1, m_temp, n_temp
INTEGER :: i, j
CHARACTER (len=20), POINTER, DIMENSION(:) :: nom_reac

```

3. Routine, mod_donnees transformer :

```

CHARACTER (len=4), SAVE, PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: nom_elem

en :

CHARACTER (len=4), SAVE, PUBLIC, POINTER, DIMENSION(:) :: nom_elem

```

A.2 Installation de PGPLOT

A.2.1 Installation intégrale avec ifc

Thierry Corbard, Observatoire de la Côte d'Azur, a construit le fichier de configuration `ifc_gcc.conf` de PGPLOT avec LINUX pour le compilateur F90 `ifc` de INTEL. Pour créer la source de PGPLOT en utilisant ce compilateur :

1. Se placer dans le sous-directory `/usr/local/src/pgplot/sys_linux` de la source de PGPLOT.
 - (a) Y inclure le fichier de configuration : `ifc_gcc.conf`, que l'on trouvera dans le sous-directory `SCRIPTS`.
 - (b) Y créer le sous-directory `ifc_src` : `mkdir ifc_src`.
 - (c) Y inclure le fichier `ifc_src/grgenv.f`, que l'on trouvera dans le sous-directory `SCRIPTS`.
2. Exécuter :

```

/usr/local/src/pgplot/makemake /usr/local/src/pgplot linux ifc_gcc

```

A.2.2 Installations sans larme

Sous LINUX avec les distributions dérivées de RedHat, Mandrake et SuSE en particulier, il est possible d'installer PGPLOT sans trop de difficultés en procédant de la façon suivante :

1. Avec un moteur de recherche, Google par exemple, rechercher `pgplot rpm`.
2. Parmi les sites détectés, choisir celui qui propose de télécharger une version récente correspondant au processeur et au système d'exploitation utilisés. Par exemple, `pgplot-5.2.2-1.i686.rpm` est satisfaisant pour un Pentium4 sous Mandrake².
3. Télécharger ce logiciel. A l'issue du téléchargement, se placer dans le directory où s'est effectué le téléchargement. Cliquer sur le nom du logiciel téléchargé, acquérir les droits du super-utilisateur, les logiciels s'installent.
4. Le système place les deux bibliothèques partageables `libpgplot.so.5.2.0` et `libpgplot.so.5` dans le directory `/usr/lib` et y crée le sous-directory `pgplot`. Il contient les 3 fichiers : `grexec.f`, `rgb.txt`, `grfont.dat`.
5. Créer dans le sous-directory `pgplot` deux liens vers les bibliothèques partageables : `ln -s /usr/lib/libpgplot.so.5 libpgplot.so`,
`ln -s /usr/lib/libpgplot.so.5.0 libpgplot.so.0`
6. Dans le fichier `.cshrc` ajouter :
 - (a) Le chemin de PGPLOT `LD_LIBRARY_PATH **** :/usr/lib/pgplot`.
 - (b) La variable d'environnement `setenv PGPLOT_DIR /usr/lib/pgplot`.

Avec les distributions DEBIAN, GNOME ou KUNBUTU, le logiciel s'installe automatiquement avec `apt-get -install pgplot5`³. Toutefois, certains logiciels, de traitement d'image par exemple, peuvent ne pas avoir été installés. Pour ce faire, la difficulté est d'en connaître les identificateurs, ceux-ci étant acquis, leur installation est immédiate avec `apt-get`. La localisation de la bibliothèque `libpgplot` s'obtient assez facilement, avec un `find` par exemple.

A.2.3 CESAM2k sans PGPLOT

Il est possible d'utiliser CESAM2k sans PGPLOT. Pour ce faire, avant la formation du module exécutable décommenter la dernière ligne du module `MOD_CESAM`. Le fichier `pgplot_factice.f` contient des émulations des routines de PGPLOT. Evidemment, coder `NOM_DES='no_des'` et `NOM_DES_ROT='no_des'` dans les fichiers de données ; il ne faut pas non plus chercher à linker avec la bibliothèque de PGPLOT ; il convient aussi de ne pas indiquer de chemin à cette bibliothèque dans le fichier `cshrc`, ou ses équivalents.

A.3 Exemple de MAKEFILE

Le MAKEFILE suivant, créé par Th. Corbard O.C.A., est placé dans le sous-directory `EXPLOIT`. Les paramètres correspondent au compilateur `ifc` d'Intel et

²On trouvera ce logiciel dans le sous-directory `SCRIPTS` de la distribution.

³Vérifier que PGLOT5 est bien dans la liste des `SOURCEs` de `apt-get` (voir man `apt-get`).

les chemin à une implantation standard. Son utilisation est décrite au § 1.5.1 (Page 4).

```
RM=rm -f
```

```
AR=ar ruv
```

```
FC90 = ifort
```

```
mod_ext=mod #extension for module files
```

```
FFLAGS90 = -extend_source -O -xW -traceback -save -nbs
```

```
OPA_HOUDEK_PATH=../SUN_STAR_DATA/v9/lib
```

```
LIBLINK= -L. -lcesam2k -L$(OPA_HOUDEK_PATH) -lopint -lpgplot -lX11
```

```
#Adapt the following if you need to specify the location of X11 and pgplot lib
```

```
#PGPLOT_DIR=/usr/local/pgplot
```

```
#X11_DIR=/usr/lib64
```

```
#LIBLINK= -L. -lcesam2k -L$(PGPLOT_DIR) -lpgplot -L$(X11_DIR) -lX11
```

```
#Mis à jour pour SOURCE et EXPLOIT du 01.03.06, P.Morel
```

```
SRCS = \
```

```
mod_kind.f\
```

```
mod_numerique.f\
```

```
mod_donnees.f\
```

```
mod_variables.f\
```

```
mod_etat.f\
```

```
mod_opa.f\
```

```
mod_conv.f\
```

```
mod_atm.f\
```

```
mod_nuc.f\
```

```
mod_bp_for_alecian.f\
```

```
mod_evol.f\
```

```
mod_static.f\
```

```
mod_cesam.f\
```

```
mod_exploit.f
```

```
OBJS = \
```

```
mod_kind.o\
```

```
mod_numerique.o\
```

```
mod_donnees.o\
```

```
mod_variables.o\
```

```
mod_etat.o\
```

```
mod_opa.o\
```

```
mod_conv.o\
```

```

mod_atm.o\
mod_nuc.o\
mod_bp_for_alecian.o\
mod_evol.o\
mod_static.o\
mod_cesam.o\
mod_exploit.o

MODS = \
mod_kind.$(mod_ext)\
mod_numerique.$(mod_ext)\
mod_donnees.$(mod_ext)\
mod_variables.$(mod_ext)\
mod_etat.$(mod_ext)\
mod_opa.$(mod_ext)\
mod_conv.$(mod_ext)\
mod_atm.$(mod_ext)\
mod_nuc.$(mod_ext)\
mod_bp_for_alecian.$(mod_ext)\
mod_evol.$(mod_ext)\
mod_static.$(mod_ext)\
mod_cesam.$(mod_ext)\
mod_exploit.$(mod_ext)

cesam2k.out: cesam2k.f libcesam2k.a
$(FC90) $(FFLAGS90) -o cesam2k.out cesam2k.f $(LIBLINK)

libcesam2k.a: $(MODS)
$(AR) libcesam2k.a $(OBJS)
$(RM) $(OBJS)

mod_kind.o mod_kind.$(mod_ext): mod_kind.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_numerique.o mod_numerique.$(mod_ext): \
    arb_rom.f\
    boite.f \
    box.f \
    bsp1dn.f\
    bsp1ddn.f\
    bsp_dis.f\
    bval0.f\
    bval1.f\
    bvald.f\
    coll.f\
    colpnt.f\
    delete_doubles.f\

```

```

difdiv.f\
fermi_dirac.f\
gauss_band.f\
horner.f\
intgauss.f\
linf.f\
matinv.f\
max_local.f\
min_max.f\
neville.f\
newspl.f\
newton.f\
noedif.f\
noein.f\
noeud.f\
noeu_dis.f\
pause.f\
polyder.f\
schu58_n.f\
shell.f\
sum_n.f\
zoning.f\
mod_kind.$(mod_ext)\
mod_numerique.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

```

```

mod_donnees.o mod_donnees.$(mod_ext): \
    ctes_85.f\
    ctes_94.f\
    ctes_94m.f\
    ini_ctes.f\
    lit_nl.f\
    print_ctes.f\
    mod_kind.$(mod_ext)\
    mod_numerique.$(mod_ext)\
    mod_donnees.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

```

```

mod_variables.o mod_variables.$(mod_ext): \
    chim_gram.f\
    inter.f\
    sortie.f\
    mod_kind.$(mod_ext)\
    mod_numerique.$(mod_ext)\
    mod_donnees.$(mod_ext)\
    mod_variables.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

```



```
mod_etat.o mod_etat.$(mod_ext): \  
    df_rotx.f\  
    etat.f\  
    etat_ceff.f\  
    etat_eff.f\  
    etat_gong1.f\  
    etat_gong2.f\  
    etat_mhd.f\  
    etat_opal.f\  
    etat_opalX.f\  
    etat_opalZ.f\  
    mu_mol.f\  
    saha.f\  
    mod_kind.$(mod_ext)\  
    mod_numerique.$(mod_ext)\  
    mod_donnees.$(mod_ext)\  
    mod_etat.f  
    $(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f
```

```
mod_opa.o mod_opa.$(mod_ext): \  
    kappa_cond.f\  
    opa.f\  
    opa_compton.f\  
    opa_gong.f\  
    opa_houdek9.f\  
    opa_int_zsx.f\  
    opa_opalC0.f\  
    opa_opal2.f\  
    opa_yveline.f\  
    opa_yveline_lisse.f\  
    z14xcotrin21.f\  
    mod_kind.$(mod_ext)\  
    mod_numerique.$(mod_ext)\  
    mod_donnees.$(mod_ext)\  
    mod_variables.$(mod_ext)\  
    mod_opa.f  
    $(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f
```

```
mod_conv.o mod_conv.$(mod_ext): \  
    conv.f\  
    conv_a0.f\  
    conv_cgm_reza.f\  
    conv_cm.f\  
    conv_cml.f\  
    conv_cm_reza.f\  
    conv_jmj.f
```

```

mod_kind.$(mod_ext)\
mod_donnees.$(mod_ext)\
mod_variables.$(mod_ext)\
mod_conv.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_atm.o mod_atm.$(mod_ext): \
    atm.f\
    coll_atm.f\
    edding.f\
    eq_atm.f\
    hopf.f\
    k5750.f\
    k5777.f\
    lim_atm.f\
    lim_gong1.f\
    lim_tau1.f\
    roger00.f\
    roger02.f\
    roger05.f\
    roger10a.f\
    taueff.f\
    tdetau.f\
    thermo_atm.f\
    trho.f\
    mod_kind.$(mod_ext)\
    mod_numerique.$(mod_ext)\
    mod_donnees.$(mod_ext)\
    mod_variables.$(mod_ext)\
    mod_etat.$(mod_ext)\
    mod_opa.$(mod_ext)\
    mod_conv.$(mod_ext)\
    mod_atm.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_nuc.o mod_nuc.$(mod_ext): \
    abon_ini.f\
    iben.f\
    nuc.f\
    planetoides.f\
    pp1.f\
    pp3.f\
    ppcno10BeBFe.f\
    ppcno10Fe.f\
    ppcno10K.f\
    ppcno10.f\
    ppcno11.f\

```

```

    ppcno12Be.f\
    ppcno12BeBFe.f\
    ppcno12Li.f\
    ppcno12.f\
    ppcno3a12Ne.f\
    ppcno3a9.f\
    ppcno3ac10.f\
    ppcno9.f\
    ppcno9Fe.f\
    rq_reac.f\
    tabul_nuc.f\
    taux_nuc.f\
    vent.f\
    mod_kind.$(mod_ext)\
    mod_numerique.$(mod_ext)\
    mod_donnees.$(mod_ext)\
    mod_variables.$(mod_ext)\
    mod_nuc.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_bp_for_alecian.o mod_bp_for_alecian.$(mod_ext): \
    mod_donnees.$(mod_ext)\
    mod_variables.$(mod_ext)\
    mod_bp_for_alecian.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_evol.o mod_evol.$(mod_ext): \
    alecian1.f\
    coeff_rota.f\
    coeff_rota3.f\
    coeff_rota4.f\
    collision.f\
    coulomb.f\
    diffm.f\
    diffm_br.f\
    diffm_mp.f\
    difft.f\
    difft_gab.f\
    difft_nu.f\
    difft_smc.f\
    difft_sun.f\
    diffus.f\
    diffw.f\
    diffw_mpz.f\
    diffw_p03.f\
    ecrit_rota.f\
    eq_diff_chim.f\

```

```

eq_diff_poisson.f\
eq_diff_rota3.f\
eq_diff_rota4.f\
evol.f\
f_rad.f\
initialise_poisson.f\
initialise_rota.f\
initialise_u.f\
initialise_w.f\
lmix.f\
pertw.f\
pertw_loc.f\
pertw_ptm.f\
pertw_sch.f\
resout_chim.f\
resout_rota3.f\
resout_rota4.f\
rkimps.f\
mod_kind.$(mod_ext)\
mod_numerique.$(mod_ext)\
mod_donnees.$(mod_ext)\
mod_variables.$(mod_ext)\
mod_etat.$(mod_ext)\
mod_nuc.$(mod_ext)\
mod_bp_for_alecian.$(mod_ext)\
mod_evol.f
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $.f

mod_static.o mod_static.$(mod_ext): \
coll_qs.f\
dgrad.f\
lim_zc.f\
pertm.f\
pertm_ext.f\
pertm_msol.f\
pertm_tot.f\
pertm_waldron.f\
resout.f\
static.f\
static_m.f\
static_r.f\
thermo.f\
update.f\
mod_kind.$(mod_ext)\
mod_numerique.$(mod_ext)\
mod_donnees.$(mod_ext)\
mod_variables.$(mod_ext)\

```

```

    mod_etat.$(mod_ext)\
    mod_opa.$(mod_ext)\
    mod_conv.$(mod_ext)\
    mod_atm.$(mod_ext)\
    mod_nuc.$(mod_ext)\
    mod_evol.$(mod_ext)\
    mod_static.f
    $(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_cesam.o mod_cesam.$(mod_ext): \
    add_ascii.f\
    ascii.f\
    cesam.f\
    des.f\
    des_m.f\
    des_r.f\
    dnunl.f\
    list.f\
    output.f\
    osc_adia.f\
    osc_invers.f\
    osc_nadia.f\
    mod_kind.$(mod_ext)\
    mod_numerique.$(mod_ext)\
    mod_donnees.$(mod_ext)\
    mod_variables.$(mod_ext)\
    mod_etat.$(mod_ext)\
    mod_opa.$(mod_ext)\
    mod_atm.$(mod_ext)\
    mod_nuc.$(mod_ext)\
    mod_static.$(mod_ext)\
    mod_cesam.f
    $(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f

mod_exploit.o mod_exploit.$(mod_ext): \
    add_ascii.f\
    ascii.f\
    ctes_85.f\
    ctes_94.f\
    ctes_94m.f\
    diffw.f\
    diffw_mpz.f\
    diffw_p03.f\
    ini_ctes.f\
    inter_atm.f\
    lit_binaire.f\
    lit_hr.f\

```

```
lit_nl.f\  
min_max.f\  
min_max_cond.f\  
osc_adia.f\  
osc_invers.f\  
osc_nadia.f\  
output.f\  
read_ascii.f\  
write_nl.f\  
mod_kind.$(mod_ext)\  
mod_numerique.$(mod_ext)\  
mod_donnees.$(mod_ext)\  
mod_variables.$(mod_ext)\  
mod_etat.$(mod_ext)\  
mod_opa.$(mod_ext)\  
mod_nuc.$(mod_ext)\  
mod_exploit.f  
$(FC90) $(FFLAGS90) -c $*.f  
  
clean:  
$(RM) cesam2k.out libcesam2k.a $(OBJJS) $(MODS)  
  
touch:  
touch $(SRCS)
```

Annexe B

Liste des fichiers ASCII

Se reporter §2.3 (Page 20) pour la description du fichier ASCII de données `mon_modele.don`.

B.1 Fichiers pour oscillations

Les fichiers ASCII pour les oscillations ont une en-tête commune. Leur contenu diffère ensuite suivant leur type.

en-tête :

- Lignes 1-4 : identification et physique utilisée.
- Ligne 5 : nombre, noms des éléments chimiques utilisés.
- Ligne 5 : nombre de couches, de “global” (13), de variables, d’éléments chimiques (redondant), indice de la vitesse angulaire (s’il n’en est pas tenu compte, l’indice est -1).

Exemple :

```
Fichier pour inversion: test-inv.osc
CESAM2k version 0.0.0.0 lagr colloc 1 2 np no diffus, 31 Aout 2003 17h45
Physique utilisée: etat_eff, opa_int_zsx, conv_jmj, ppcno9, NACRE
solaire_gn, lim_atm, hopf, perte_ext, diffm_mp, difft_nu, ctes_94
10 H1 He3 He4 C12 C13 N14 N15 O16 O17 Si28
      472      13      25      10      -1
1.989190000000E+33 6.959888774683E+10 3.846010241481E+33 1.723296157963E-02 7.033715921640E-01
1.601359931639E+00 7.033715881909E-01 2.793954502293E-01-1.234804262016E+02-1.250212463069E+02
4.650000000000E+03 0.000000000000E+00 0.000000000000E+00
6.965125316795E+10 1.125188830934E-10 4.712514552821E+03 1.082443642936E+03 3.550000000000E-09
2.317104979700E-04 3.846010241481E+33 5.992732100399E-03 0.000000000000E+00 1.664711685203E+00
3.986098681160E-01 1.004603449555E+00 1.630687926937E+08 1.300571860485E+00 2.500897748491E+03
0.000000000000E+00 1.729836584721E+00 8.429278614488E-01 0.000000000000E+00 0.000000000000E+00
.....
3.983397251906E-01 9.536638658353E-01 2.457927862174E+08 8.289918269170E-01 0.000000000000E+00
0.000000000000E+00-1.948967682005E+00 3.878822249046E-01 2.023289474023E+02 1.828866051074E+01
1.000000000000E+00 3.288637435509E-01-5.586998681649E-03 6.642708700530E-03-8.894901969547E-03
3.750487629847E-01 1.039826643345E-05 6.071493899575E-01 1.637161572818E-05 4.475726236722E-06
4.374234929779E-03 1.935496963607E-07 7.968745830613E-03 3.970500883875E-04 5.030377050940E-03
```

B.1.1 Fichier pour oscillations adiabatiques

glob: variables globales du fichier mon_modele-ad.osc

```

glob(1)=mstar*msol
glob(2)=rtot*rsol
glob(3)=ltot*lsol
glob(4)=z0
glob(5)=x0
glob(6)=alpha
glob(7)=X dans ZC
glob(8)=Y dans ZC
glob(9)=d2p
glob(10)=d2ro
glob(11)=age
glob(12)=wrot vitesse de rotation globale
glob(13)=w_rot initial
glob(14)=g constante de la gravitation utilisée
glob(15)=msol masse solaire utilisée
glob(16)=rsol rayon solaire utilisé
glob(17)=lsol luminosité solaire utilisée

```

var: variables locales utilisées ; nvar=22 pour oscillations adiabatiques

```

var(1,i)=r*rsol
var(2,i)=log(m/mstar) -1.d38 au centre
var(3,i)=t
var(4,i)=Ptot
var(5,i)=ro
var(6,i)=gradient réel d ln T / d ln P
var(7,i)=l
var(8,i)=kap
var(9,i)=énergie thermo+gravifique
var(10,i)=grand Gamma1
var(11,i)=gradient adiabatique
var(12,i)=delta
var(13,i)=cp
var(14,i)=mu elec.
var(15,i)=vaissala, 0 au centre
var(16,i)=vitesse angulaire, radian/sec
var(17,i)=d ln kappa / d ln T
var(18,i)=d ln kappa / d ln ro
var(19,i)=d epsilon(nuc) / d ln T
var(20,i)=d epsilon(nuc) / d ln ro
var(21,i)=Ptot / Pgas (grad_mu sans pression turbulente)
var(22,i)=gradient radiatif

```

composition chimique


```
var(22+j,i)=xchim(j)*nucleo(j), j=1,nbelem
```

B.1.2 Fichier pour oscillations non adiabatiques

glob: variables globales du fichier mon_modele-nad.osc

```
var: variables
glob(1)=mstar*msol
glob(2)=rtot*rsol
glob(3)=ltot*lsol
glob(4)=z0
glob(5)=x0
glob(6)=alpha
glob(7)=X dans ZC
glob(8)=Y dans ZC
glob(9)=d2p
glob(10)=d2ro
glob(11)=age
glob(12)=wrot vitesse de rotation globale
glob(13)=w_rot initial
glob(14)=g constante de la gravitation utilisée
glob(15)=msol masse solaire utilisée
glob(16)=rsol rayon solaire utilisé
glob(17)=lsol luminosité solaire utilisée
```

var: variables locales utilisées ; nvar=44 pour oscillations non adiabatiques

```
var(1,i)=r*rsol
var(2,i)=log(m/mstar) -1.d38 au centre
var(3,i)=t
var(4,i)=Ptot
var(5,i)=ro
var(6,i)=gradient reel d ln T / d ln P
var(7,i)=l
var(8,i)=kap
var(9,i)=énergie thermo+gravifique
var(10,i)=grand Gamma1
var(11,i)=gradient adiabatique
var(12,i)=delta
var(13,i)=cp
var(14,i)=mu elec.
var(15,i)=vaissala, 0 au centre
var(16,i)=vitesse angulaire, radian/sec
var(17,i)=d ln kappa / d ln T
var(18,i)=d ln kappa / d ln ro
var(19,i)=d epsilon(nuc) / d ln T
```

```

var(20,i)=d epsilon(nuc) / d ln ro
var(21,i)=Ptot / Pgas (grad_mu sans pression turbulente)
var(22,i)=gradient radiatif
var(23,i)=d Gamma1 / d log P
var(24,i)=d Gamma1 / d log T
var(25,i)=d Gamma1 / dY = d Gamma1 / dZ
var(26,i)=dP / dro (TX)
var(27,i)=dP / dT (roX)
var(28,i)=dP / dX (Tro)
var(29,i)=du / dro (TX)
var(30,i)=du / dT (roX)
var(31,i)=du / dx(Tro)
var(32,i)=énergie interne
var(33,i)=d^2P / dro^2 (TX)
var(34,i)=d^2P / dro dT (X)
var(35,i)=d^2P / dT^2(roX)
var(36,i)=d^2U / dro^2 (TX)
var(37,i)=d^2U / dro dT (X)
var(38,i)=d^2U / dT^2 (X)
var(39,i)=dK / dX
var(40,i)=d^2K / dT^2
var(41,i)=d epsi / dX
var(42,i)=dX / dR
var(43,i)=J-B
var(44,i)=Edding. facteur

composition chimique

var(44+j,i)=xchim(j)*nucleo(j), j=1,nbelem

```

B.1.3 Fichier pour inversions

glob: variables globales du fichier mon_modele-inv.osc

```

glob(1)=mstar*msol
glob(2)=rtot*rsol
glob(3)=ltot*lsol
glob(4)=z0
glob(5)=x0
glob(6)=alpha
glob(7)=X dans ZC
glob(8)=Y dans ZC
glob(9)=d2p
glob(10)=d2ro
glob(11)=age
glob(12)=wrot vitesse de rotation globale

```

```

glob(13)=w_rot initial
glob(14)=g constante de la gravitation utilisée
glob(15)=msol masse solaire utilisée
glob(16)=rsol rayon solaire utilisé
glob(17)=lsol luminosité solaire utilisée

var: variables locales utilisées ; nvar=25 pour inversion

var(1,i)=r*rsol
var(2,i)=log(m/mstar) -1.d38 au centre
var(3,i)=t
var(4,i)=Ptot
var(5,i)=ro
var(6,i)=gradient reel d ln T / d ln P
var(7,i)=l
var(8,i)=kap
var(9,i)=énergie thermo+gravifique
var(10,i)=grand Gamma1
var(11,i)=gradient adiabatique
var(12,i)=delta
var(13,i)=cp
var(14,i)=mu elec.
var(15,i)=vaissala, 0 au centre
var(16,i)=vitesse angulaire, radian/sec
var(17,i)=d ln kappa / d ln T
var(18,i)=d ln kappa / d ln ro
var(19,i)=d epsilon(nuc) / d ln T
var(20,i)=d epsilon(nuc) / d ln ro
var(21,i)=Ptot / Pgas (grad_mu sans pression turbulente)
var(22,i)=gradient radiatif
var(23,i)=d Gamma1 / d log P
var(24,i)=d Gamma1 / d log T
var(25,i)=d Gamma1 / dY = d Gamma1 / dZ

composition chimique

var(25+j,i)=xchim(j)*nucleo(j), j=1,nbelem

```

B.1.4 Utilisation du nombre maximum de couches

Avec certains types de précision, *cf.* § 2.3 (Page 20), il est possible de créer un fichier ASCII d'oscillation comportant au moins un nombre de couches fixé à l'avance; le nombre maximum de couches étant utilisé lors du calcul des derniers modèles. Les critères requis pour ce faire sont les suivants :

- Type de précision utilisé : 'sa', ou 'co'.
- **ET** réalisation d'un des critères suivants :
 - Age du modèle à calculer inférieur d'un million d'années de l'âge maximum

à atteindre.

- Numéro du modèle à calculer égal à `NMAX_MODELS - 1`.
- Température effective voisine de la limite demandée.
- Abondance centrale d'hydrogène voisine de la limite demandée.
- Extension du noyau d'hélium voisine de la limite demandée.

B.2 Fichier pour diagramme HR

Le fichier pour tracé/exploitation du diagramme HR est systématiquement implémenté au cours de chaque exécution de `CESAM2k`. Il est créé lors de l'initialisation d'un modèle sur la séquence principale d'âge zéro homogène ou la pré-séquence principale homogène. Il est complété en cas de reprise d'un modèle existant.

Pour chaque modèle, sur une première ligne sont reportés :

1. l'âge en 10^6 ans ;
2. le nombre d'éléments du vecteur de composition chimique ;
3. le nombre de limites zones radiatives / zones convectives
4. le numéro du modèle,
5. pour chaque limite zone radiative / zone convective la mention "T" ou "F" suivant qu'il s'agit, ou non, du début d'une zone convective ;
6. suivant le nombre de limites, une ou plusieurs lignes sont nécessaires pour indiquer :
 - (a) $\log T_{\text{eff}}$,
 - (b) $\log L/L_{\odot}$,
 - (c) $\log R/R_{\odot}$
 - (d) pour chaque limite, M_{\star}/M_{\odot} , $(M_{\star} - m)/M_{\odot}$, r/R_{\odot} , r_{ov}/R_{\odot} , (r_{ov} étant le rayon de la limite étendue par overshooting).

Dans les cas particuliers, on utilise les conventions suivantes :

- modèle totalement convectif : 1 (seule) limite "F" placée au centre ($r/R_{\odot} = 0$),
- modèle totalement radiatif : 0 (aucune) limite "F" placée en -100 ($r/R_{\odot} = -100$).

Viennent ensuite les noms des éléments chimiques et leurs abondances, par unité de masse, au centre et à la surface. S'il n'est pas imposé d'overshoot, les valeurs r_{ov} des rayons des limites étendues sont fixées à -100 . S'il est tenu compte de la diffusion du moment cinétique, une ligne supplémentaire, identifiée par `Wrot` indique les vitesses linéaire et angulaire de la couche externe. Exemple :

```
0.0000000000000000E+00 10 2 0 F T
3.749146E+00-1.723498E-01-6.098130E-02 1.000000E+00 9.053737E-01 1.262897E-01
-1.000000E+02 2.969686E-02 6.310311E-01-1.000000E+02
H1 6.97718E-01 6.97718E-01
He3 8.91487E-05 8.91487E-05
He4 2.82700E-01 2.82700E-01
C12 3.33842E-03 3.33842E-03
C13 4.02357E-05 4.02357E-05
N14 1.03227E-03 1.03227E-03
```

```

N15  4.06226E-06 4.06226E-06
O16  9.39680E-03 9.39680E-03
O17  3.80402E-06 3.80402E-06
Si28 5.67649E-03 5.67649E-03
Wrot 5.00050E+01 4.92437E-05  <-- qu'avec diffusion du moment cinétique
      1.000000000000000E+01 10  2    1 F T
      3.750235E+00-1.660591E-01-5.995672E-02 1.000000E+00 9.485921E-01 1.002733E-01
-1.000000E+02 2.900062E-02 6.330032E-01-1.000000E+02
      H1  6.97097E-01 6.97795E-01
He3  6.62006E-05 8.91324E-05
He4  2.83225E-01 2.82627E-01
C12  2.45937E-03 3.33777E-03
C13  4.11117E-04 4.02273E-05
N14  1.66274E-03 1.03208E-03
N15  2.18466E-07 4.06144E-06
O16  9.39741E-03 9.39506E-03
O17  3.87613E-06 3.80329E-06
Si28 5.67687E-03 5.67553E-03
Wrot 5.21773E+01 5.03611E-05  <-- qu'avec diffusion du moment cinétique
.....

      4.685000000000000E+03 10  31  1 T
      3.761741E+00-3.270666E-06 2.093004E-06 1.000000E+00 2.259322E-02 7.173108E-01
-1.000000E+02
      H1  3.22007E-01 7.30094E-01
He3  6.46882E-06 8.19412E-05
He4  6.57151E-01 2.51936E-01
C12  2.05912E-05 3.04480E-03
C13  5.63346E-06 3.64768E-05
N14  5.13761E-03 9.44078E-04
N15  2.25834E-07 3.69734E-06
O16  8.99719E-03 8.61328E-03
O17  7.99800E-04 3.47279E-06
Si28 5.87454E-03 5.24189E-03
Wrot 1.94190E+02 8.24763E-05  <-- qu'avec diffusion du moment cinétique

```

Les fichiers pour diagramme HR sont lus par la routine `lit_hr` du module `mod_exploit`.

B.3 Fichier ASCII des variables de la diffusion du moment cinétique

Le fichier ASCII des variables de la diffusion du moment cinétique est créé dans l'environnement du calcul suivant les circonstances décrites au § 2.10 (Page 29). Il peut être exploité par le programme de dessin `des2k_rot` du sous-directory `EXPLOIT`, cf. § 1.3 (Page 2).

en-tête :

- Lignes 1-4 : identification du modèle et physique utilisée.

- Ligne 5 : noms des variables dans l'ordre d'écriture.
- Ligne 6 : nombre, noms des éléments chimiques utilisés.
- Ligne 7 : nombre de couches, nombre total de variables, nombre de variables, d'éléments chimiques (redondant), identificateur de formalisme de diffusion de moment cinétique (3 pour Talon & Zhan 1997, 4 pour Mathis & Zahn 2004), indice de ^4He , numéro du modèle, indice de ^7Li .
- Ligne suivantes : **FORMAT(5es19.12)** variables et composition chimique.

Le modèle est listé du centre vers la surface. Exemple :

```
Fichier pour la diffusion du moment cinétique: 1.0_coeff_rota.dat
CESAM2k version V2.2.0 lagr colloc 2 3 pr no diffus, 18 Mai 2006 11h59
Physique utilisée: etat_eff, opa_yveline, conv_jmj, ppcno9, ctes_94, NACRE, diff_tz97
solaire_gn, lim_atm, hopf, pertm_ext, pertw_0, diffm_mp, diff_t_nu, diffw_mpz, diff_tz97
Variables : R, M, Omega, U, Theta, Psi, Lambda, Flux, Deff, Dh, Dv, T, ro, grad_mu, Xchim
10 H1 He3 He4 C12 C13 N14 N15 O16 O17 Si28
601 24 14 10 3 3 42 0
0.000000000000E+00 0.000000000000E+00 2.492796313373E-06 1.222009447047E-15-2.215093172271E-11
4.146564017724E-13 2.345111261140E-11-9.012551719834E-35 2.621399230830E+00 3.397109673134E+00
2.621399230830E+00 1.340098717163E+07 8.330731227990E+01 1.426753865039E-02 6.871377248045E-01
5.018205056432E-05 2.922381643859E-01 1.473316033117E-05 4.025153911526E-06 5.082420872692E-03
2.299827930187E-07 9.638362729473E-03 6.971562756039E-06 5.827185297122E-03
1.644625353770E-02 2.636507234666E-04 2.492796313373E-06 1.222009447047E-15-2.215093172271E-11
4.146564017724E-13 2.345111261140E-11-9.012551719834E-35 2.621399230830E+00 3.397109673134E+00
2.621399230830E+00 1.340098717163E+07 8.330731227990E+01 1.426753865039E-02 6.871377248045E-01
5.018205056432E-05 2.922381643859E-01 1.473316033117E-05 4.025153911526E-06 5.082420872692E-03
2.299827930187E-07 9.638362729473E-03 6.971562756039E-06 5.827185297122E-03
2.464852077382E-02 8.840621368772E-04 2.492616591912E-06 3.215689566074E-15-4.144404321209E-11
1.675631823126E-12 4.481166434756E-11-5.704344611195E-34 2.614052191228E+00 3.746479760886E+01
2.614052191228E+00 1.334650928015E+07 8.276105949309E+01 8.706470878900E-03 6.872913782734E-01
5.143754364837E-05 2.920832735684E-01 1.464390266467E-05 4.002793748349E-06 5.082554714526E-03
2.301323508453E-07 9.638504967128E-03 6.795246250354E-06 5.827178857934E-03

.....
.....

8.794865539306E-01 9.99999998874E-01 2.361680091400E-06-5.768386555867E-05 2.367155329527-282
-6.926405852191-289 3.012743146671-282-1.572130233500E-28 1.000000000000E+13 1.000000000000E+13
1.000000000000E+13 9.146301617794E+03 4.727352051188E-07 0.000000000000E+00 6.999999992655E-01
8.827001090114E-05 2.799117307236E-01 3.424868374763E-03 4.127760067609E-05 1.059003261745E-03
4.167448298824E-06 9.640129747024E-03 3.902528976547E-06 5.826651038552E-03
8.795031344698E-01 1.000000000000E+00 2.361680091400E-06-5.770215872484E-05 6.993868019057-283
-2.308801950730-289 1.022180710478-282-1.515562617419E-28 1.000000000000E+13 1.000000000000E+13
1.000000000000E+13 8.883218491357E+03 4.555466484484E-07 0.000000000000E+00 6.999999992655E-01
8.827001090114E-05 2.799117307236E-01 3.424868374763E-03 4.127760067609E-05 1.059003261745E-03
4.167448298824E-06 9.640129747024E-03 3.902528976547E-06 5.826651038552E-03
```

Bibliographie

- Adelberger, E., et al. : Solar Fusion Rates. *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1265–1291 (1998)
- Anders, E., Grevesse, N. : Abundances of the elements - Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 197–214 (1989)
- Angulo, C., Arnould, M., Rayet, M., and the NACRE collaboration : A compilation of charged-particle induced thermonuclear reaction rates. *Nuclear Physics A* **656**, 3–183 (1999)
- Böhm-Vitense, E. : Über die Wasserstoffkonvektionszone in Sternen verschiedener Effektivtemperaturen und Leuchtkräfte. *Zs. f. Astrophys.* **46**, 108 (1958)
- Canuto, V.M., Mazitelli, I. : Stellar turbulent convection - A new model and applications. *ApJ* **370**, 295–311 (1991)
- Caughlan, G.R., Fowler, W.A. : Thermonuclear Reaction Rates V. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **40**, 284–334 (1988)
- Cox, J.P., Giuli, R.T. : *Principles of Stellar Structure*, vol I & II. Gordon & Breach, New-York, (1968)
- Grevesse, N., Noels, A. : Cosmic Abundances of the Elements. In : Prantzos, E. Langioni-flam, M. Casse (eds.) *Origin and Evolution of the Elements*. Cambridge Univ. Press, 14, (1993)
- Grevesse, N., Sauval, A.J. : Standard Solar Composition. *Space Science Revue*, **85**, 161-174 (1998)
- Houdek, G., & Rogl, J. : On the accuracy of opacity interpolation schemes. *Bulletin of the Astronomical Socety of India* **24**, 317 (1996)
- Iglesias, C.A., & Rogers F.J. : Opacities for the solar radiative interior. *ApJ* **371**, 408–417 (1991)
- Lang, K.R. : *Astrophysical formulae*, Springer-Verlag Berlin (1968)
- Mathis, S., Zahn, J.P. : Transport and mixing in the radiation zones of rotating stars. I. Hydrodynamical processes, *A&A* **425**, 229–242 (2004)
- Mathis, S., Palacios, A., Zahn, J.P. : On shear-induced turbulence in rotating stars, *A&A* **425**, 243–247 (2004)

- Mihalas D., Dappen, W., Hummer, D.G. : The equation of state for stellar envelopes. II - Algorithm and selected results. *ApJ* **331**, 815–825 (1988)
- Mitler, H.E. : Thermonuclear ion-electron screening at all densities. I - Static solution. *ApJ* **212**, 513–532 (1997)
- Palacios, A., Talon, S., Charbonnel, C., Forestini, M. : Rotational mixing in low mass stars : I Effects of the μ gradient in main sequence and sub giant Pop I stars. *A&A* **399** 603–617 (2003]
- Waldron, W.L. : Stellar winds : Observational evidence for a hot-cool star connection. In NASA. Goddard Space Flight Center The Origin of Nonradiative Heating/Momentum in Hot Stars *A.Ap* **229**, 95-100 (1985)