# Nucléosynthèse dans les étoiles de la branche asymptotique: du coeur dégénéré à l'enveloppe circumstellaire

## Présentation des AGB.

- Structure interne et externe
- Spécificités des AGB

## Contexte de ce travail.

- Deux observations: deux mystères
- Deux paramètres déterminants l'évolution des AGB

## Observations d'enveloppes circumstellaires

- Pourquoi Les étoiles de type "J"?
- Interprétation des raies rotationnelles observées
- Modèle de transfert de rayonnement utilisé
- Conclusion

## Modélisation du Dredge-up

- Tests pertinents et leurs implications
- Changement de l'équation d'état
- Processus de mélange et frontières convectives
- Résultats

## Perspectives

# Le "Mystère des étoiles carbonées"

## Observationellement ...

Au dessus de $M_{bol}^{max} = -6$, plus d'AGB carbonées $(C/O > 1)$ ?
(Cohen et al. 1981)
Si, mais enfouies dans une épaisse enveloppe circumstellaire.
(Van Loon et al. 1999)

Observations $\longrightarrow$ concurrence Hot Bottom Burning/Dredge-up

## Influence du Hot Bottom Burning (HBB)

$\longrightarrow$ empèche l'étoile de devenir carbonée.

- Transformation $C \longrightarrow N$ à la base de l'enveloppe
- Requiert des "hautes" températures $\longrightarrow M > 5$ M$_\odot$
- Cesse lorsque $\dot{M} \propto L$ atteint une valeur limite:
  C/O peut alors monter.

## Influence du Dredge-up (DUP)

$\longrightarrow$ apport de Carbone dans l'enveloppe d'autant plus important...

- que sa profondeur est importante
- qu'il apparaît tôt durant la phase AGB
- que le nombre total de DUP est important (dépend de $\dot{M}$)

# Le "Mystère des étoiles S"

## Observations ...

Surabondance d'éléments plus lourds que le Fer.
Historiquement, Merrill (1951) observe du Technétium à durée de vie inférieure à la phase AGB
$\longrightarrow$ synthèse pendant la phase AGB.

## Origine

Eléments "s"

Captures de neutrons

Source

Conditions ($\rho$,T)

| | |
|---|---|
| $^{13}C(\alpha, n)^{16}O$ | T>$10^8$ K, radiatif, intercouche |
| $^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg$ | T>3.5 $10^8$ K, convectif, pulse |

## Influence du DUP

D'où vient le $^{13}C$ nécessaire au processus "s" ?

$$^{12}C(p,\gamma)^{13}N(\beta^+)^{13}C$$

$\longrightarrow$ le DUP comme source de protons.
$\longrightarrow$ on commence tout juste à savoir faire !

# Deux paramètres déterminants l'évolution des AGB

## Perte de masse

- Contrôle la fin de la phase AGB (nombre de pulses et de DUP)
- A $M_*$ fixée
  perte de masse $\longleftrightarrow$ température à la base de l'enveloppe convective
- Modélisation très difficile (pulsations, formation de poussière, mécanisme d'accélération, couplage gaz/poussière...)
- Relations empiriques établies à partir des observations (cas particuliers, évolution $\dot{M}(t)$ ?)

## Traitement du Dredge-up

Protons (intercouche), Carbone et éléments "s" (surface) en dépendent. Modélisation complexe à cause du gradient de composition:

- critère de localisation de la frontière convective (Schwarzschild, overshooting, semiconvection)
- nature du transport turbulent, souvent modélisé par du mélange lent (cisaillement...)
- aspects numériques (discrétisation, algorithme de mélange, ...)
  $\longrightarrow$ Très code-dépendant

Un même processus physique pour obtenir une poche de $^{13}C$ et un Dredge-up plus profond ?

# Etoiles de type “J”

## Caractéristique

Etoiles à faible rapport isotopique du Carbone:

$^{12}$C /$^{13}$C$< 10$ contre $[3, 100]$ pour les AGB

## Intéret du rapport $^{12}$C /$^{13}$C

$\frac{^{12}C}{^{13}C}$ dépend de tous les épisodes de mélange et de nucléosynthèse.

| Rapport $\frac{^{12}C}{^{13}C}$ en surface | 3 $M_\odot$ | 4 $M_\odot$ | 5 $M_\odot$ | 6 $M_\odot$ |
|---|---|---|---|---|
| Dredge-up | $\nearrow$ | $\nearrow$ | $\nearrow$ | $\nearrow$ |
| Hot Bottom Burning | 0 | 0 | $\searrow$ | $\searrow$ |
| Total | $\nearrow$ | $\nearrow$ | ? | ? |

(d’après Forestini et al (1997) et pour Z=0.02)

$\longrightarrow$ DUP(couche d’Hydrogène, Pulse)

$\longrightarrow$ Total($\dot{M}$,profondeur du DUP)

## Intéret d’une mesure radio

- apport d’une détermination par une autre méthode (transitions rotationnelles des molécules)
- modèle bien contraint avec plusieurs raies
- l’analyse révèle la structure de l’enveloppe circumstellaire $(R, \dot{M})$.
- donne des barres d’incertitudes de l’ordre de 15% en utilisant des détecteurs récents et des molécules abondantes.

(Les enveloppes sont moins facilement opaques aux ondes radio.)

# Conclusions

## Résultats

- $\dot{M}$ est faible: $1 \cdot 10^{-7} < \dot{M} < 3 \cdot 10^{-7}$ $M_\odot \cdot yr^{-1}$
- $r_{CO}$ trouvés compatibles avec les rayons de photodissociation issus de modèles chimiques pour CO (Mamon et al. 1985)
- $\tau(^{12}C^{32}S) > \tau(^{13}C^{32}S) > \tau(^{12}C^{16}O) > \tau(^{13}C^{16}O)$
  $\longrightarrow$ le transfert radiatif n'est pas nécessaire
  rapport des intensités = rapport d'abondances moléculaires
- Comparaison CO et CS: effets chimiques négligeables
  $\longrightarrow$ rapport des intensités = rapport d'abondances atomiques
- Pour les quatre sources:
  $^{12}C/^{13}C \sim$ rapport d'équilibre du cycle CNO.

## Interprétation

Les valeurs de $^{12}C/^{13}C$, $\dot{M}$ et $C/O > 1$ (photosphérique) sont difficilement conciliables:

- $\dot{M}$ est cohérent avec les faibles masses
- $C/O > 1$ est cohérent avec les faibles masses
- $^{12}C/^{13}C$ est cohérent avec les masses intermédiaires

Mais

$\longrightarrow$ La prise en compte de transport lent dès la phase RGB pourrait réconcilier les trois valeurs. Une "petite révolution" !

$\longrightarrow$ On peut toujours supposer un phénomène de binarité (transfert de masse).

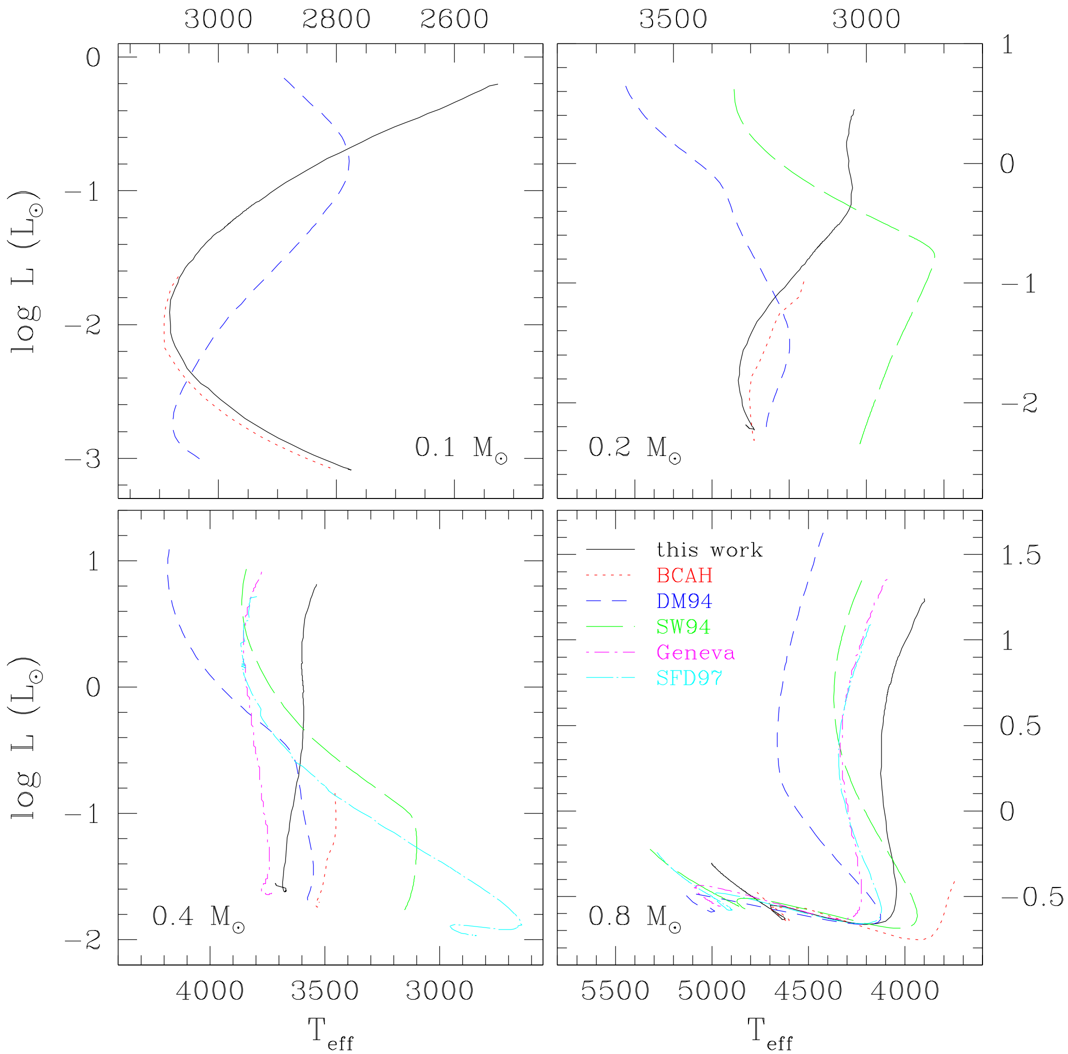
# Equation d'état...

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">Ancienne méthode</th></tr>
<tr><td>Entrées<br>Sorties</td><td colspan="2">$(\rho, T, Y_i)$<br>$(P, u) \rightarrow (\nabla_{ad}, C_P, q)$...</td></tr>
<tr><td>$q$</td><td colspan="2">$(P, u)$ ou $(T, P)$</td></tr>
<tr><td>$(\mathbf{P}, \mathbf{u})$</td><td colspan="2">$P = P_\gamma + P_e + P_{ion} + \Delta P$<br>$u = u_\gamma + u_e^i + u_{ion} + \Delta u$</td></tr>
<tr><td>$\mathbf{\Delta P}$</td><td colspan="2">Ecrantage de Coulomb<br>Modèle de Debye-Hückel<br>$\eta_e \ll 0$ $\Gamma \ll 1$</td></tr>
<tr><td>$\mathbf{P_e}$</td><td colspan="2">? $\eta_e$ ?<br>$P_e^{ND}$ ou $P_e^{D}$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">$\mathbf{P_e^D}$</td><td>$\eta_e$</td><td>- Ionisation $\longrightarrow n_e$<br>- Inversion numérique itérative d'une équation intégrale fonction de $n_e$</td></tr>
<tr><td>Ionisation</td><td>- Valable en milieu non dégénéré (équation de Saha)<br>- Résolution numerique itérative d'un système d'équations non linéaires<br>- Critère de complète ionisation</td></tr>
<tr><td colspan="2">Passages supplémentaires $\longrightarrow$ dérivées</td></tr>
<tr><td>$\mathbf{P_e^{ND}}$</td><td colspan="2">Calcul à partir de $n_e$ et $\rho$</td></tr>
</table>

## ...rénovation.

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">Nouvelle méthode<br>(basée sur Pols et al., 1995)</td><td>Comparaison</td></tr>
<tr><td>Entrées<br>Sorties</td><td colspan="2">$(lnf, lnT, Y_i)$ $\quad lnf \sim \eta_e$<br>$(P, s) \rightarrow (\nabla_{ad}, C_P, q, u, \rho)$</td><td>$\forall \eta_e$, lnf “bonne variable”<br>Calcul sans approximations</td></tr>
<tr><td>$(P, s)$</td><td colspan="2">$F = F_\gamma + F_e + F_{ion} + \Delta F$<br>$-\left.\frac{dF_i}{dT}\right|_{V,N_i} \qquad -\left.\frac{dF_{i\neq e}}{dV}\right|_{T,N_i}$</td><td>Cohérence<br>thermodynamique totale</td></tr>
<tr><td>$\epsilon_{grav}$</td><td colspan="2">$s$ ou $(P, u)$ ou $(T, P)$</td><td>Equivalence<br>Dépend des abondances</td></tr>
<tr><td>$\Delta F$</td><td colspan="2">Ecrantage de Coulomb<br>Un seul ajustement pour<br>Graboske et al. (1969)<br>$\forall \eta_e \qquad \Gamma \ll 1$<br>Slattery et al. (1980)<br>$\eta_e \gg 0 \qquad 1 < \Gamma < 300$<br>Ionisation par pression<br>Ajusté sur Mihalas et al. (1988)</td><td>Validité $(\rho, T)$ étendue<br>Validité en couplage fort<br>Additivité de $\Delta F$<br><br><br><br>Réalisme de<br>l’ionisation par pression</td></tr>
<tr><td>$P_e$</td><td colspan="2">Polynôme de $(lnf, T)$ ajusté</td><td>Dérivées analytiques<br>Coupure numérique<br>Cohérence avec $s_e$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">$\rho = \frac{n_e}{N_e}$</td><td>$n_e$</td><td>Polynôme de $(lnf, T)$ ajusté</td><td>Rapidité (calcul de $n_e$,<br>qualité des dérivées)<br>Valable $\forall \eta_e$, cohérence</td></tr>
<tr><td>$N_e$</td><td>Ionisation $\longrightarrow N_e$</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>Saha généralisée $(lnf, T)$<br>contraint par la<br>conservation de la masse</td><td>Partielle ionisation $\forall X$<br>Fonctions de partition $(T)$<br>Extension des ionisables<br>Ajout de $H_2$ et $H^-$<br>Rapidité (écriture des rapports<br>et dérivées analytiques)</td></tr>
</table>

# Equation d'état et étoiles PMS




## Comparaison

Forme: équation d'état

Décalage: atmosphère ou convection

## Conséquences

Extension de la validité des tracés jusqu'à 0.1 $M_\odot$

Différence constante en $T_{eff}$: traitement de l'atmosphère

Différences à masse plus élevée: traitement des "lourds"

Equivalence des écritures de $dQ$

# Mélanges

## Overshooting

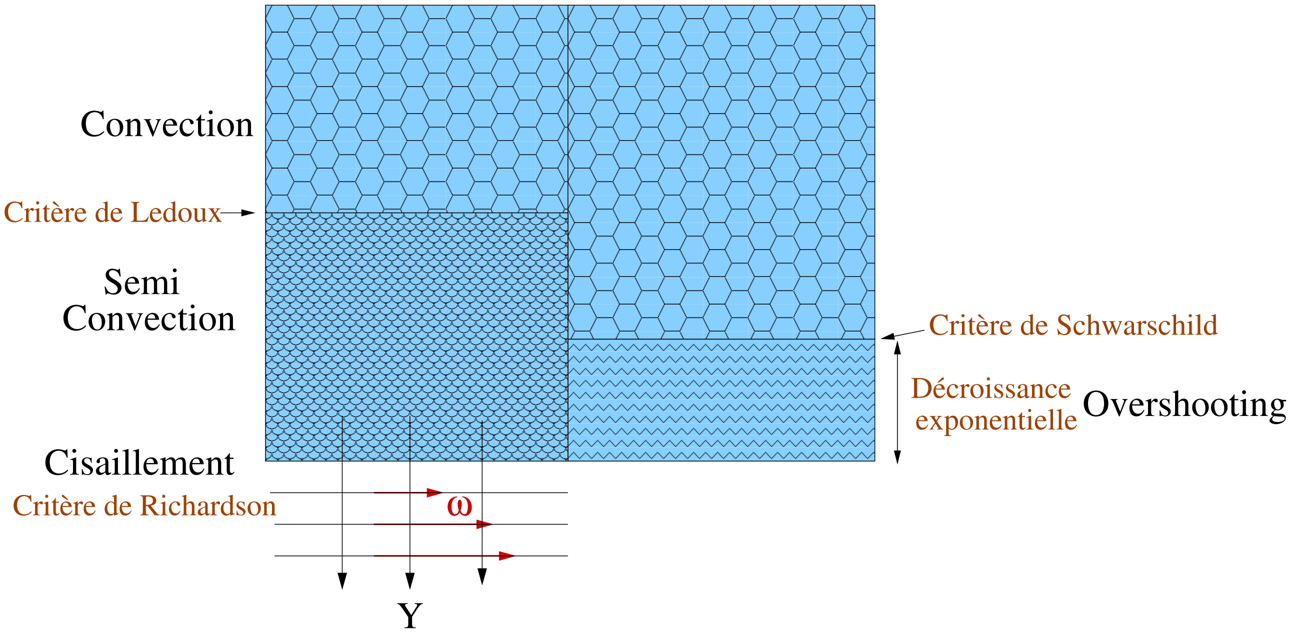
- Prise en compte de la vitesse non nulle à la frontière convective
- Diffusion amortie exponentiellement (Herwig et al. 1997)

## Semi-convection

- Inhibation de l'insabilité convective si $\nabla_\mu$ est trop fort.
- Instable par rapport aux vibrations: de petits mouvements s'amplifient

## Cisaillement

- Le gradient radial de vitesse (fortement soupçonée à la phase AGB) favorise l'instabilité
- Formalisme de Maeder (1998): couplage de l'instabilité de cisaillement et de la semiconvection.




## Implémentation

- Mélange lent implémenté par une équation de diffusion
- Résolution par méthode robuste: éléments finis.

# Tests autour du troisième Dredge-up

## Objectif

Algorithme performant (physique adaptée, peu ou pas de de paramétres, efficacité) de traitement du DUP

Limitation: on reste à une dimension

## Tests pertinents

| Code | Explication |
|---|---|
| | Numérique |
| SHL | Nombre de couches multiplié par 2 |
| SHL2 | Nombre de couches multiplié par 3 |
| TIM | Nombre de pas de temps multiplié par 10 |
| | Equation d'état |
| ION | Addition de l'ionisation de C,N,O et Ne. |
| EGS | Réécriture de $\epsilon_{grav}$ avec l'entropie |
| FDT | Calcul exact des intégrales de Fermi-Dirac |
| | Frontières convectives |
| LED | Utilisation du critère de Ledoux |
| STA | Recherche d'une frontière convective stable |
| MIX | Mélange convectif à chaque itération |
| | Processus de mélange |
| DOV | Addition de l'Overshooting |
| SCO | Addition de la semi-convection |
| SHR | Addition du mélange induit par cisaillement |

## Intéret

- Isoler chaque influence, toutes choses égales par ailleurs
- Faire tous ces tests avec le même code
- Vérifier certaines dépendances de la littérature

# Résultats

## Augmentation de la profondeur du Dredge-up

| Code | STD | SHL | SHL2 | TIM | ION | EGS | FDT | LED | STA | MIX | DOV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta M_{dup}$ | 0.99 | 1.07 | 1.05 | 1.59 | 1.30 | 1.04 | 1.08 | -0.25 | 3.61 | 2.38 | 1.97 |

### Sans effets: SHL, EGS, FDT

Validation de l'eos, désaccord avec Straniero et al. (1996), aussi trouvé par Lattanzio et al. (1998)

### Réduction: LED

Normal: possibilité de pénétration réduite par fort $\nabla_\mu$ sans traitement de la semi-convection.

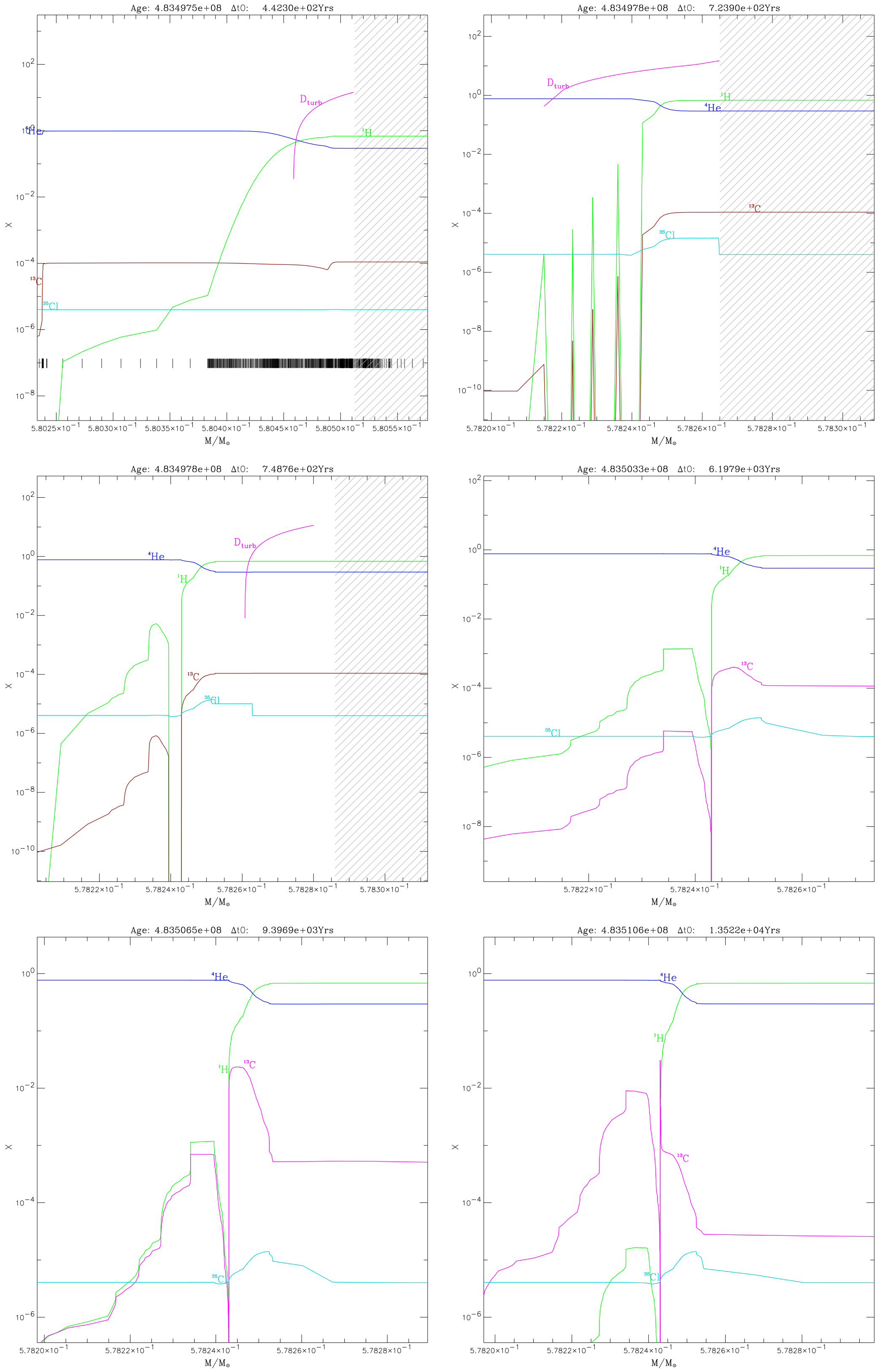
### Augmentation: ION, TIM, DOV, MIX, STA

- Accord qualitatif avec Straniero et al. (TIM)
- Les trois algorithmes de mélanges permettent d'augmenter la profondeur du Dredge-up.
- Confirme une forte influence de la méthode numérique utilisée (différence MIX, STA) comme trouvé par Lattanzio et al. (1997).

### En cours: SCO, SHR

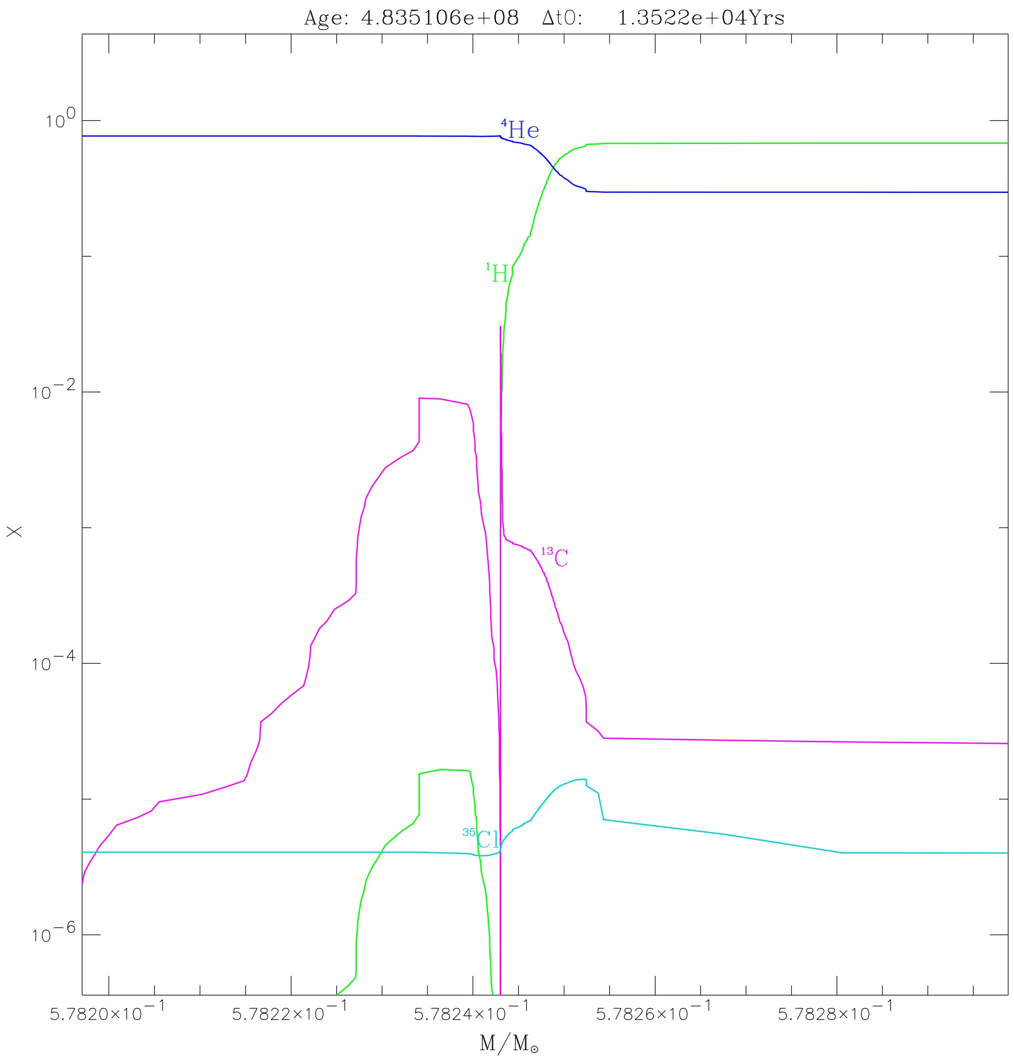
# Résultats

## Transport lent de protons



# Résultats

## Diffusion des protons (DOV)




## Conclusion

L'overshooting permet **à la fois**:

- d'augmenter la profondeur du dredge-up
- et de produire une poche de $^{13}$C

⟶ un même phénomène physique aide donc à comprendre qualitativement les étoiles carbonées de faibles masses et la production d'éléments "s".

# Conclusion - Perspectives

## Technique

- Le code d'évolution stellaire est maintenant très performant pour la modélisation des AGB
- Amélioration par la possibilité d'y faire du processus "s"
- Amélioration de l'ionisation par presssion dont le traitement est très approximatif.
- Fin des tests sur le DUP (semiconvection, cisaillement, combinaisons).
- Détermination d'un algorithme de traitement efficace au vue des tests.

## Méthode

- Eviter les cas particuliers:
  Eviter d'ajouter des paramètres libres pour puvoir "ajuster" les modèles à chaque observation de manière had-hoc et ponctuelle.
  $\longrightarrow$ Modéliser la physique sous-jacente valablement pour toutes les conditions renceontrées.
- Cohérence RGB-AGB Les deux approches, observations et la modélisation, rencontrent des difficultés à la phase AGB: incohérence $\dot{M}$, $^{12}\mathrm{C}/^{13}\mathrm{C}$, et $C/O > 1$, difficultés rencontrées dans la modélisation du DUP,...
  $\longrightarrow$ modéliser correctement la phase RGB, avec les processus physiques identifiés (transport lent), pour commencer la phase AGB avec un "modèle initial" dont la physique est cohérente à celle utilisée à la phase AGB.