

# Évolution Stellaire multi-dimensionnelle

Michel Rieutord

Observatoire Midi-Pyrénées

# Plan

1. Enjeux Astrophysiques
2. Les challenges
3. Forces et expertises
4. Exemple de MesoNH
5. le Projet ESTER

# Enjeux Astrophysiques

Trois exemples de types d'étoiles qui nécessitent plus particulièrement plus d'une dimension :

1. Les étoiles en rotation (2D)
2. Les étoiles magnétiques (3D)
3. les étoiles doubles serrées (3D)

## Cependant

- ✓ Il existe des étoiles non-magnétiques
- ✓ il existe des étoiles simples
- ✓ mais il n'existe pas d'étoile sans rotation

Trois dimensions sont nécessaires pour traiter tous les cas

**Le passage à 2 dimensions sera une étape majeure.**

# Raisons d'être d'un modèle bidimensionnel

Problèmes fondamentaux liés à la rotation :

- ✓ Les zones radiatives ne sont plus en équilibre
- ✓ Les pertes de moment angulaire accentuent ce déséquilibre
- ✓ Apparition de mouvements à grande échelle
- ✓ Modification de l'abondance des éléments

# Les limites de l'approche unidimensionnelle

Le mélange rotationnel à une dimension, c'est le modèle de Zahn 1992 :

- ✓ l'advection devient une diffusion turbulente
- ✓ la turbulence joue un rôle fondamental de redistribution horizontale

**Pas de marge de progression possible car la dynamique des fluides est trop condensée.**

# Les oscillations stellaires

Le spectre des oscillations est fortement modifié par la rotation :

- ✓ Accélération de Coriolis
- ✓ Déformation centrifuge
- ✓ Remodelage des zones excitatrices

# Les données

- ✓ du VLT/VLTI (cf Achernar)
- ✓ SOHO, COROT, EDDINGTON, GAIA
- ✓ Espadons, Narval, Sophie,.....



## En résumé :

Construire des modèles d'étoile bidimensionnels permet une approche cohérente pour évaluer **les effets de la rotation aux grandes échelles de temps** sur la composition chimique d'une étoile et sur son spectre d'oscillation.

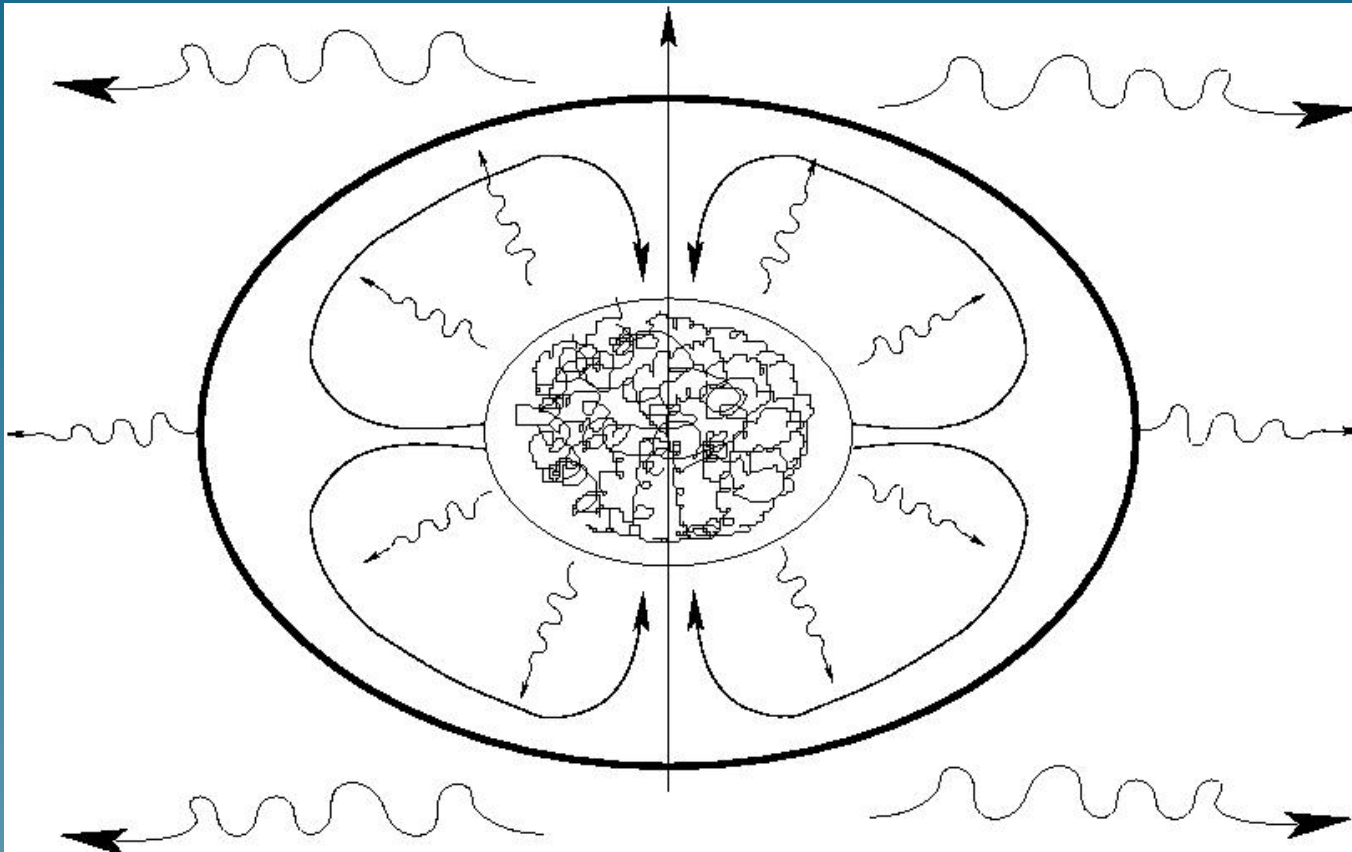


FIG. 1: Coupe schématique d'une étoile massive.

# Les challenges de la modélisation

- ✓ Extraction du moment angulaire de l'étoile
- ✓ L'atmosphère et son raccord à l'intérieur stellaire
- ✓ La turbulence en zone convective : connaître les champs moyens :
  - $\langle \vec{B} \rangle$ ,  $\langle \vec{v} \rangle$  en particulier  $\Omega(r, \theta)$
  - $\langle v'_i v'_j \rangle$ ,  $\langle \vec{v} \wedge \vec{b} \rangle$ ,  $\langle \delta T \vec{v} \rangle$

- ✓ La turbulence en zone radiative
- ✓ Les tachoclines (interface zone radiative/zone convective).
- ✓ La turbulence des zones semi-convectives
- ✓ La turbulence des couches de combustion
- ✓ ...

Pour tous ces phénomènes il faut des modèles d'ordre 0, 1, 2....

## Les équations du problème

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \Delta\phi = 4\pi G\rho \\
 \\
 \frac{D\vec{v}}{Dt} + 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v} = -\vec{\nabla}P - \vec{\nabla}(\phi + \phi_c) + \overrightarrow{Div} \langle \rho v'_i v'_j \rangle \\
 \\
 \rho T \frac{Ds}{Dt} = \text{div}(\chi \vec{\nabla}T) + D + Q \\
 \dots \\
 \\
 P \equiv P(\rho, T), \quad \chi \equiv \chi(\rho, T), \dots
 \end{array} \right. \quad (1)$$

# Evolution stellaire : les grandes lignes de l'algorithme

- ✓ Conditions initiales : Masse, Rotation, Composition chimique.
- ✓ Solution quasi-statique
- ✓ Evolution temporelle

# Difficultés

De multiples échelles de temps interviennent :

- ✓ Evolution nucléaire
- ✓ Diffusion microscopique et turbulente
- ✓ Advection en zone radiative
- ✓ Perte de masse
- ✓ Perte de moment angulaire

# Forces et expertises de la communauté française

## Codes d'évolution stellaire unidimensionnels :

- ✓ CESAM (Nice, Meudon, CEA) Expertise associée : Hélio/Astérosismologie de précision, discrétisation sur les B-splines
- ✓ STAREVOL (Grenoble-Bruxelles) Expertise associée : mélange rotationnel et phases avancées
- ✓ CTG (Code Toulouse-Genève) Expertise associée : mélange rotationnel, phases avancées, étoiles massives....



## Problèmes Stellaires bidimensionnels

- ✓ ER : Calcul d'une Zone radiative en rotation rapide (géométrie sphéroïdale) (Toulouse)
- ✓ Expertise sur l'approche non-perturbative du rôle de la déformation centrifuge du spectre acoustique d'une étoile bipolytropic (Toulouse)
- ✓ Expertise sur l'interaction non-perturbative modes de gravité et rotation ; oscillation magnéto-acoustiques (Toulouse)
- ✓ Interaction Convection- Pulsation (projet Lyon-Toulouse)

# Problèmes tridimensionnels

## Convection/Dynamo

- ✓ Globale : ASH (S. Brun - Boulder)
- ✓ Locale : Boîte périodique horizontalement
  - ✗ Avec transfert radiatif (Samadi/Nordlund)
  - ✗ Sans transfert mais avec  $\vec{B}$  ; spectral+DFC (Rincon/Lignières)
  - ✗ Sans transfert mais avec  $\vec{B}$  ; Splines cubique (Dintrans/Brandenburg)

**Atmosphères** : Montpellier/Nice

**Microphysique** : Lyon/CEA/Nice

**Conclusions** : La communauté française de physique stellaire possède toutes les expertises nécessaires pour accomplir la révolution que sera la mise au point d'un code d'évolution bidimensionnel.

## Exemple d'un projet abouti : MesoNH

- ✓ Modélisation méso-échelle (100 km) de l'atmosphère terrestre.
- ✓ 400 000 lignes de codes en fortran 90
- ✓ Dimensionnalité = 1,2 ou 3
- ✓ Environ 60 utilisateurs. Interprétation des observations et modélisation des processus.
- ✓ Maintenance : deux équipes de 5 personnes.

# Le projet : ESTER

## Evolution STEllaire en Rotation

Modélisation avec 2 dimensions d'espace + Evolution en temps

Les courtes échelles de temps (turbulence) sont représentées par leurs effets moyens.

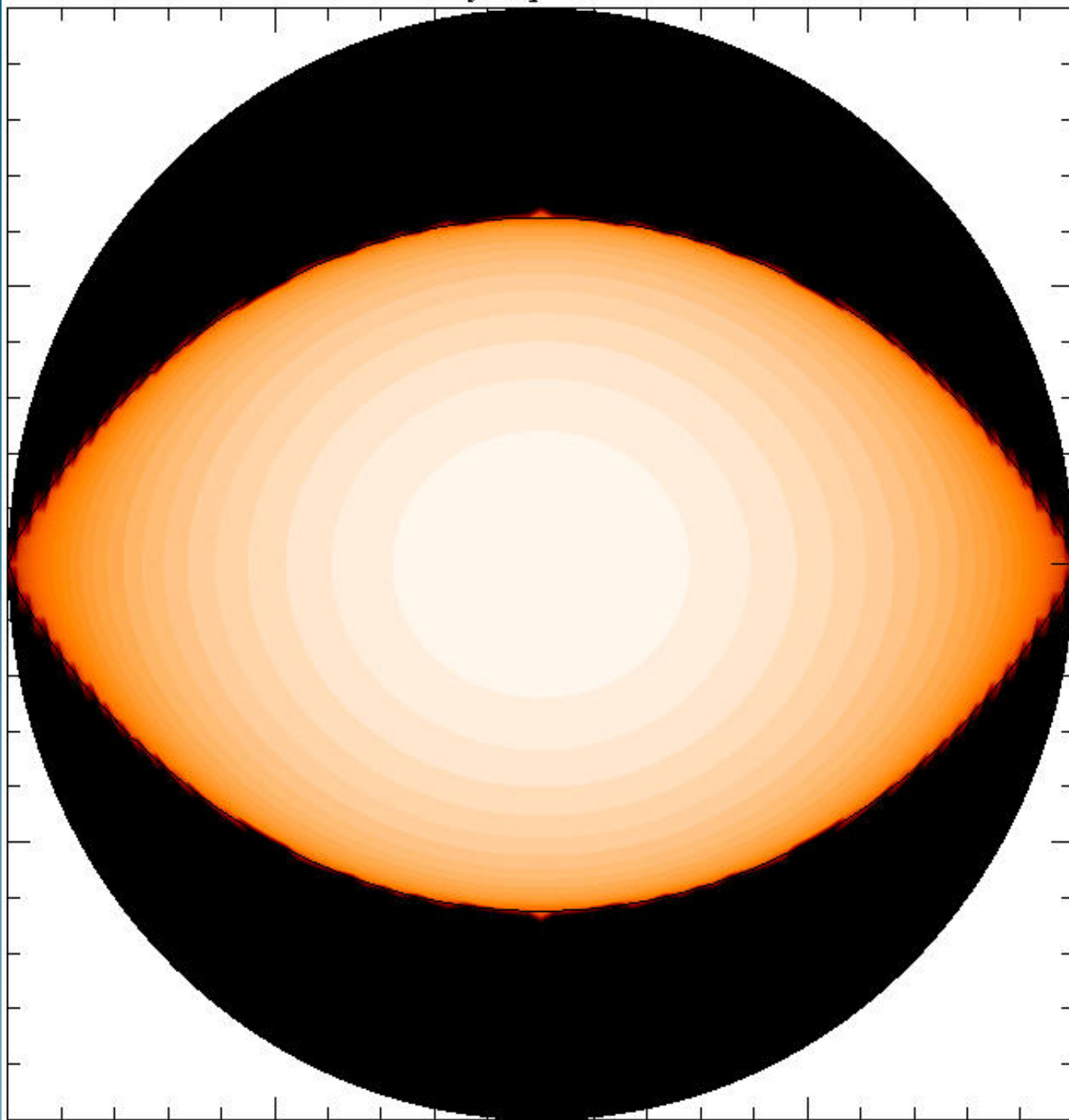


FIG. 2: Polytrope  $n=3/2$  en rotation maximale.

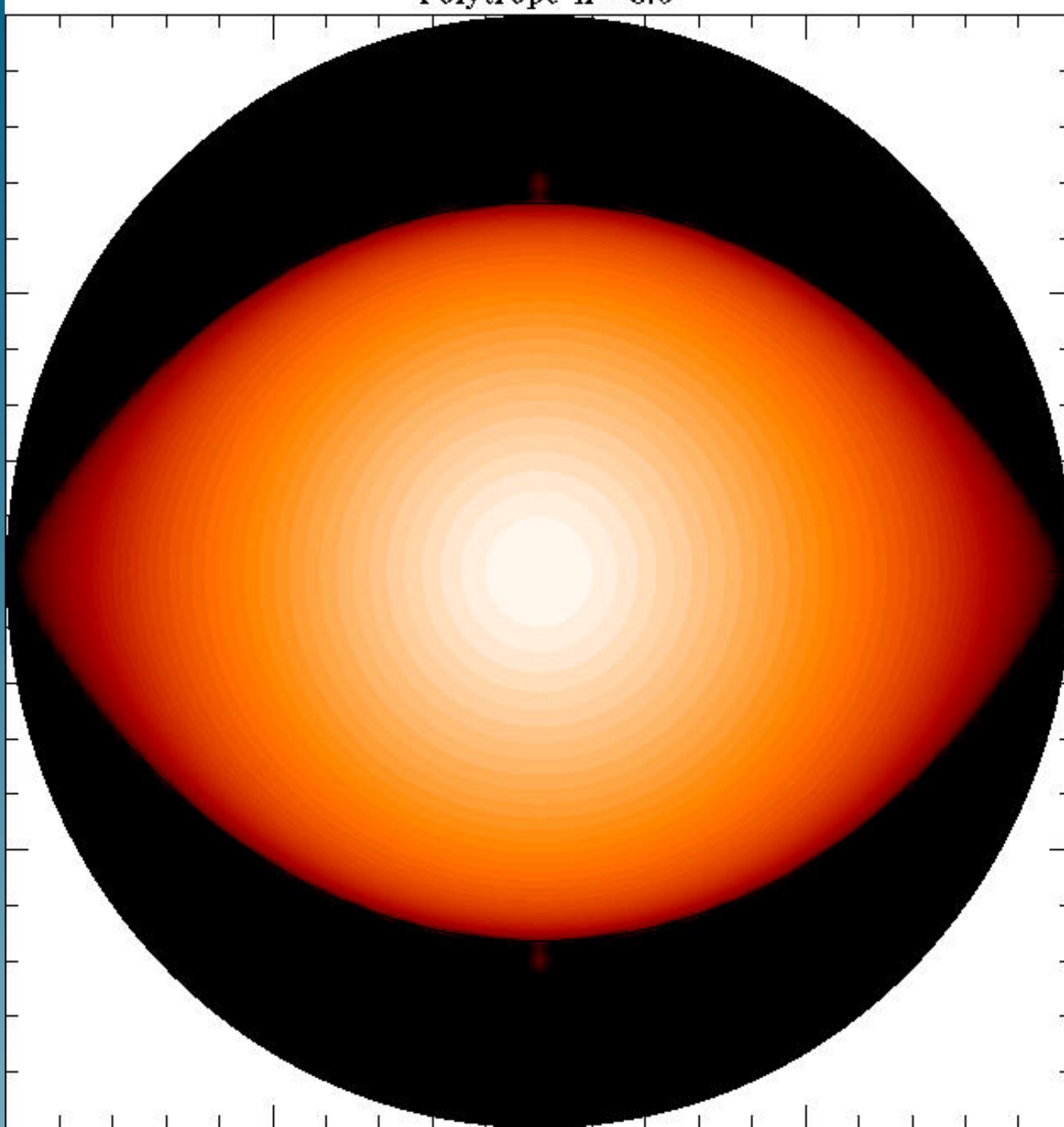


FIG. 3: Polytrope  $n=3$  en rotation maximale.





## Calendrier :

- ✓ Printemps 2004 : Cahier des charges/ plan détaillé de réalisation
- ✓ Livraison en 2006 pour le lancement de COROT.

Equipes concernées : Lyon, Montpellier, Nice, Paris-Meudon, SAp, Toulouse

**FIN**