

Chauffage turbulent et refroidissement des boucles coronales

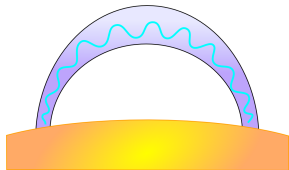
É. Buchlin

P.J. Cargill, S.J. Bradshaw, M. Velli*

Space and Atmospheric Physics Department,
Blackett Laboratory, Imperial College, Londres

* Jet Propulsion Laboratory et Università di Firenze

Semaine de l'Astrophysique Française – 03 Jul 2007



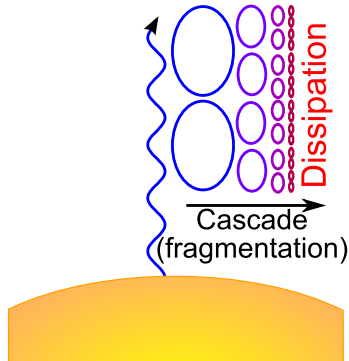
**Imperial College
London**

Chauffage coronal aux petites échelles, et turbulence

Origine, transport, conversion de l'énergie?

Mécanismes de dissipation (d'ondes, reconnexion...) *pas assez efficaces aux grandes échelles* (observables, > 100 km)

→ Dissipation aux *petites échelles*, qui peuvent être créées par la *turbulence* (e.g. Heyvaerts & Priest 1992)



Indices de *turbulence* et *petites échelles* dans la couronne:

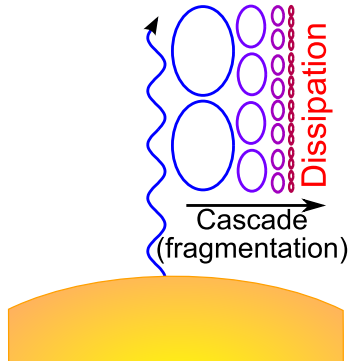
- ▶ Large intervalle d'échelles observables (espace et temps)
- ▶ Spectres de Fourier et distributions de structures observables (Berghmans et al. 1998... Buchlin et al. 2006)
- ▶ Nombre de Reynolds attendu: 10^{10} – 10^{13}

Chauffage coronal aux petites échelles, et turbulence

Origine, transport, conversion de l'énergie?

Mécanismes de dissipation (d'ondes, reconnexion...) *pas assez efficaces aux grandes échelles* (observables, > 100 km)

→ Dissipation aux *petites échelles*, qui peuvent être créées par la *turbulence* (e.g. Heyvaerts & Priest 1992)



Indices de *turbulence et petites échelles* dans la couronne:

- ▶ Large intervalle d'échelles observables (espace et temps)
- ▶ Spectres de Fourier et distributions de structures observables (Berghmans et al. 1998... Buchlin et al. 2006)
- ▶ Nombre de Reynolds attendu: 10^{10} – 10^{13}

Simulations numériques de turbulence coronale

De nombreuses *difficultés pour les simulations numériques directes*:

- ▶ Large intervalle d'échelles, très grand nombre de Reynolds
 - Résolution
 - Physique multi-échelles
- ▶ Physique non-linéaire, turbulence

→ *Alternatives aux simulations numériques directes*:

Simulations numériques de turbulence coronale

De nombreuses *difficultés pour les simulations numériques directes*:

- ▶ Large intervalle d'échelles, très grand nombre de Reynolds
 - Résolution
 - Physique multi-échelles
- ▶ Physique non-linéaire, turbulence

→ *Alternatives* aux simulations numériques directes:

- ▶ *Automates cellulaires*:

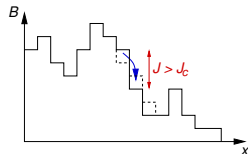
Lu & Hamilton 1991, Vlahos et al. 1995,

Buchlin et al. 2003...

SOC, avalanches → MHD

- ▶ *Modèles en couches* (scalaires):

- Hydro: Gledzer, Ohkitani, Yamada 1973–1987
- MHD: Gloaguen, Léorat, Pouquet & Grappin 1985,
Biskamp 1994, Frick, Boffetta, Giuliani 1998–2002...
- Hall-MHD: Galtier & Buchlin 2007



Simulations numériques de turbulence coronale

De nombreuses *difficultés pour les simulations numériques directes*:

- ▶ Large intervalle d'échelles, très grand nombre de Reynolds
 - Résolution
 - Physique multi-échelles
- ▶ Physique non-linéaire, turbulence

→ *Alternatives* aux simulations numériques directes:

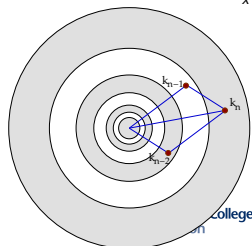
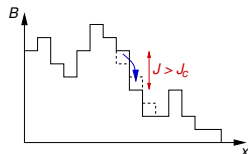
▶ *Automates cellulaires*:

Lu & Hamilton 1991, Vlahos et al. 1995,
Buchlin et al. 2003...

SOC, avalanches → MHD

▶ *Modèles en couches* (scalaires):

- Hydro: Gledzer, Ohkitani, Yamada 1973–1987
- MHD: Gloaguen, Léorat, Pouquet & Grappin 1985,
Biskamp 1994, Frick, Boffetta, Giuliani 1998–2002...
- Hall-MHD: Galtier & Buchlin 2007



Chauffage: Modèles en couches MHD pour une boucle coronale

1 *Introduction*

- Chauffage coronal aux petites échelles
- Simulations numériques de turbulence coronale

2 *Chauffage: Modèles en couches MHD pour une boucle coronale*

- Modèle numérique
- Résultats

3 *Couplage chauffage-refroidissement*

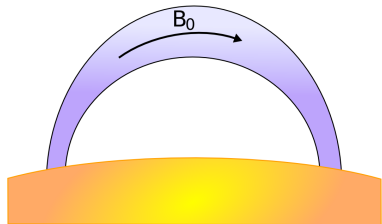
- Motivation
- Modèle
- Premiers résultats

4 *Conclusions et perspectives*

Chauffage: Modèle en couches pour une boucle coronale

<http://www.arcetri.astro.it/~eric/shell-atm/codedoc/>

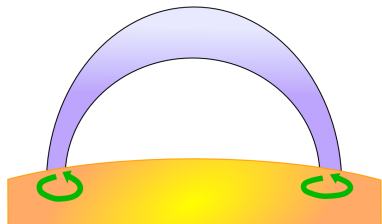
- ▶ Géométrie d'une boucle coronale
- ▶ Vitesse imposée à la photosphère
- ▶ Ondes d'Alfvén
- ▶ Termes non-linéaires de la MHD, *turbulence*: Modèles en couches



Chauffage: Modèle en couches pour une boucle coronale

<http://www.arcetri.astro.it/~eric/shell-atm/codedoc/>

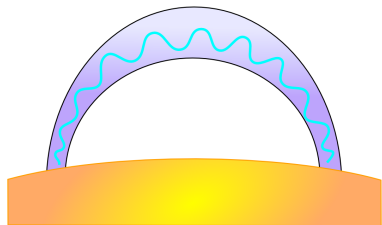
- ▶ Géométrie d'une boucle coronale
- ▶ Vitesse imposée à la photosphère
- ▶ Ondes d'Alfvén
- ▶ Termes non-linéaires de la MHD, turbulence: Modèles en couches



Chauffage: Modèle en couches pour une boucle coronale

<http://www.arcetri.astro.it/~eric/shell-atm/codedoc/>

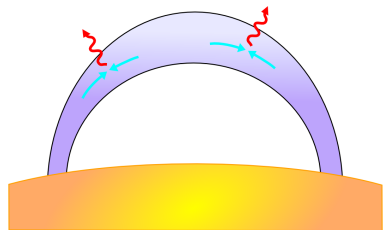
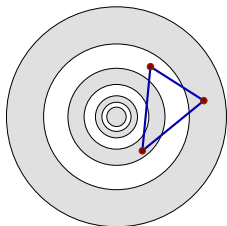
- ▶ Géométrie d'une boucle coronale
- ▶ Vitesse imposée à la photosphère
- ▶ Ondes d'Alfvén
- ▶ Termes non-linéaires de la MHD, turbulence: Modèles en couches



Chauffage: Modèle en couches pour une boucle coronale

<http://www.arcetri.astro.it/~eric/shell-atm/codedoc/>

- ▶ Géométrie d'une boucle coronale
- ▶ Vitesse imposée à la photosphère
- ▶ Ondes d'Alfvén
- ▶ Termes non-linéaires de la MHD, *turbulence*: Modèles en couches



Avantages:

- ▶ *grand Reynolds* ($\approx 10^6$)
- ▶ longues simulations \rightarrow *statistiques*

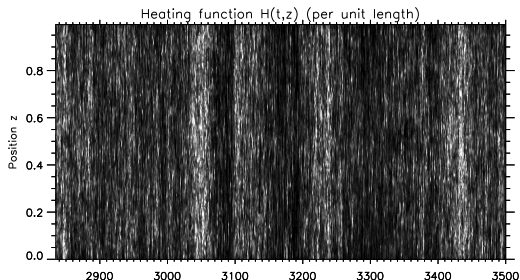
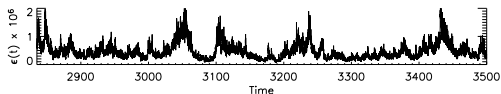
Rapide aperçu des résultats sur le chauffage

Buchlin & Velli, ApJ 2007; voir aussi Nigro et al. 2004–2005

- ▶ *Fonction de chauffage:*
 - *suffisante* pour chauffer la couronne
 - est intermittente

Plus:

- ▶ Lois de puissance des événements
- ▶ Déclenchement des événements suite à des variations du spectre de turbulence
- ▶ Transfert spectral anisotrope (en k_{\perp} et k_{\parallel})
- ▶ Résonances et paquets d'ondes



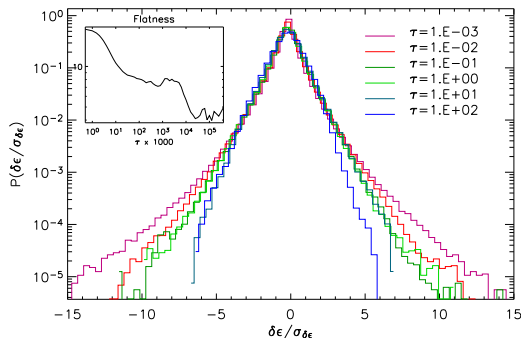
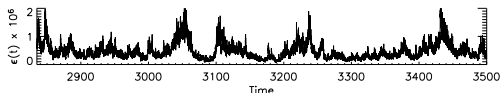
Rapide aperçu des résultats sur le chauffage

Buchlin & Velli, ApJ 2007; voir aussi Nigro et al. 2004–2005

- ▶ Fonction de chauffage:
 - suffisante pour chauffer la couronne
 - est *intermittente*

Plus:

- ▶ Lois de puissance des événements
- ▶ Déclenchement des événements suite à des variations du spectre de turbulence
- ▶ Transfert spectral anisotrope (en k_{\perp} et k_{\parallel})
- ▶ Résonances et paquets d'ondes



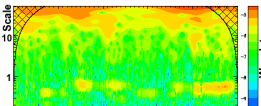
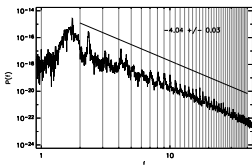
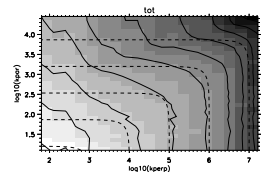
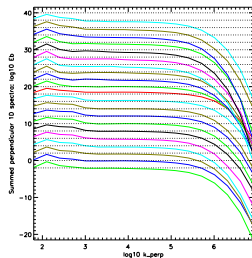
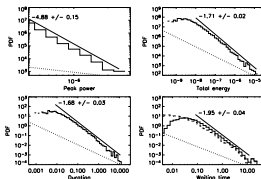
Rapide aperçu des résultats sur le chauffage

Buchlin & Velli, ApJ 2007; voir aussi Nigro et al. 2004–2005

- ▶ Fonction de chauffage:
 - suffisante pour chauffer la couronne
 - est intermittente

Plus:

- ▶ Lois de puissance des événements
- ▶ Déclenchement des événements suite à des variations du spectre de turbulence
- ▶ Transfert spectral anisotrope (en k_{\perp} et k_{\parallel})
- ▶ Résonances et paquets d'ondes



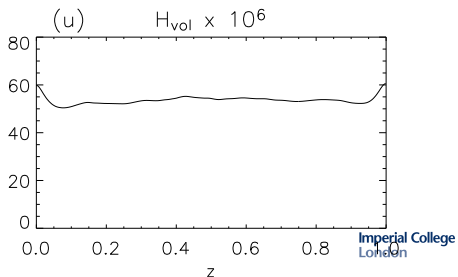
Où a lieu le chauffage?

Buchlin et al. A&A 2007

Boucle uniforme \rightarrow chauffage quasi-uniforme

Comment cela change-t-il dans une boucle avec des profils de densité et de champ magnétique *non-uniformes*?

- ▶ Densité non-uniforme (facteur 30) \rightarrow encore quasi-uniforme
- ▶ + Champ magnétique non-uniforme \rightarrow plus de chauffage aux pieds
- ▶ Coefficients de diffusion non-uniformes ($\nu \propto T^{7/2}$ et $\eta \propto T^{-3/2}$) \rightarrow chauffage non-uniforme



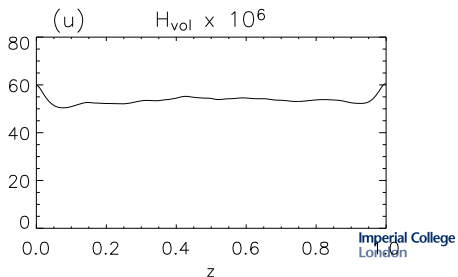
Où a lieu le chauffage?

Buchlin et al. A&A 2007

Boucle uniforme \rightarrow chauffage quasi-uniforme

Comment cela change-t-il dans une boucle avec des profils de densité et de champ magnétique *non-uniformes*?

- ▶ Densité non-uniforme (facteur 30) \rightarrow encore quasi-uniforme
- ▶ + Champ magnétique non-uniforme \rightarrow plus de chauffage aux pieds
- ▶ Coefficients de diffusion non-uniformes ($\nu \propto T^{7/2}$ et $\eta \propto T^{-3/2}$)
 \rightarrow chauffage non-uniforme



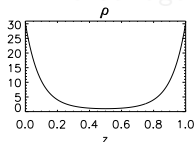
Où a lieu le chauffage?

Buchlin et al. A&A 2007

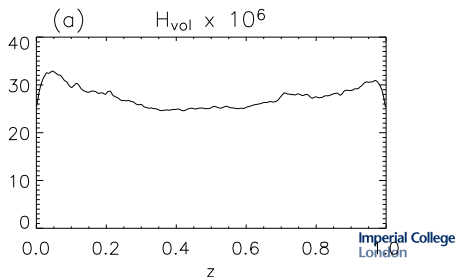
Boucle uniforme \rightarrow chauffage quasi-uniforme

Comment cela change-t-il dans une boucle avec des profils de densité et de champ magnétique *non-uniformes*?

- ▶ *Densité non-uniforme* (facteur 30) \rightarrow encore quasi-uniforme
- ▶ + Champ magnétique non-uniforme \rightarrow plus de chauffage aux pieds
- ▶ Coefficients de diffusion non-uniformes ($\nu \propto T^{7/2}$ et $\eta \propto T^{-3/2}$) \rightarrow chauffage non-uniforme



Densité du modèle HYDRAD (Bradshaw et al.)



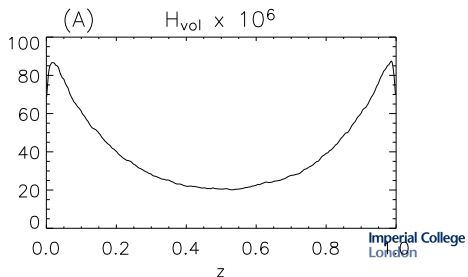
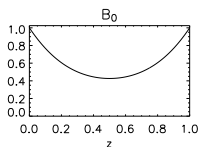
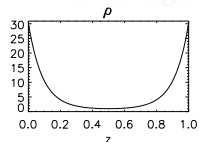
Où a lieu le chauffage?

Buchlin et al. A&A 2007

Boucle uniforme \rightarrow chauffage quasi-uniforme

Comment cela change-t-il dans une boucle avec des profils de densité et de champ magnétique *non-uniformes*?

- ▶ Densité non-uniforme (facteur 30) \rightarrow encore quasi-uniforme
- ▶ + *Champ magnétique non-uniforme* \rightarrow *plus de chauffage aux pieds*
- ▶ Coefficients de diffusion non-uniformes ($\nu \propto T^{7/2}$ et $\eta \propto T^{-3/2}$)
 \rightarrow *chauffage non-uniforme*



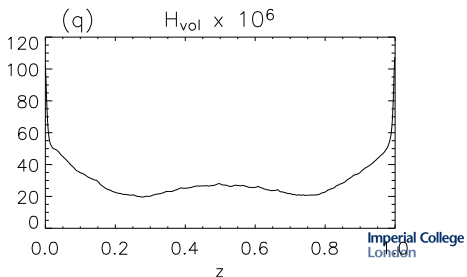
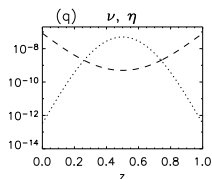
Où a lieu le chauffage?

Buchlin et al. A&A 2007

Boucle uniforme \rightarrow chauffage quasi-uniforme

Comment cela change-t-il dans une boucle avec des profils de densité et de champ magnétique *non-uniformes*?

- ▶ Densité non-uniforme (facteur 30) \rightarrow encore quasi-uniforme
- ▶ + Champ magnétique non-uniforme \rightarrow plus de chauffage aux pieds
- ▶ *Coefficients de diffusion non-uniformes* ($\nu \propto T^{7/2}$ et $\eta \propto T^{-3/2}$)
 \rightarrow chauffage non-uniforme

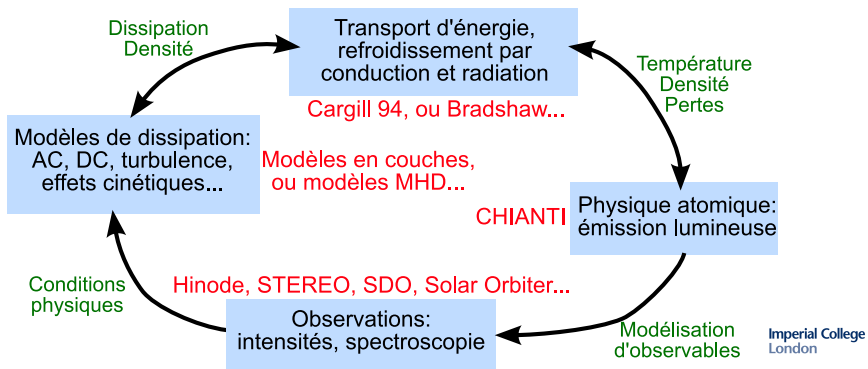


Couplage chauffage-refroidissement

- 1 *Introduction*
 - Chauffage coronal aux petites échelles
 - Simulations numériques de turbulence coronale
- 2 *Chauffage: Modèles en couches MHD pour une boucle coronale*
 - Modèle numérique
 - Résultats
- 3 *Couplage chauffage-refroidissement*
 - Motivation
 - Modèle
 - Premiers résultats
- 4 *Conclusions et perspectives*

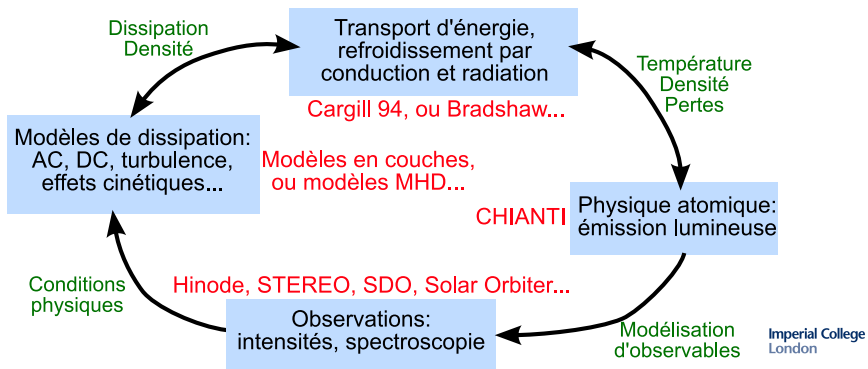
Pourquoi coupler chauffage et refroidissement?

- ▶ Meilleure comparaison modèles–observations:
 - Calcul d'*observables spectroscopiques*: Parenti et al. 2006, Reale et al. 2005, Patsourakos & Klimchuk 2004-2006...
 - Trouver des *signatures observables* des différents mécanismes de chauffage → choisir entre eux
- ▶ Prendre en compte les *rétro-actions* sur le chauffage

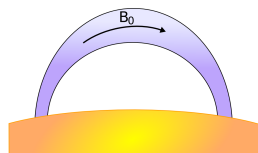
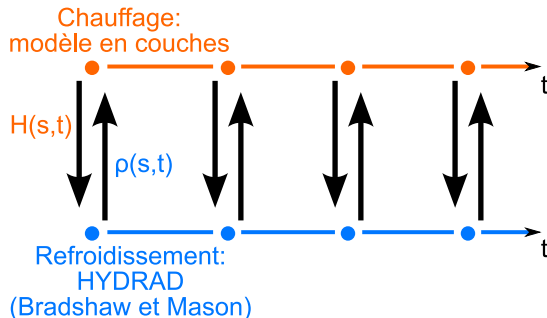


Pourquoi coupler chauffage et refroidissement?

- ▶ Meilleure comparaison modèles–observations:
 - Calcul d'*observables spectroscopiques*: Parenti et al. 2006, Reale et al. 2005, Patsourakos & Klimchuk 2004-2006...
 - Trouver des *signatures observables* des différents mécanismes de chauffage → choisir entre eux
- ▶ Prendre en compte les *rétro-actions* sur le chauffage



Modèle couplé chauffage-refroidissement dans une boucle



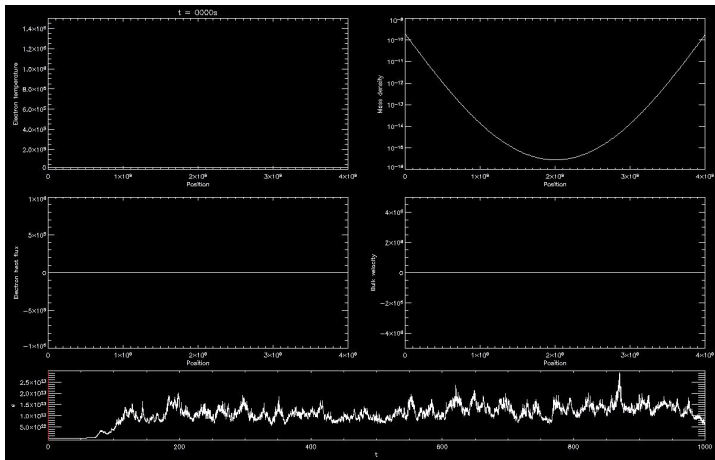
Échange d'information en temps réel entre les modèles de chauffage et de refroidissement (lancés simultanément)

→ Modèle de boucle entièrement *auto-consistant*, avec *rétro-action*.
Seul \vec{v} à la photosphère est imposé

Paramètres: \vec{B}_0 , longueur et masse de la boucle.

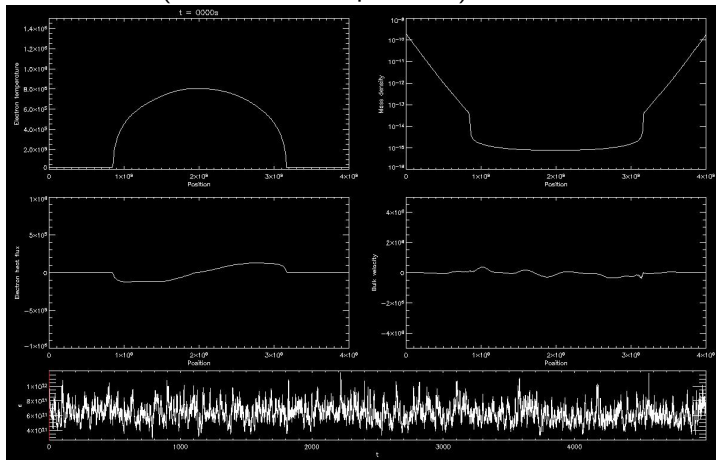
Évolution d'une boucle avec chauffage turbulent

Début:



Évolution d'une boucle avec chauffage turbulent

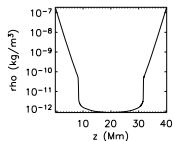
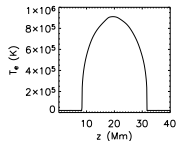
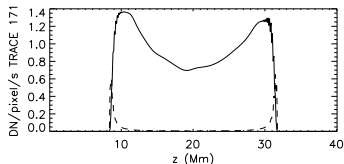
Suite de l'évolution (montrée 5 fois plus vite):



Émission en UV

(HYDRAD/CHIANTI)

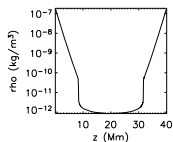
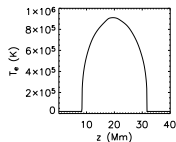
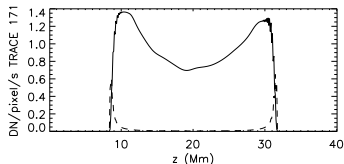
Fe et O dans TRACE 171Å
(quand $T_{apex} \approx 0.9$ MK)



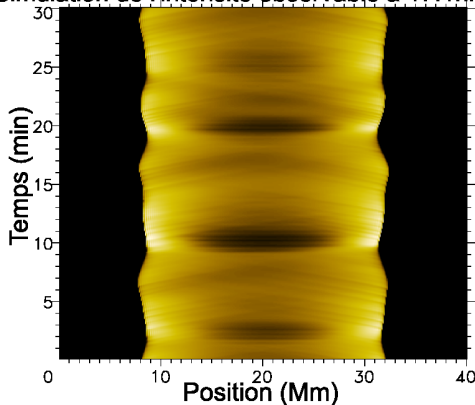
Émission en UV

(HYDRAD/CHIANTI)

Fe et O dans TRACE 171Å
(quand $T_{apex} \approx 0.9$ MK)



Simulation de l'intensité observable à 17.1nm



Conclusions et perspectives

- 1 *Introduction*
 - Chauffage coronal aux petites échelles
 - Simulations numériques de turbulence coronale
- 2 *Chauffage: Modèles en couches MHD pour une boucle coronale*
 - Modèle numérique
 - Résultats
- 3 *Couplage chauffage-refroidissement*
 - Motivation
 - Modèle
 - Premiers résultats
- 4 *Conclusions et perspectives*

Conclusions et perspectives

Le chauffage de la couronne solaire:

- ▶ pourrait provenir de la dissipation de la *turbulence*, anisotrope et intermittente, produite par des ondes d'Alfvén excitées à la photosphère
- ▶ a un profil qui dépend de la stratification
- ▶ dépend des rétro-actions avec les processus de refroidissement

Perspectives immédiates:

- ▶ Calcul d'observables spectroscopiques, en/hors équilibre d'ionisation
- ▶ Signatures de la turbulence et des rétro-actions

Conclusions et perspectives

Le chauffage de la couronne solaire:

- ▶ pourrait provenir de la dissipation de la *turbulence*, anisotrope et intermittente, produite par des ondes d'Alfvén excitées à la photosphère
- ▶ a un profil qui dépend de la stratification
- ▶ dépend des rétro-actions avec les processus de refroidissement

Perspectives immédiates:

- ▶ Calcul d'observables spectroscopiques, en/hors équilibre d'ionisation
- ▶ Signatures de la turbulence et des rétro-actions

Conclusions et perspectives

Les modèles en couches sont des outils puissants, *complémentaires aux simulations numériques « directes »*

- ▶ Plus grands nombres de Reynolds, meilleures statistiques
- ▶ Aident à prendre en compte la *complexité* de la turbulence dans la couronne: processus physiques multi-échelles, non-linéaires, anisotropes...

Comparaisons aux observations:

- ▶ Recherche de signatures spectroscopiques du chauffage: EIS/Hinode (+ imageurs UV et STEREO pour contexte et structure 3D)
- ▶ Caractérisation de la turbulence et de l'intermittence coronales

Conclusions et perspectives

Les modèles en couches sont des outils puissants, *complémentaires aux simulations numériques « directes »*

- ▶ Plus grands nombres de Reynolds, meilleures statistiques
- ▶ Aident à prendre en compte la *complexité* de la turbulence dans la couronne: processus physiques multi-échelles, non-linéaires, anisotropes...

Comparaisons aux observations:

- ▶ Recherche de signatures spectroscopiques du chauffage: EIS/Hinode (+ imageurs UV et STEREO pour contexte et structure 3D)
- ▶ Caractérisation de la turbulence et de l'intermittence coronales

