

Pulsations d'intensité de longue période : signature de la stratification et de la fréquence du chauffage dans les boucles coronales solaires

Clara Froment - Institut d'Astrophysique Spatiale

Thèse encadrée par Frédéric Auchère
et par Karine Bocchialini

29 septembre 2016

La couronne solaire

Couronne = enveloppe externe de l'atmosphère solaire

- plasma peu dense ($\sim 10^{15} \text{ m}^{-3}$)
- températures de l'ordre de 1 MK
- milieu très dynamique, sculpté par le champ magnétique

Températures surface solaire (photosphère) $\sim 6000 \text{ K}$

➔ Une des grandes questions de la physique solaire :

Comment la couronne est-elle chauffée ?

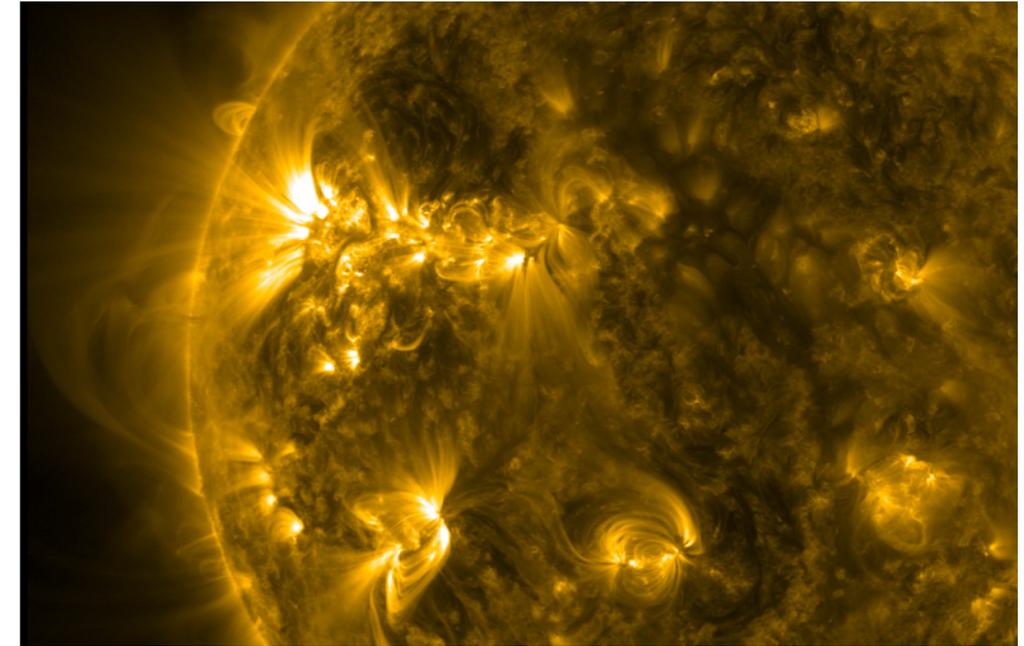
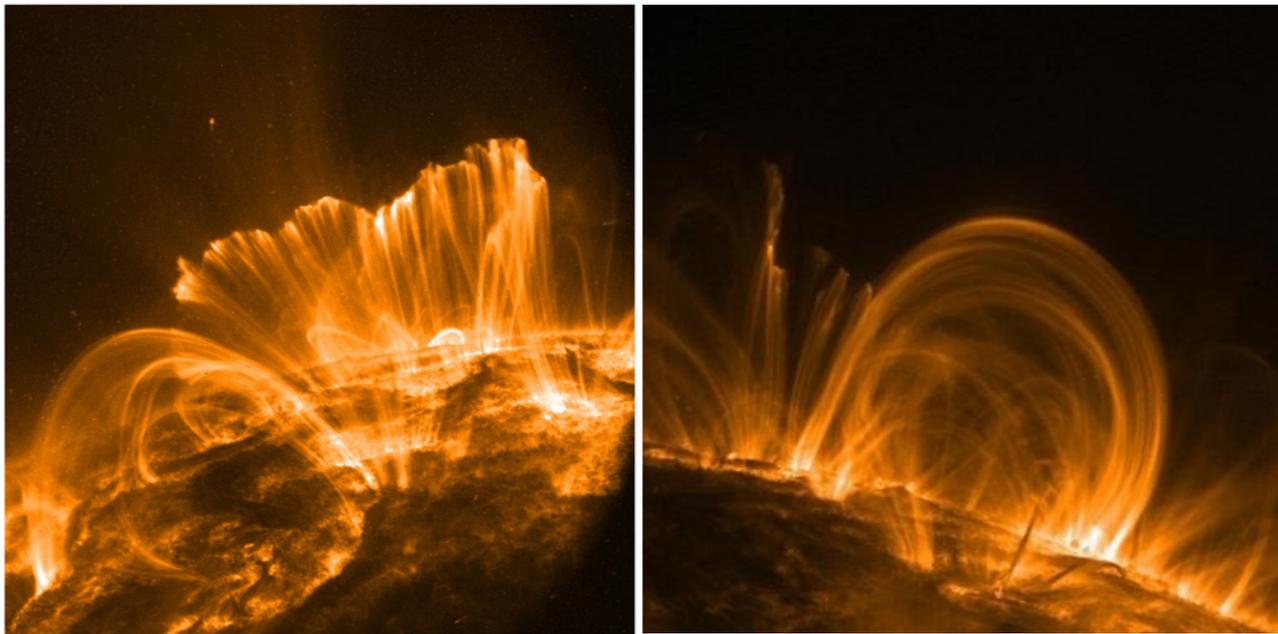
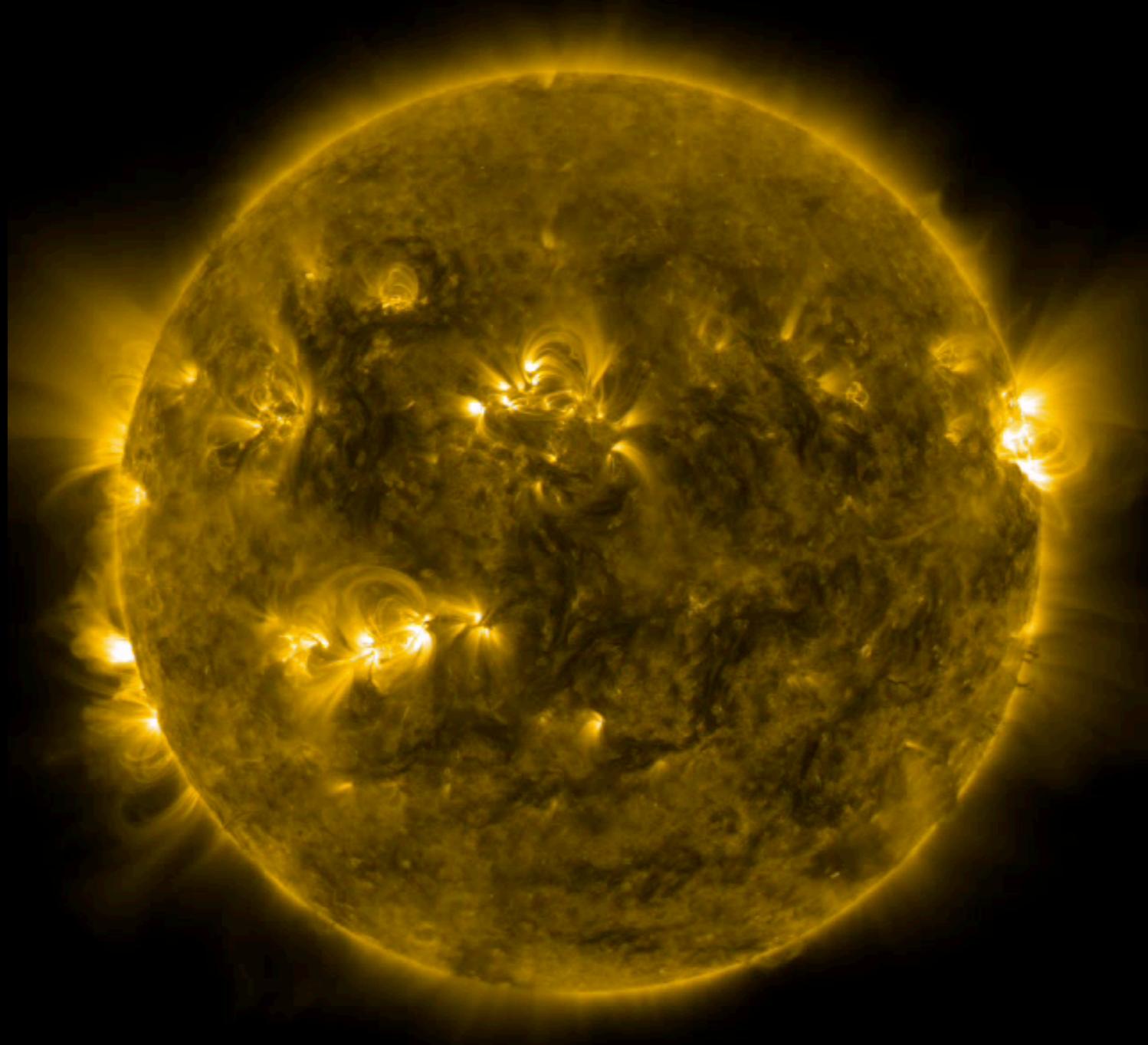


Image à 171 Å



Boucles = briques de base de la couronne EUV

- structures magnétiquement fermées
- confinent le plasma
- + denses que leur environnement (x 10)



Le chauffage des boucles coronales

Source d'énergie :

➔ **champ magnétique**, mouvements permanents des pieds des structures (convection)

Quel(s) mécanisme(s) de dissipation ?

Deux grandes catégories de modèles :

- **Direct Current** : perturbation plus lente que le refroidissement de la structure
exemple : **nanoflares basses fréquences**
- **Alternative Current** : perturbation plus rapide que le refroidissement de la structure
exemple : **nanoflares hautes fréquences** ou **ondes d'Alfvén (MHD)**



chauffage quasi-continu

Chauffage quasi-continu et très stratifié

Chauffage **quasi-continu**
et **localisé aux pieds des boucles**



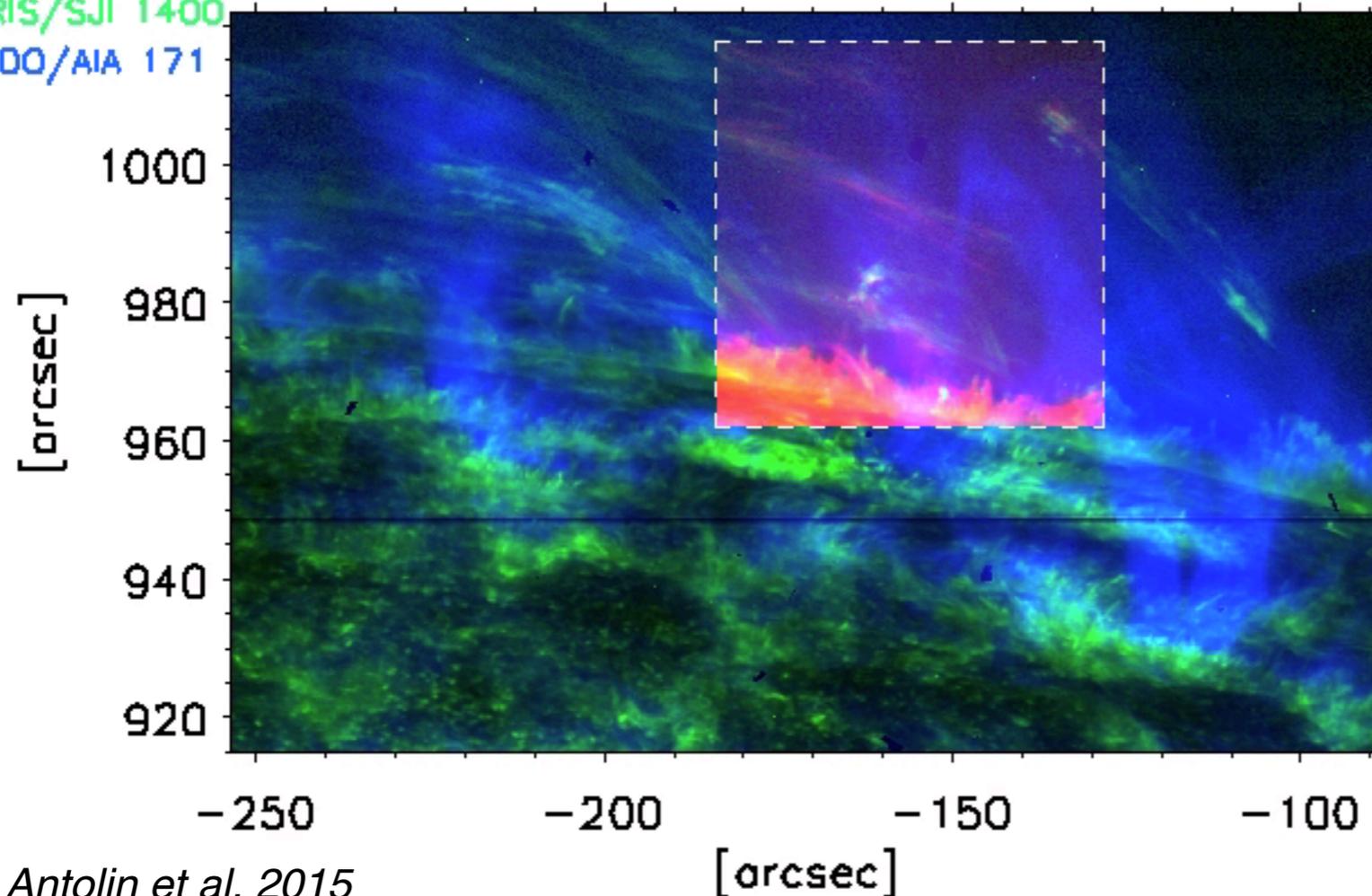
Boucles non stables, pas de
d'équilibre thermique possible



« **Catastrophic cooling** »
matière froide et dense :
pluie coronale, protubérances

Événement de pluie coronale

Hinode/SOT Ca II H 2013-11-29 23:06:46 UT
IRIS/SJI 1400
SDO/AIA 171



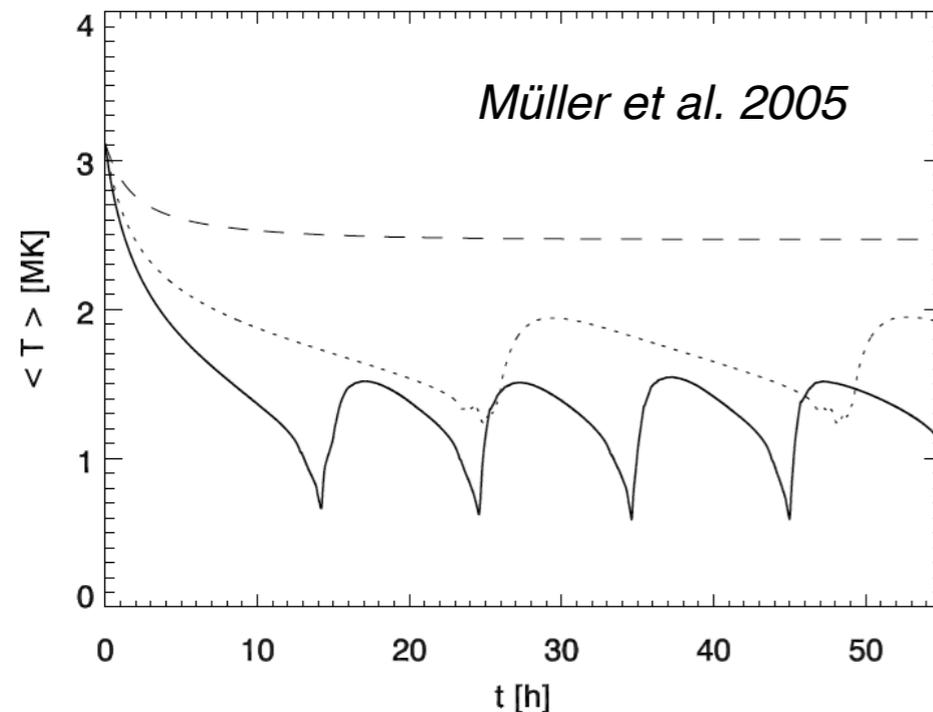
Antolin et al. 2015

Protubérance (SDO/AIA, 304 Å)



Les pulsations d'intensité de longue période

Simulations : prédisent une périodicité



Évaporation chromosphérique
Température \nearrow \rightarrow Densité \nearrow

↓
Instabilité thermique
« Catastrophic cooling »

↓
Condensation
évacuation vers les pieds

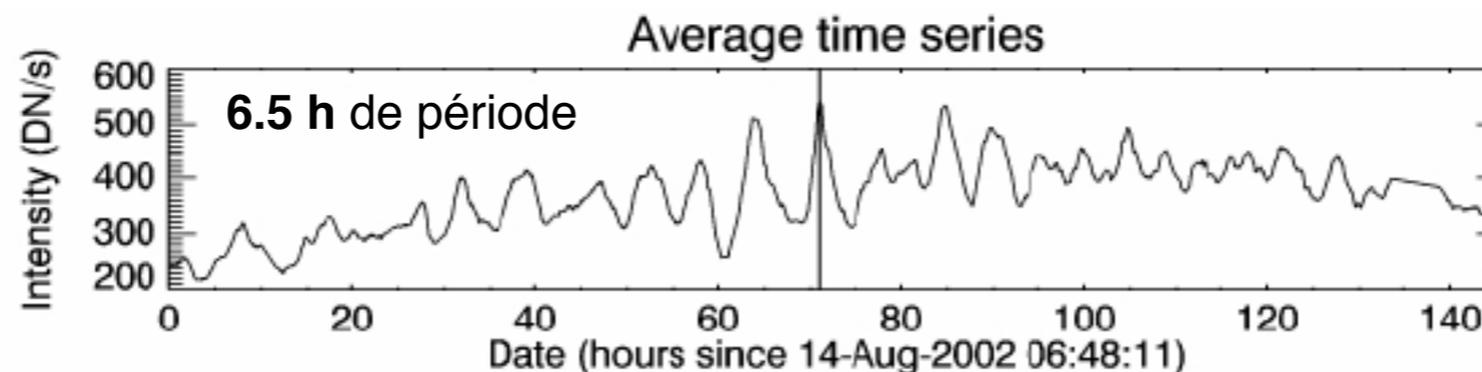
↓
Variations périodiques de la
température et de la densité

↓
Thermal Non Equilibrium (TNE)

Phénomène découvert récemment : pulsations d'intensité (2h - 16h)

➔ Détection avec SOHO/EIT :

+ de 900 événements (1997-2010) dans la bande 195 Å (Auchère et al. 2014)



Objectif I : Périodicité répandue ?

I. Phénoménologie

1. Utilisation des données SDO/AIA
2. Méthode de détection
3. Conclusion : un phénomène très fréquent

Objectif III - Le TNE permet-il d'expliquer ces observations ?

III. Modélisation

1. Objectifs de la modélisation
2. Structure des boucles
3. Simulations hydrodynamiques 1D
4. Conclusion : le TNE permet d'expliquer les pulsations observées

Objectif II : Caractérisation thermodynamique

II. Diagnostics

1. Événements étudiés en détails
2. Évolution de la température et de la densité
3. Étude de la phase de refroidissement
4. Conclusion : TNE - signature de cycles d'évaporation et de condensation

IV. Conclusions et Perspectives

Objectif I : Périodicité répandue ?

I. Phénoménologie

1. Utilisation des données SDO/AIA
2. Méthode de détection
3. Conclusion : un phénomène très fréquent

Objectif III - Le TNE permet-il d'expliquer ces observations ?

III. Modélisation

1. Objectifs de la modélisation
2. Structure des boucles
3. Simulations hydrodynamiques 1D
4. Conclusion : le TNE permet d'expliquer les pulsations observées

Objectif II : Caractérisation thermodynamique

II. Diagnostics

1. Événements étudiés en détails
2. Évolution de la température et de la densité
3. Étude de la phase de refroidissement
4. Conclusion : TNE - signature de cycles d'évaporation et de condensation

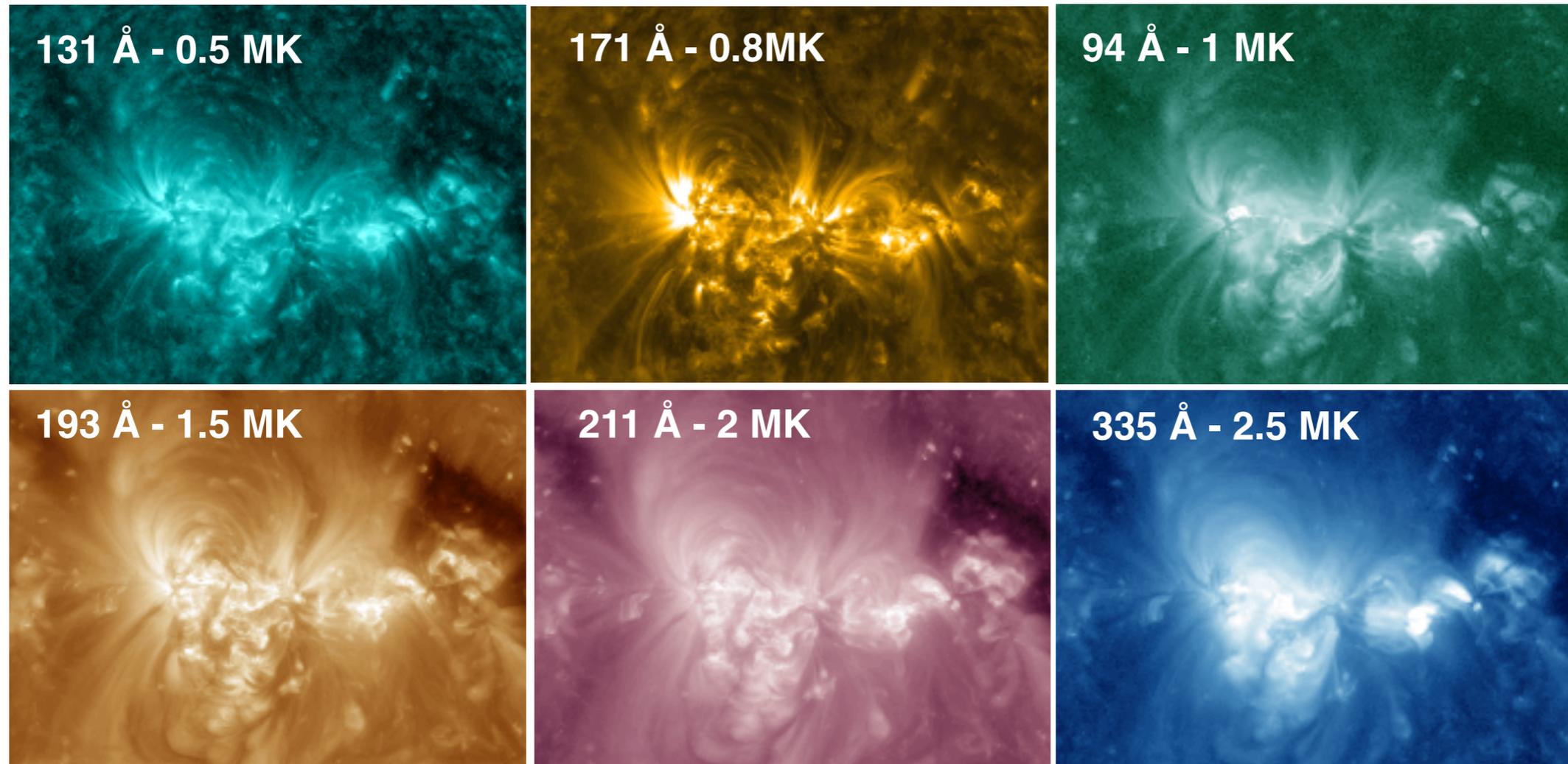
IV. Conclusions et Perspectives

Utilisation données SDO/AIA

Détection avec **SDO/AIA** :

- satellite (NASA) lancé en **2010**
- observations en continu dans **6 bandes coronales**

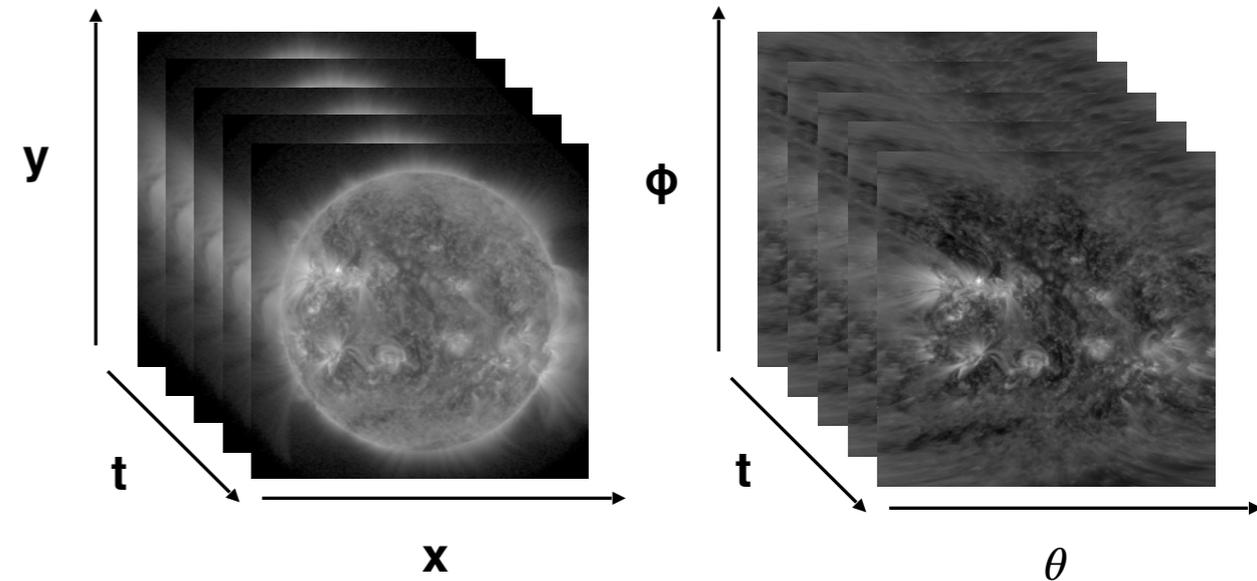
➔ Permet une analyse thermique du plasma



Méthode de détection

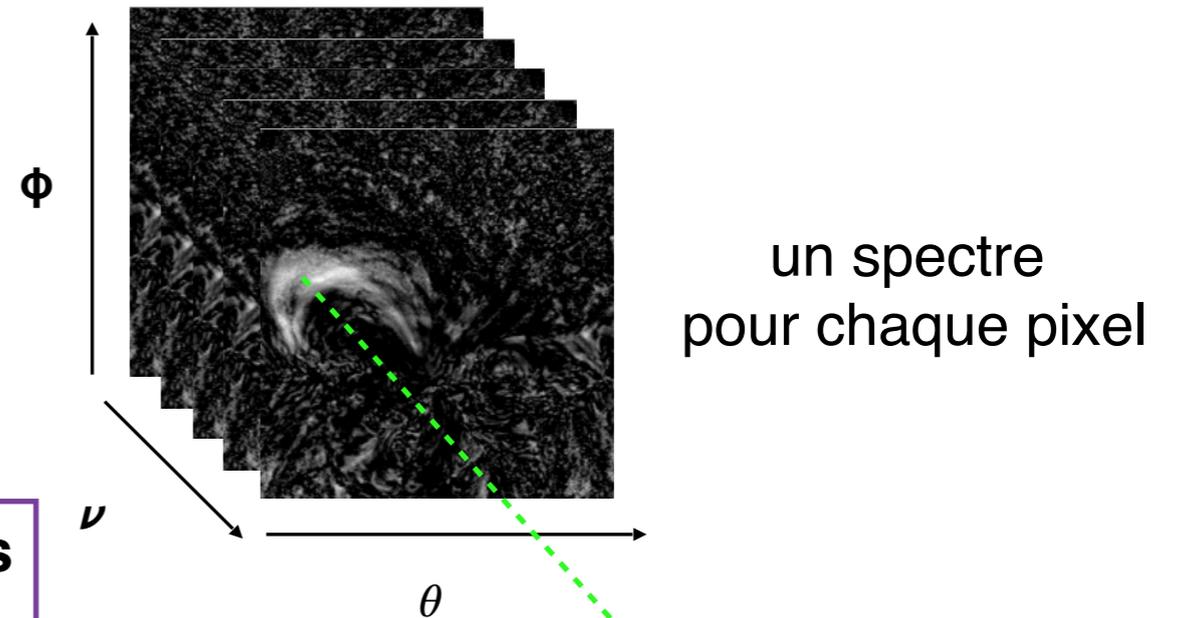
Construction du cube de données

Région d'intérêt suivie sur plusieurs jours,
passage du cube en coordonnées héliographiques



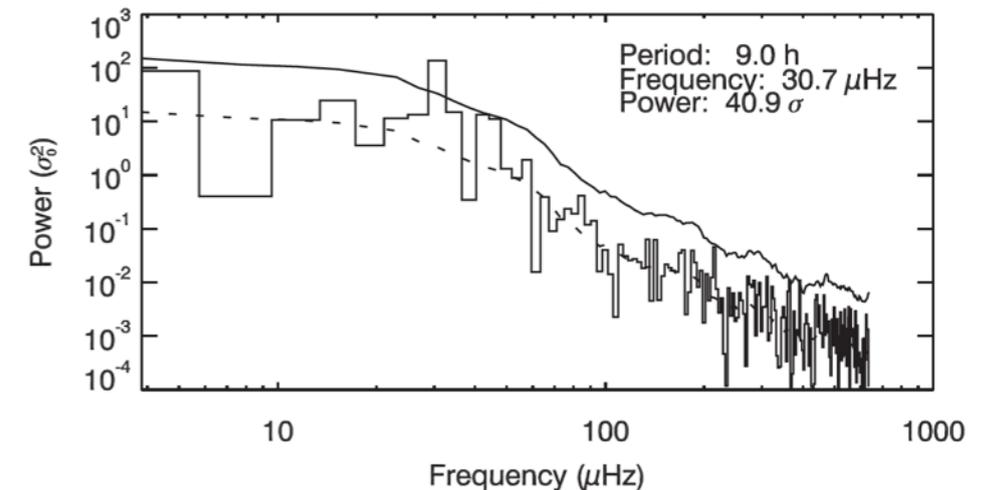
Construction du cube de puissance

Analyse de Fourier pixel par pixel



Sélection des événements avec plusieurs critères

- seuil à 10σ (niveau de confiance à 99%)
- surface $> 2^\circ$ carrés



Sauvegarde du film et des paramètres des
événements détectés pour **analyse statistique**

Conclusion : un phénomène très fréquent

Statistiques avec AIA (2010-2016)

Bandes d'AIA	94 Å	131 Å	171 Å	193 Å	211 Å	335 Å	Total	
Nombre d'événements détectés	92	97	675	1210	892	215	3181	AR : région actives
% d'événements AR	100	100	55	56	75	100	67	QS : Soleil calme
% d'événements QS	0	0	45	44	25	0	33	

Statistiques avec EIT (1997-2010)

EIT	195 Å
Nombre d'événements détectés	917
% d'événements AR	54
% d'événements QS	45
% d'événements boucles (AR)	51

- ➔ Confirme les résultats obtenus avec EIT
- ➔ Se produirait dans au moins 50% des AR (*Auchère et al. 2014*)

➔ Périodicité pas mise en évidence avant :

- données à traiter sur **temps longs**
- des **centaines de To de données à traiter**
- utilisation intensive de l'**archive MEDOC**

Objectif I : Périodicité répandue ?

I. Phénoménologie

1. Utilisation des données SDO/AIA
2. Méthode de détection
3. Conclusion : un phénomène très fréquent

Objectif III - Le TNE permet-il d'expliquer ces observations ?

III. Modélisation

1. Objectifs de la modélisation
2. Structure des boucles
3. Simulations hydrodynamiques 1D
4. Conclusion : le TNE permet d'expliquer les pulsations observées

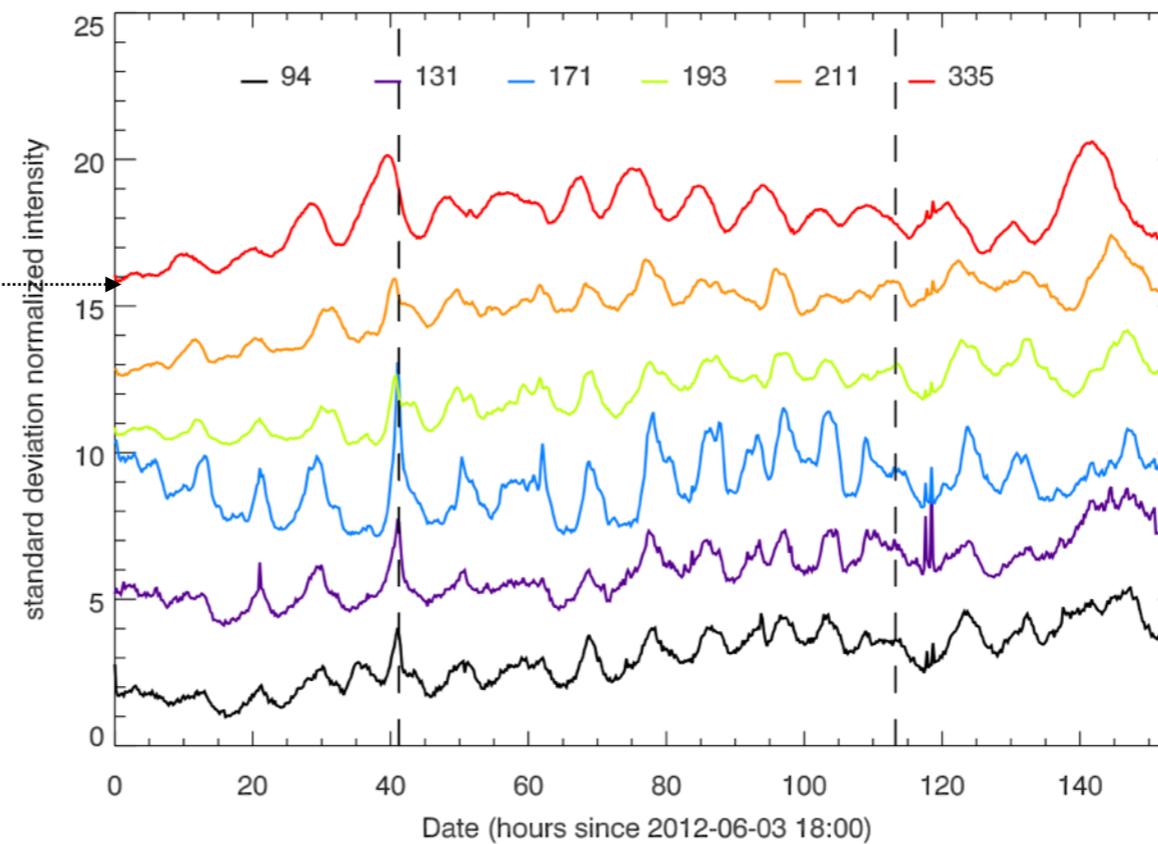
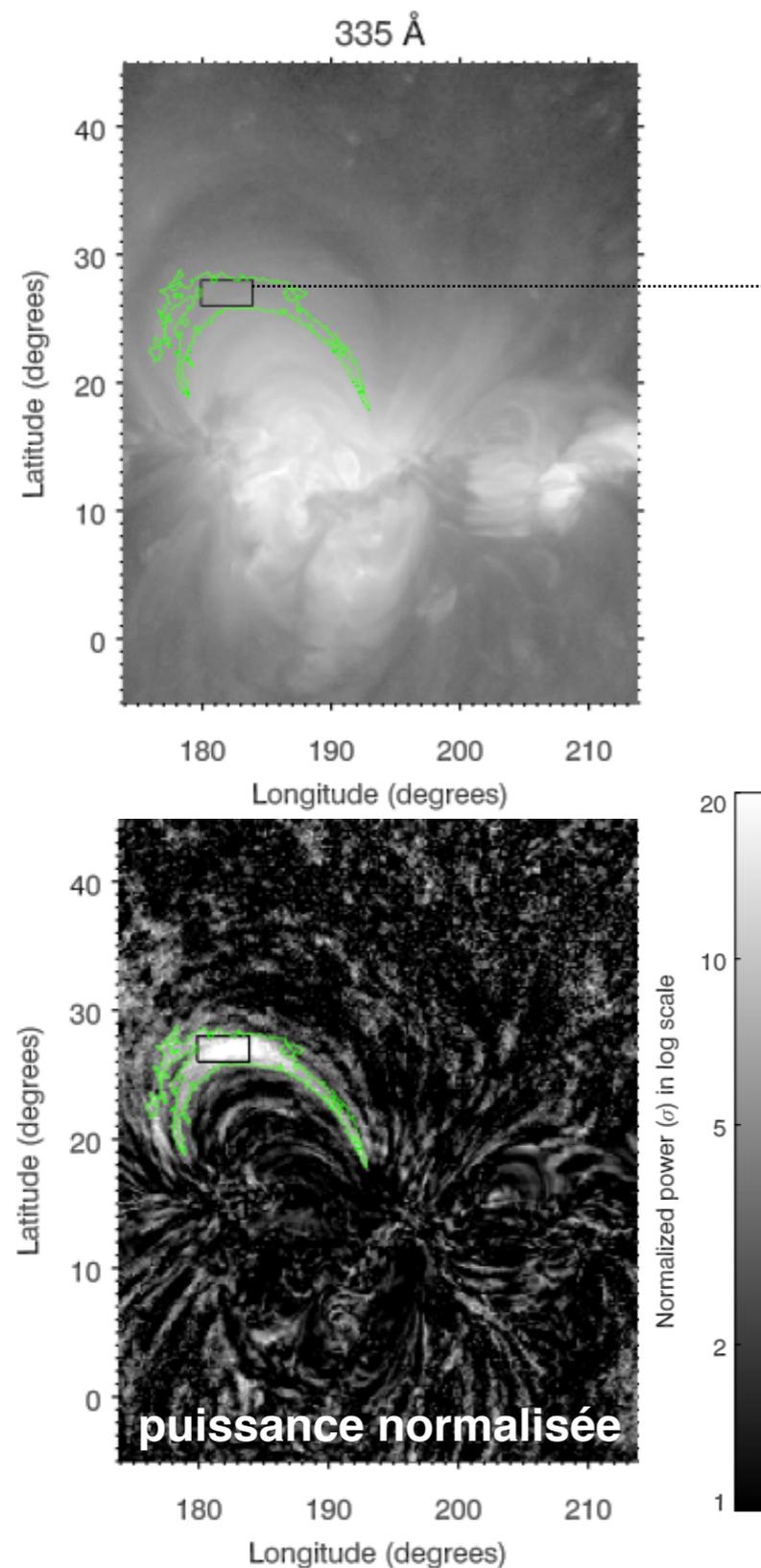
Objectif II : Caractérisation thermodynamique

II. Diagnostics

1. Événement étudié en détails
2. Évolution de la température et de la densité
3. Étude de la phase de refroidissement
4. Conclusion : TNE - signature de cycles d'évaporation et de condensation

IV. Conclusions et Perspectives

Événement étudié en détails



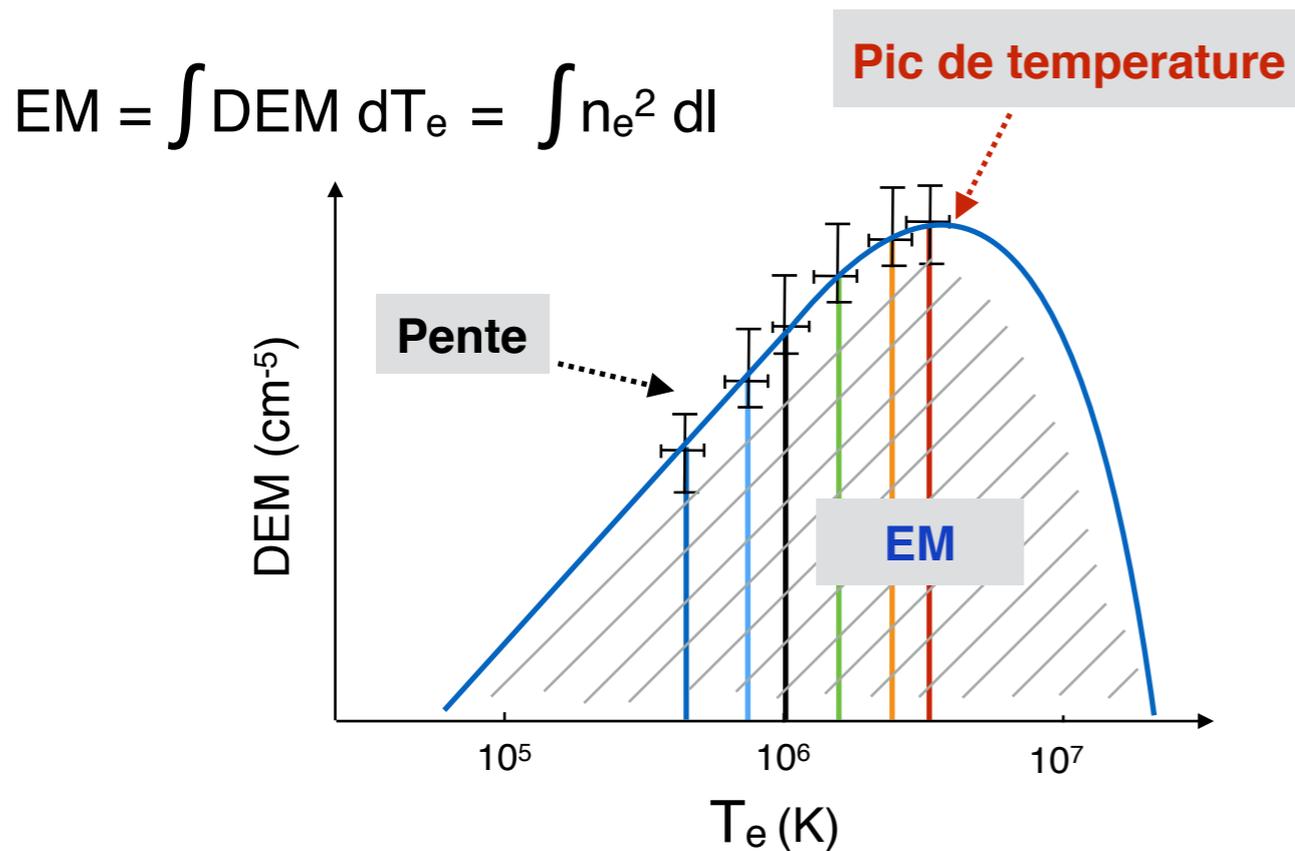
Événement n°1 de *Froment et al. 2015, ApJ*

- 9 h de période
- grandes boucles (200 - 400 Mm)

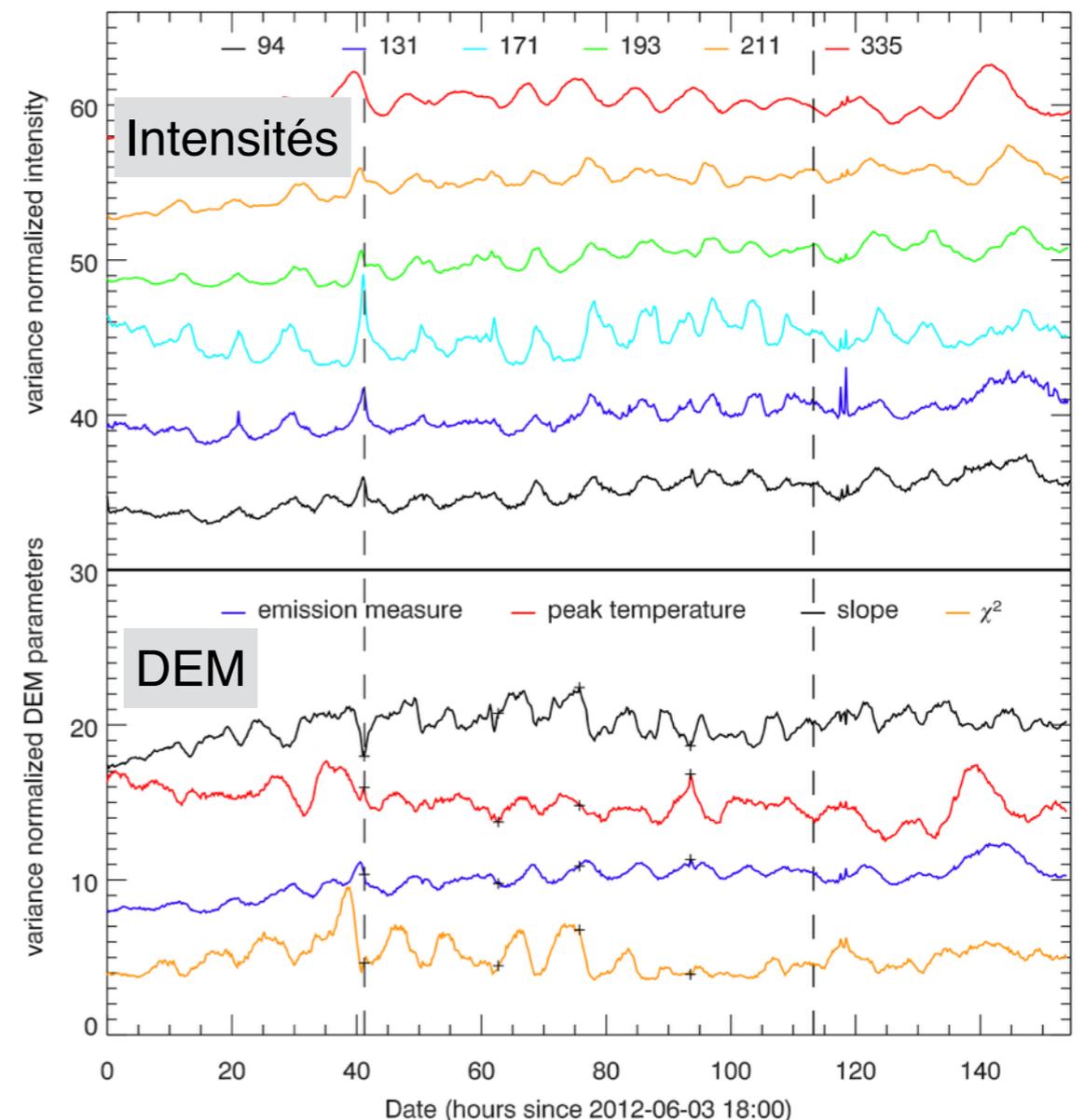
Evolution de la température et densité

Analyse de la structure thermique

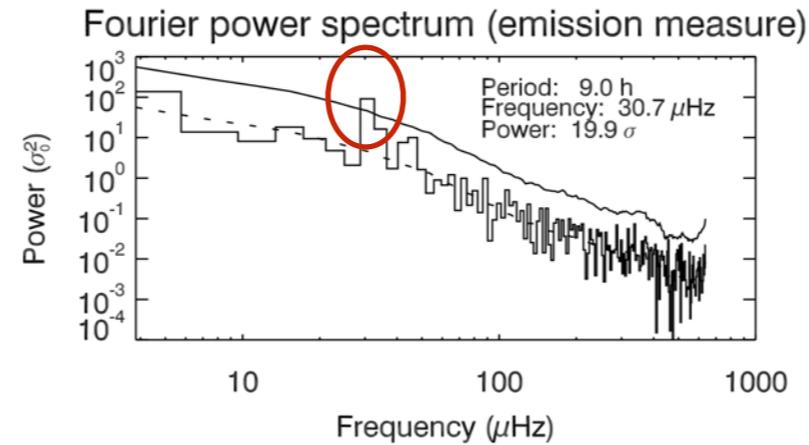
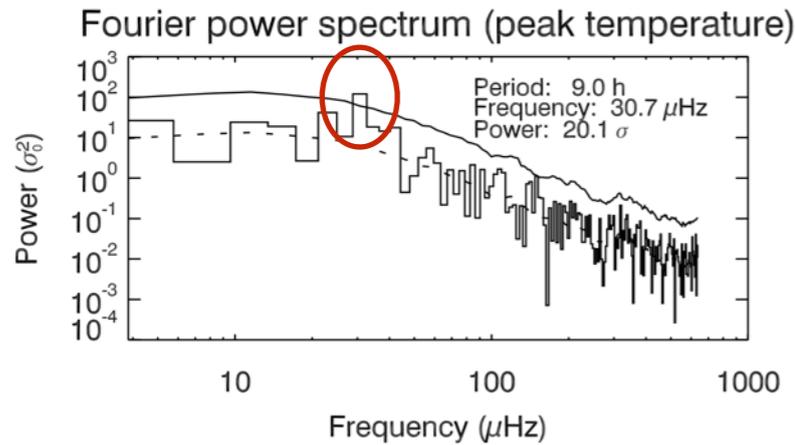
- ➔ Pour chaque pixel et à chaque instant : **six observations** (bandes coronales d'AIA)
- ➔ **Reconstruction de la mesure d'émission différentielle (DEM)** correspondante : quantité de matière qui émet le long de la ligne de visée, en fonction de la température
- ➔ Utilisation de l'outil développé à l'IAS (*Guennou et al. 2012a,b*)



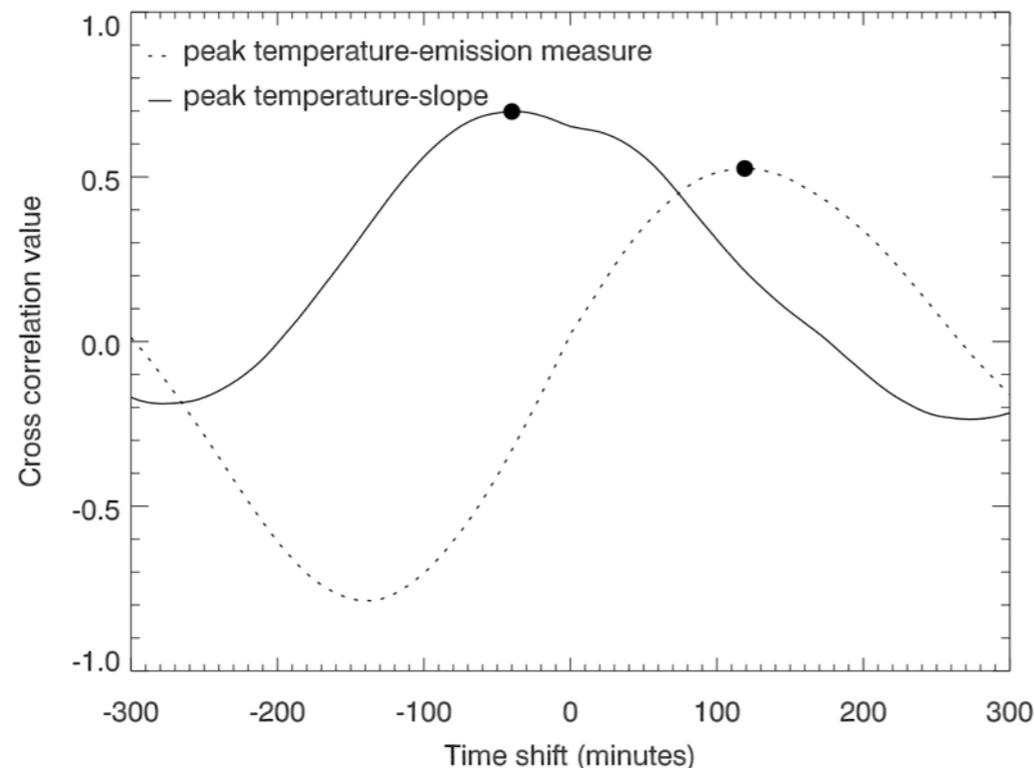
- forme typique de la DEM observée dans les AR (*Warren et al. 2011, Winebarger et al. 2011, etc*)
- **modèle de régions actives** (*Guennou et al. 2013*)



Evolution de la température et densité



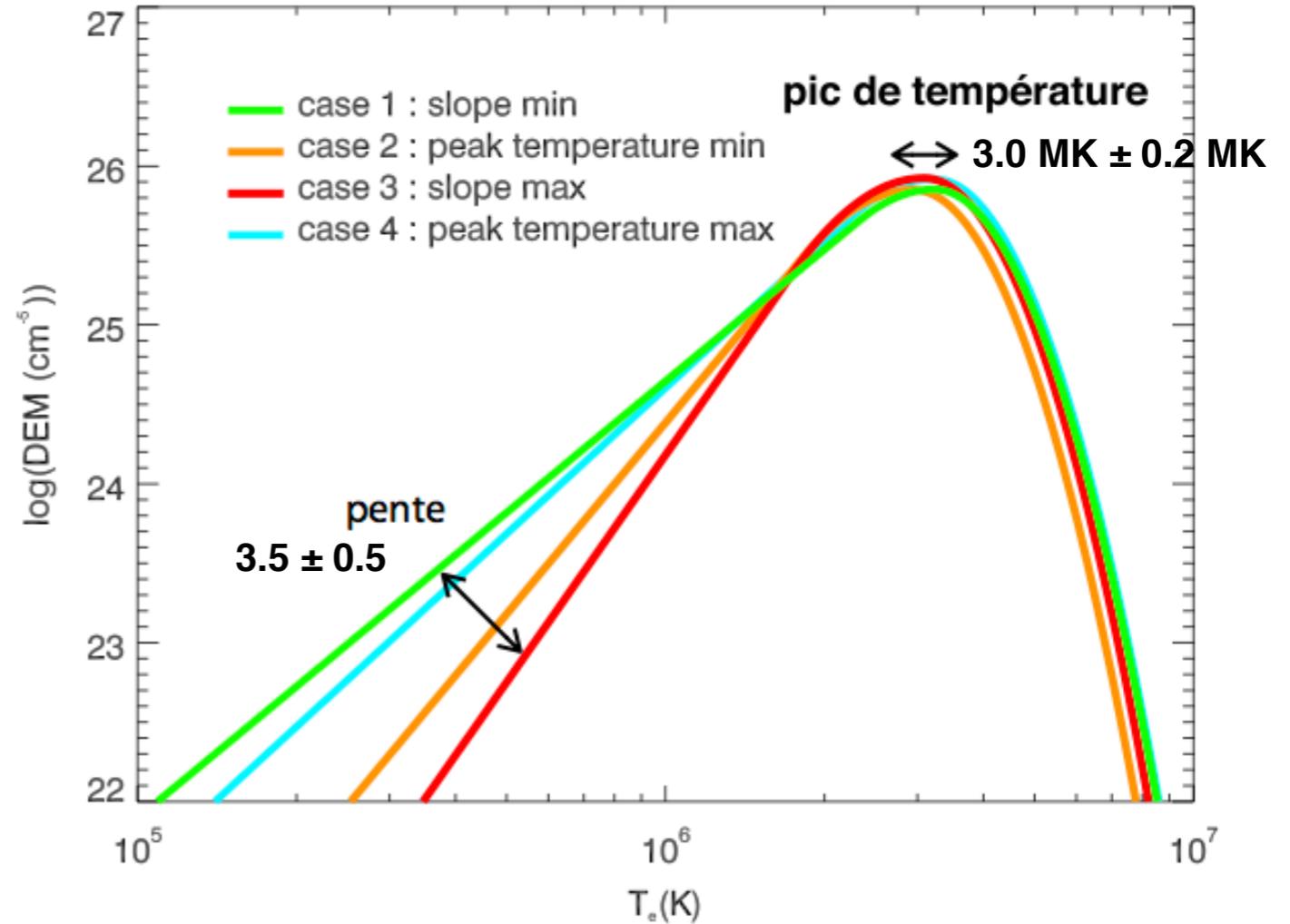
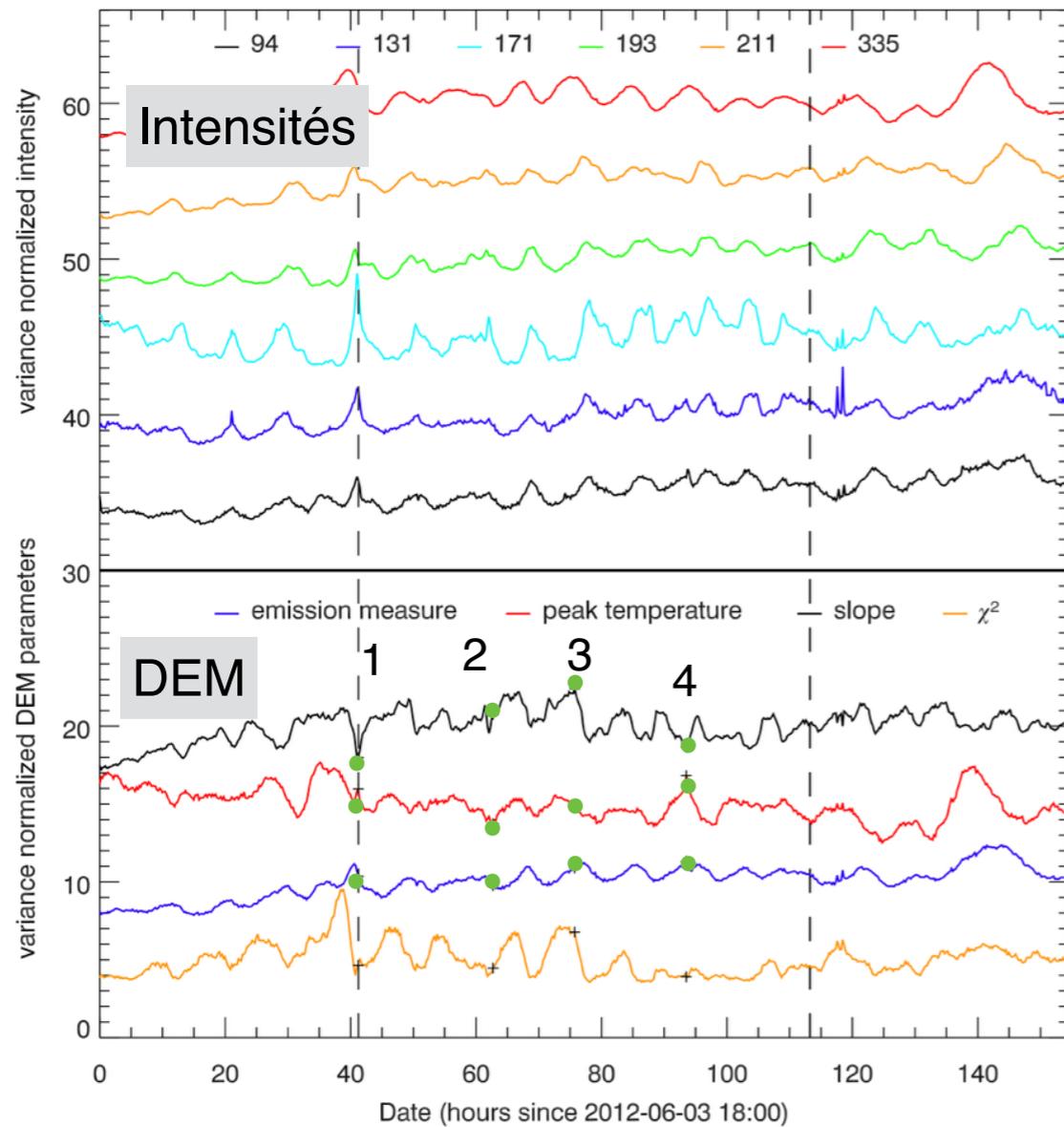
➔ Évolution périodique (9h) du pic de température et de l'EM



➔ Retard entre le pic de température et l'EM

- ➔ Évolution périodique de la température et de la densité dans les boucles
- ➔ Retard entre la température et la densité
- ➔ Caractéristique de cycles évaporation/condensation

Evolution de la température et densité



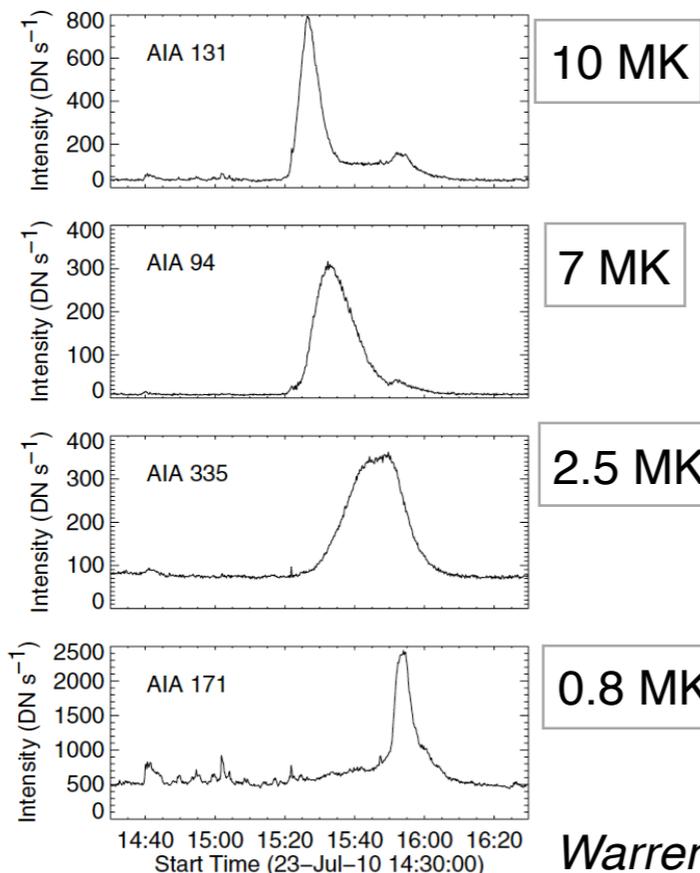
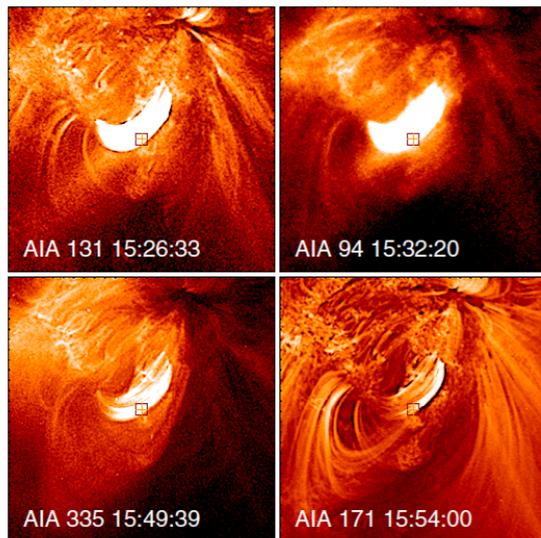
Pulsations dans la structure thermique avec grande amplitude sur la pente et l'EM

→ Cycles d'évolution thermique

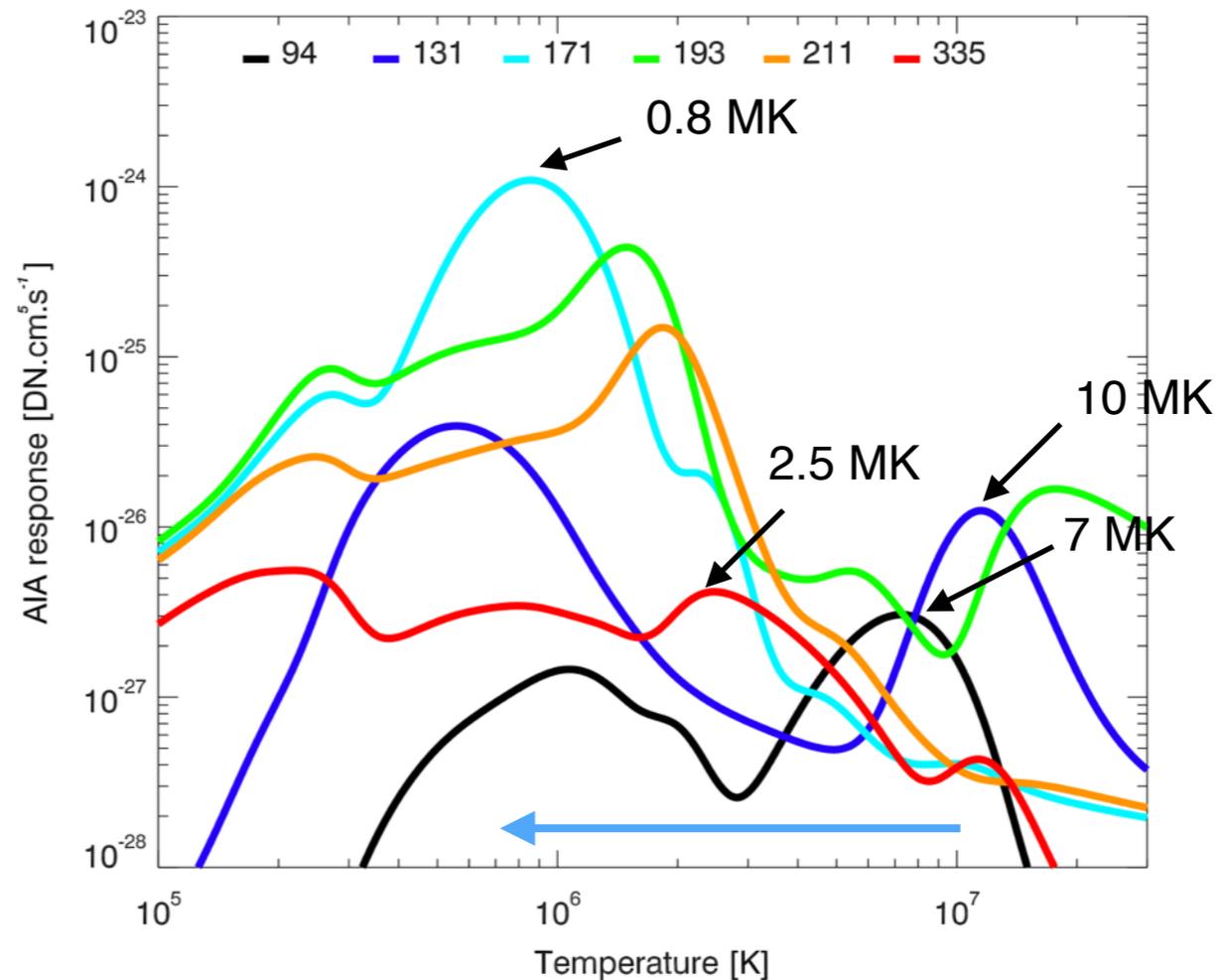
Étude de la phase de refroidissement

Les observations EUV montrent un refroidissement généralisé de la couronne (*Warren et al. 2002, Winebarger et al. 2003, Ugarte-Urra et al. 2006, 2009,...*)

Les **phases de chauffage** se font à faible densité
 ➔ pas observables par les instruments actuels

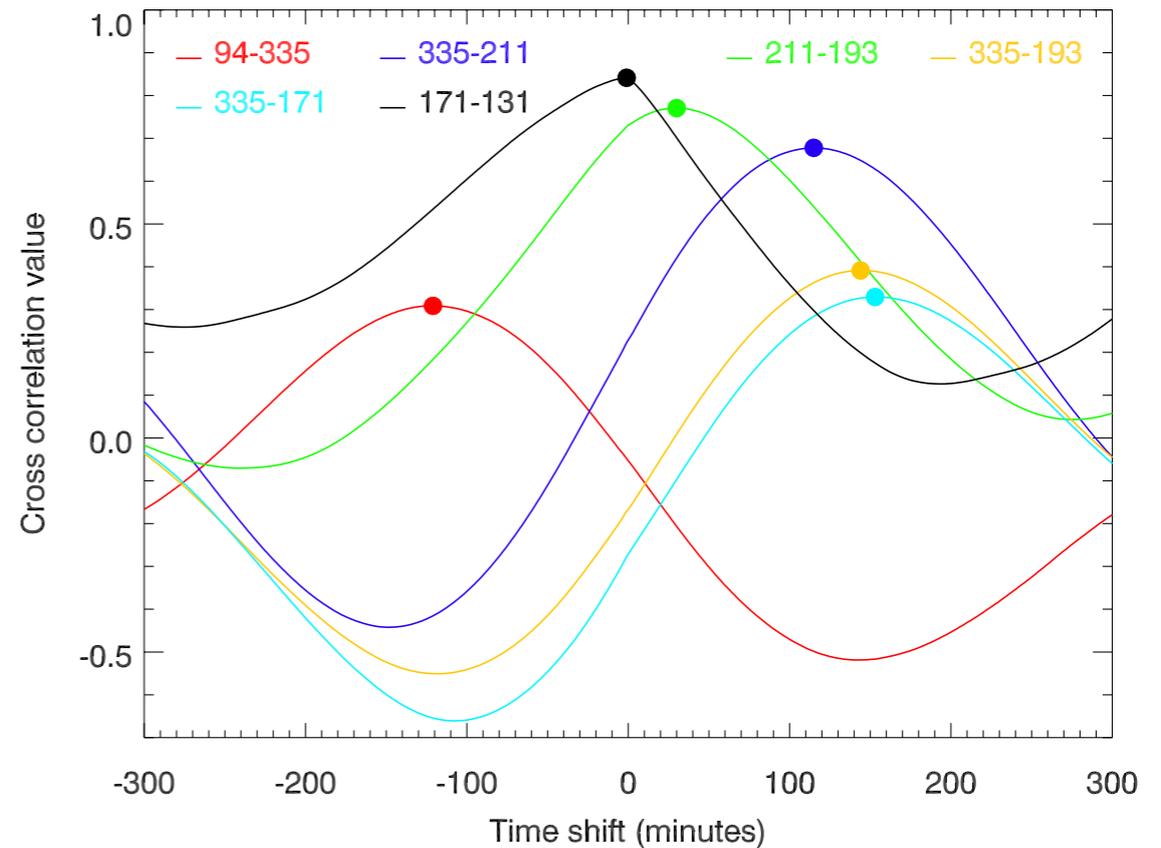
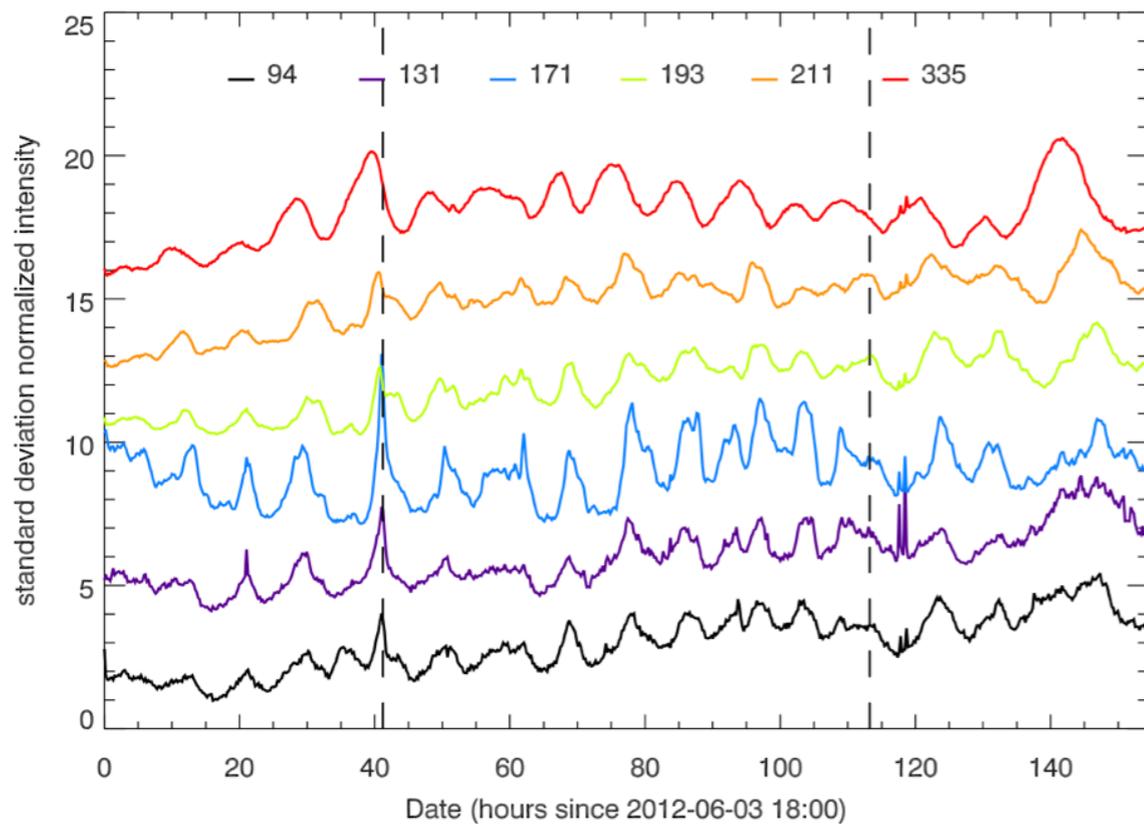


Warren et al. 2011



Réponse graduelle des bandes spectrales en fonction de leurs pics de réponse

Étude de la phase de refroidissement



Ordre des d'apparition des pics :

335, 211, 94, 193, 171 / 131

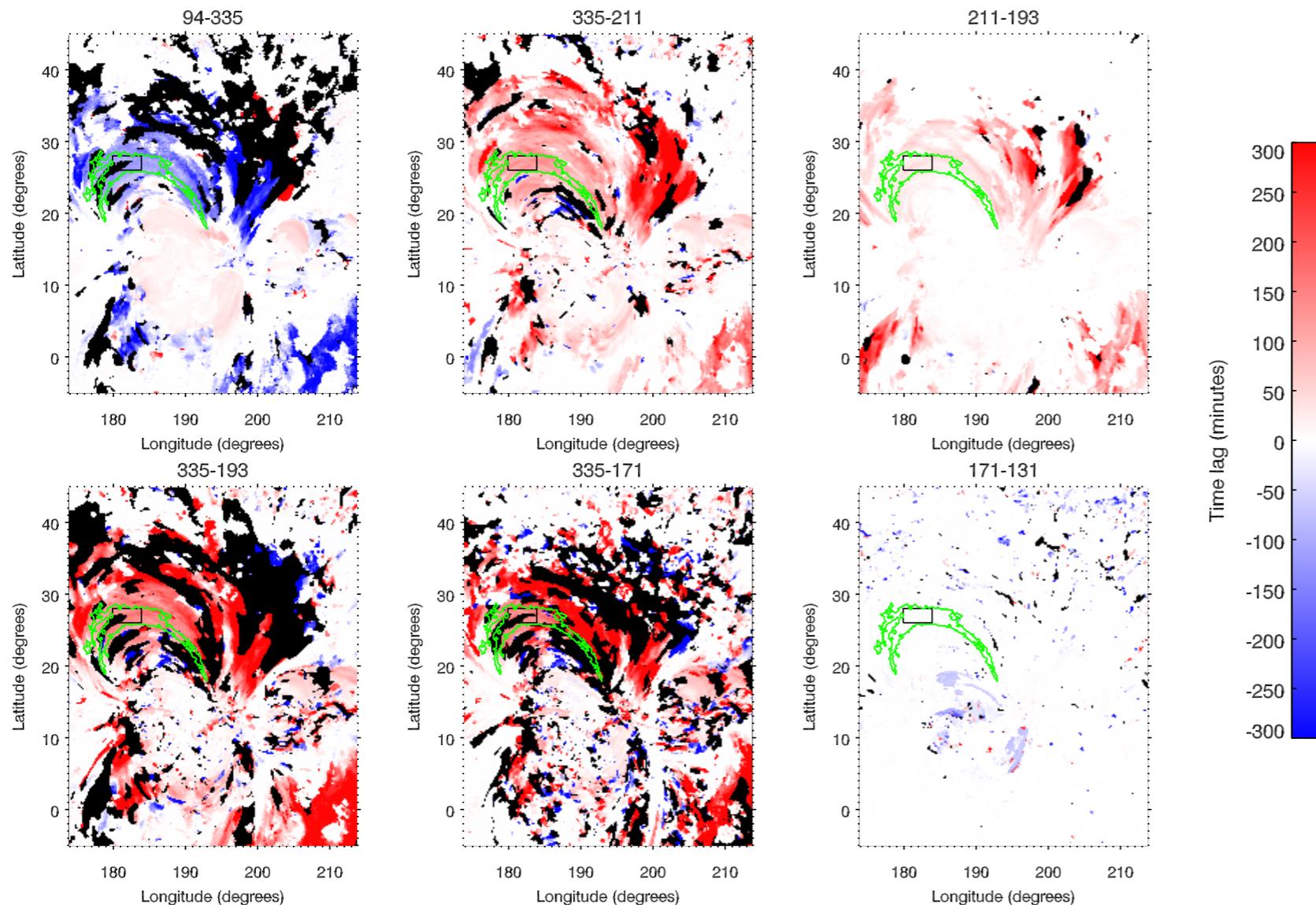
2.5 MK, 2 MK, 1 MK, 1.5 MK, 0.8 MK / 0.5 MK

Décalages temporels :

- pics de **corrélations croisées** entre les bandes spectrales
- pour **reconstruire l'ordre des bandes** et donc des **températures**

Étude de la phase de refroidissement

Cartes de décalages temporels, même méthode que *Viall & Klimchuk, 2012*



bandes 171 et 131 simultanées :
température qui ne descend pas
en dessous du pic de 171 Å

- ➔ Refroidissement généralisé
- ➔ Comportement identique pour les boucles pulsantes et les autres boucles

Conclusion : signature de cycles d'évaporation et condensation

- ➔ **Analyse de la structure thermique - DEM :**
 - évolution périodique température et densité
 - retard entre température et densité
 - caractéristiques de cycles d'évaporation/condensation (TNE)
- ➔ **Analyse de la phase de refroidissement :**
 - boucles pulsantes refroidissent de la même manière que les autres boucles
 - pas de refroidissement (en moyenne) en dessous de 0.8 MK
- ➔ **TNE - cycles d'évaporation et de condensation « incomplètes »**
- ➔ Pour aller plus loin : **analyse des vitesses d'écoulement**, prédites par les modèles

Objectif I : Périodicité répandue ?

I. Phénoménologie

1. Utilisation des données SDO/AIA
2. Méthode de détection
3. Conclusion : un phénomène très fréquent

Objectif III - Le TNE permet-il d'expliquer ces observations ?

III. Modélisation

1. Objectifs de la modélisation
2. Structure des boucles
3. Simulations hydrodynamiques 1D
4. Conclusion : le TNE permet d'expliquer les pulsations observées

Objectif II : Caractérisation thermodynamique

II. Diagnostics

1. Événements étudiés en détails
2. Évolution de la température et de la densité
3. Étude de la phase de refroidissement
4. Conclusion : TNE - signature de cycles d'évaporation et de condensation

IV. Conclusions et Perspectives

Objectifs de la modélisation

- ➔ Le modèle de TNE permet-il d'expliquer les observations ?
- ➔ Quelle influence de la géométrie de la boucle et du chauffage ?
- ➔ Pourquoi certaines boucles entrent dans ces cycles et pas d'autres ?

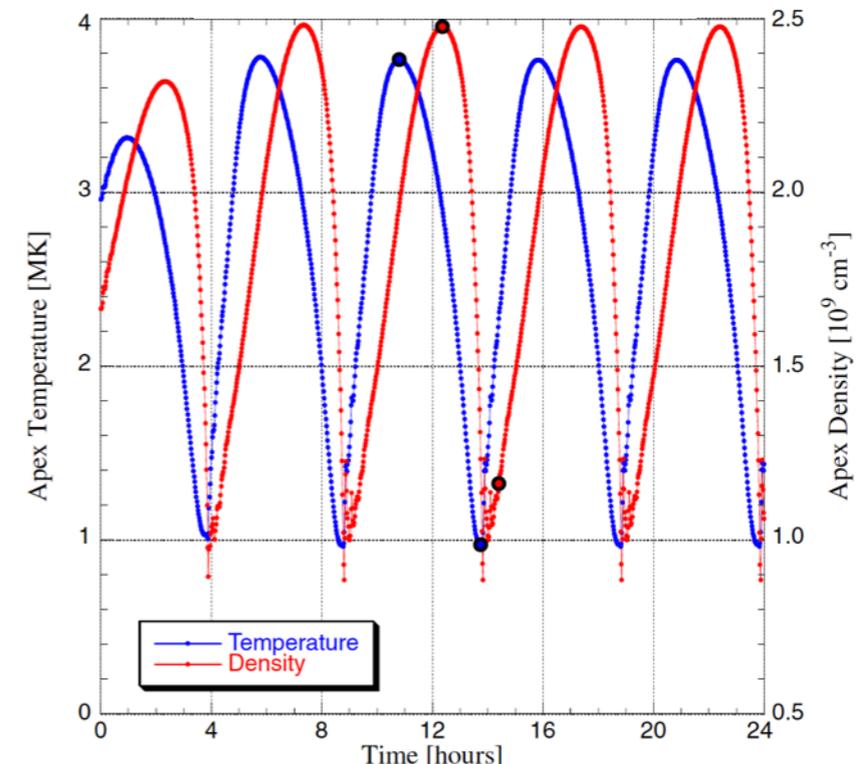
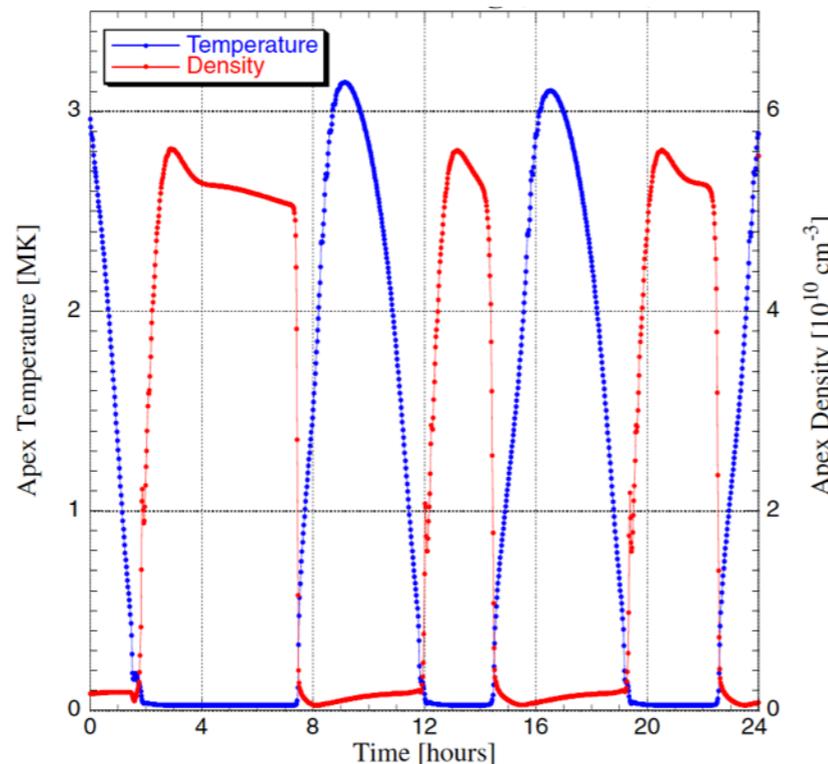
Dans *Mikić et al. 2013* : simulations hydrodynamiques 1D

➔ **géométrie de la boucle et du chauffage** = influence importante sur les solutions

boucle statique
température et
densité constante

cycles avec
condensations
« complètes »

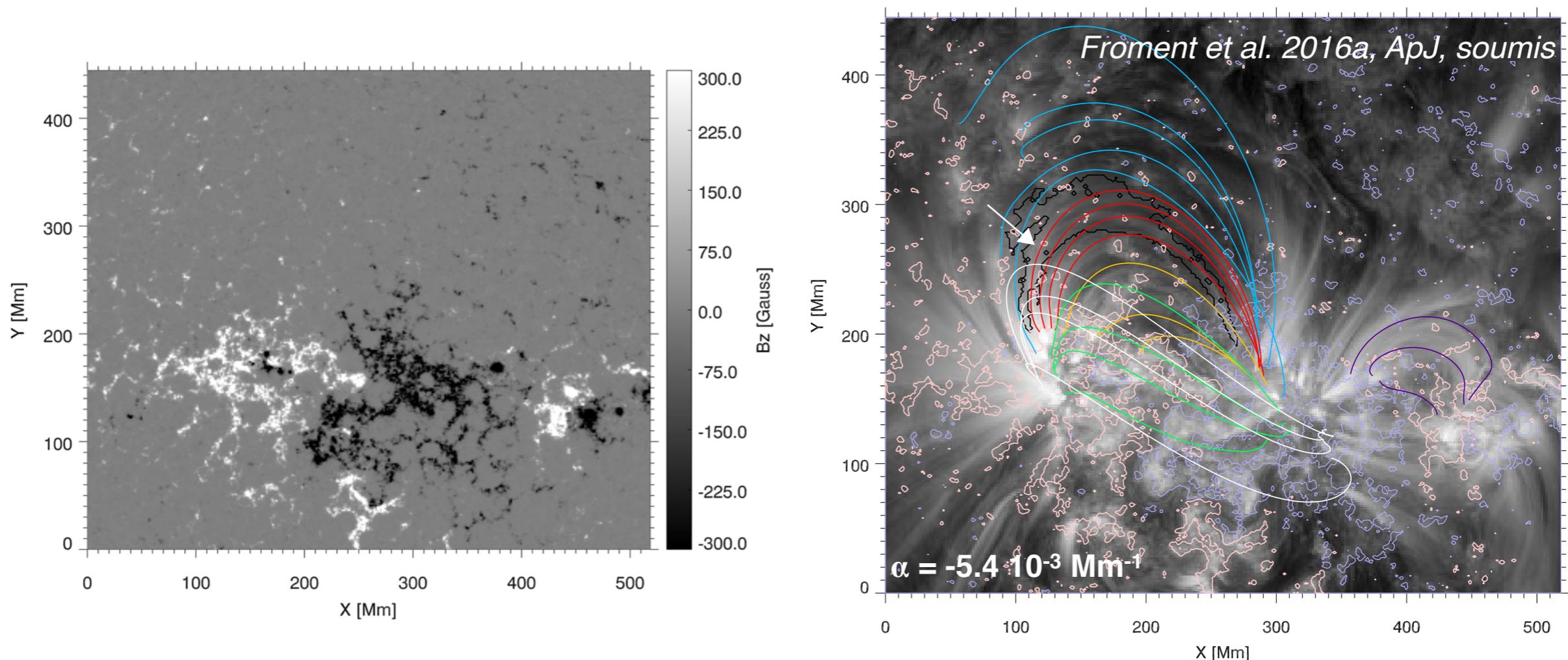
cycles avec
condensations
« incomplètes »



Extrapolation du champ magnétique

Importance d'utiliser une géométrie « réaliste » (*Mikić et al. 2013*)

- ➔ Géométrie de boucle = entrée du modèle
- ➔ Lignes de champ magnétiques = support physique
- ➔ Reconstruction 3D (LFFF) du champ magnétique coronal à partir des mesures à la photosphère



lignes de champ « boucles pulsantes »

Les boucles pulsantes se distinguent-elles par leur géométrie ?

Géométrie des boucles

Extrapolations de milliers de boucles pour 3 régions actives avec des boucles pulsantes :

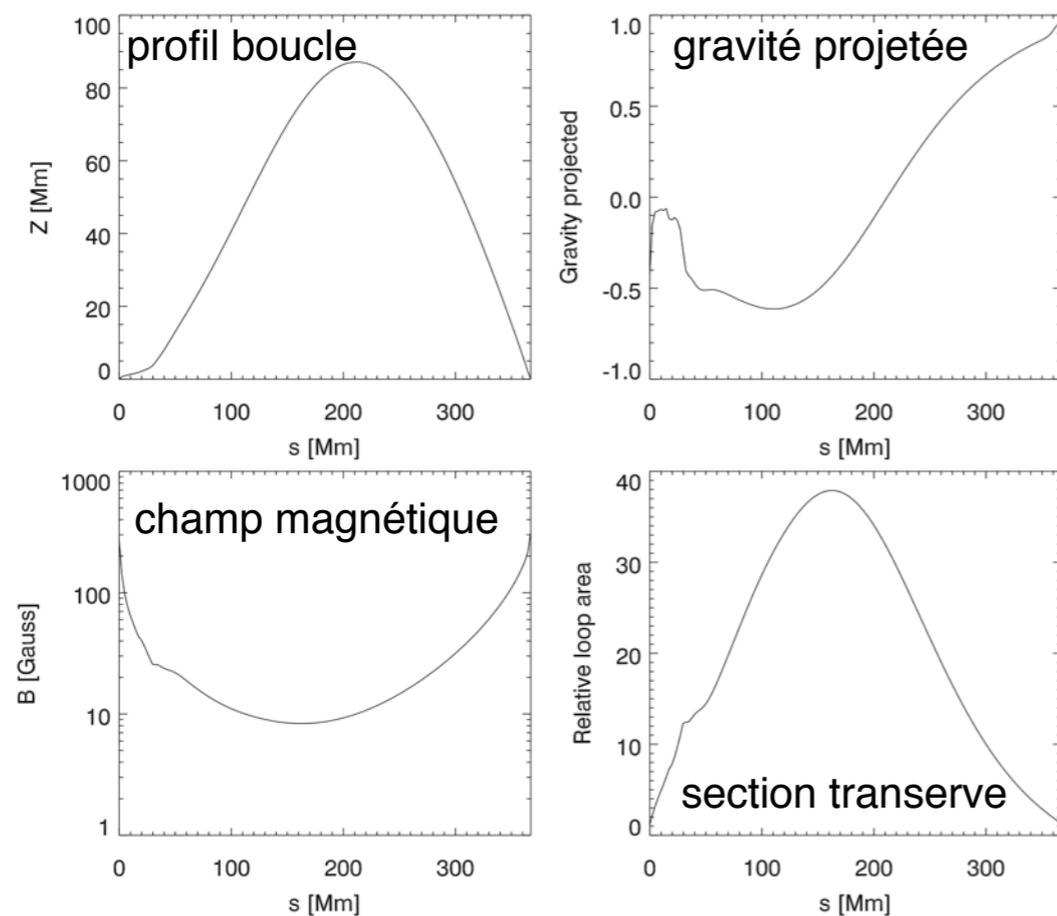
- « boucles pulsantes » déterminées à partir du contour de détection
 - **tests semi-automatiques sur la géométrie** : circularité, comportement aux pieds
-
- ➔ Sur les 3 cas, **pas de comportement géométrique commun aux boucles pulsantes**
 - ➔ **Pourquoi certaines boucles présentent des cycles : la géométrie seule ne peut l'expliquer**
 - ➔ **Combinaison de la géométrie et des caractéristiques du chauffage ?**

Simulations hydrodynamiques 1D

Code de Mikić et al. 2013

- ➔ champ magnétique : structure de la boucle mais n'intervient pas dans la dynamique
- ➔ plasma des boucles = fluide compressible
- ➔ équations de la **conservation de la masse**, de la **quantité de mouvement** et de l'**énergie**
- ➔ **pertes radiatives et par conduction thermique**

Géométrie de boucle (extrapolation LFFF)

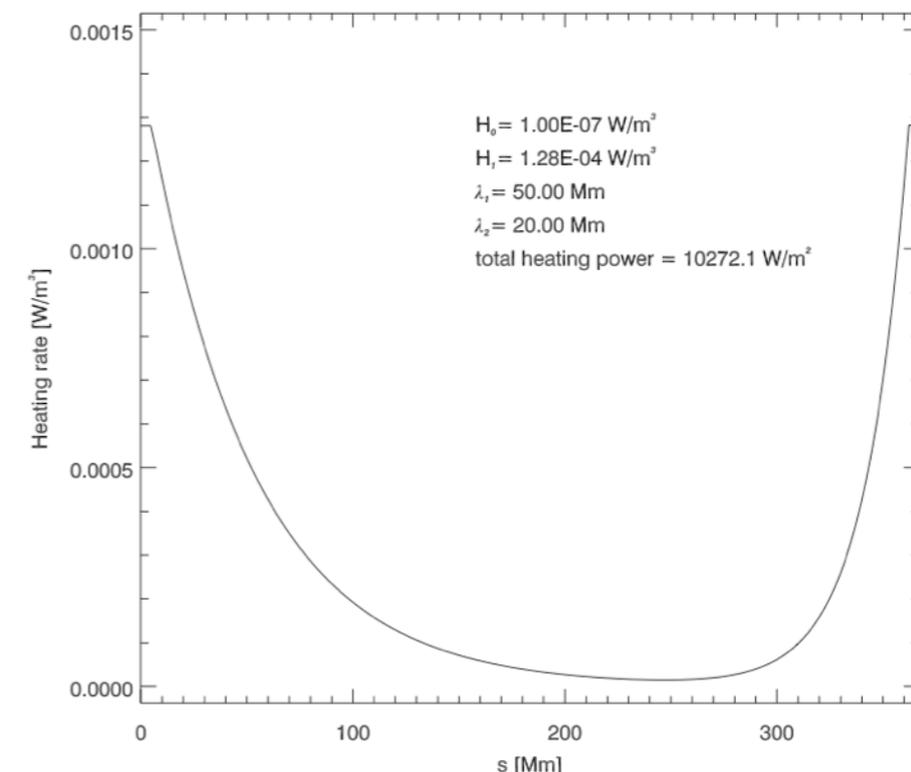


Chauffage constant et stratifié

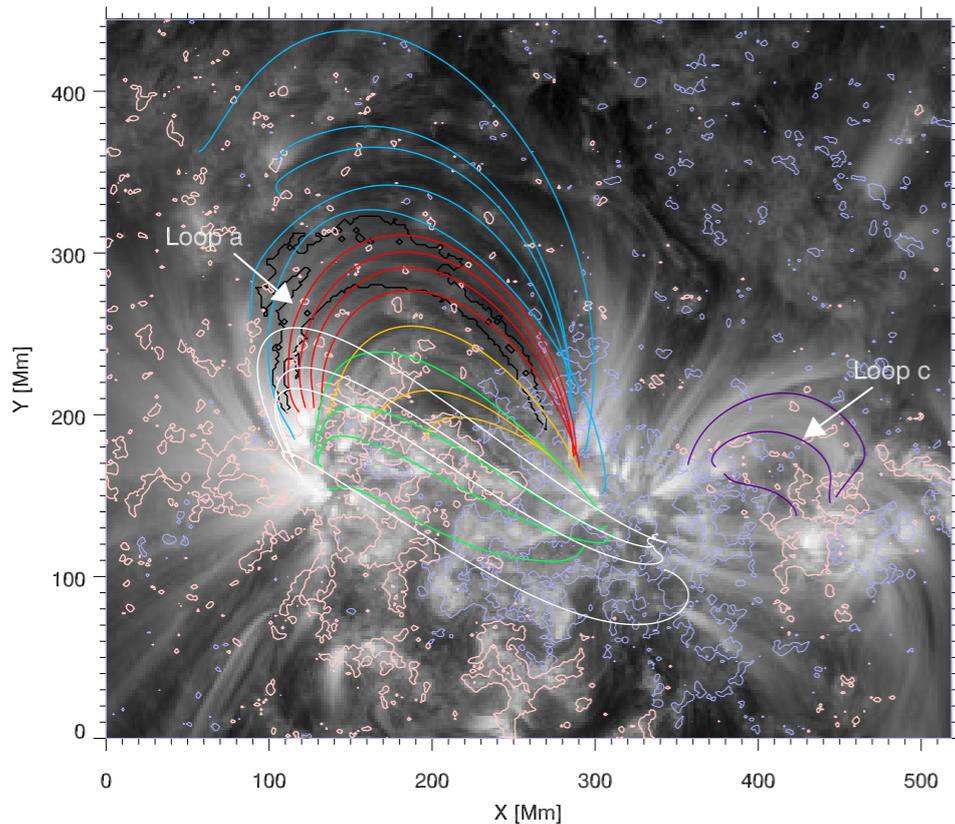
$$H(s) = H_0 + H_1(e^{-g(s)\lambda_1} + e^{-g(L-s)\lambda_2})$$

puissance volumique au sommet/aux pieds $g(s) = \max(s - \Delta, 0)$ and $\Delta = 5$ Mm hauteurs d'échelle

exemple : avec $L = 363$ Mm



Balayage de l'espace des paramètres



- ➔ Pour **3 géométries de boucles** : pulsante, non-pulsante et boucle « témoin » symétrique
- ➔ Exploration des **paramètres de chauffage** : puissance (H_1 , H_0 fixé) et hauteurs d'échelle (λ_1 , λ_2)

Entre 400 et 700 simulations pour chaque géométrie de boucle :

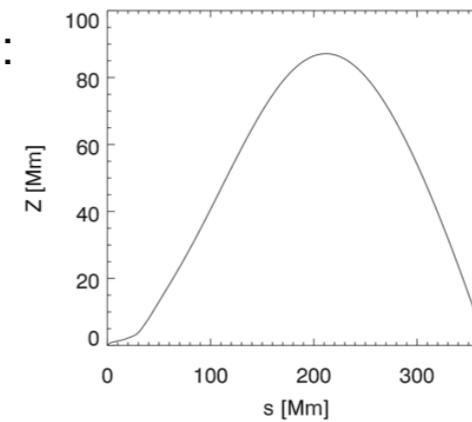
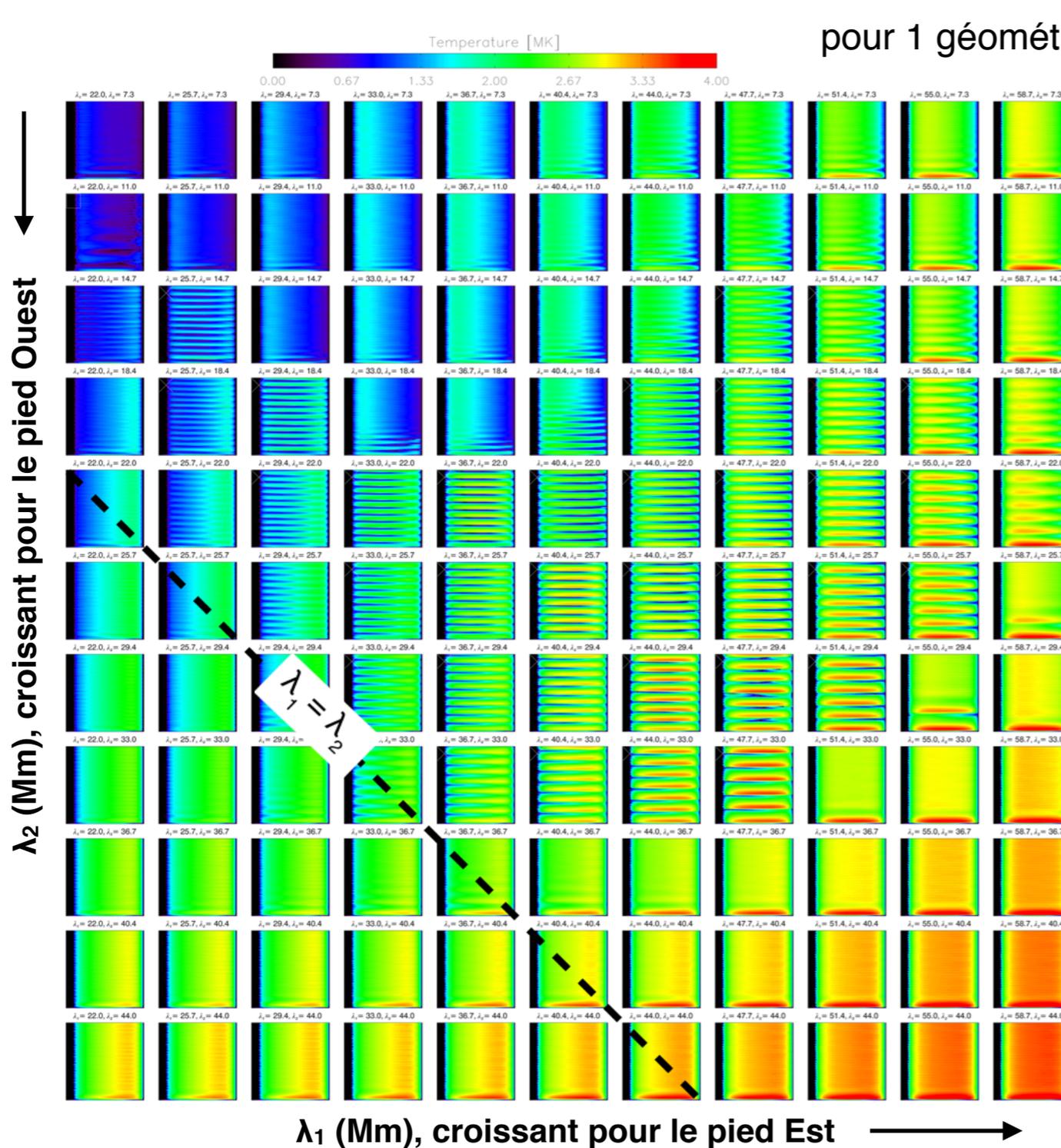
- « parallélisation » : une simulation par processeur
- des **milliers d'heures de temps CPU**

Modèle simple :

- ➔ simulations 1D : **1 seule boucle, pas d'effet d'avant/arrière plan**
- ➔ **chauffage strictement constant**

ne reproduit pas les
détails = **comportement
moyen et composante
long terme**

Balayage de l'espace des paramètres



$$H_0 = 1 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-3}$$

$$H_1 = 12.8 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-3}$$

$$2\% L < \lambda_1 < 12\% L$$

$$6\% L < \lambda_2 < 16\% L$$

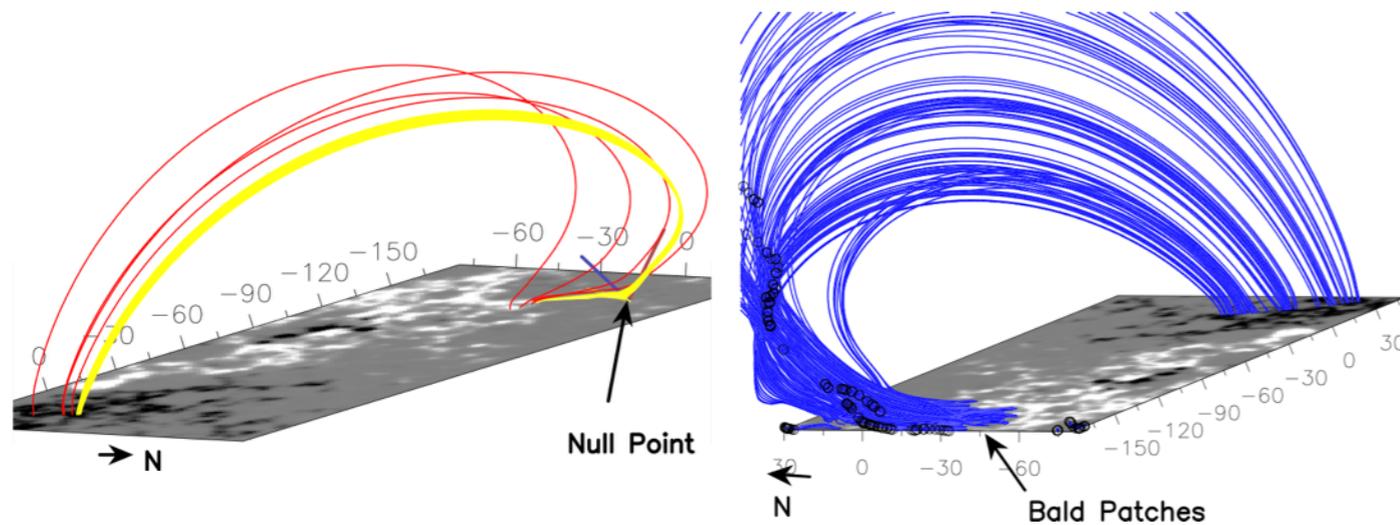
Conclusions sur les 3 géométries :

- ➔ On a des cycles quelle que soit la géométrie
- ➔ Pour chaque géométrie, **conditions sur le chauffage différentes**
- ➔ **Domaine restreint : combinaison géométrie boucle et paramètres du chauffage**
- ➔ Cycles évaporation/condensation possibles quand $\lambda_1 > \lambda_2$: **chauffage asymétrique**

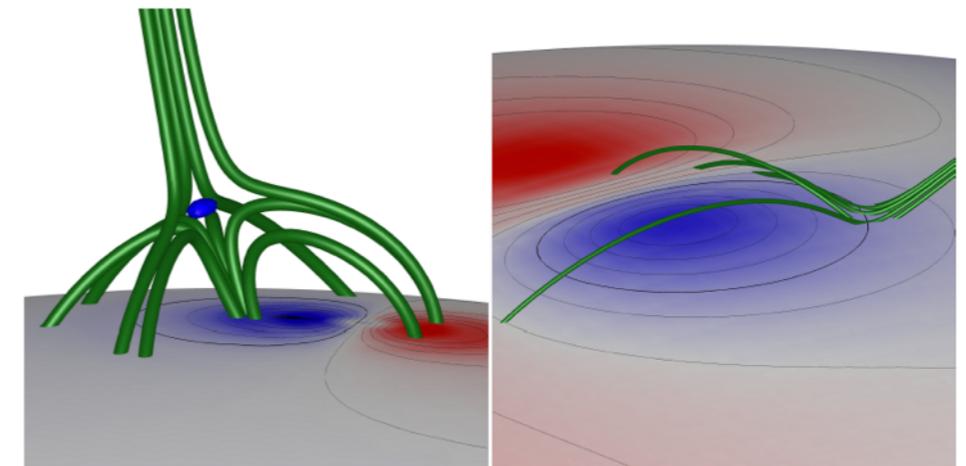
Froment et al. 2016b, en préparation

Indication de chauffage asymétrique

Pieds Est des boucles pulsantes : un **point nul** photosphérique et nombreux **Bald Patches**



Froment et al. 2016, ApJ, soumis

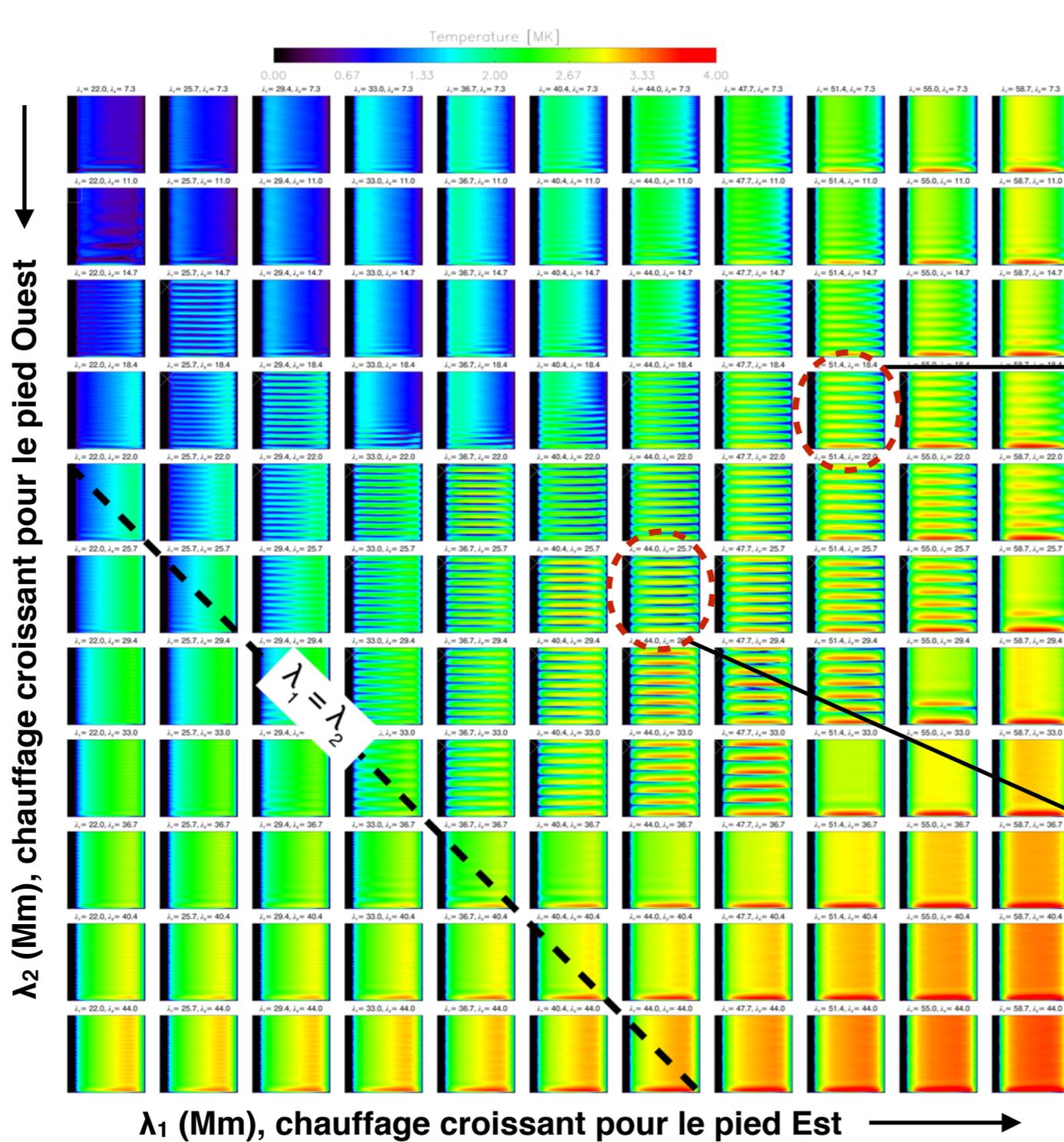


Point nul et Bald Patches en 3D
Müller & Antiochos 2008

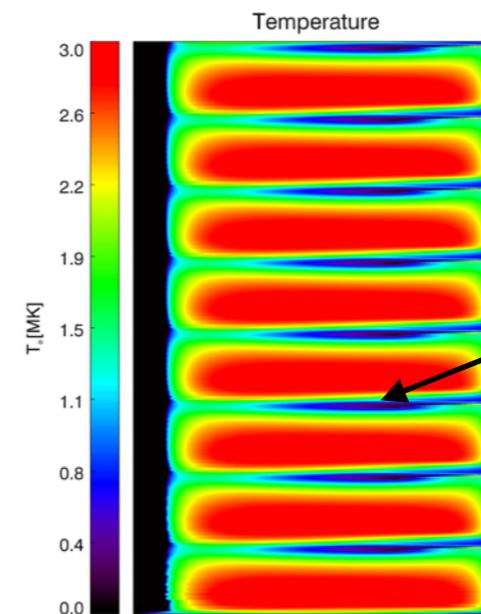
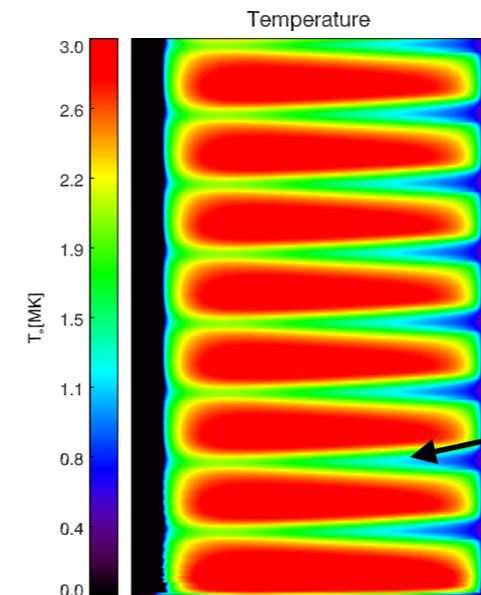
Structures topologiques particulières du champ magnétique : forment des **séparatrices**

- ➔ Sites préférentiels pour la **reconnexion magnétique**
- ➔ Un **chauffage potentiellement plus important à l'Est qu'à l'Ouest** de ces boucles

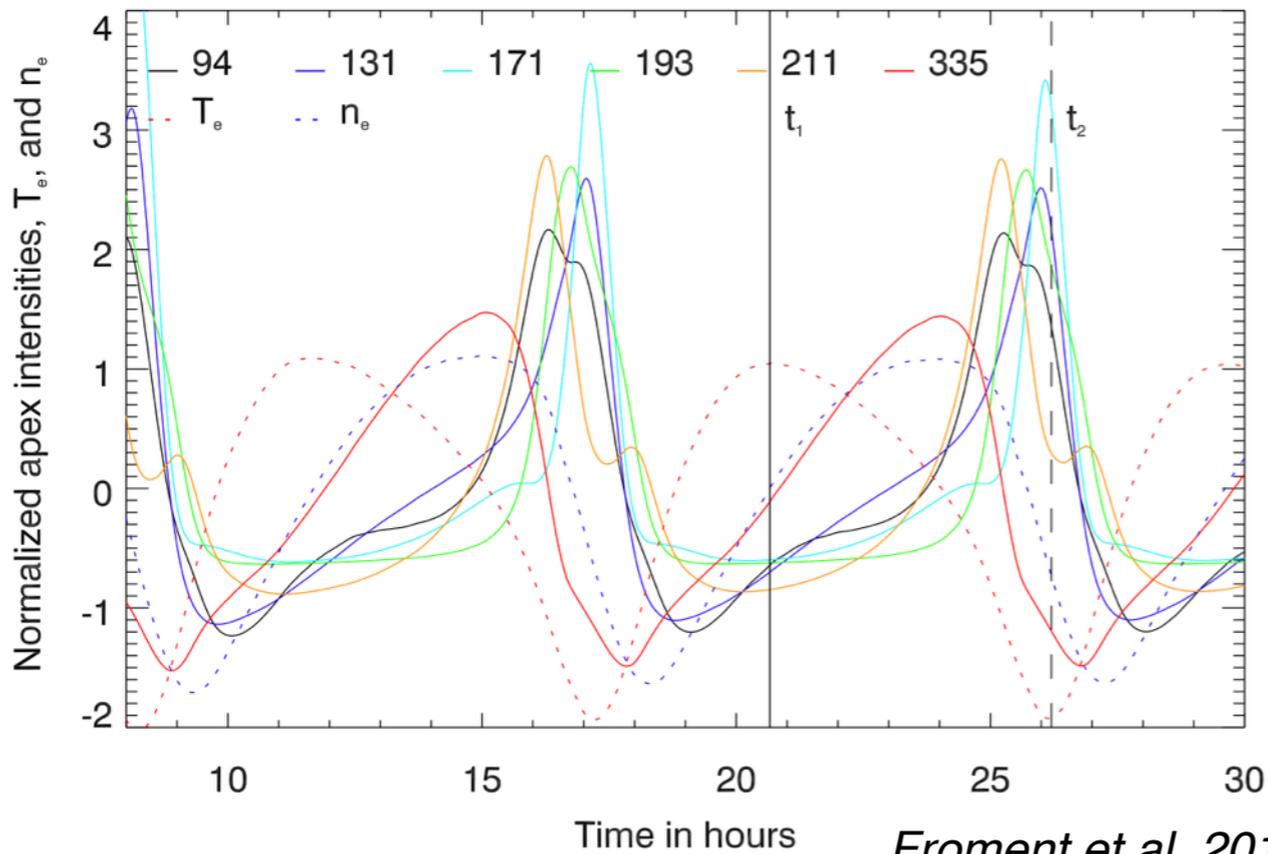
Étude d'une simulation en particulier



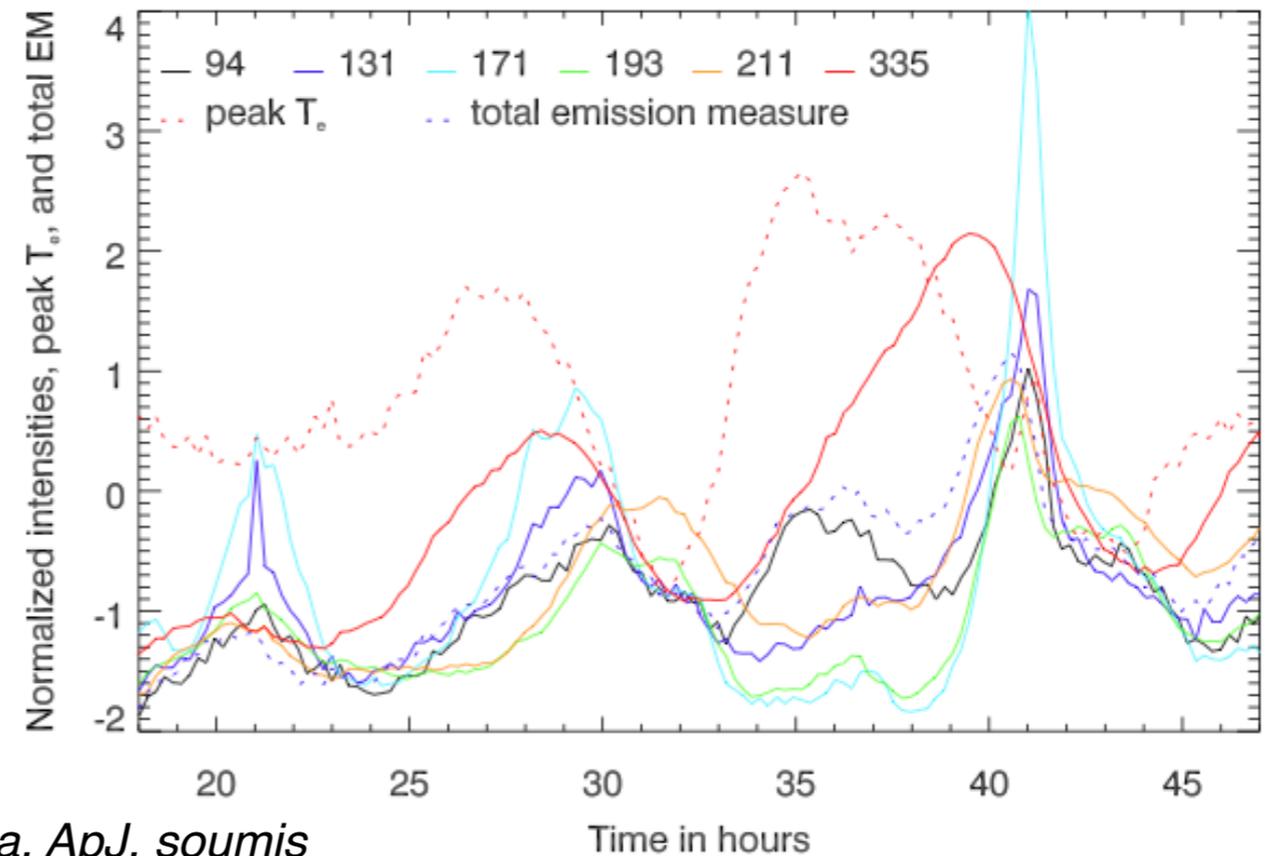
Différents types de comportements moyens reproduits



Intensités simulées et observations AIA



Froment et al. 2016a, ApJ, soumis



- ➔ Valeurs moyennées au sommet de la boucle
- ➔ Intensités simulées avec fonctions réponses AIA (CHIANTI 8.0, *Del Zanna et al. 2015*)
- ➔ Modèle qui reproduit la **composante long terme** de l'évolution thermique

Modèle qui permet d'expliquer les observations de pulsations d'intensité longue période

Conclusion : le TNE permet d'expliquer les pulsations observées

➔ Analyse de la géométrie des boucles :

- les boucles pulsantes ne se distinguent pas par leur géométrie

➔ Balayage paramètres chauffage/géométrie dans les simulations hydrodynamiques 1D :

- n'importe quelle boucle peut rentrer dans des cycles de TNE
- TNE : bonne adéquation entre géométrie boucle et chauffage
- cela explique pourquoi certaines boucles présentent des cycles et d'autres non

➔ TNE - cycles d'évaporation et de condensation « incomplètes »

- modèle qui permet de reproduire comportement moyen et composante long terme
- **un chauffage stratifié et quasi-constant explique nos observations**

Objectif I : Périodicité répandue ?

I. Phénoménologie

1. Utilisation des données SDO/AIA
2. Méthode de détection
3. Conclusion : un phénomène très fréquent

Objectif III - Le TNE permet-il d'expliquer ces observations ?

III. Modélisation

1. Objectifs de la modélisation
2. Structure des boucles
3. Simulations hydrodynamiques 1D
4. Conclusion : le TNE permet d'expliquer les pulsations observées

Objectif II : Caractérisation thermodynamique

II. Diagnostics

1. Événements étudiés en détails
2. Évolution de la température et de la densité
3. Étude de la phase de refroidissement
4. Conclusion : TNE - signature de cycles d'évaporation et de condensation

IV. Conclusions et Perspectives

Conclusions

- ➔ **Statistiques sur 6 ans de données SDO/AIA :**
 - origine solaire de ces pulsations ainsi que leur caractère fréquent dans la couronne
- ➔ **Diagnostics thermiques des boucles pulsantes** (*Froment et al. 2015*) :
 - **TNE - cycles d'évaporation et de condensation « incomplètes »**
- ➔ **Modélisation** (*Froment et al. 2016a, soumis ; Froment et al. 2016b, en préparation*) :
 - **confirmation que le TNE peut expliquer les observations**
 - reproduit les intensités observées
 - explique pourquoi toutes les boucles ne rentrent dans ces cycles
- ➔ **Implications importantes pour le chauffage coronal : localisation et fréquence**

Perspectives

Unification du phénomène observé avec la pluie coronale

- ➔ Observation **simultanée de pulsations d'intensité et de pluie coronale**
; de **pluie coronale périodique**
- ➔ Vérifier ce qui est **prédit par les simulations**, notamment les **vitesse d'écoulement**
- ➔ **Compréhension de la nature du processus physique** : analyse fine avec les simulations
- ➔ **Événements du Soleil calme ?**

Merci de votre attention !