

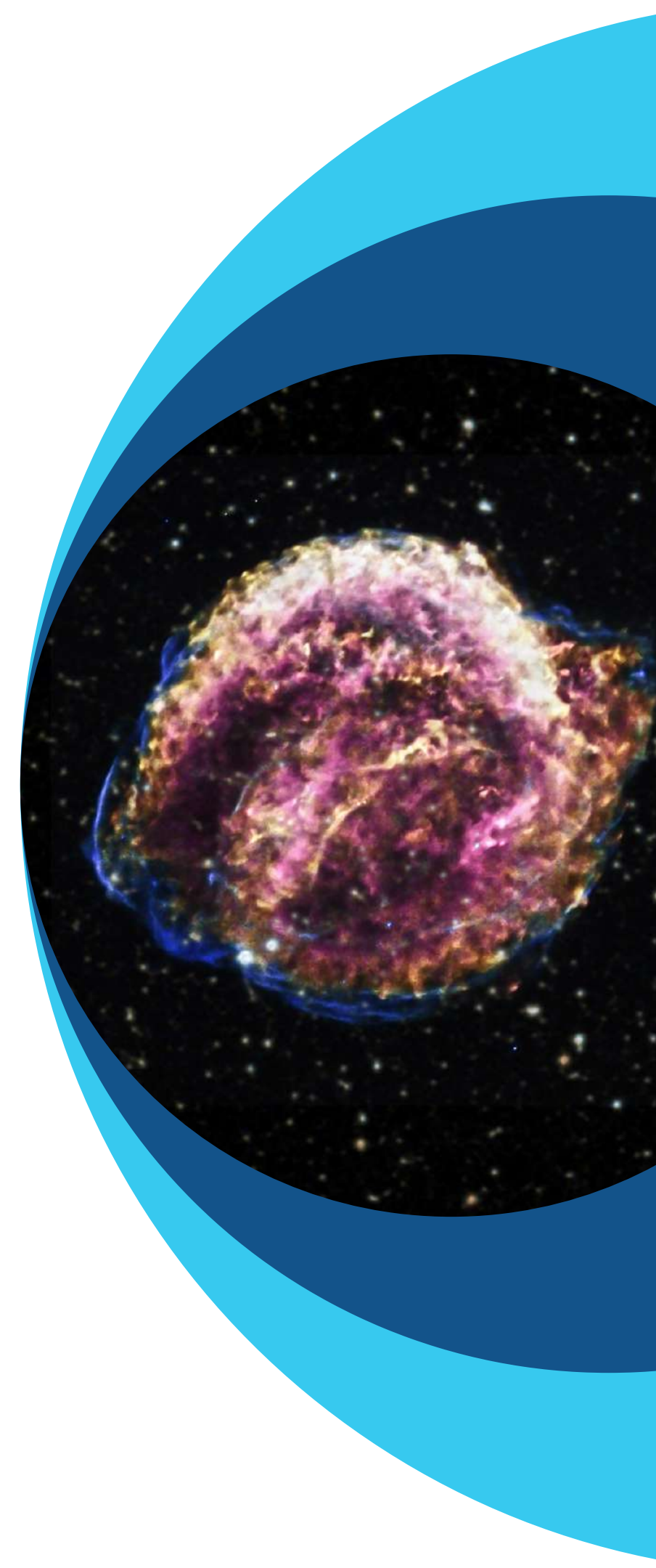
23 JUIN 2021

Oral de stage du M2 PSA

CARACTÉRISATION MULTIDIMENSIONNELLE DES VESTIGES DE SUPERNOVA EN RAYONS X

Direction : Fabio Acero

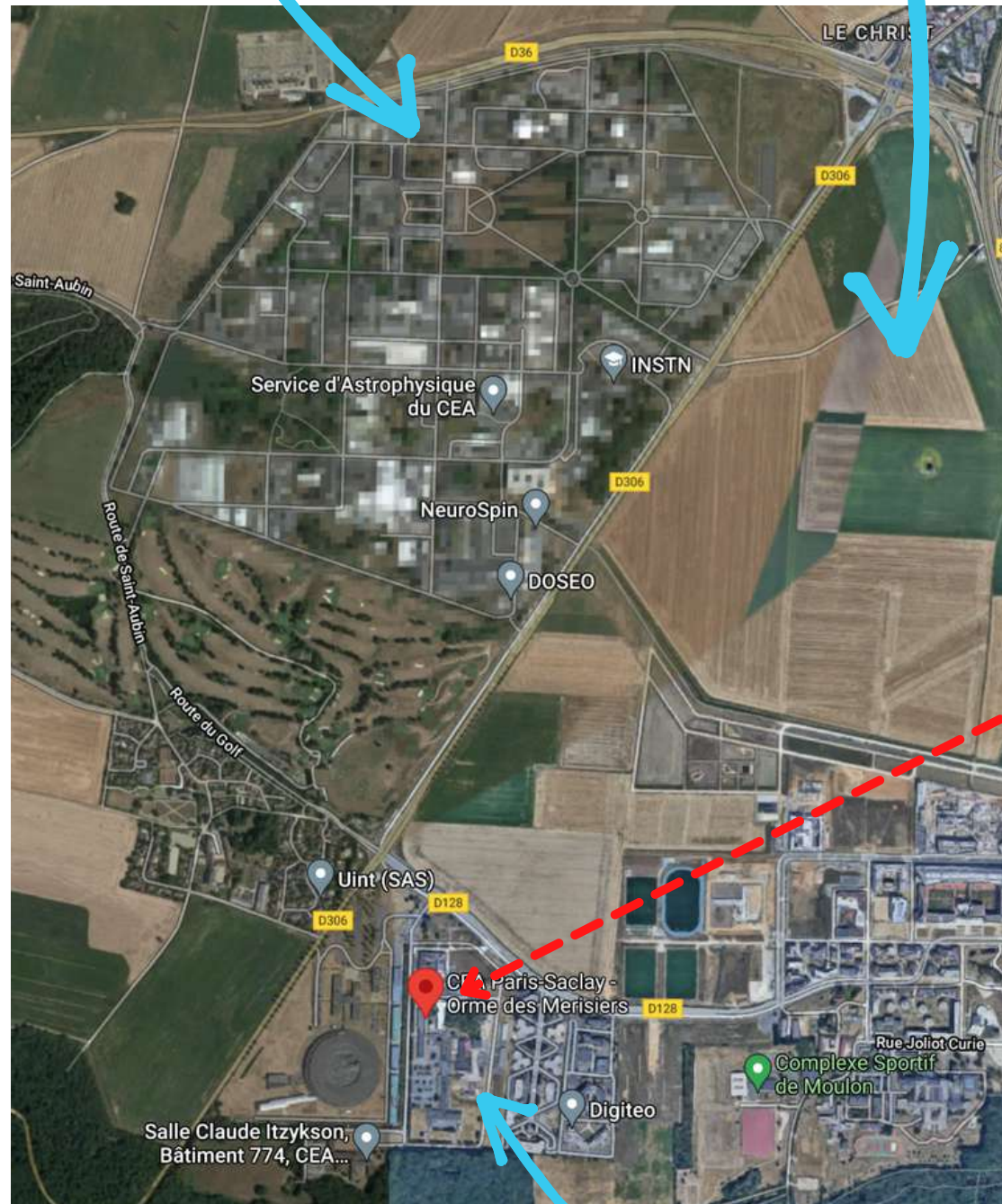
Leïla Godinaud



Contexte L'astrophysique au CEA Saclay

Zone principale
du CEA Saclay

Champs du plateau
de Saclay



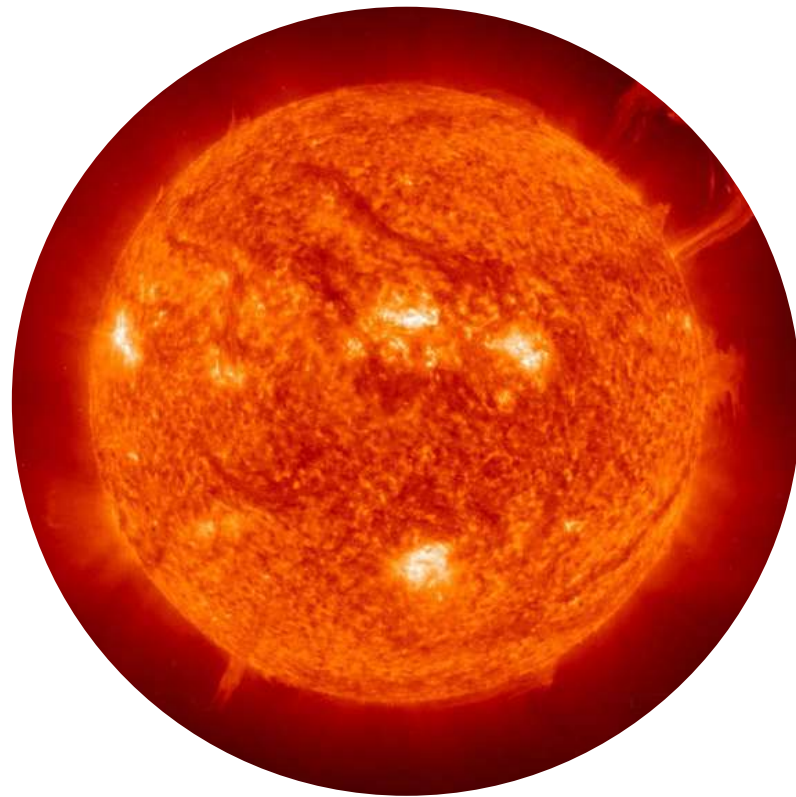
L'orme des
merisiers



- CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
- IRFU : L'Institut de Recherche sur les lois fondamentales de l'Univers
- DAp : Département d'Astrophysique
- LEPCHÉ : Laboratoire d'Étude des Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie

Contexte La mort d'une étoile

Progéniteur (étoile en fin de vie)



- Composé de carbone et oxygène
- Vents stellaires enrichissant le milieu circumstellaire (CSM)



Supernova



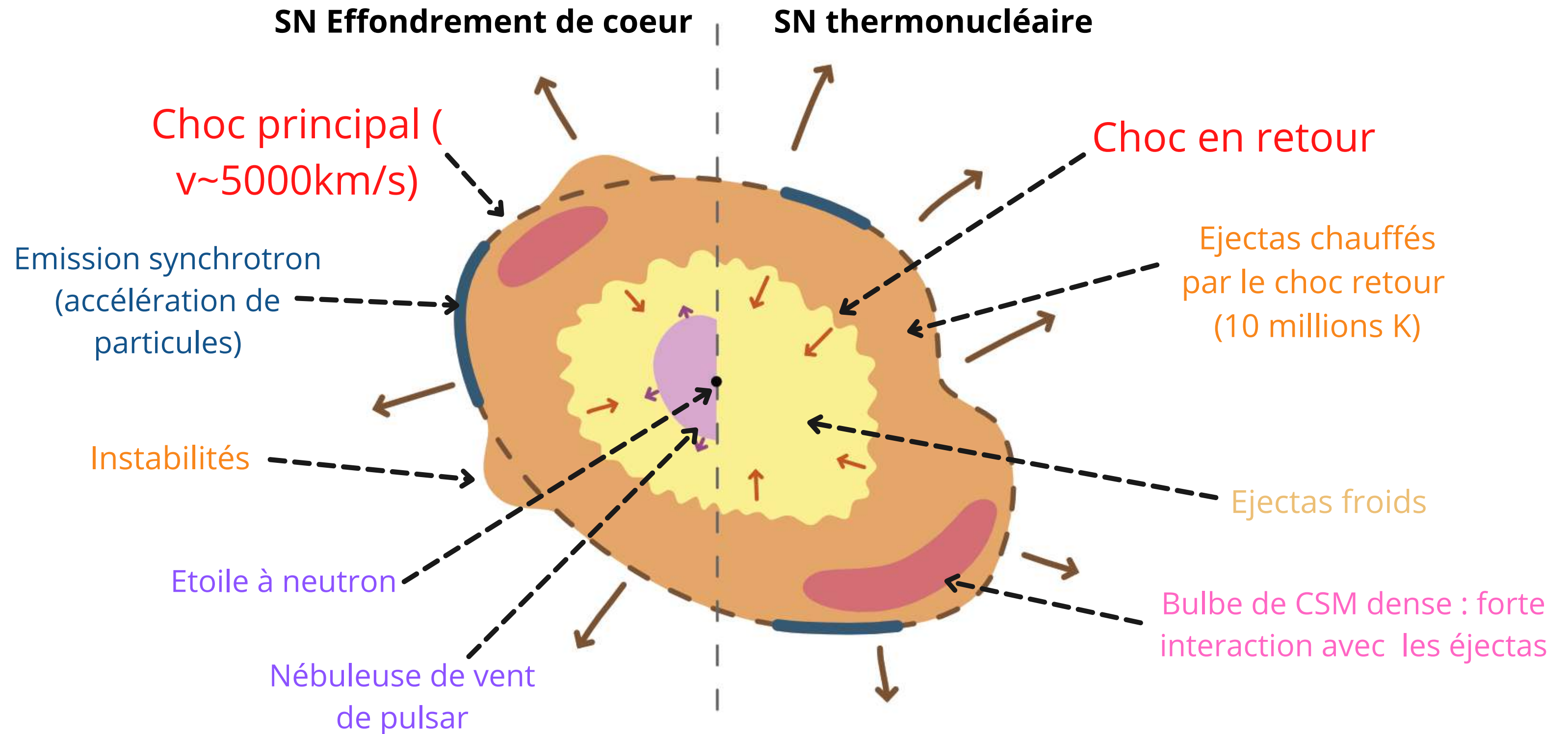
- Thermonucléaire ou à effondrement de coeur
- Nucléosynthèse lors de l'explosion
- Assymétrie de l'explosion



Rémanent de supernova

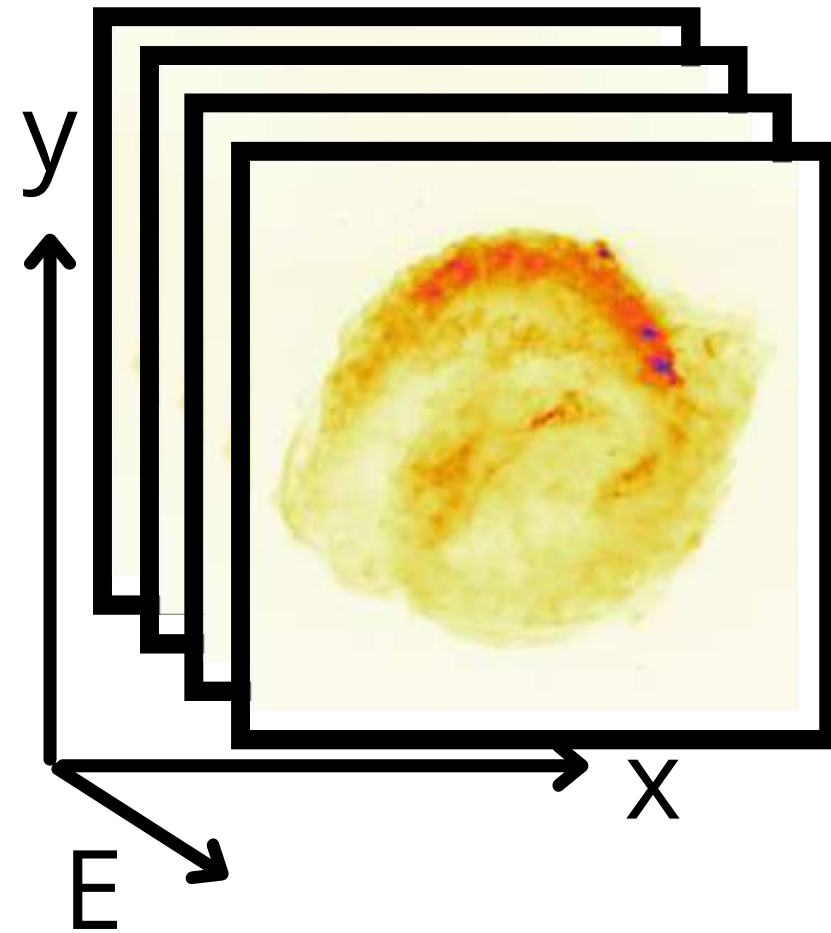


Contexte Les rémanents de Supernovae



Contexte

L'astrophysique en rayon X



La position, énergie et instant d'arrivée mesurés pour chaque photon.

Les télescopes spectro-imageurs : des cubes de données

- Chandra (depuis 1999)
- XMM-Newton (depuis 1999)
- Athena - XIFU (2030)

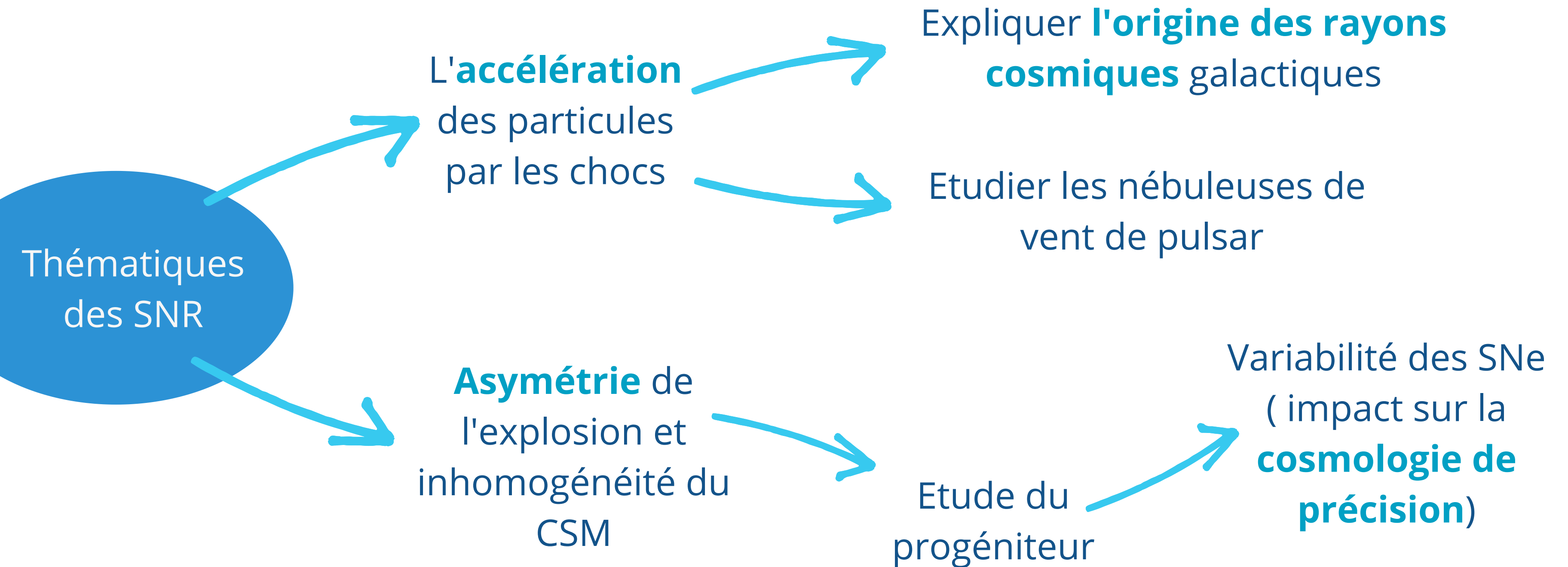


Révolution à venir pour les caméras en rayons X

- Traditionnellement CCD (conversion photon en électron)
- Bientôt utilisation de détecteurs calorimétriques (mesure hausse température au passage d'un photon)

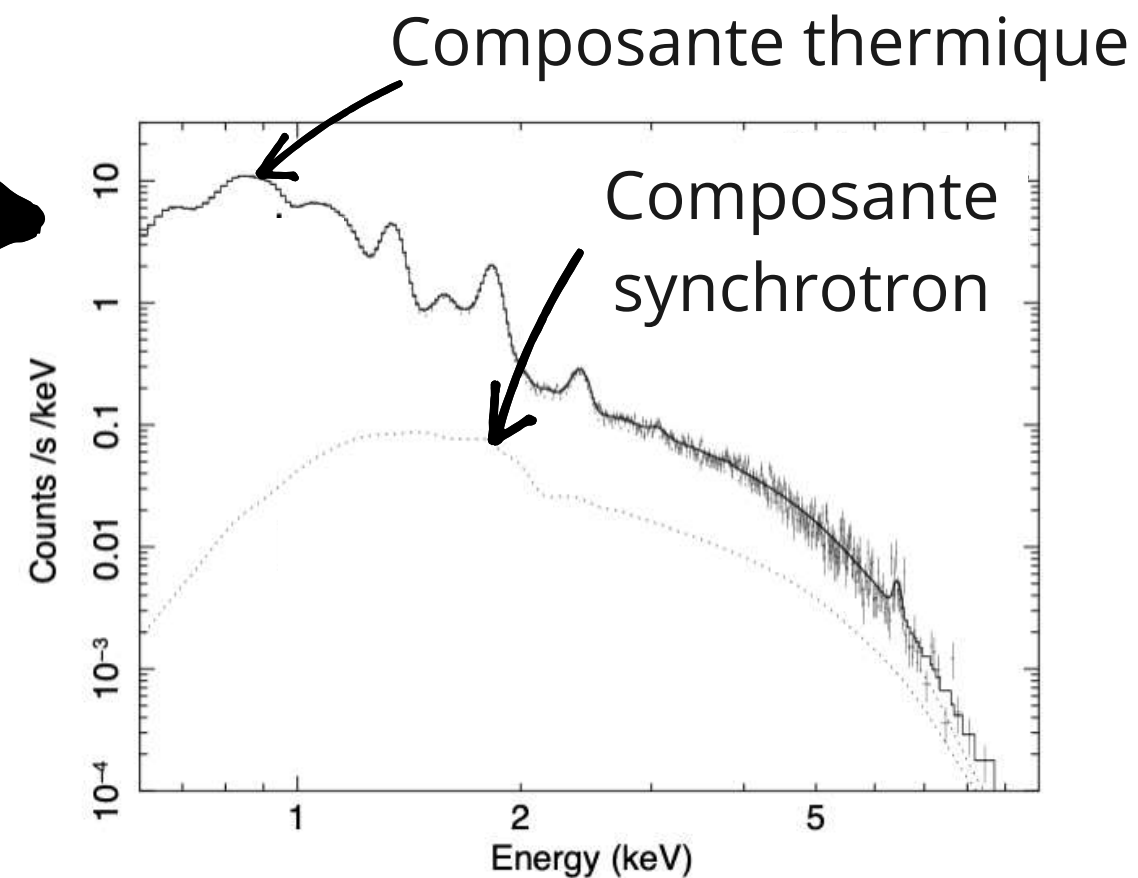
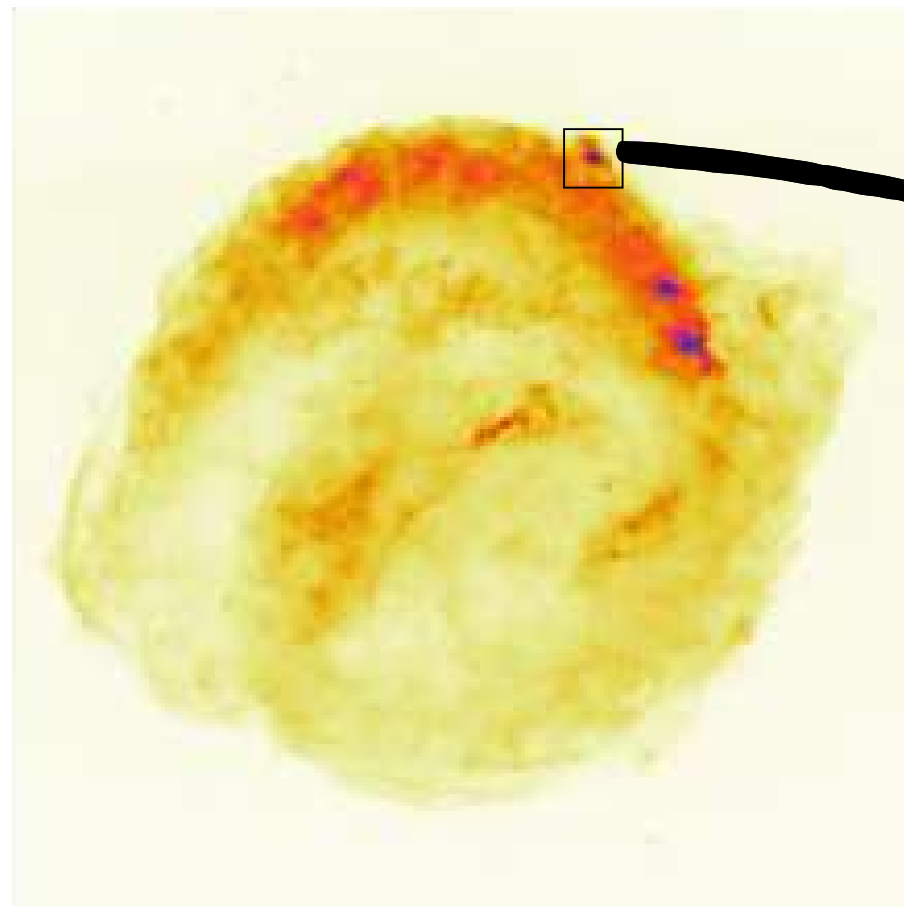


Contexte Les enjeux scientifiques



Contexte Les méthodes d'analyse traditionnelles

En X mesure pour chaque photon de sa position et énergie



1) Définir à l'oeil des régions d'intérêt

2) Extraire et modéliser le spectre associé

Limites :

- Composantes mélangées et séparation spectrale uniquement
- Dégénérescence modèle à haute énergie entre composantes

Bien que les données soient 3D (x, y, E), analyses en 2D ou 1D

Contexte

- Exploiter pleinement la nature 3D des données
- Blind source separation : analyse non supervisée
- Initialement utilisée pour données de Planck
- Développé au CEA par des experts d'analyse de données

General Morphological Component Analysis (GMCA)

$$X = \sum_k A_k * S_k$$

Diagram illustrating the GMCA model structure. The equation $X = \sum_k A_k * S_k$ is shown. Arrows point from the terms to their corresponding data types: X is labeled "Cube de données (3D)", A_k is labeled "Spectre (1D)", and S_k is labeled "Image(2D)".

Diagram illustrating the GMCA model structure with Planck data. A 3D cube of data is shown on the left, with axes labeled x , y , and E . This is followed by an equals sign and a sum of products: $\text{spec1} * \text{[2D map]} + \text{spec2} * \text{[2D map]} + \dots$. The 2D maps are color-coded: the first is blue/orange, the second is green/yellow, and the third is red/purple.

poissonian GMCA (pGMCA) :

- bruit adapté aux données X (pas gaussien)
- meilleure reconstruction des composantes

■ Objectif du stage

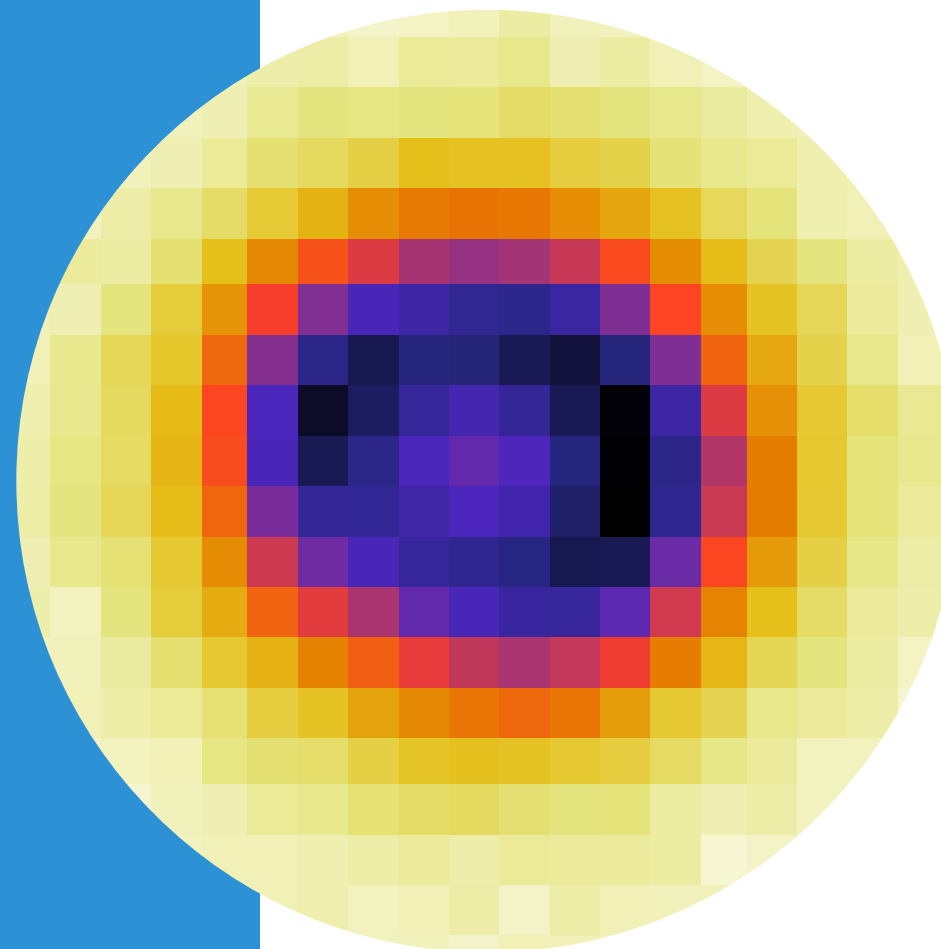
DEMONTRER LE POTENTIEL SCIENTIFIQUE DE GMCA.

Avec la thématique de l'**accélération de particules** dans les jeunes rémanents observés dans le domaine des rayons X.



SNR Kepler

- âge : 417 ans
- distance : 5 kpc
- type SN : Thermonucléaire
- 570x570 pixels
- 300 bins énergie (0.5 à 10keV)

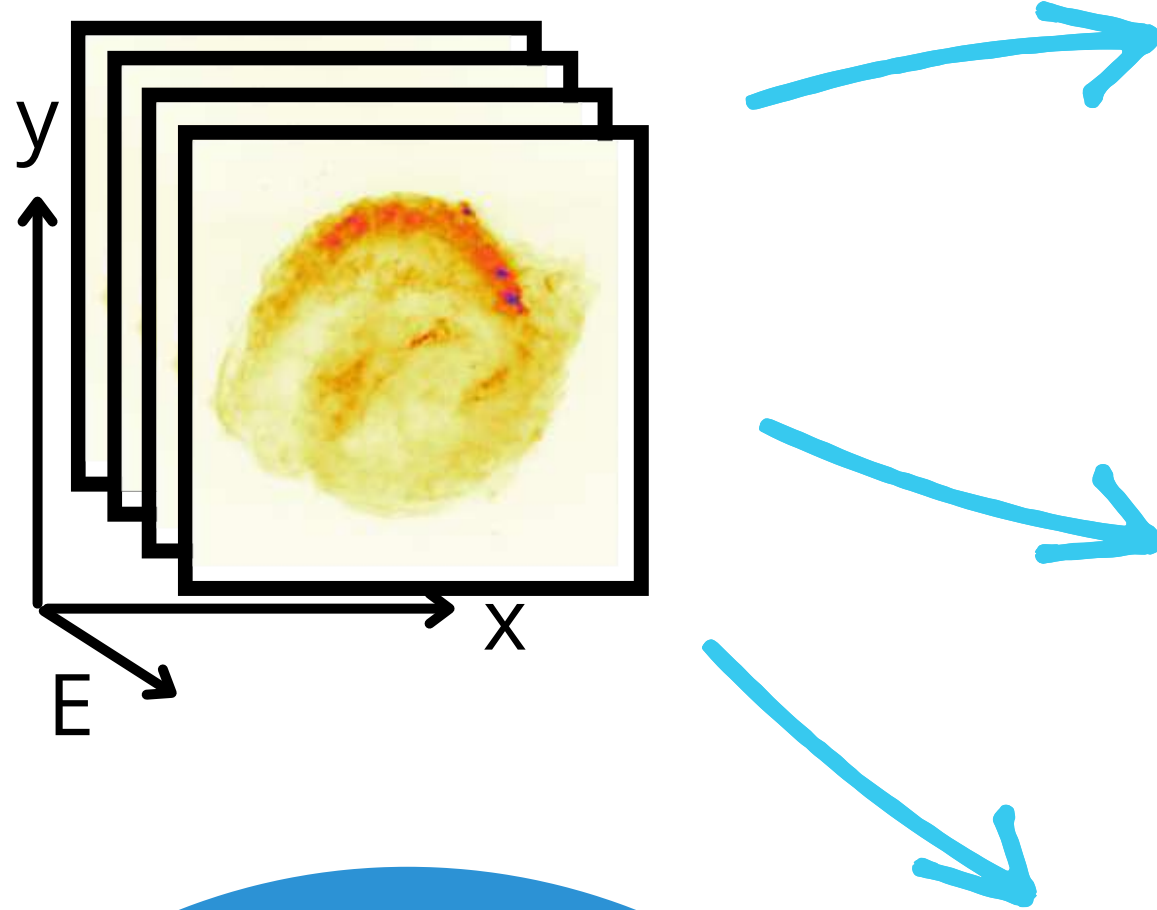


SN87a

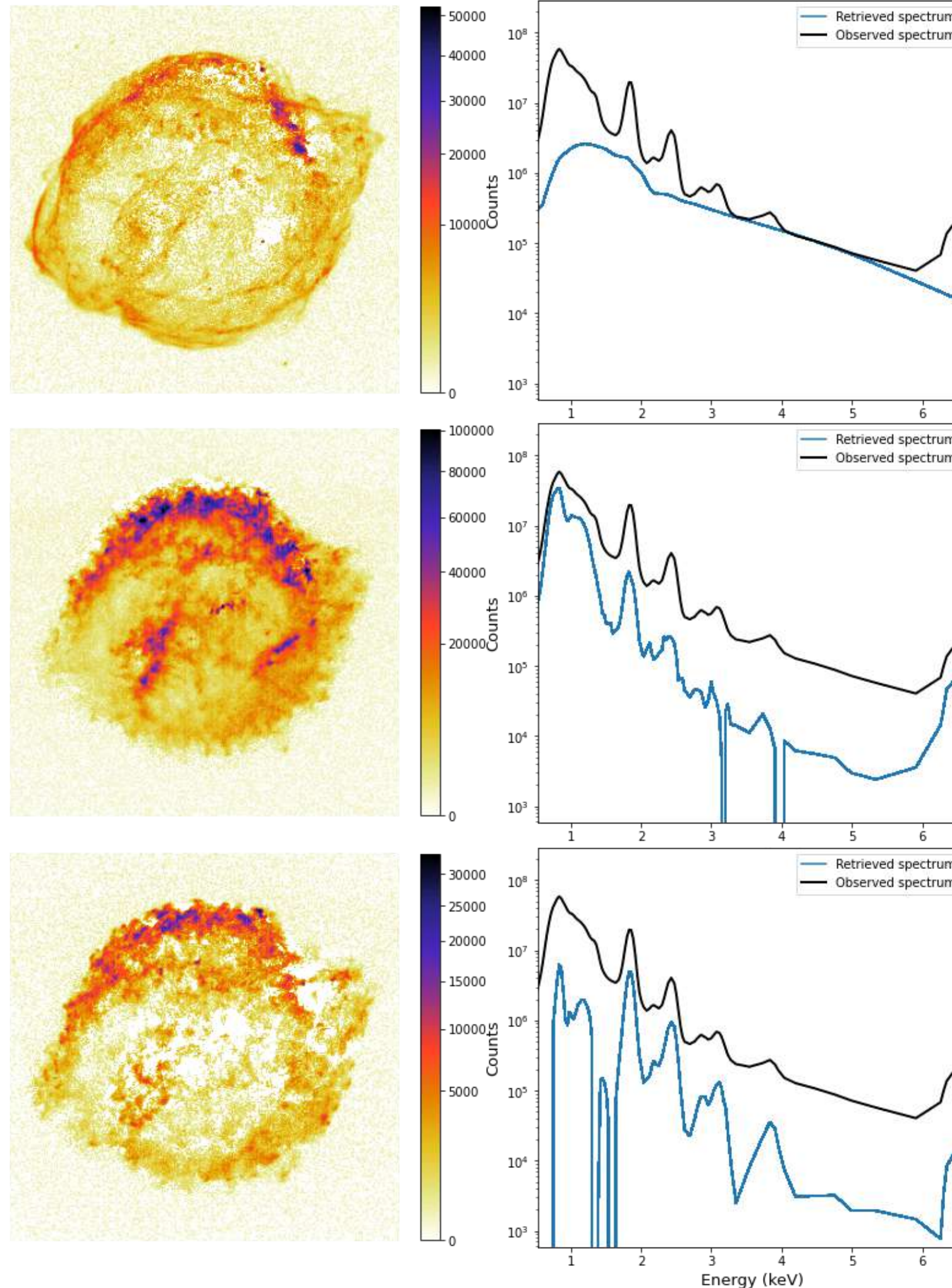
- âge : 34 ans
- distance : 50 kpc
- type SN : Core Collapse
- 20x20 pixels
- 60 bins énergie (0.5 à 7keV)

Stage

Application GMCA : Kepler



- Aucun a priori physique (Possibilité initialisation)
- interprétation parfois difficile



Synchrotron

- spectre : power law
- image : filaments

Ejecta Fer :

- spectre : raie Fe K et L
- image : structure moutonneuse

Autres éjecta (Si, S, Ar, Ca) :

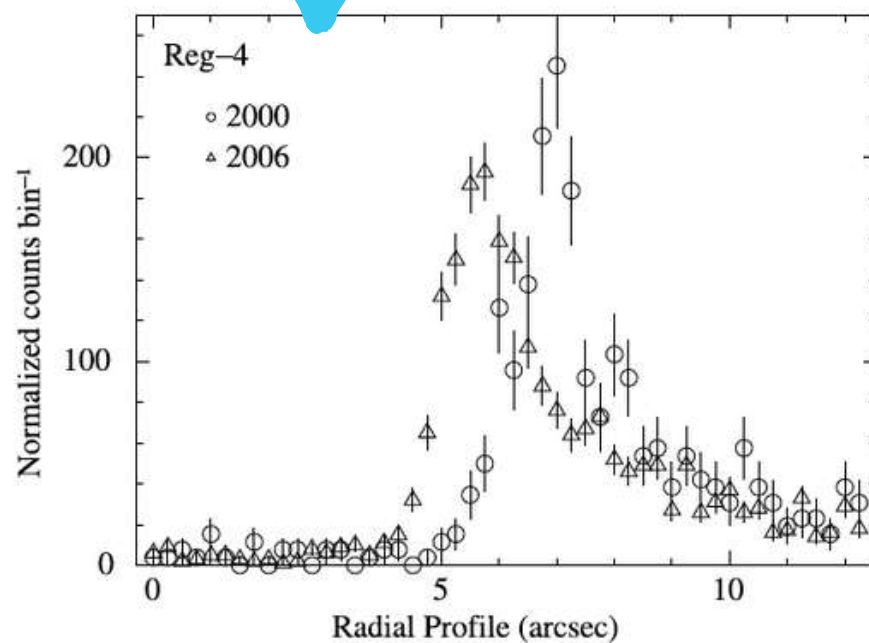
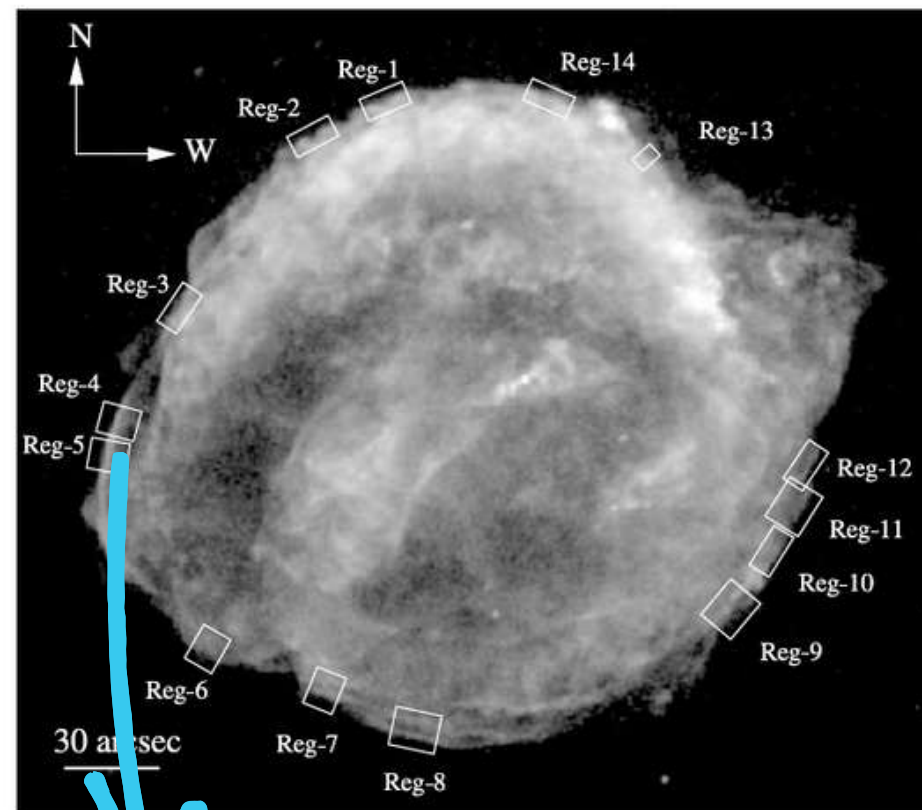
- spectre : raies
- image : structure moutonneuse

Stage SNR Kepler

- *State of art* : Katsuda et al, 2008

Enjeux :

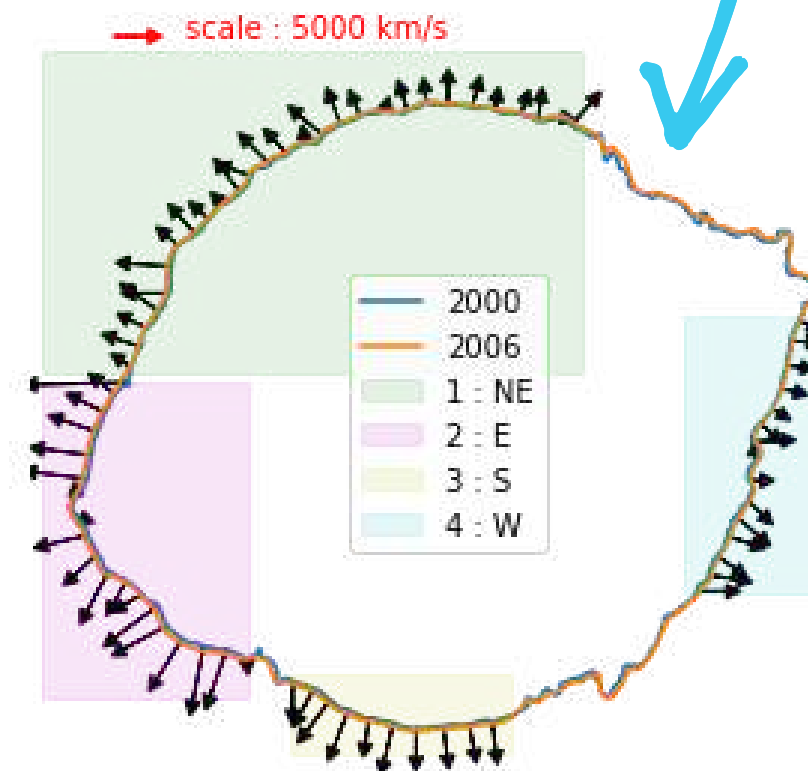
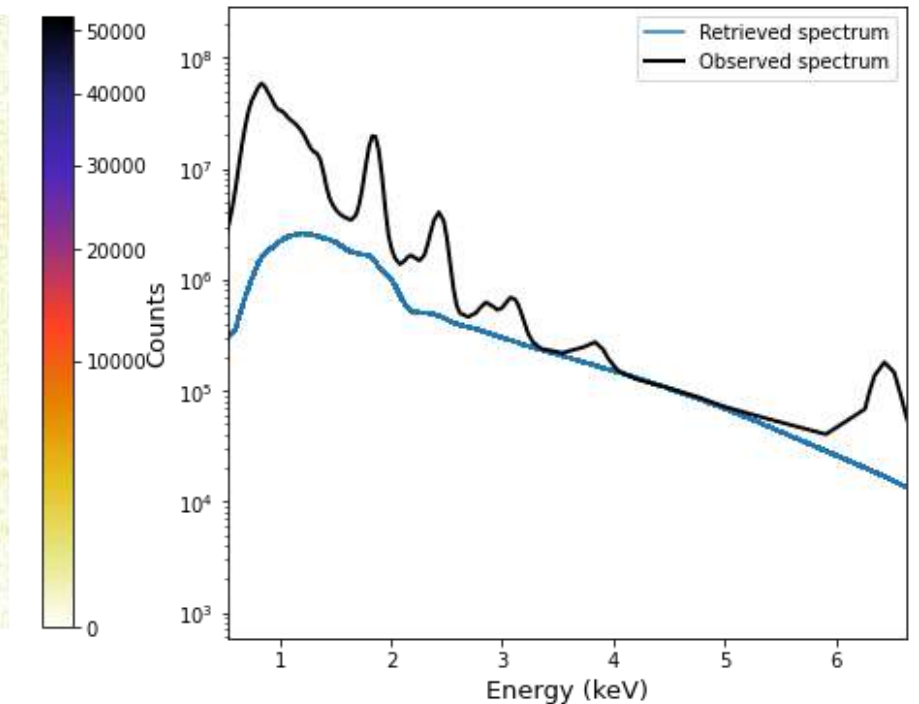
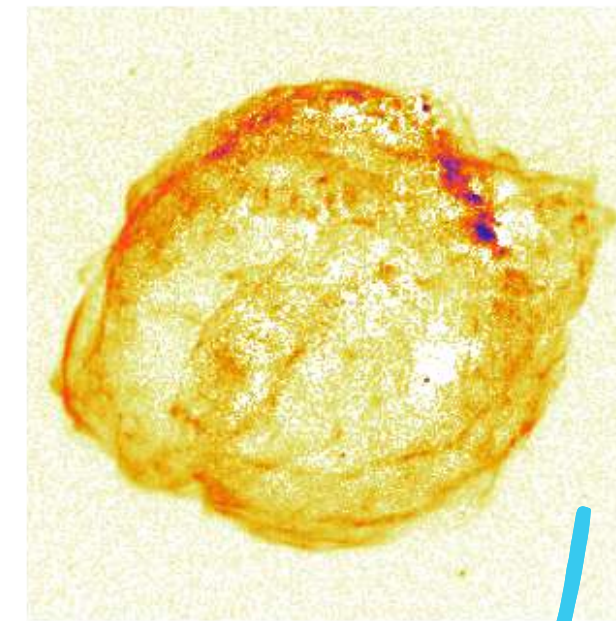
- 1) Mécanisme d'accélération de particules
- 2) Asymétrie de l'explosion et du CSM



- Image totale du rémanent vu entre 0.5 et 8 keV
- aucune séparation entre synchrotron et thermique

Protocole :

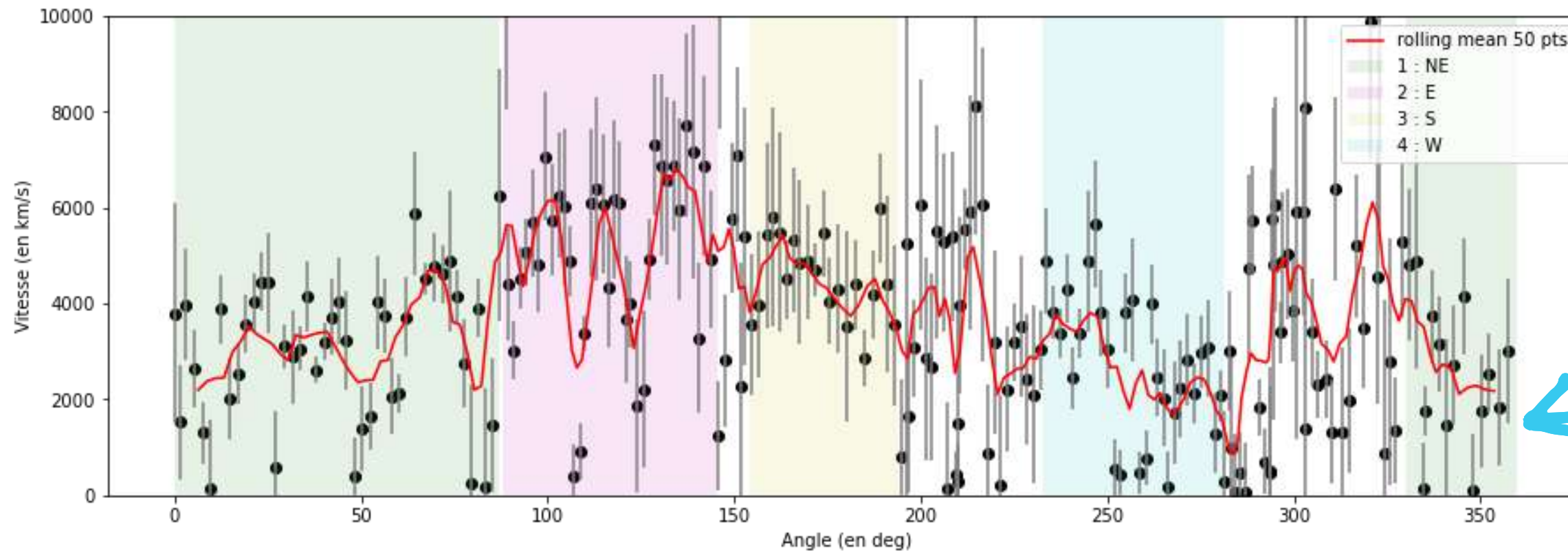
1. Définition de zones
2. Extraction du profil radial dans chaque région
3. Comparaison et mesure du déplacement



Protocole :

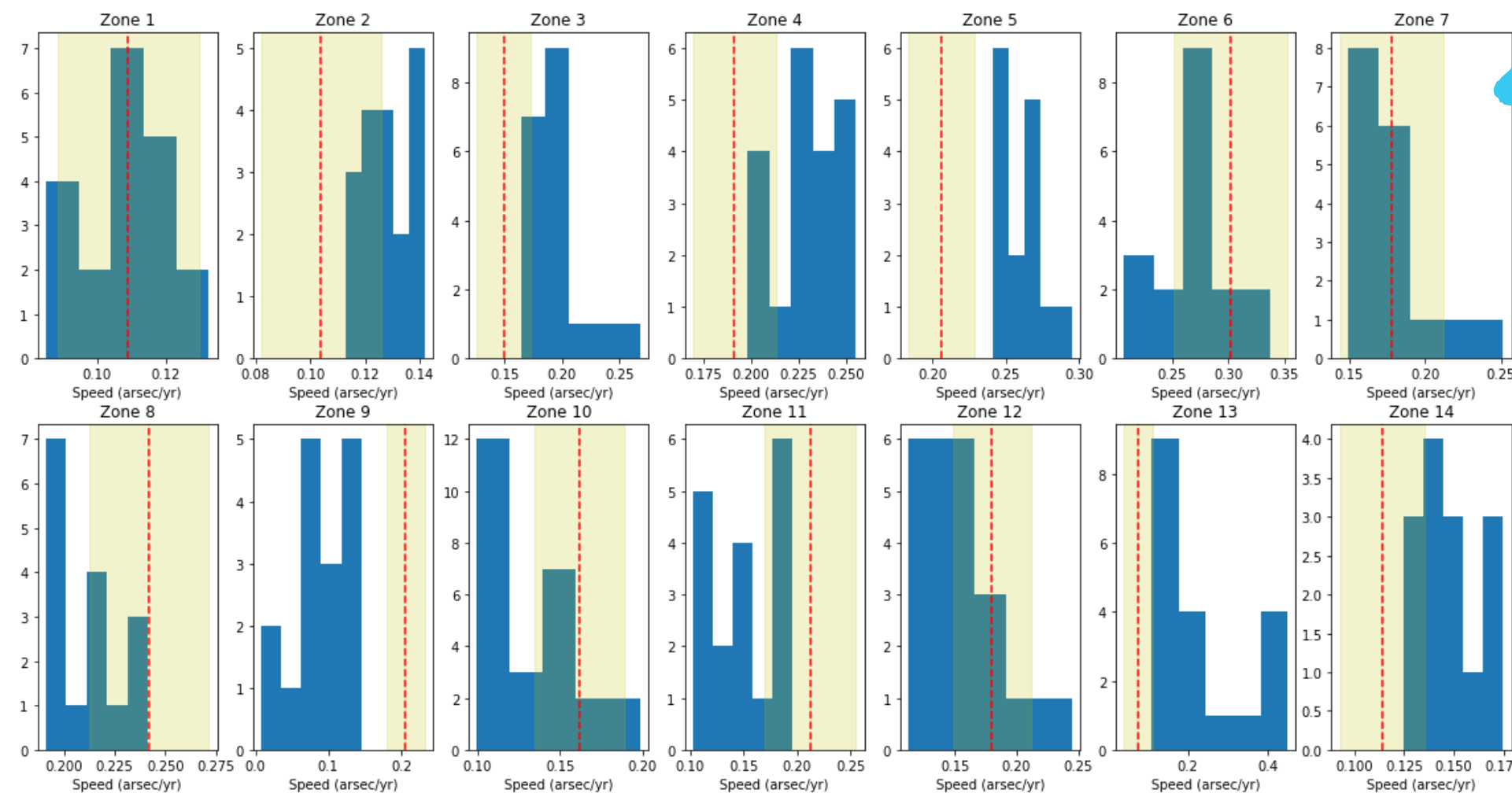
1. Isoler synchrotron avec GMCA
2. Contours avec Scikit image
3. Champ de vitesse

Stage SNR Kepler



Champ de vitesse obtenu en fonction de l'angle

Comparaison avec les mesures de Katsuda et al



Limites Katsuda et al:

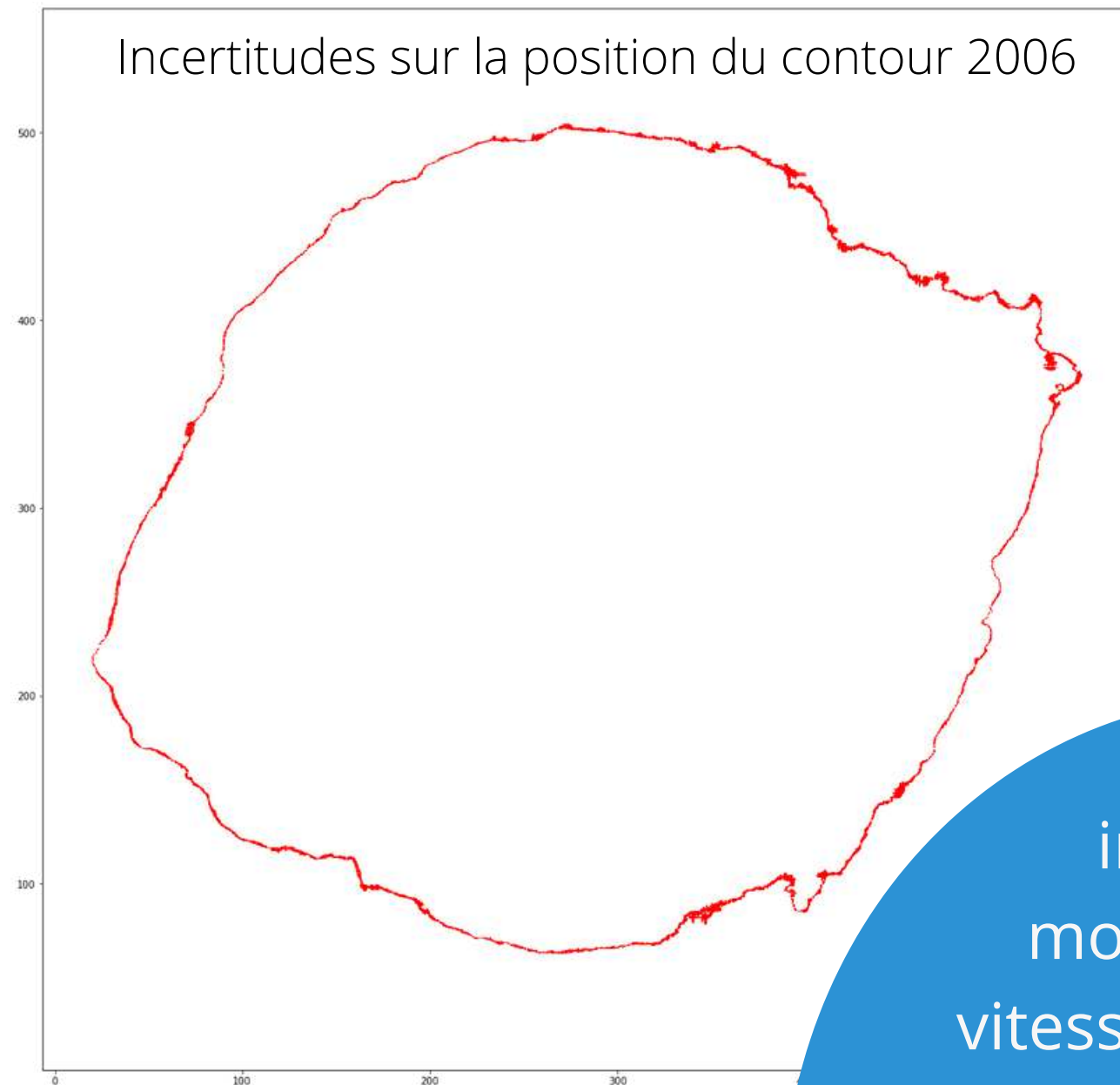
- **Pas de séparation** entre émission synchrotron et thermique
- Nombre limité de région

Limites protocole du stage :

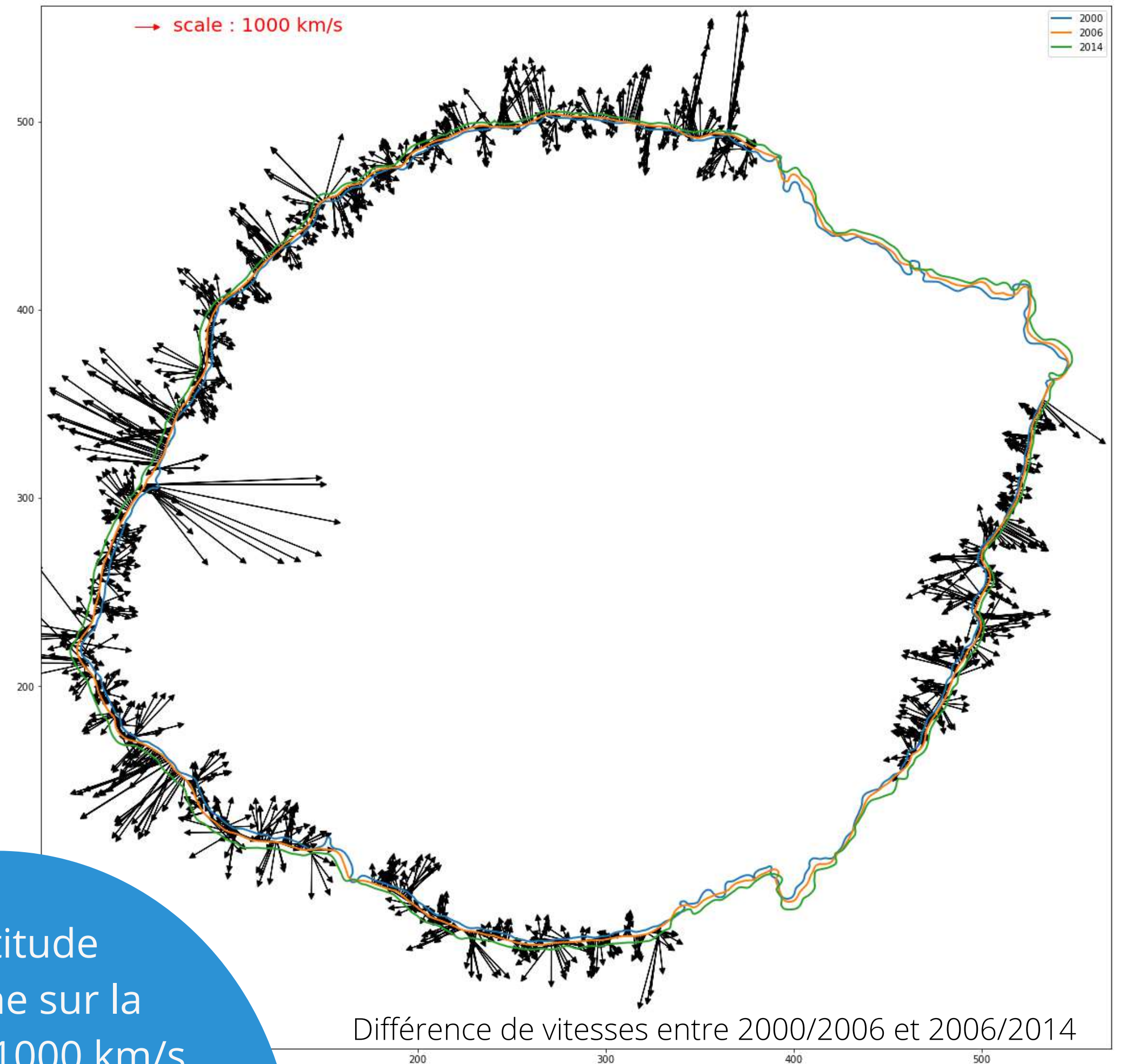
1. Erreur de détection des contours à évaluer
2. **Améliorer l'isolement** du synchrotron

Stage SNR Kepler

- Evaluer les incertitudes lors de la détection de contours ...
- Pour réaliser des études de précision sur les in-homogénéités du champ de vitesse et sa variation dans le temps.



incertitude
moyenne sur la
vitesse ~ 1000 km/s



Stage SN 87a

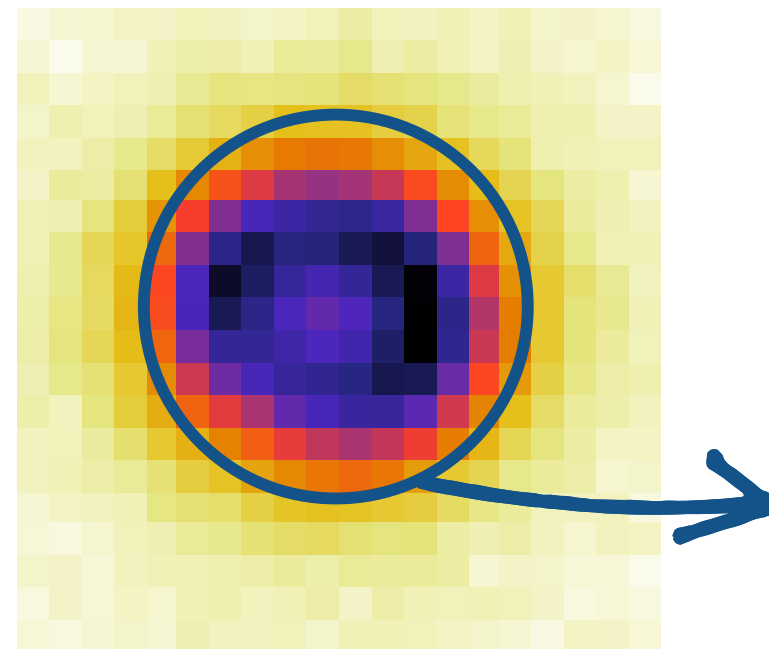
Enjeux :

Une composante "dure" est mesurée dans le spectre de SN87a, est-ce du à un Pulsar Wind Nebula ou à l'accélération des particules ?

- *State of art* : Alp et al, 2021 (opposition à Greco et al, 2021)

Protocole :

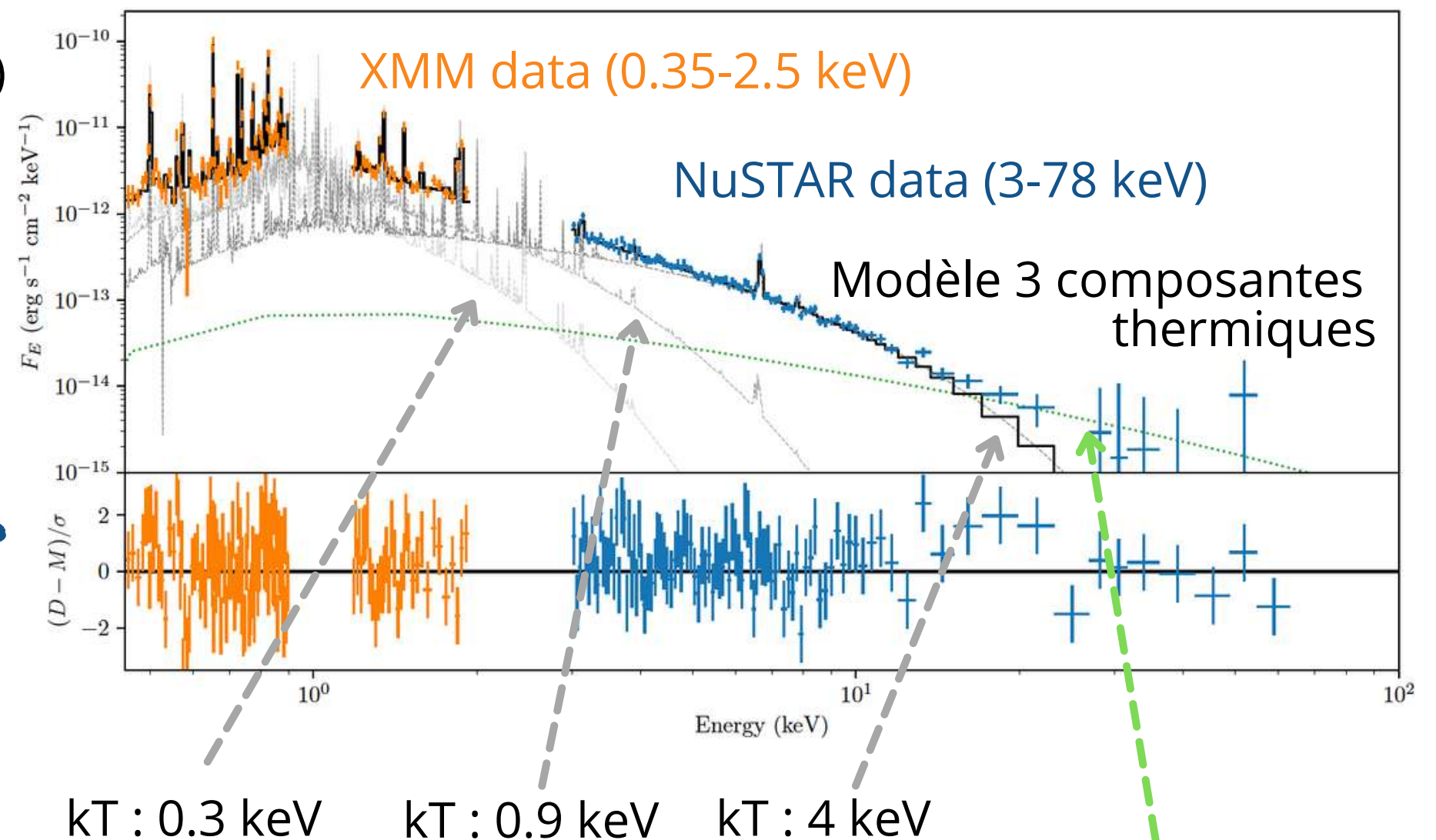
1. Définition du rémanent comme zone d'intérêt
2. Extraction du spectre total
3. Modélisation du spectre avec plusieurs composantes thermiques



Conclusion :

- Pour Greco et al : une composante non thermique est nécessaire
- Pour Alp et al : trois composantes thermiques suffisent

Avec GMCA : idéalement obtention d'un spectre de PWN avec émission au coeur dans l'image associée



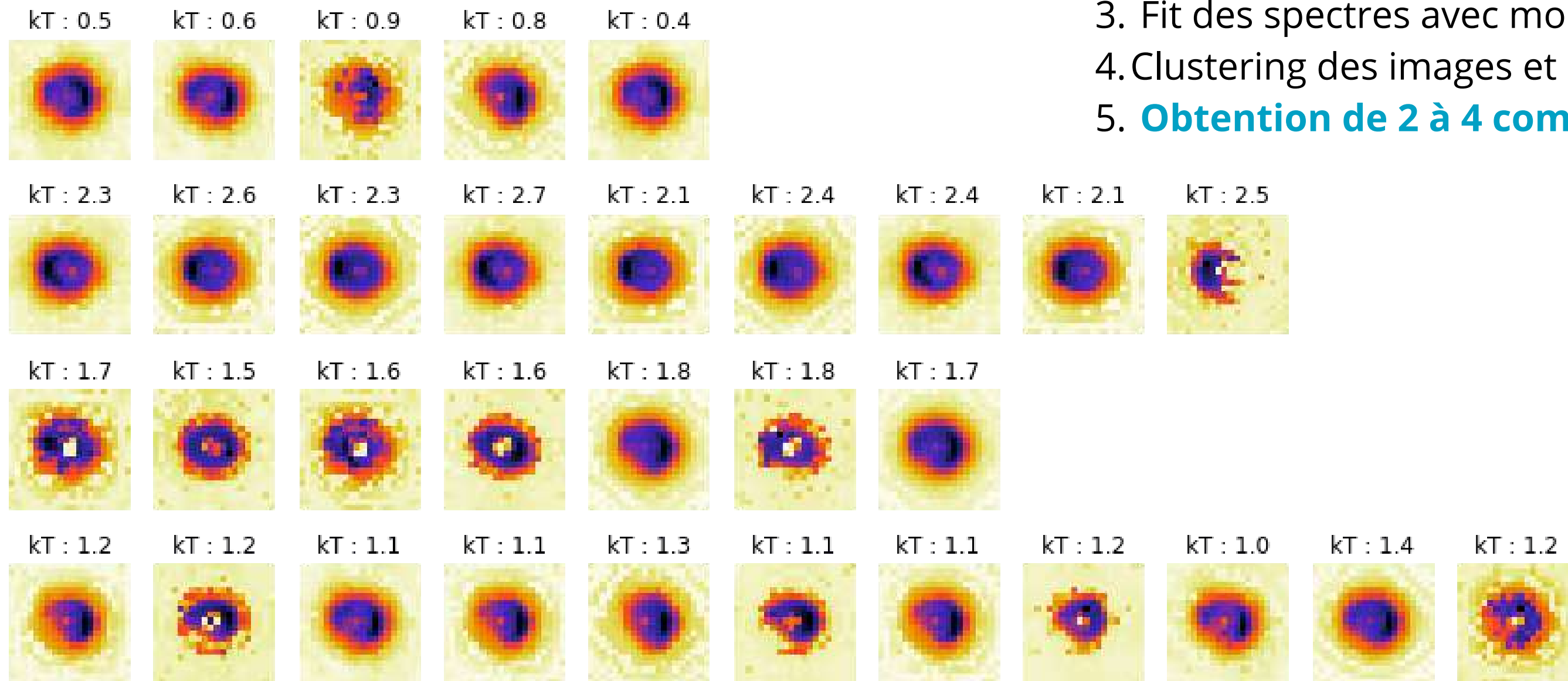
Composante supplémentaire synchrotron, statistiquement non nécessaire au fit

Stage SN 87a

- *Stage :*
 - Isoler l'origine spatiale de cette composante dure
 - Evaluer la stabilité des résultats

Protocole :

1. Générer cube de données
2. Appliquer pGMCA avec différents paramètres
3. Fit des spectres avec modèle thermique
4. Clustering des images et spectres obtenus
5. **Obtention de 2 à 4 composantes différentes**



Interprétations et limites :

1. Pas de composante centrale (PWN)
2. Chandra peu sensible à hautes énergies ?
3. Difficultés de contraindre les spectres dans GMCA

Objectifs

- Sens physique pour les composantes trouvées
- Réduire les contaminations entre composantes
- Meilleure sensibilité pour les composantes faibles

Nombre de composante et type de contrainte spectrale (ex : loi de puissance sur composante 0)

Expertise Machine Learning :
Collaboration avec Jerome Bobin et Rémi Carloni

Perspectives Supervised GMCA (sGMCA)

Librairie de spectres modélisés

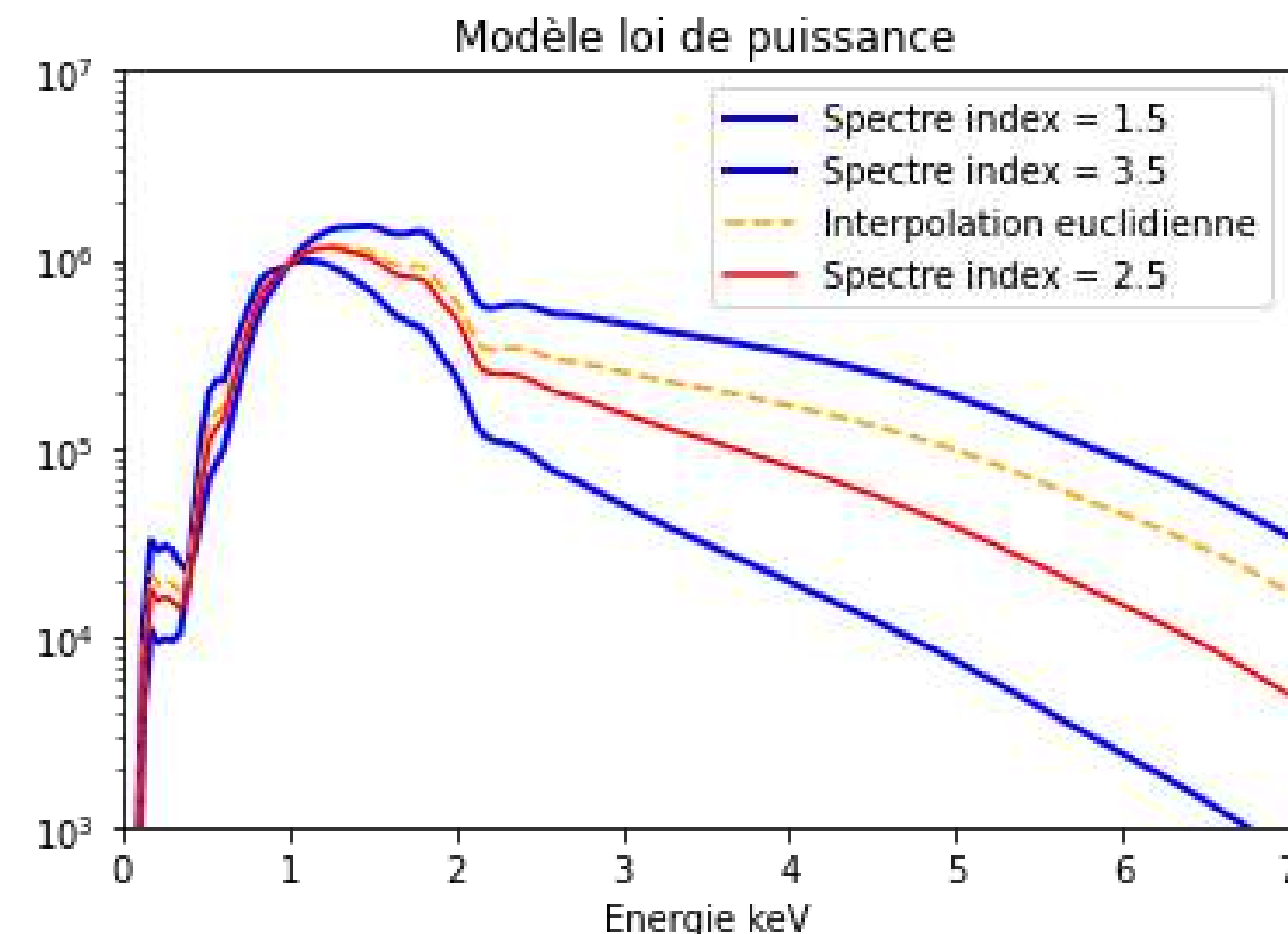
Interpolation Auto-Encoder

Métrique du modèle apprise

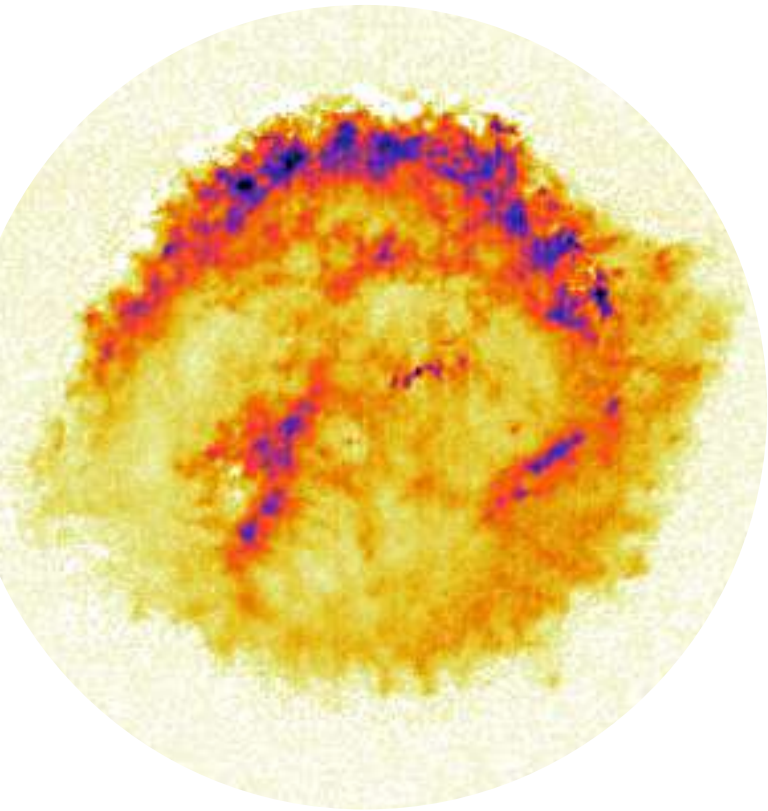
sGMCA

Projection des spectres sur la métrique : contrainte dans GMCA sur A_0

$$X = A_0 * S_0 + A_1 * S_2 + A_3 * S_3 + \dots$$

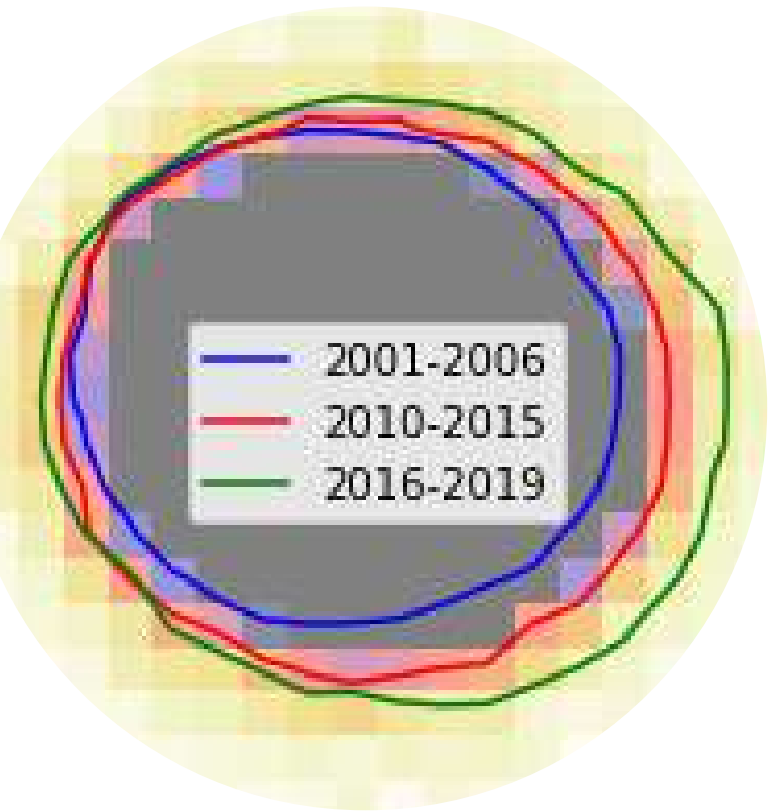


Perspectives Supervised GMCA (sGMCA)



SNR Kepler

- Mieux isoler l'émission synchrotron pour mesure vitesse du choc principal.
- étude de la "surface" des éjectas et des instabilités de Rayleigh Taylor.



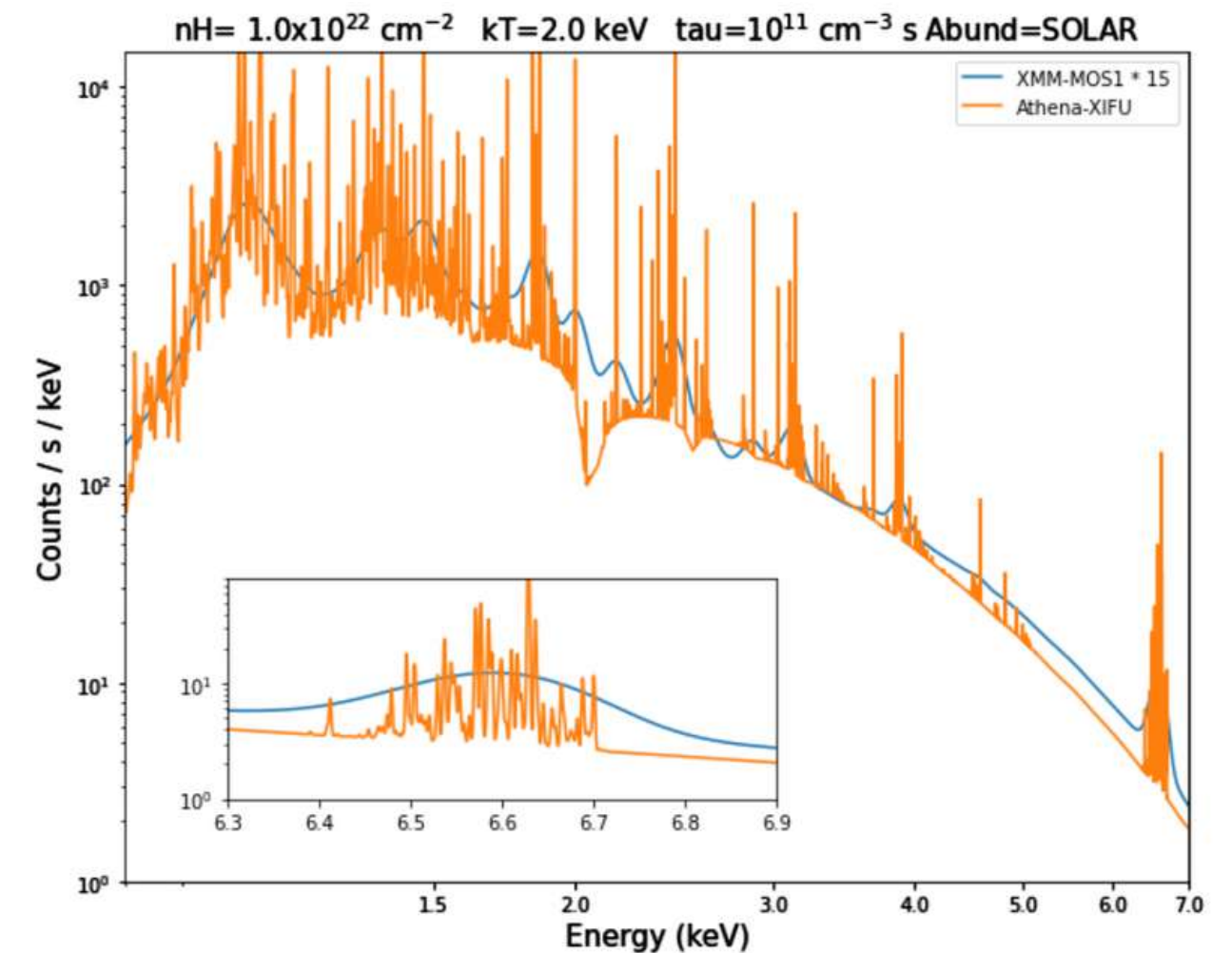
SN87A

- Palier le manque de données pour une meilleure séparation.
- étude de la dynamique du rémanents avec les contours.

LA FUTURE MISSION ATHENA XIFU

- Adaptation de sGMCA pour XIFU.
- Toy model avec simulations numériques.

Objectif : Vitesses 3D avec effet Doppler et vitesses dans le plan



MÉTHODE D'ANALYSE INNOVANTE

- Exploite pleinement la nature 3D des données contrairement aux méthodes traditionnelles.
- Séparation de composantes à l'aveugle.

sGMCA

- Ajout d'a priori physique sur les spectres
- Meilleures séparations des composantes

APPORT AUX GRANDES THÉMATIQUES DU DOMAINE

- 20 ans d'archive à revisiter et bientôt de nouvelles données
- Etude de l'accélération des rayons cosmiques et des progéniteur des supernovae.

GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE

- JWST et MUSE : pluridisciplinaire
- SPHERE : détection d'exoplanètes
- CRISM : observation de la surface de Mars

Conclusion

Objectif du stage :
Prouver le potentiel scientifique
de la nouvelle méthode
d'analyse des données GMCA

An abstract graphic on the left side of the slide. It features a large light blue circle partially cut off by the left edge. Below it is a white circle, also partially cut off. A vertical light blue line extends from the top to the bottom of the white circle, passing through its center.

Backup

Backup

Algorithme GMCA

Décomposition linéaire du cube X en somme de spectres et images :

$$X = AS + N = \sum_{i=1}^n A_i S_i + N,$$

Problème de minimisation

$$\min_{A,S} \sum_{i=1}^n \lambda_i \|S_i\|_p + \|X - AS\|_F^2,$$

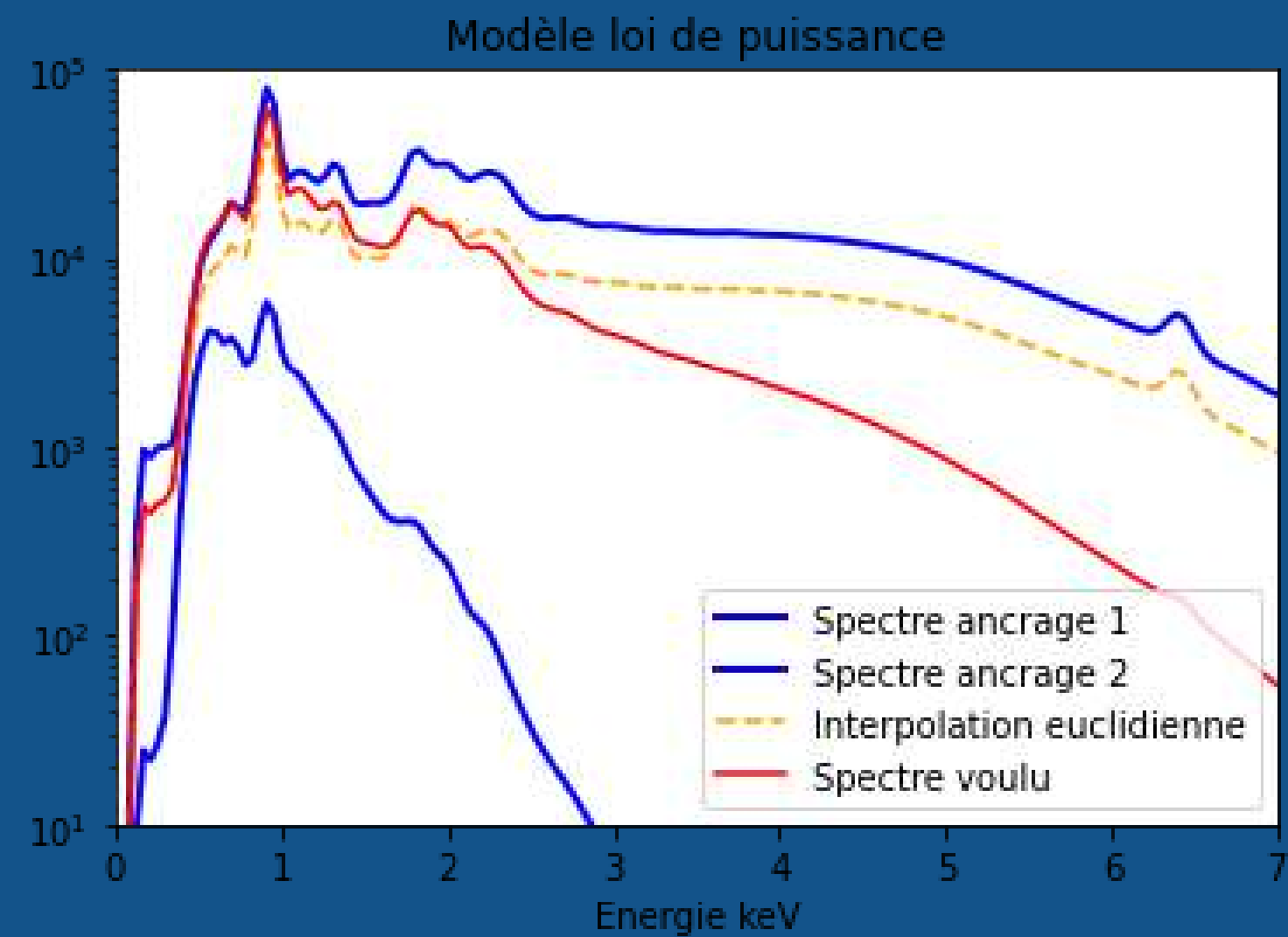
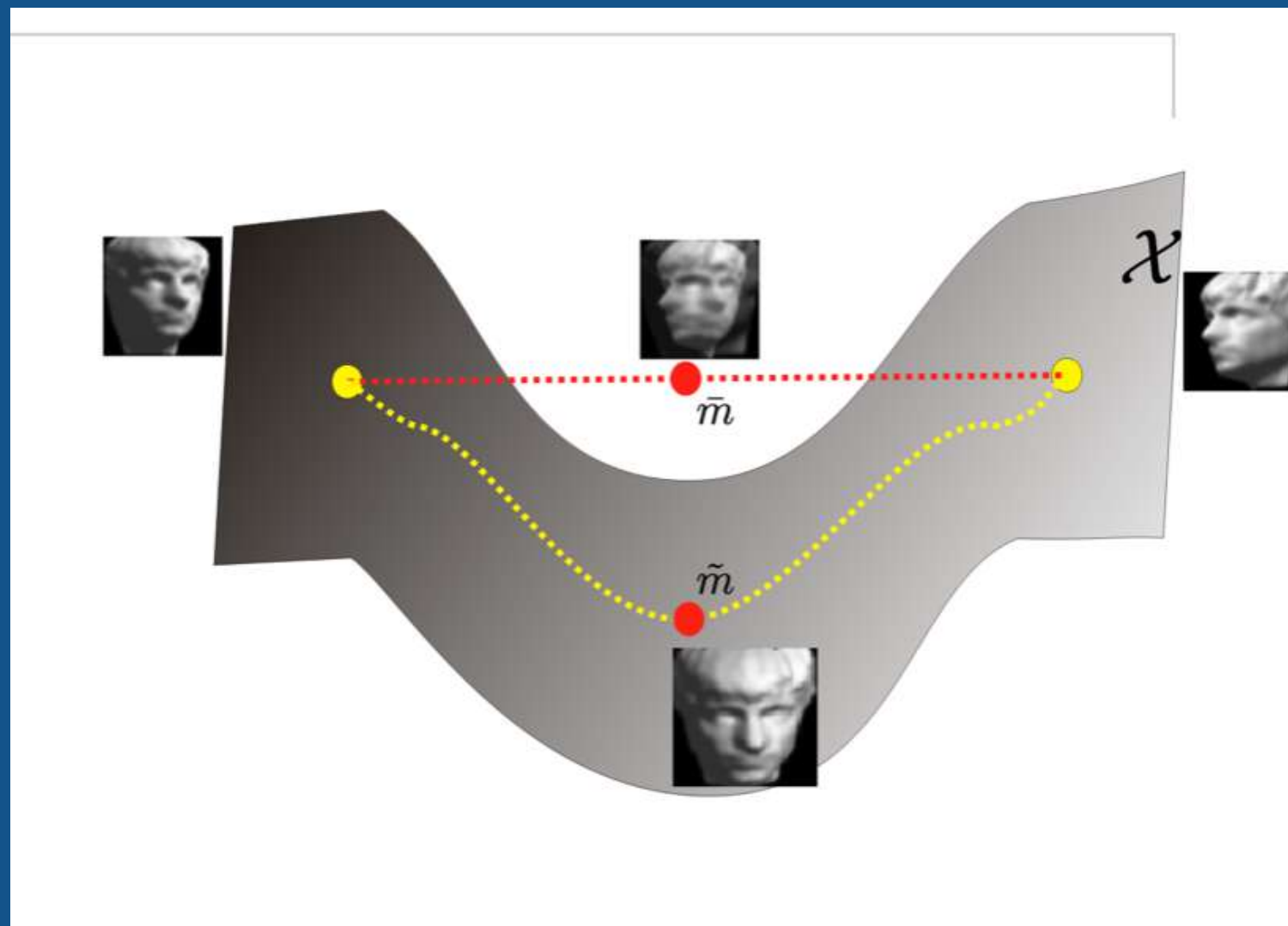
Algorithme itératif

More precisely, the GMCA is an iterative algorithm repeating the following two steps:

- Step 1: Estimation of S for fixed A , by simultaneously minimizing $\|X - AS\|_F$ and the term enforcing sparsity in the Wavelet domain;
- Step 2: Estimation of A for fixed S by minimizing $\|X - AS\|_F$.

Backup

Metric Learning

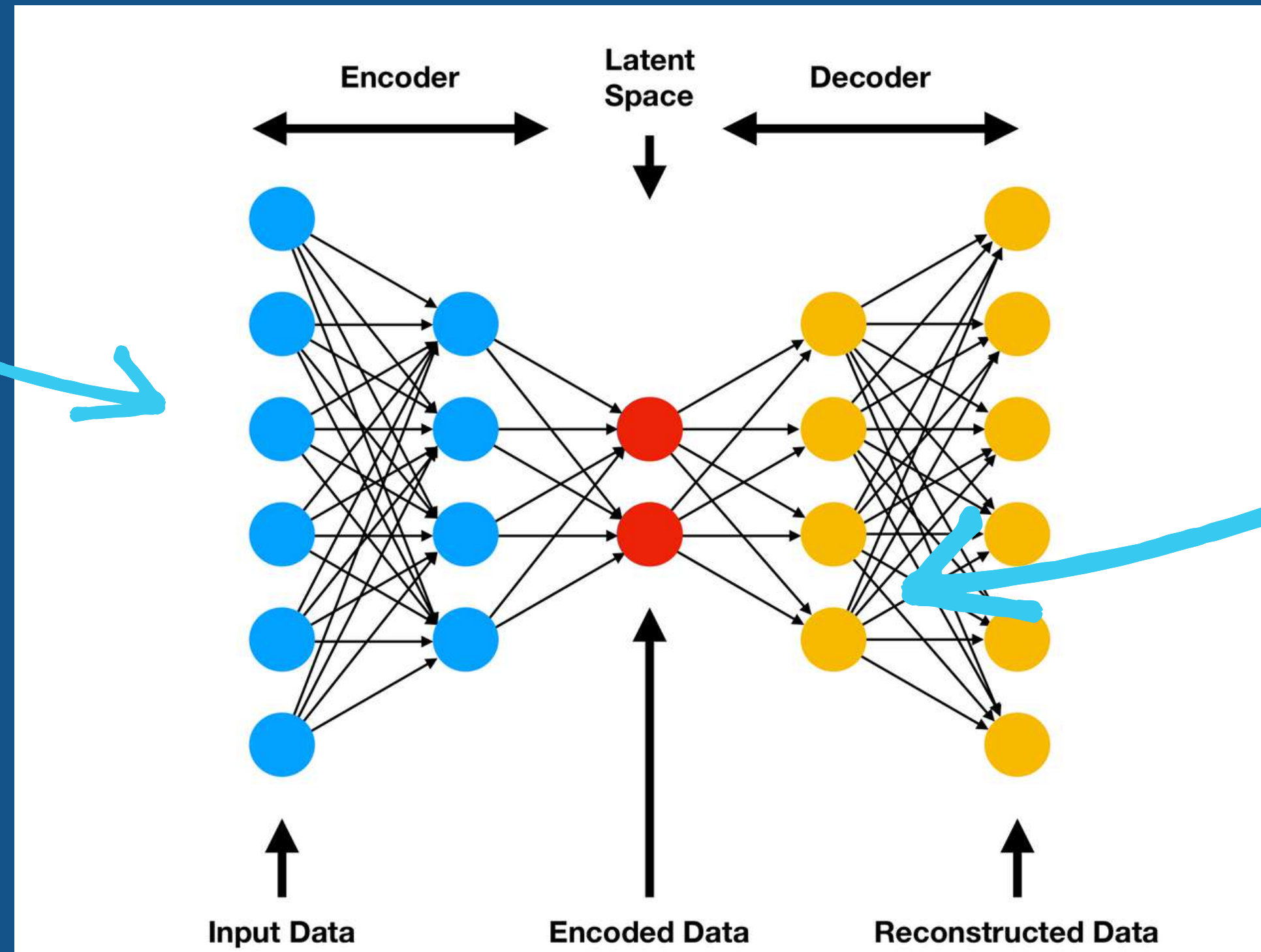


Backup

IAE

Espace transformé où l'on réalise les
interpolations + réduction de
dimensionnalité

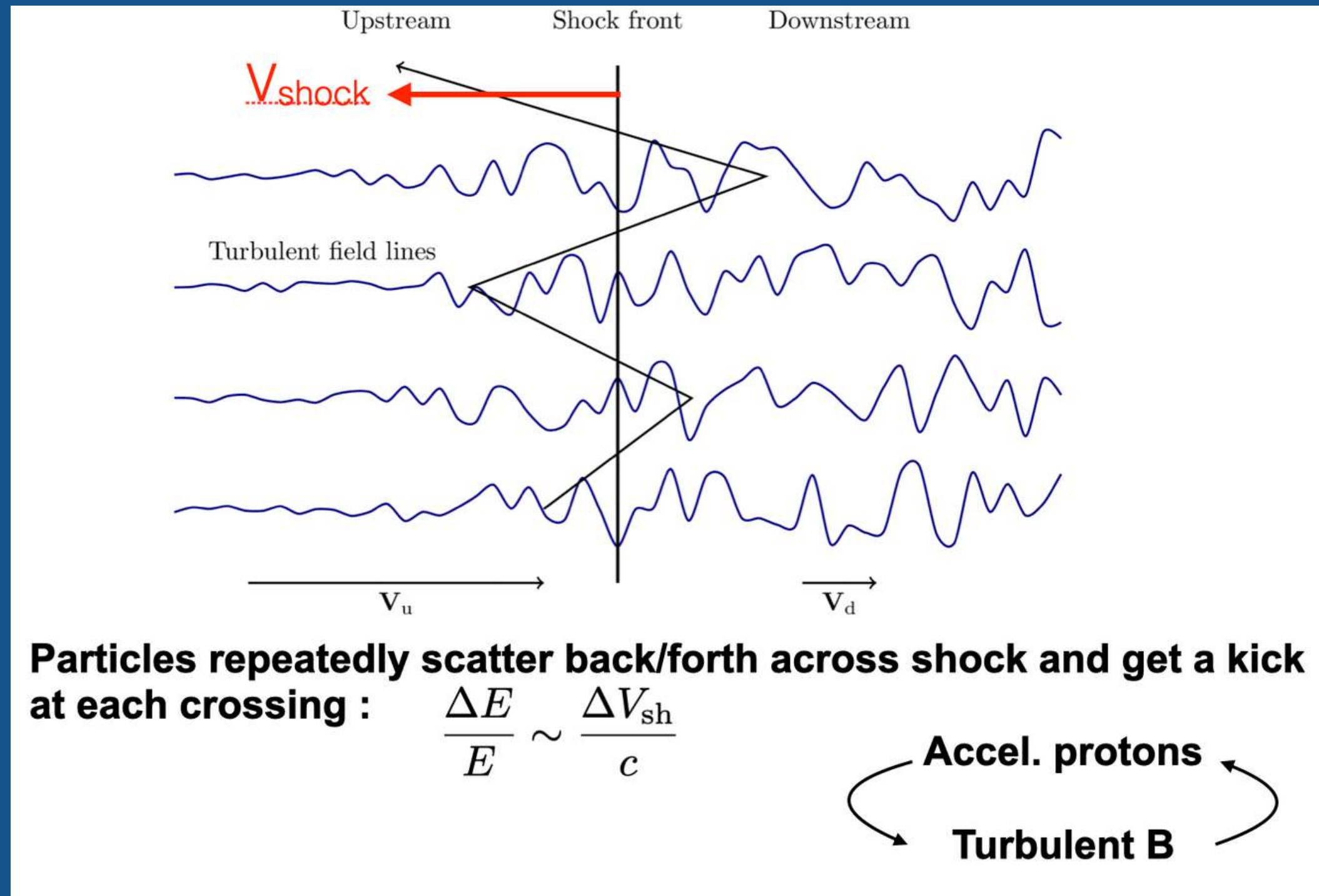
Espace réel des spectres :
projection pas possible
durant GMCA



Réseaux de neurones :
apprentissage des matrices
de poids et de biais pour
l'encodeur et décodeur

Backup

Accélération des particules au shock



Backup

Valeurs composantes thermiques de SN87a

Table 6. Comparison with Previously Fitted Thermal Model Temperatures

Date	Epoch	Model	Energy range	$k_{\mathrm{B}}T_1^a$	$k_{\mathrm{B}}T_2^a$	$k_{\mathrm{B}}T_3^a$	Reference
(YYYY-mm-dd)	(d)		(keV)	(keV)	(keV)	(keV)	
2018-09-15	11,527	Two shocks	0.5–3	0.5	...	1.5	Bray et al. (2020)
2015-09-17	10,433	Two shocks	0.5–8	0.3	...	2.1	Frank et al. (2016)
2014-09-18	10,069	Two shocks	0.5–3	0.5	...	1.4	Bray et al. (2020)
2014-07-11	$\sim 10,000$	Three shocks	0.45–24	0.5	1	4	This paper
2014-07-11	$\sim 10,000$	Continuous	0.45–24	0.3	0.9	4.2	This paper
2011-03-03	8774	Three shocks	0.6–5	0.5	1.2	2.7	Dewey et al. (2012)
2009-01-30	8012	Two shocks	0.4–8	0.5	...	2.4	Sturm et al. (2010)
2007-09-10	7504	Two shocks	0.4–7	0.5	...	1.9	Zhekov et al. (2009)
2007-09-10	7504	Continuous	0.4–7	0.5	...	2.2	Zhekov et al. (2009)
2007-03-25	7335	Three shocks	0.6–5	0.5	1.2	4.3	Dewey et al. (2012)
2007-01-20	7271	Three shocks	0.3–8	0.3	1.7	2.7	Zhekov et al. (2010)
2007-01-17	7268	Two shocks	0.2–10	0.4	...	3.0	Heng et al. (2008)
2005-07-14	6716	Two shocks	0.3–8	0.3	...	2.3	Park et al. (2006)
2004-08-30	6398	Two shocks	0.4–7	0.5	...	2.7	Zhekov et al. (2006)
2004-08-30	6398	Continuous	0.4–7	0.5	...	3	Zhekov et al. (2006)
2003-05-10	5920	Two shocks	0.2–9	0.3	...	3.1	Haberl et al. (2006)
2000-12-07	5036	Two shocks	0.3–8	0.2	...	3.2	Park et al. (2006)
2000-12-07	5036	Three shocks	0.3–8	0.2	2.9	5.1	Zhekov et al. (2010)
2000-12-07	5036	Three shocks	0.4–8.1	0.7	1.2	4.2	Dewey et al. (2012)
2000-01-20	4714	Two shocks	0.3–9	0.2	...	2.0	Haberl et al. (2006)

NOTE—Temperatures of individual shock components or approximate temperature peaks for the continuous temperature models.

^aThe subscripts denote individual shock component temperatures or temperature distribution peaks. Models with only two characteristic temperatures lack the mid-temperature component.

Backup

GMCA : interprétations et limites

