

IMAGER LES ÉTOILES

ET LEUR ENVIRONNEMENTS

ANTOINE MÉRAND

OBSERVATOIRE EUROPÉEN AUSTRAL (GARCHING, ALLEMAGNE)

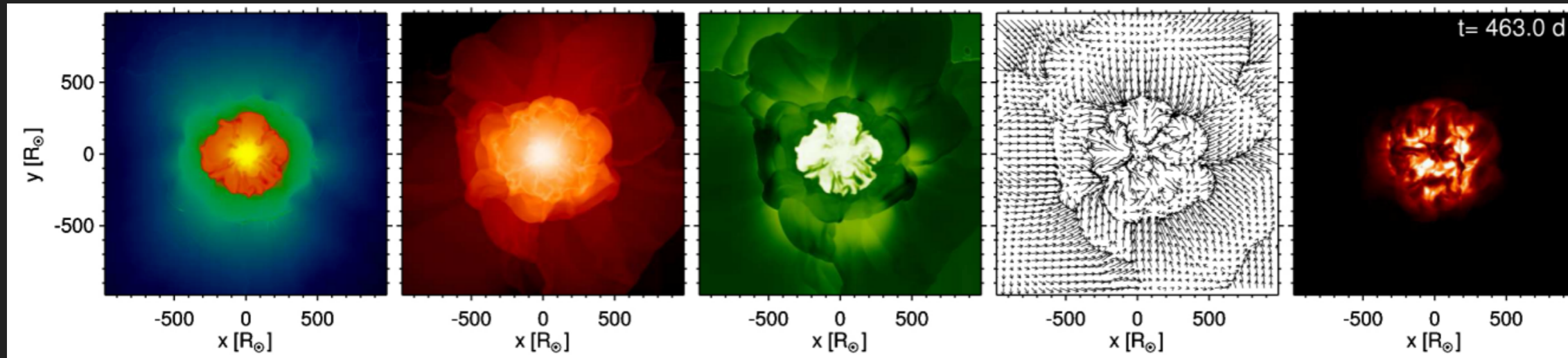
BIOGRAPHIE

- ▶ 2002-2005 : Thèse sur l'interférométrie IR et les Céphéides (Meudon)
- ▶ 2006-2008 : Postdoc à l'interféromètre CHARA (USA)
- ▶ 2008-2012 : Astronome de support au VLT (ESO-Paranal)
- ▶ 2012-2016 : "VLT System Scientist" (ESO-Paranal)
- ▶ 2017-Présent : "VLT Programme Scientist" (ESO-HQ)

IMAGER LES ÉTOILES

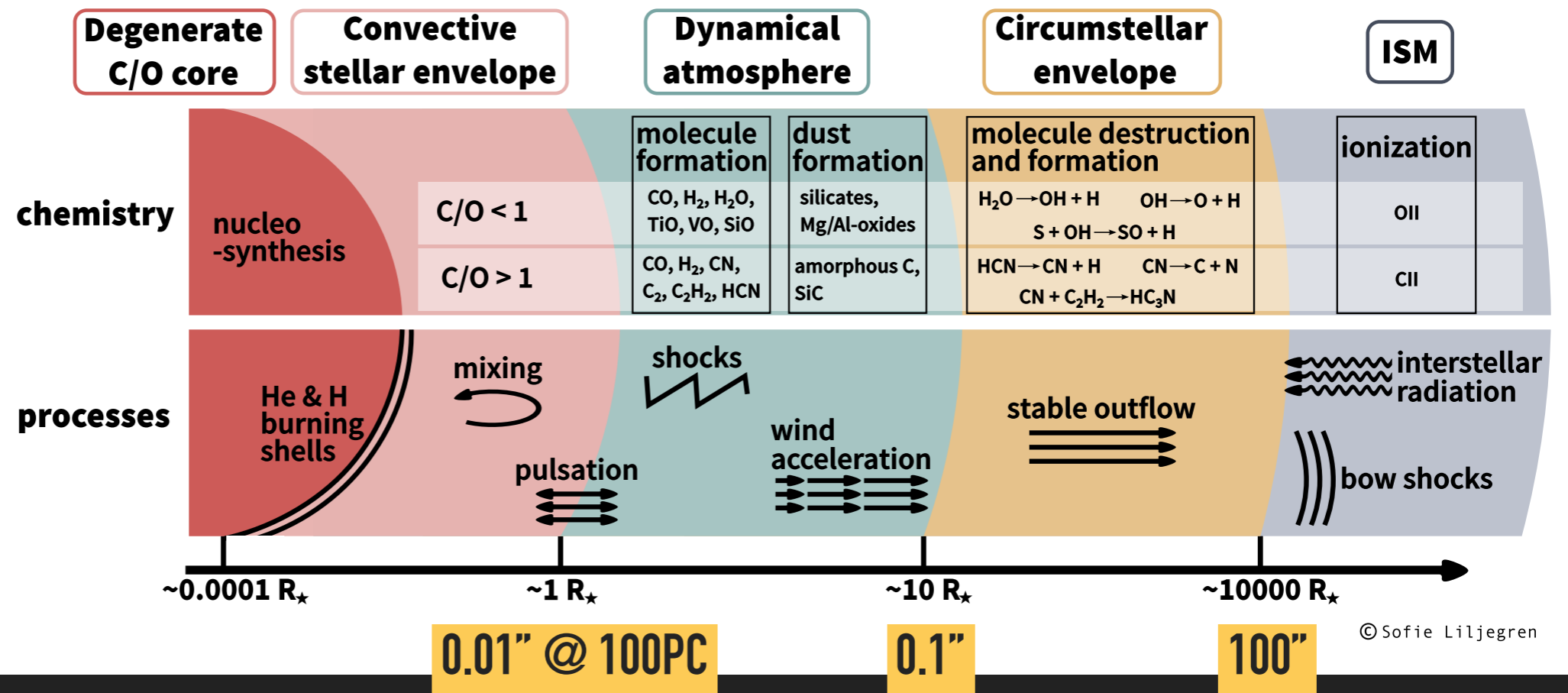
- ▶ Certaines étoiles révèlent leurs surfaces indirectement : binaires à éclipses, étoiles tachées...
- ▶ L'interférométrie est la seule technique qui permet de résoudre directement les étoiles ($\sim 0.001''$ résolution)
- ▶ Les surfaces révèlent de façon unique l'atmosphère, la dynamique (rotation, convection, pulsation, ...) et les interactions avec l'environnement (vents, perte de masse, accrétion, ...)

LES AGB ET LEUR ENVIRONNEMENT



Freytag+ 2017

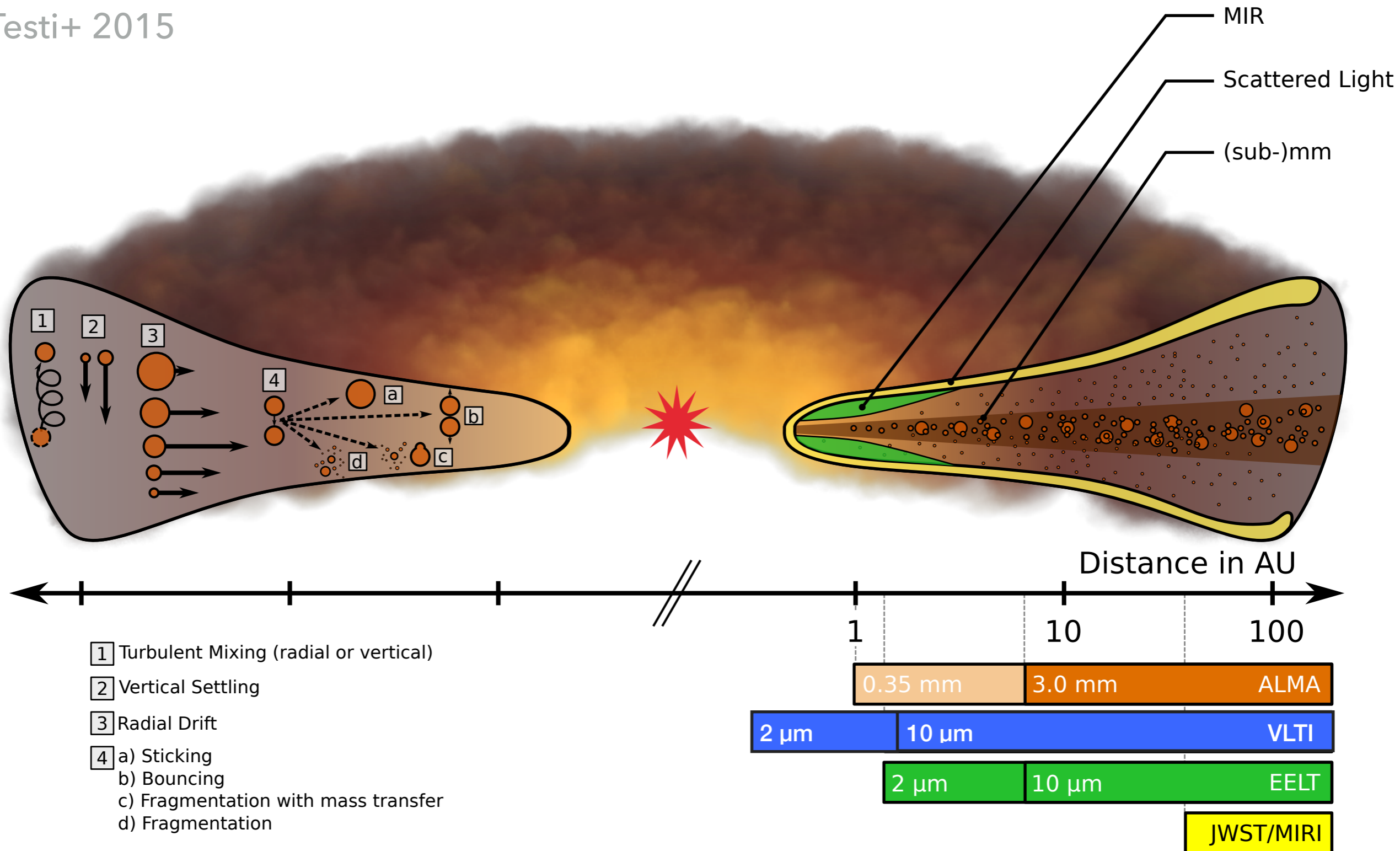
Höfner & Olofsson 2018



LES DISQUES D'ÉTOILES JEUNES

L'interférométrie optique résout angulairement l'interaction étoile / disque

Testi+ 2015



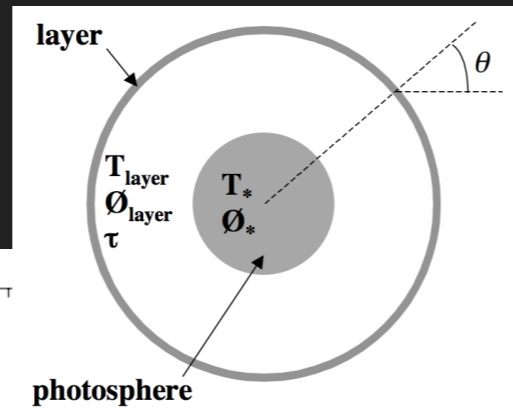
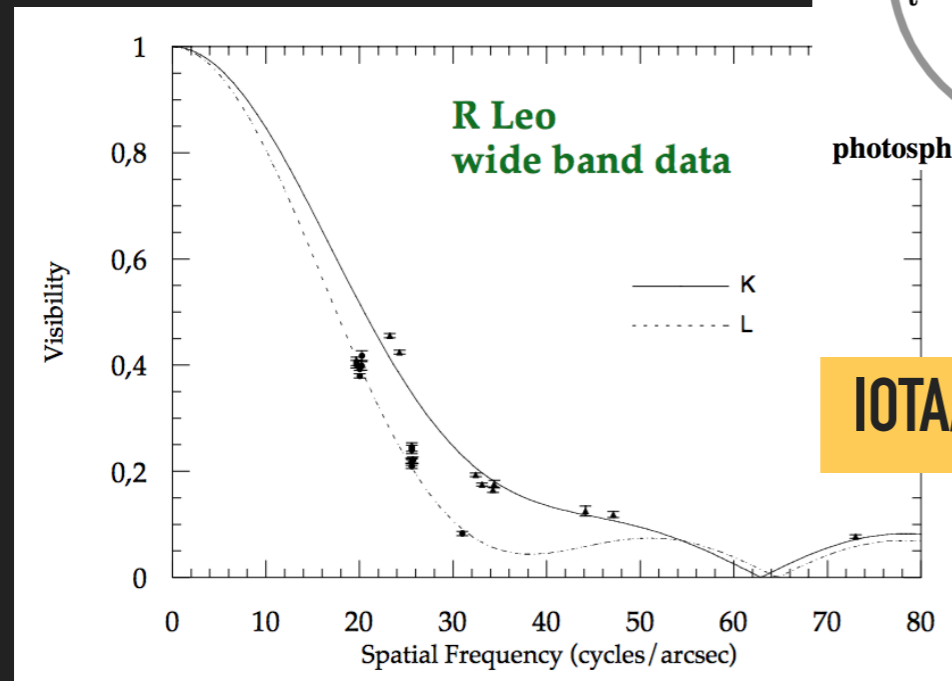
CONNECTER LA PHYSIQUE, LES MODÈLES ET LES OBSERVATIONS

L'interférométrie optique est une technique difficile

- ▶ Diffusion lente: Instrumentalistes → Experts → Observateurs → Théoriciens
- ▶ Interpréter physiquement les résultats
- ▶ Connecter les modèles aux observables
- ▶ Sortir de "On décrète que ce que l'on peut observer est ce qui est intéressant et donc ce que l'on va étudier" (D. Mozurkewitch)

ENVELOPES MOLÉCULAIRES AUTOUR DE MIRA

Découverte et modélisation simple (Perrin+ 2004)

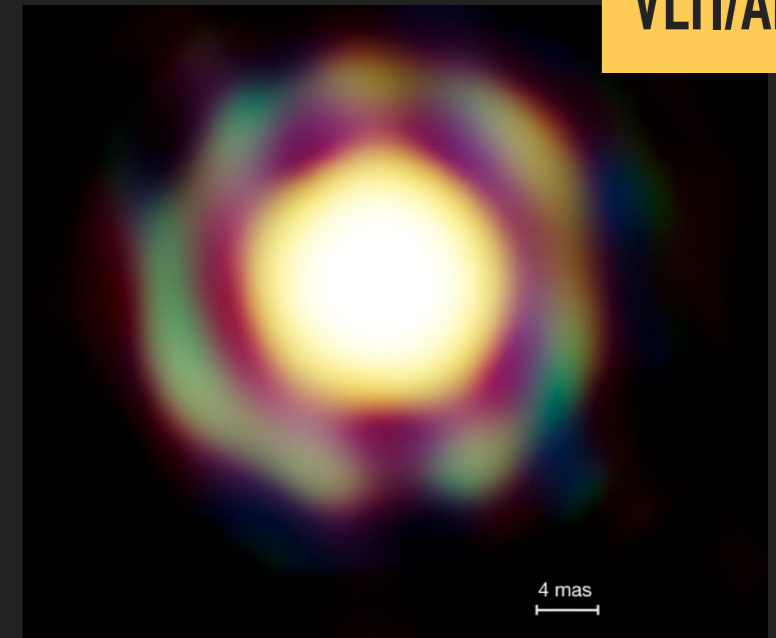


IOTA/FLUOR

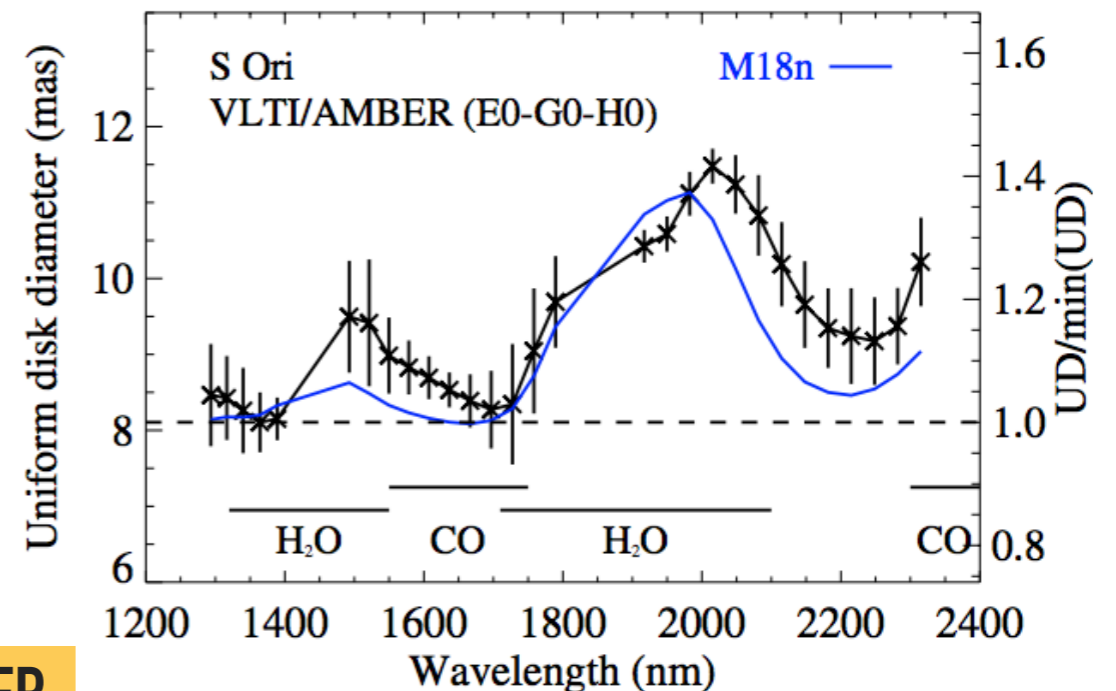
Spectroscopie et, comparaison avec modèles dynamique (Wittkowski+ 2008)

VLT/AMBER

VLT/AMBER



Confirmation par reconstruction d'image de T Lep (Le Bouquin+ 2009)

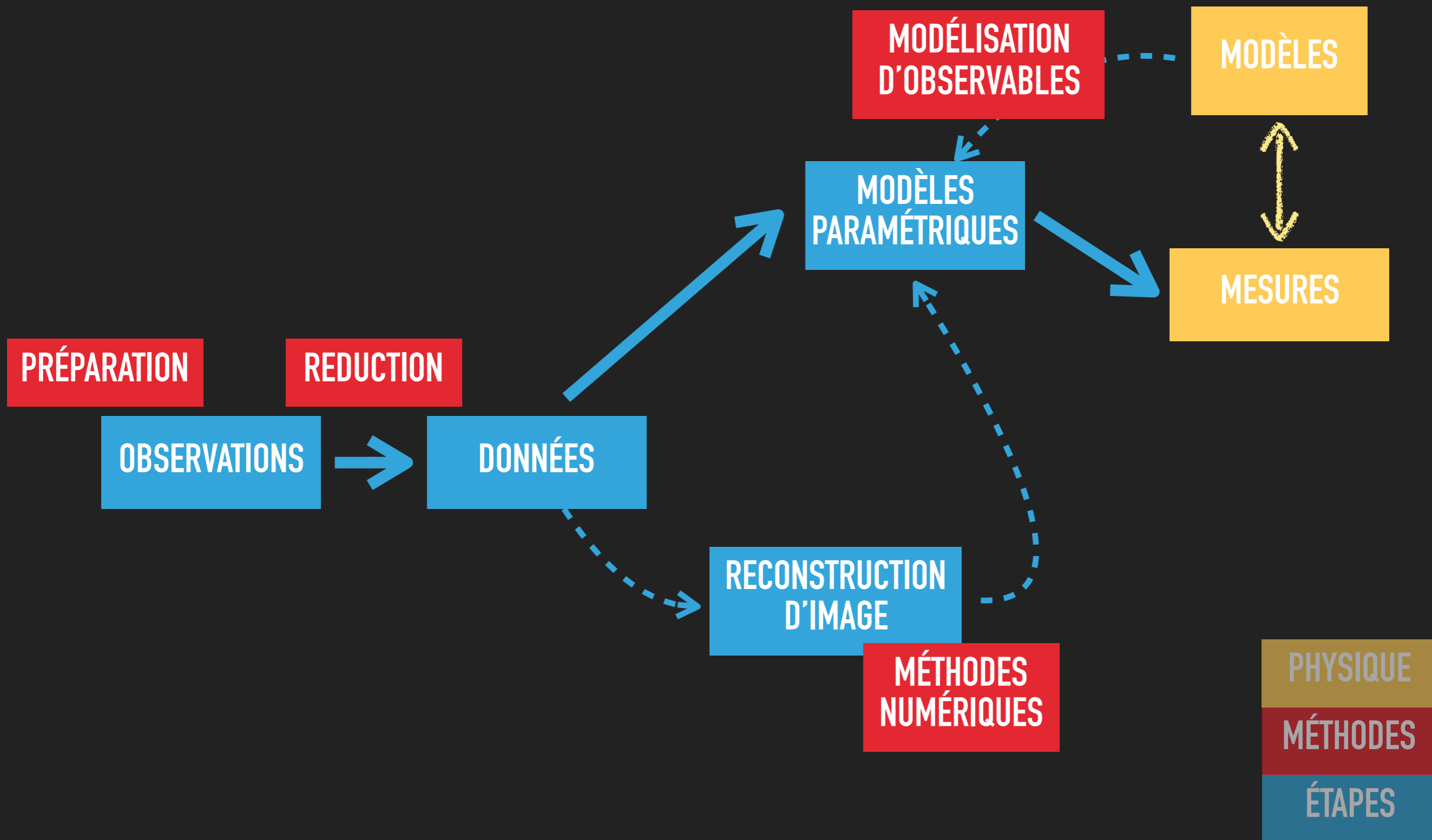


LEÇONS SUR LES PREMIÈRES ÉTUDES DES MOLSPHERES

- ▶ Observations faciles : objets brillants et partiellement résolus
- ▶ Modèles simples reproduisent les données: 1D, optiquement mince, LTE, atmosphère grise, ...
- ▶ Modélisation dominées par des interférométristes
- ▶ Études souvent mono-techniques et mono-chromatiques

“low hanging fruit” pour les premiers interféromètres infrarouges

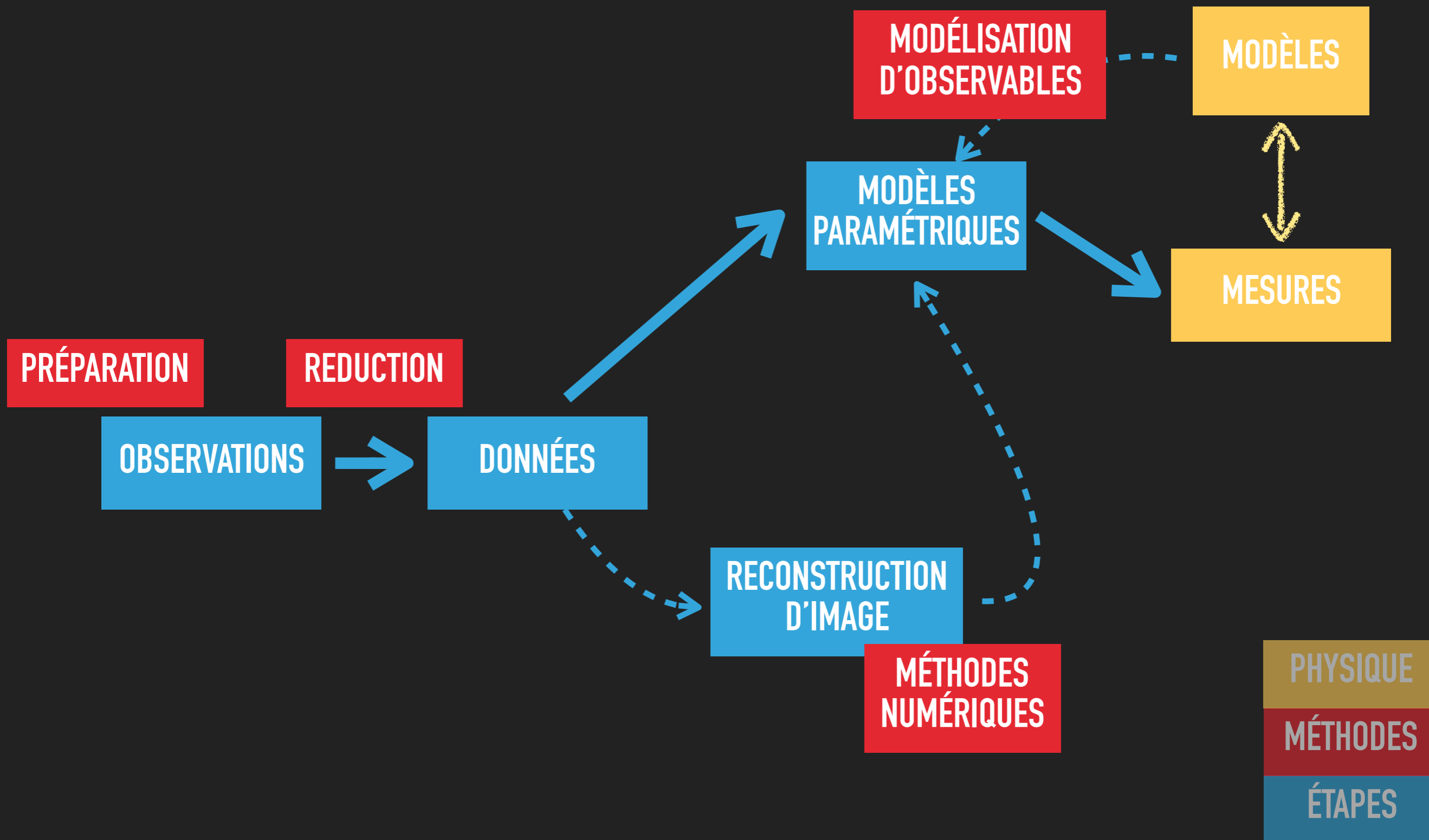
UN PARCOURS SEMÉ D'EMBUCHES



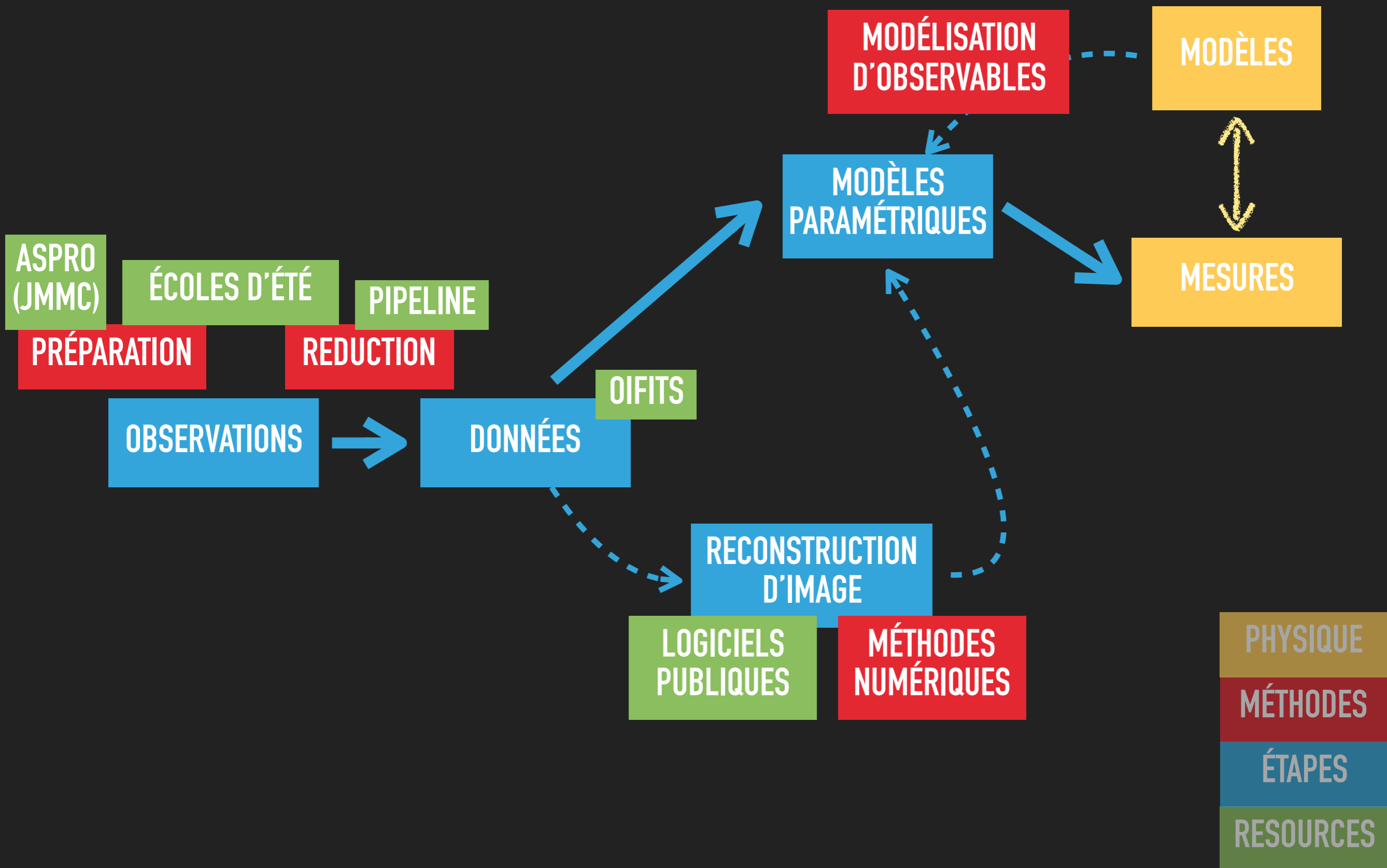
CE QUI A CHANGÉ DANS LES ANNÉES 2010+

- ▶ Les interféromètres optiques sont matures
 - large quantités de données pour les images
- ▶ Outils et standards facilitent l'utilisation des données
- ▶ Support dans la communauté : JMMC, EII, écoles VLTI
- ▶ Des ponts se créent avec des modèles complexes
- ▶ Généralisation du multi-techniques et multi-longueurs d'onde

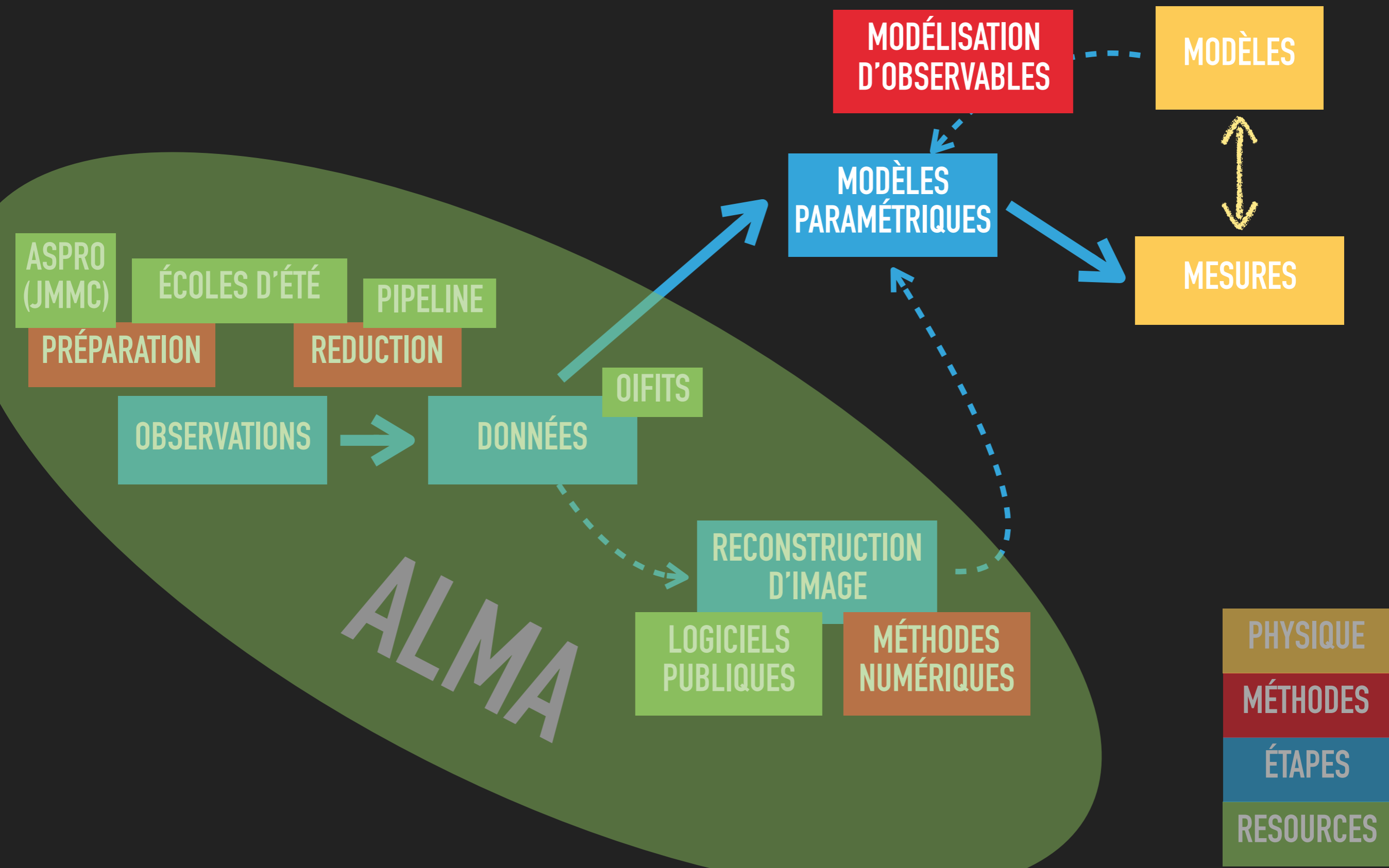
UN PARCOURS SEMÉ D'EMBUCHES



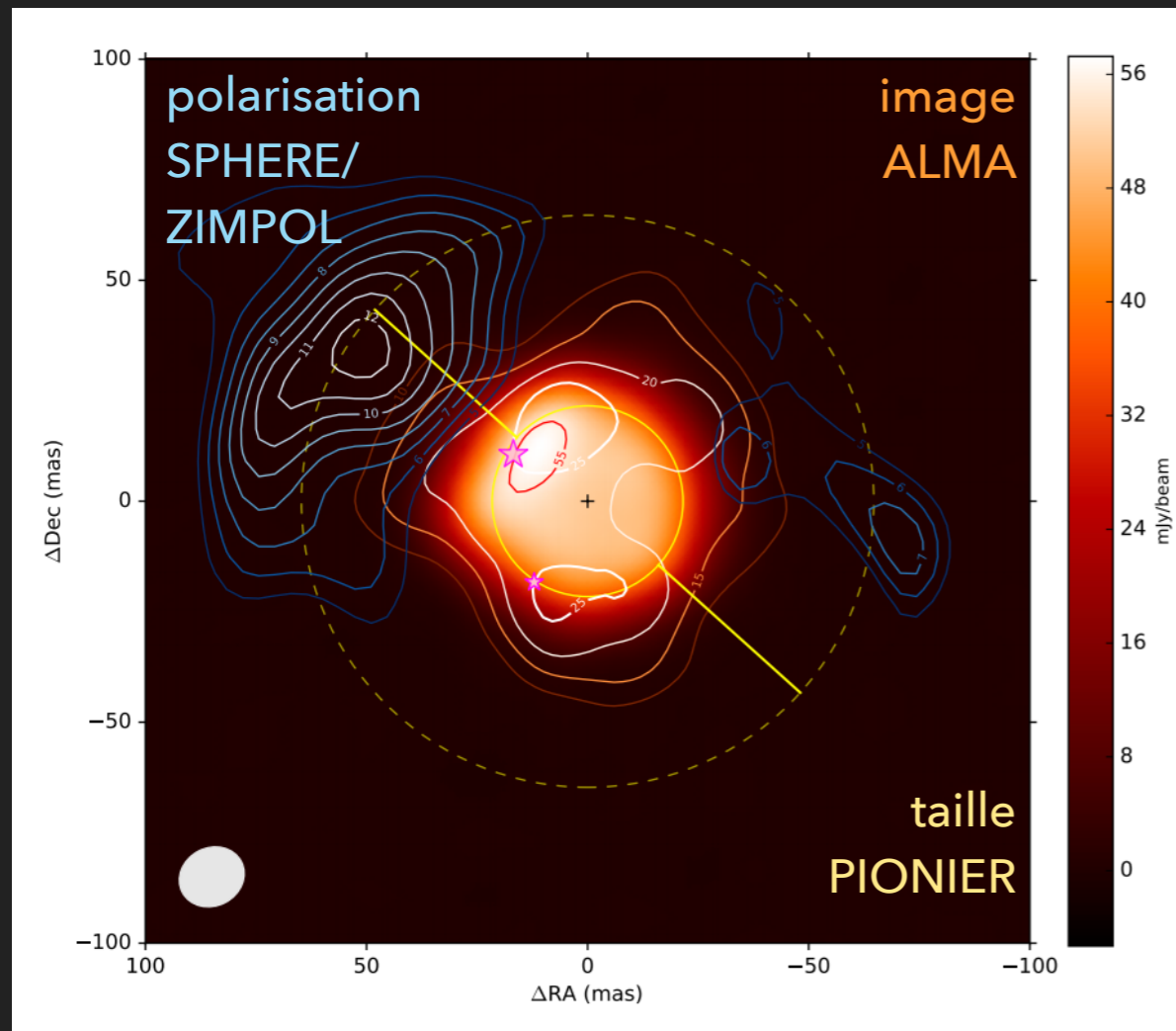
UN PARCOURS SEMÉ D'EMBUCHES



UN PARCOURS SEMÉ D'EMBUCHES



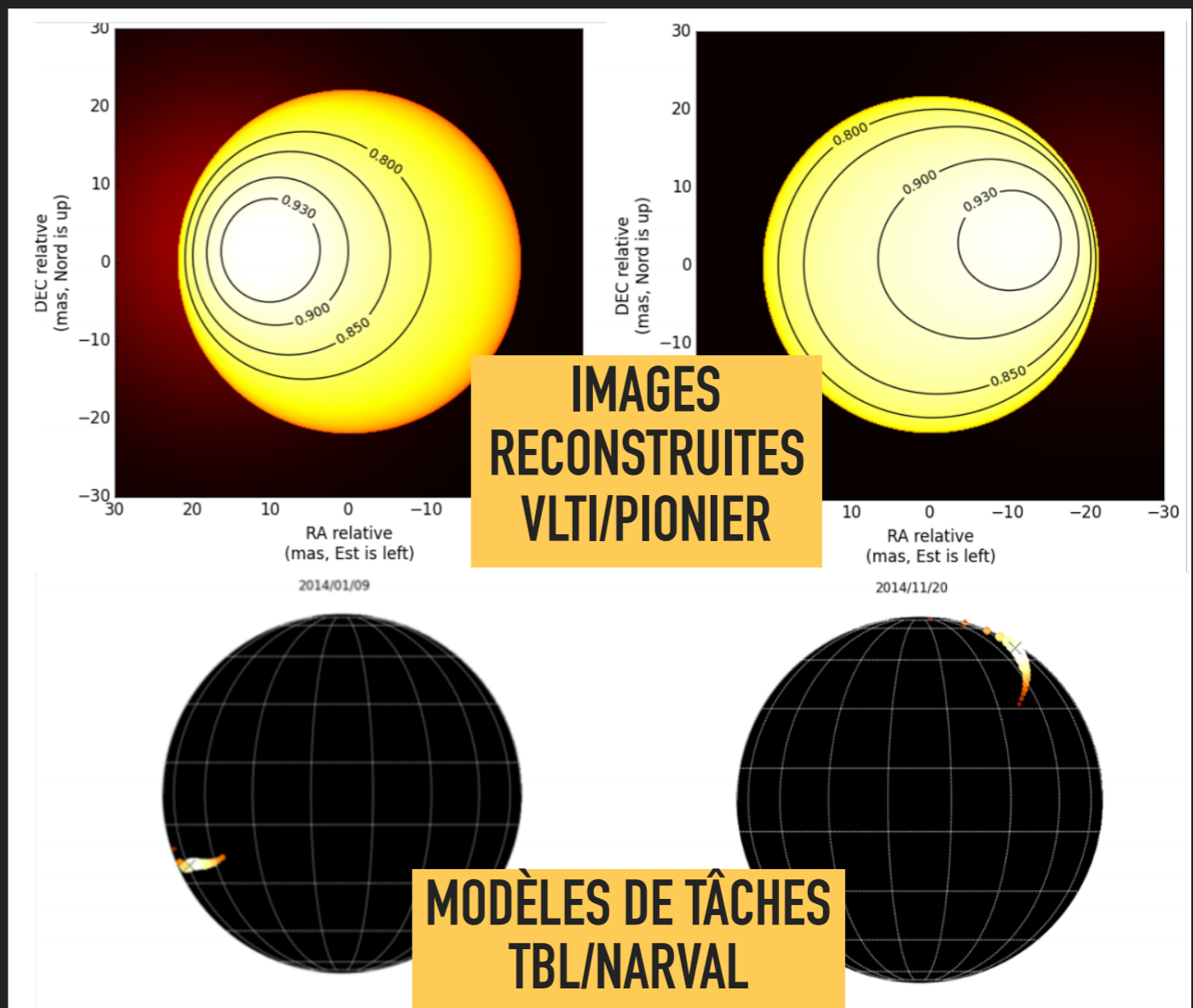
ÉTUDES MULTI-TECHNIQUES: BETELGEUSE (RSG)



Kervella+ 2018

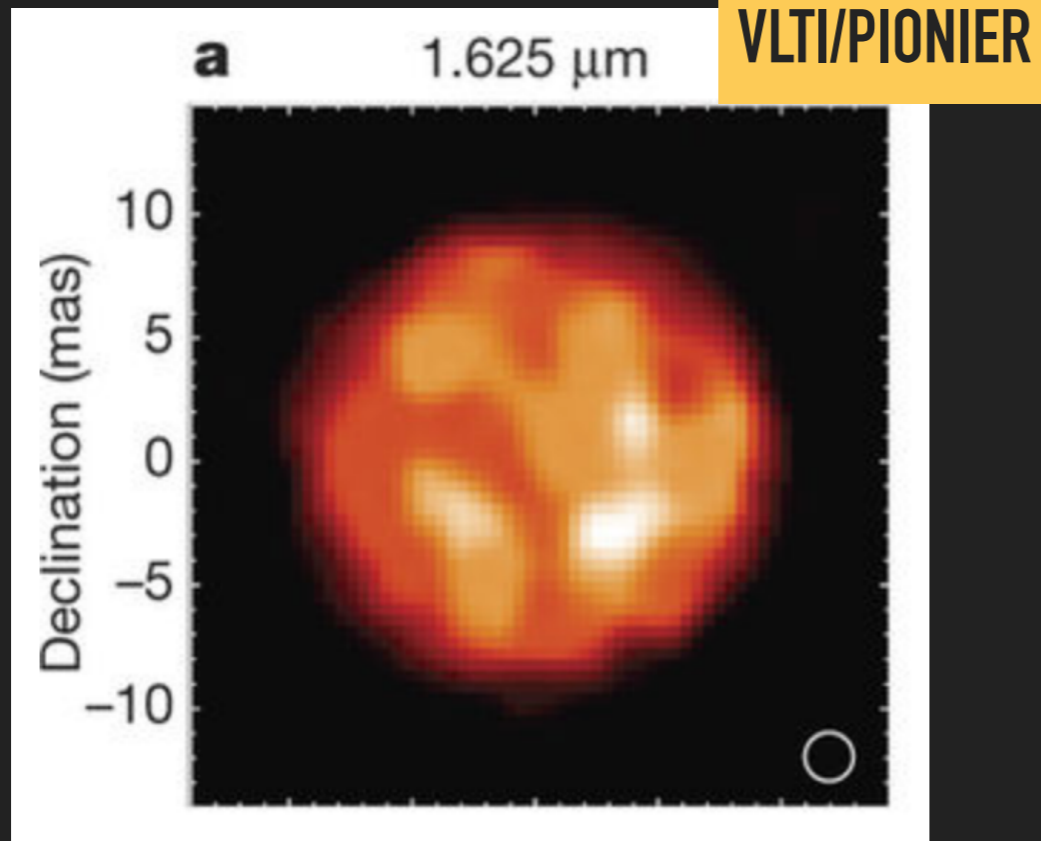
- ▶ Rotation détectée
- ▶ cellule de convection au pôle et plume de poussière

Montarges+ 2015
Aurière+ 2016

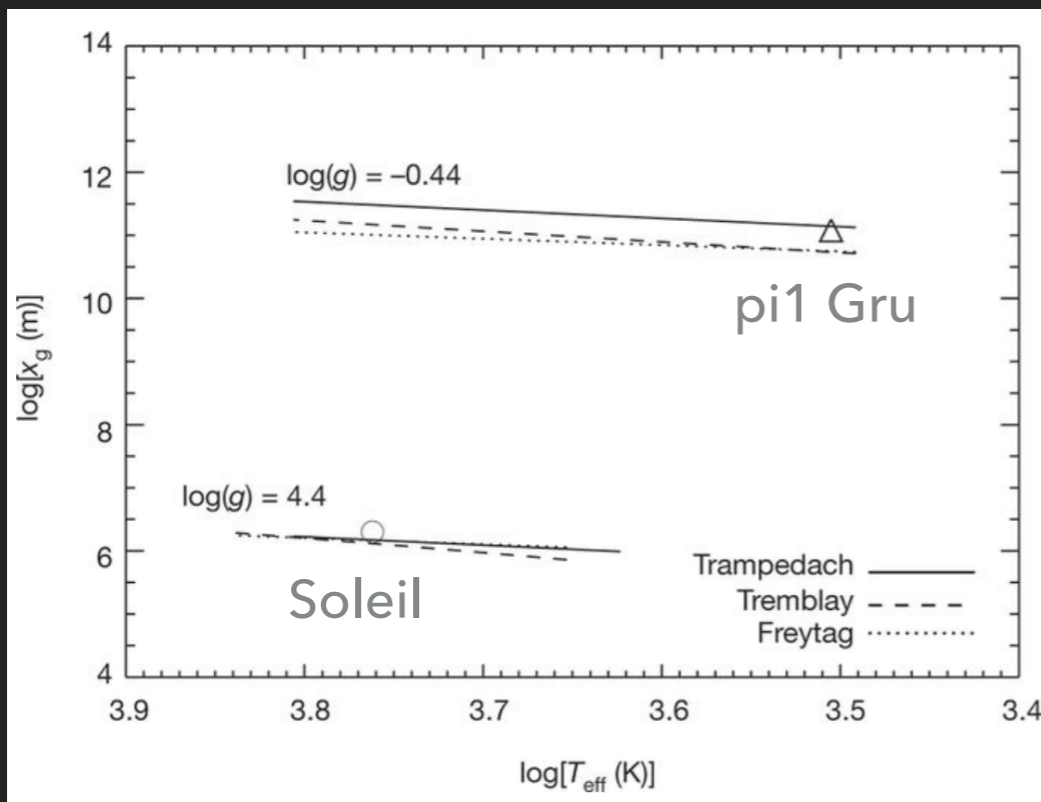
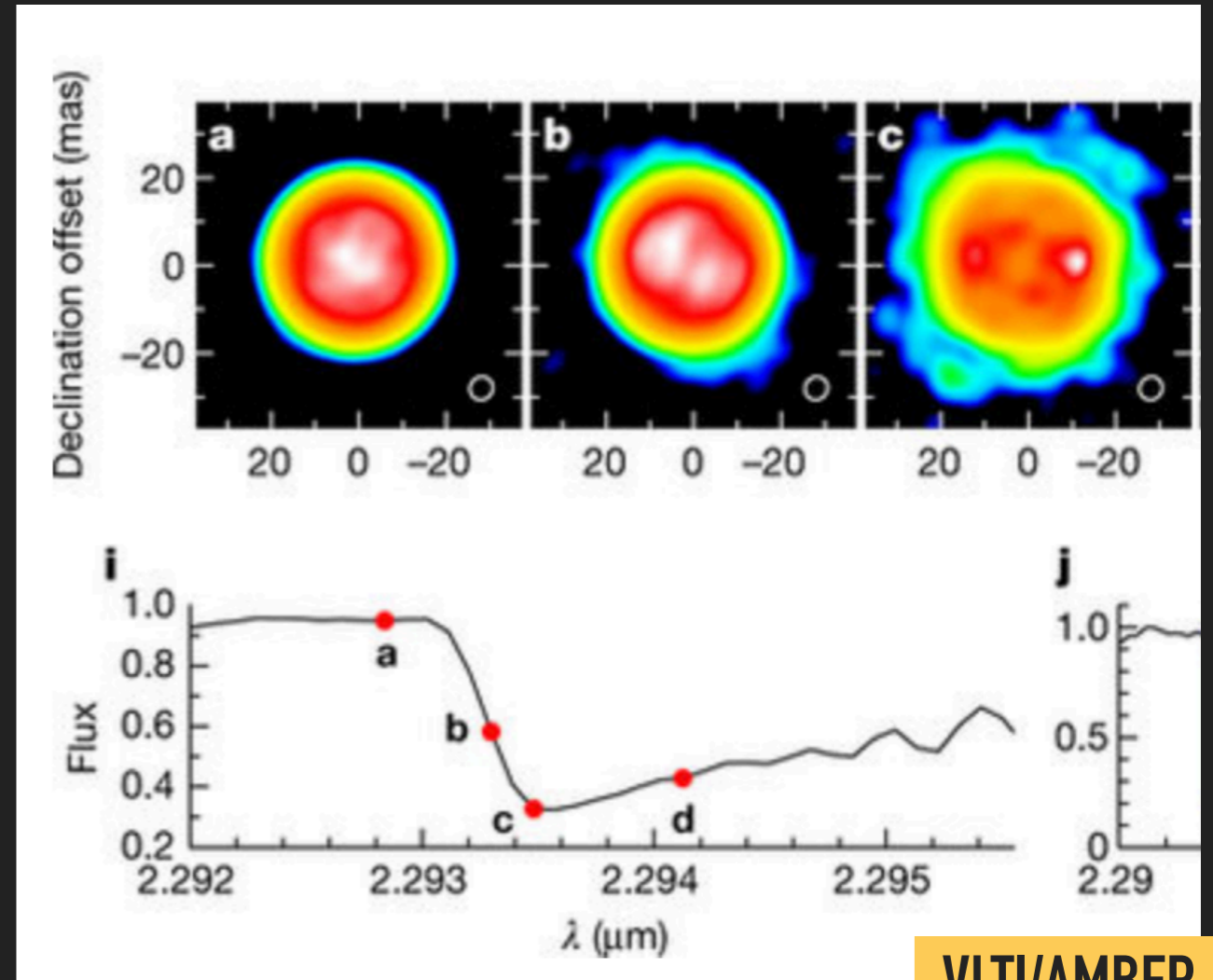


IMAGES VLT DE SURFACES STELLAIRES

pi1 Gru (Paladini+ 2018)

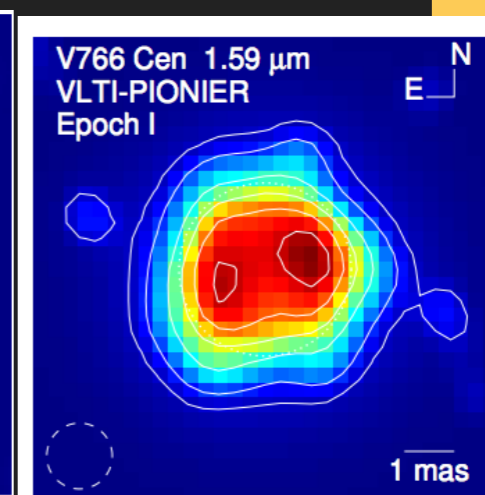
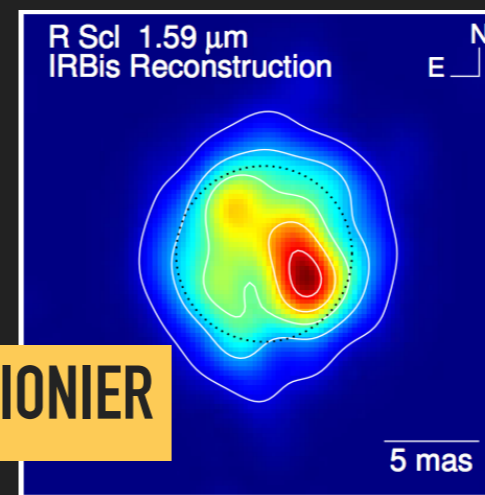


Antares (Ohnaka+ 2017)



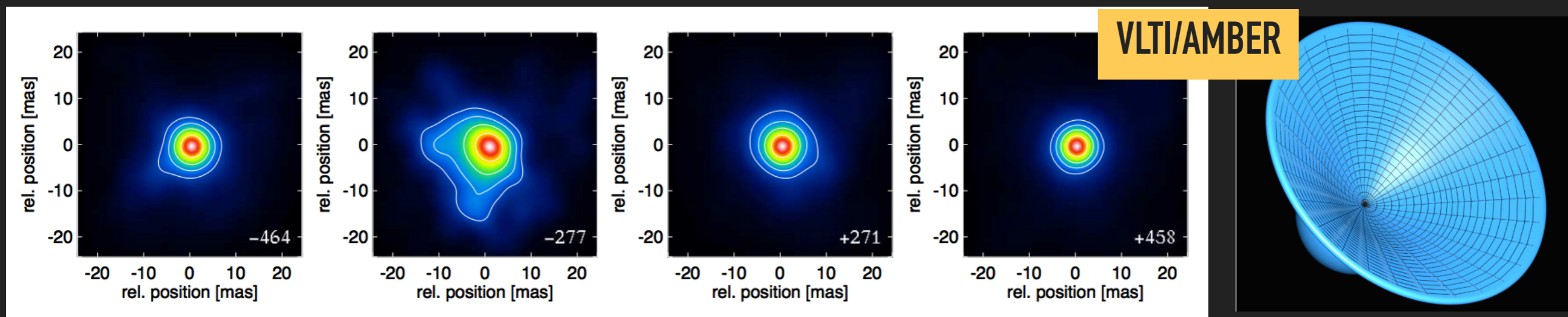
VLT/AMBER

VLT/PIONIER

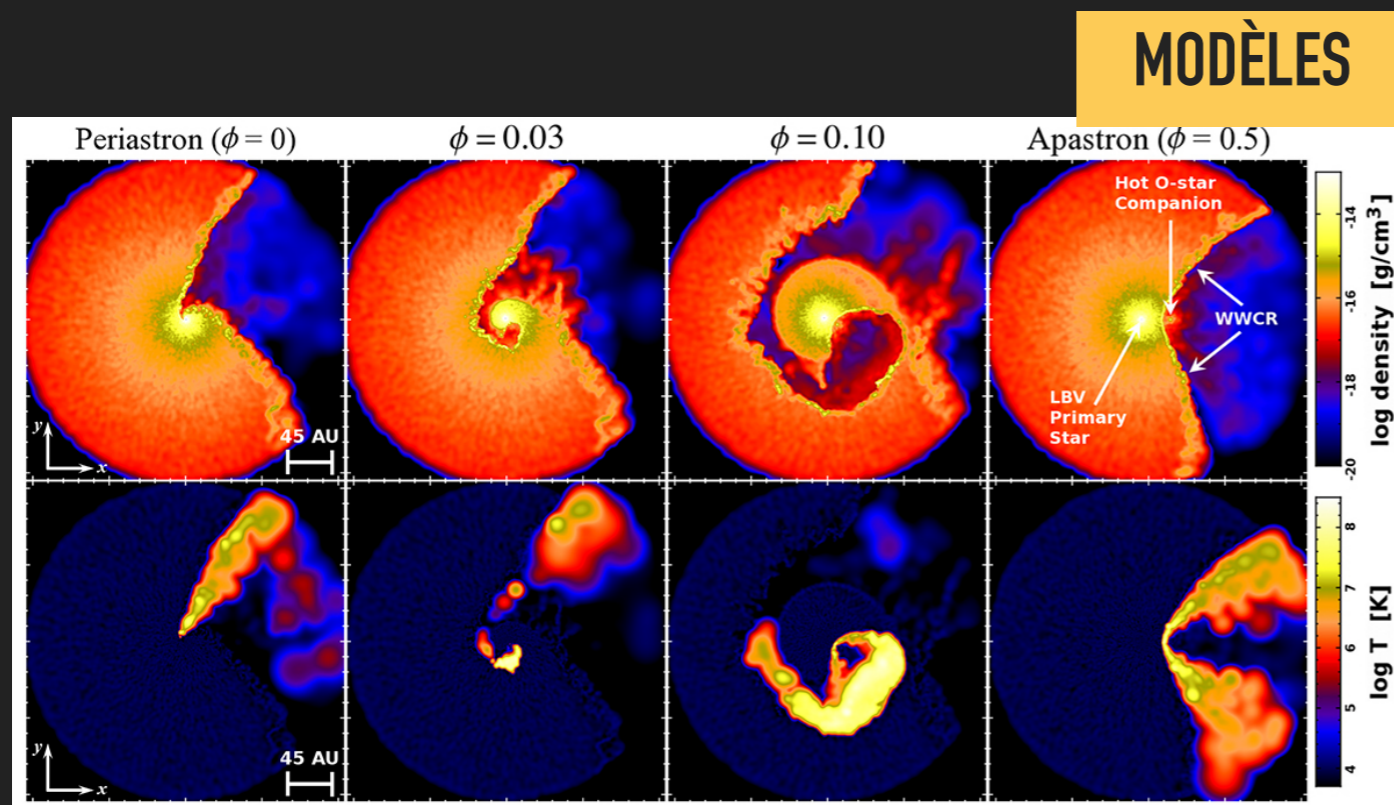


Wittkowski+ 2017

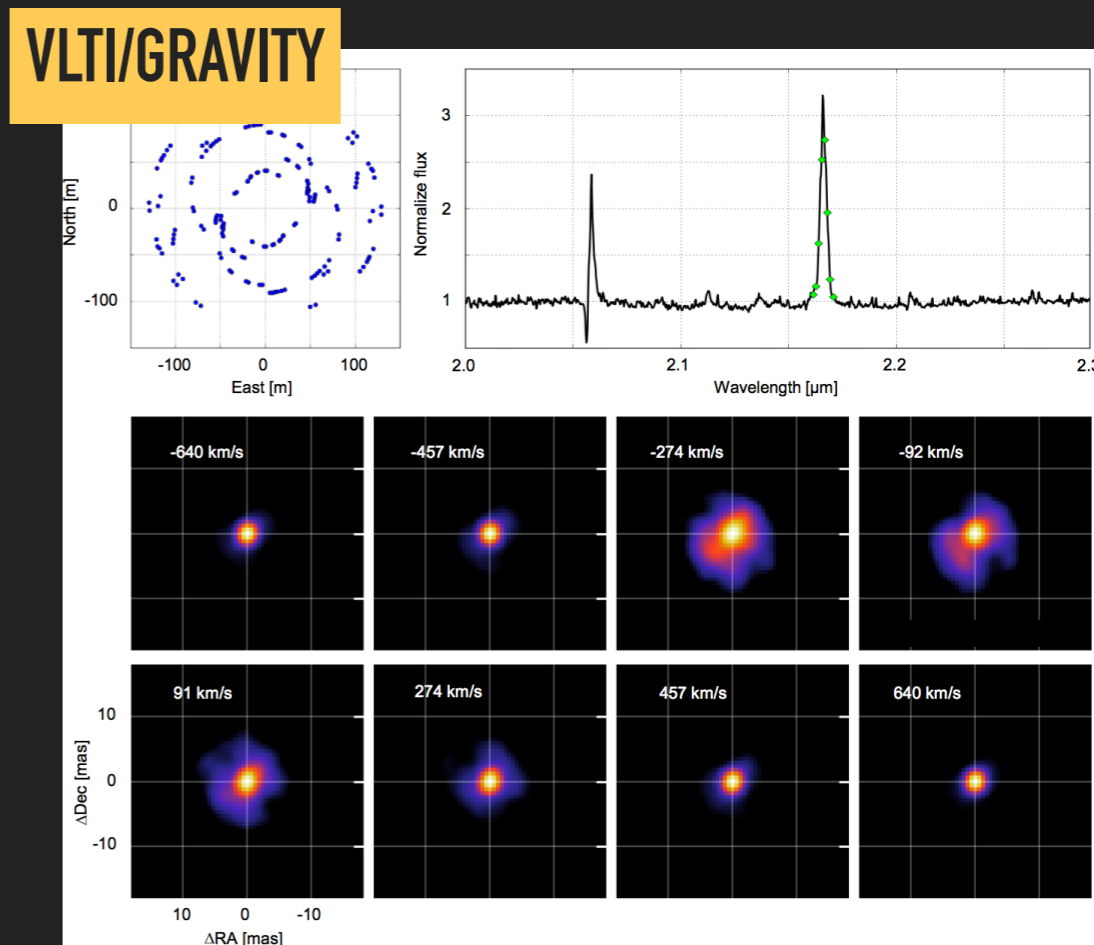
IMAGES VLTI : ETA CAR (LBV, COLLISION DE VENTS)



Weigelt+ 2016



models by Madura+ 2013



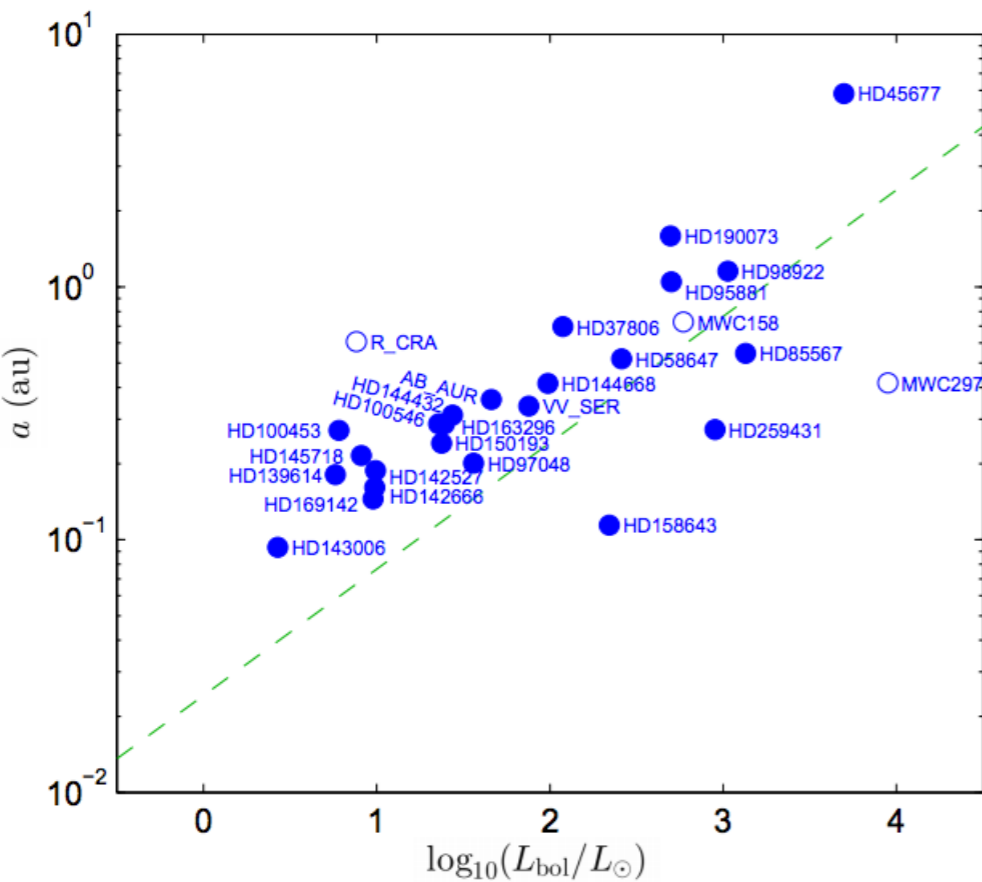
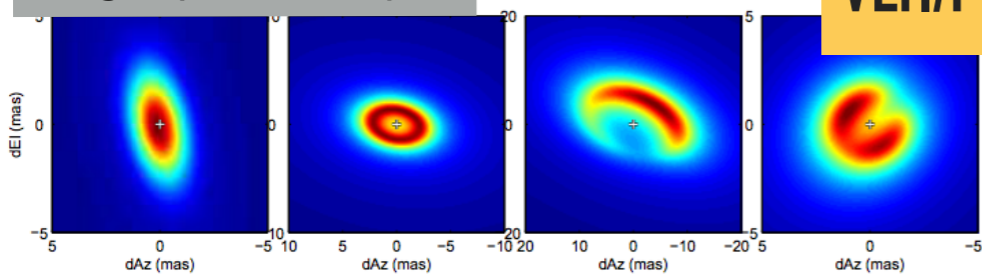
GRAVITY collaboration+ 2017

INTERFACE ÉTOILES JEUNES / DISQUE

VLTI/PIONIER

images paramétriques

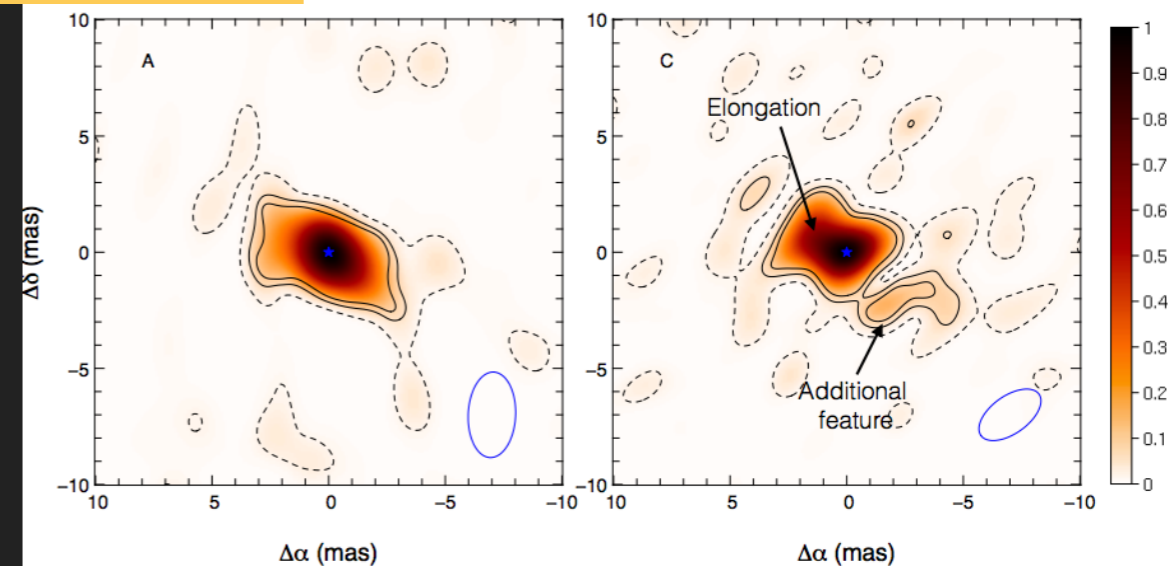
VLTI/PIONIER



rayon de sublimation des poussières

Herbig AeBe (Lazareff+ 2017)

MWC158



type T Tauri (Kluska+ 2016)

VLTI/PIONIER, MIDI + CHARA

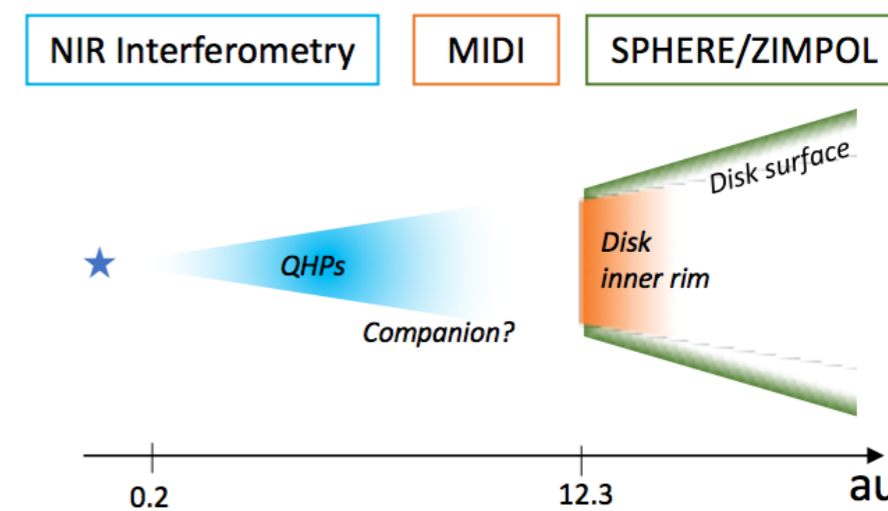
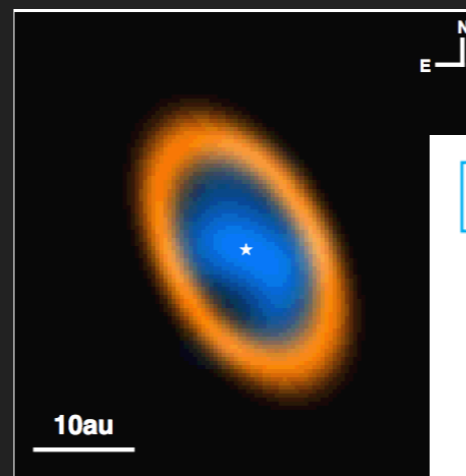
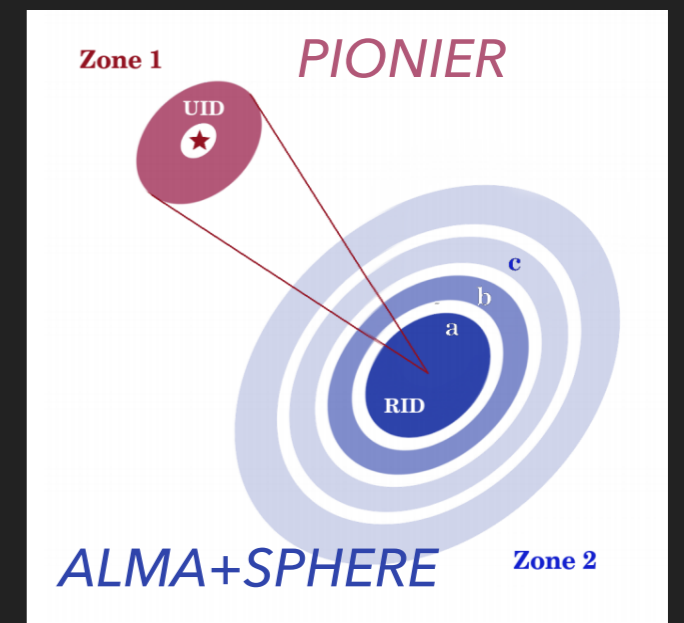


Figure 17. Sketch of MWC 614.

disque pré-transitionnel (Kluska+ 2018)

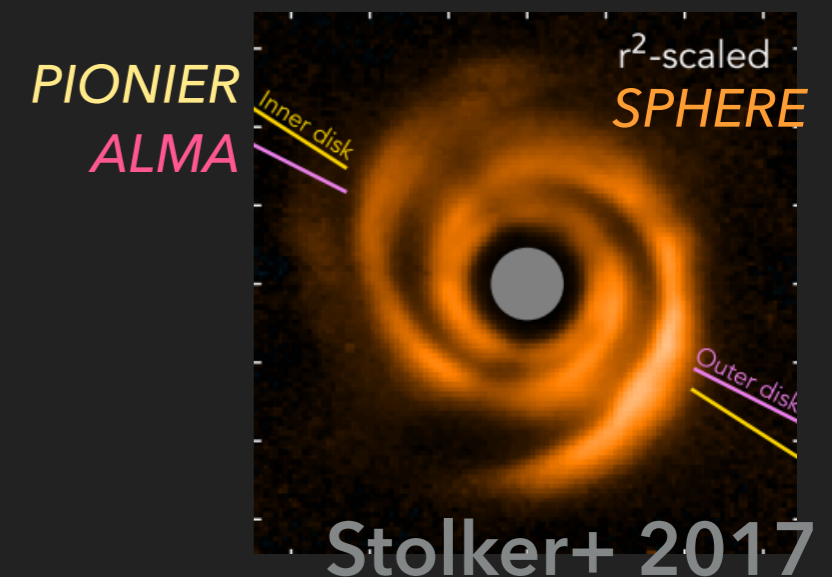
IMAGERIE INTERFÉROMÉTRIQUES DES AGB ET YSO

- ▶ Rôle clé de l'imagerie directe:
 - ▶ AGB : taille et location des cellules de convection
 - ▶ YSO : bord interne des disques



Muro-Arena+ 2018

- ▶ Lien entre les échelles spatiales
 - ▶ AGB : convection / poussières, gas
 - ▶ YSO : Disque interne / disque externe



VLTI 2.0 : TOUS LES INSTRUMENTS PASSENT À 4-TÉLÉSCOPES

- ▶ **GRAVITY** remplace **AMBER** (2004-2018)
 - 2x plus d'informations spatiales (3T -> 4T)
 - plus sensible et toujours en résolution spectrale (R~500 / 4000 sur toute la bande K)
- ▶ **MATISSE** remplace **MIDI** (2002-2014)
 - ~10x plus d'informations spatiales (2T -> 4T)
 - Ouverture de nouvelles bandes IR (N -> LMN)
- ▶ Optique Adaptative sur les ATs (et CHARA) fin 2018
- ▶ Optimisation des opérations VLTI pour l'imagerie (P102)

AVONS-NOUS TOUJOURS BESOIN D'IMAGES?

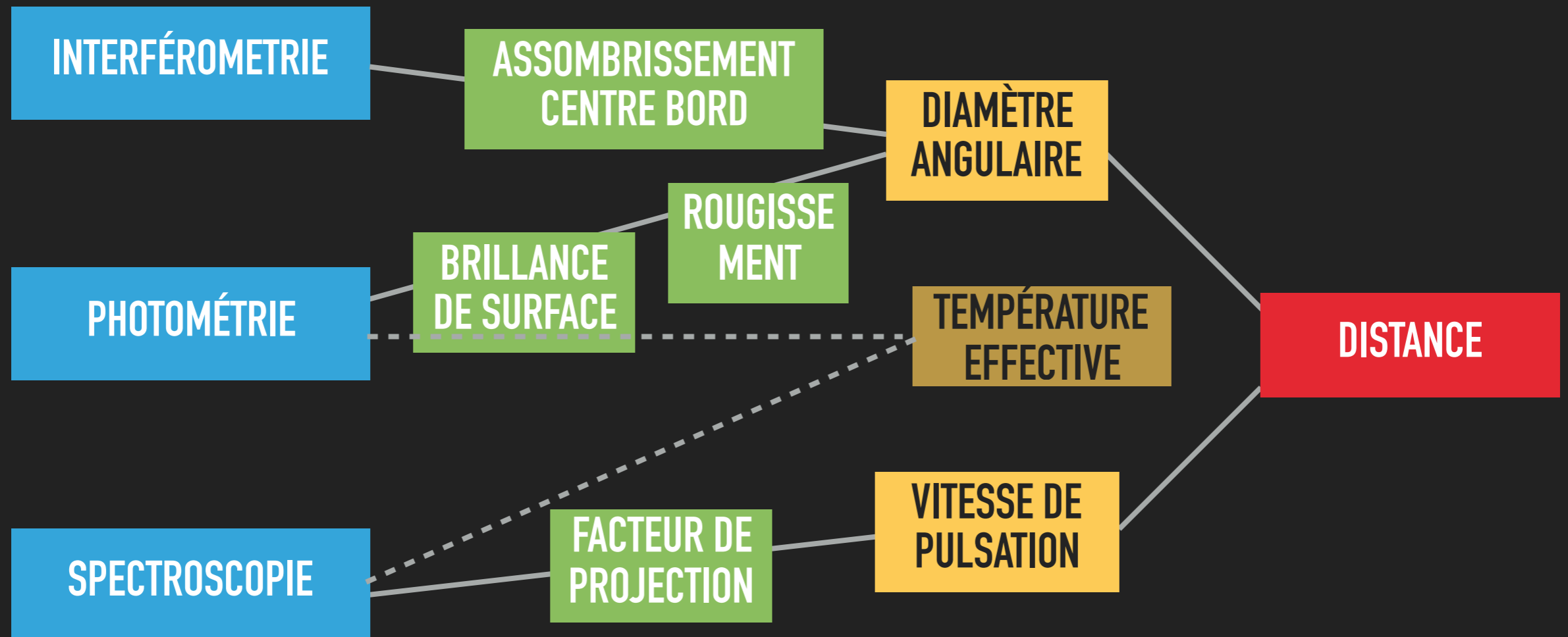
l'interprétation paramétrique des données
interférométriques fourni des paramètres stellaires
fondamentaux

PARALLAXE DE PULSATION DES CÉPHÉIDES

$$\Delta\theta \propto \frac{1}{d} \int V_{\text{puls}}$$

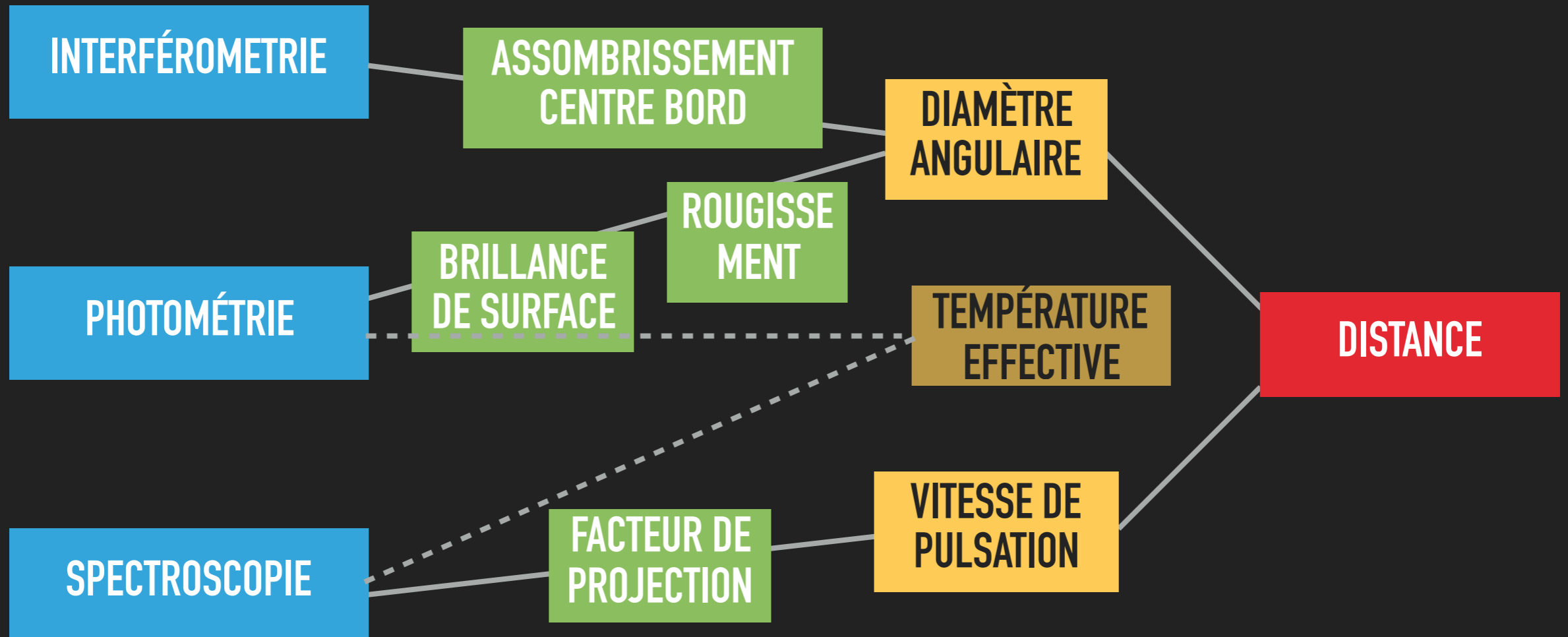
- ▶ On ne mesure pas directement la vitesse de pulsation “ V_{puls} ”
 - vitesse radiale projetée, formation de raies, ...
- ▶ On ne mesure pas directement le diamètre angulaire “ θ ”
 - photométrie : brillance de surface, rougissement
 - interférométrie : assombrissement centre-bord, CSE
- ▶ Mettre la physique connue pour éviter les coefficients ad-hoc
- ▶ Combiner toutes les données pour meilleure précision

PARALLAXE DE PULSATION : INTRINSÈQUEMENT BIAISÉE



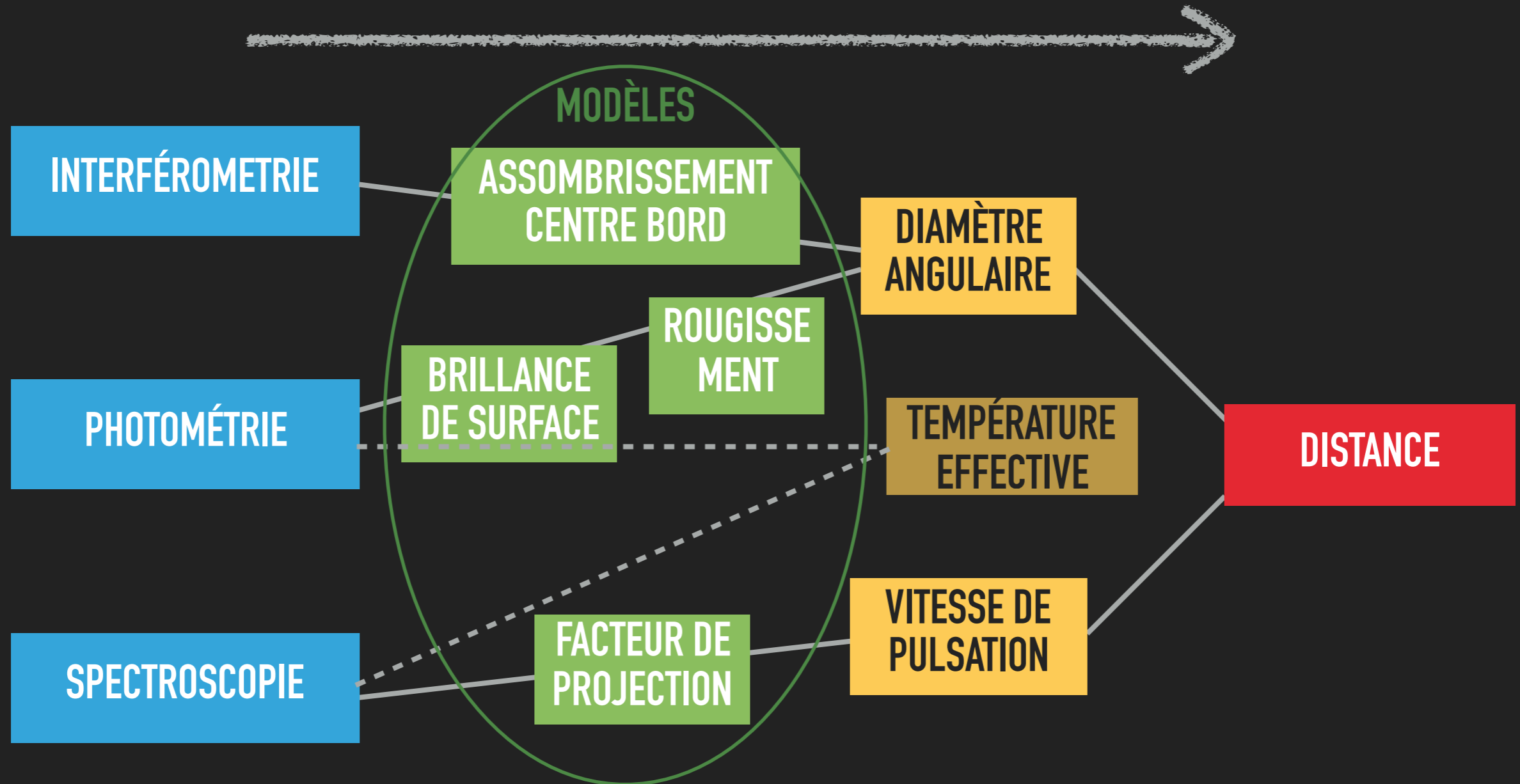
PARALLAXE DE PULSATION : INTRINSÈQUEMENT BIAISÉE

Détermination de la **distance** en modélisant les **observables**



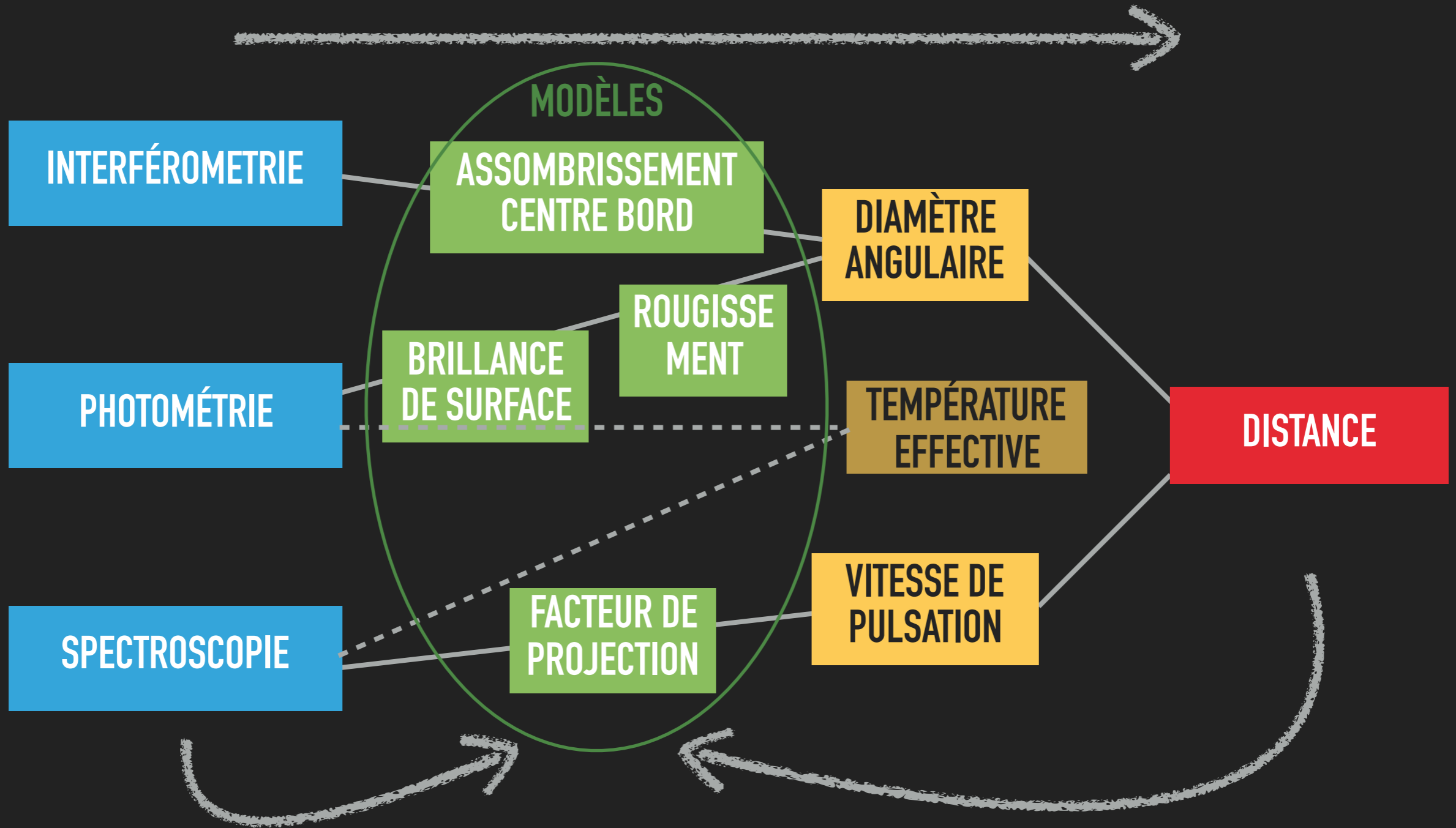
PARALLAXE DE PULSATION : INTRINSÈQUEMENT BIAISÉE

Détermination de la **distance** en modélisant les **observables**



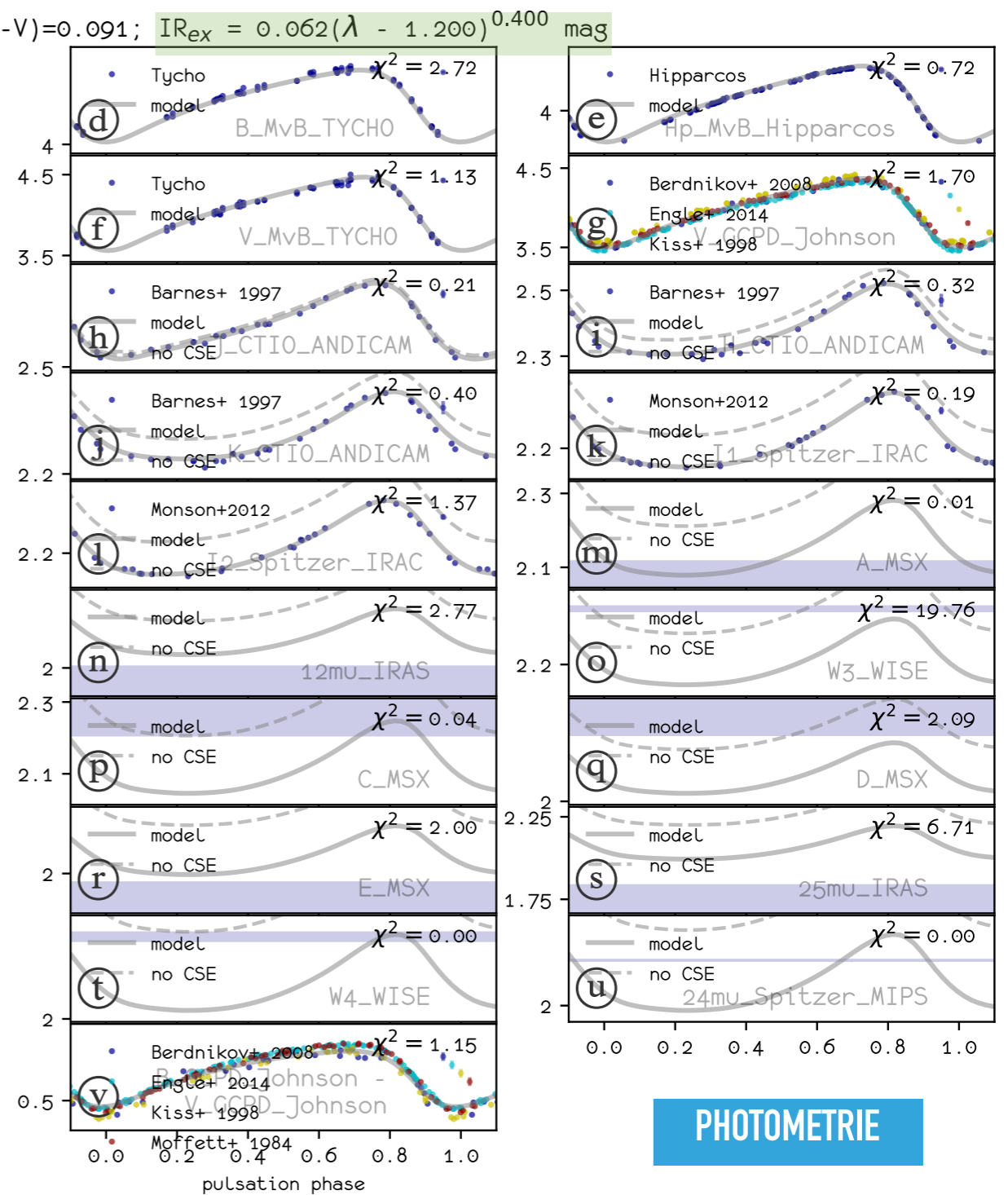
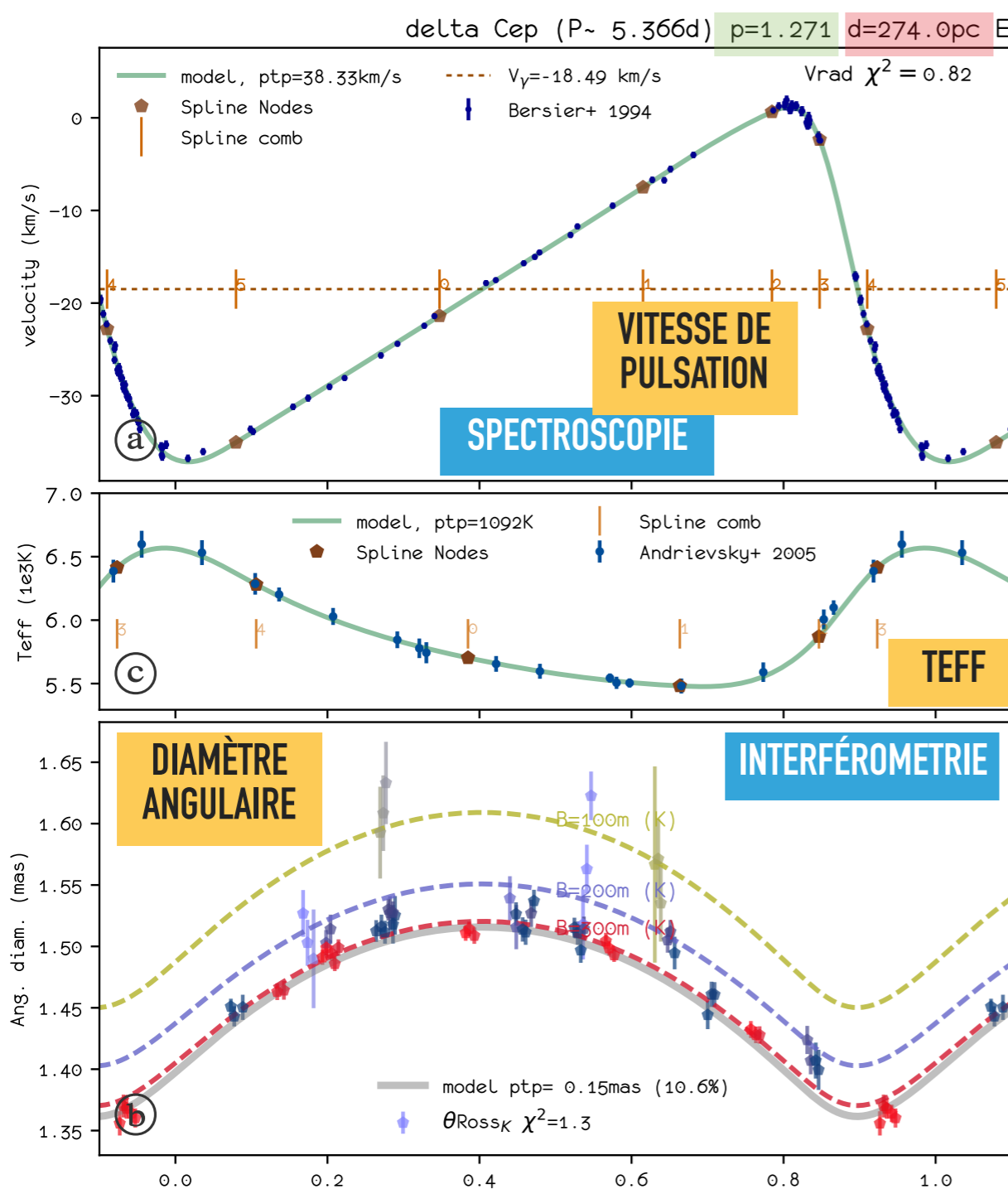
PARALLAXE DE PULSATION : INTRINSÈQUEMENT BIAISÉE

Détermination de la **distance** en modélisant les **observables**



Contraindre les modèles / comprendre la physique des Céphéides

ENJEUX : DISTANCE PRÉCISE ET JUSTE À 1%

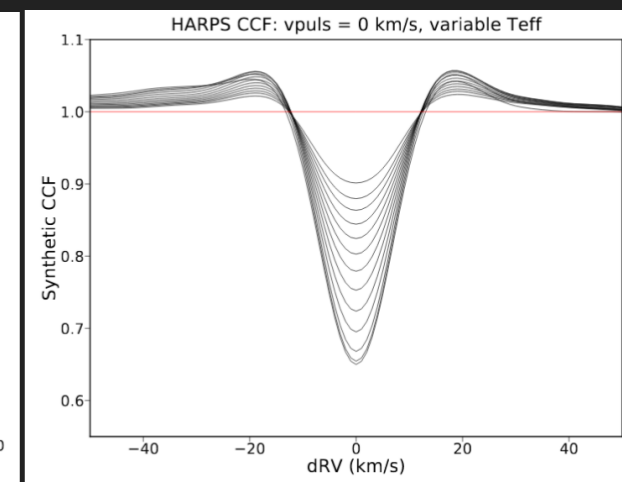
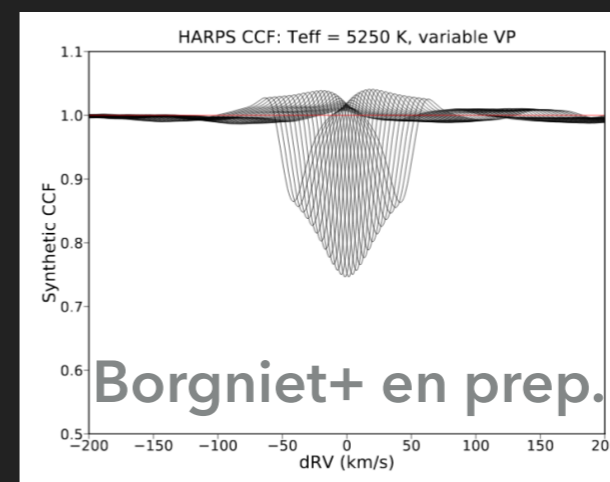
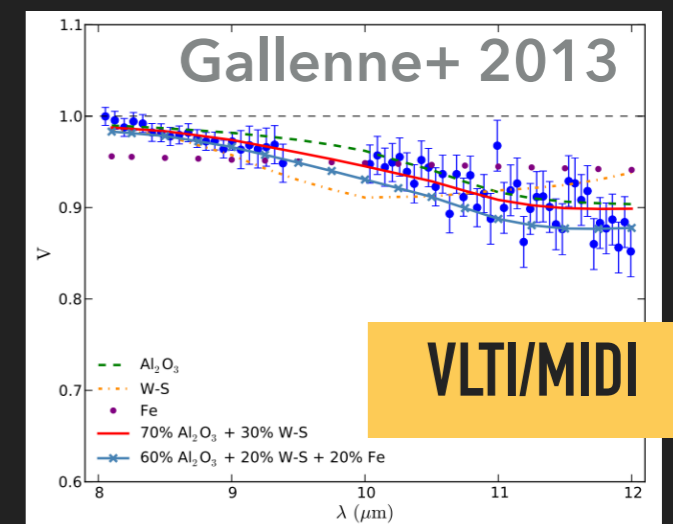
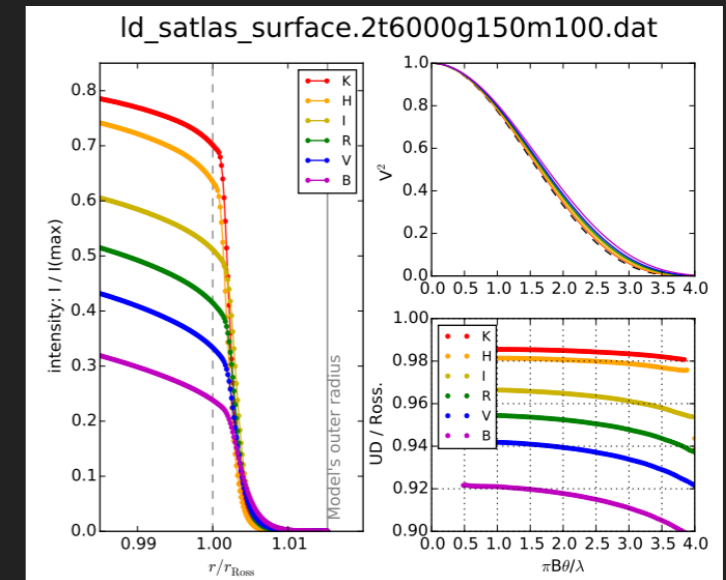


Breitfelder+ 2014
 Mérand+ 2015

SPIPS : MODÉLISATION PHYSIQUE ET VALIDATION

- ▶ Photométrie synthétique : modèles **ATLAS**
- ▶ Assombrissements centre-bord : modèles **SATLAS**
- ▶ Modèles de CSE et excès IR :
 - à-la "Perrin et al. 2014"
 - **DUSTY**
- ▶ Fonctions de corrélation spectroscopiques synthétiques : **PHOENIX**

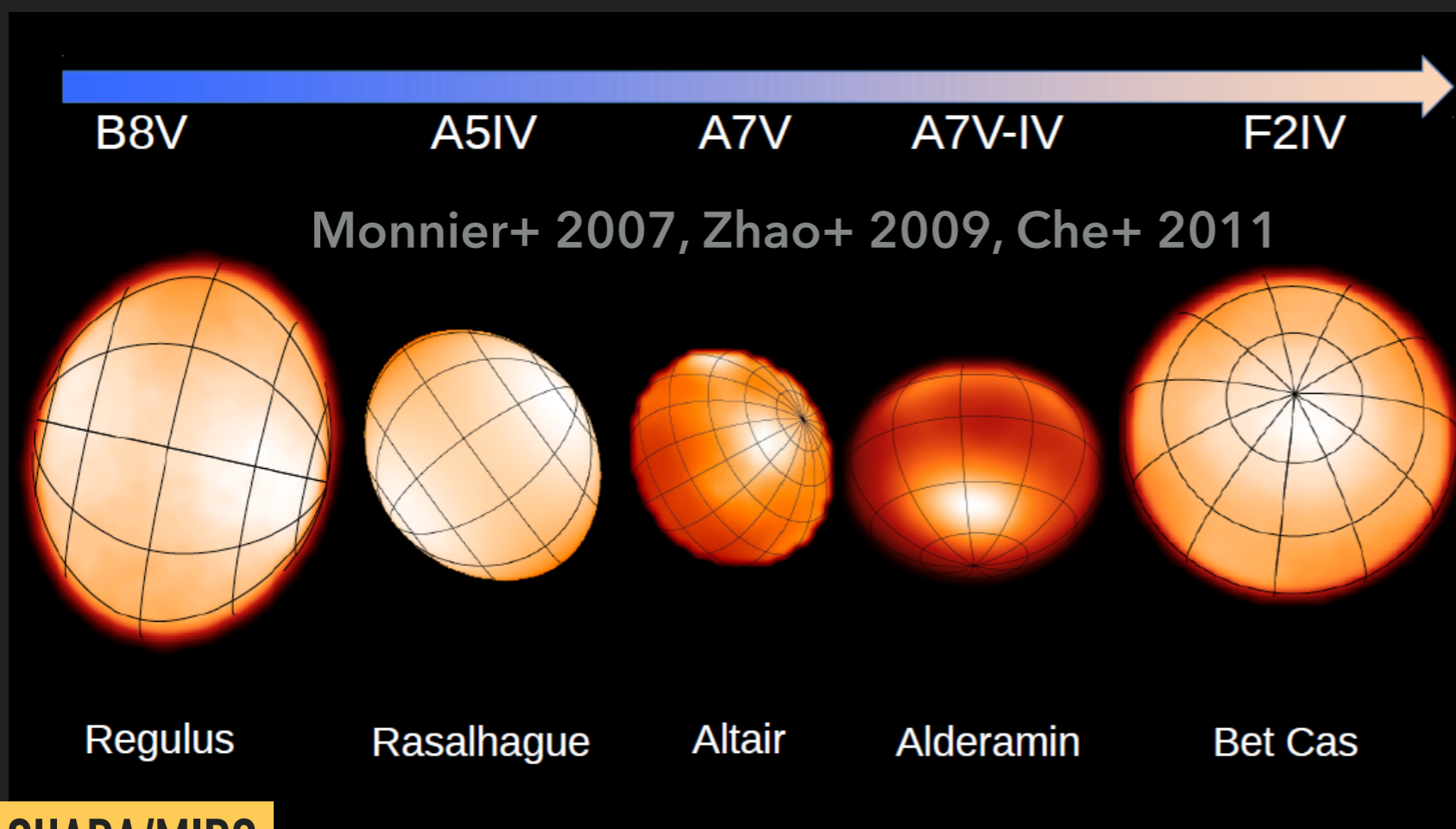
Mérand+ 2015
Nardetto+ 2017



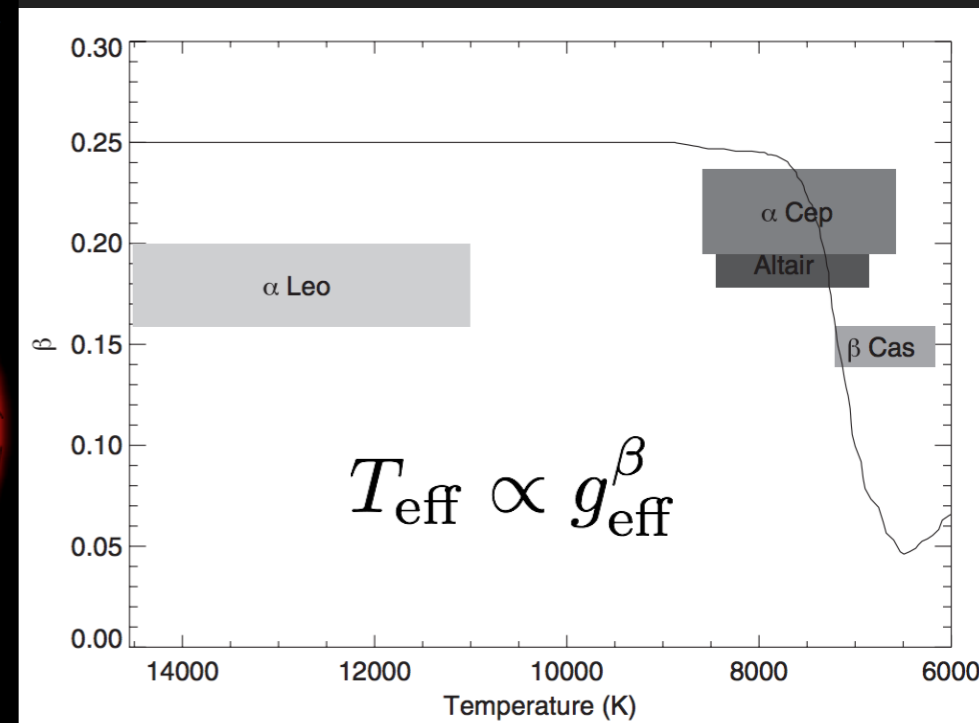
SPIPS À L'ÈRE DE GAIA

- ▶ La relation P-L est un des fondements de l'échelle de distance pour mesurer H_0
- ▶ Gaia va mesurer les distances de 300 Céphéides Galactiques à mieux que 2%
- ▶ SPIPS+Gaia pour tester:
 - Notre compréhension de la physique liée à la P-L et parallaxe de pulsation
 - Notre confiance dans l'extrapolation de la P-L locale à d'autres galaxies (e.g. LMC)
- ▶ "UnlockCepheids" (ANR, PI Kervella) : ~1000 θ sur une 30aine étoiles, spectroscopie additionnelle, postdocs/thèses pour la modélisation

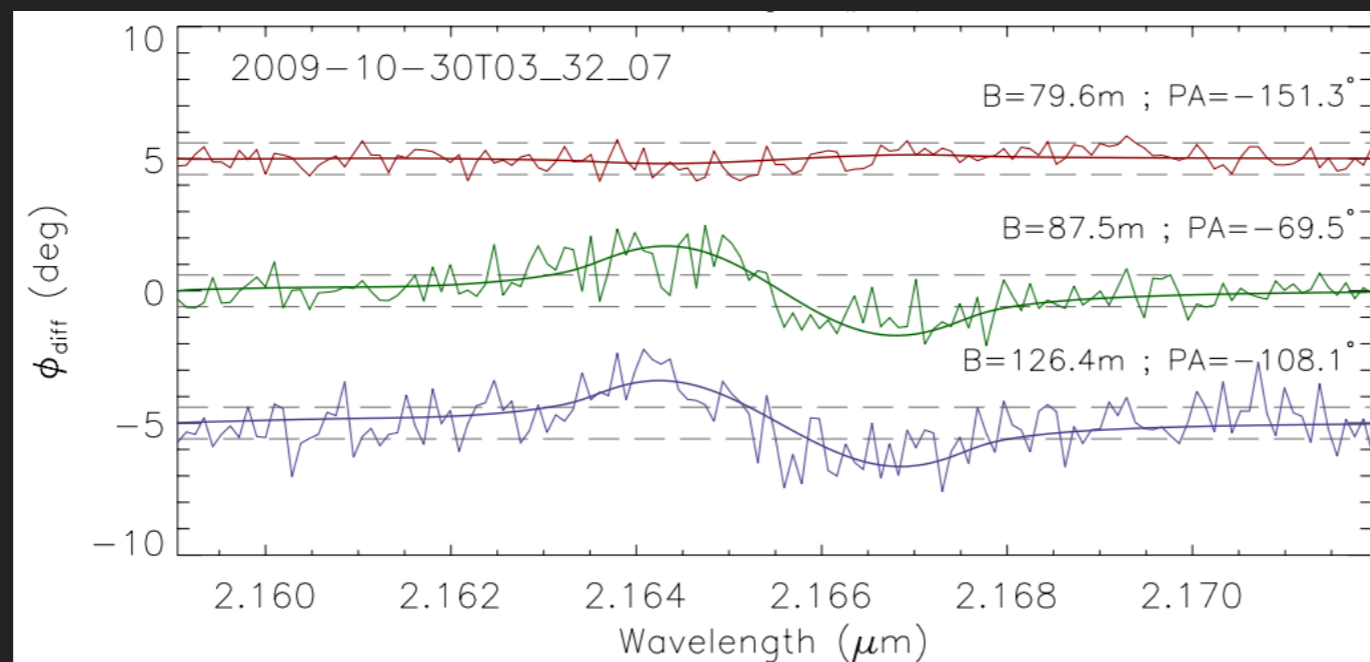
ROTATION SUR LA SÉQUENCE PRINCIPALE



CHARA/MIRC



Claret+ 2000, Che+ 2011



Domiciano de Souza+ 2012

MODÉLISATION D'OBSERVABLES POUR LA ROTATION STELLAIRE

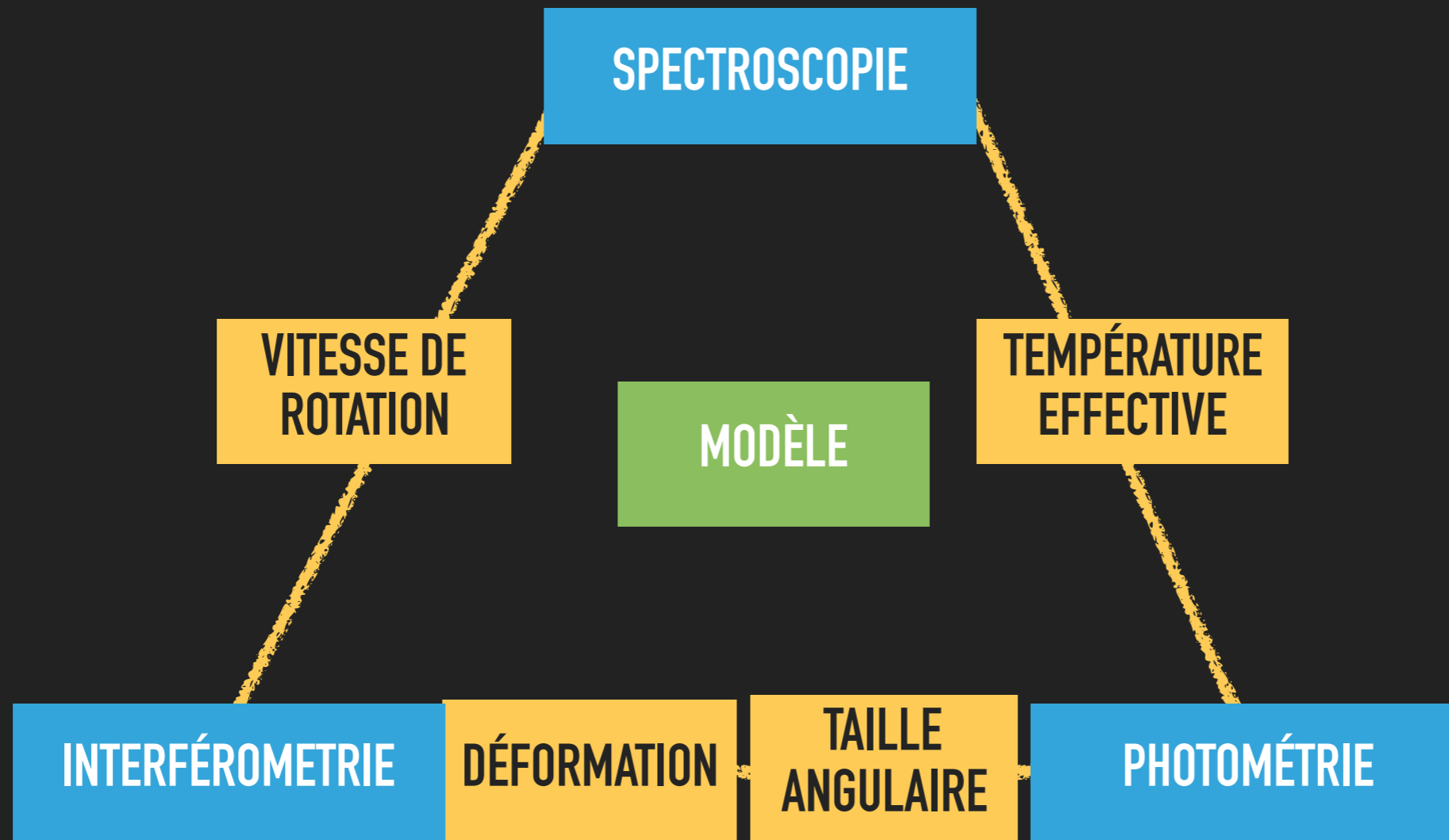
Les modèles utilisés pour l'interprétation sont simplistes:

- ▶ Sphéroïde de Roche (toute la masse au centre, rotation uniforme)
- ▶ Carte de température Von-Zeipel (atm. grise) $T_{\text{eff}} \propto g_{\text{eff}}^{\beta}$
- ▶ Surface recouverte de modèles hydrostatiques (e.g. ATLAS)

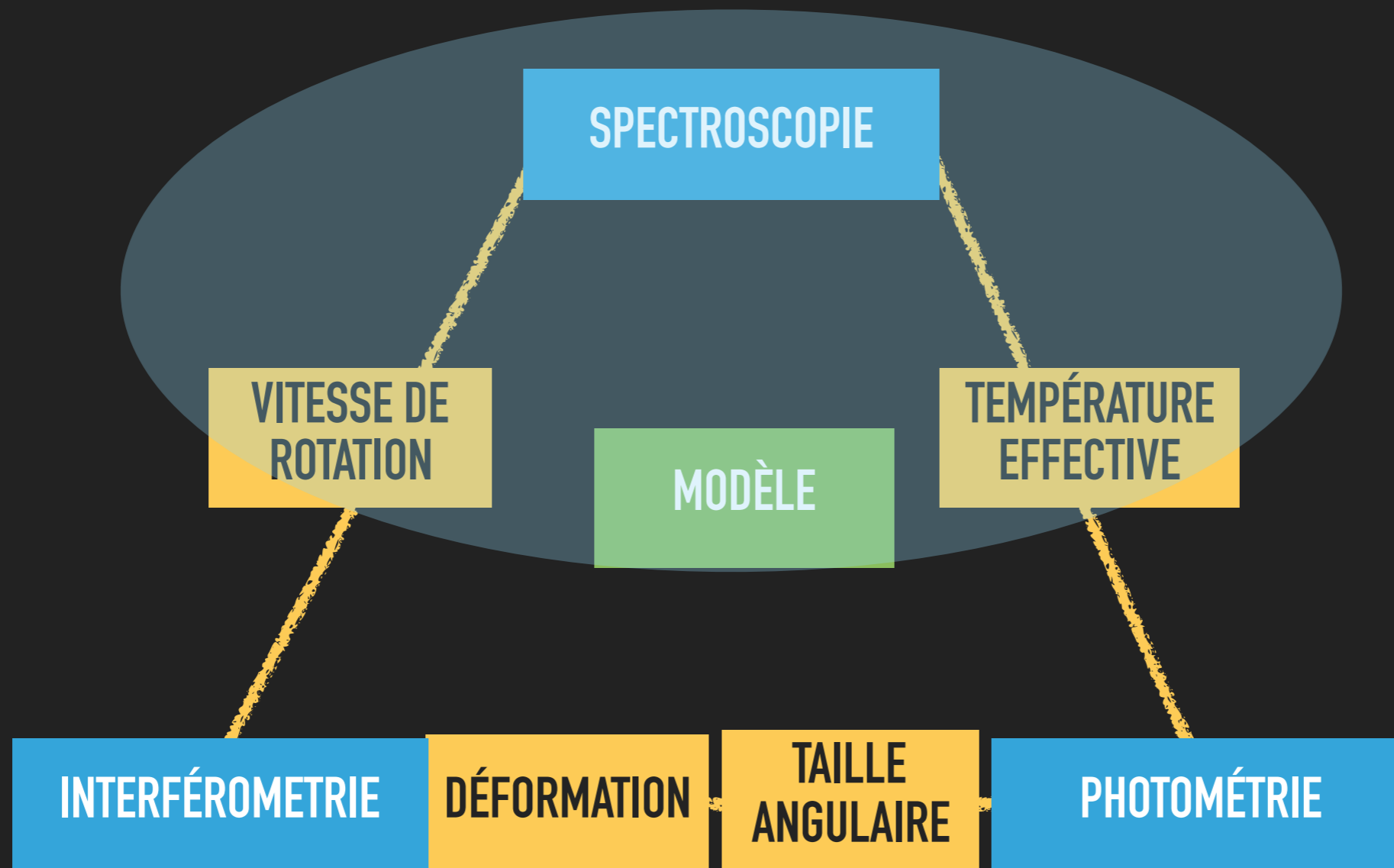
Deux approches possibles:

- ▶ Implémenter des "interpréteurs" plus physiques
- ▶ Pousser les "interpréteurs" actuels dans leurs retranchements

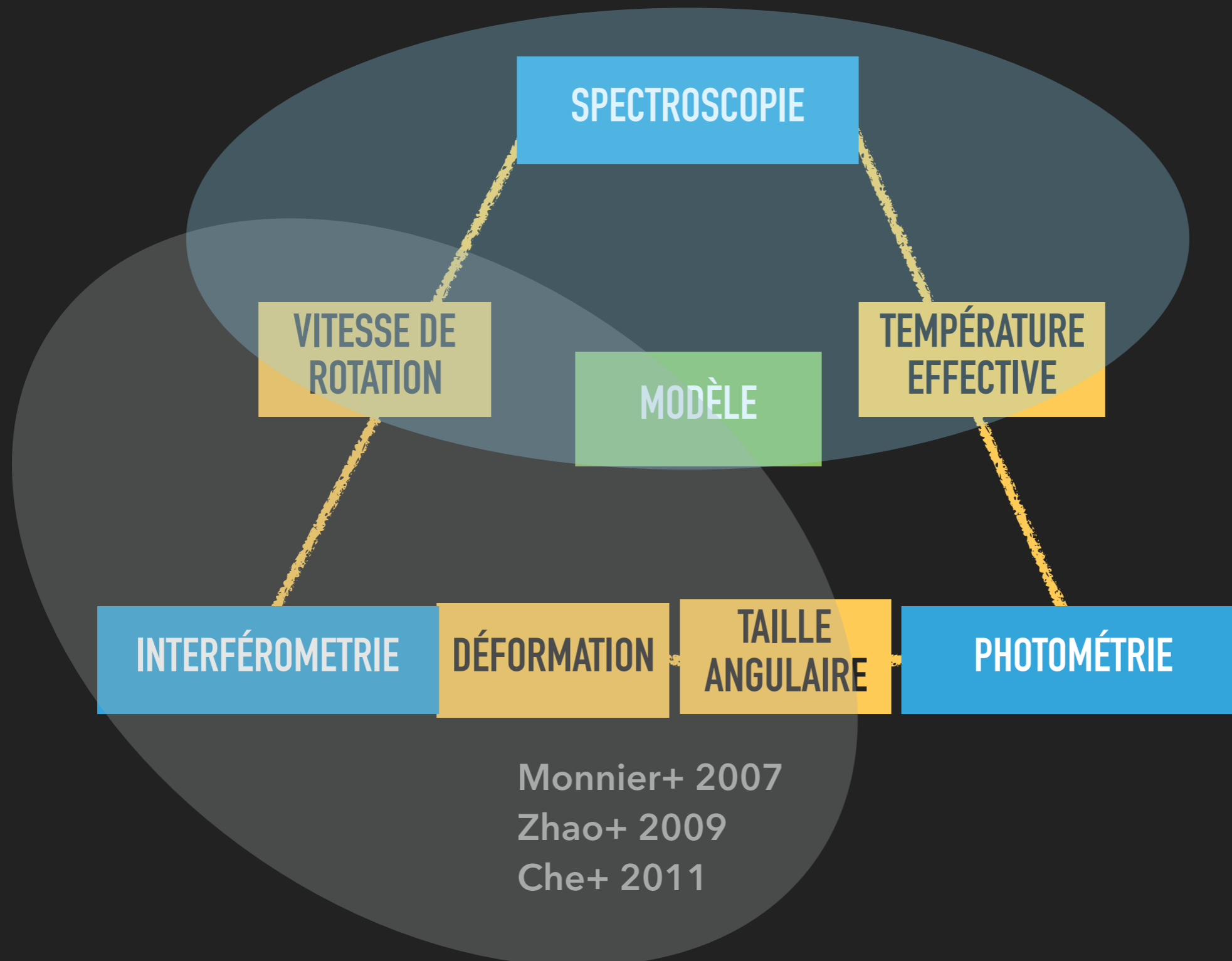
POUSSER LES INTERPRÉTEURS DANS LEUR RETRANCHEMENTS



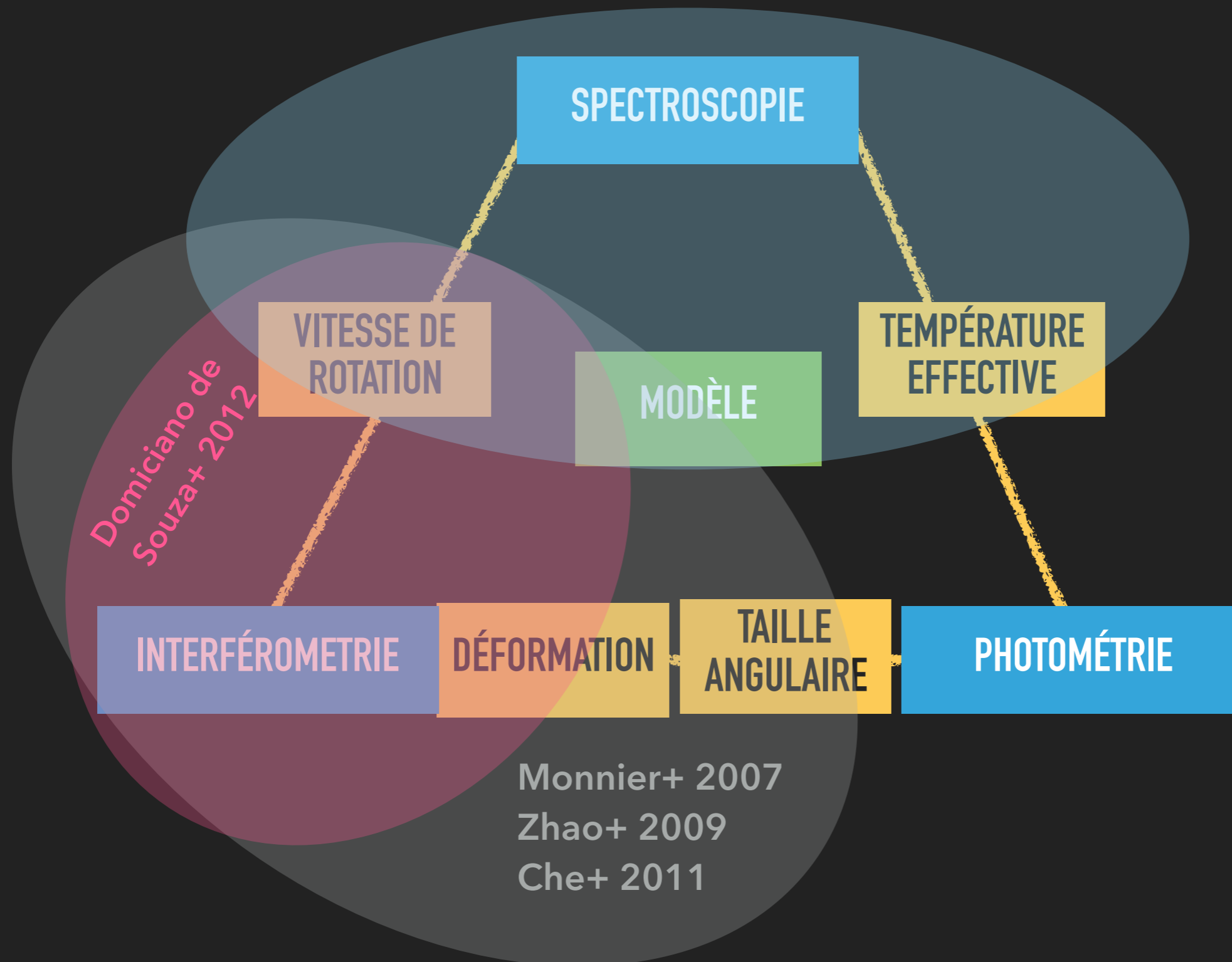
POUSSER LES INTERPRÉTEURS DANS LEUR RETRANCHEMENTS



POUSSER LES INTERPRÉTEURS DANS LEUR RETRANCHEMENTS

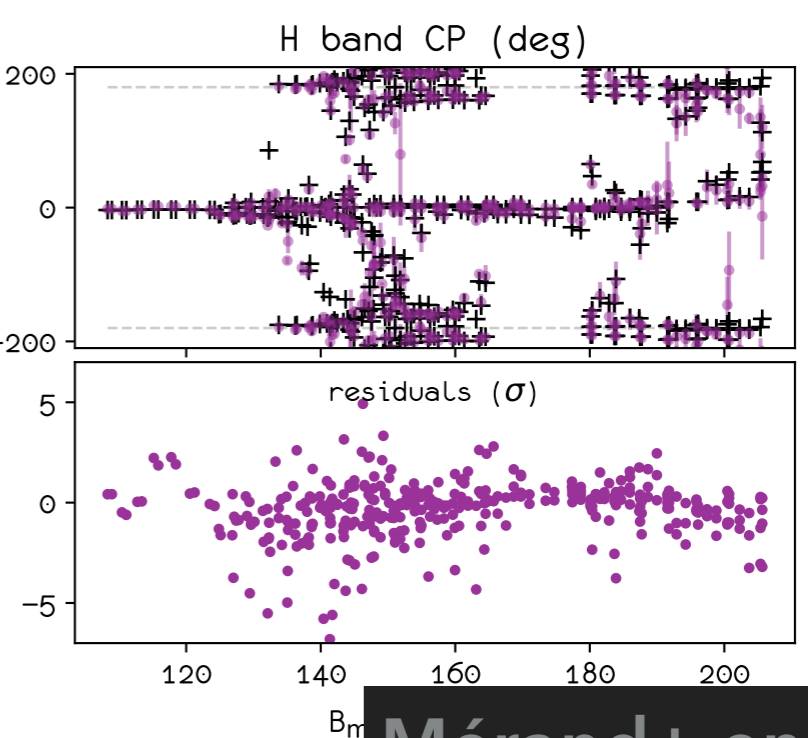
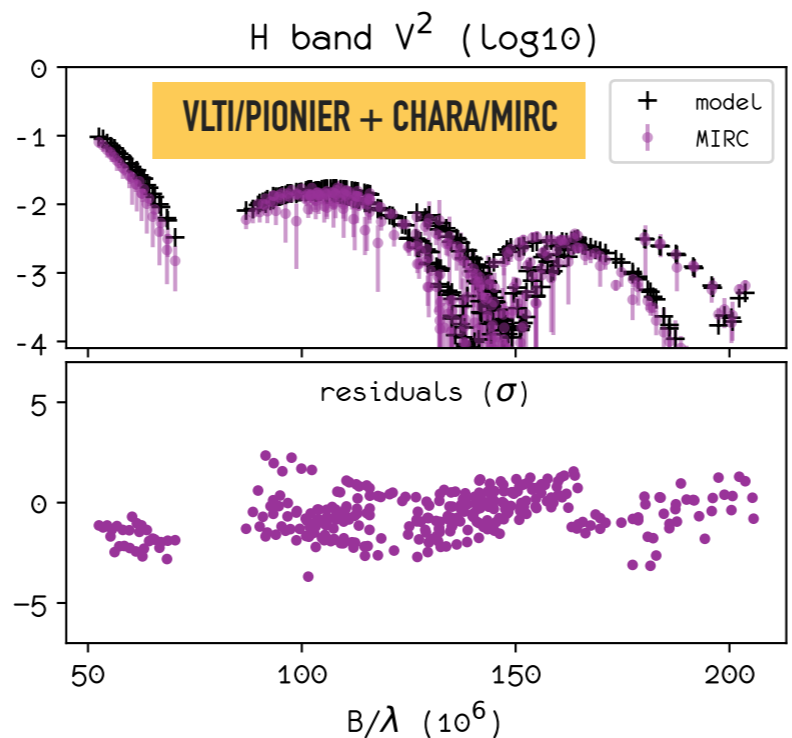
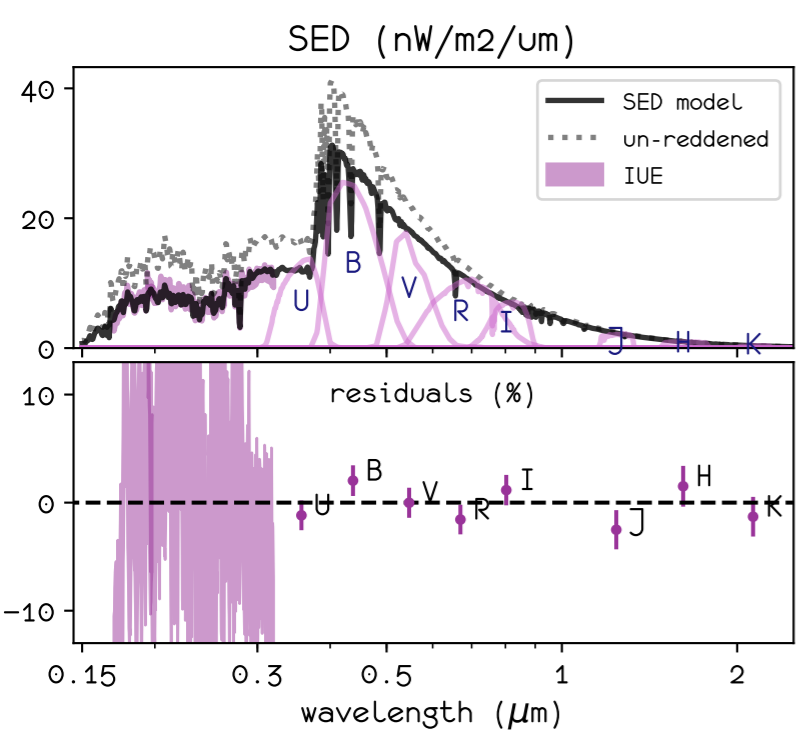
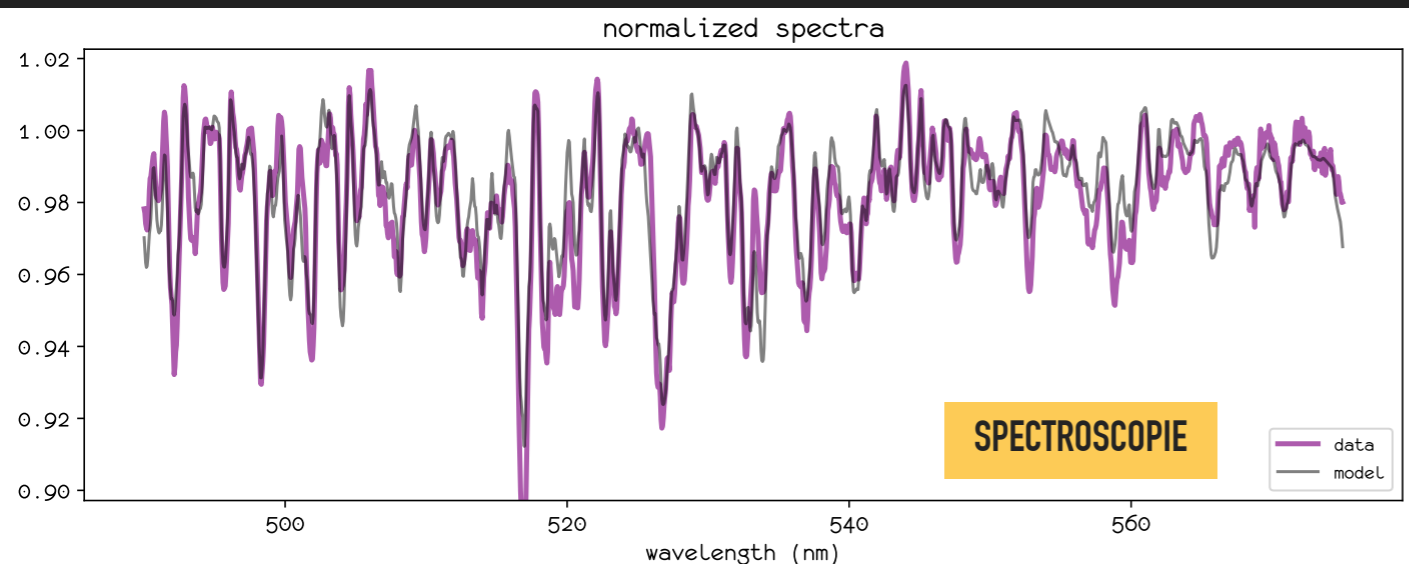
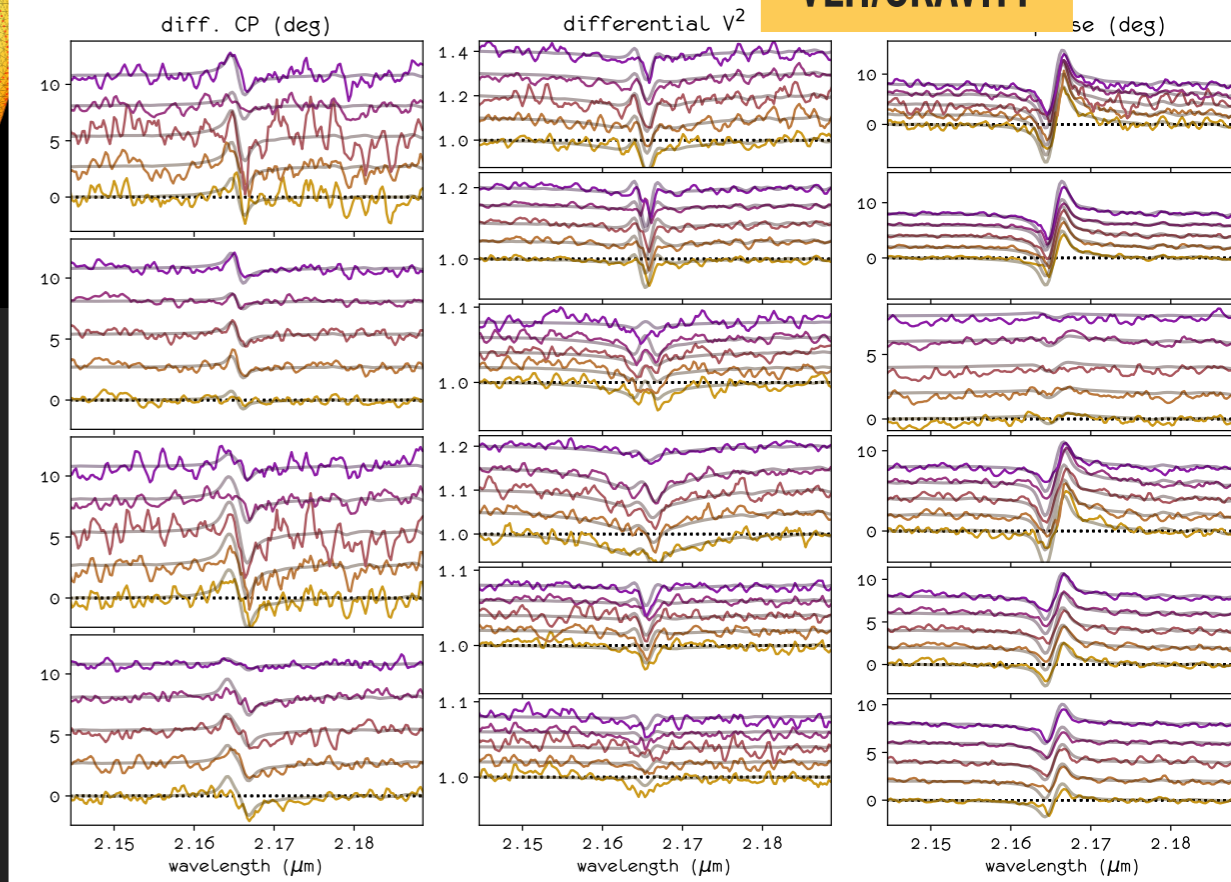
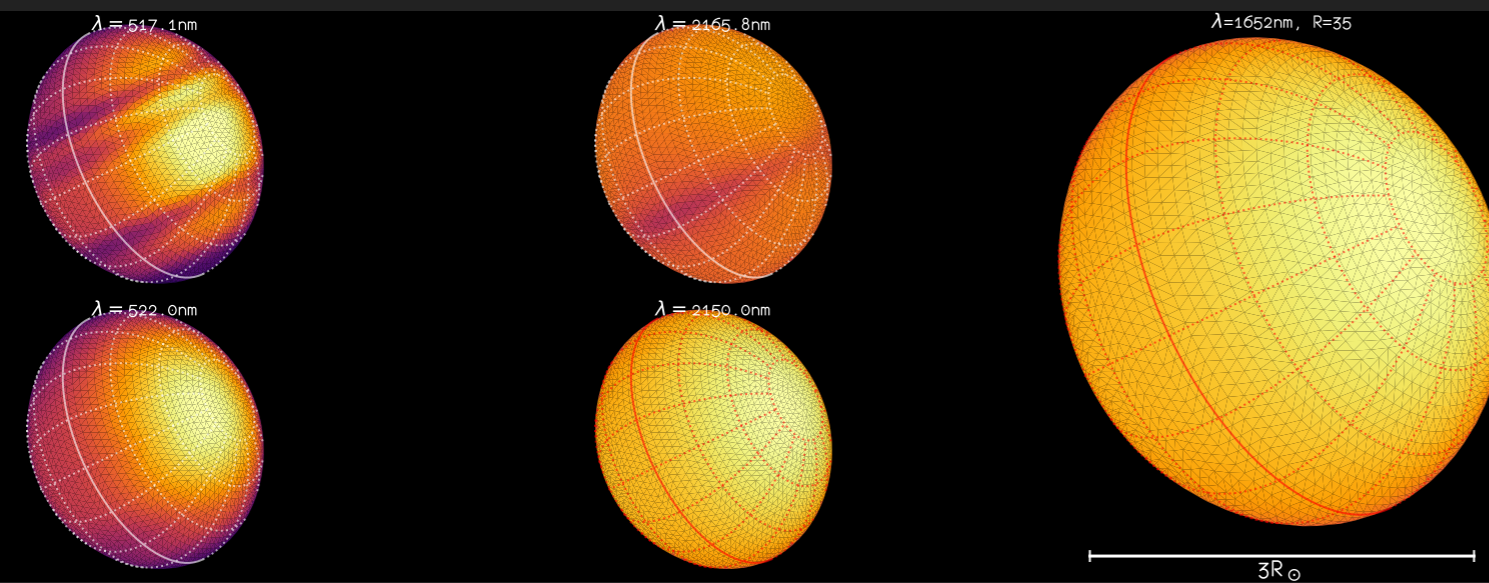


POUSSER LES INTERPRÉTEURS DANS LEUR RETRANCHEMENTS



MODÉLISATION GLOBALE

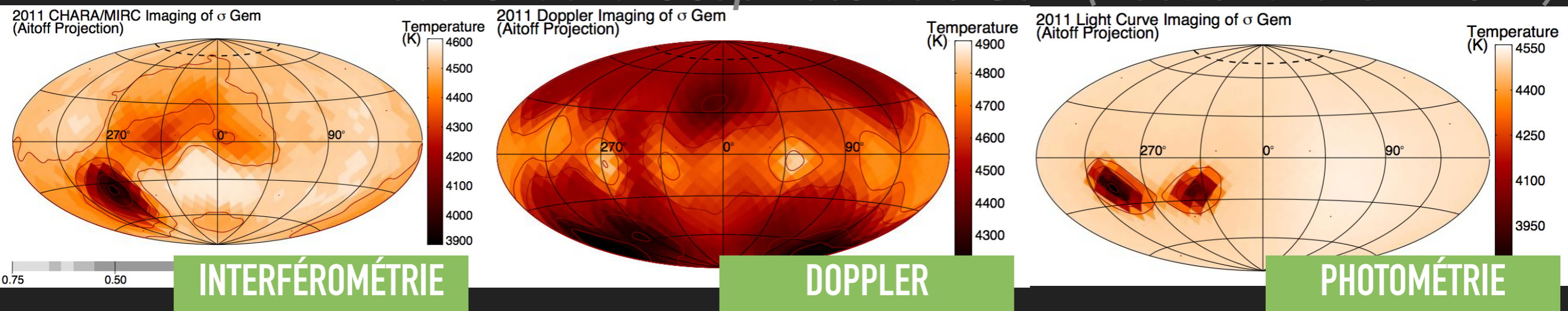
VLTI/GRAVITY



PERSPECTIVES SUR LA ROTATION

- ▶ Modèles simplistes semblent expliquer toutes les observables d'Altair...
- ▶ Spectro-interférométrie prometteuse mais demande une plus grande résolution spatiale (CHARA, instrument visiteur VLTi en bande I ou J?)
- ▶ La modélisation globale est la prochaine étape
- ▶ Aussi pour les étoiles avec tâches, binaires à éclipses, etc.

reconstructions séparées de σ Gem (Roettenbacher+ 2017)



LES ENJEUX

- ▶ Maintenir et améliorer la facilité d'utilisation des interféromètres optiques VLT & CHARA (Imagerie, relevés)
 - rôle clé des initiatives de la communauté (JMMC, EII)
- ▶ GRAVITY: généralisation de la spectro-interférométrie
- ▶ MATISSE: révolution du 4T en bandes LMN
- ▶ Foyer visiteur du VLT (2019+)
- ▶ Elargir le contexte des observations interférométriques:
 - Relier les échelles spatiales (ALMA, SPHERE, ...)
 - Modélisation simultanée spectro / photo / interférométrique
 - Augmenter la taille des échantillons observés

DOCUMENTS DE PROSPECTIVES

- ▶ “Future of optical interferometry in Europe” rapport de l’EII (2017) <http://www.european-interferometry.eu/working-groups/the-future-of-interferometry-in-europe>
- ▶ “Science cases for a visible interferometer” Stee et al. (2017) <https://arxiv.org/abs/1703.02395>
- ▶ “VLT Roadmap” Mérand, ESO Messenger (2018)

