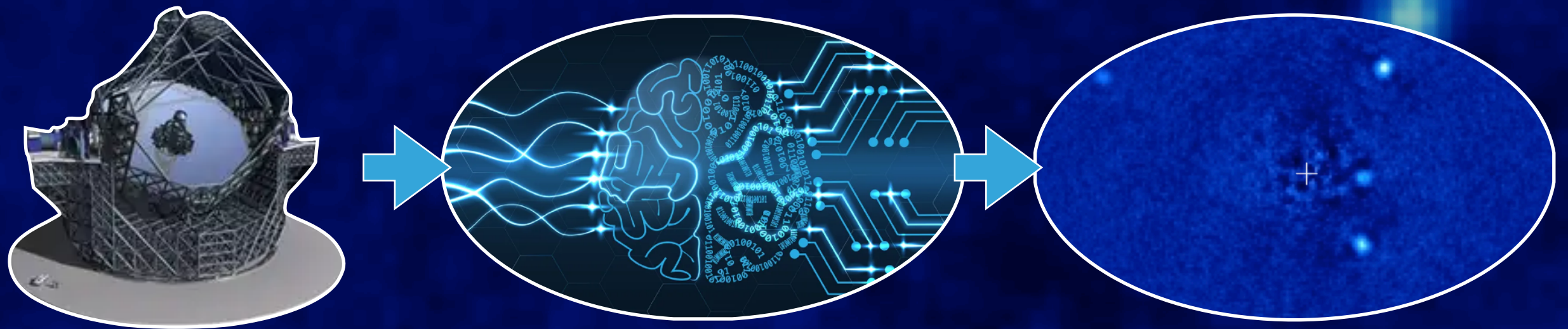


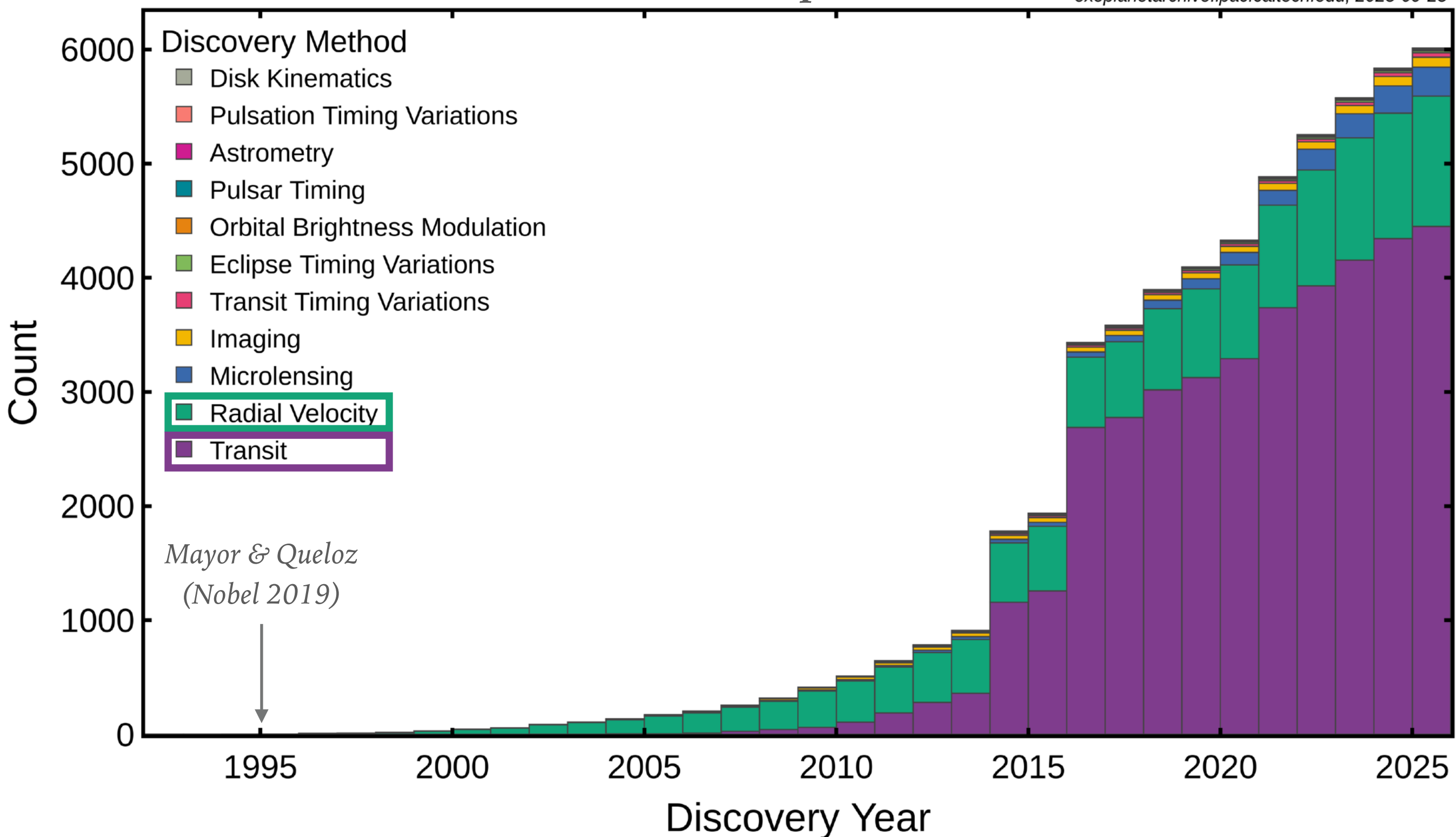


L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU SERVICE DE LA DÉTECTION D'EXOPLANÈTES

Olivier ABSIL

*Université de Liège
Fonds de la Recherche Scientifique - FNRS*

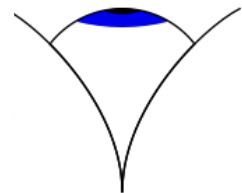
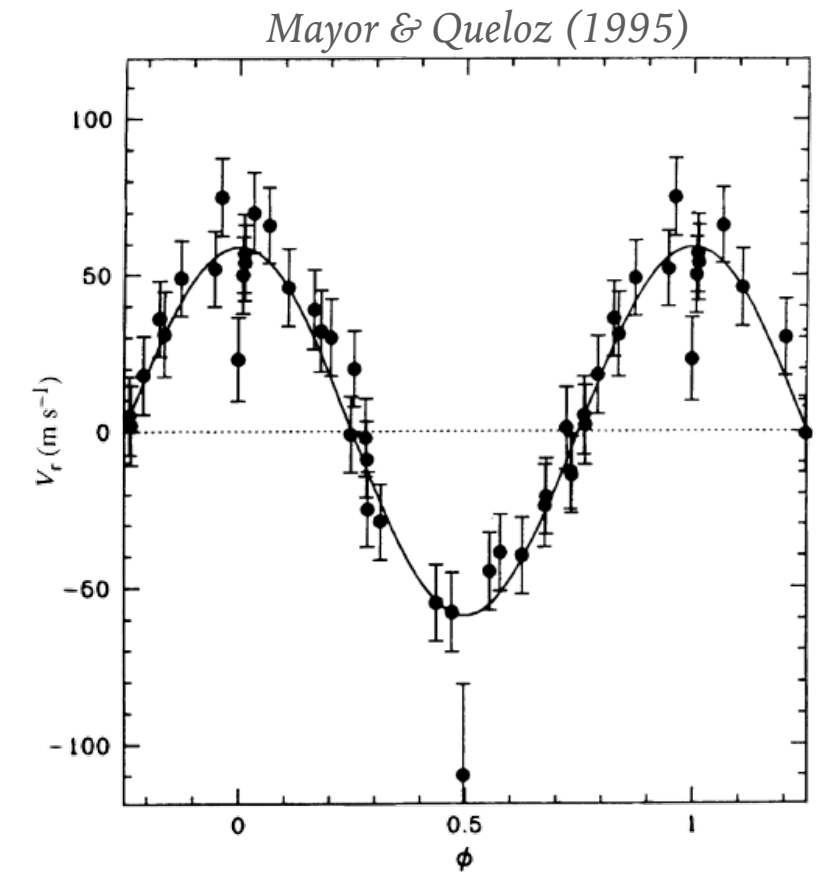
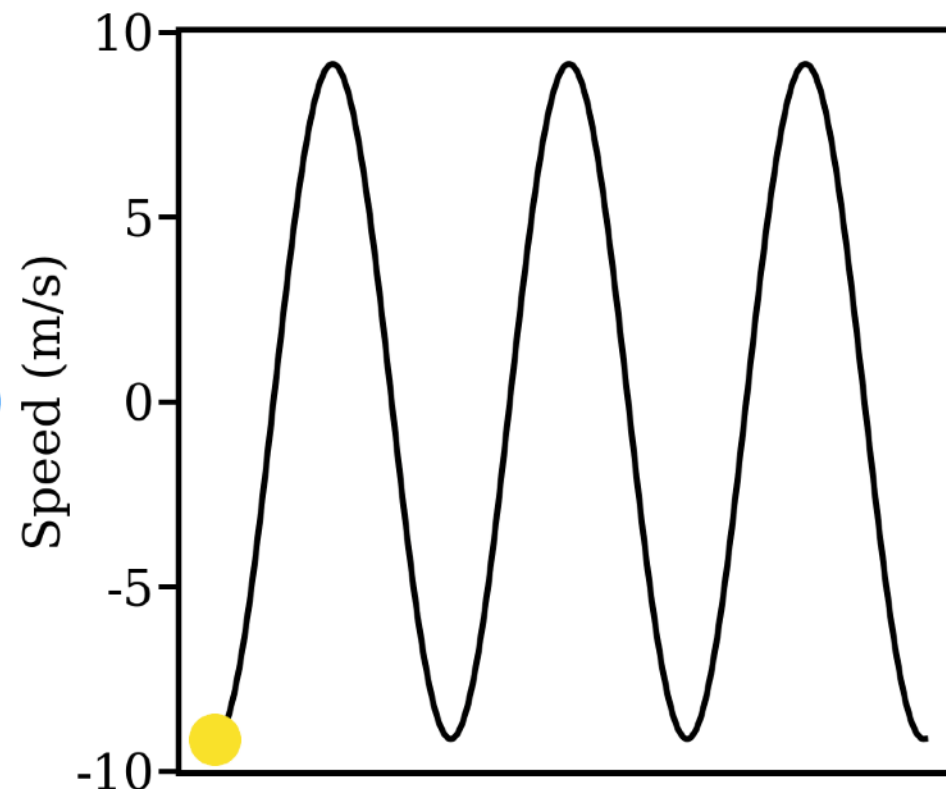
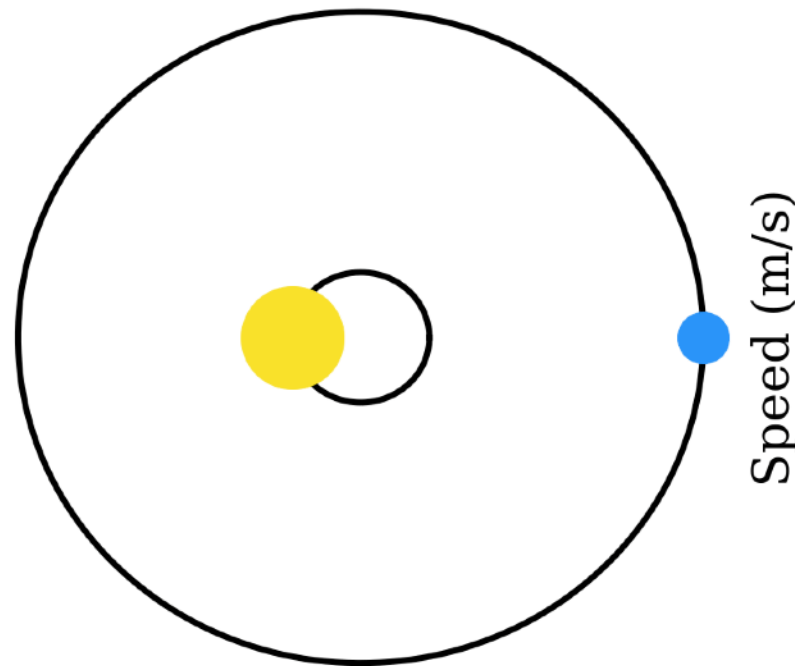
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-09-25



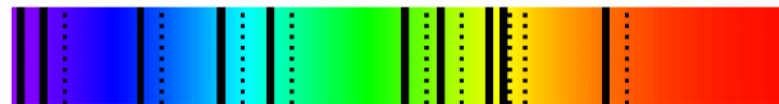
UNE DÉTECTION **INDIRECTE**, PAR EFFET DOPPLER

Méthode dite des « vitesses radiales »

Alysa Obertas (@AstroAlysa)

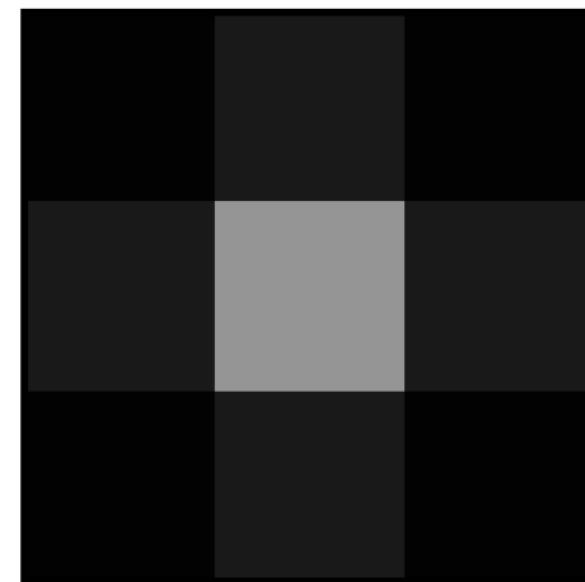
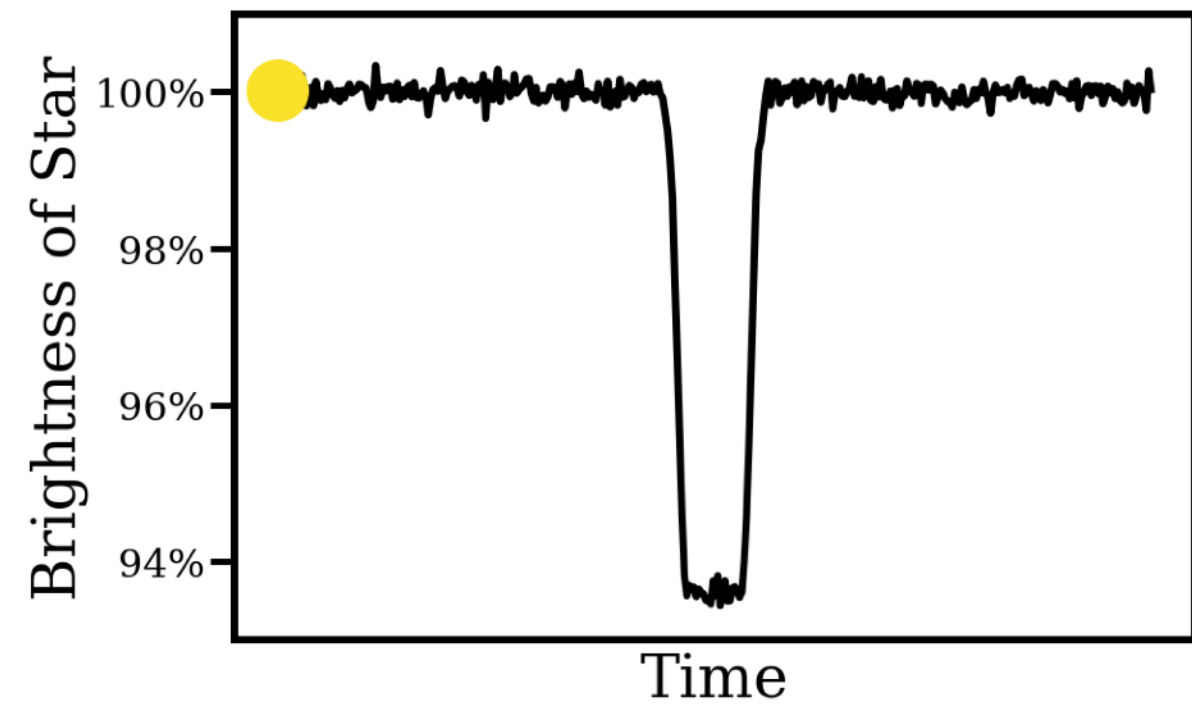
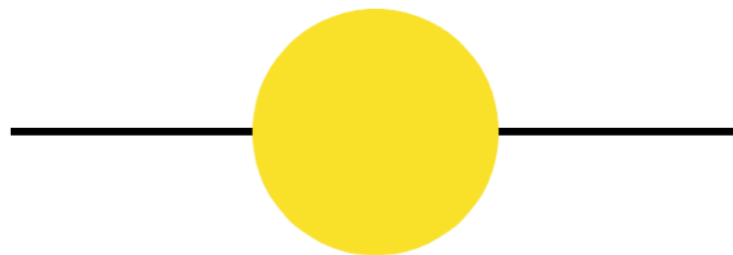
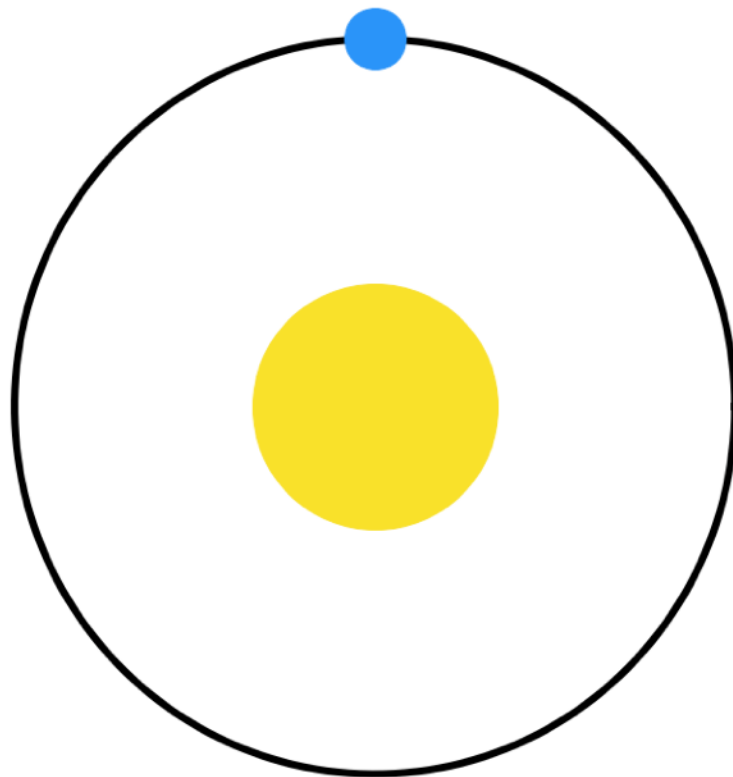


*observateur
terrestre*



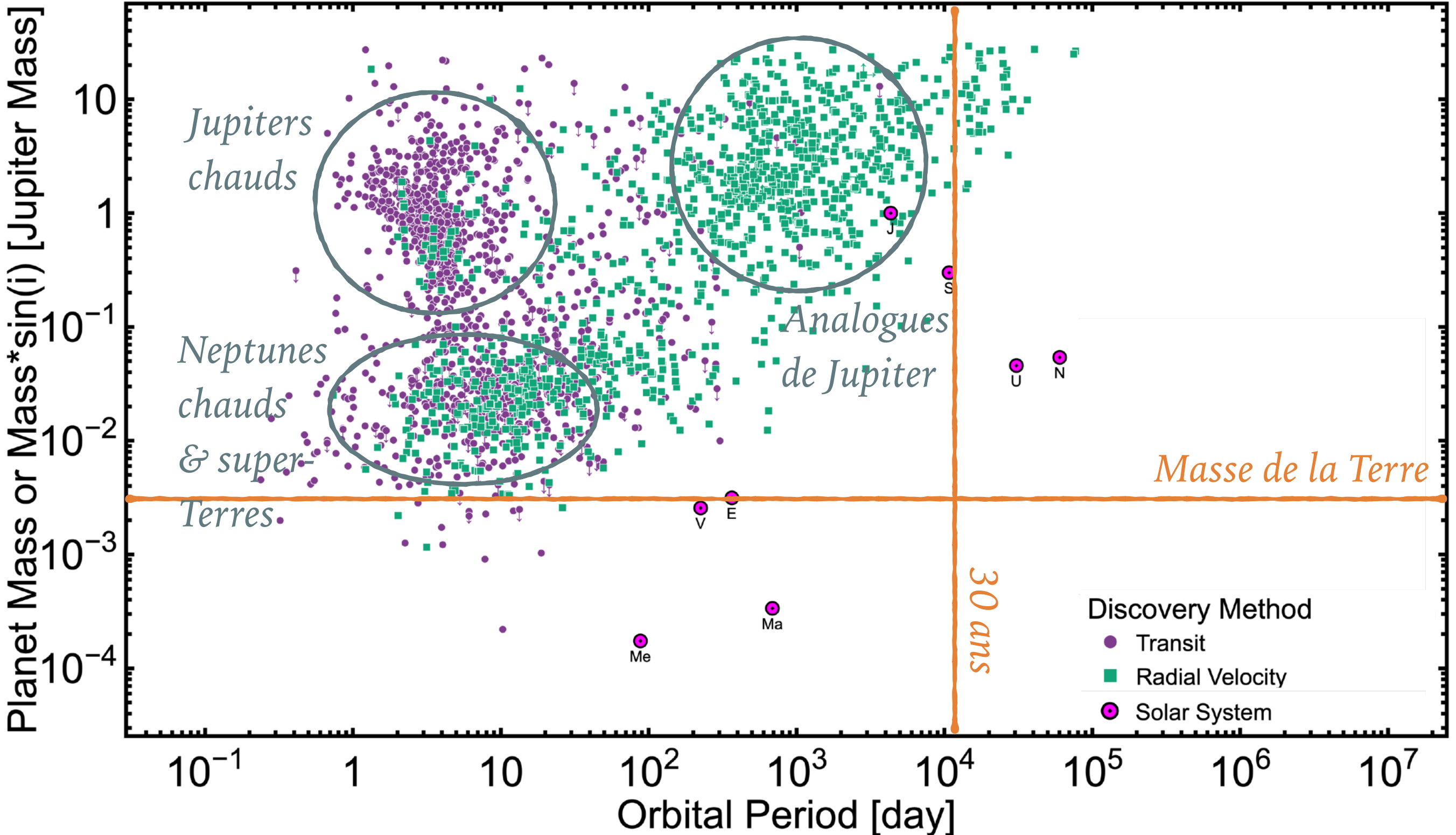
TRANSITS PHOTOMÉTRIQUES: UNE AUTRE MÉTHODE **INDIRECTE**

Alysa Obertas (@AstroAlysa)

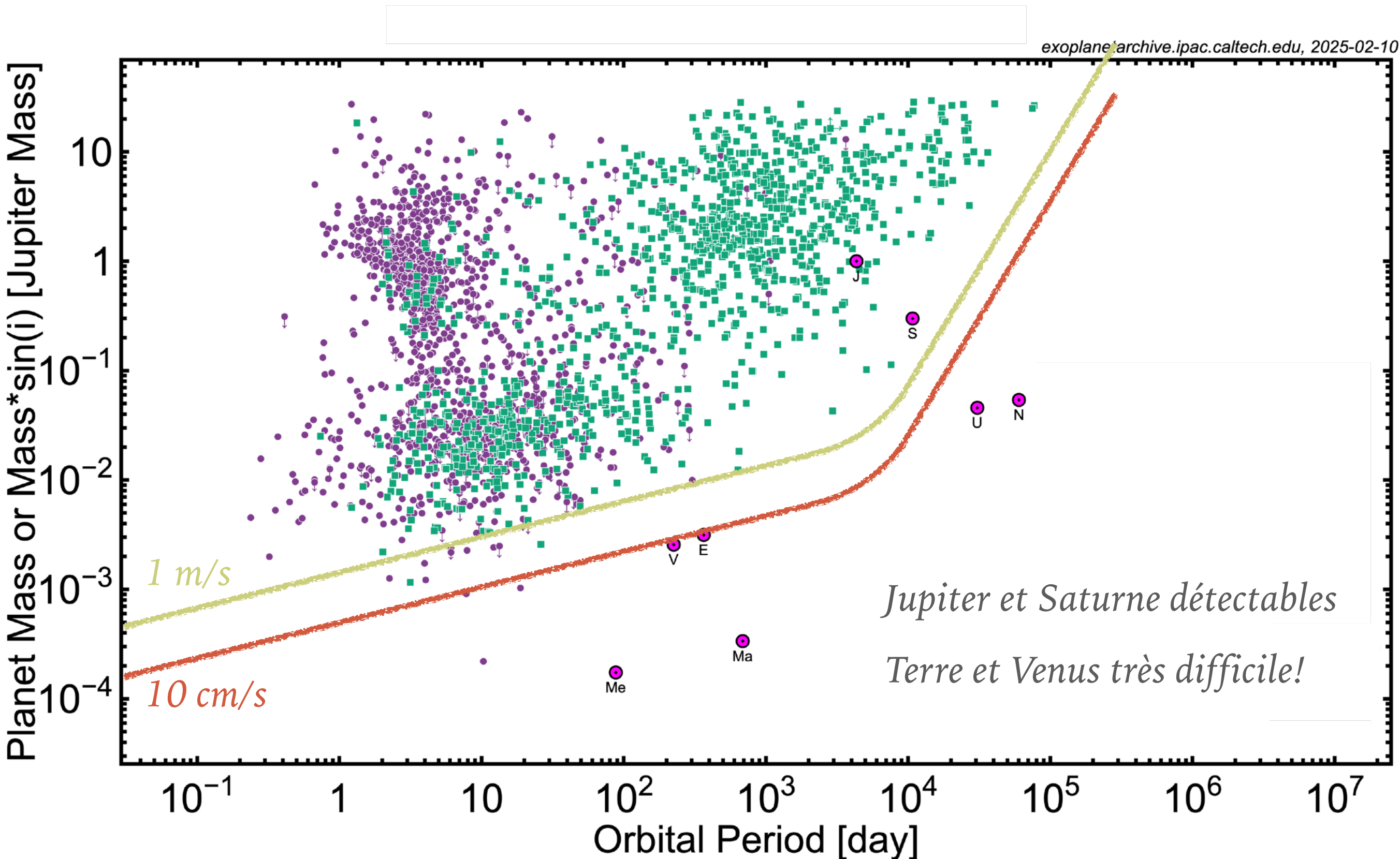


POPULATIONS DÉTECTÉES PAR VITESSES RADIALES ET TRANSITS

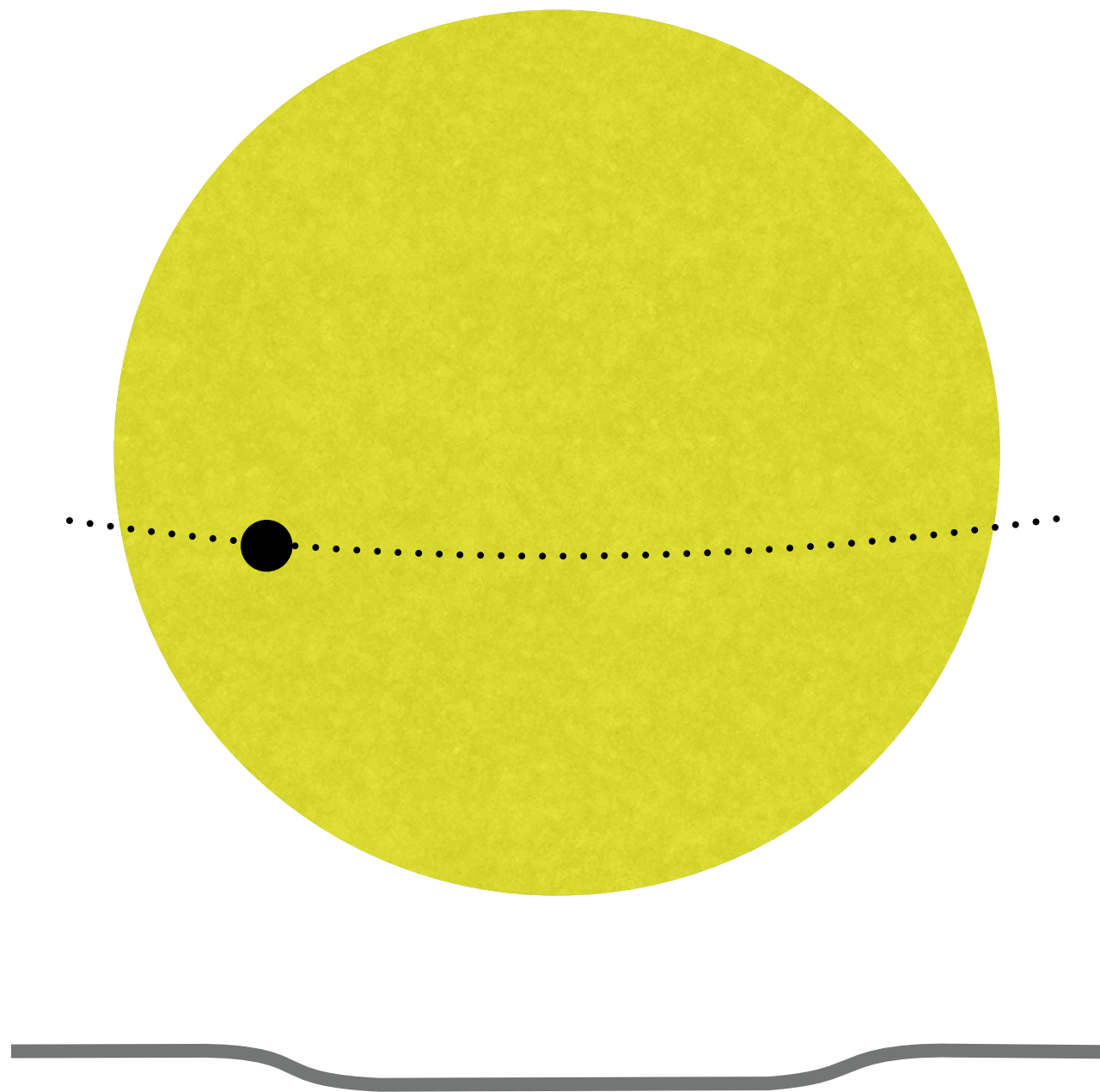
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-02-10



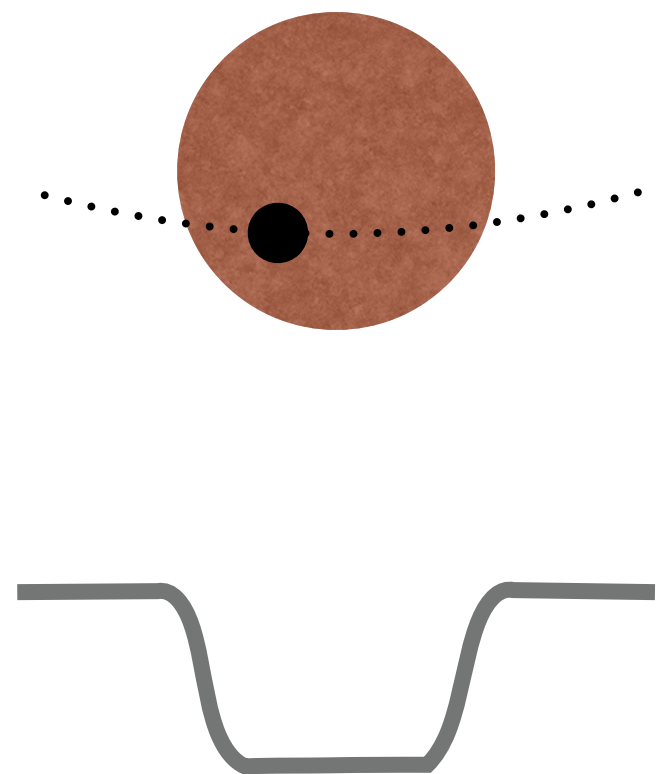
LIMITE DE DÉTECTION DES VITESSES RADIALES



LIMITE DE DÉTECTION DES TRANSITS



Transit long et peu profond



Transit court et profond

TRAPPIST-1: SEPT PLANÈTES DE LA TAILLE DE LA TERRE!

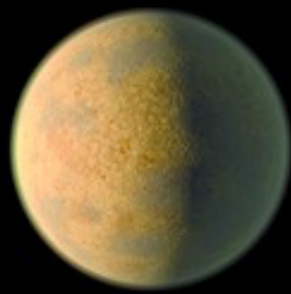
.....

TRAPPIST-1

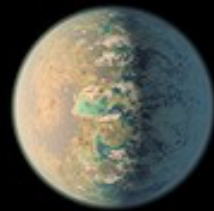
Une avancée majeure dans la quête de vie ailleurs dans l'Univers



TRAPPIST-1 **b**



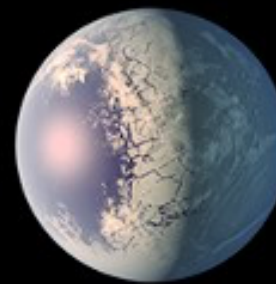
TRAPPIST-1 **c**



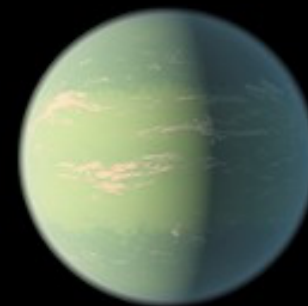
TRAPPIST-1 **d**



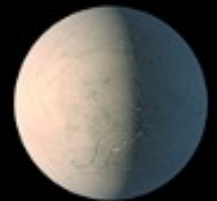
TRAPPIST-1 **e**



TRAPPIST-1 **f**



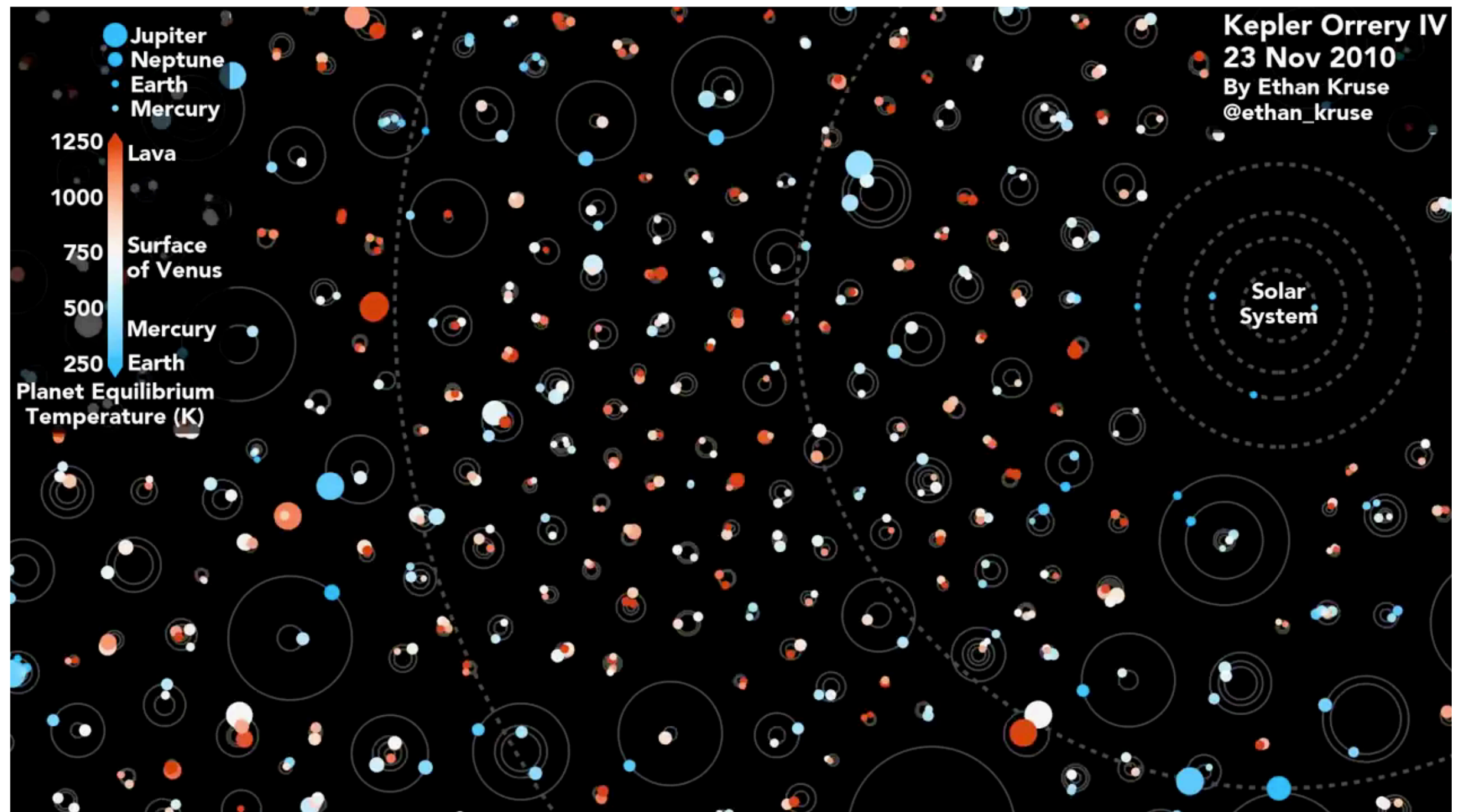
TRAPPIST-1 **g**



TRAPPIST-1 **h**

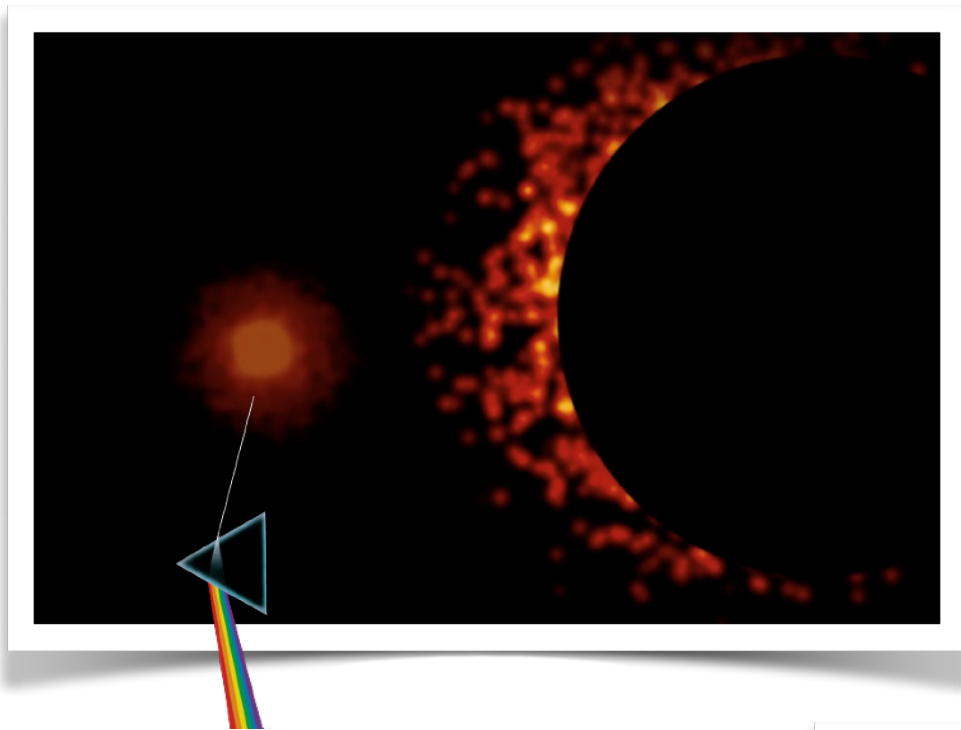
Crédit : NASA/JPL-Caltech/R. Hurt/T. Pyle

INFORMATION APPORTÉE: ORBITES, MASSES, TAILLES

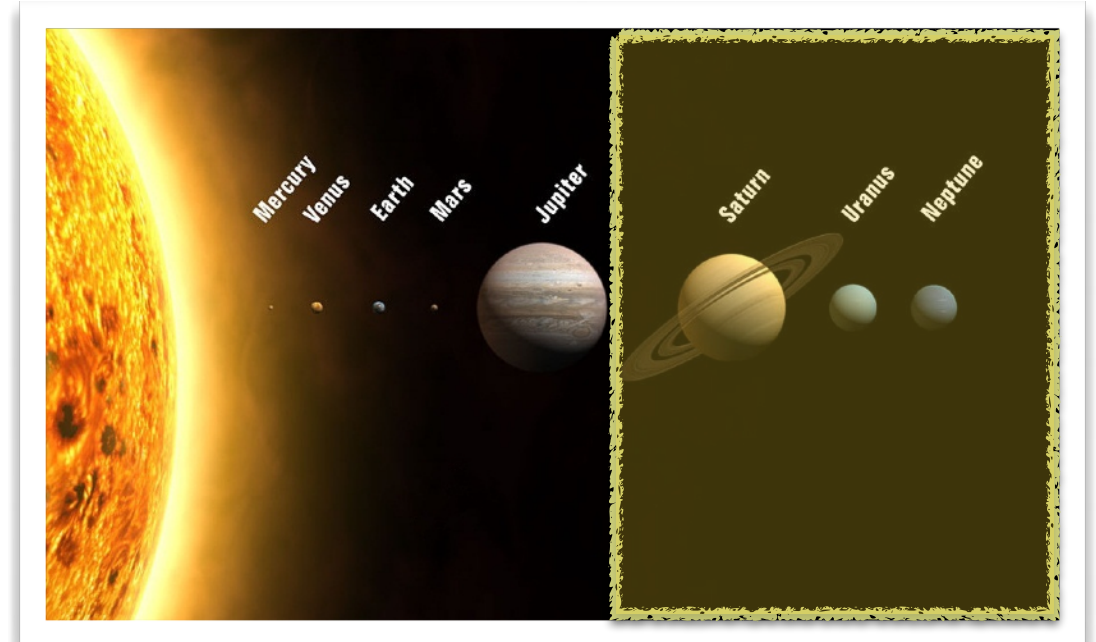


L'IMAGERIE **DIRECTE** EST LA CLÉ POUR EN SAVOIR PLUS

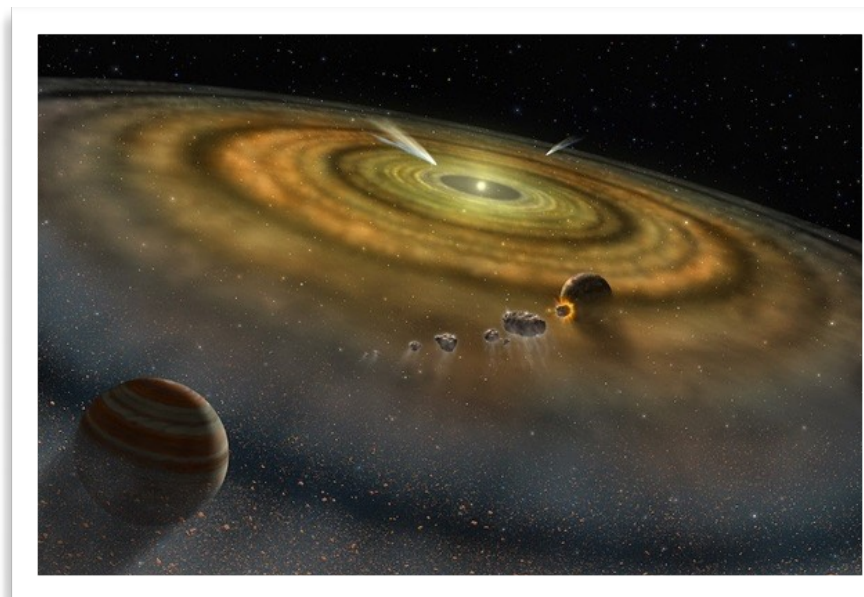
- Accès à l'information essentielle: la lumière de la planète



*mesure du spectre
—> composition chimique*



*étudier les parties
externes des systèmes
planétaires*



étudier la formation et l'évolution des planètes

L'IMAGERIE DIRECTE: UN DÉFI MAJEUR!

.....

Rapport de flux énorme, et séparation angulaire très petite



... comme détecter une luciole près d'un phare à 1000 km

(sauf que l'étoile ne s'éteint jamais)

OBSERVATIONS À TRAVERS L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

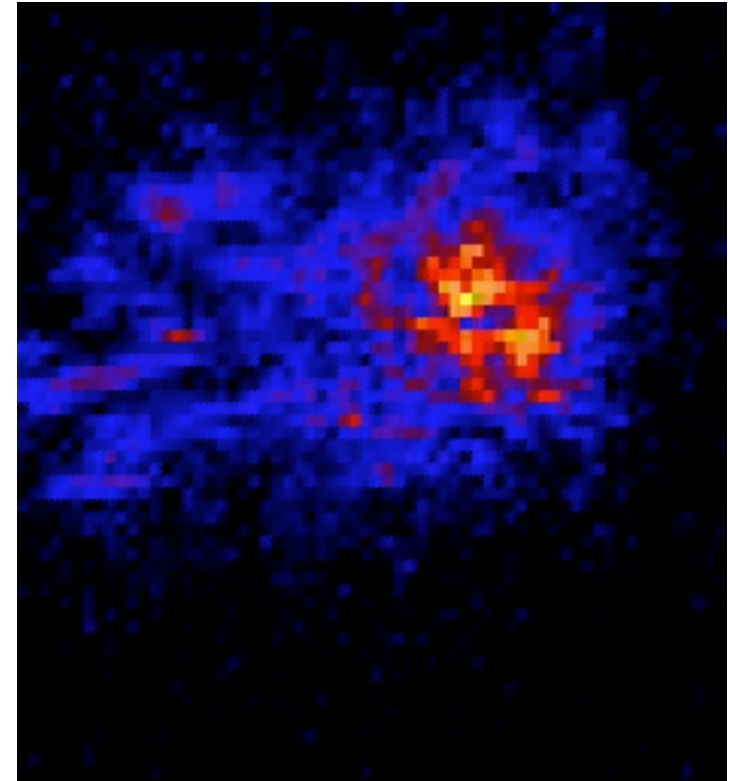
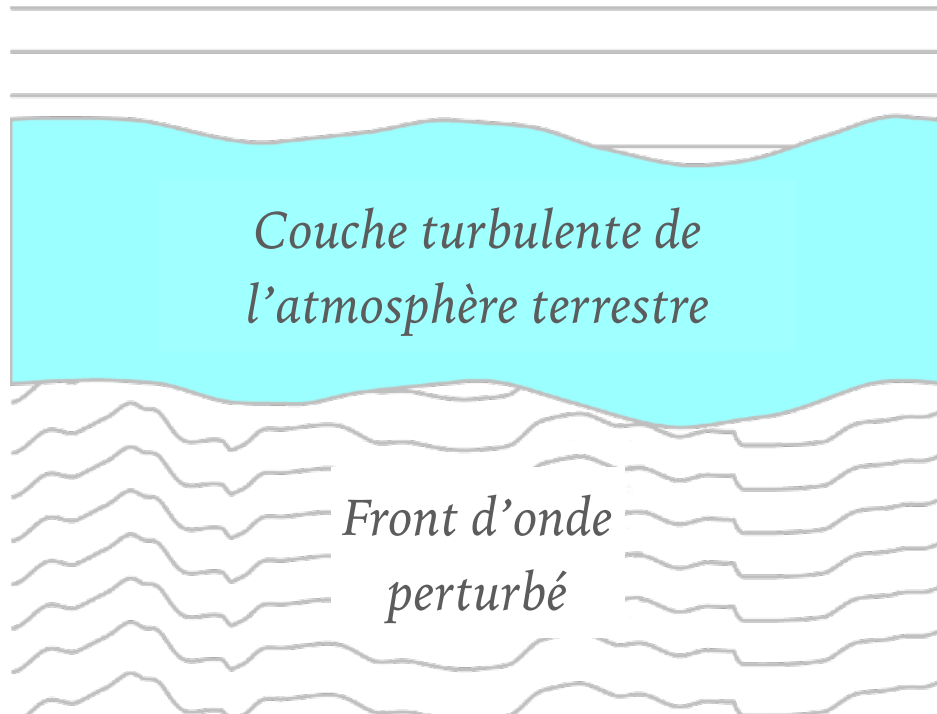
.....



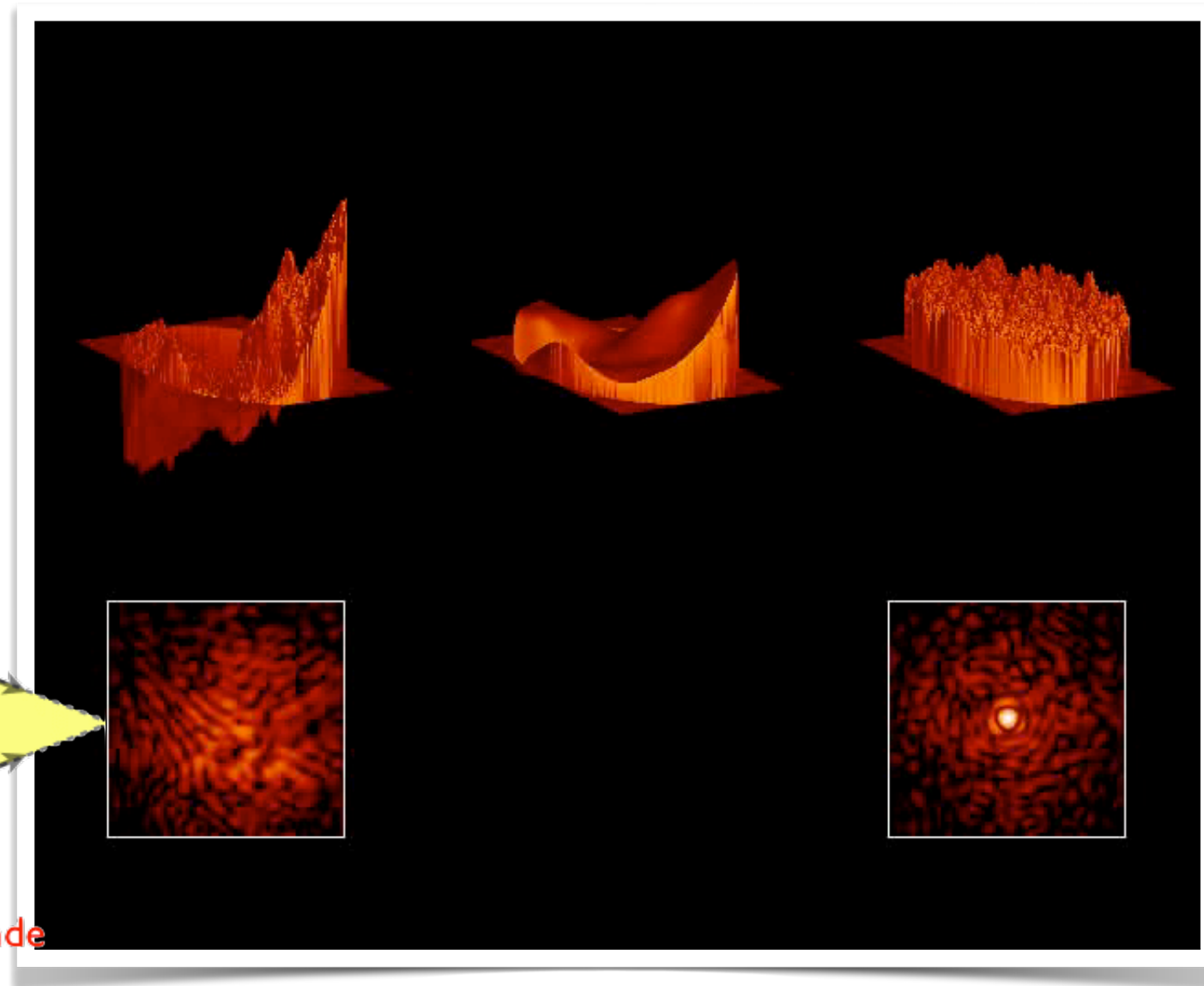
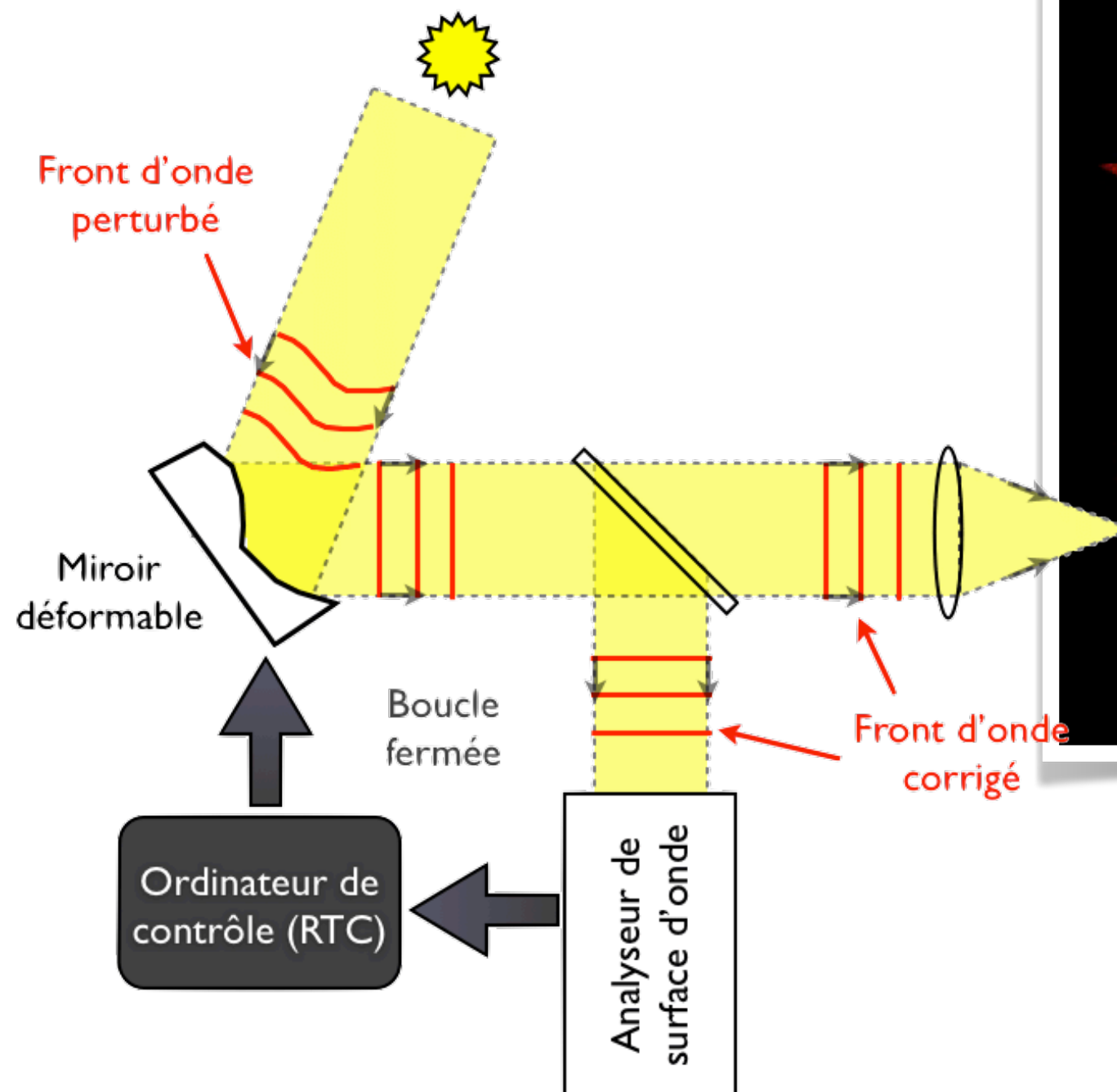
OBSERVATIONS À TRAVERS L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

.....

Ondes planes d'une source lointaine



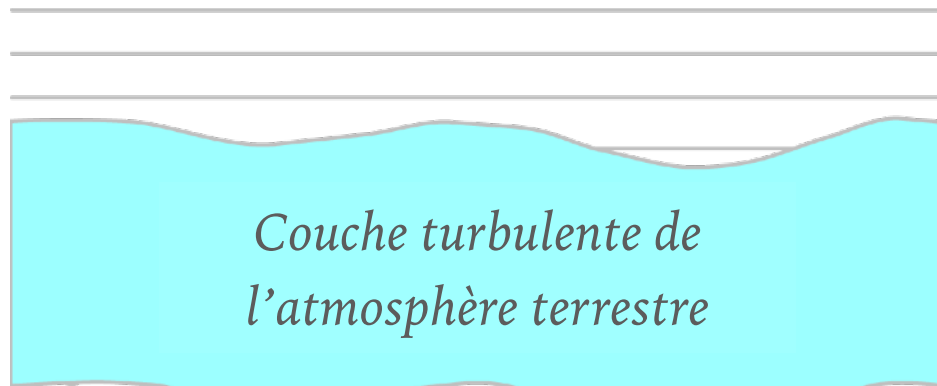
ETAPE 1: CORRIGER LA TURBULENCE



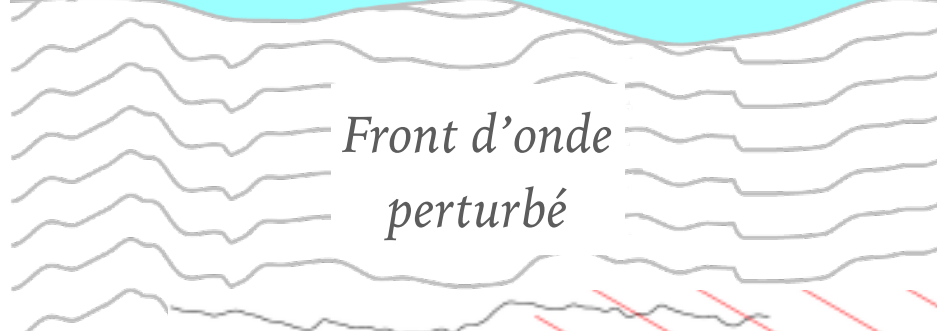
CORRECTION PAR OPTIQUE ADAPTATIVE

.....

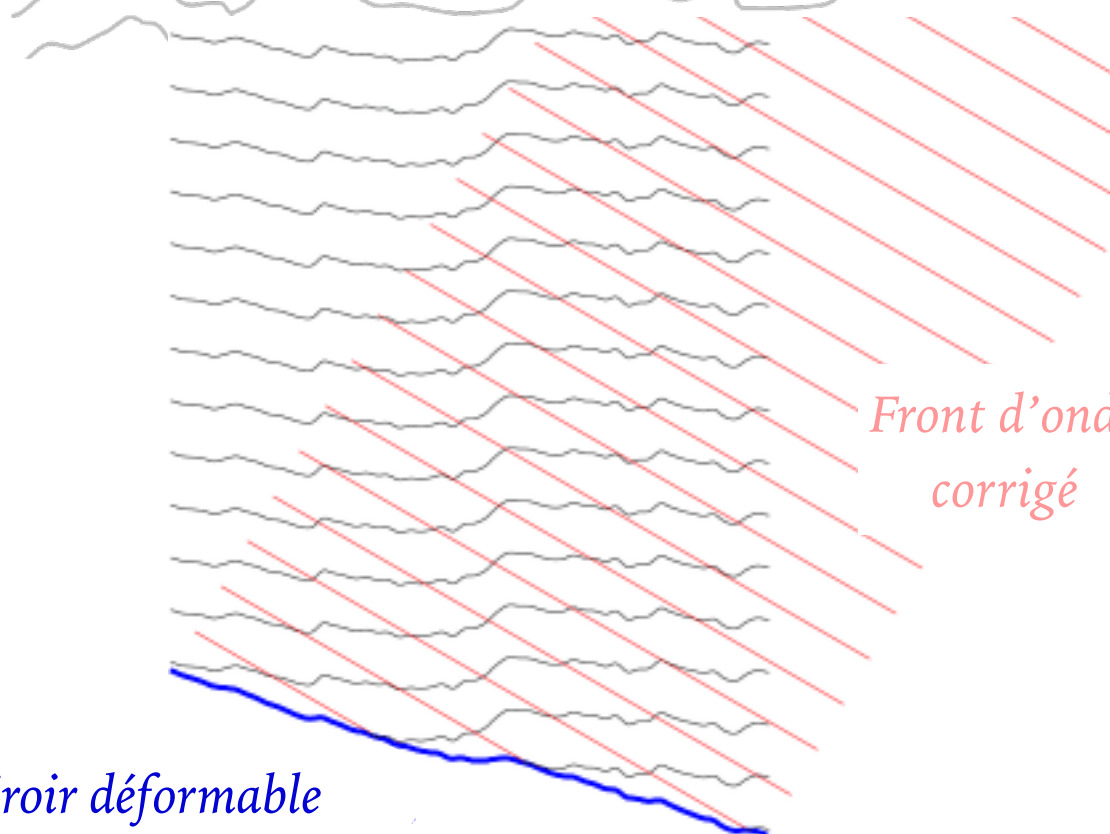
Ondes planes d'une source lointaine



*Couche turbulente de
l'atmosphère terrestre*

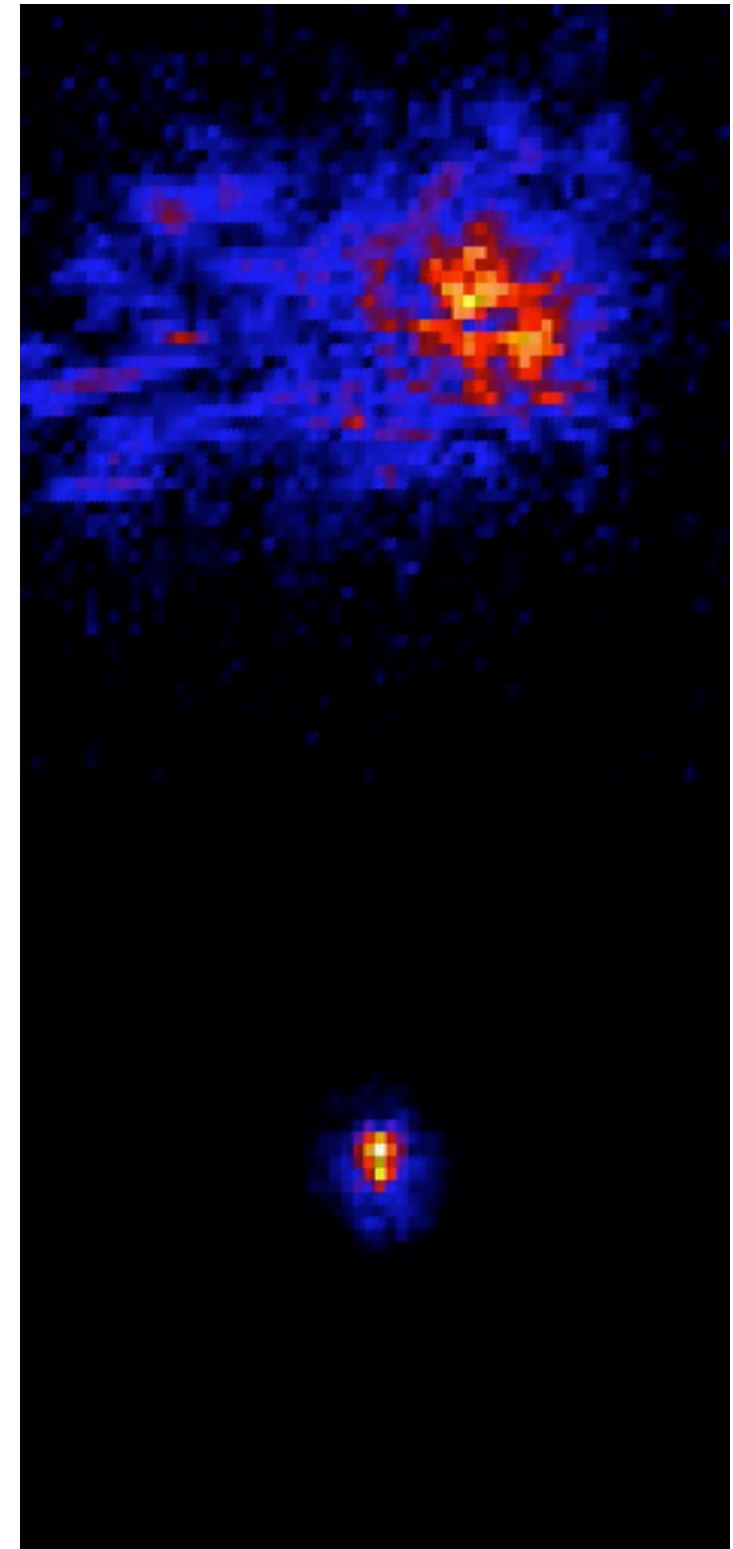


*Front d'onde
perturbé*



*Front d'onde
corrigé*

Miroir déformable



ETAPE 2: ÉTEINDRE L'ÉTOILE (ARTIFICIELLEMENT)

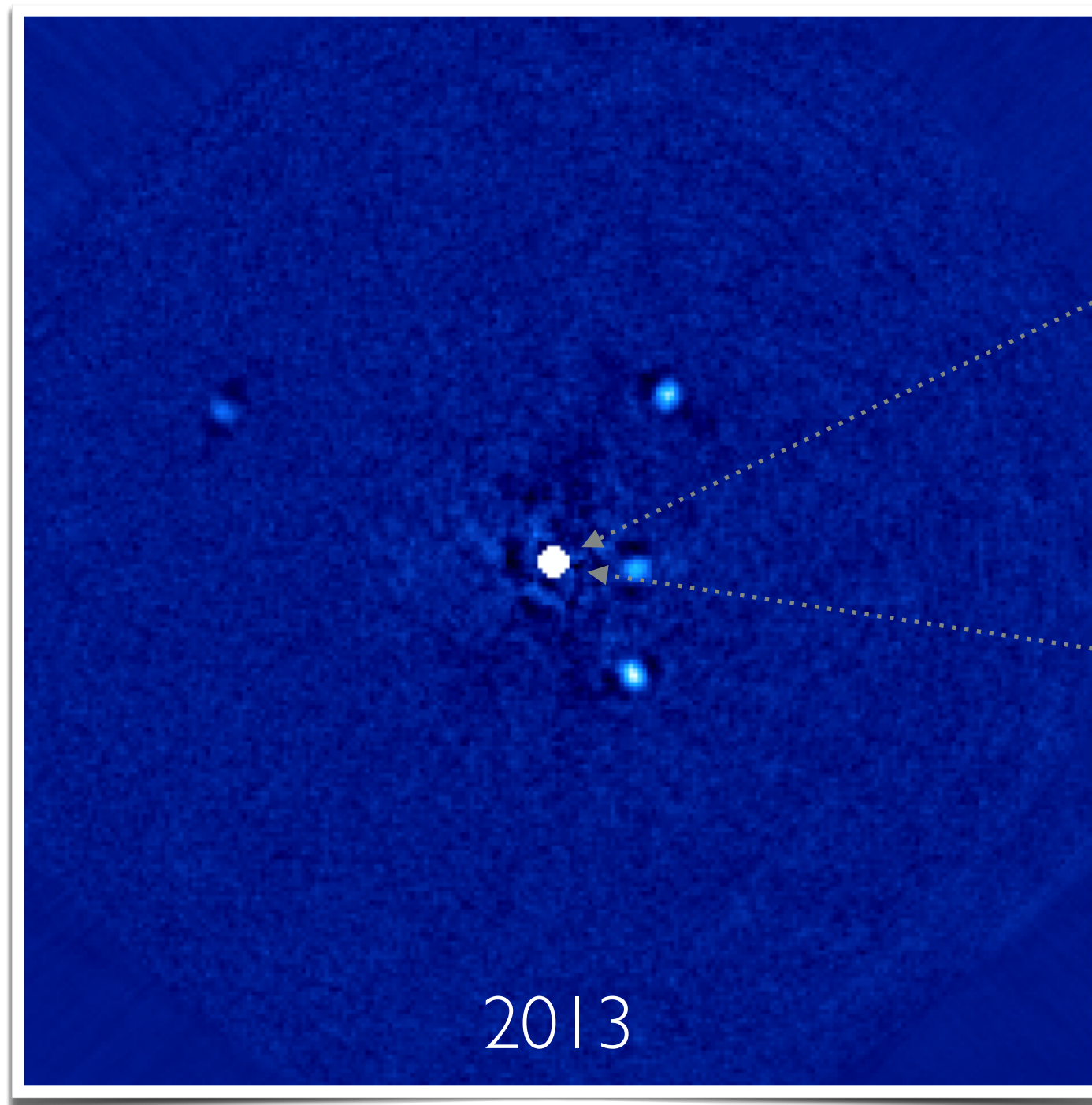
.....



Bernard Lyot, 1934
— invention du coronographe —

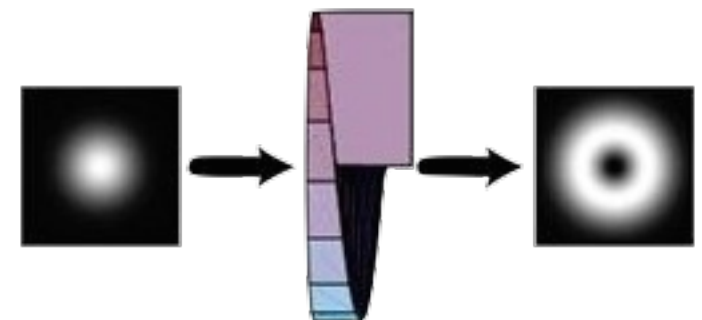
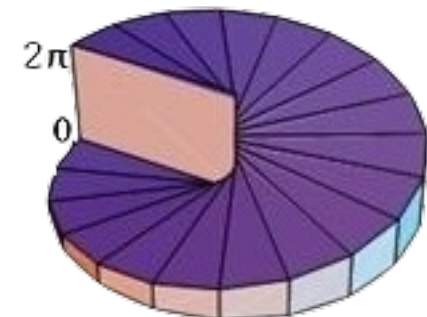


LA CORONOGRAPHIE STELLAIRE



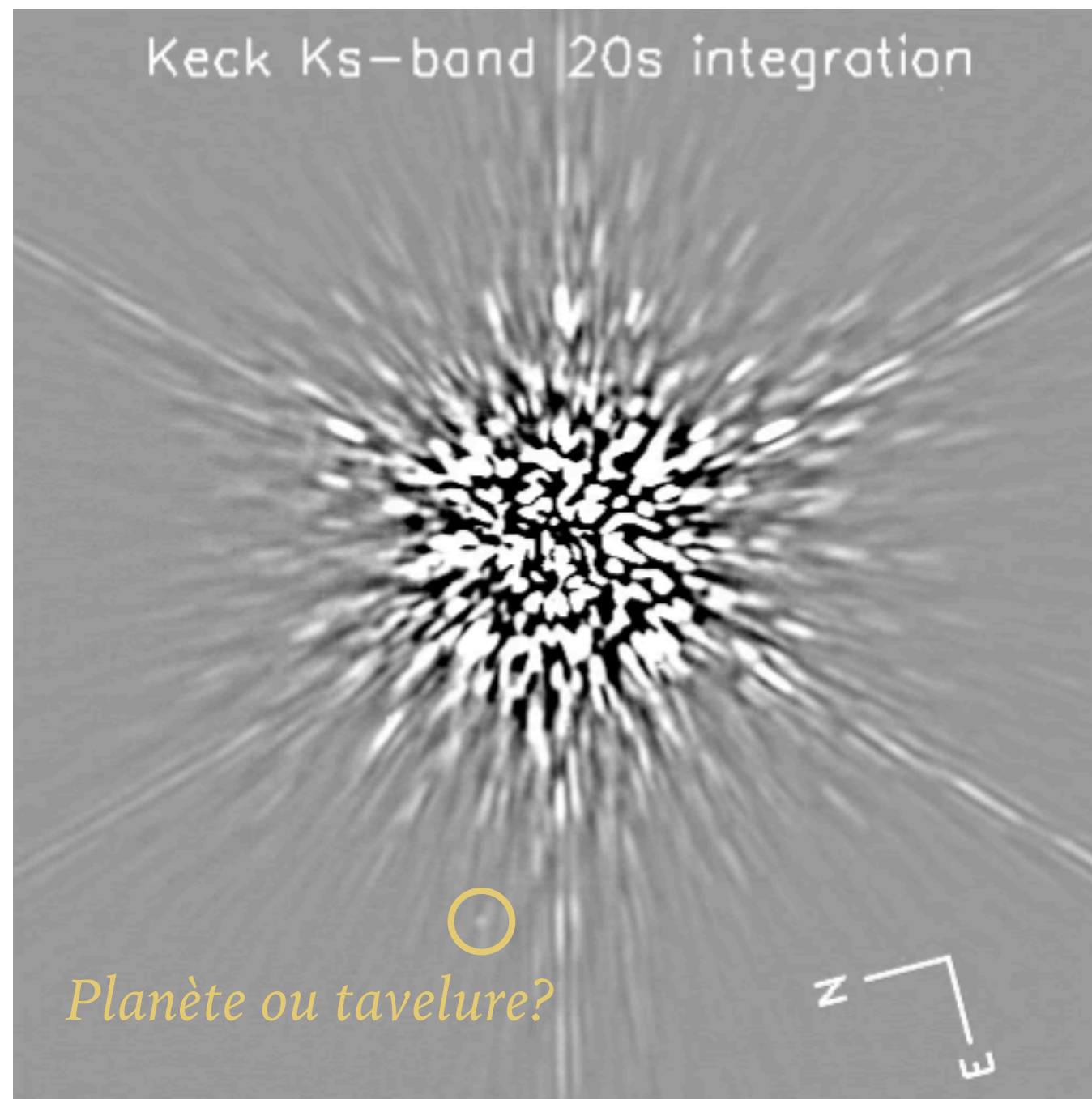
*Petit masque
opaque*

*Coronographe
'vortex'*



UNE AIGUILLE DANS UNE BOTTE DE TAVELURES...

.....



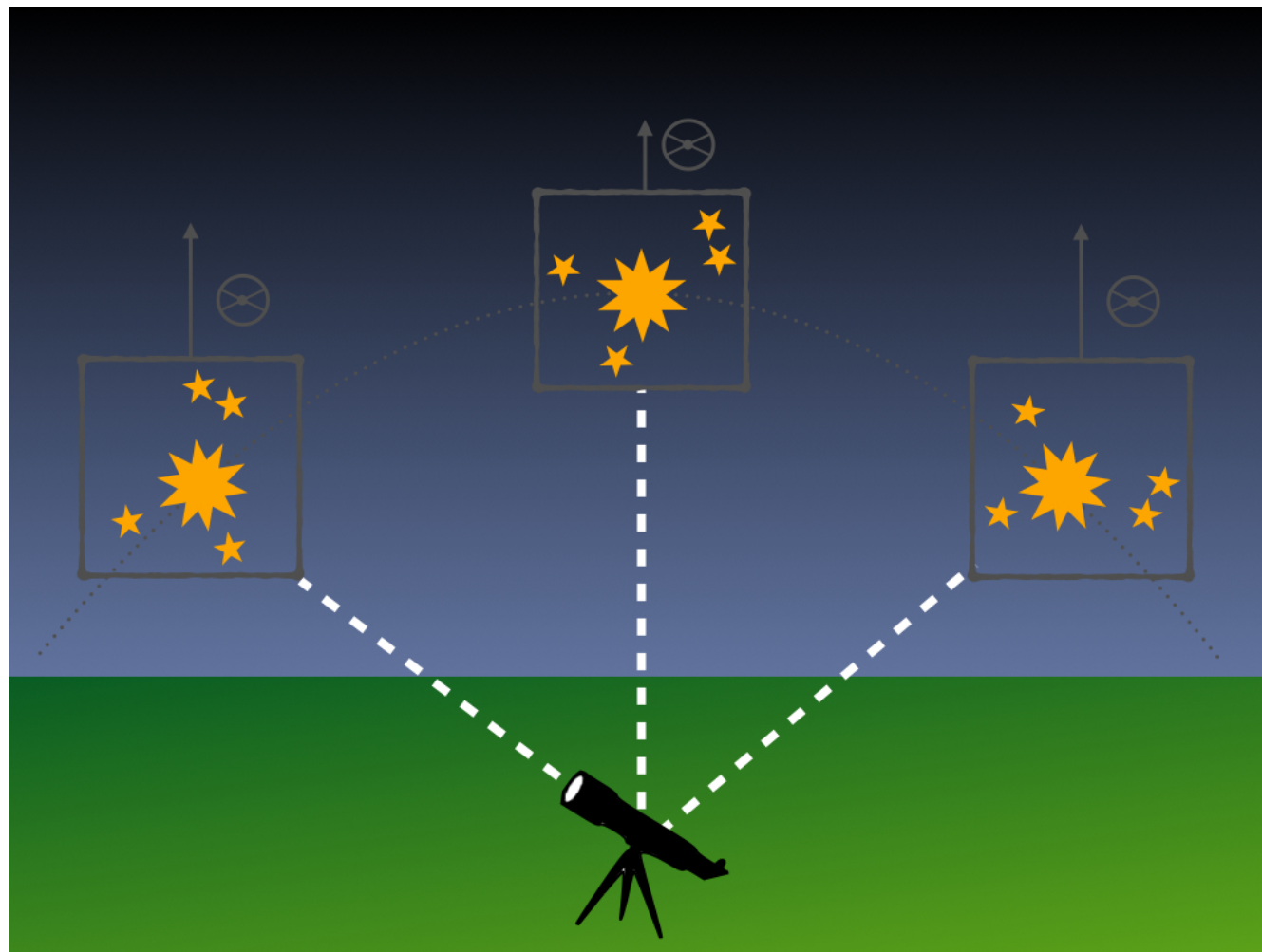
ETAPE 3: LA ROTATION DU CHAMP COMME RÉVÉLATEUR

Le ciel semble tourner au-dessus de nos têtes

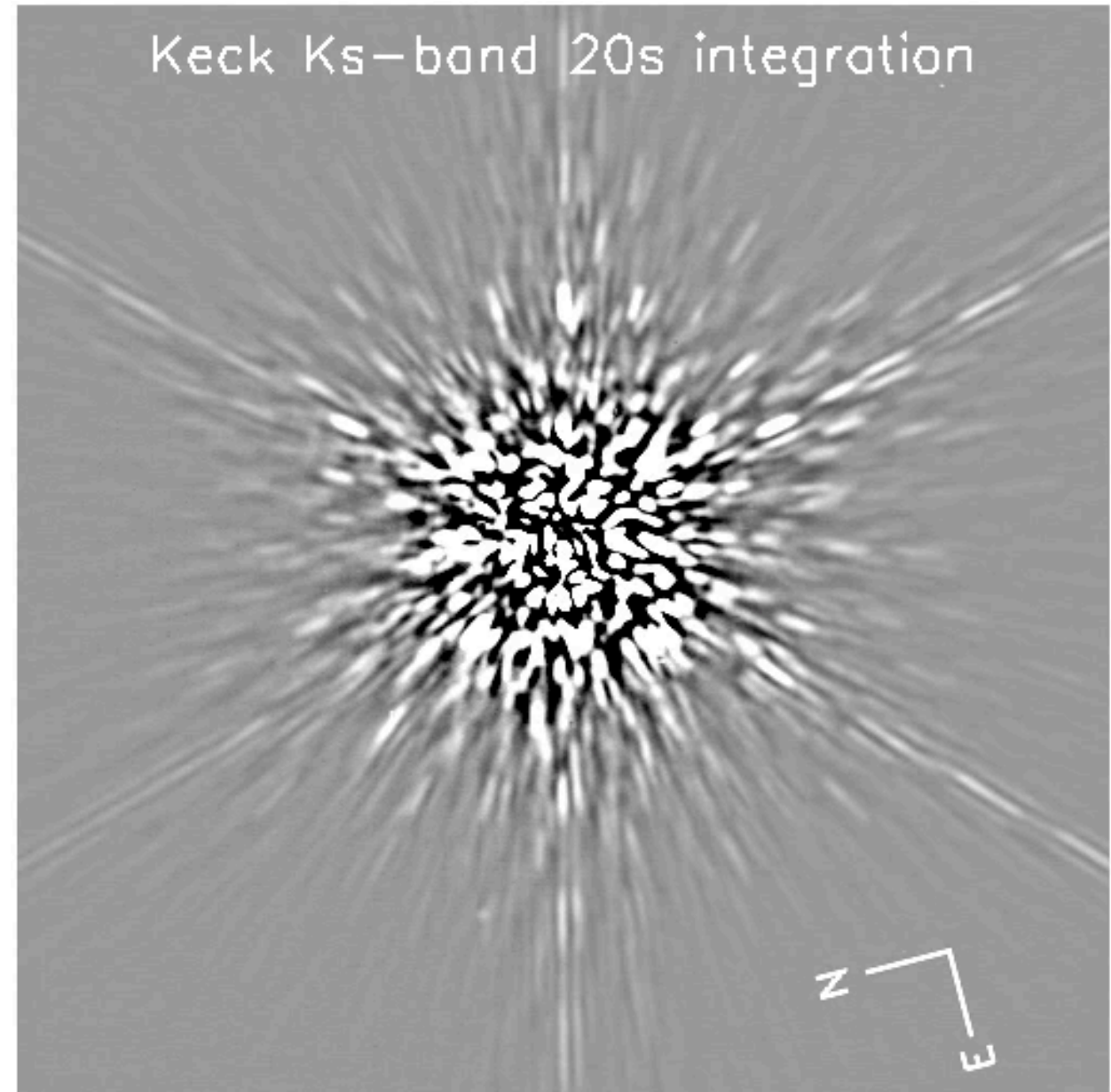


LA ROTATION DU CHAMP COMME RÉVÉLATEUR

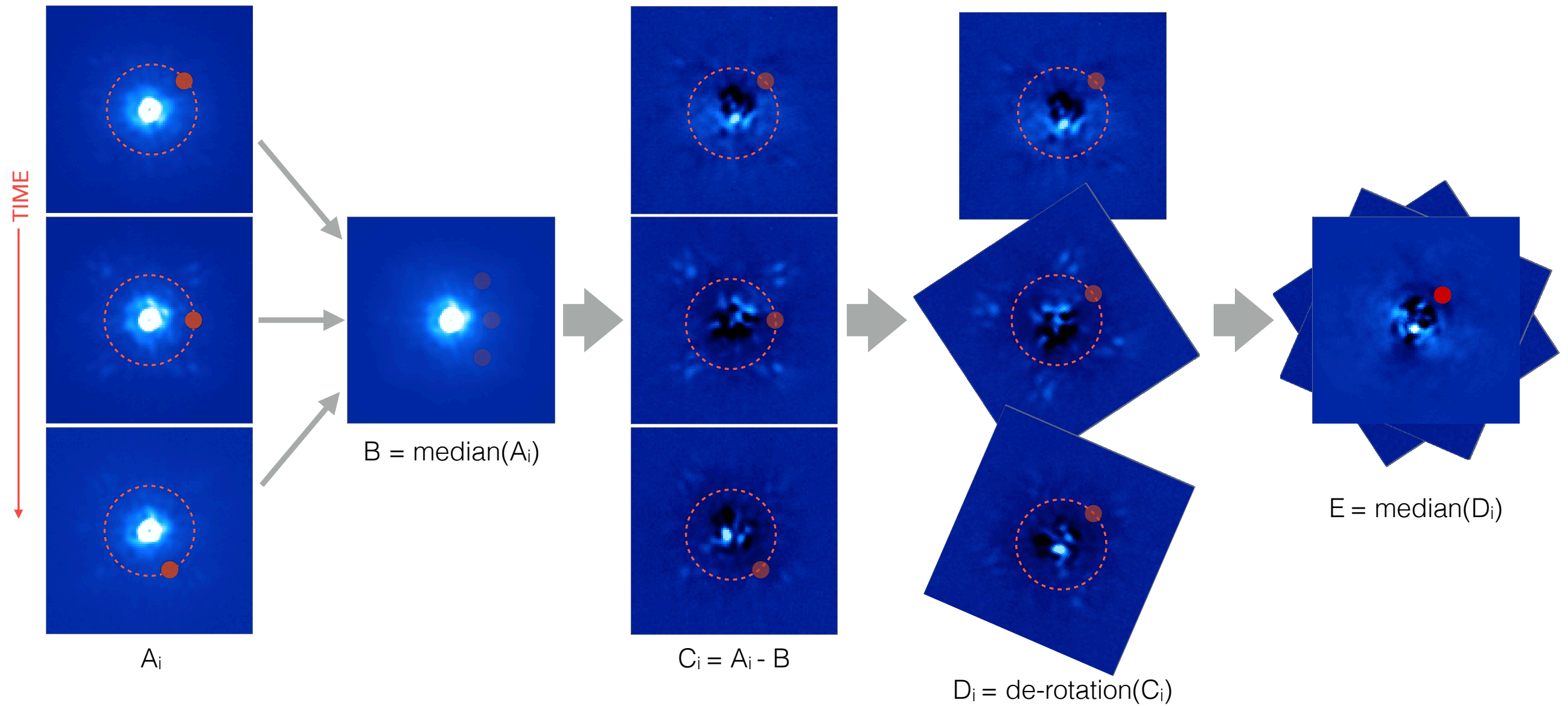
Le ciel semble tourner au-dessus de nos têtes



... et si on ne compensait pas cette rotation?



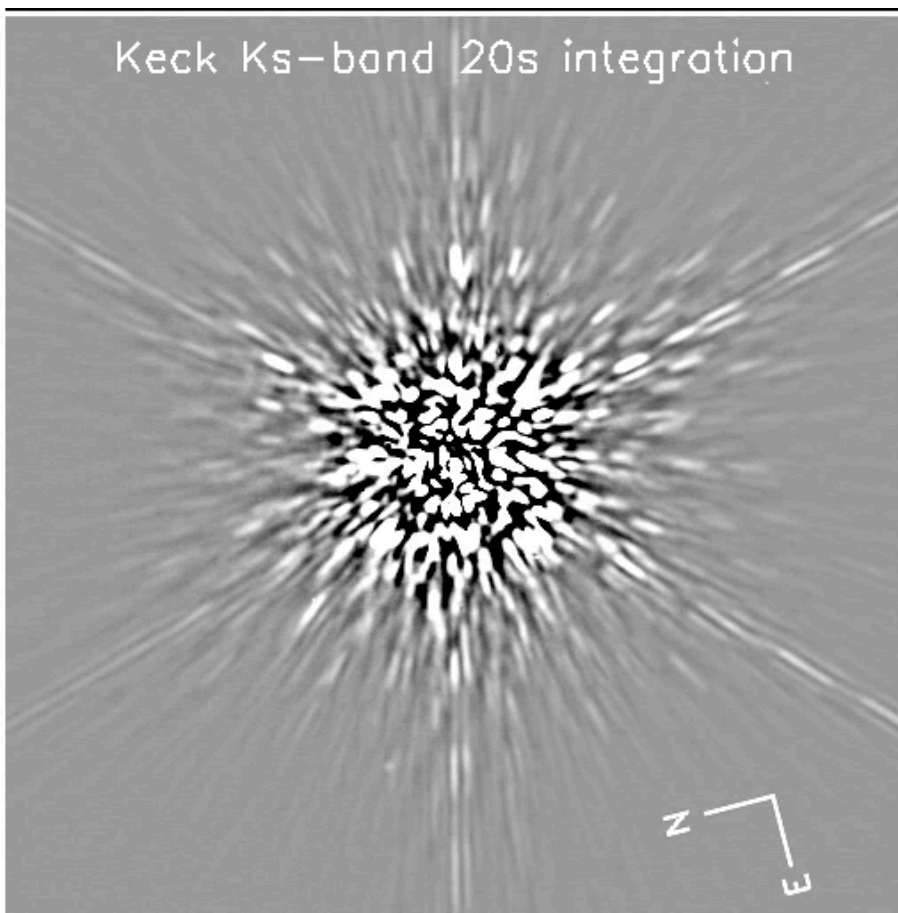
ETAPE 4: TRAITEMENT D'IMAGE



LE TRAITEMENT D'IMAGE EN ACTION

Données brutes

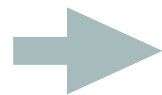
Keck Ks-band 20s integration



LE TRAITEMENT D'IMAGE EN ACTION

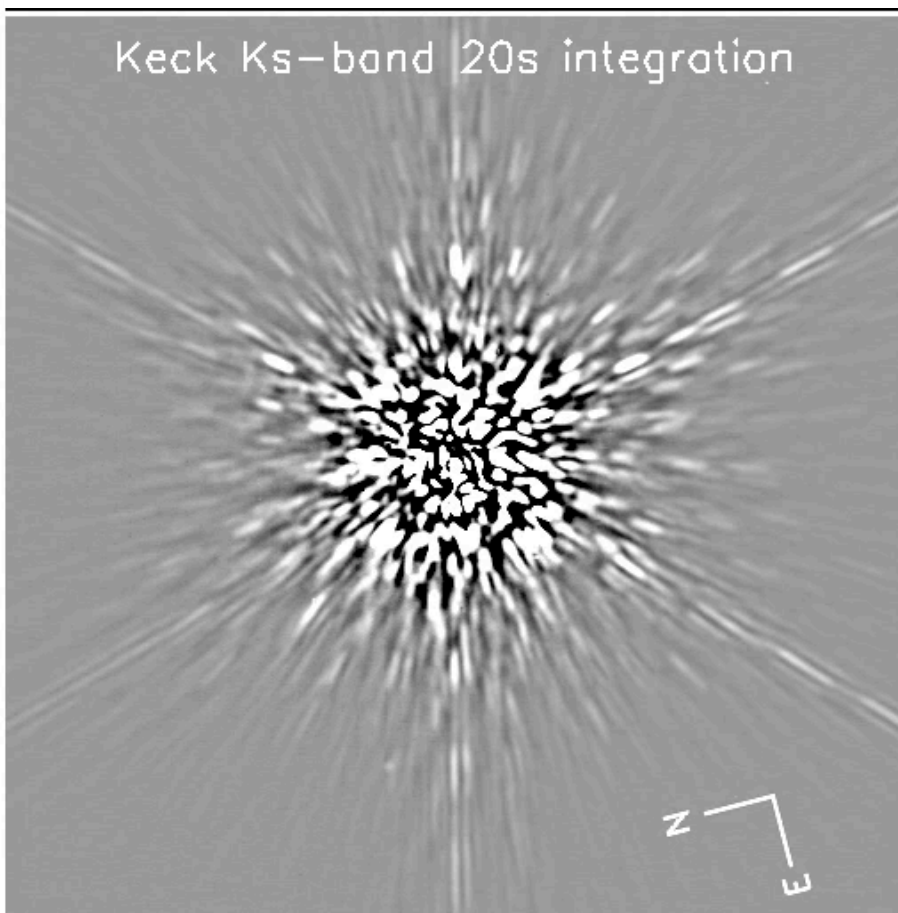
.....

Données brutes

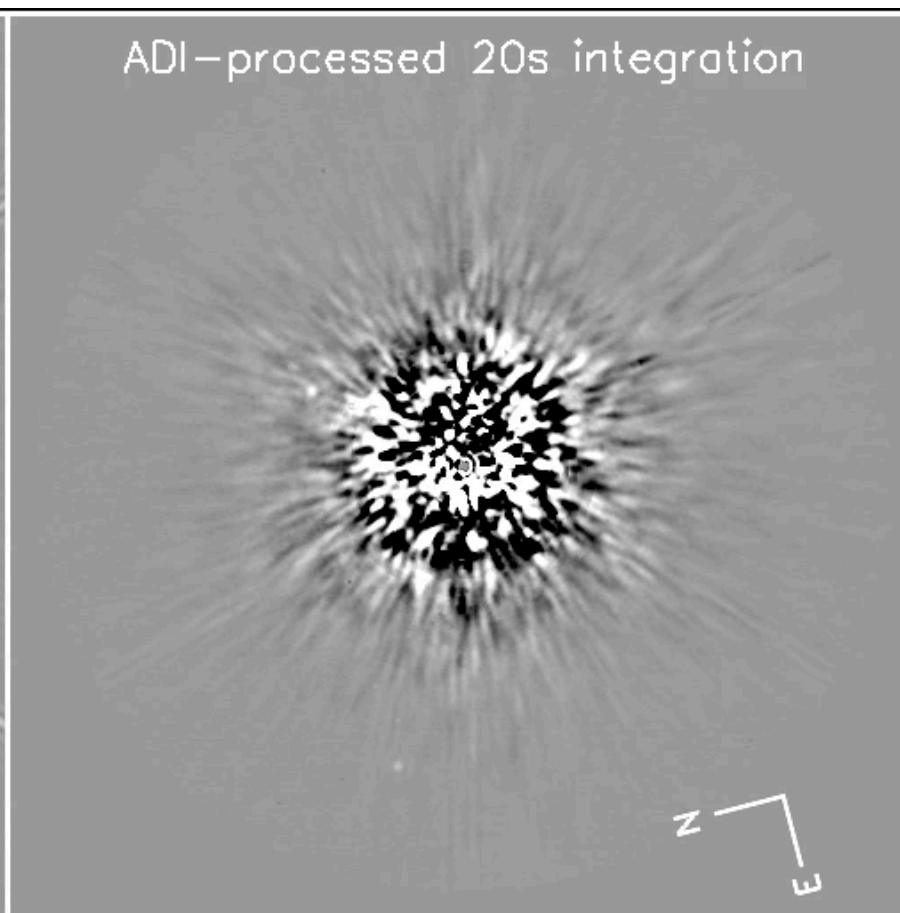


Soustraction de médiane

Keck Ks-band 20s integration



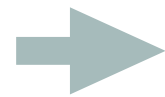
ADI-processed 20s integration



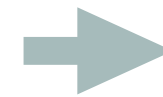
LE TRAITEMENT D'IMAGE EN ACTION

.....

Données brutes

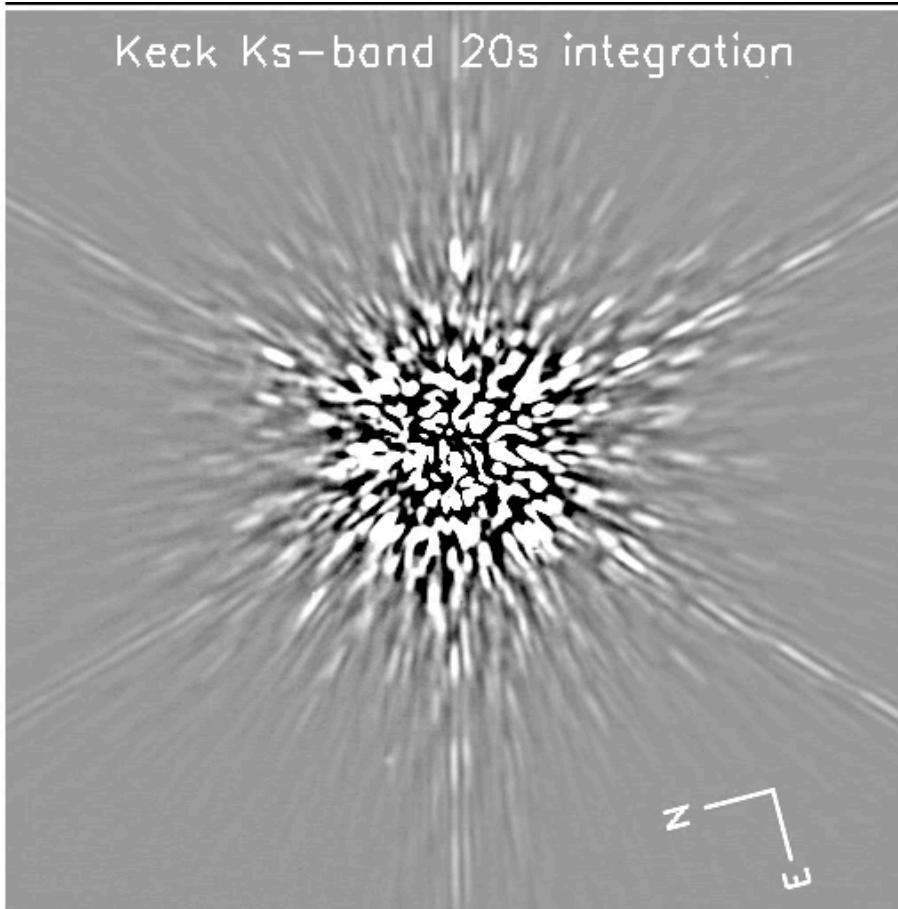


Soustraction de médiane

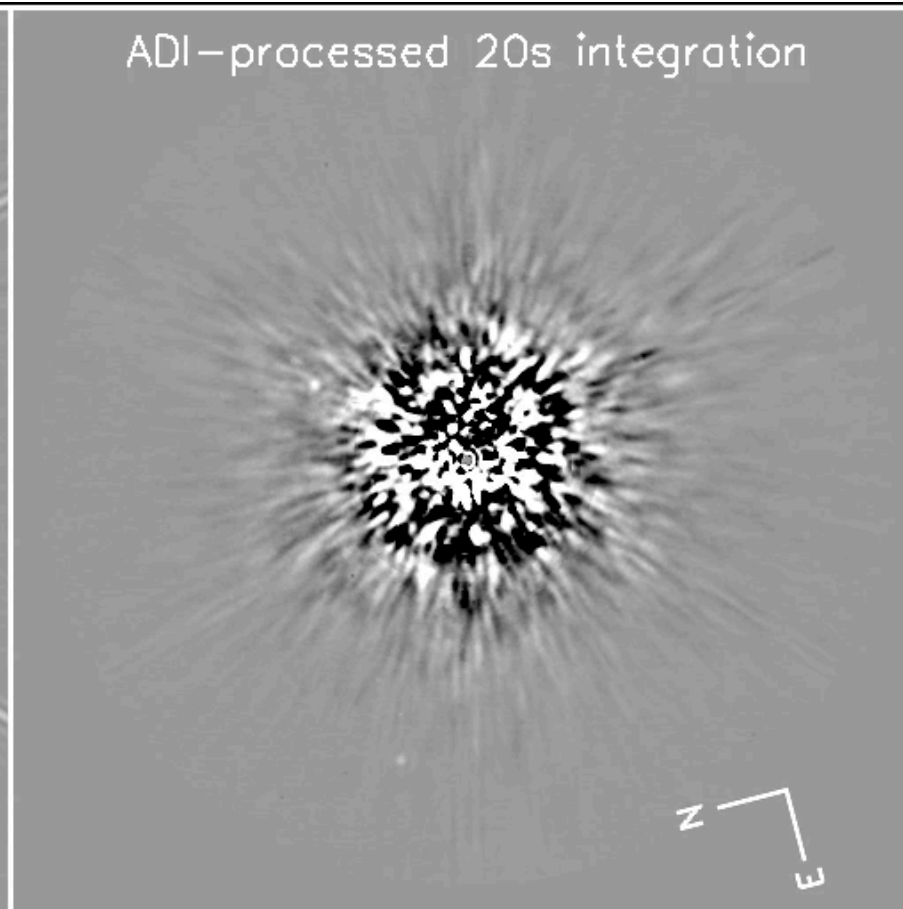


Dérotation + combinaison

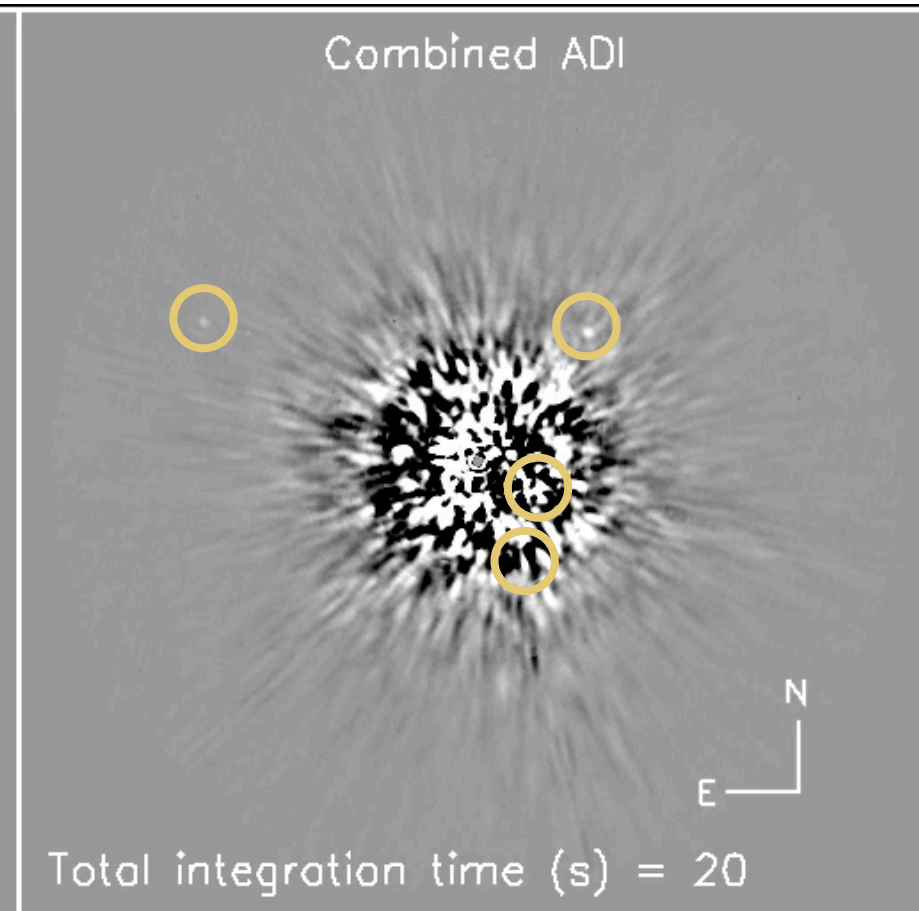
Keck Ks-band 20s integration



ADI-processed 20s integration

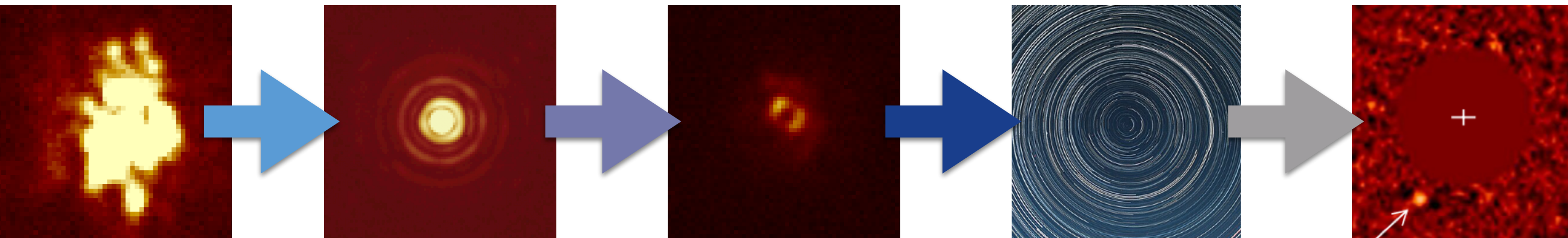


Combined ADI



LES QUATRE PILIERS DE L'IMAGERIE DIRECTE

.....



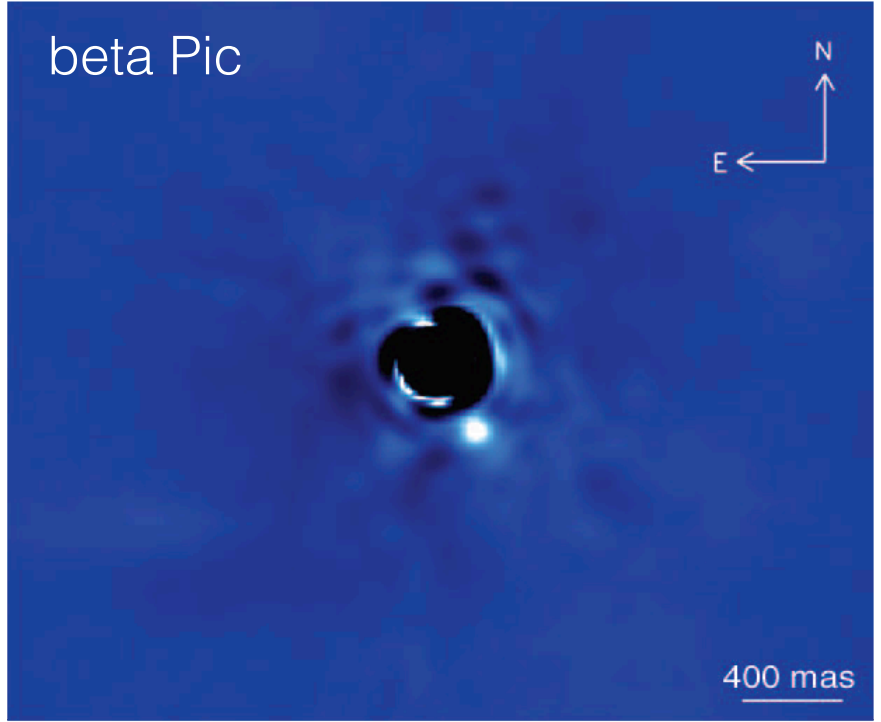
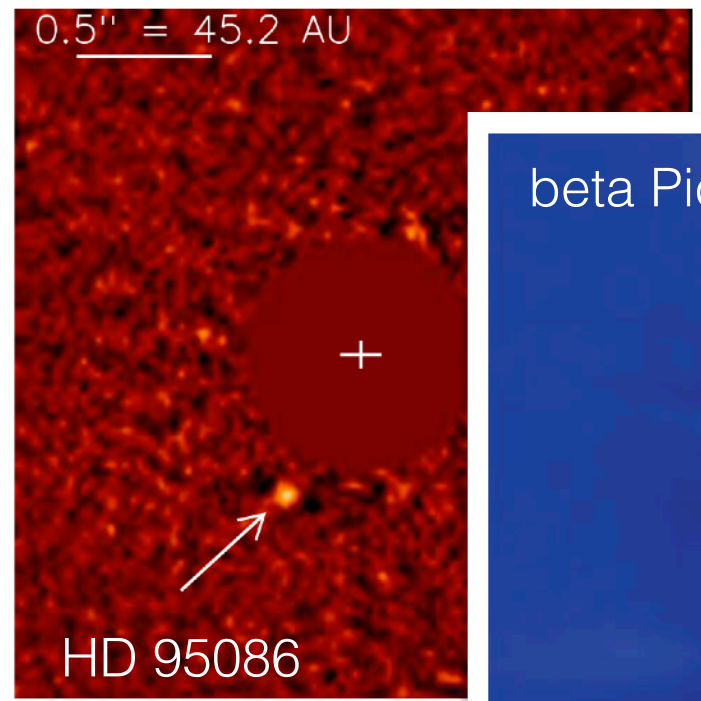
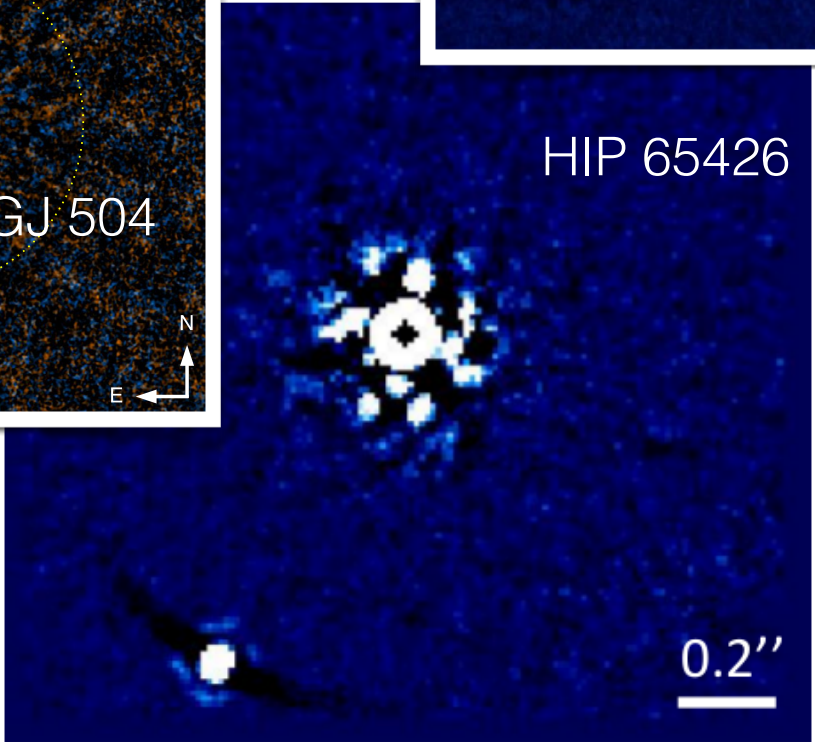
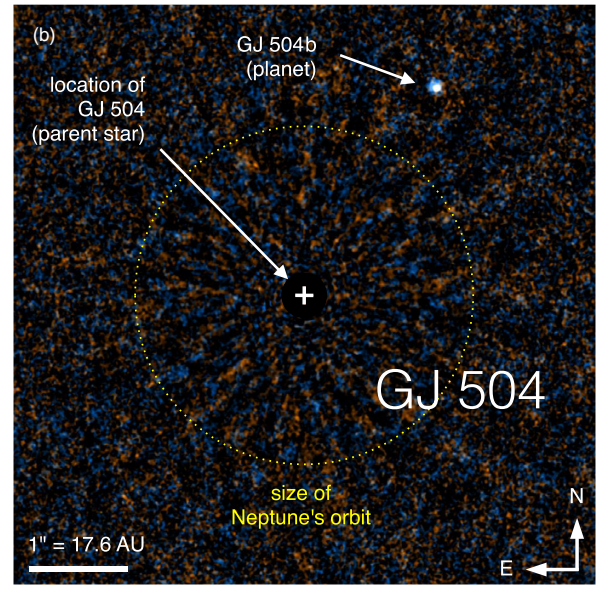
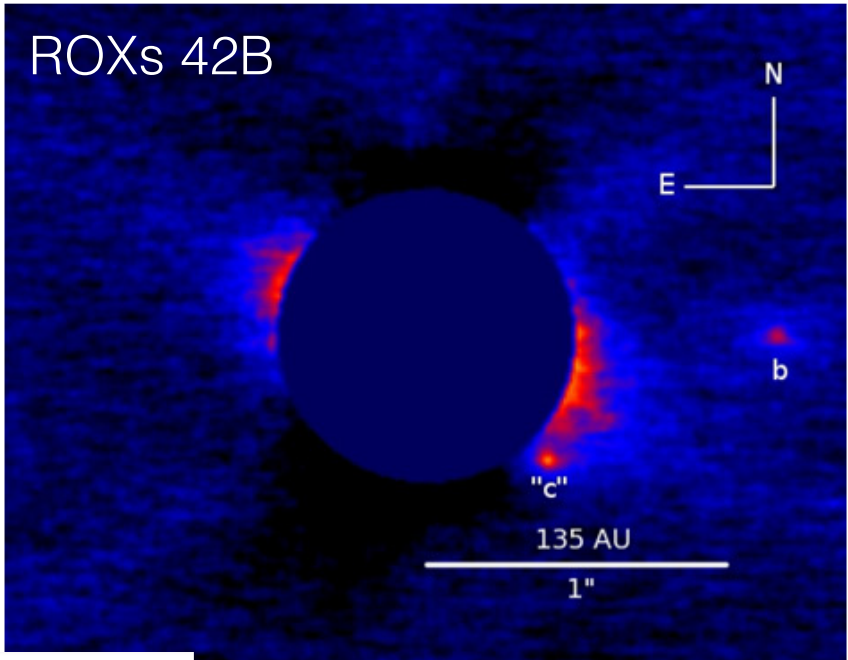
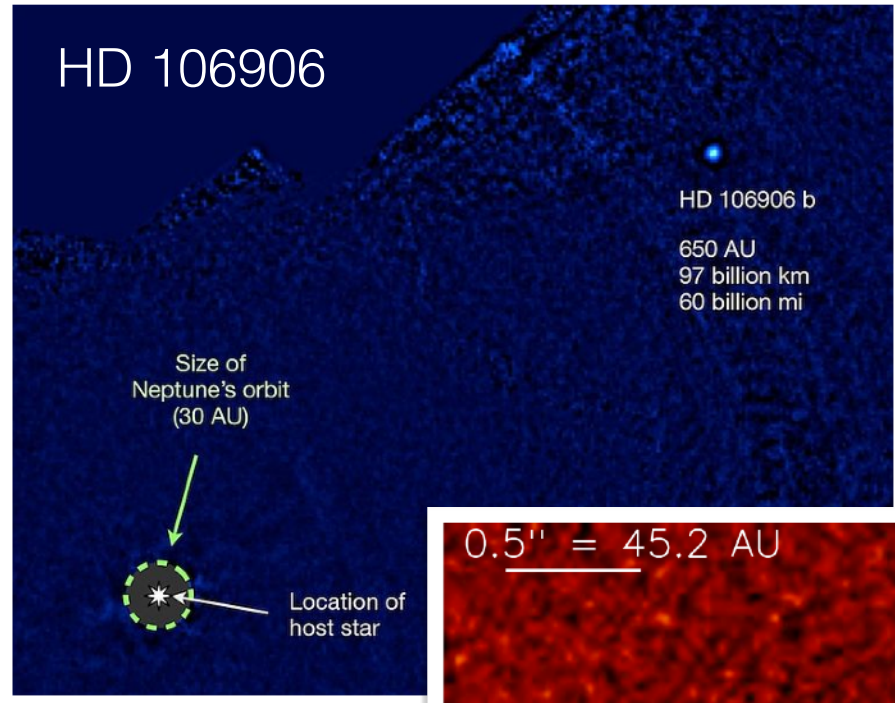
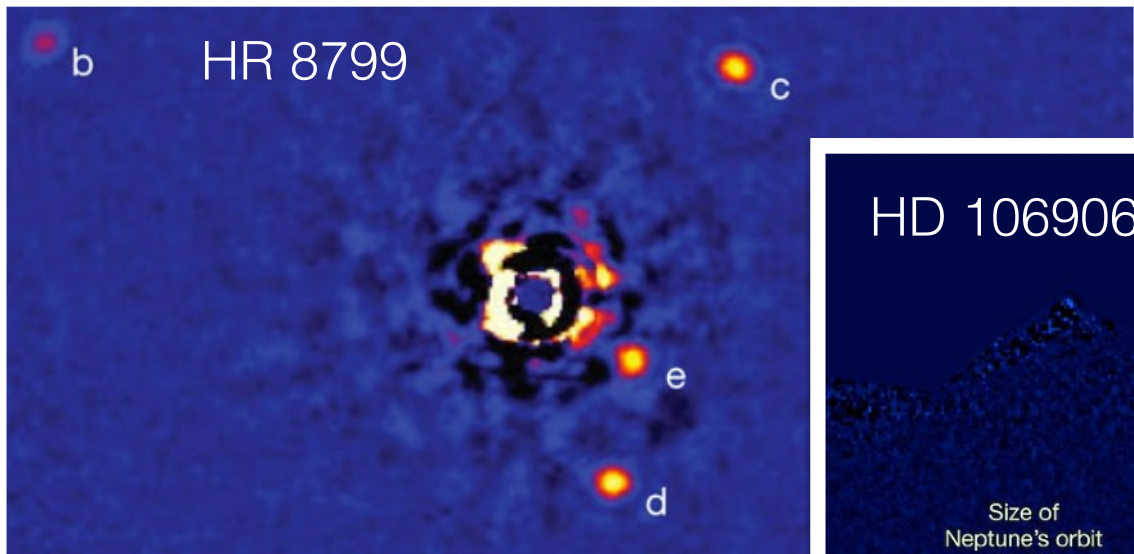
Optique adaptative

Coronagraphie

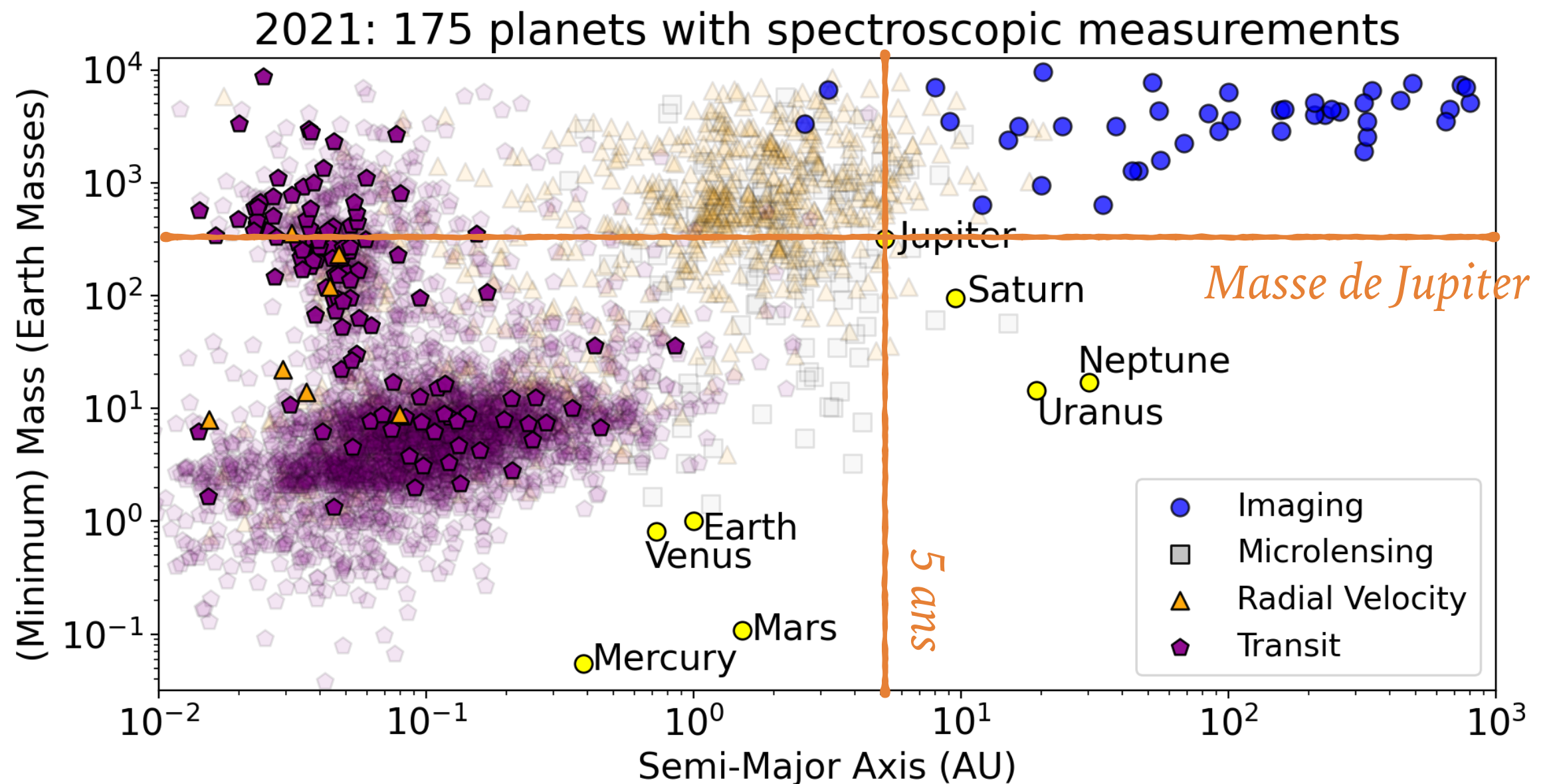
Opérations

Traitement d'image

UNE QUARANTAINE DE PLANÈTES DÉTECTÉES DEPUIS 2008



UNE QUARANTAINE DE PLANÈTES DÉTECTÉES PAR IMAGERIE



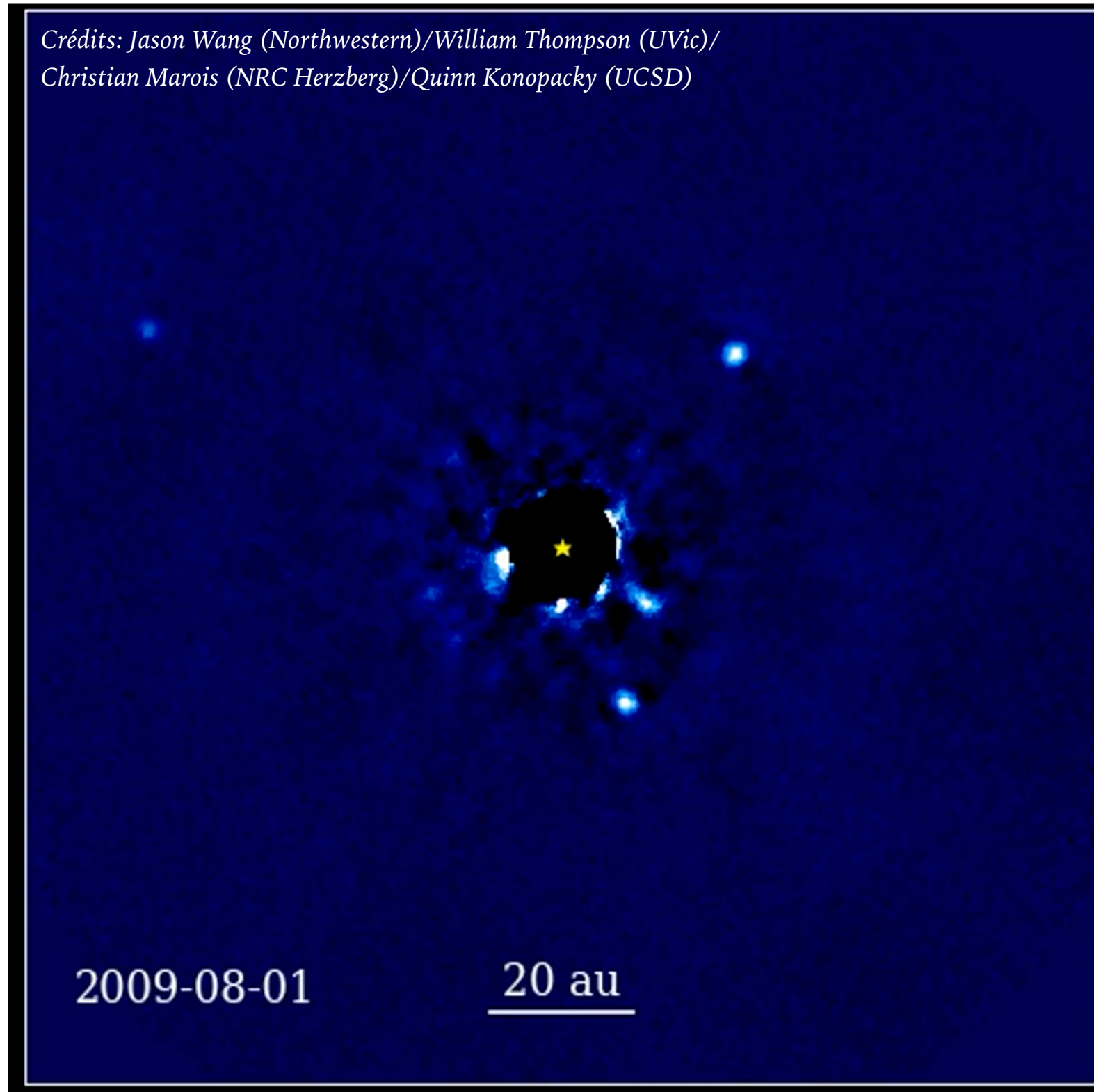
UNE DÉCENNIE D'IMAGERIE DIRECTE: SUIVI DES ORBITES

.....

*Crédits: Jason Wang (Northwestern)/William Thompson (UVic)/
Christian Marois (NRC Herzberg)/Quinn Konopacky (UCSD)*

2009-08-01

20 au

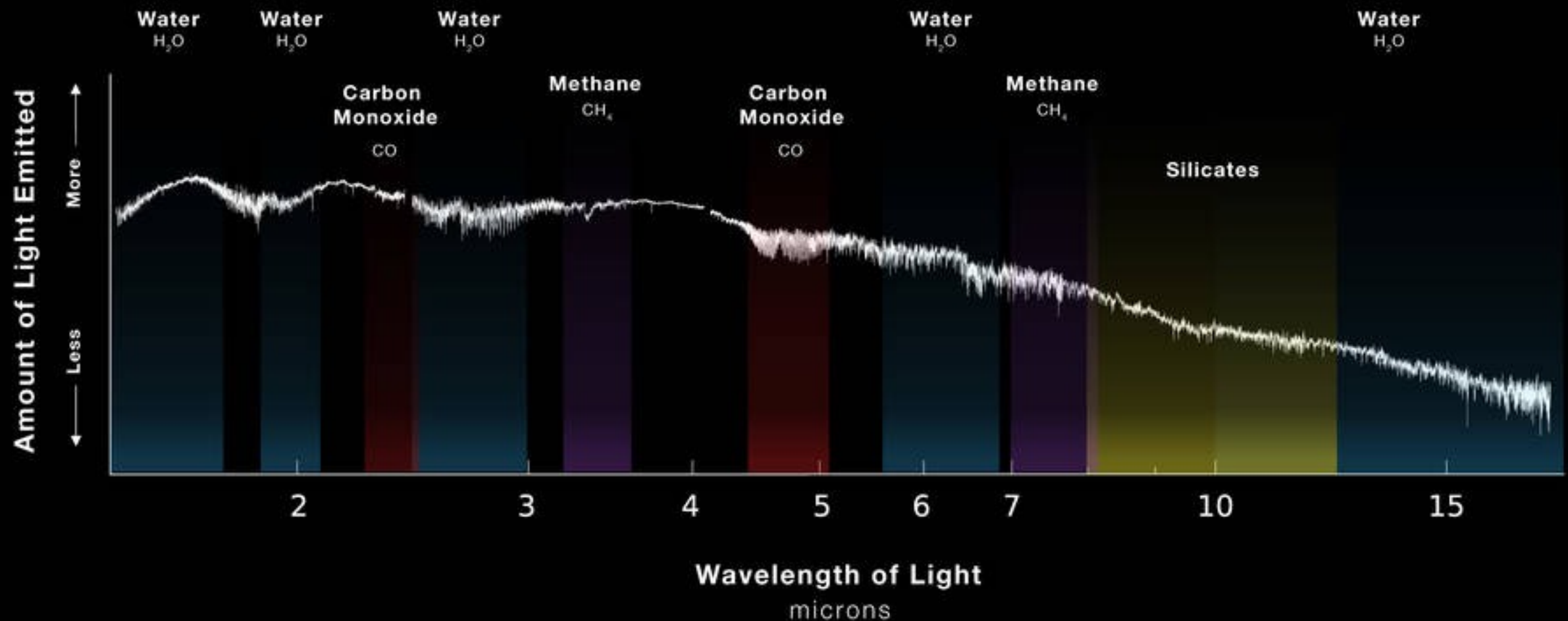


CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES ATMOSPHÈRES

EXOPLANET VHS 1256 b

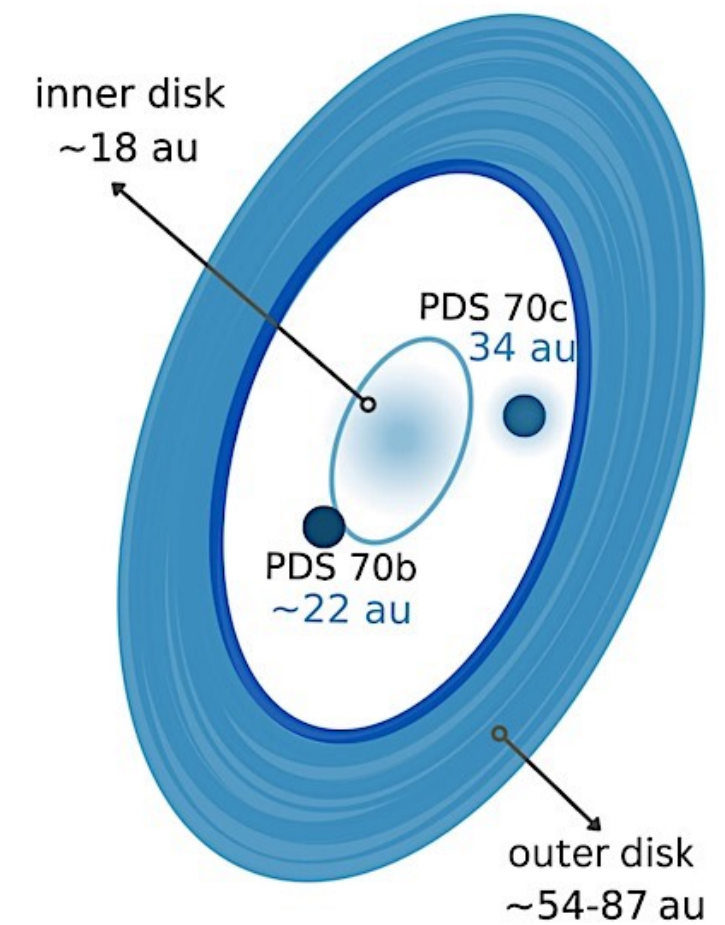
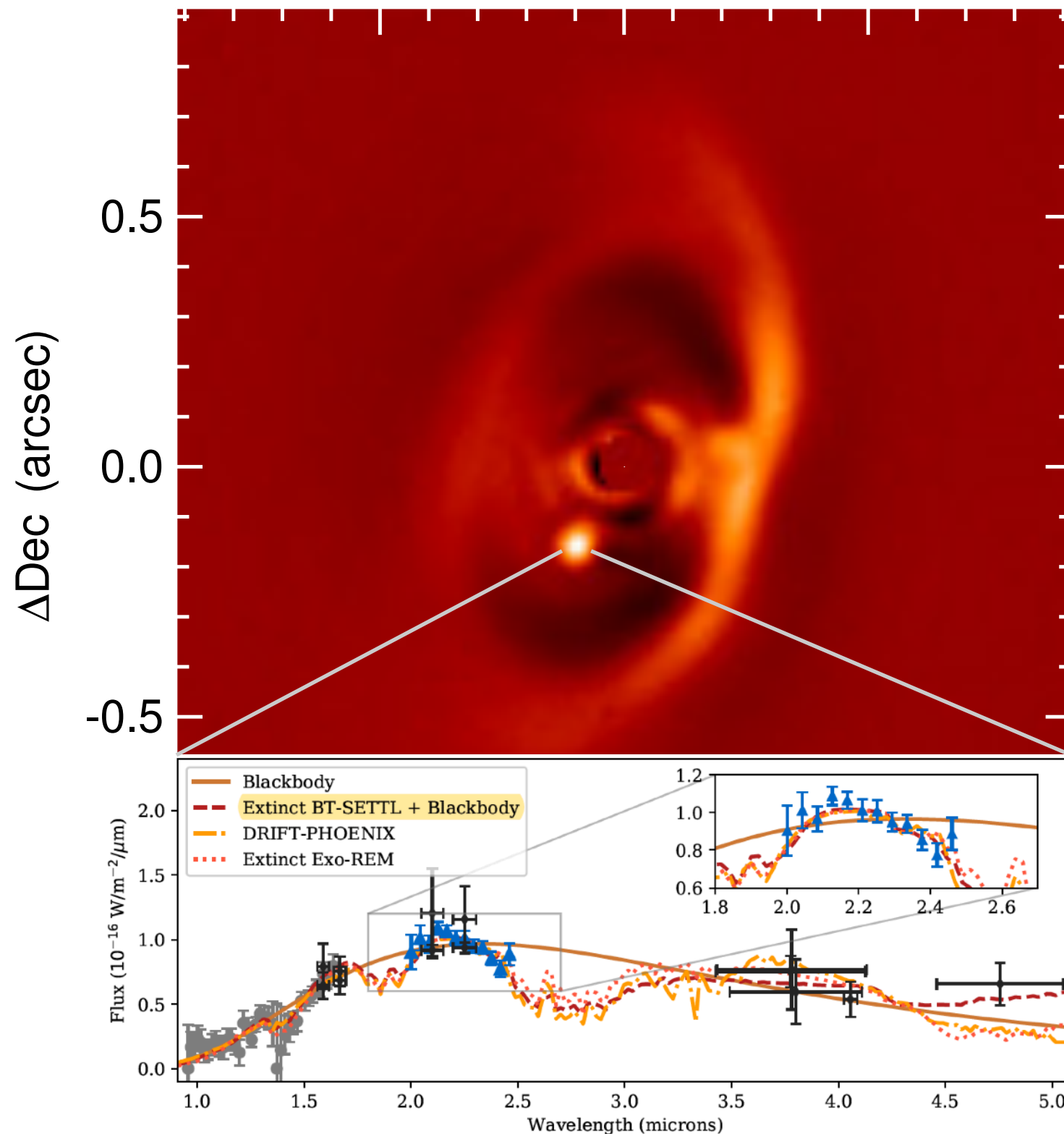
EMISSION SPECTRUM

NIRSpec and MIRI | IFU Medium-Resolution Spectroscopy

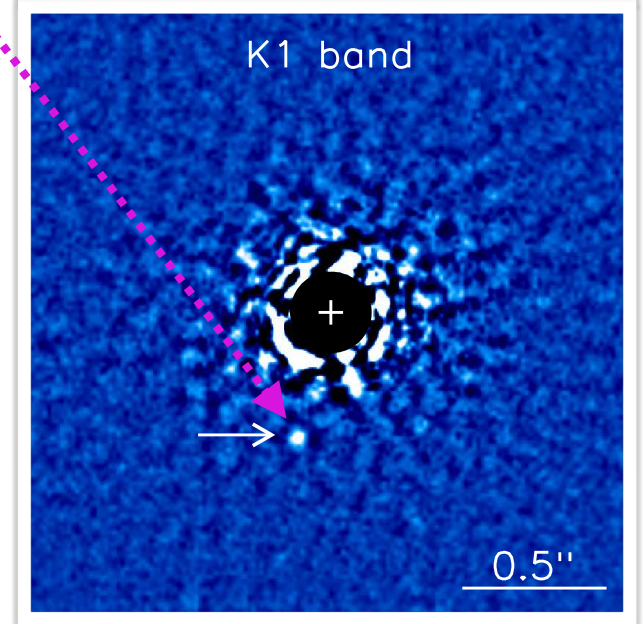
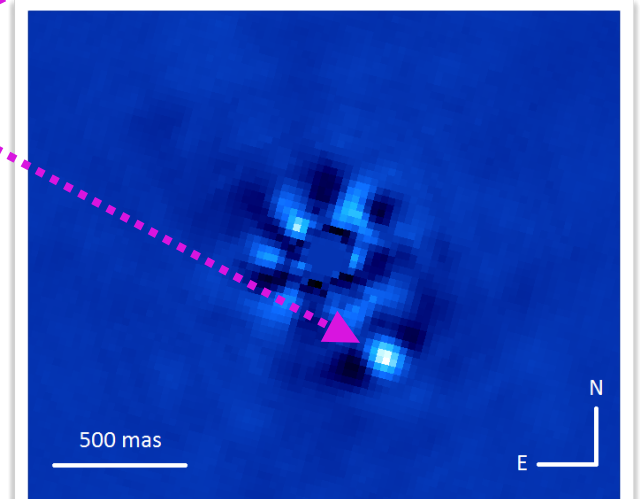
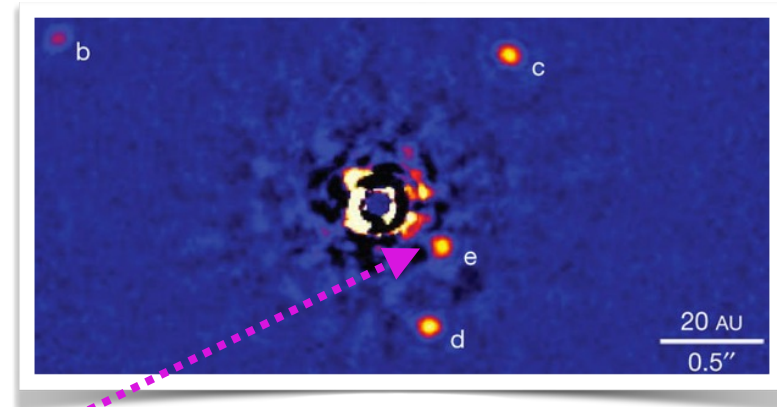
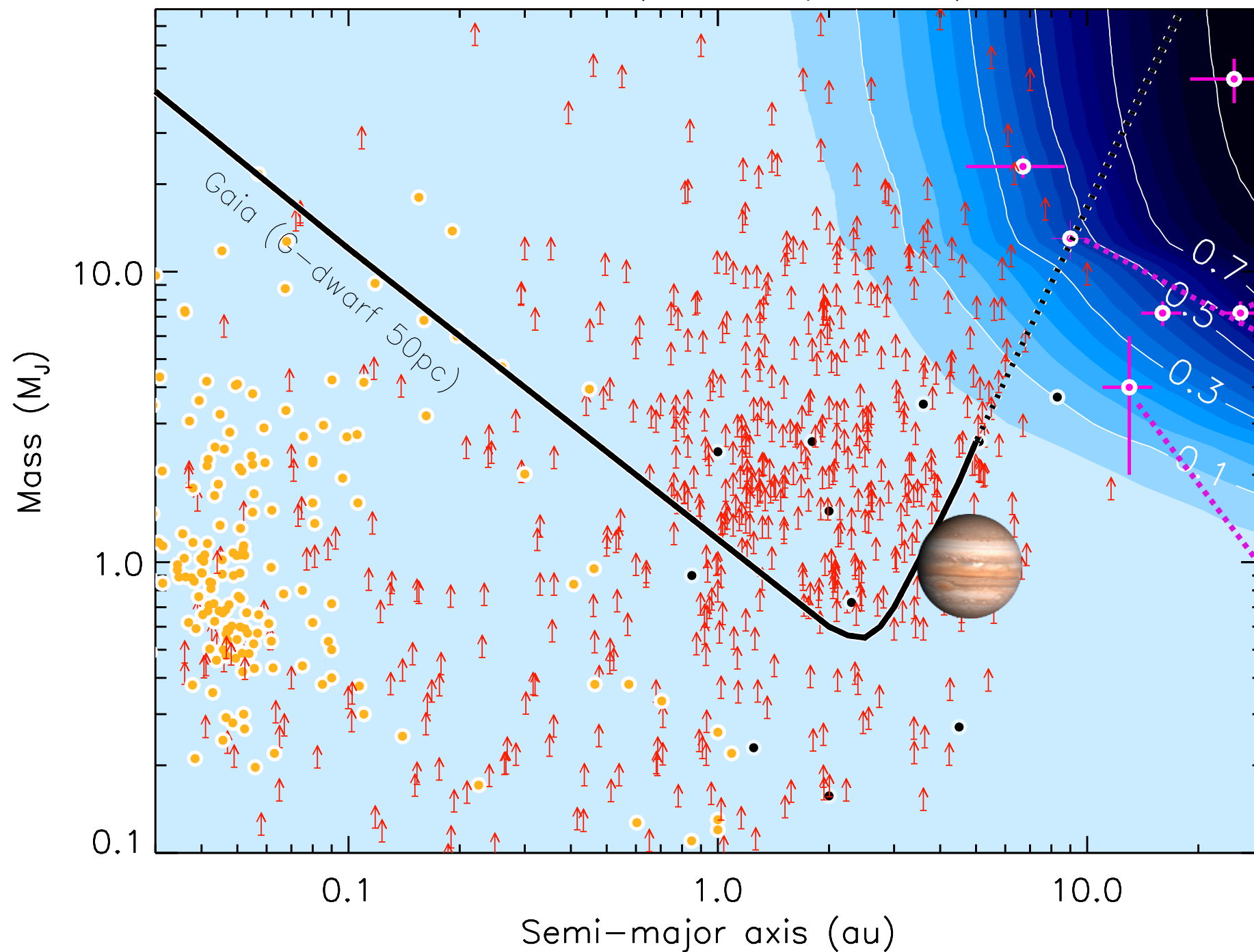


WEBB
SPACE TELESCOPE

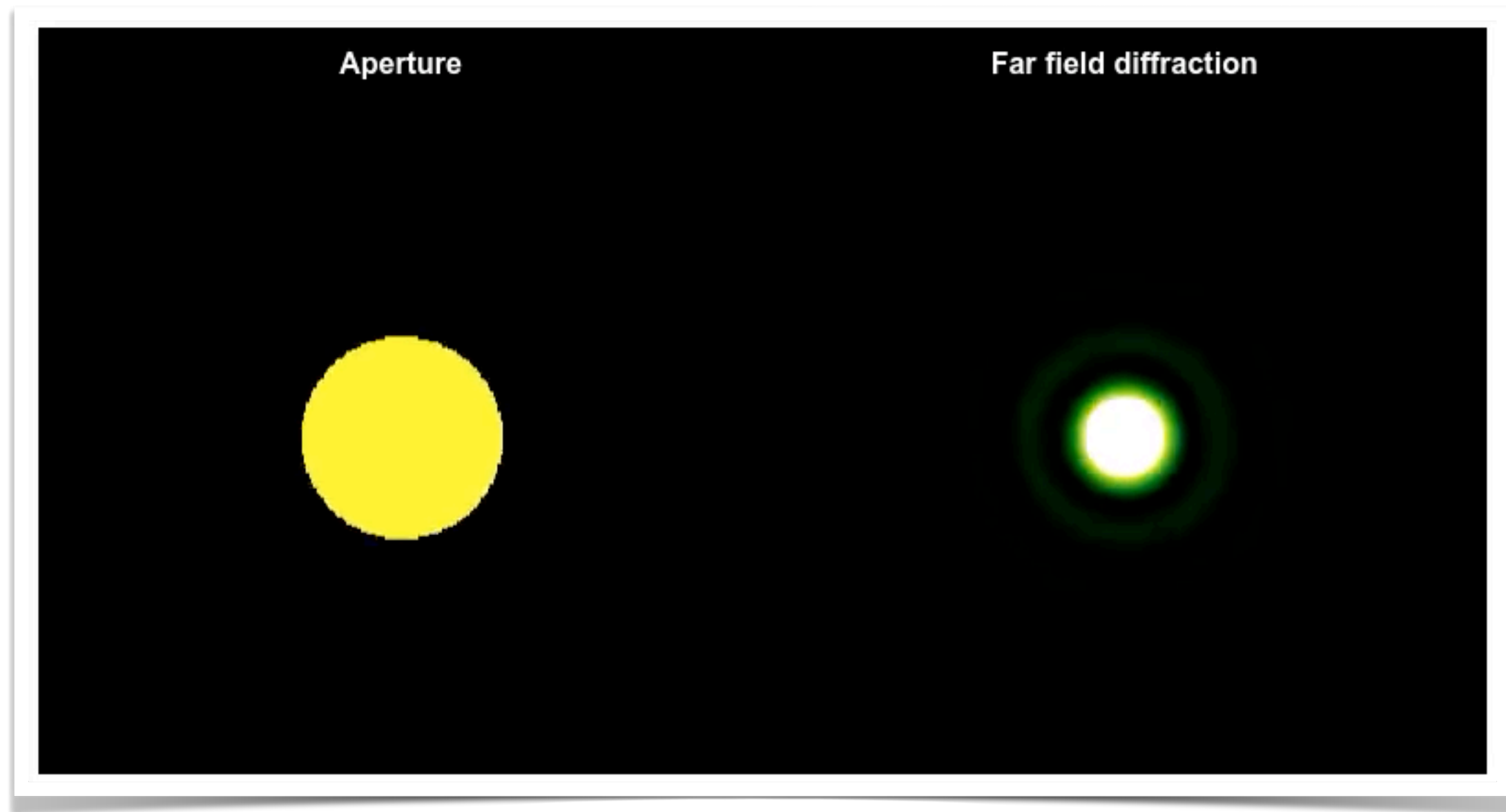
OBSERVER LES PLANÈTES EN TRAIN DE NAÎTRE!



UNE QUARANTAINE DE DÉTECTIONS... SEULEMENT!



PLANÈTES PLUS PROCHES: PLUS GRANDS TÉLESCOPES

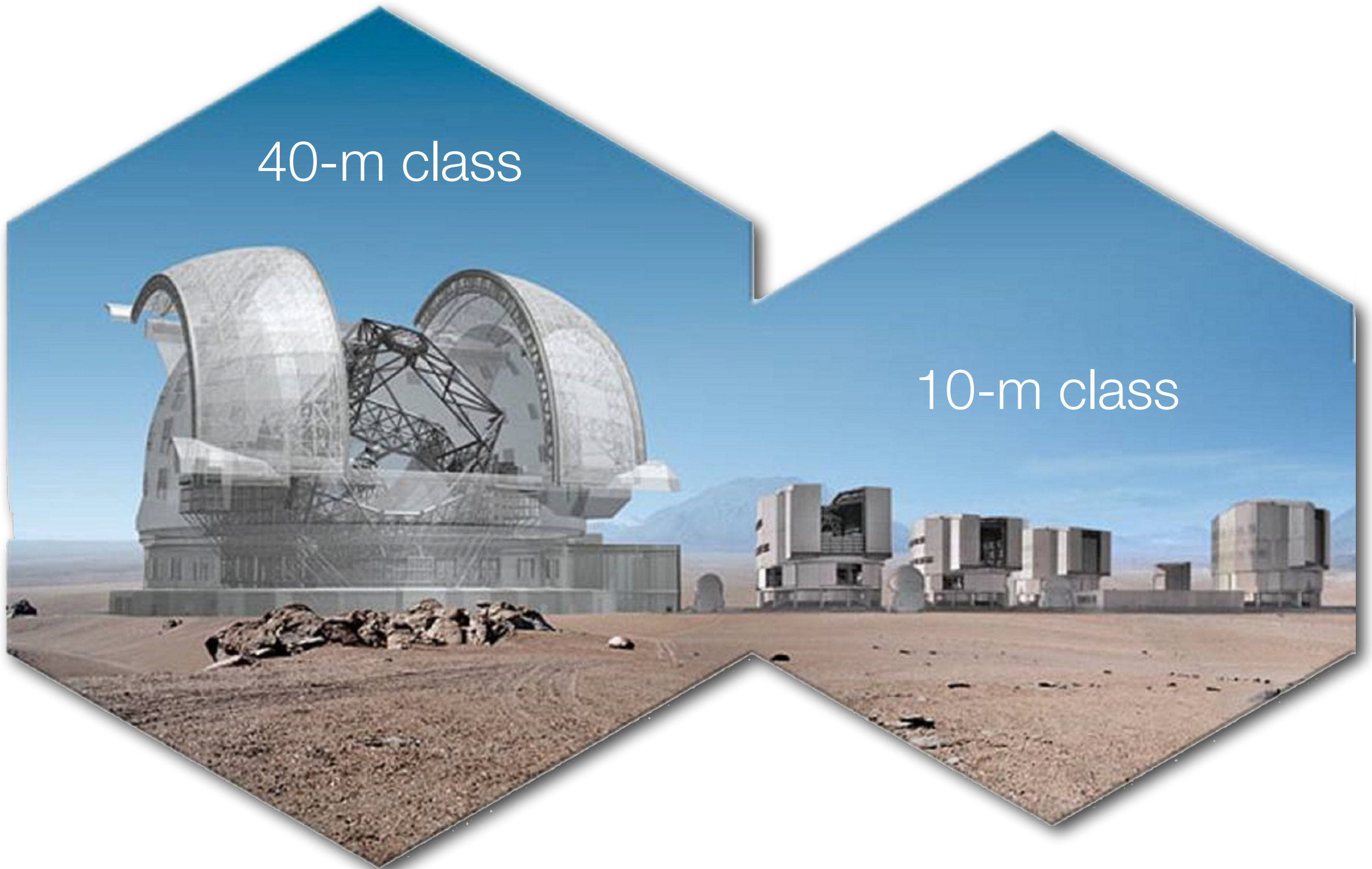


LE PROJET 'EXTREMELY LARGE TELESCOPE'

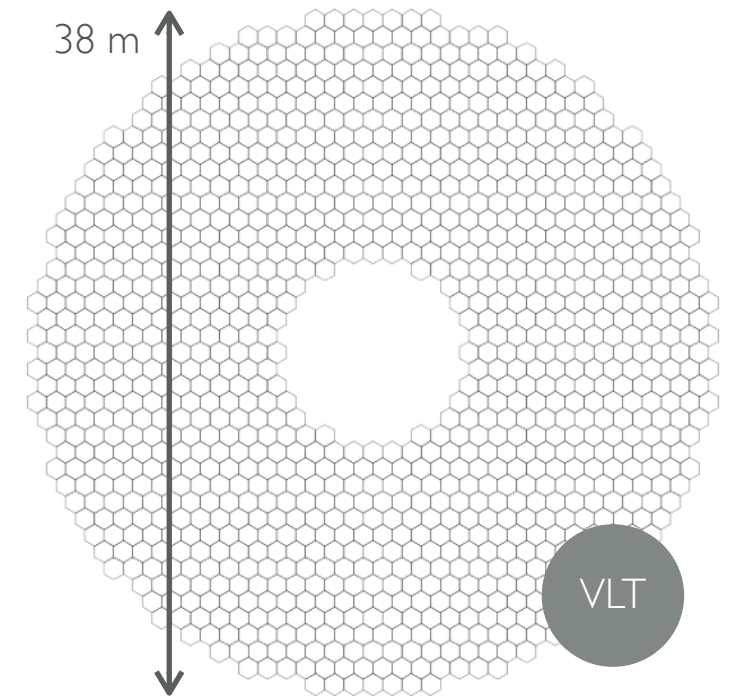
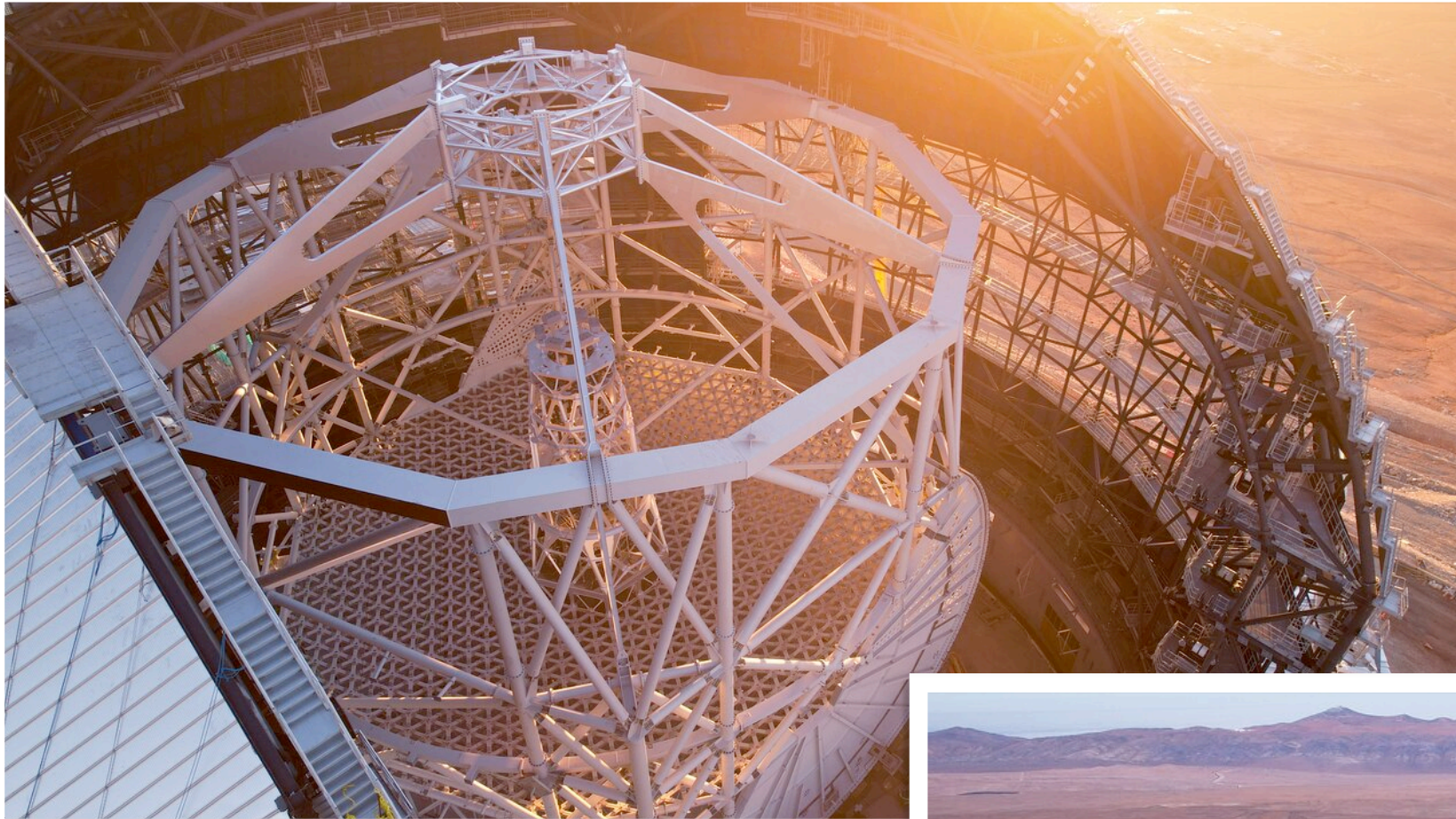
.....

40-m class

10-m class

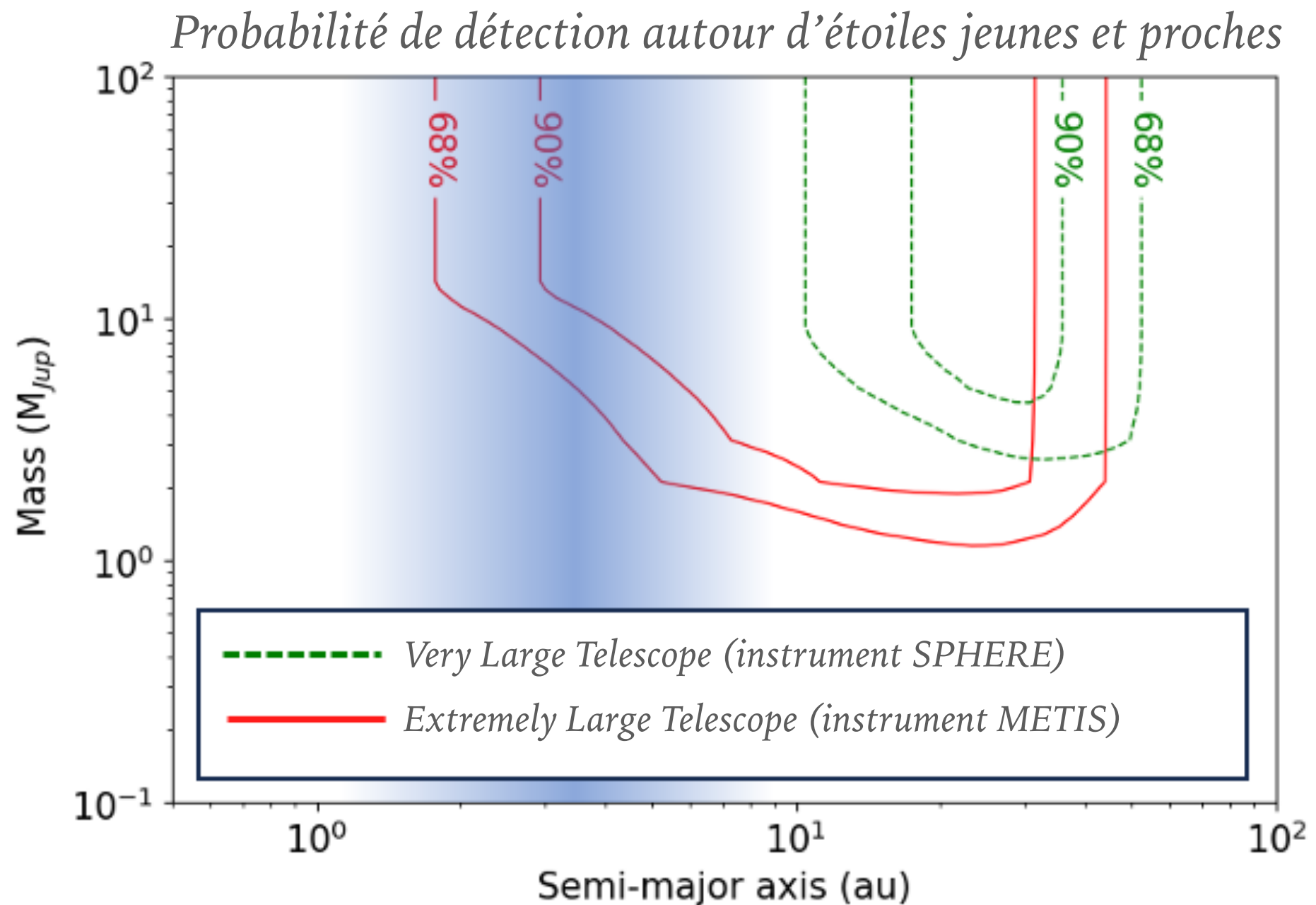


CONSTRUCTION EN COURS ... PREMIÈRE LUMIÈRE EN 2028



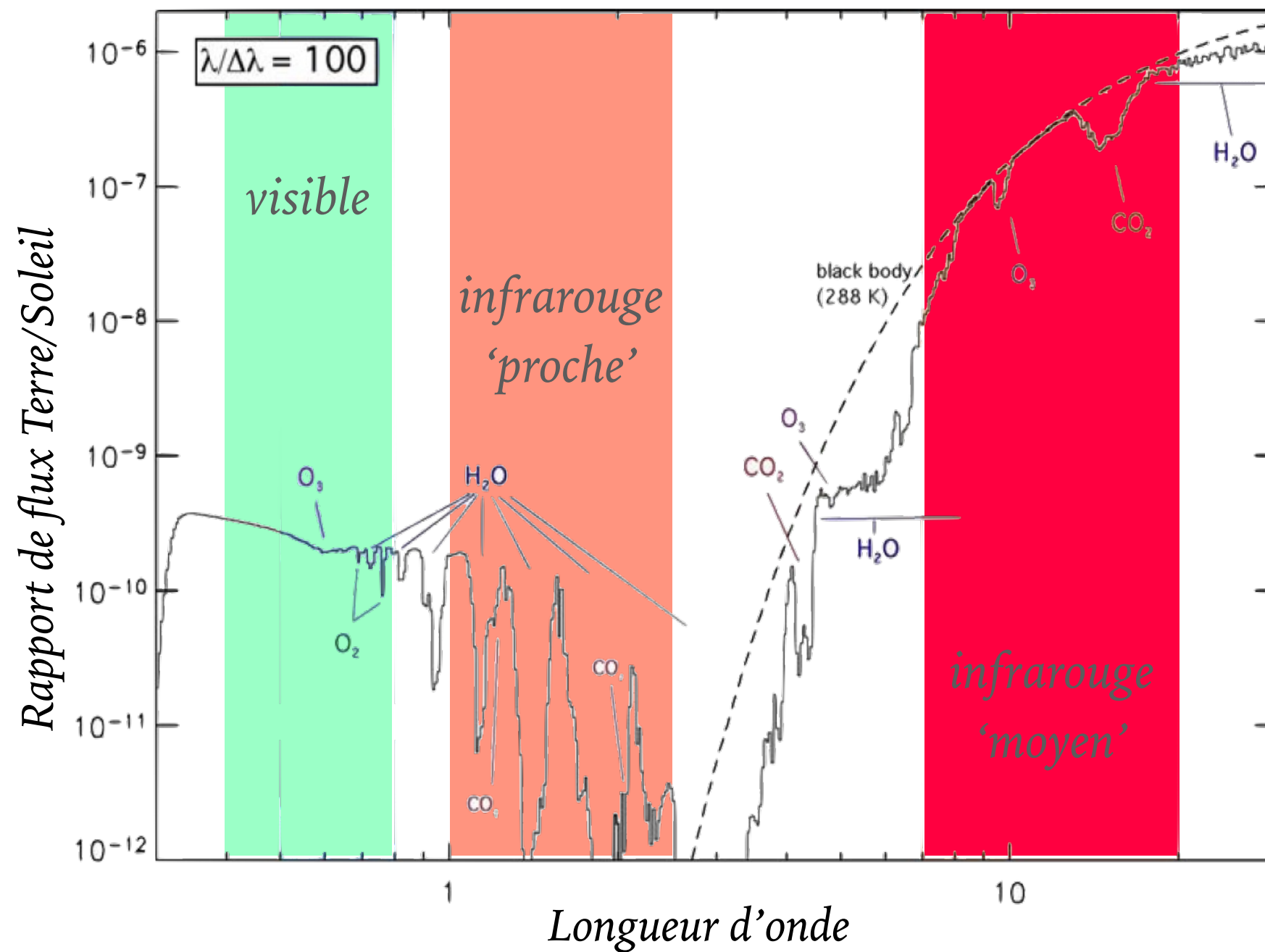
LE POTENTIEL DU EXTREMELY LARGE TELESCOPE

- Sensibilité aux planètes détectées par vitesses radiales



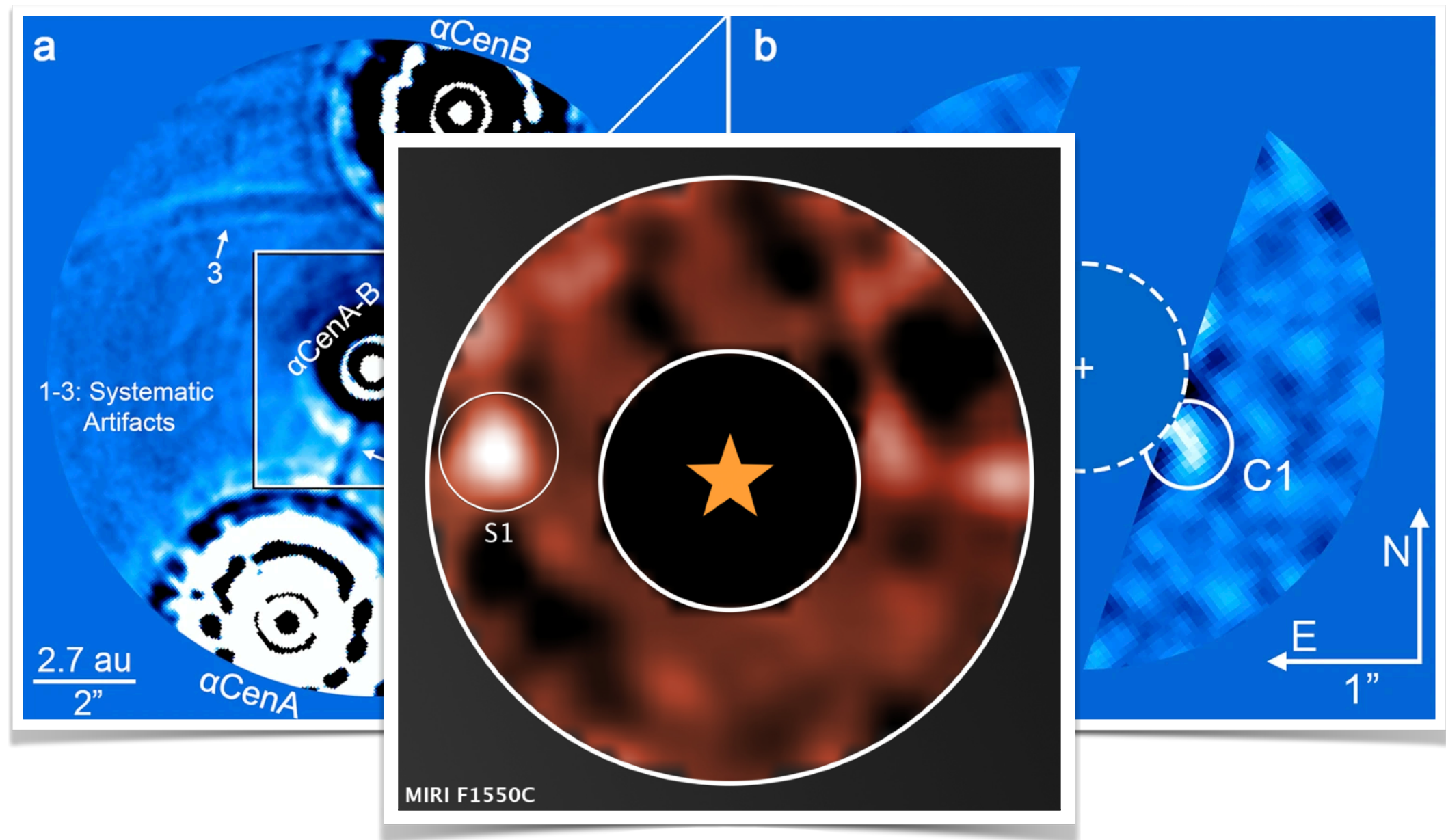
PLANÈTES PLUS PETITES: L'INFRAROUGE 'MOYEN'

.....

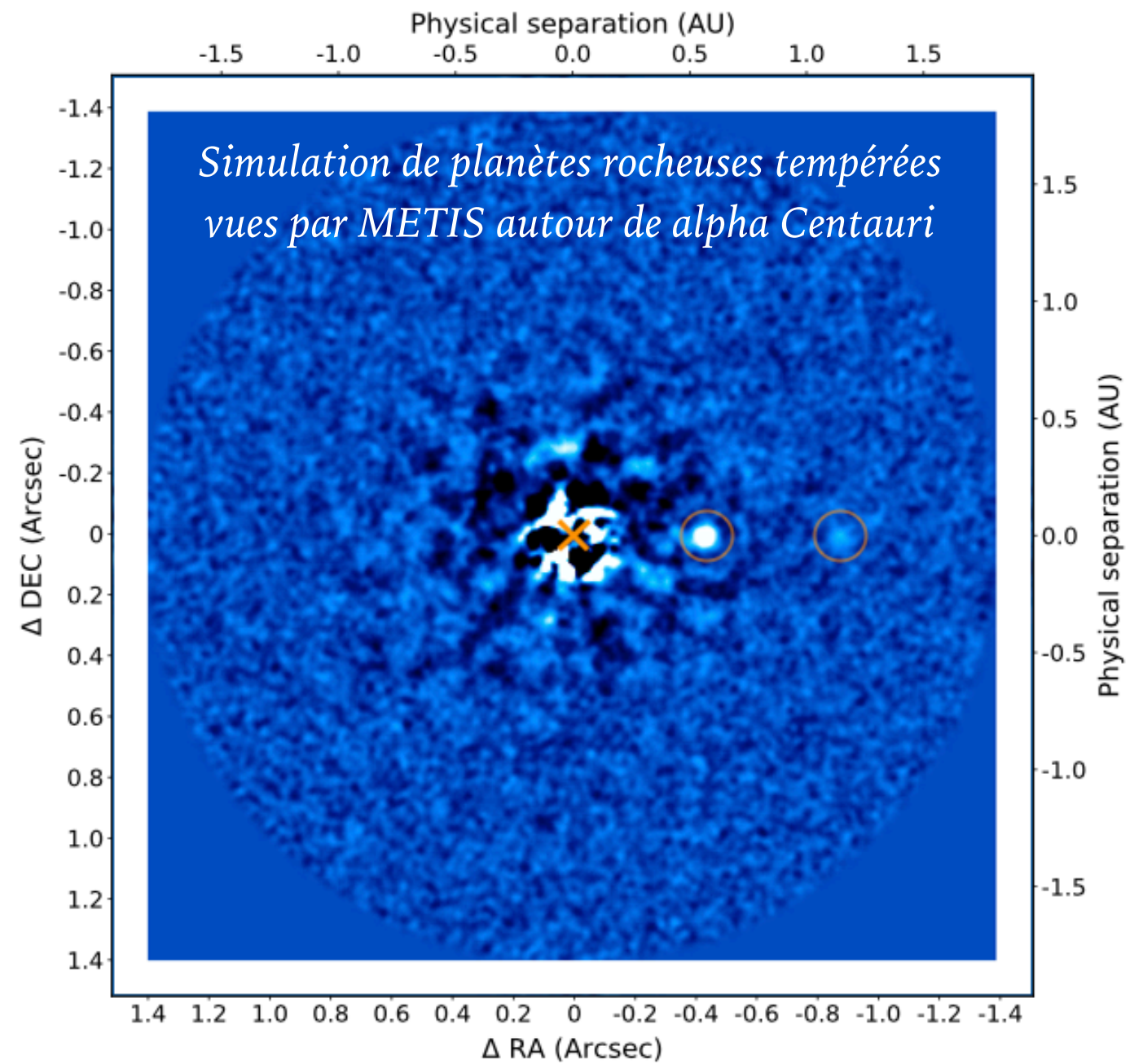


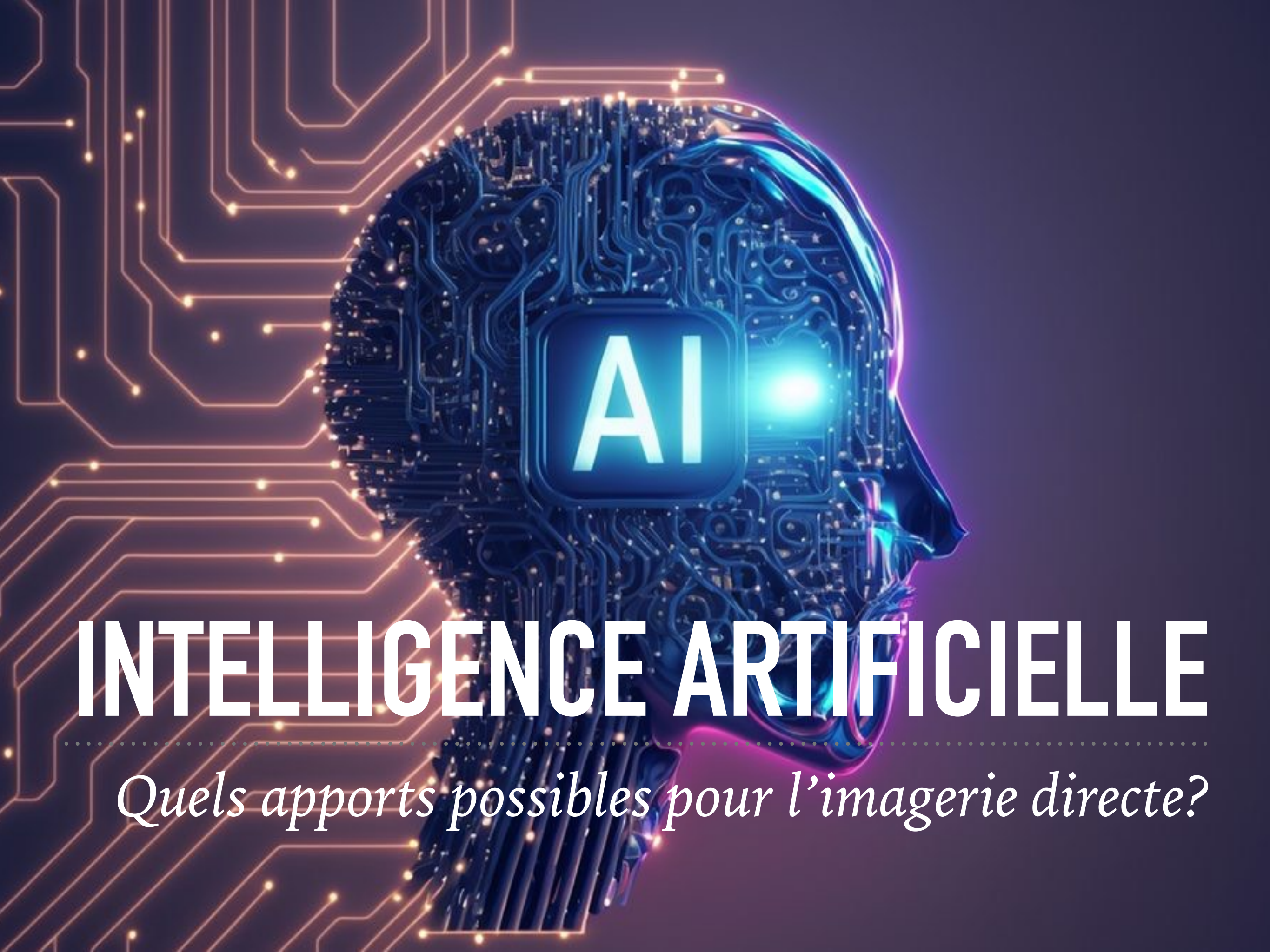
LE PROJET 'NEAR' AU VERY LARGE TELESCOPE

*100h d'intégration sur alpha Centauri dans l'infrarouge moyen.
Un candidat de masse intermédiaire entre Neptune et Saturne.*



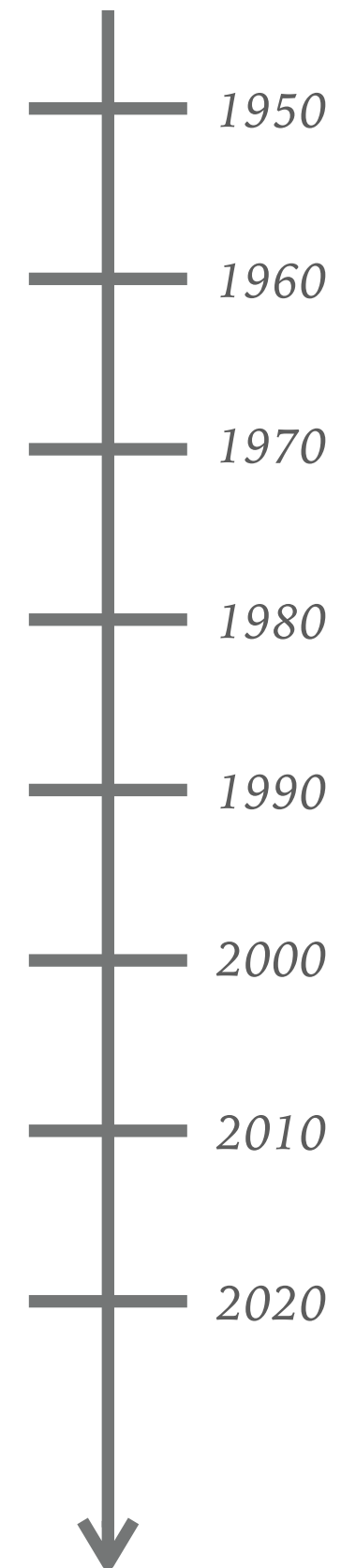
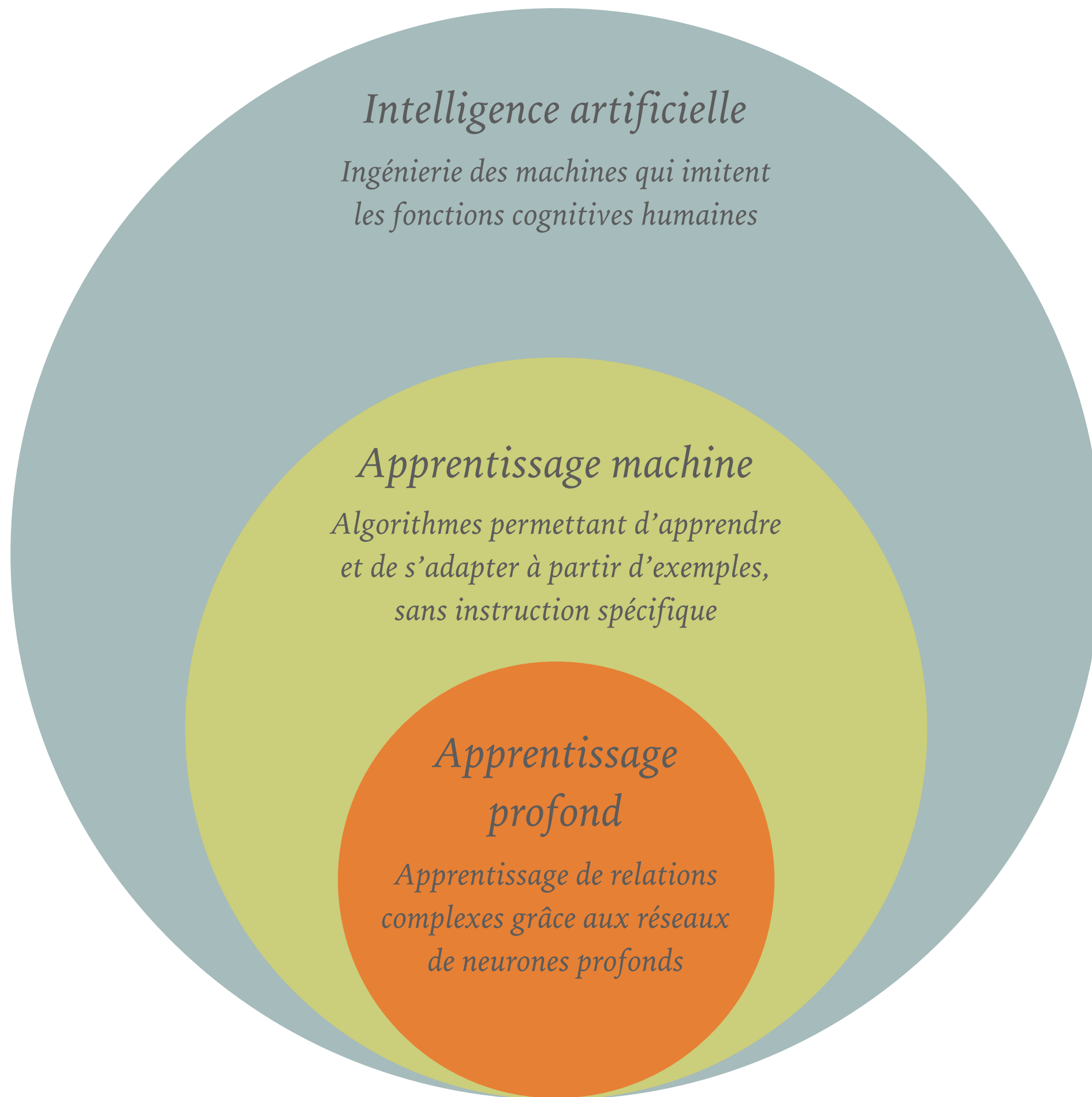
L'INSTRUMENT METIS (INFRAROUGE MOYEN) POUR L'ELT



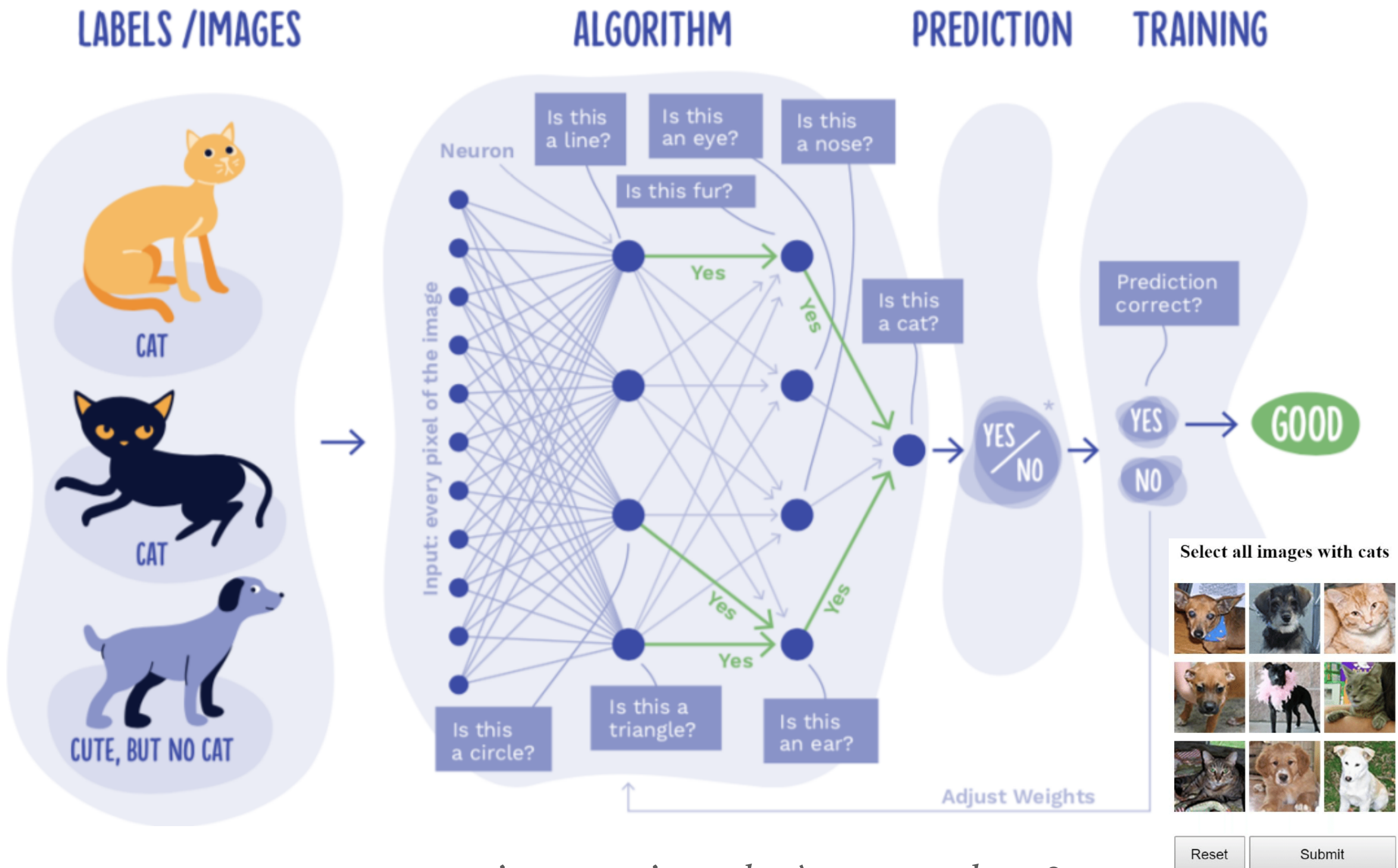


INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Quels apports possibles pour l'imagerie directe?



Des réseaux de neurones bien entraînés peuvent reconnaître chiens et chats...



... pourquoi pas aussi exoplanètes et tavelures?

Trois classes de problèmes d'apprentissage

Apprentissage Supervisé

Données : (x, y)

x est une donnée d'entrée, y est une étiquette (par exemple, une photo avec l'étiquette "chat")

Objectif: Apprendre à associer l'entrée à la sortie, c'est-à-dire $x \rightarrow y$

Un exemple: pour classier Ceci est un chat



Un chat

Apprentissage Non Supervisé

Données: x ,

x est une donnée, il n'y a pas d'étiquettes !

Objectif: Apprendre la structure sous-jacente des données.

Un exemple: Comparaison, regroupement



Ces deux choses se ressemblent

Apprentissage par Renforcement

Données: pas de données, seulement des paires état-action (s, a)

Objectif: Maximiser la récompense future sur plusieurs étapes temporelles.

Un exemple: récompense = joie



L'interaction avec le chat donne de la joie

APPORTS POSSIBLES À TOUS LES NIVEAUX



Optique adaptative

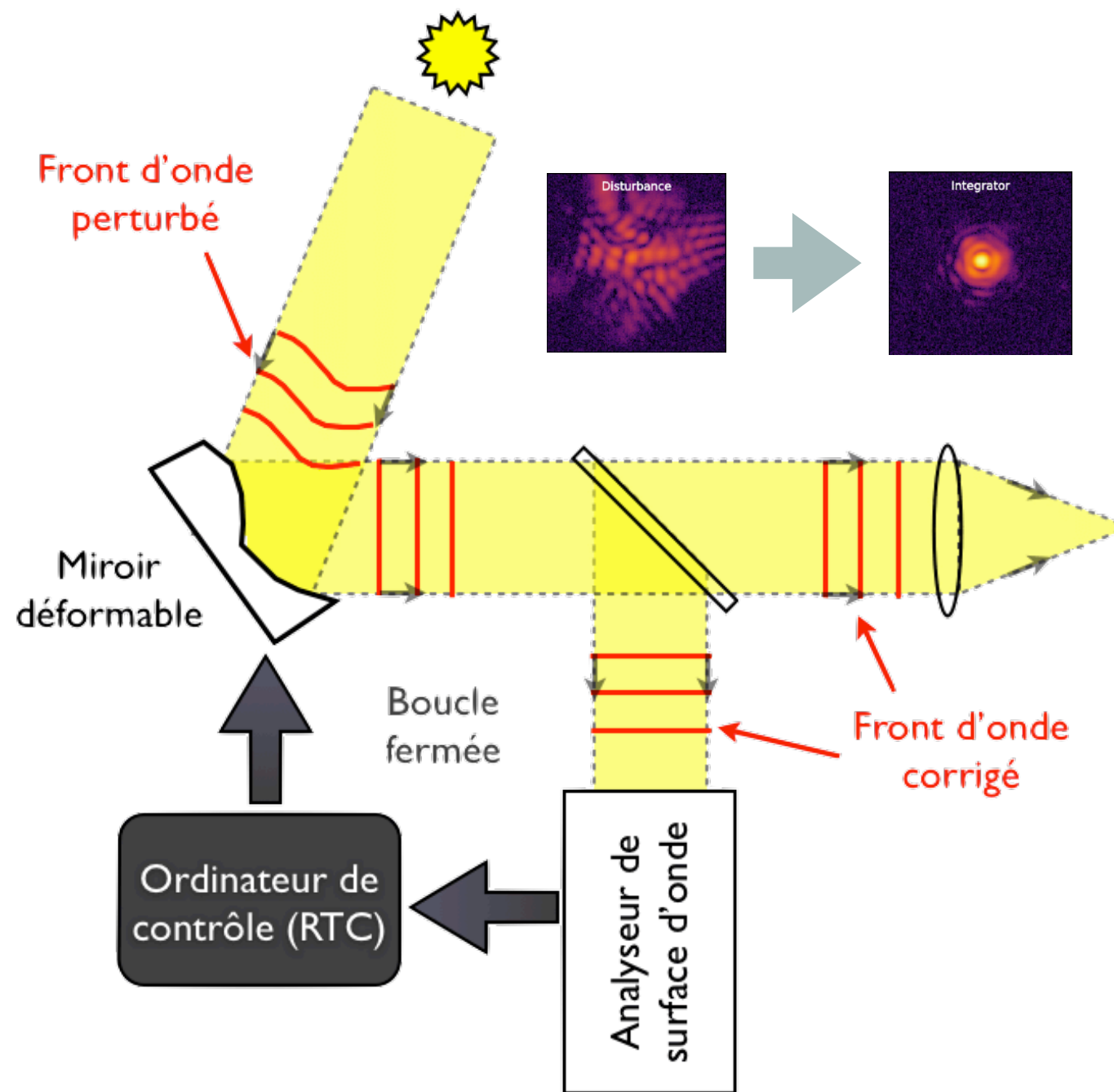
Coronographie

Opérations

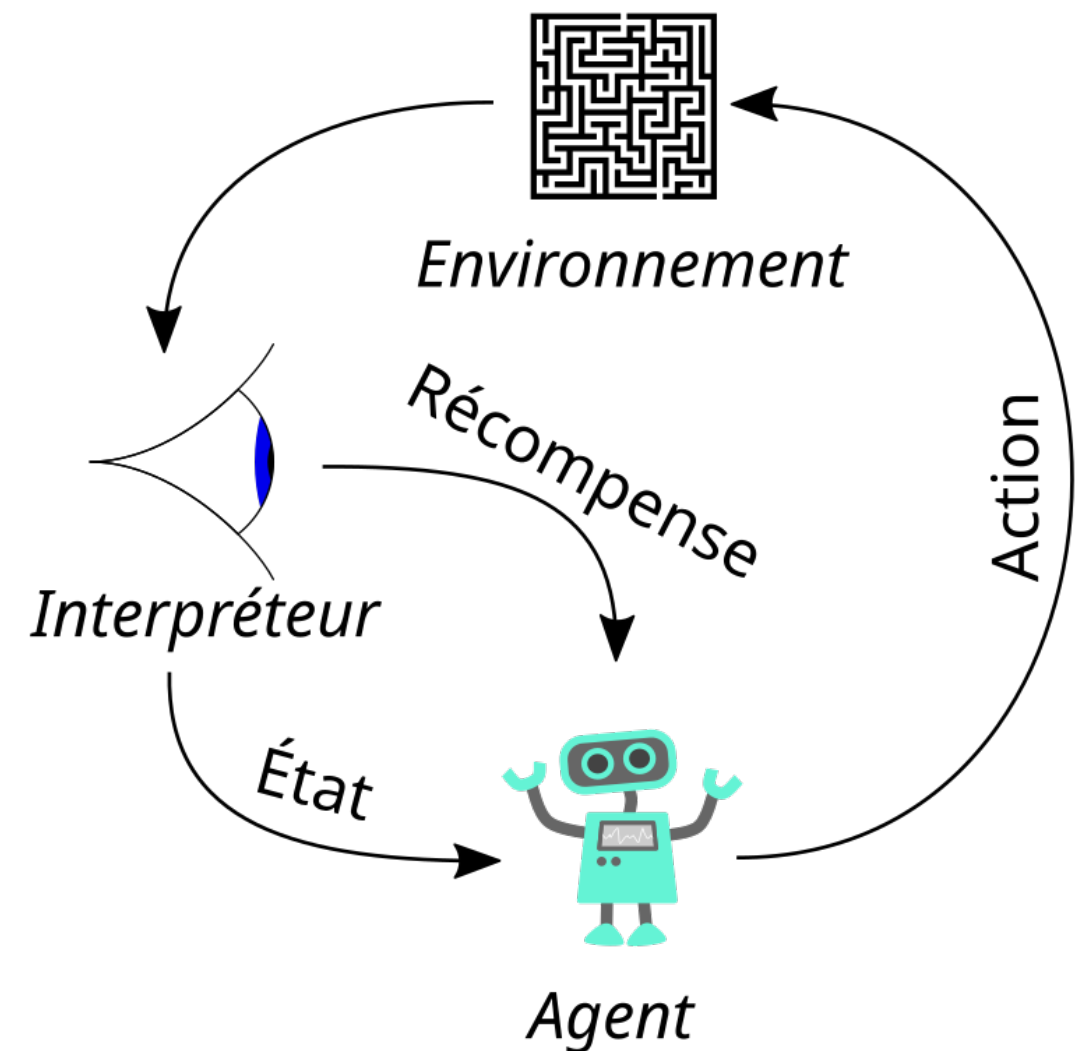
Traitement d'image



PILIER #1 – OPTIQUE ADAPTATIVE



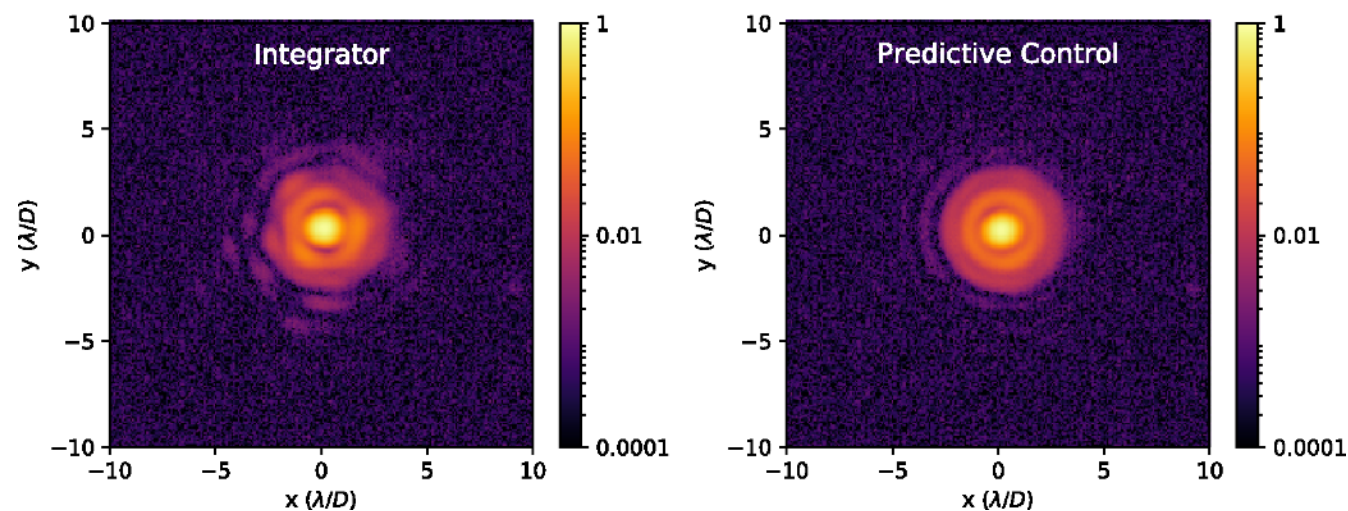
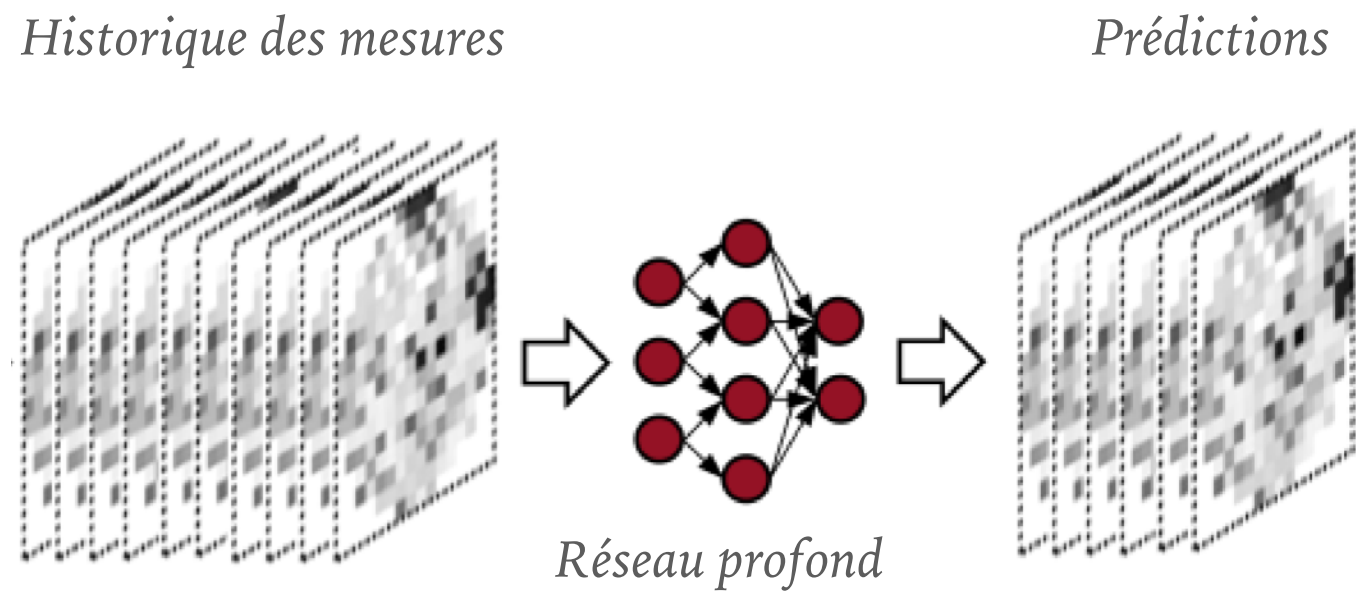
Apprentissage par renforcement



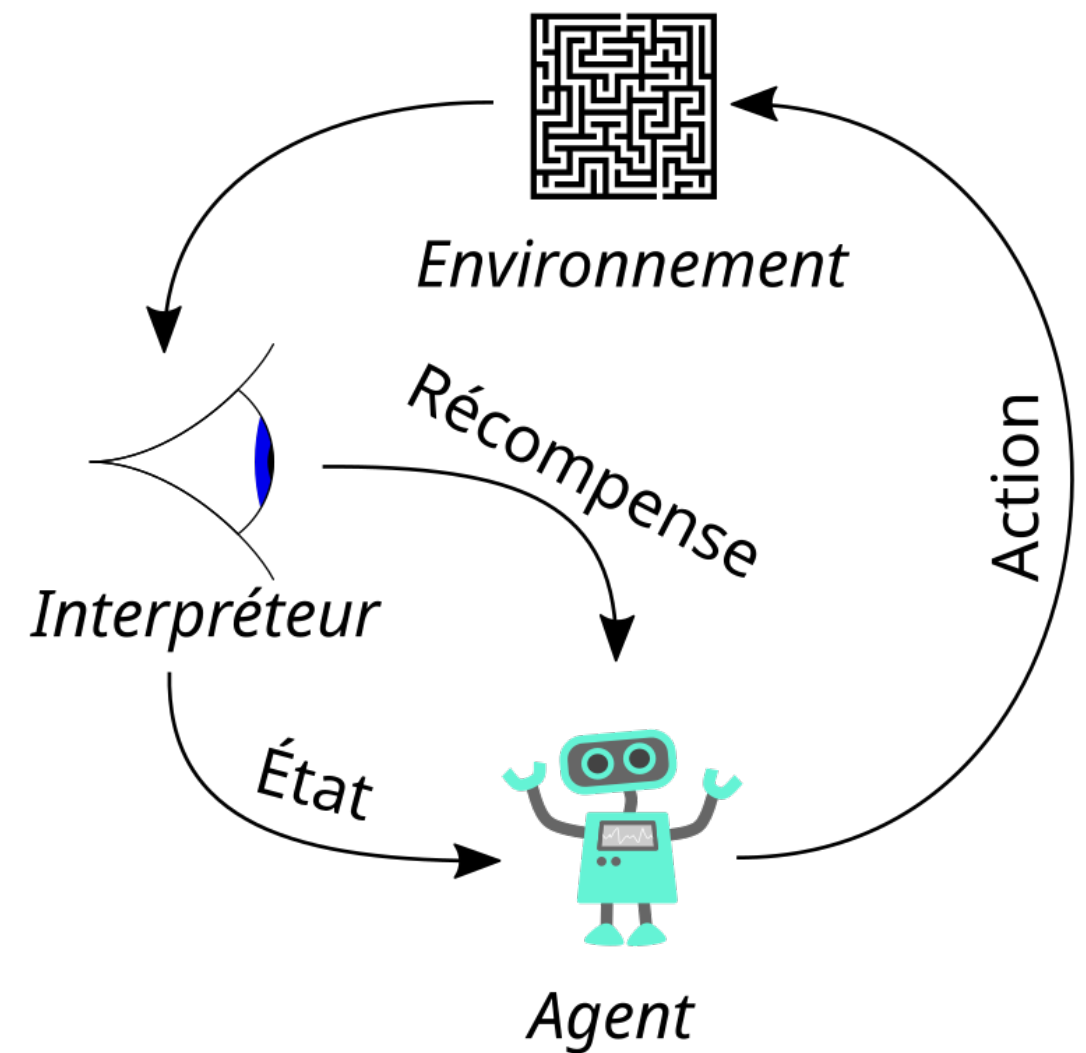
Utilisé dans les jeux vidéo, robots, agents conversationnels, etc

OPTIQUE ADAPTATIVE « PRÉDICTIVE »

Contrôle prédictif

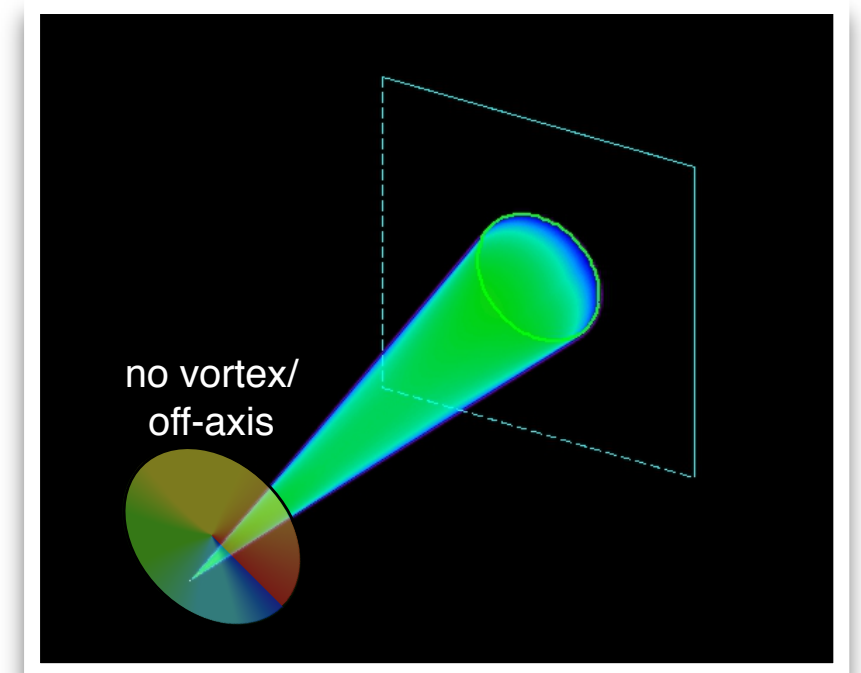
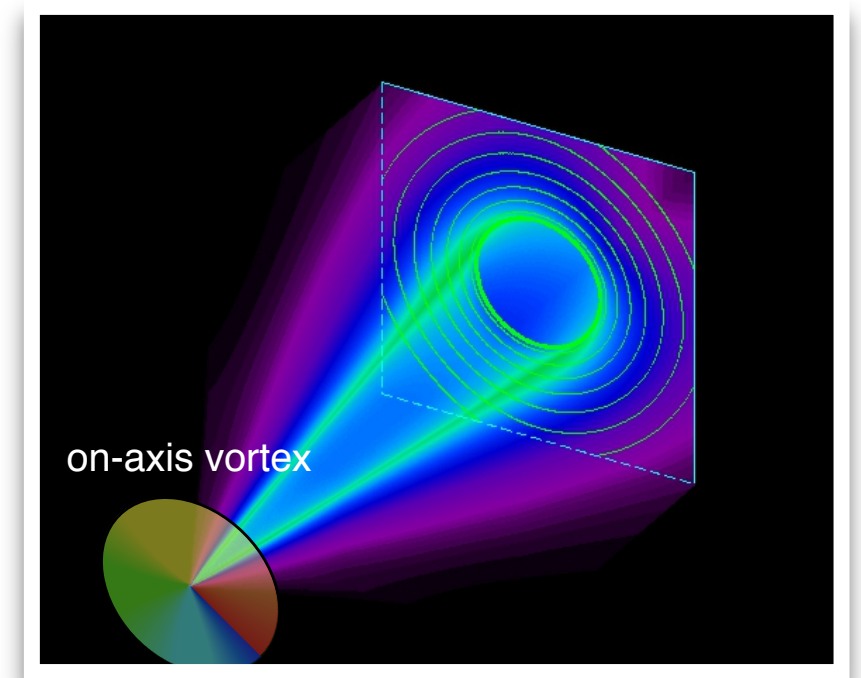
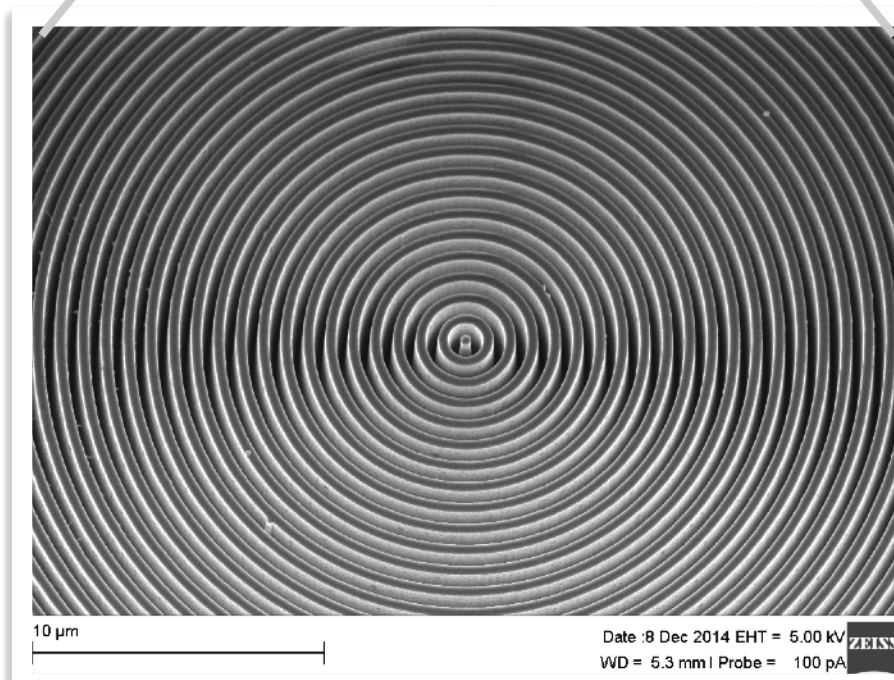
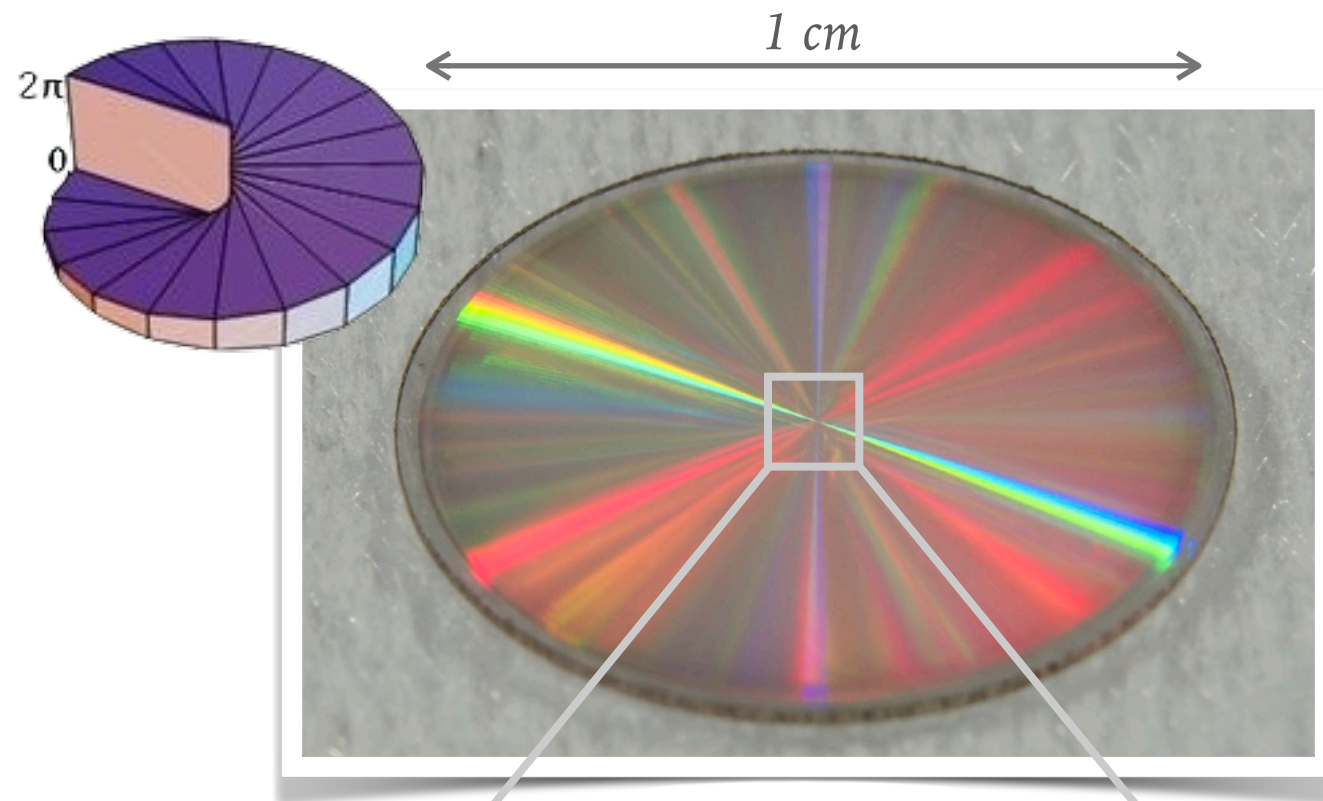


Apprentissage par renforcement



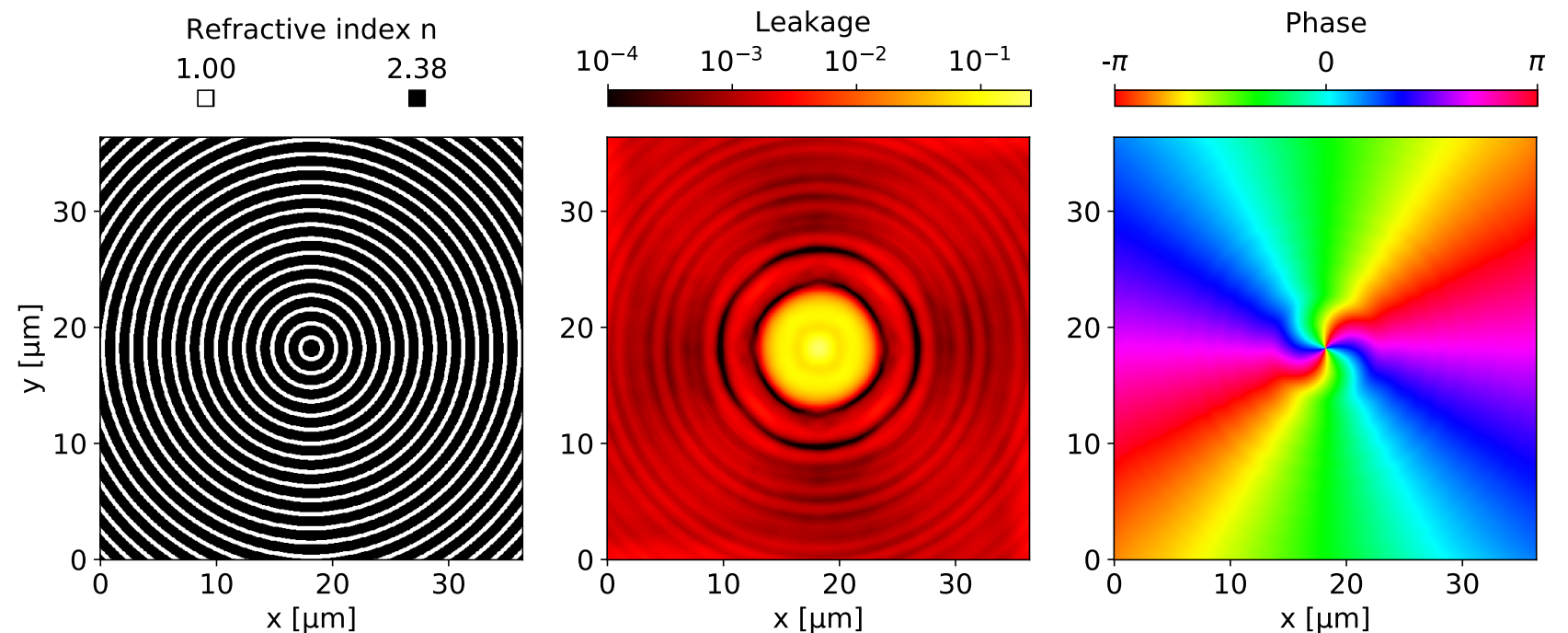
Utilisé dans les jeux vidéo, robots,
agents conversationnels, etc

PILIER #2 – CORONOGRAPHIE

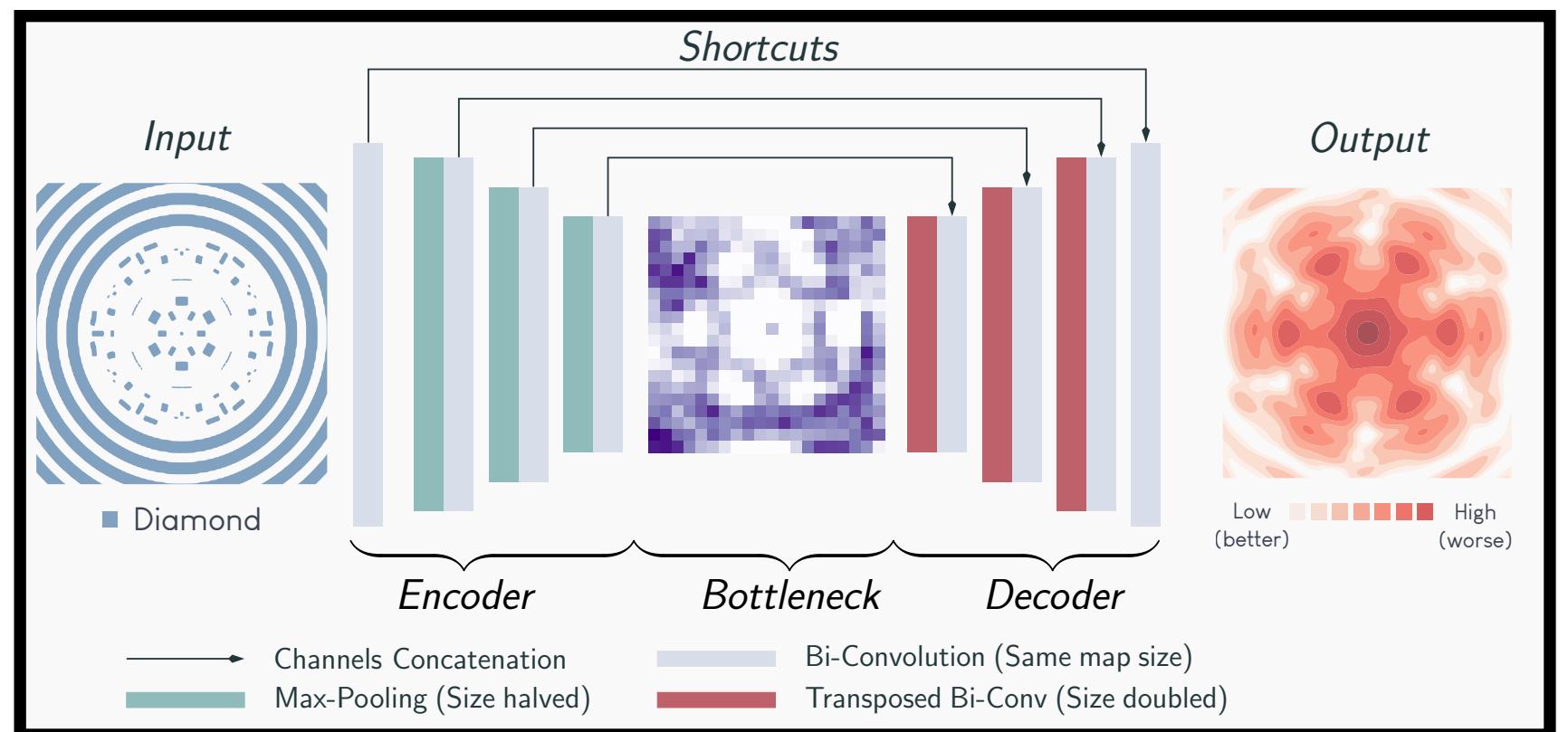


DE MEILLEURS CORONOGRAPHES

*Conception du vortex:
résolution des équations
de Maxwell —> très lent*

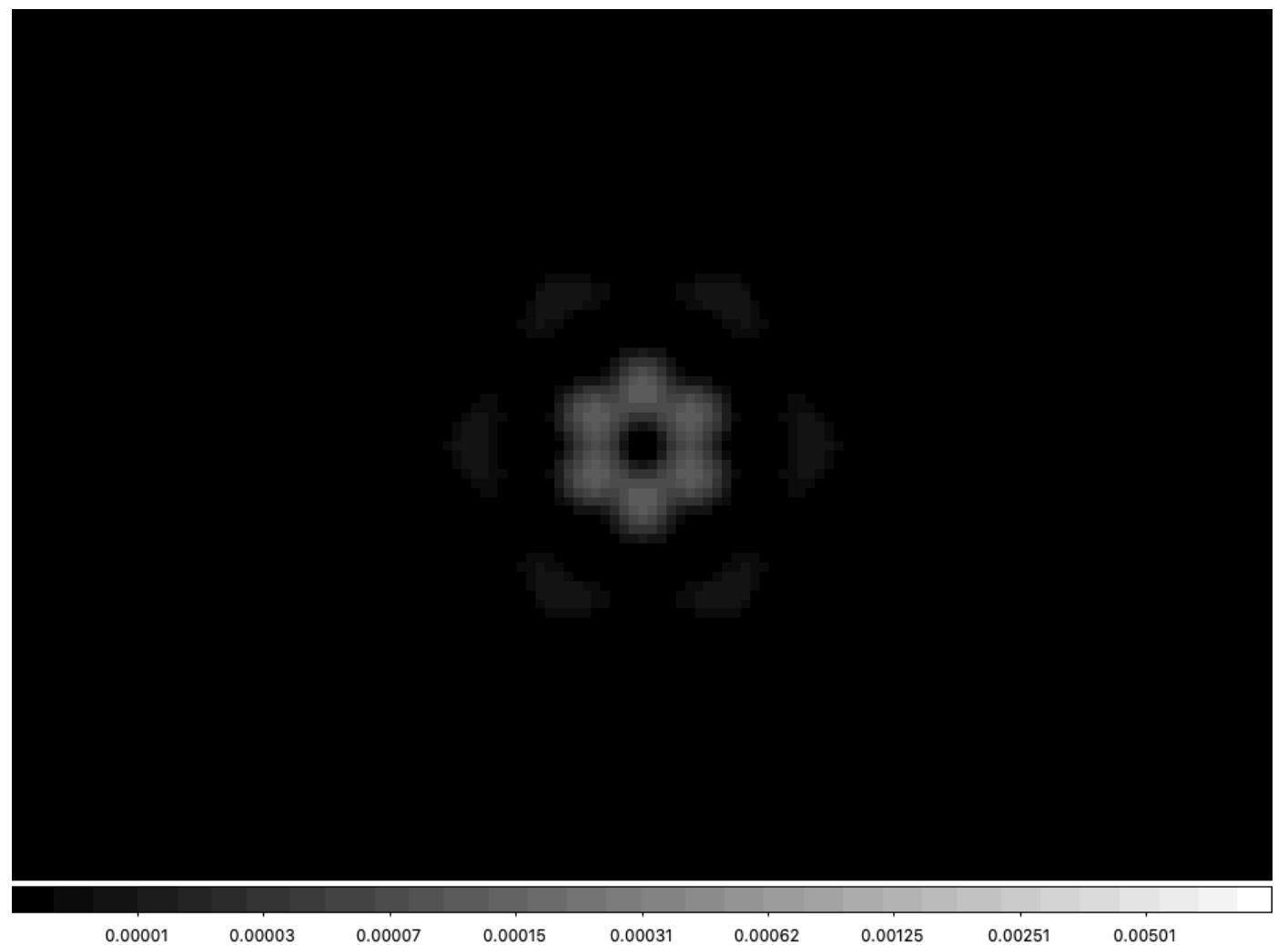
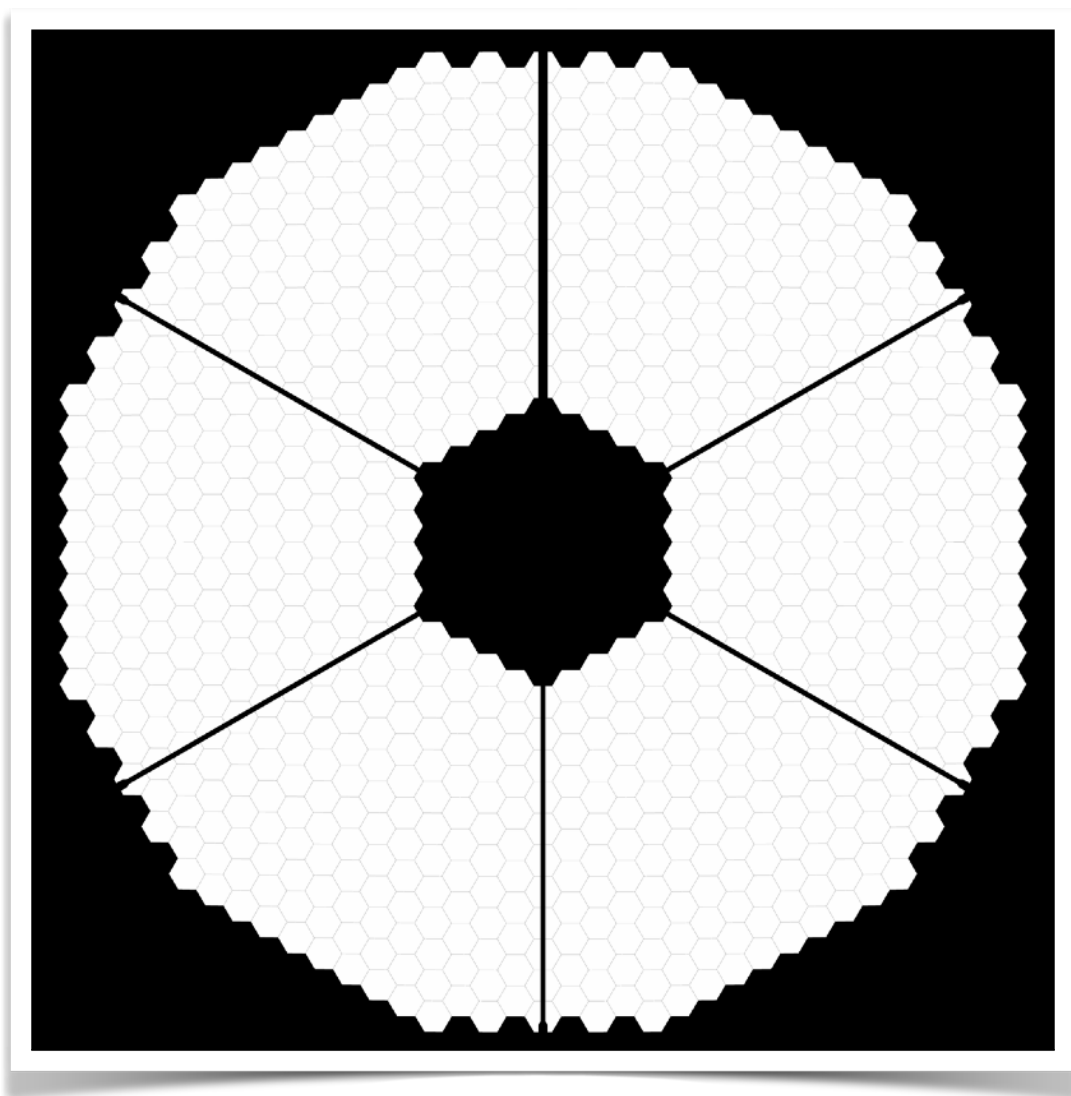


*Un réseau de neurones
peut apprendre à résoudre
les équations de Maxwell,
et donner accès à des
concepts plus avancés*



PILIER #3 – OPÉRATIONS

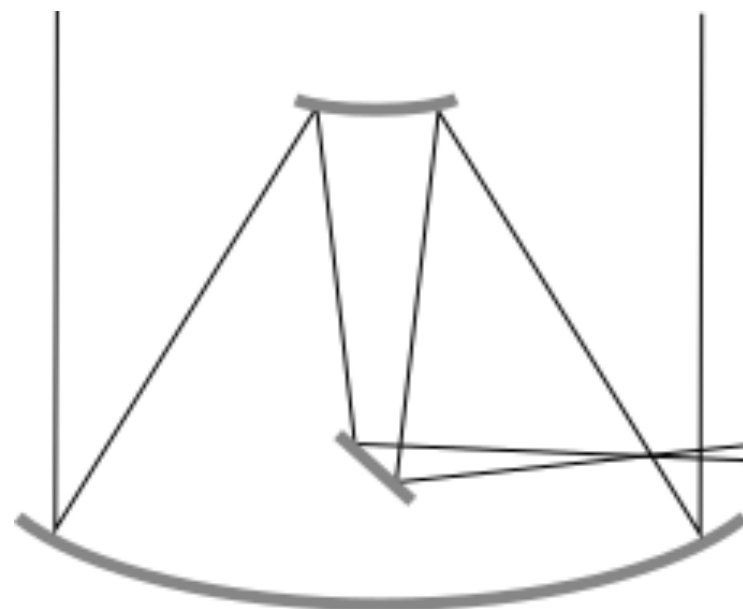
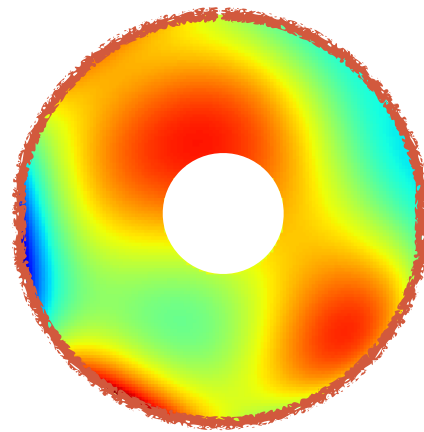
*Effet d'un décentrage de l'étoile sur le coronographe vortex
pour un télescope complexe comme le ELT*



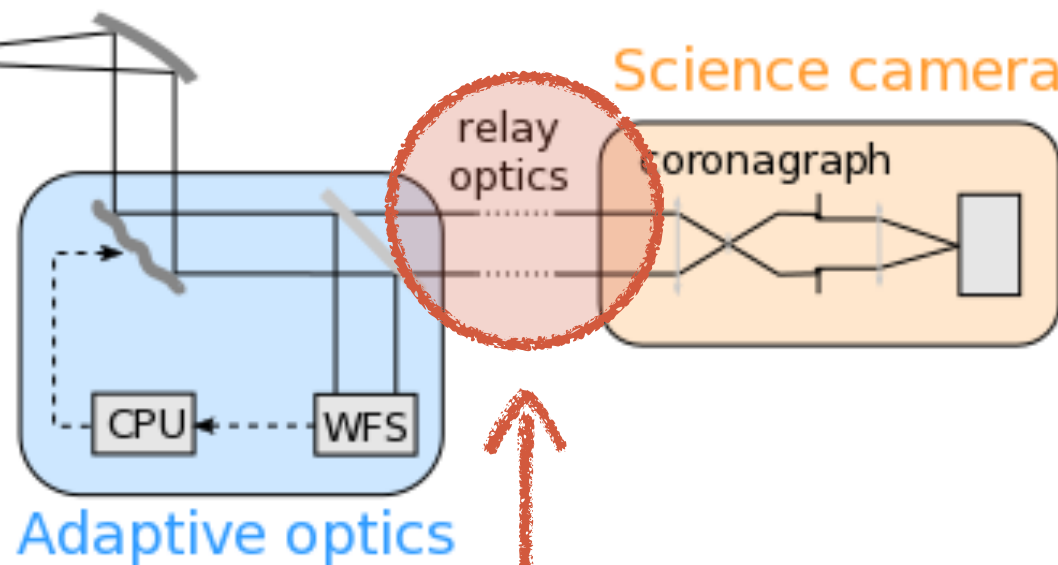
Relation complexe mais prédictible —> pas besoin d'apprentissage machine

ALLER AU-DELÀ DU SIMPLE RECENTRAGE?

*Déformation du front
d'onde lumineux*



Telescope



Adaptive optics

Science camera

coronagraph

*Aberrations
supplémentaires*

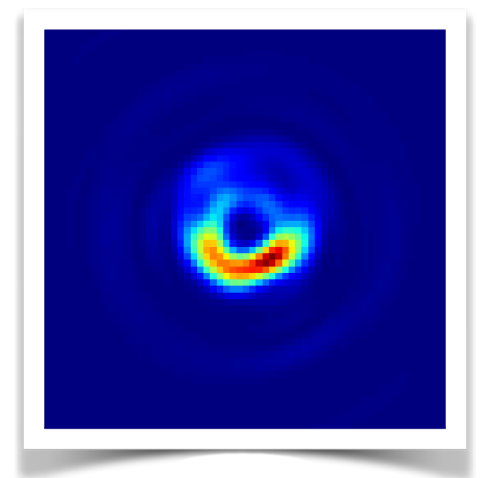
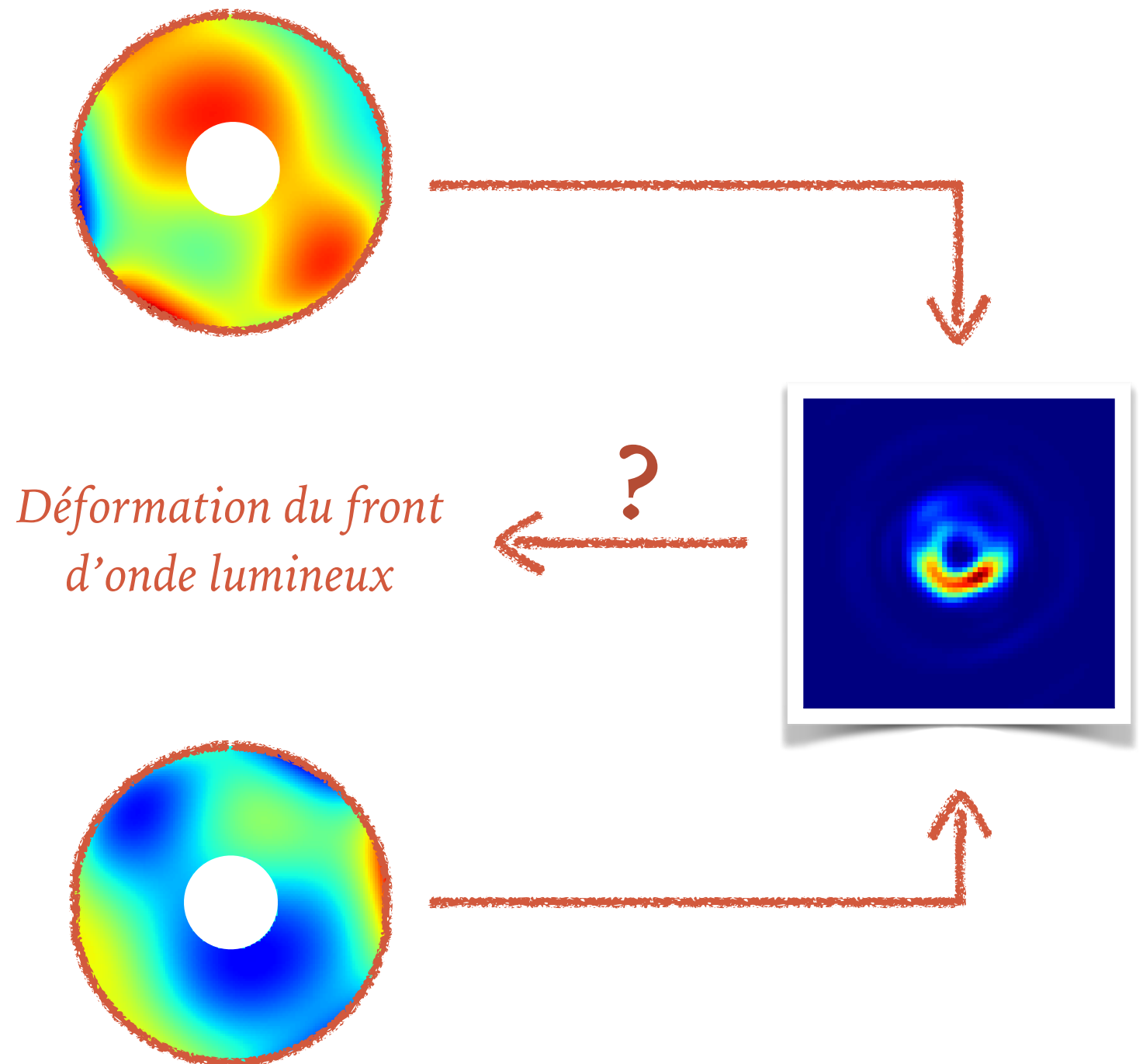


Image perturbée

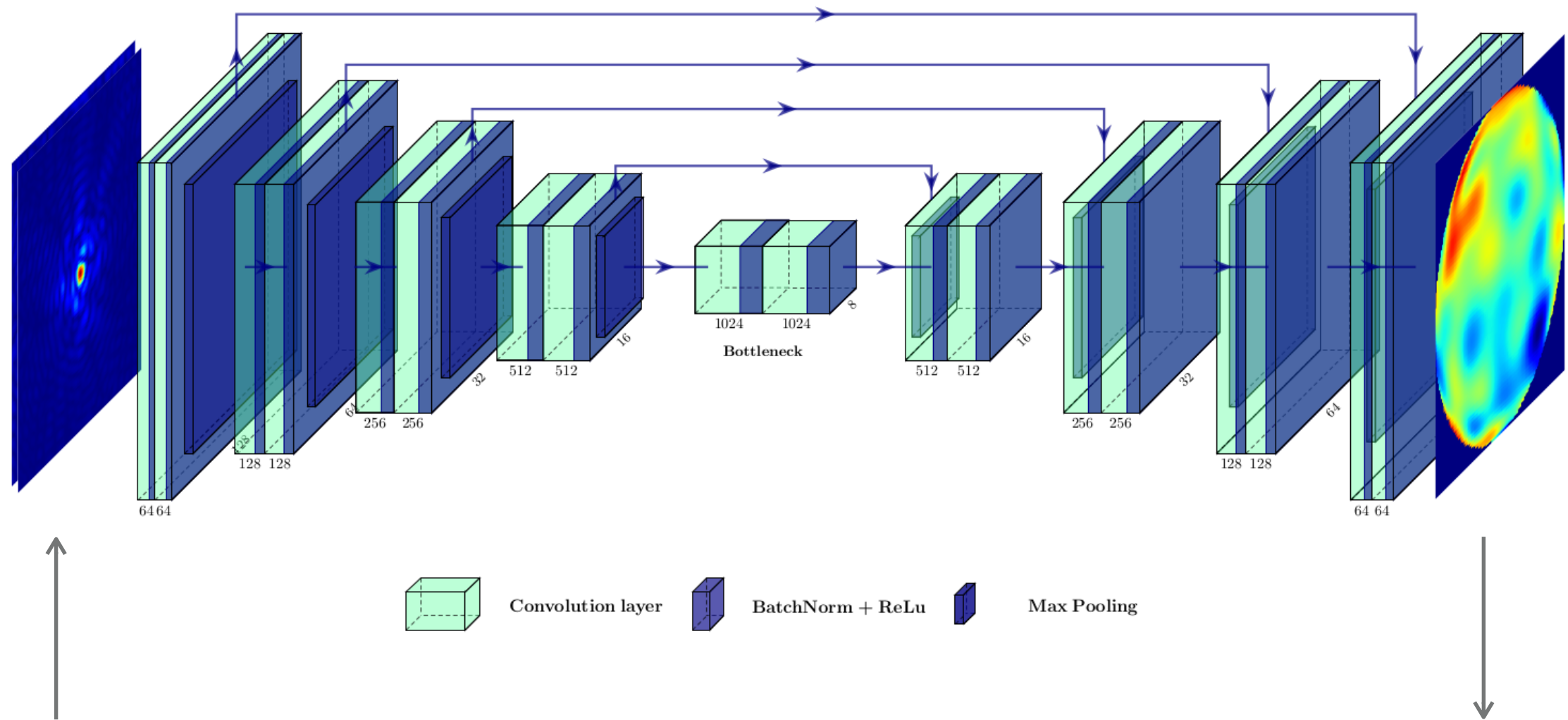
ALLER AU-DELÀ DU SIMPLE RECENTRAGE?

- **But:** retrouver les aberrations qui ont créé l'image enregistrée, afin de les corriger
- **Problème:** relation complexe et partiellement indéterminé (pas de solution unique)
- **Solution:** l'apprentissage profond peut apprendre la relation complexe entre image et déformation du front d'onde lumineux



CONTRÔLE DE L'INSTRUMENT PAR APPRENTISSAGE PROFOND

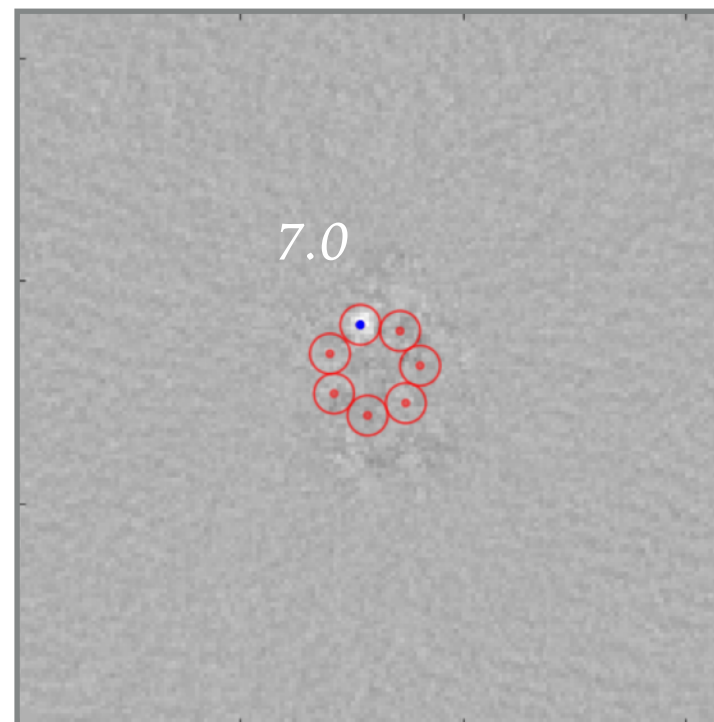
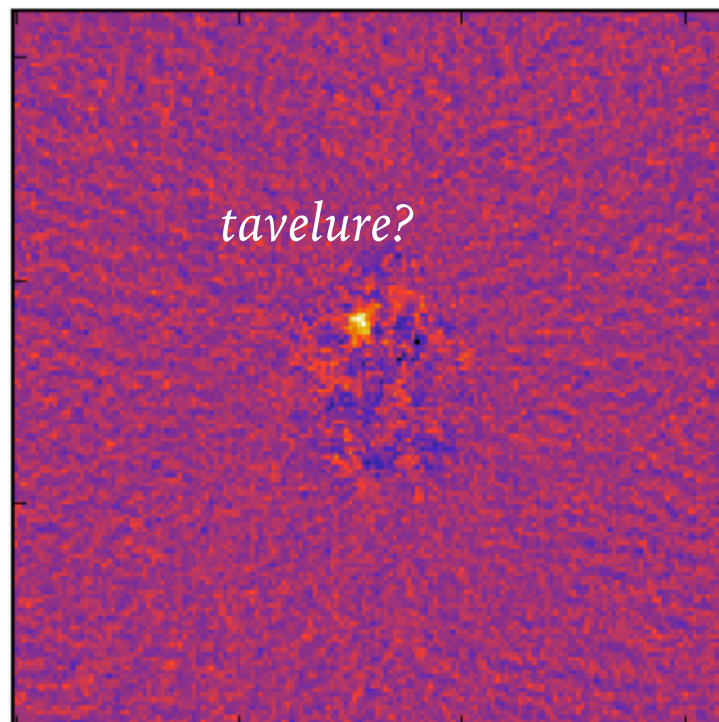
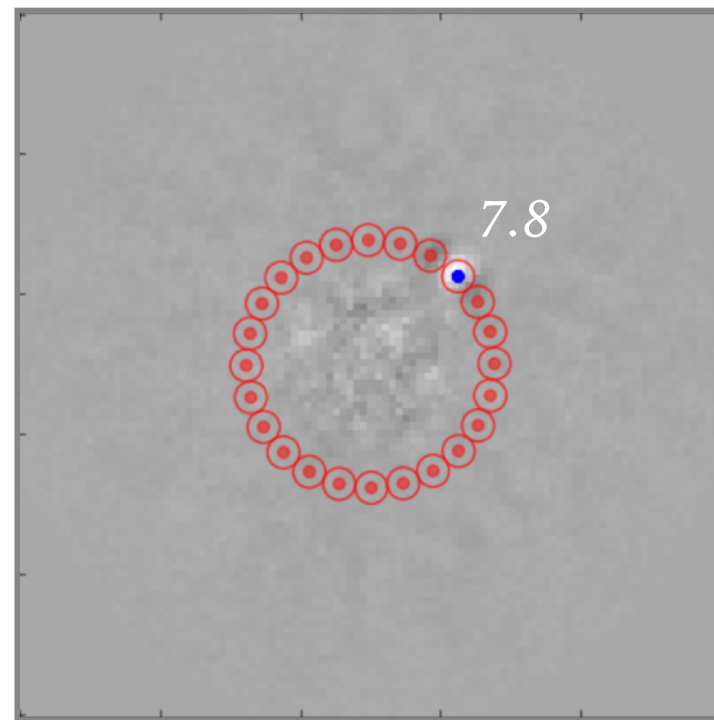
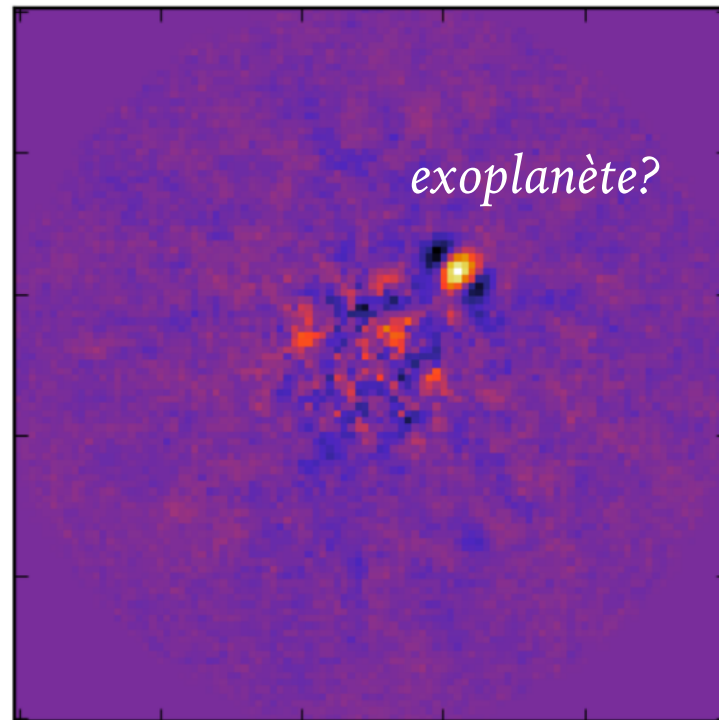
Réseau profond entraîné sur des exemples



*Images de la caméra
coronographique*

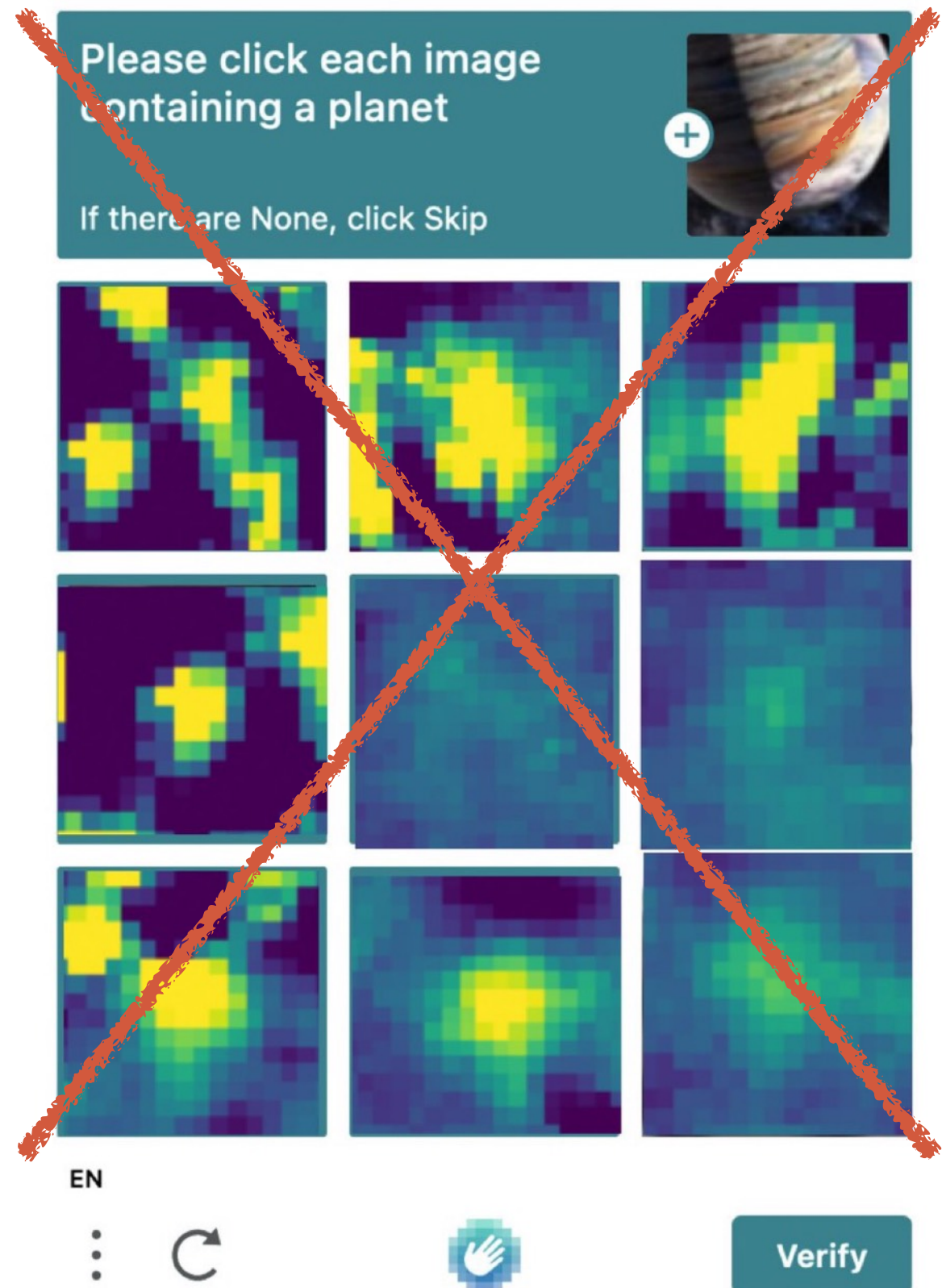
*Corrections à ajouter
au miroir déformable*

PILIER #4: TRAITEMENT D'IMAGE



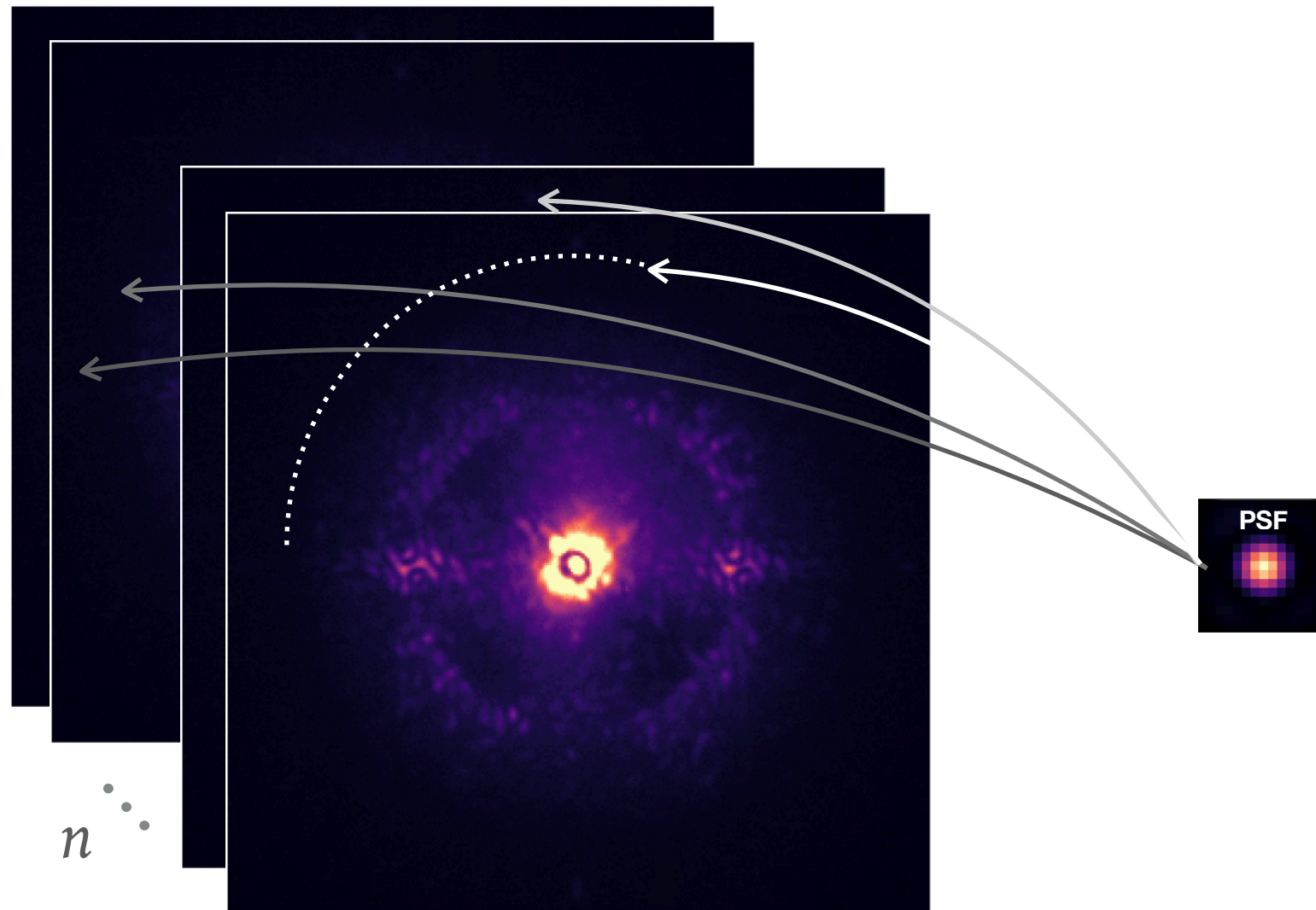
ADAPTER LE PROBLÈME POUR DE L'APPRENTISSAGE SUPERVISÉ?

- Problème: créer des milliers de données étiquetées
 - pas assez de planètes connues
 - oeil humain pas suffisant



ADAPTER LE PROBLÈME POUR DE L'APPRENTISSAGE SUPERVISÉ?

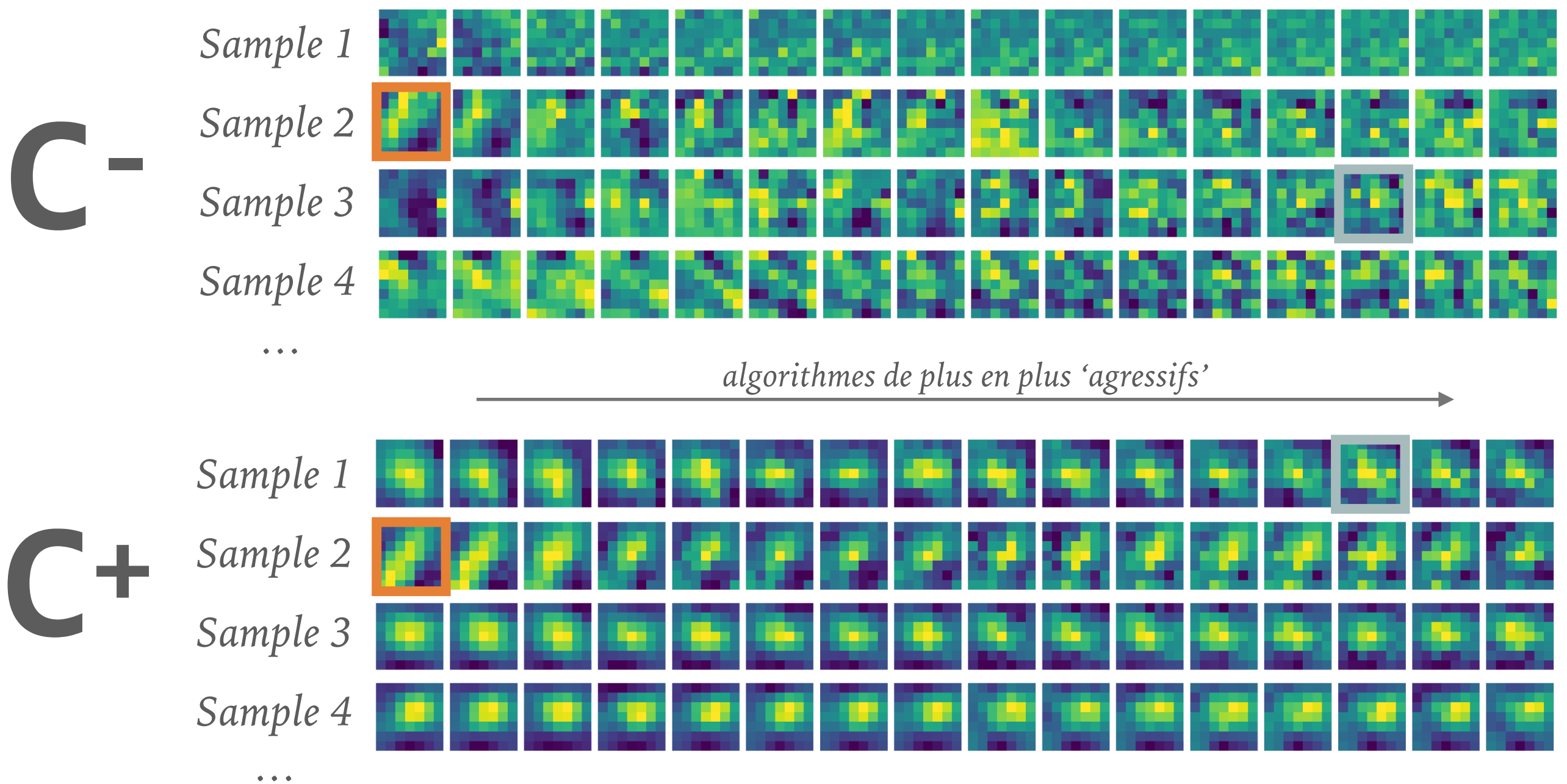
- Problème: créer des milliers de données étiquetées
- Solution: injection de fausses planètes, suivant trajectoire



UN PETIT COUP DE POUCE POUR L'ENTRAÎNEMENT DU RÉSEAU

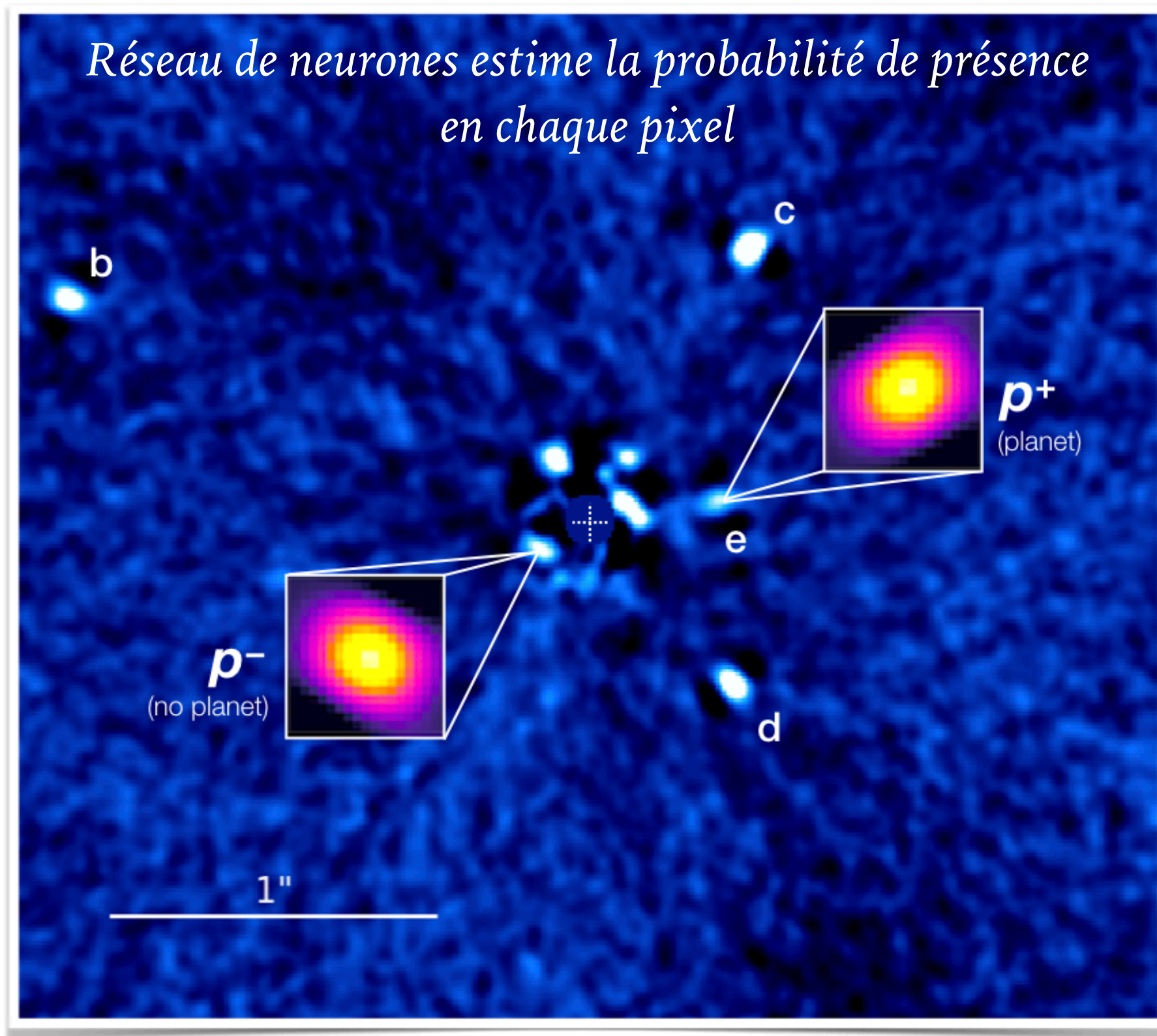
.....

- Pré-traitement des données avec des algorithmes 'classiques'
- Extraction d'images: soit avec planète (C+), soit sans (C-)

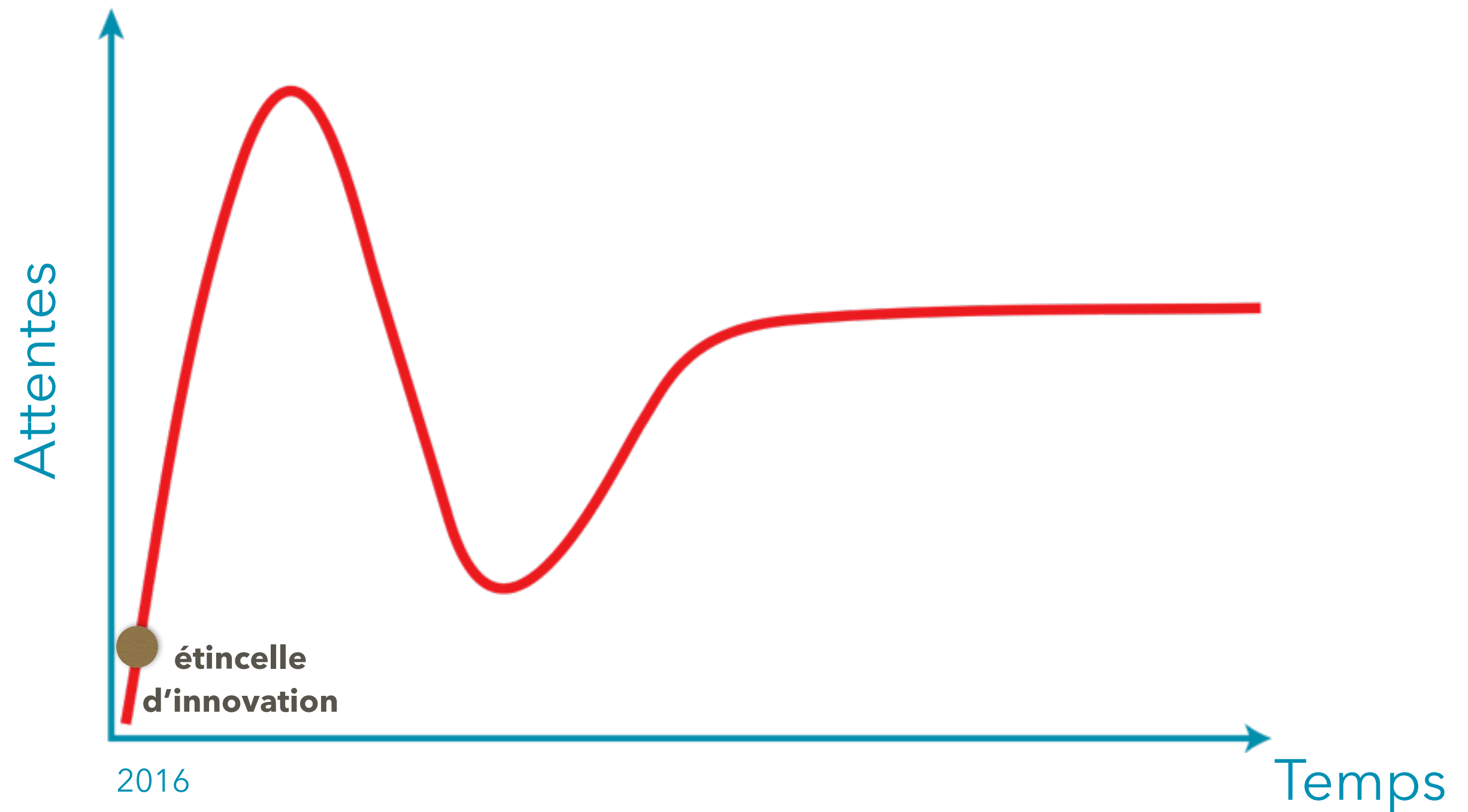


APRÈS ENTRAÎNEMENT...

.....

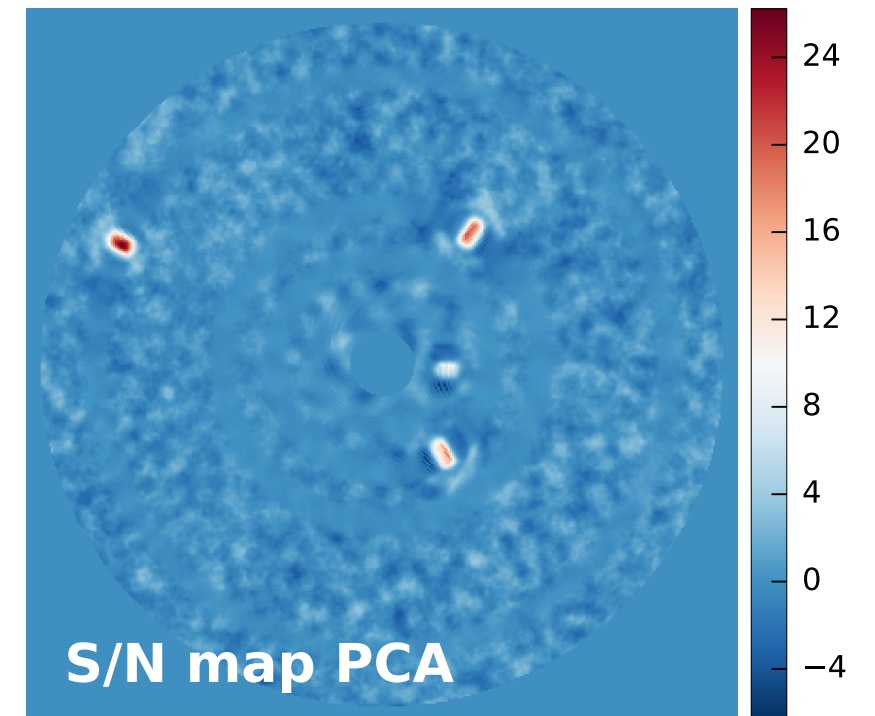
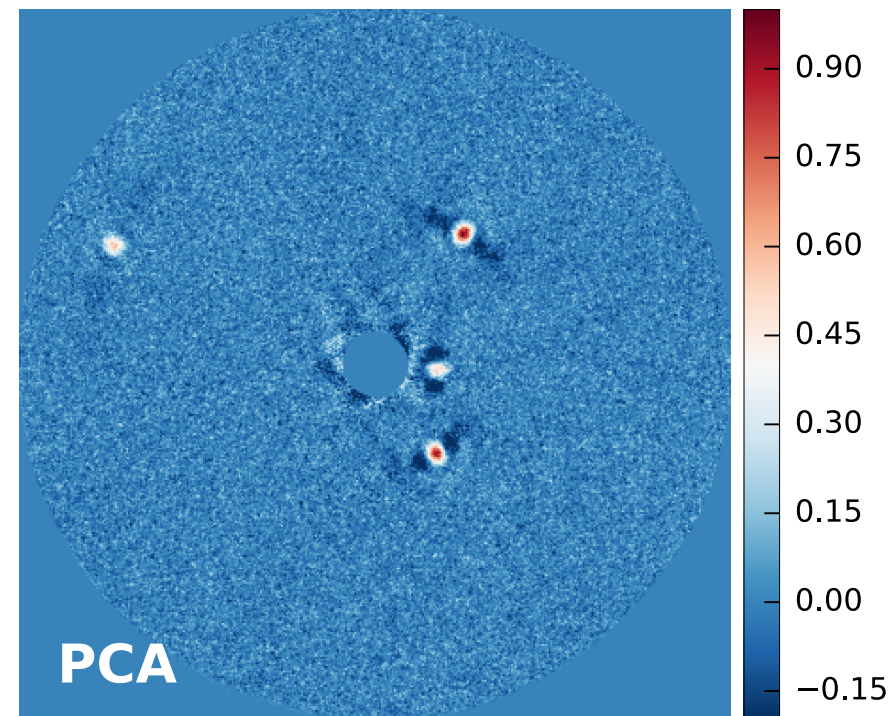


INTERLUDE #1: LE CYCLE DE LA HYPE

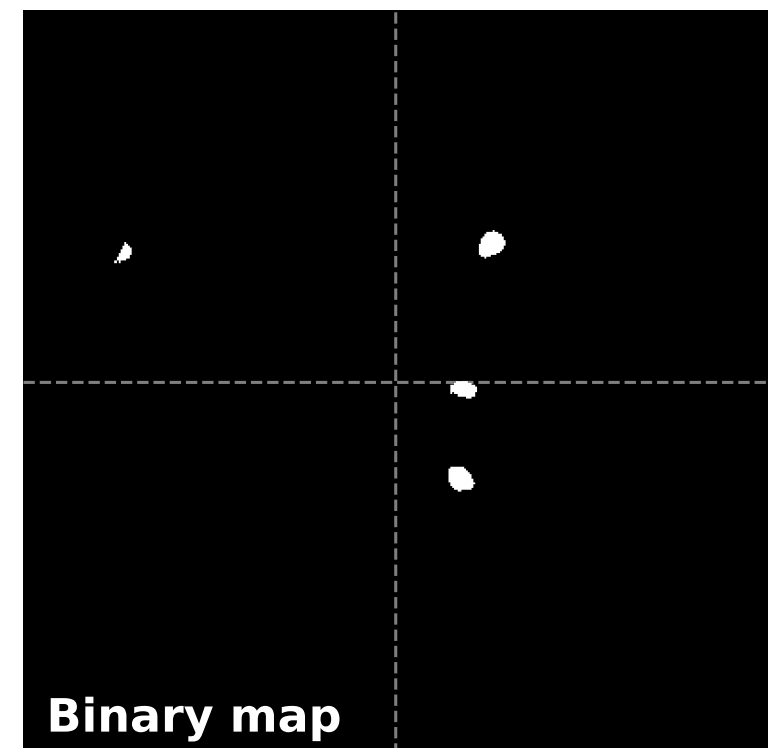
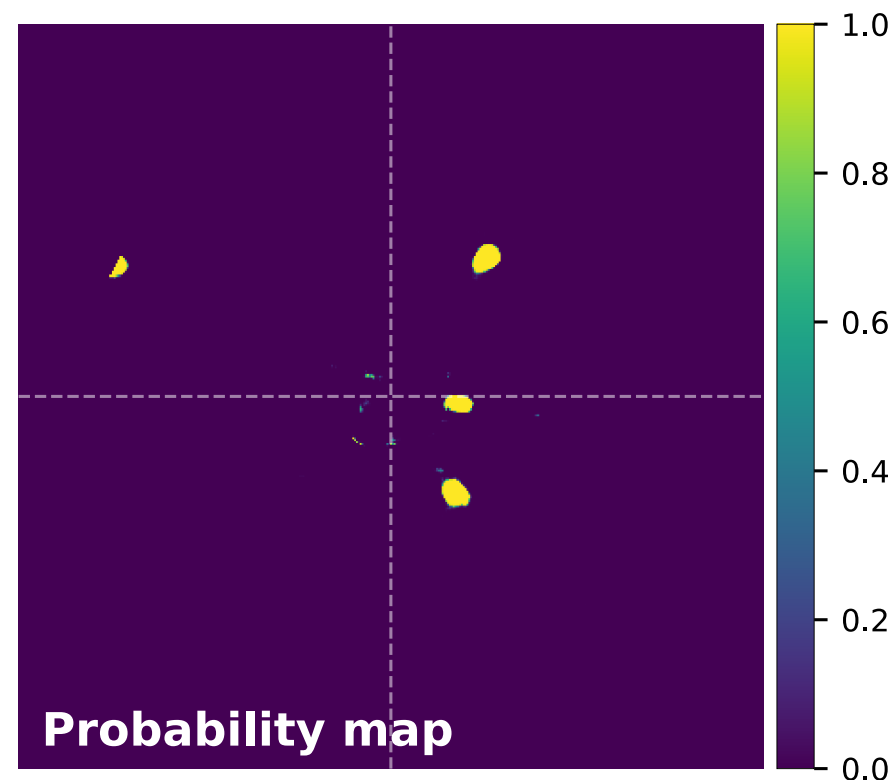


TESTS SUR DES CAS RÉELS

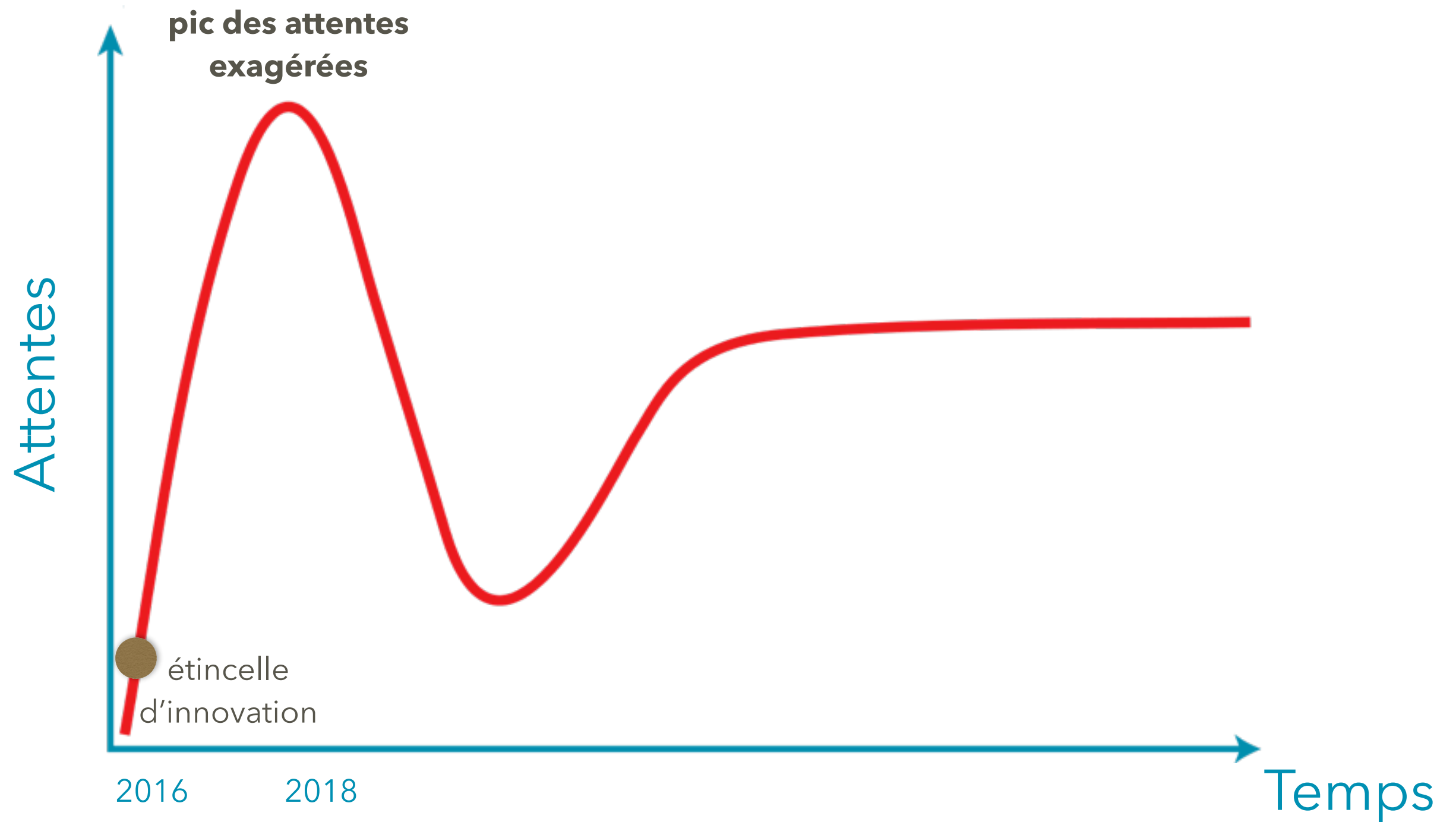
Résultat d'un
traitement d'image
classique



Résultat avec
entraînement
supervisé

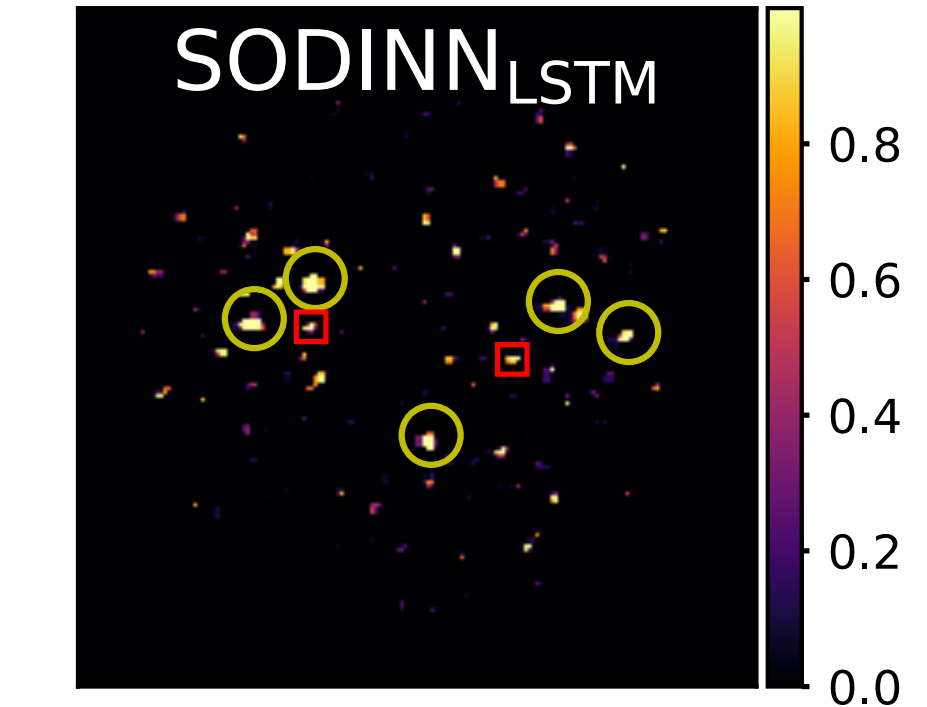
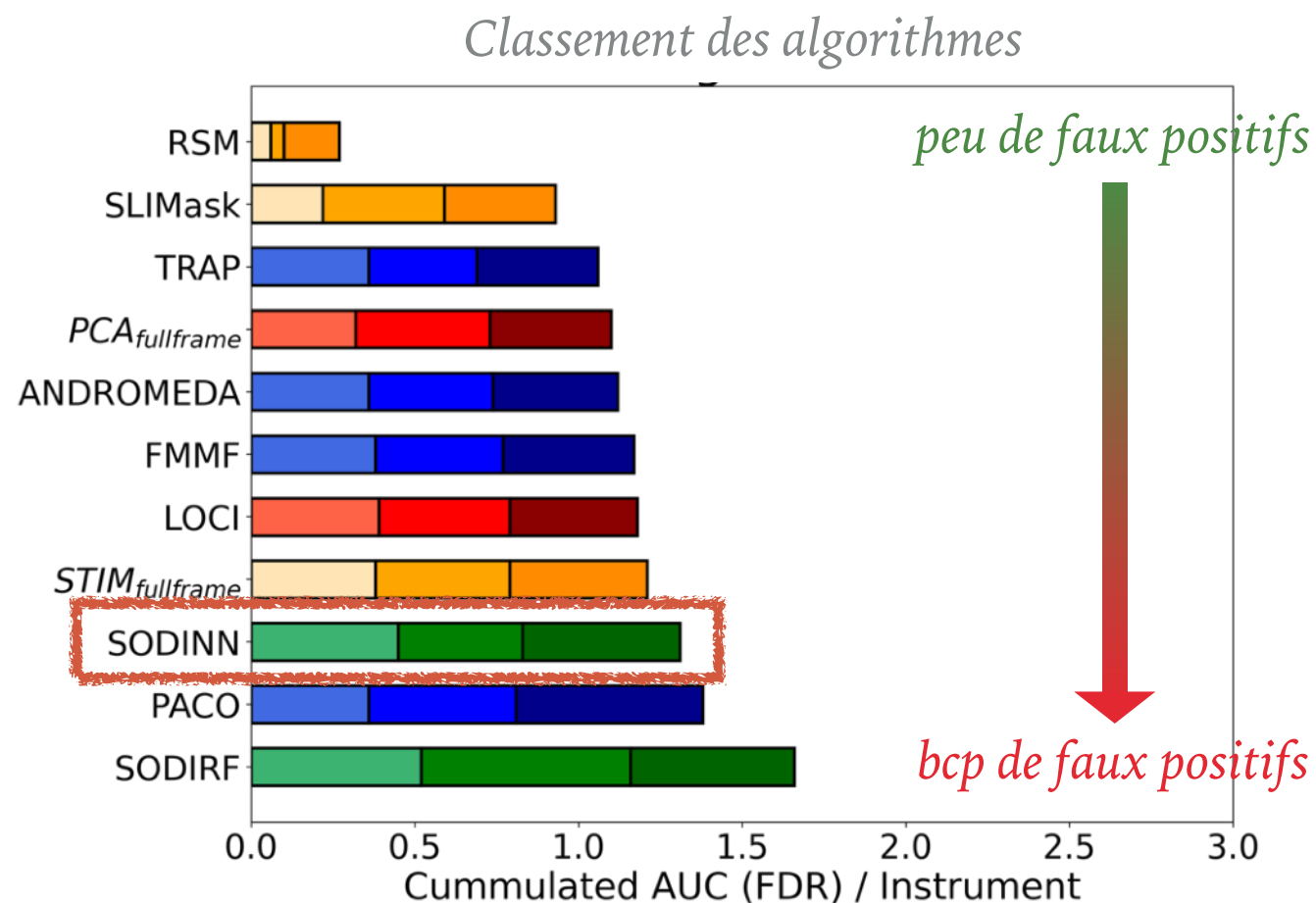


INTERLUDE #2: LE CYCLE DE LA HYPE



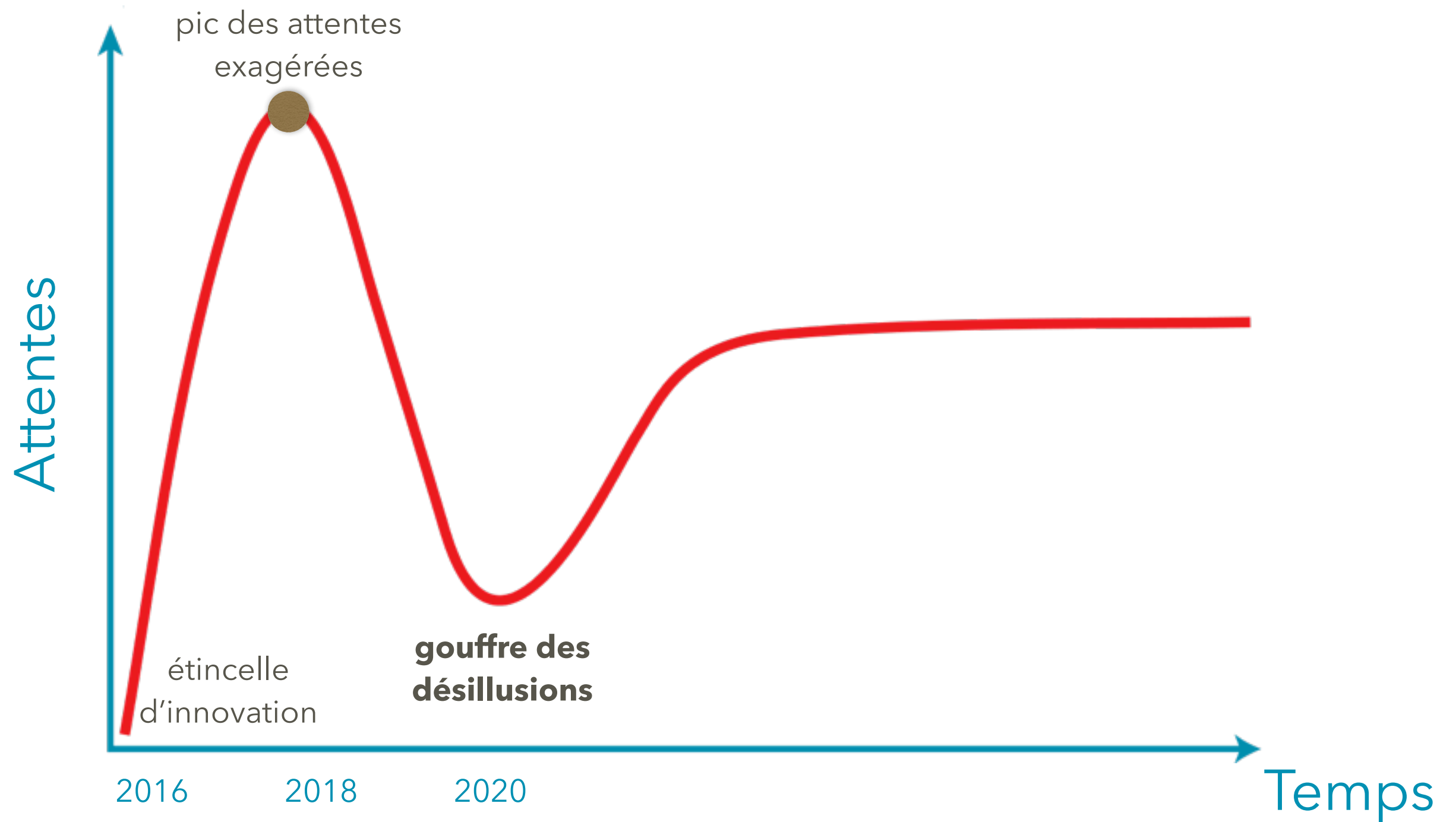
COMPÉTITION D'IMAGERIE À HAUT CONTRASTE

- Effort communautaire pour évaluer les algorithmes
 - défi: détection de planètes injectées dans divers jeux de données
- Apprentissage supervisé mal classé: trop de faux positifs!!!



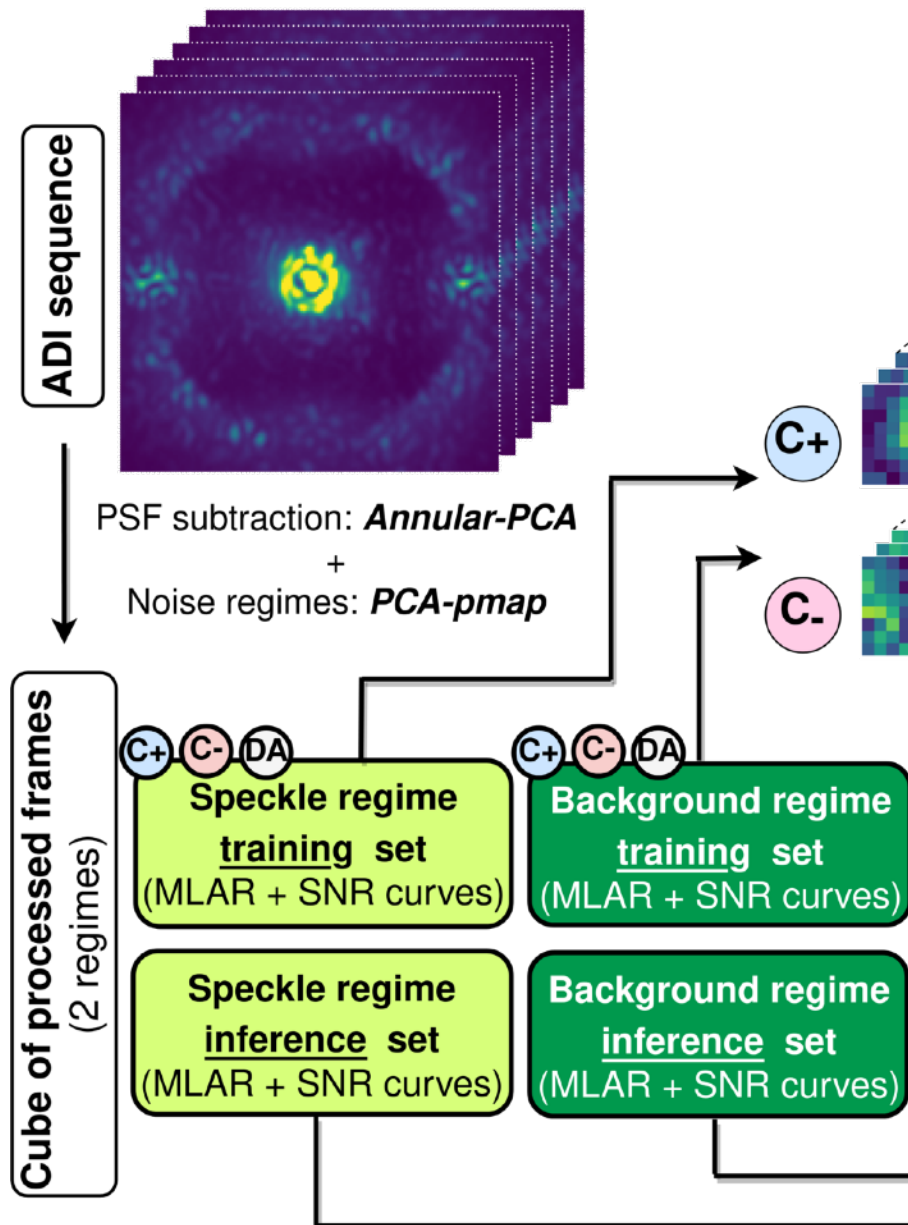
Un exemple où notre algorithme échoue

INTERLUDE #3: LE CYCLE DE LA HYPE

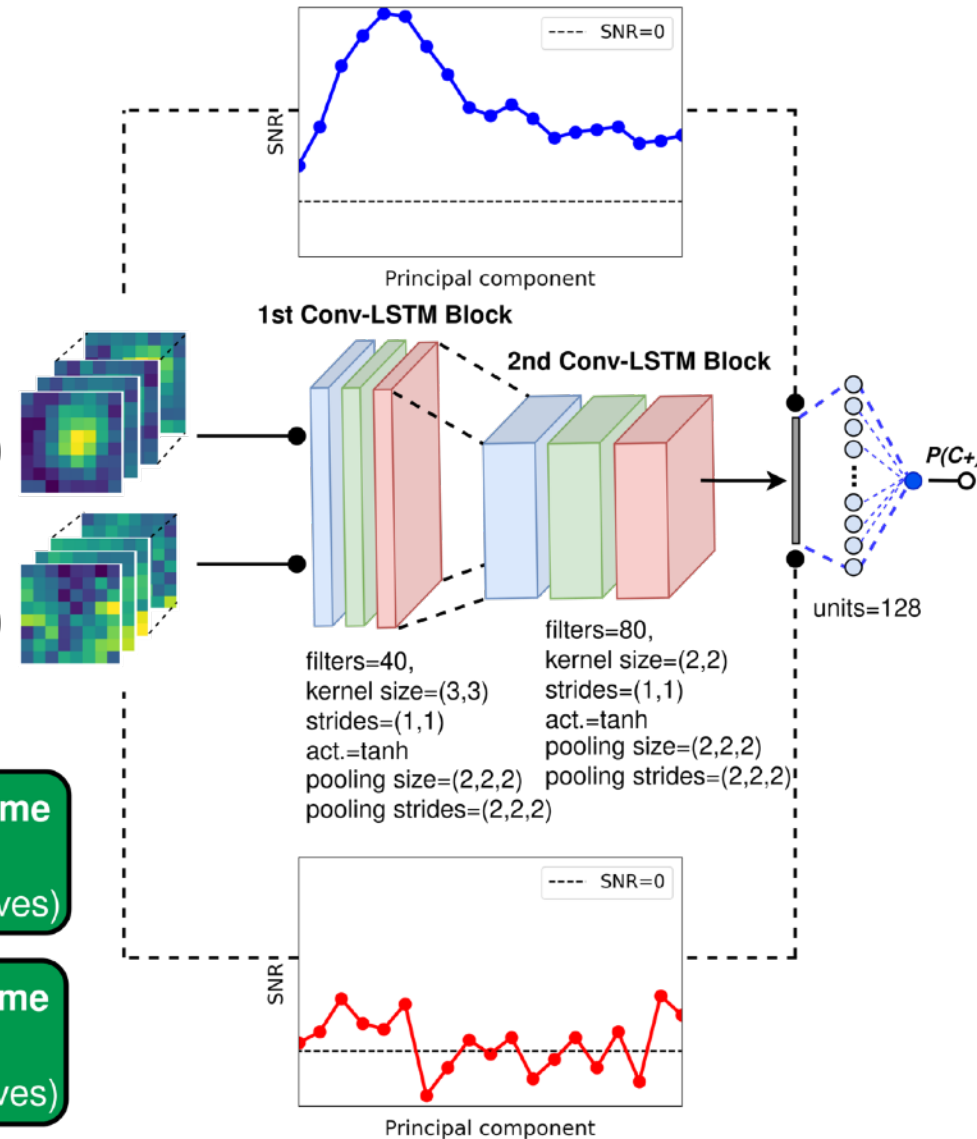


APPRENDRE DE SES ERREURS...

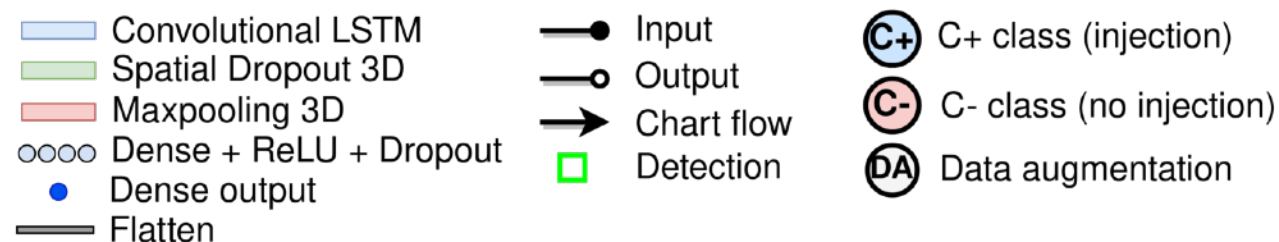
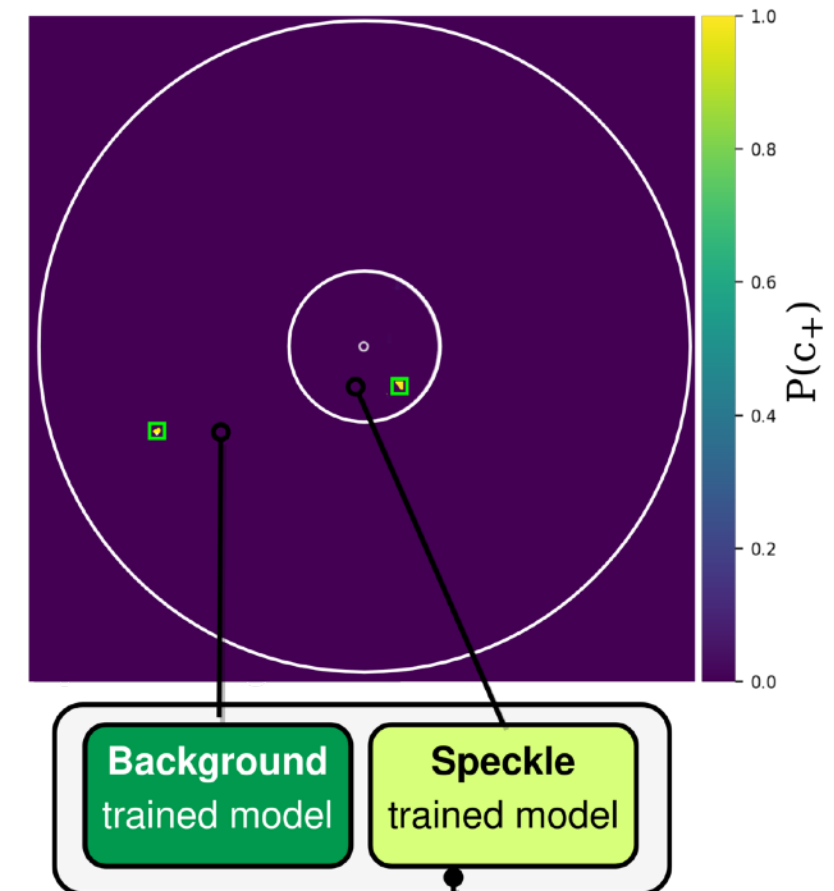
I. Generate training sets



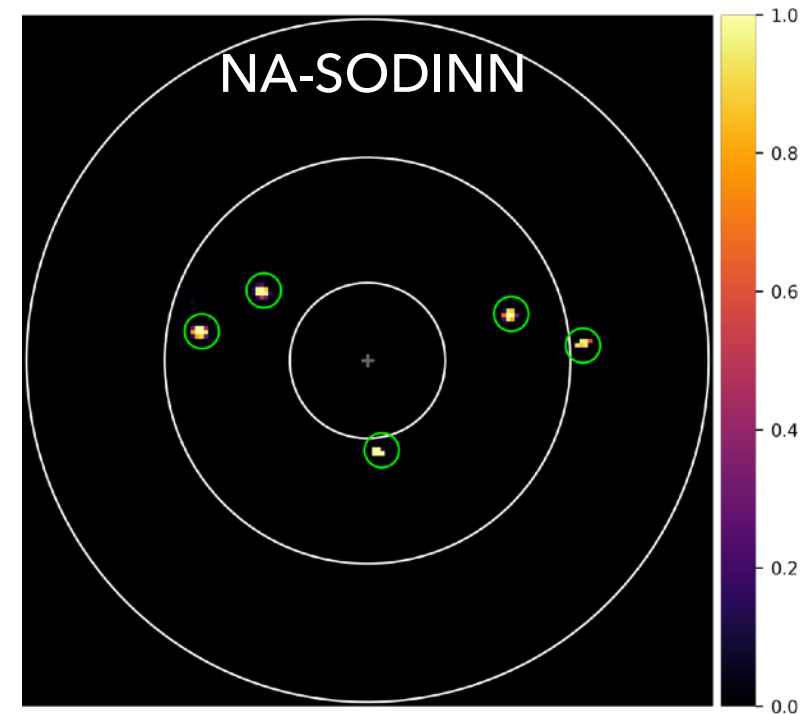
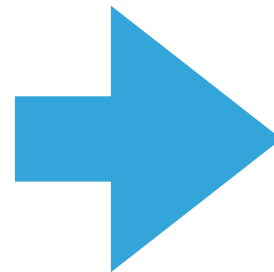
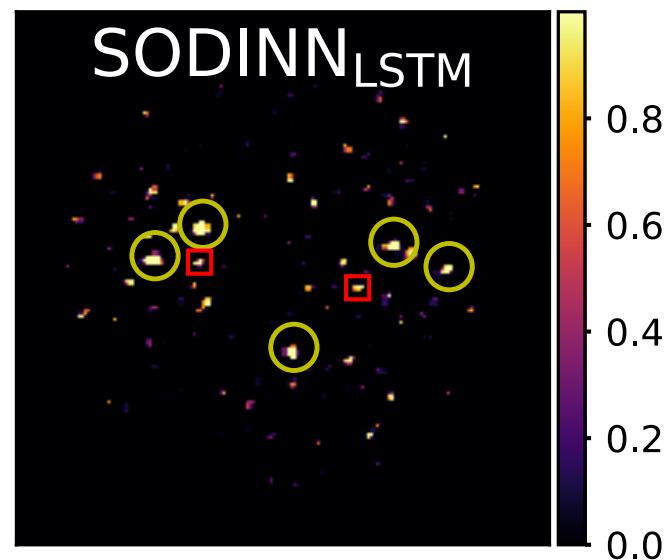
II. Train models



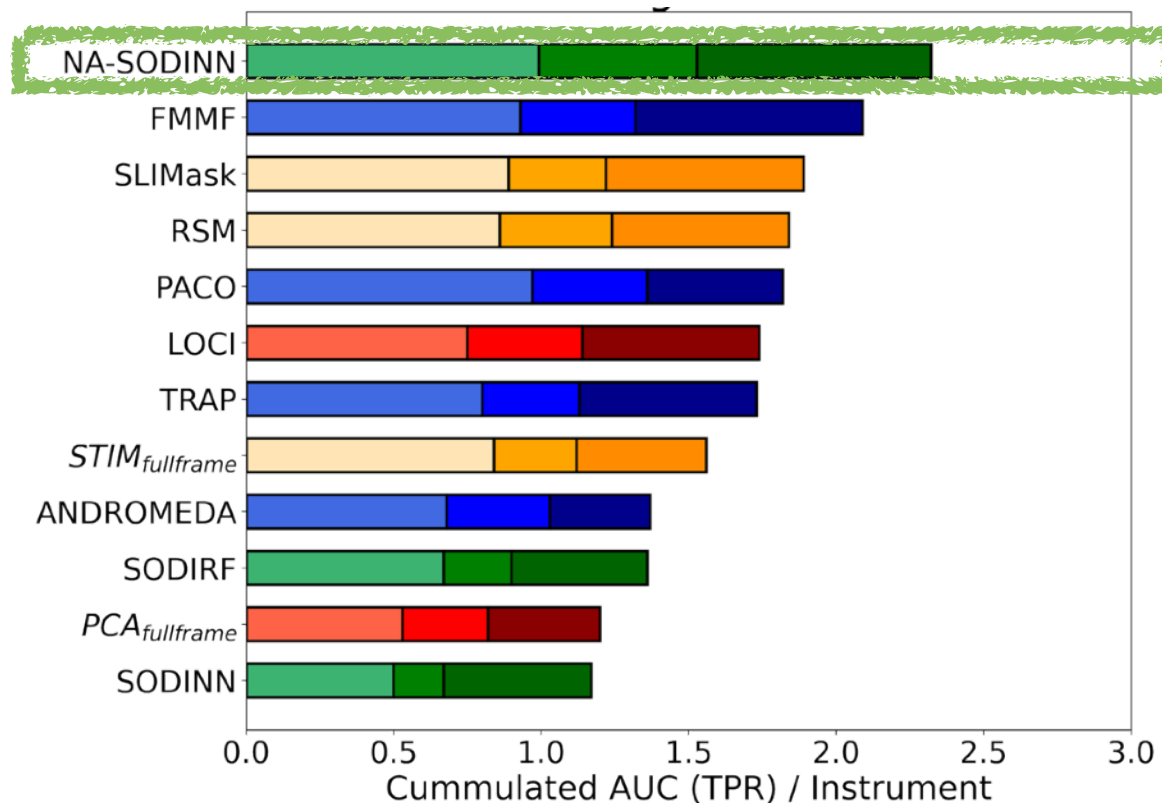
III. Probability map



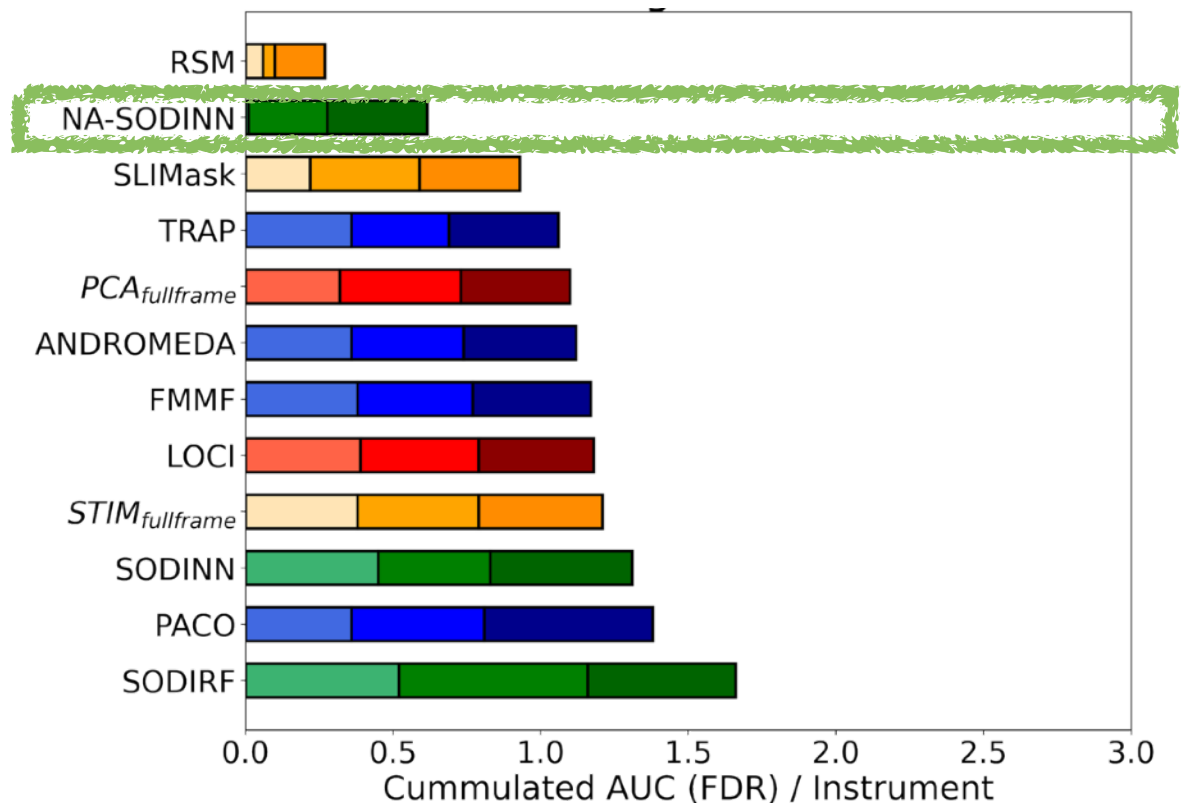
NOUVELLE SOUMISSION À LA COMPÉTITION D'IMAGERIE



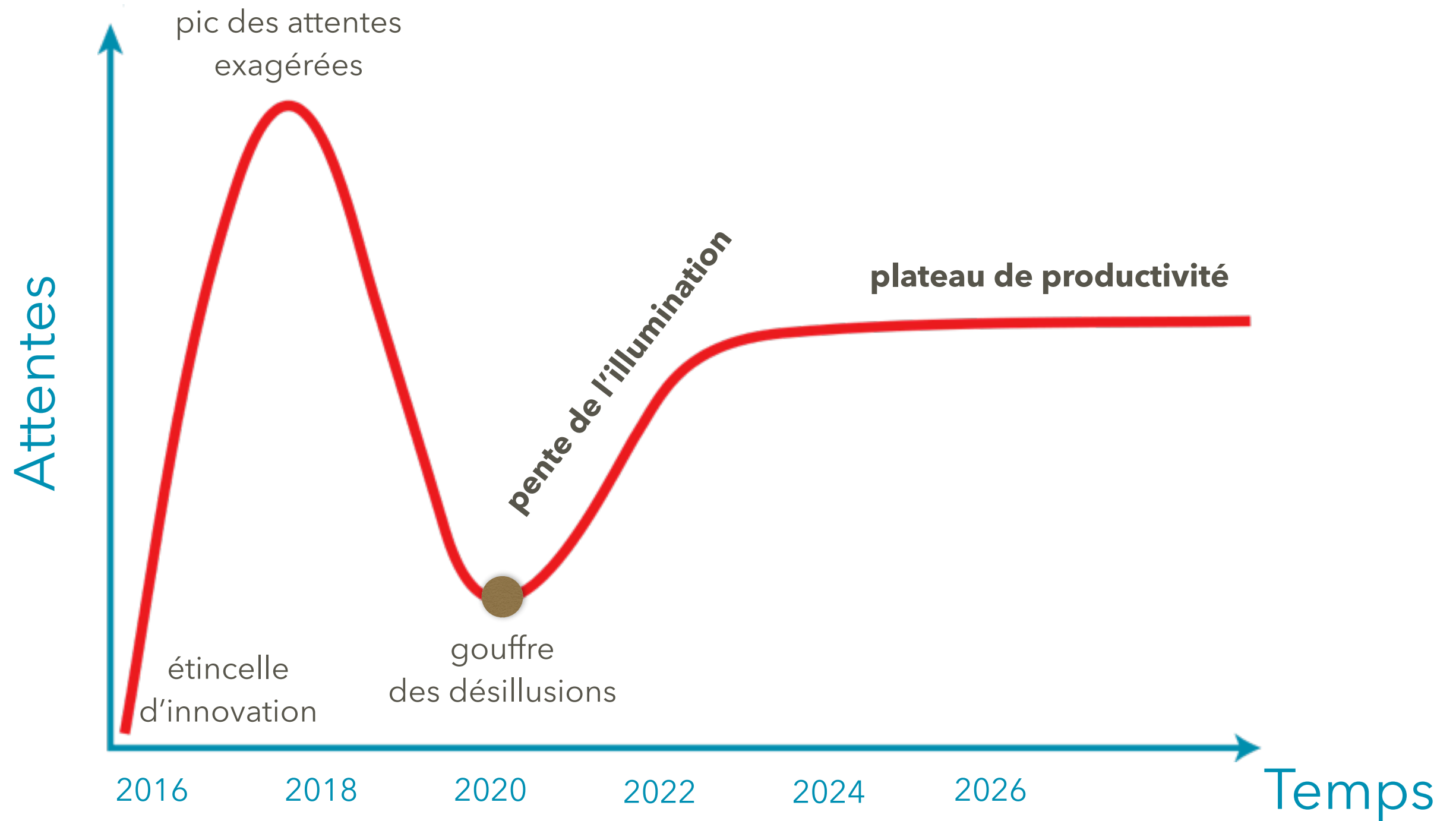
Classement (vrais positifs)



Classement (faux positifs)

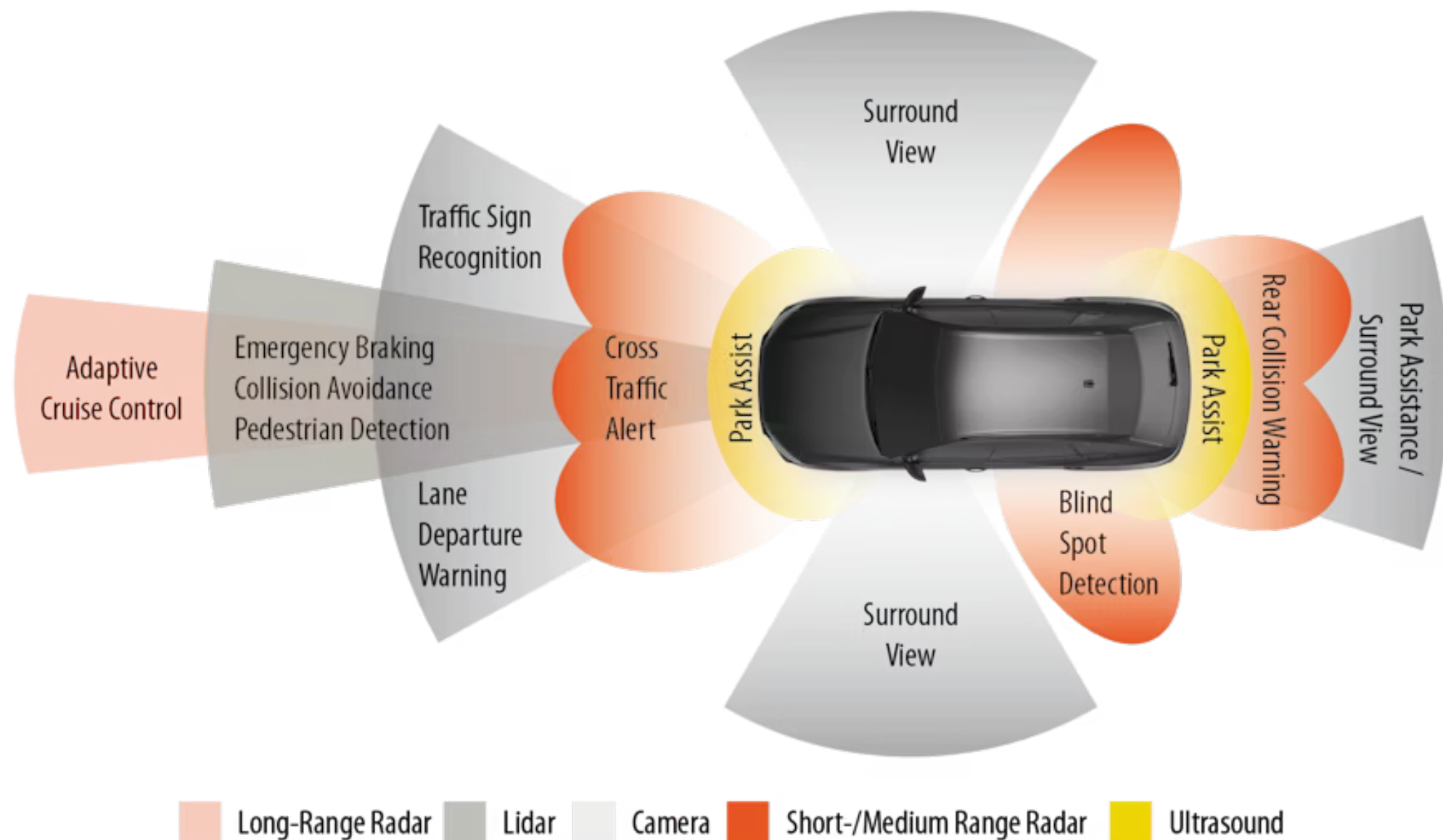


VERS UN FUTUR PRODUCTIF...



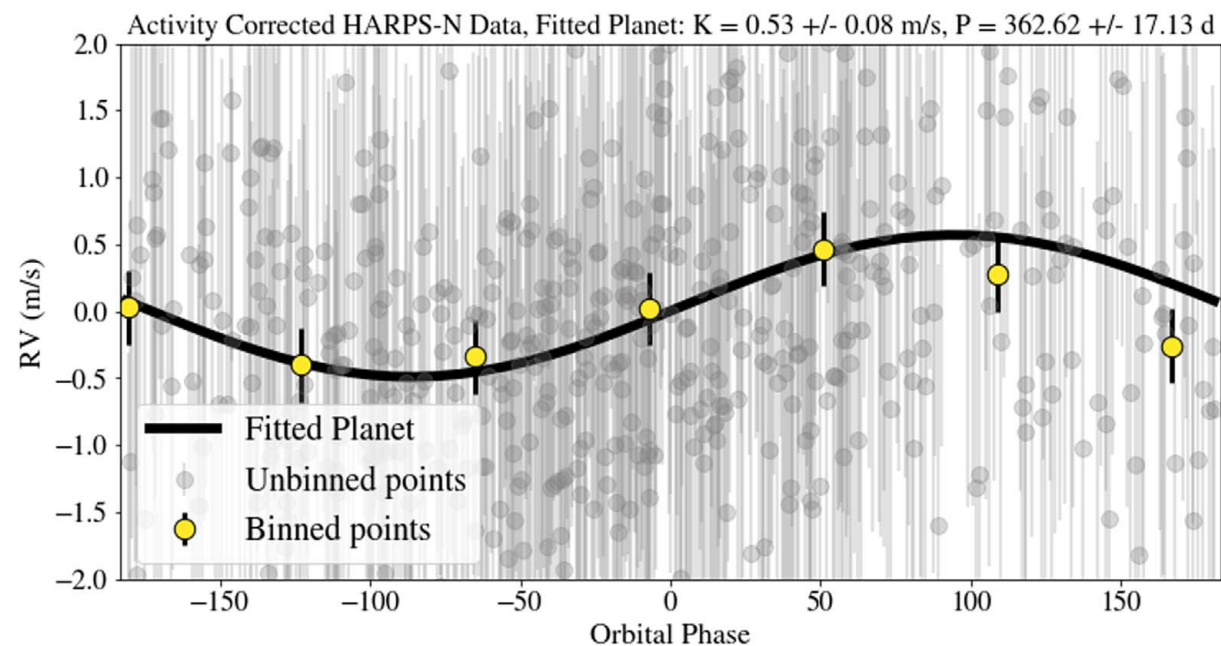
FUTUR: FUSION DE SENSEURS

- Caméra scientifique, optique adaptative, station météo, etc
- Défi majeur: comment éviter le phénomène boîte noire?



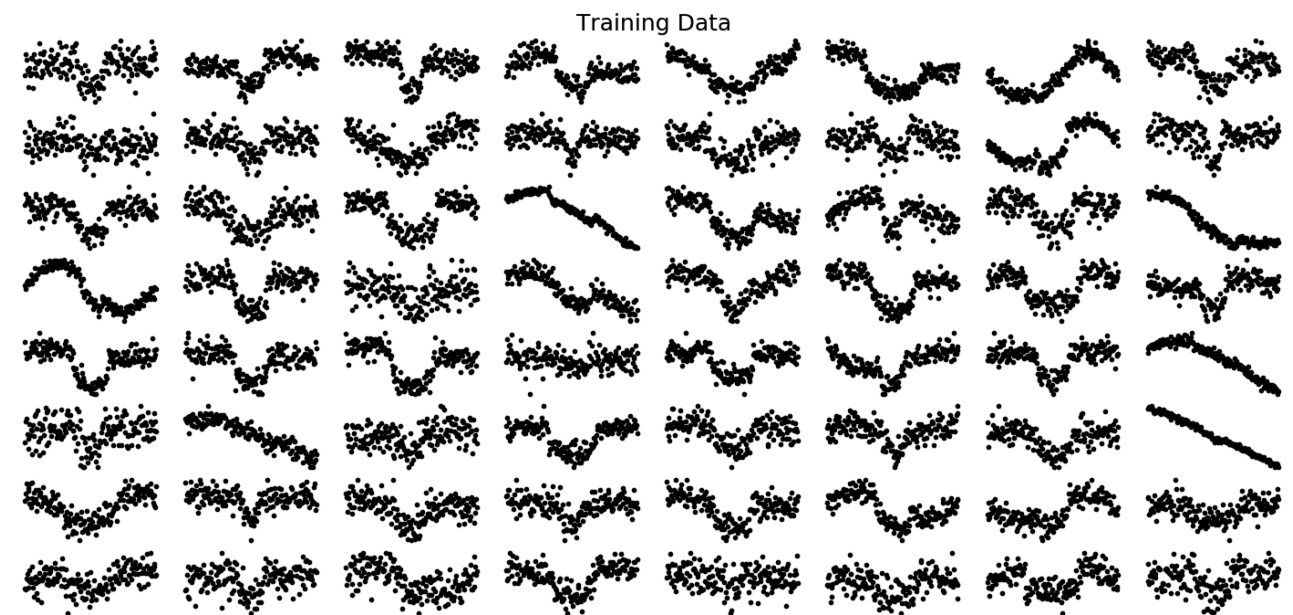
APPRENTISSAGE PROFOND AUSSI POUR MÉTHODES INDIRECTES!

Vitesses radiales



*Recherche de signaux périodiques dans du bruit,
avec apprentissage de la structure du bruit
(activité stellaire)*

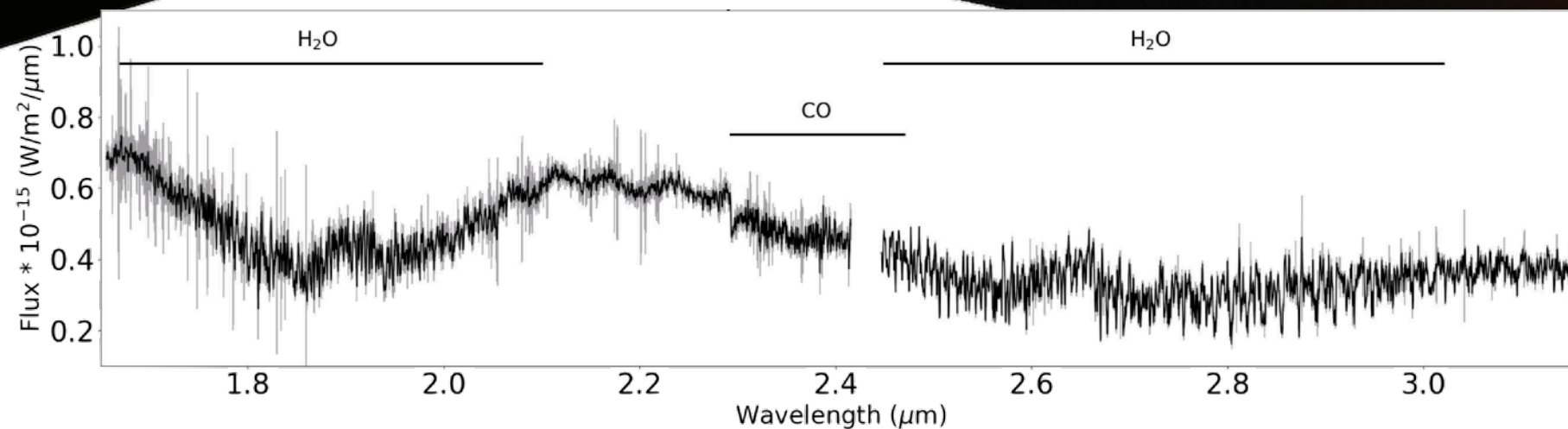
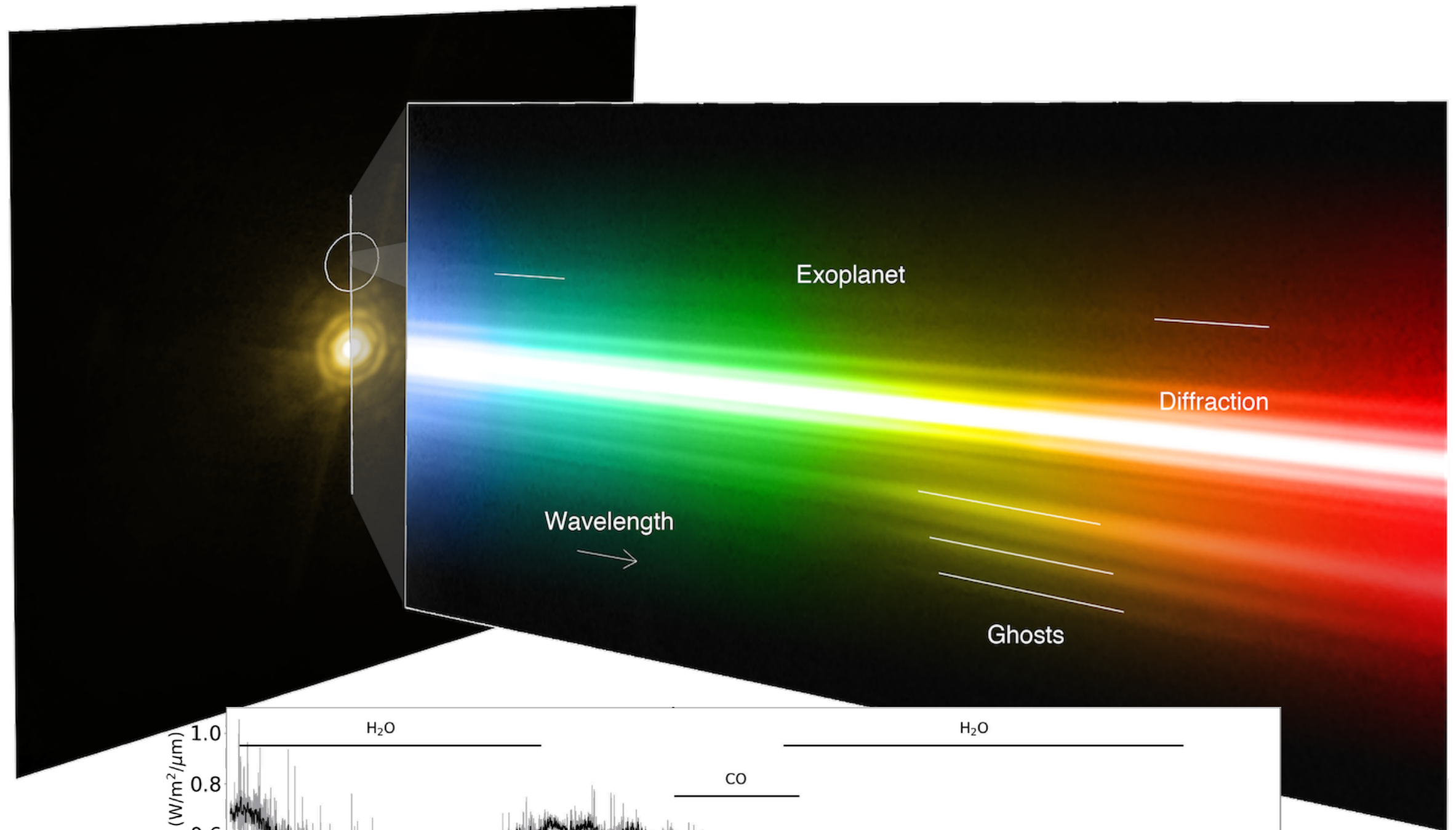
Transits



*Apprentissage supervisé permet de s'affranchir
des variations instrumentales et des bruits
d'activité stellaire*

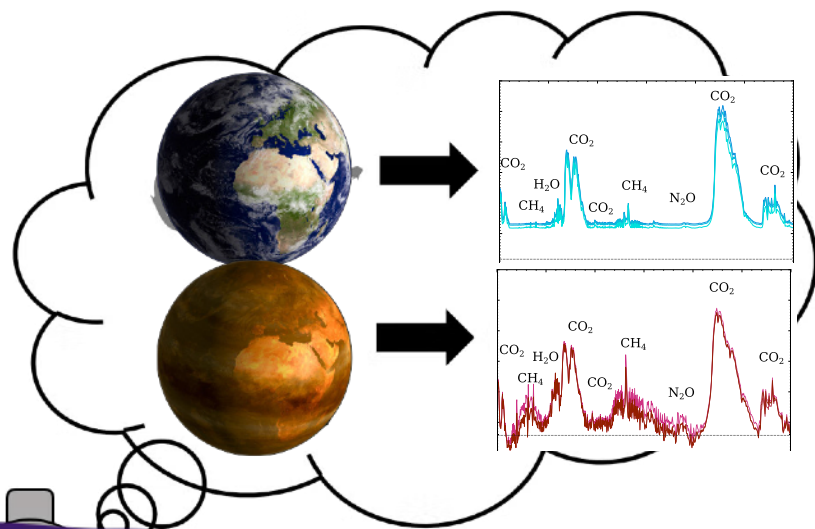
DERNIÈRE ÉTAPE: CARACTÉRISATION PAR SPECTROSCOPIE

.....

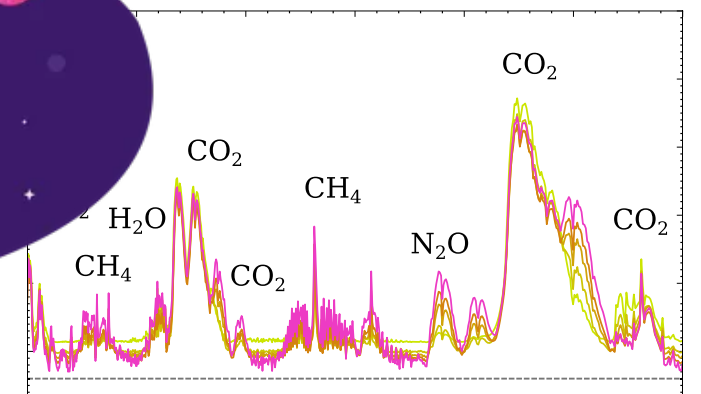
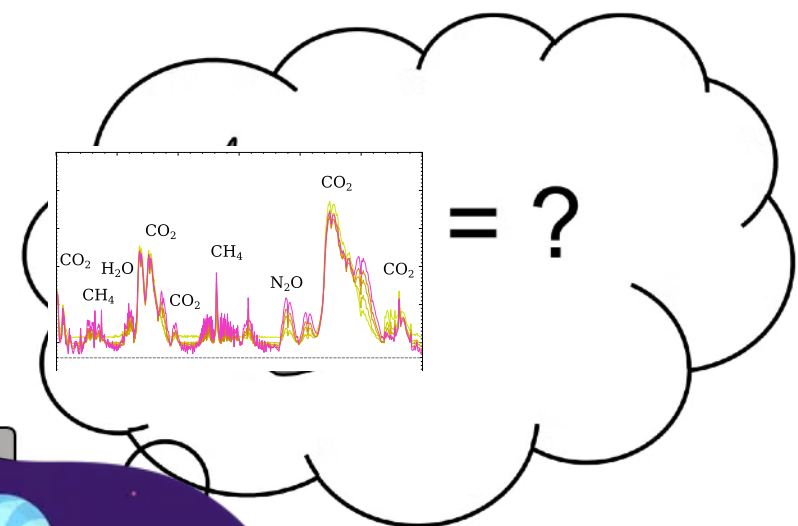


PROBLÈME INVERSE: RETROUVER LES CAUSES D'UNE OBSERVATION

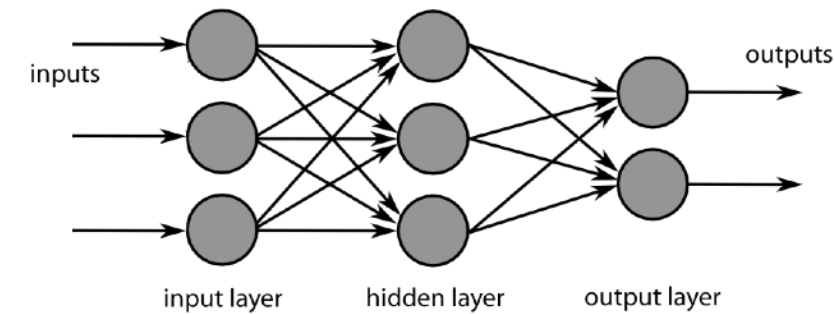
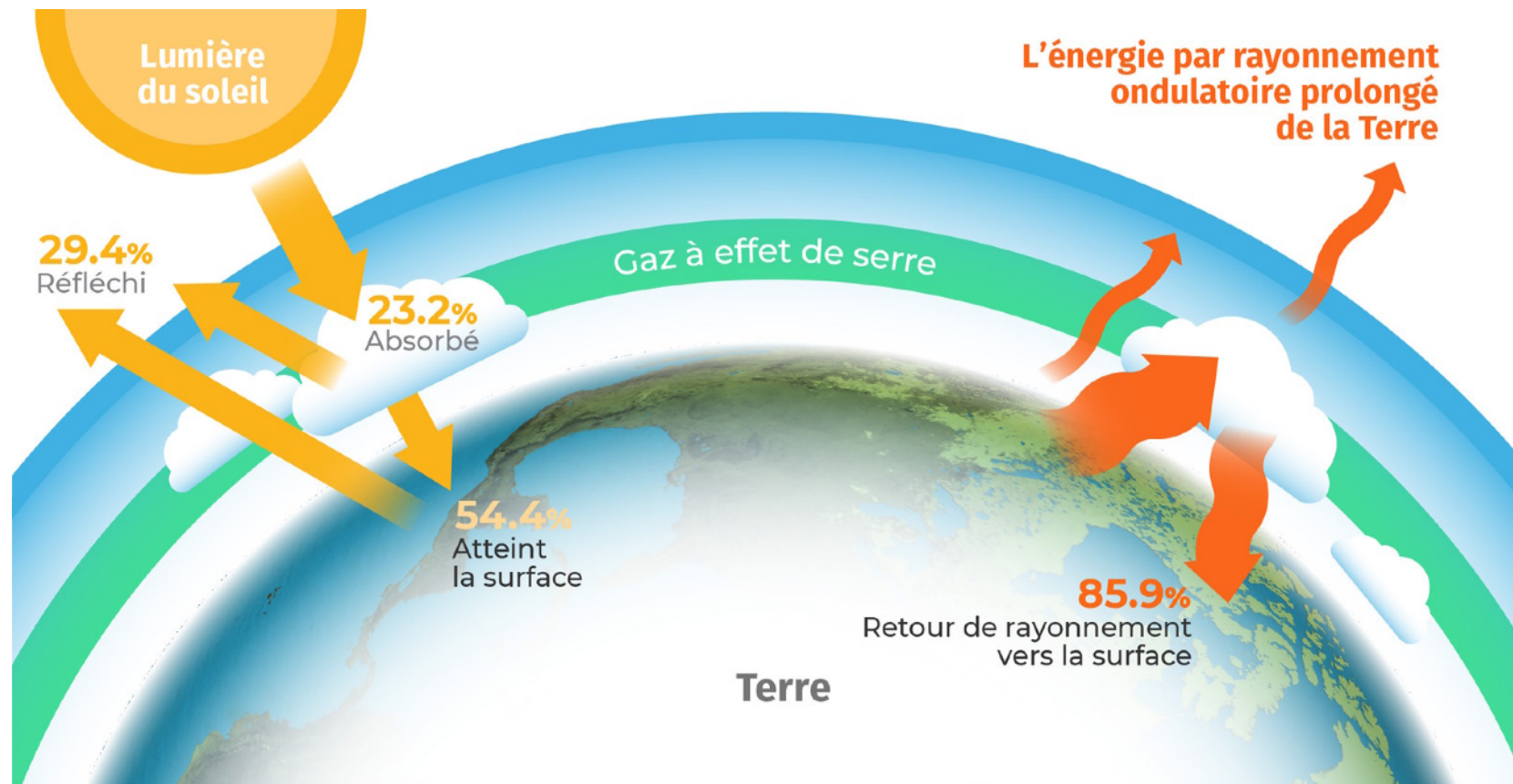
*Problème direct:
des causes vers les effets*



*Problème inverse:
des effets vers les causes*

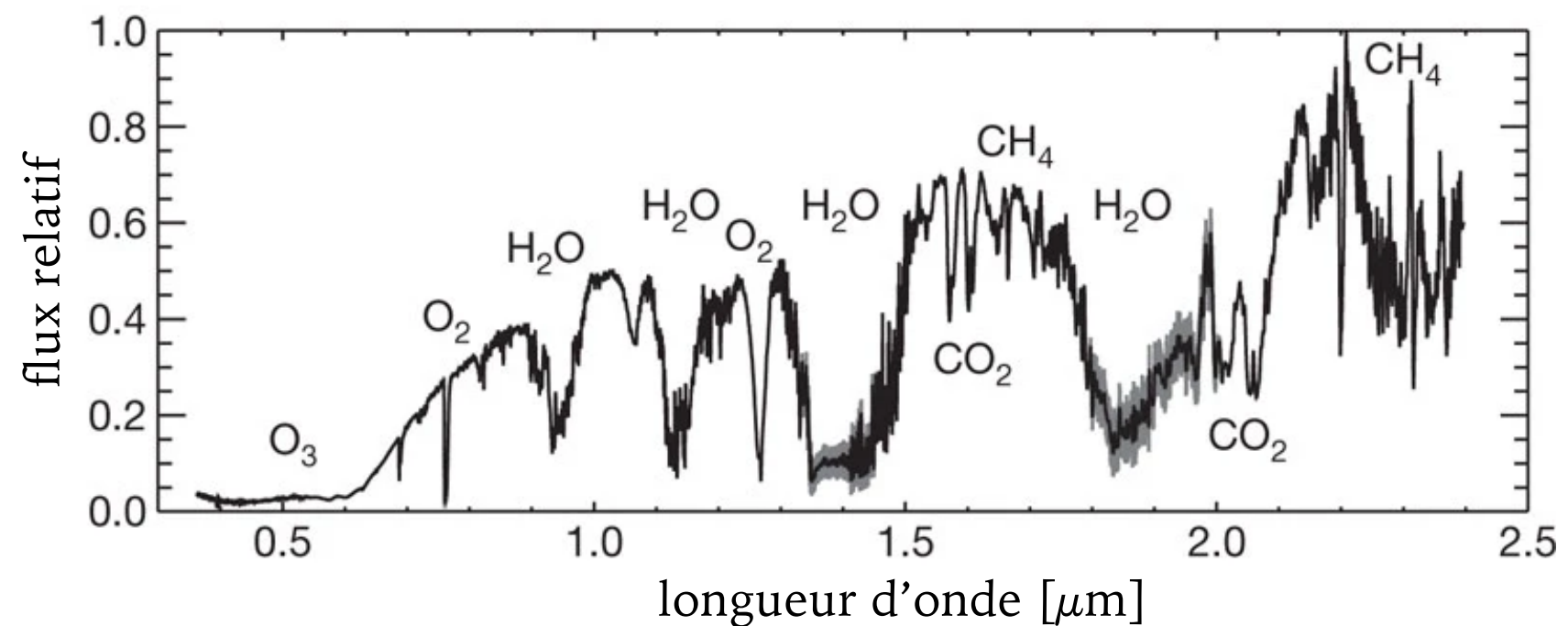


MODÉLISATION DES ATMOSPHÈRES PLANÉTAIRES



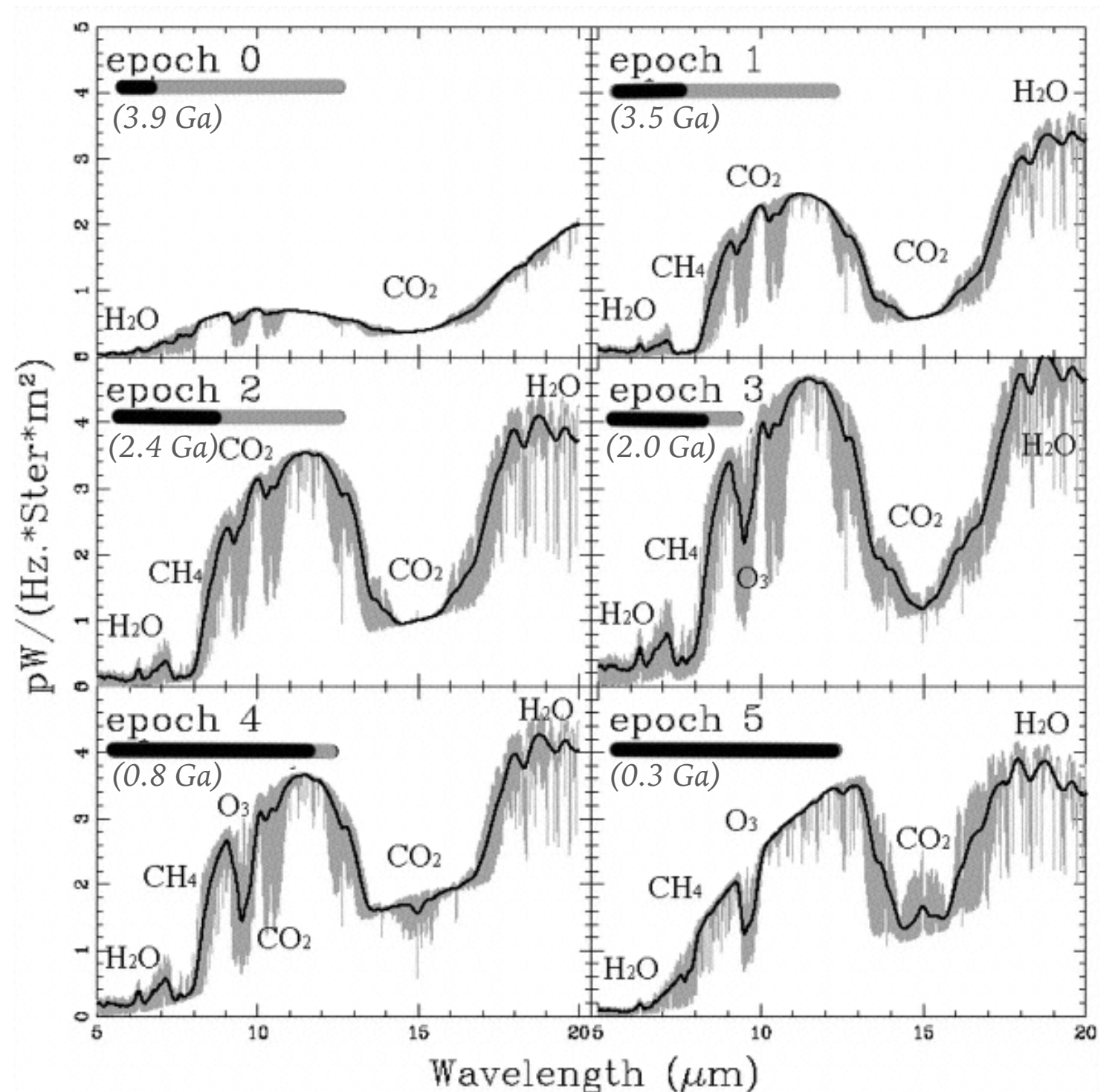
Problème inverse

*Problème direct
(description physique)*



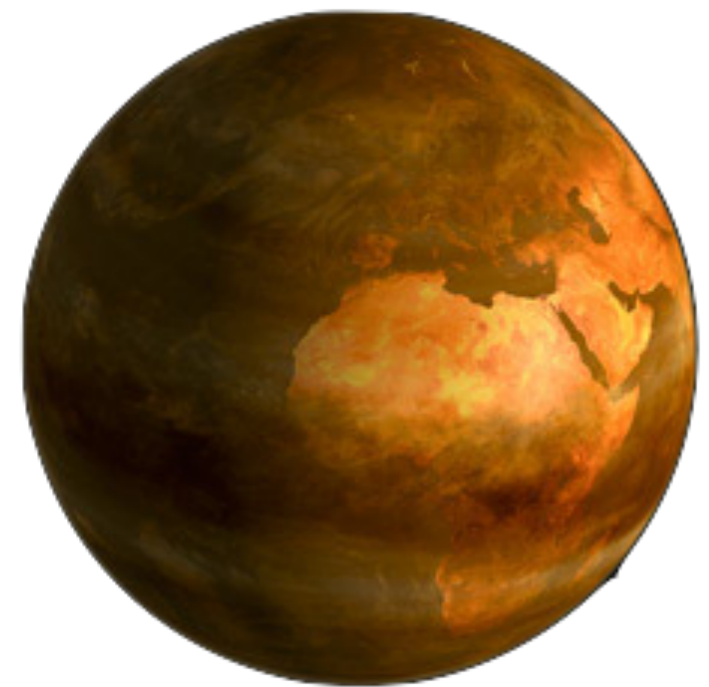
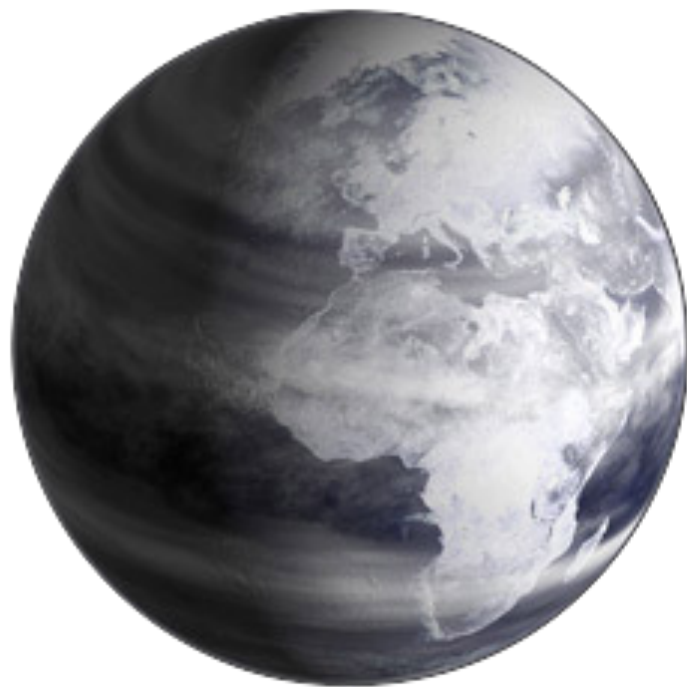
NOTRE PLANÈTE N'A PAS TOUJOURS ÉTÉ « HABITABLE »

- L'étude de notre système solaire et des exoplanètes nous permet de mieux comprendre le délicat équilibre de notre climat.
- Tâchons de garder notre Terre habitable pour les futures générations!



NOTRE TERRE EST PLUS IMPORTANTE QUE TOUTE EXOPLANÈTE

« Il y a de nombreuses raisons pour lesquelles transporter l'humanité vers une autre planète est impossible dans un futur immédiat. »



La plupart des astronomes s'efforcent de réduire leur empreinte carbone.

L'intelligence artificielle, comme tout autre outil, doit être utilisée avec responsabilité.

L'objectif de ces travaux est d'optimiser l'exploitation des ressources mises à notre disposition.

CONCLUSIONS

- Méthodes indirectes: des milliers d'exoplanètes
- Imagerie directe: étude détaillée de quelques dizaines d'exoplanètes géantes
- Les télescopes géants permettent de voir plus près, plus petit
- L'intelligence artificielle = outil pour l'imagerie directe
 - correction plus efficace de la turbulence atmosphérique
 - design plus optimal des instruments
 - amélioration des opérations
 - meilleur traitement des images
 - interprétation plus poussée des résultats obtenus