

# Contribution à l'étude de l'interférométrie annulante pour la détection d'exo-planètes

Bruno Chazelas

Préparé à l'IAS  
Équipe : Systèmes planétaires

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



# Sommaire

1. Des planètes extra-solaires :

2. Interférométrie annulante (DARWIN) :

Caractériser des exo-planètes telluriques

3. Limitations instrumentale de l'extinction :

Comment atteindre les performances requises

4. NULLTIMATE :

Un banc pour tester des déphaseurs achromatiques (APS)

5. Stabilisation d'un interféromètre annulant

**1.Des planètes**

**2.Interférométrie annulante**

**3.Extinction**

**4.NULLTIMATE**

**5.Stabilité !**



# 1. Des planètes extra-solaires !

3

- pourquoi chercher ces planètes ?
  - explorer la diversité des planètes
  - comprendre la formation des systèmes planétaires
  - la vie ailleurs ?
- premières découvertes (détections indirectes) :
  - 1995 découverte de 51 Pegb  
*(Mayor & Queloz, 1995)*
  - 1999 confirmation :  
transit de HD209458b  
*(Charbonneau et al.)*

**1.Des planètes**

**2.Interférométrie  
annulante**

**3.Extinction**

**4.NULLTIMATE**

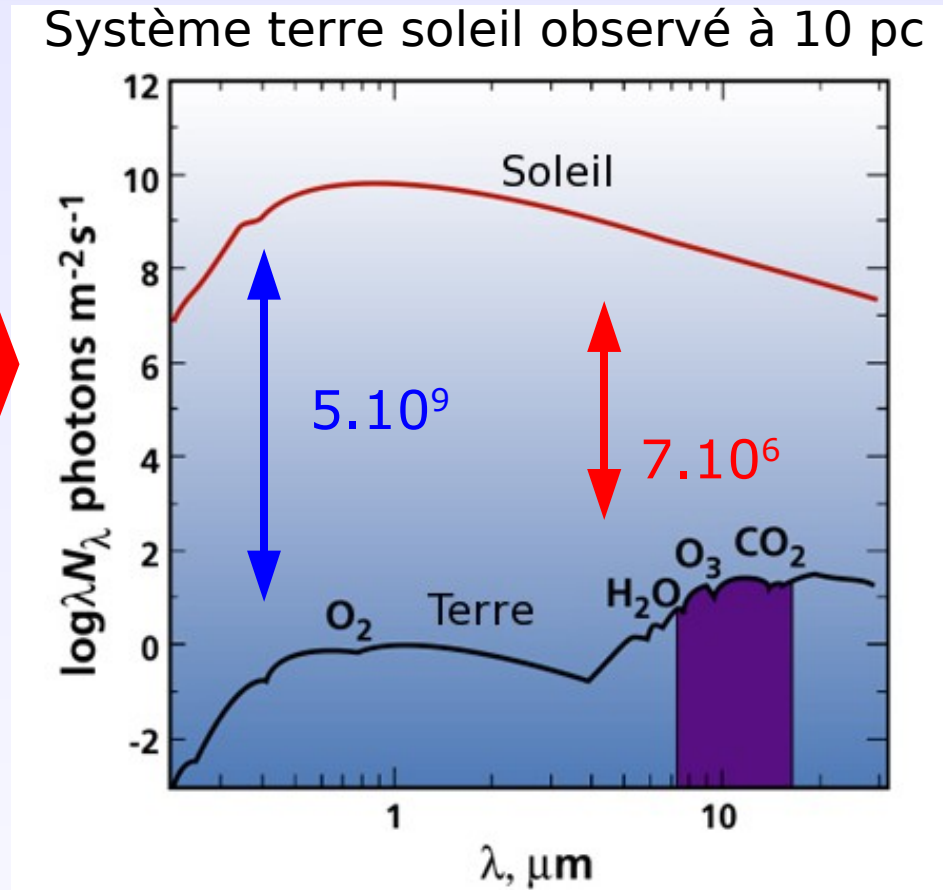
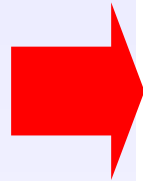
**5.Stabilité !**



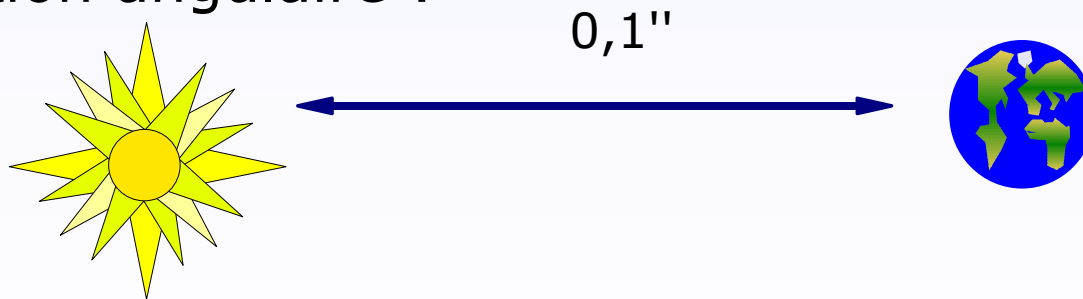
# 1. Des planètes extra-solaires !

## Détection directe d'une exo-planète tellurique :

Contraste :



Résolution angulaire :



1.Des planètes

2.Interférométrie  
annulante

3.Extinction

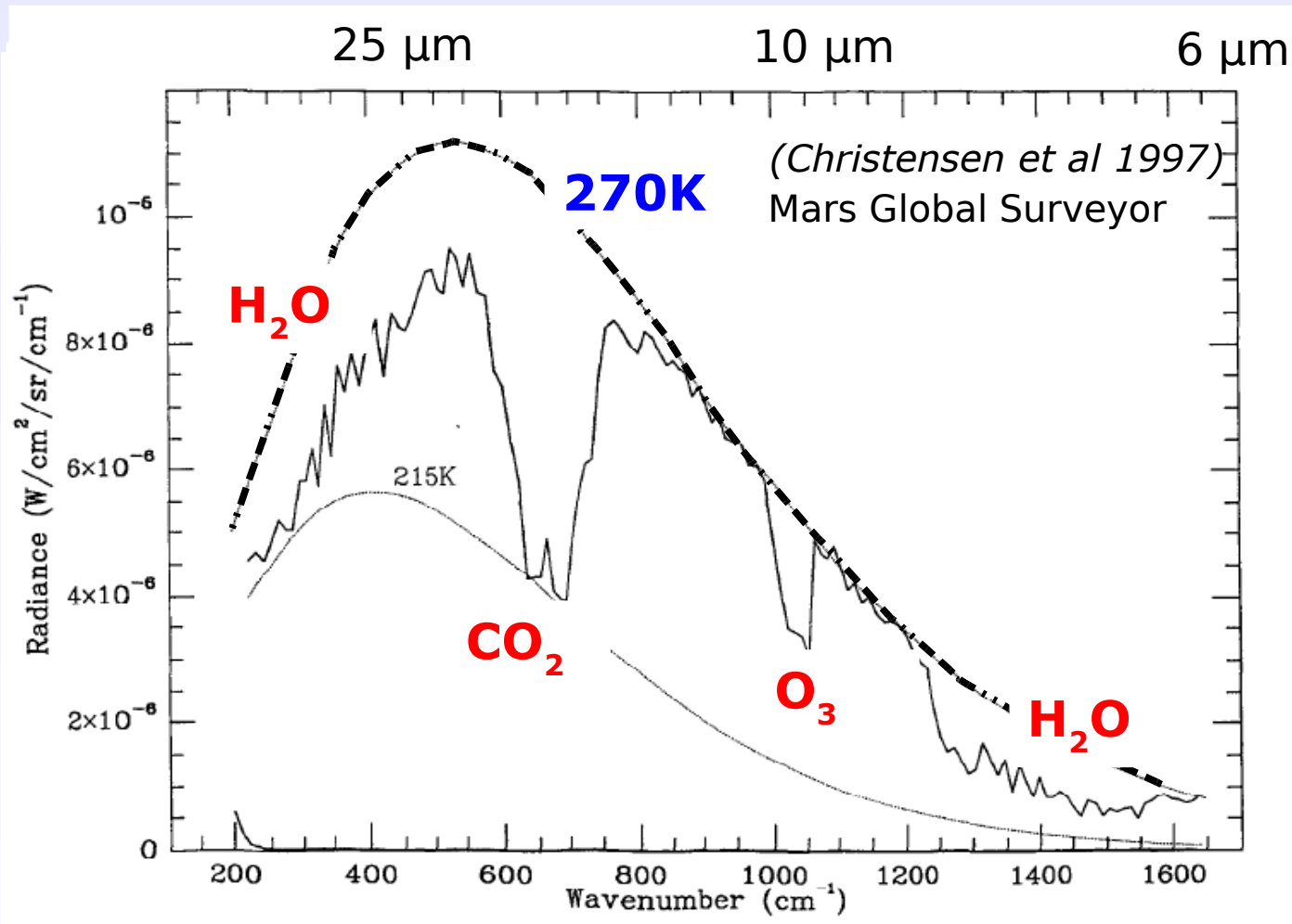
4.NULLTIMATE

5.Stabilité !



# 1. Des planètes extra-solaires !

## Caractérisation spectrale d'une exo-terre



### Bio-Signatures :

Signatures spectrales que l'on ne comprend qu'en présence de vie

1.Des planètes

2.Interférométrie annulante

3.Extinction

4.NULLTIMATE

5.Stabilité !



## 2. Interférométrie annulante

### Principe

L'interférométrie annulante :

- **extinction** : interférence destructive
- **résolution** : base de l'interféromètre

Idée de base : **Bracewell (1978)**

1.Des planètes

2.Interférométrie  
annulante

3.Extinction

4.NULLTIMATE

5.Stabilité !



## 2. Interférométrie annulante

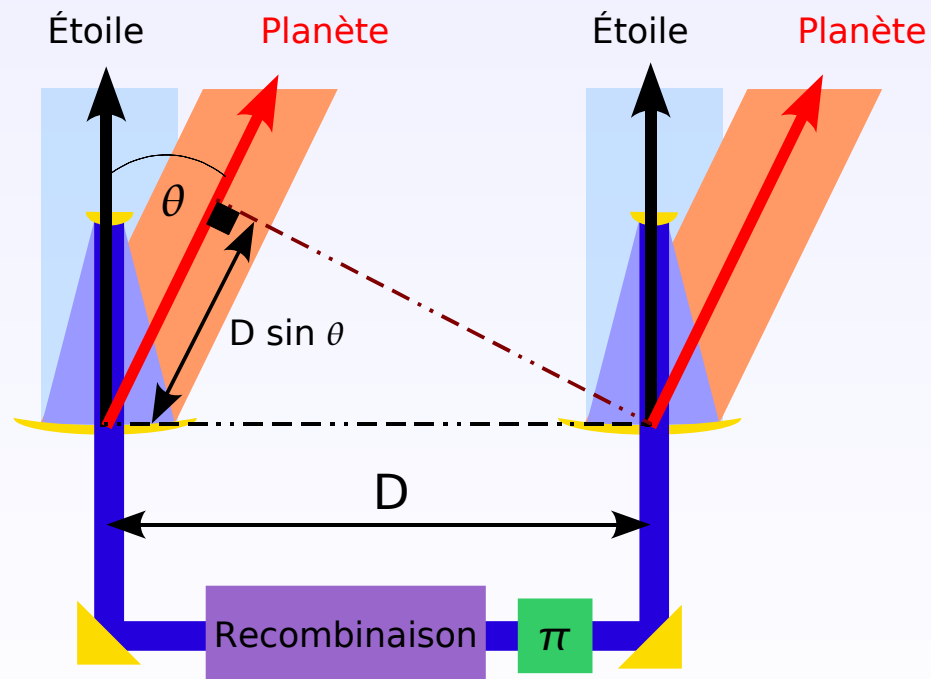
7

### Principe

L'interférométrie annulante :

- **extinction** : interférence destructive
- **résolution** : base de l'interféromètre

Idée de base : **Bracewell (1978)**



1.Des planètes

2. Interférométrie annulante

3. Extinction

4. NULLTIMATE

5. Stabilité !



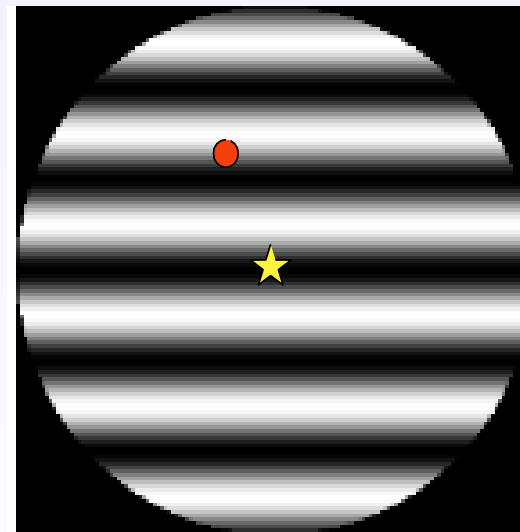
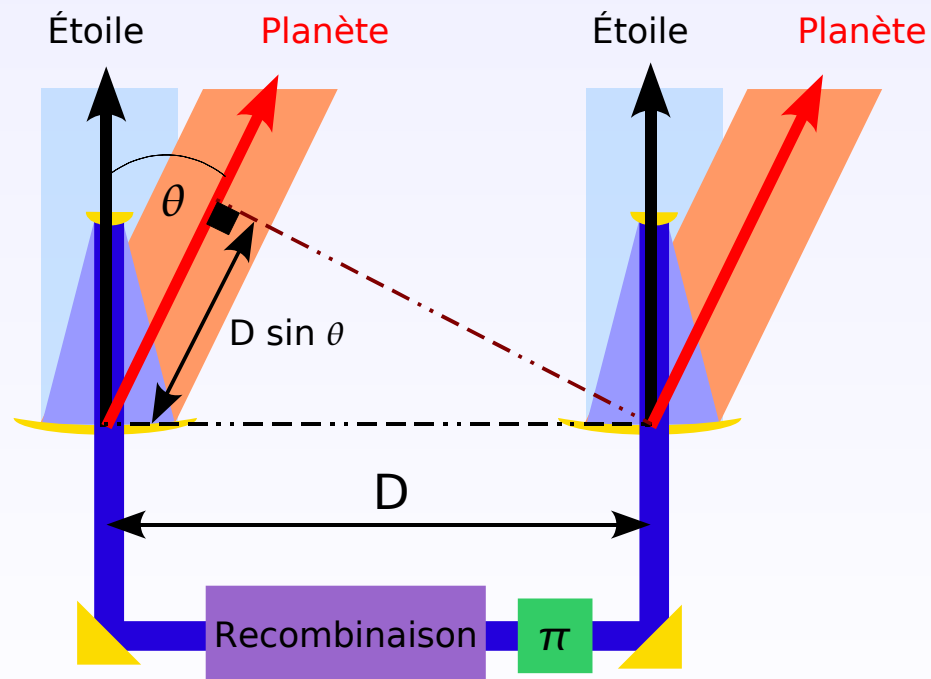
## 2. Interférométrie annulante

### Principe

L'interférométrie annulante :

- **extinction** : interférence destructive
- **résolution** : base de l'interféromètre

Idée de base : **Bracewell (1978)**



1.Des planètes

2. Interférométrie annulante

3. Extinction

4. NULLTIMATE

5. Stabilité !



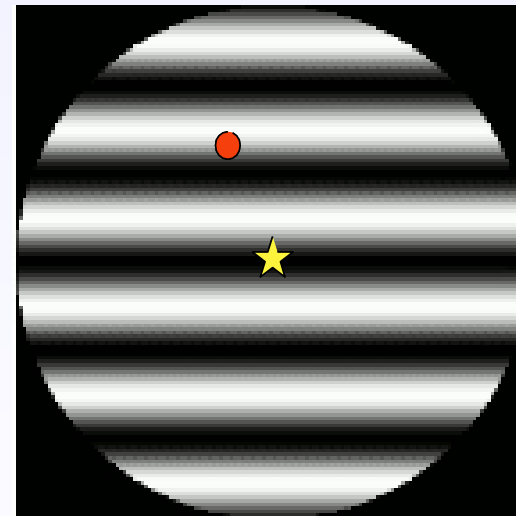
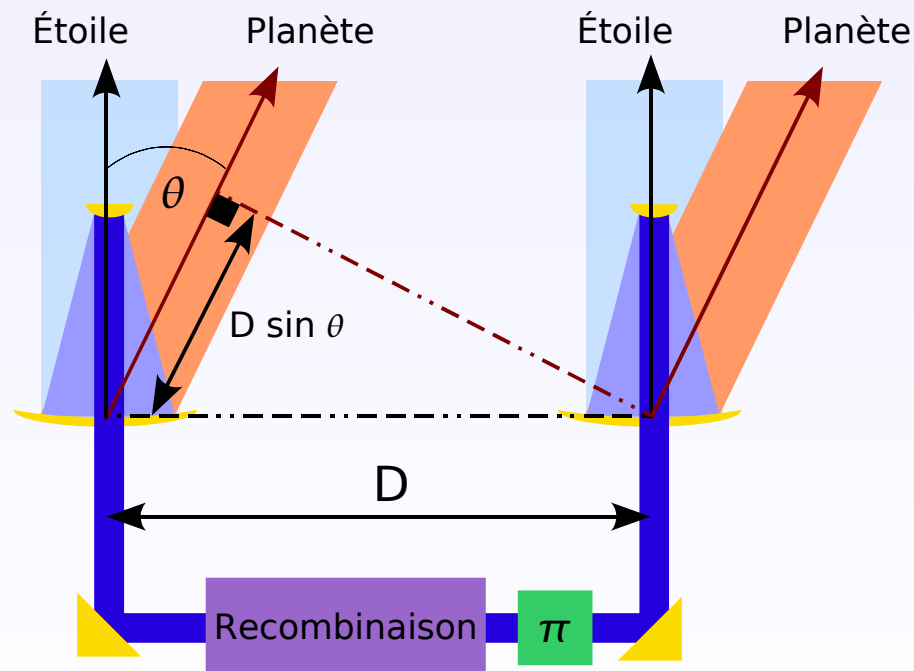
## 2. Interférométrie annulante

### Principe

L'interférométrie annulante :

- **extinction** : interférence destructive
- **résolution** : base de l'interféromètre

Idée de base : **Bracewell (1978)**



1.Des planètes

2.Interférométrie annulante

3.Extinction

4.NULLTIMATE

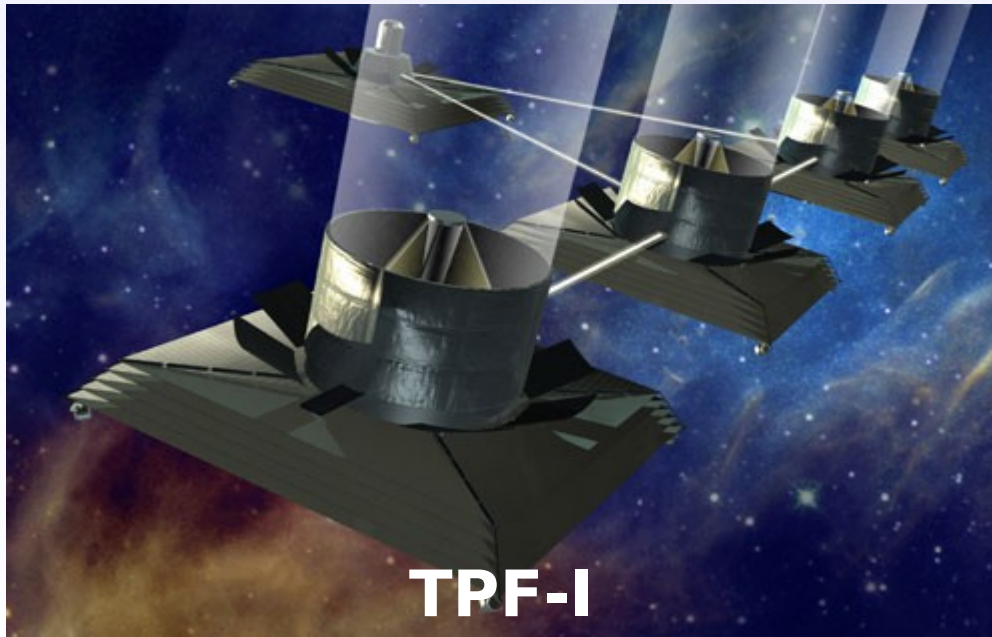
5.Stabilité !

## 2. Interférométrie annulante

### Missions spatiales



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



## 3. Extinction interférométrique

### Comment obtenir les performances requises

- extinction :

$$N = \frac{I_{min}}{I_{max}} \quad \langle N \rangle_{\tau} = 10^{-5} (\lambda/7\mu m)^{3,37}$$

- spécifications pour avoir  $10^{-6}$  (à 2 ondes)

- **phase :**

- Différence de marche (*ddm*) :  $\sigma < 3$  nm
- Front d'onde :  $\lambda_{\text{visible}} / \mathbf{160}$  rms

- **intensité :**

- $\Delta I < 0,4$  %

- **polarisation**

- $\varphi_s - \varphi_p < 2 \cdot 10^{-3}$  rad
- Rotation différentielle  $< 0,1$  °

1.Des planètes

2.Interférométrie  
annulante

3.Extinction

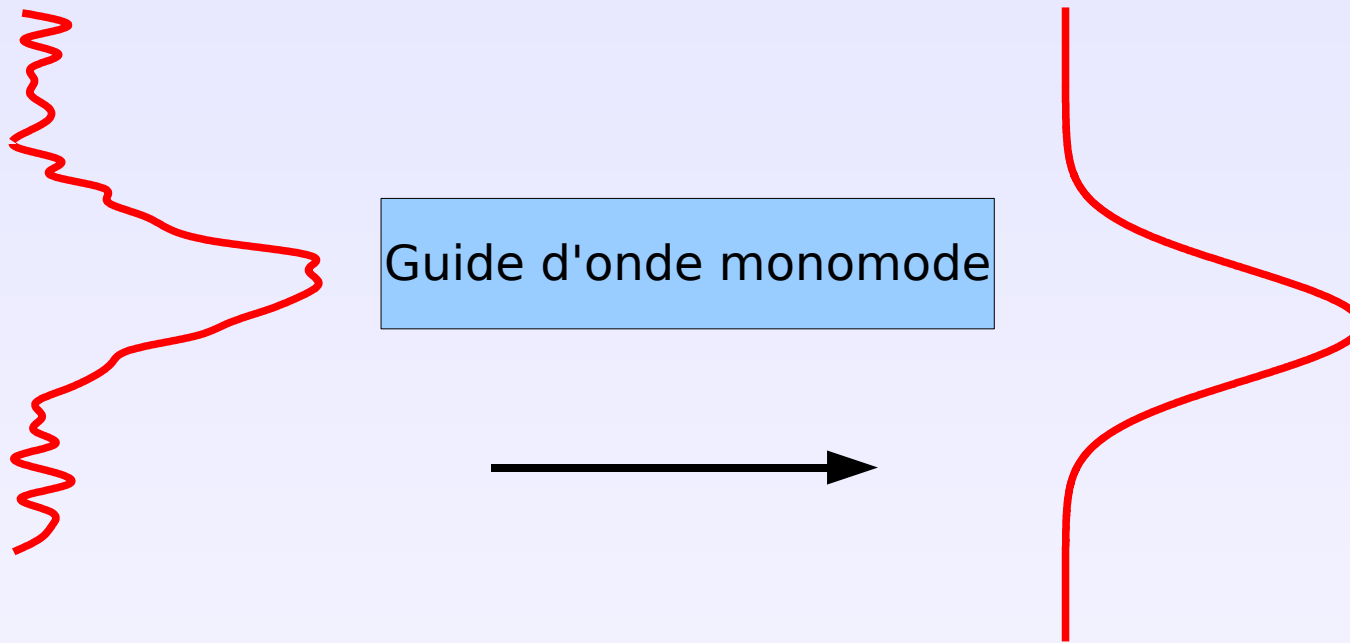
4.NULLTIMATE

5.Stabilité !



### 3. Extinction interférométrique

#### Filtrage modal



Excitation du mode fondamental du guide d'onde

En sortie :

- défauts de  $ddm$ ,  $\Delta I$ , et de polarisation

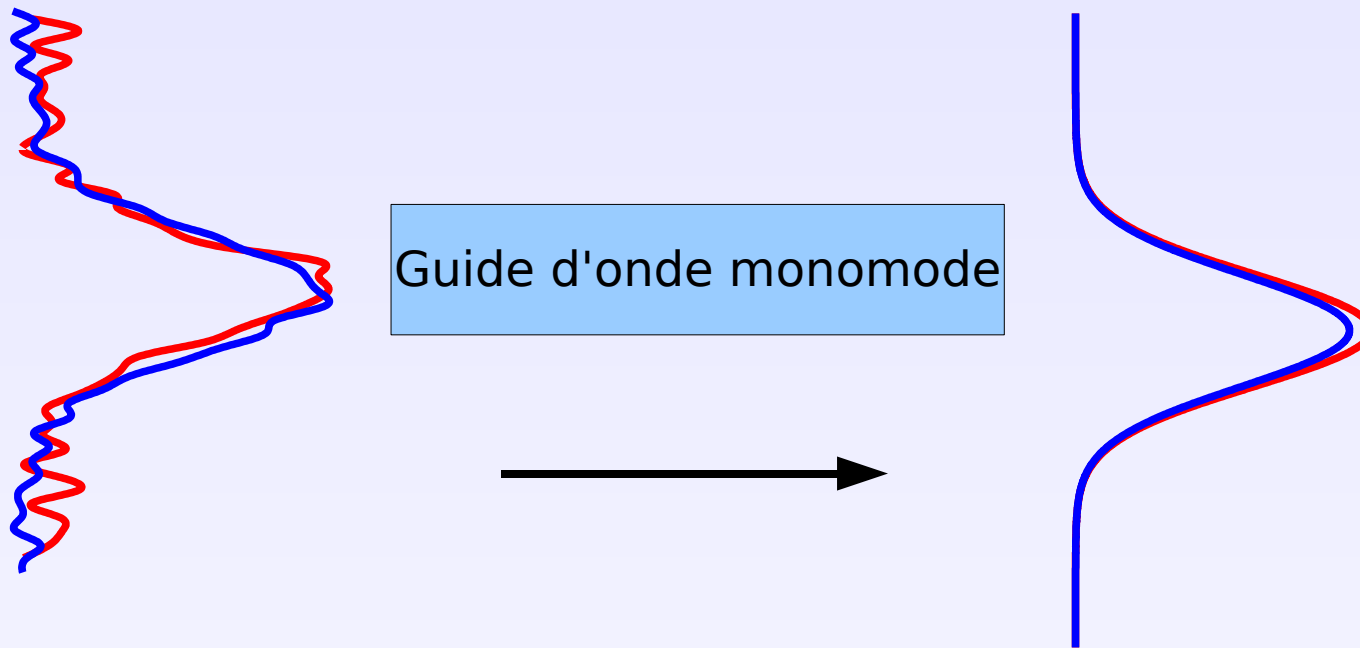
➔ Spécification sur le front d'onde :  $\lambda_{\text{visible}} / \mathbf{10}$  rms

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



### 3. Extinction interférométrique

#### Filtrage modal



Excitation du mode fondamental du guide d'onde

En sortie :

- défauts de  $ddm$ ,  $\Delta I$ , et de polarisation

➔ Spécification sur le front d'onde :  $\lambda_{\text{visible}} / \mathbf{10}$  rms

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

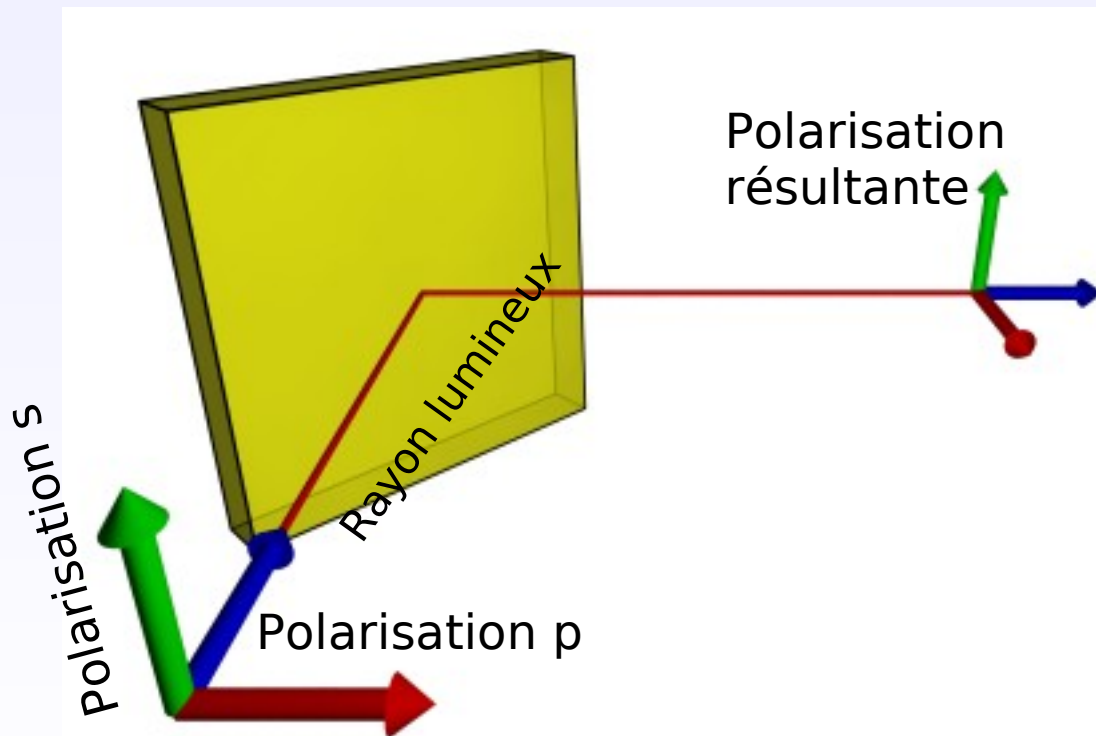


# 3. Extinction interférométrique

## Polarisation

Formalisme de Jones :

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad E_{fin} = R(\beta) \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} R(-\beta) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante

### 3.Extinction

### 4.NULLIMATE

### 5.Stabilité !

## 3. Extinction interférométrique

### Polarisation

Sources des défauts de polarisation :

- non identité/uniformité des traitements

**1.Des planètes**

**2.Interférométrie  
annulante**

**3.Extinction**

**4.NULLTIMATE**

**5.Stabilité !**

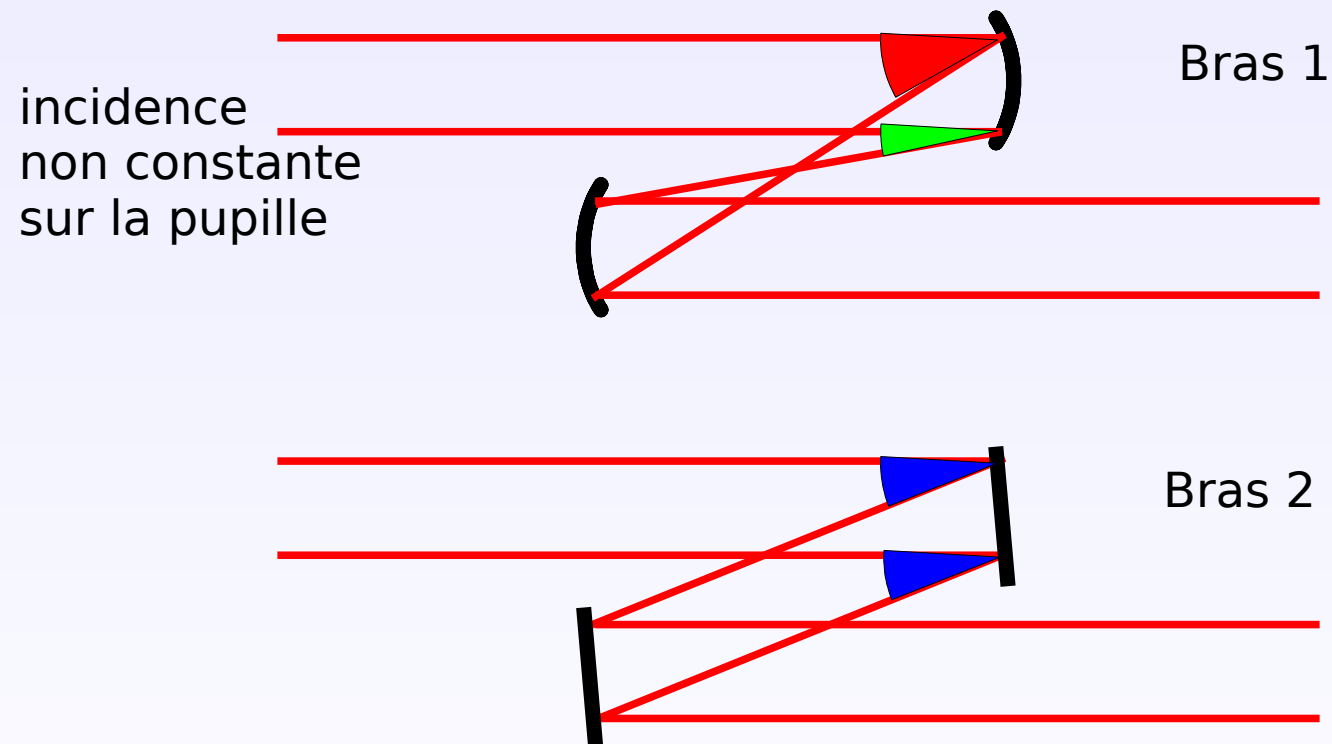


## 3. Extinction interférométrique

### Polarisation

Sources des défauts de polarisation :

- non identité/uniformité des traitements
- dispersion d'incidence



1.Des planètes  
2.Interférométrie  
annulante

3.Extinction

4.NULLTIMATE

5.Stabilité !

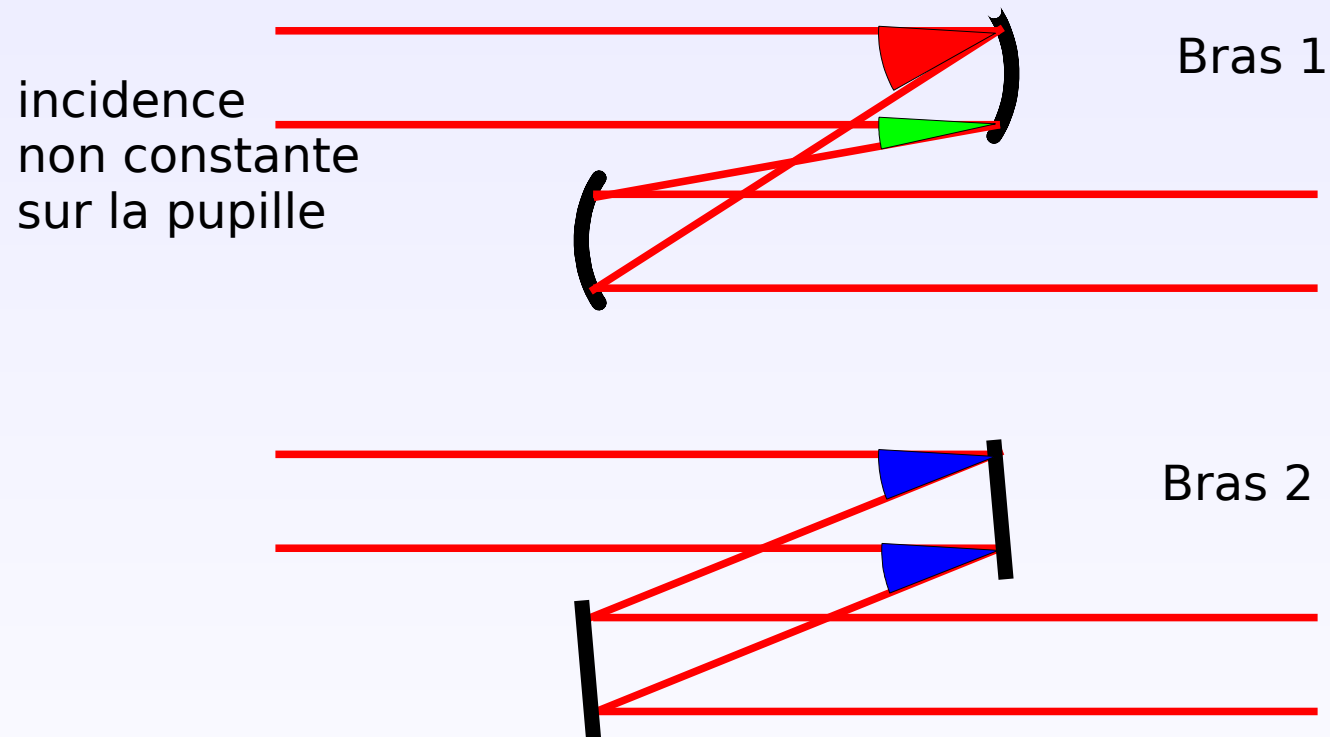


### 3. Extinction interférométrique

#### Polarisation

Sources des défauts de polarisation :

- non identité/uniformité des traitements
- dispersion d'incidence



- **disparités d'alignement**

1.Des planètes  
2.Interférométrie  
annulante

3.Extinction

4.NULLTIMATE

5.Stabilité !

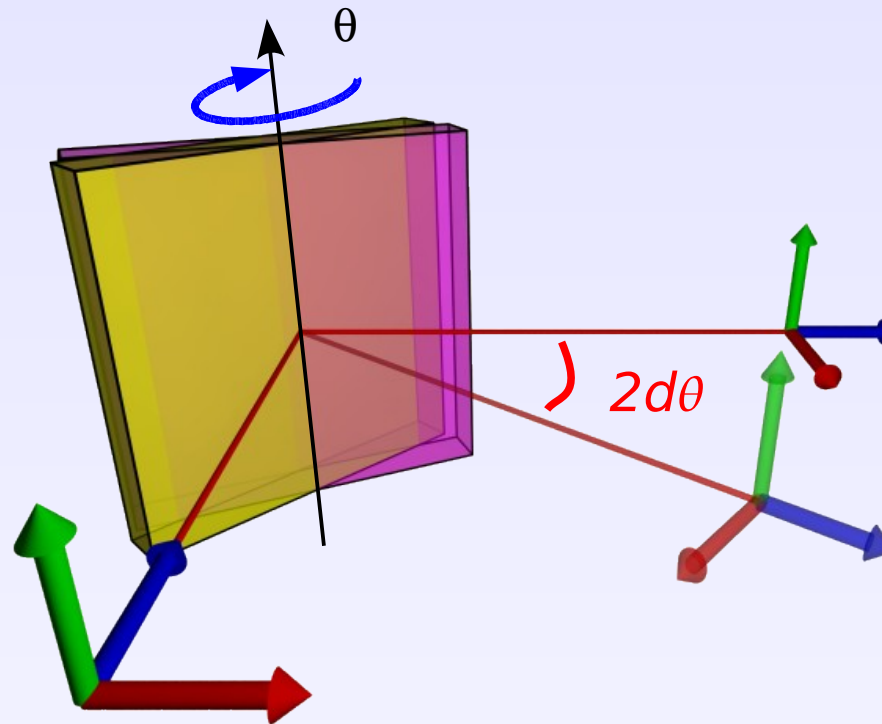


### 3. Extinction interférométrique

#### Polarisation

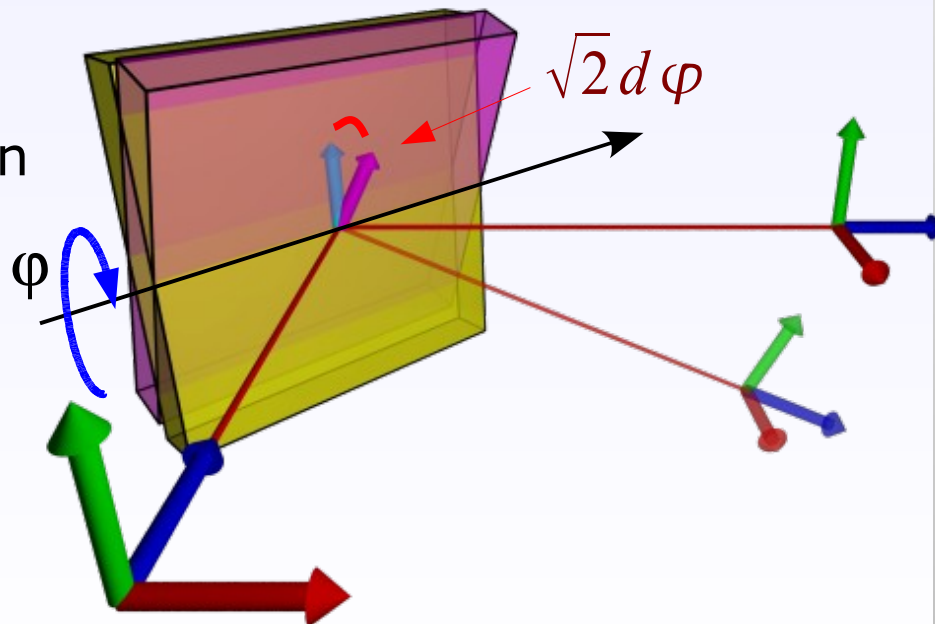
Effet de l'alignement :  
Rotation selon  $\theta$

- variation d'incidence
- $N \propto d\theta^2$
- chromatique



Rotation selon  $\varphi$

- rotation polarisation
- $N \propto d\varphi^2$
- achromatique



1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLTIMATE
5. Stabilité !

### 3. Extinction interférométrique

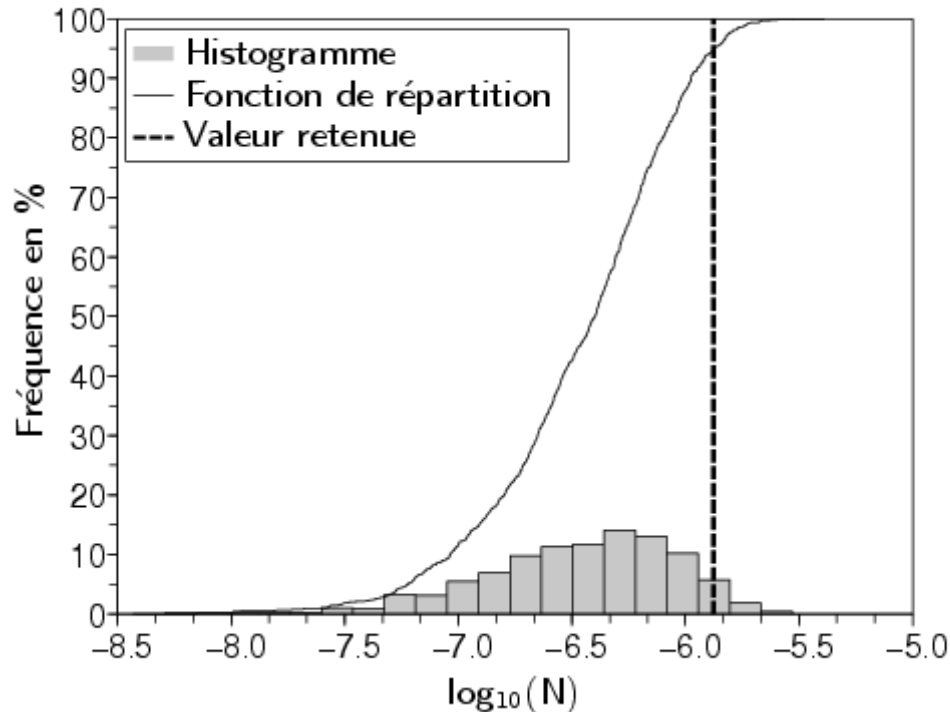
#### Polarisation : Modélisation systématique

#### Développement d'un modèle numérique

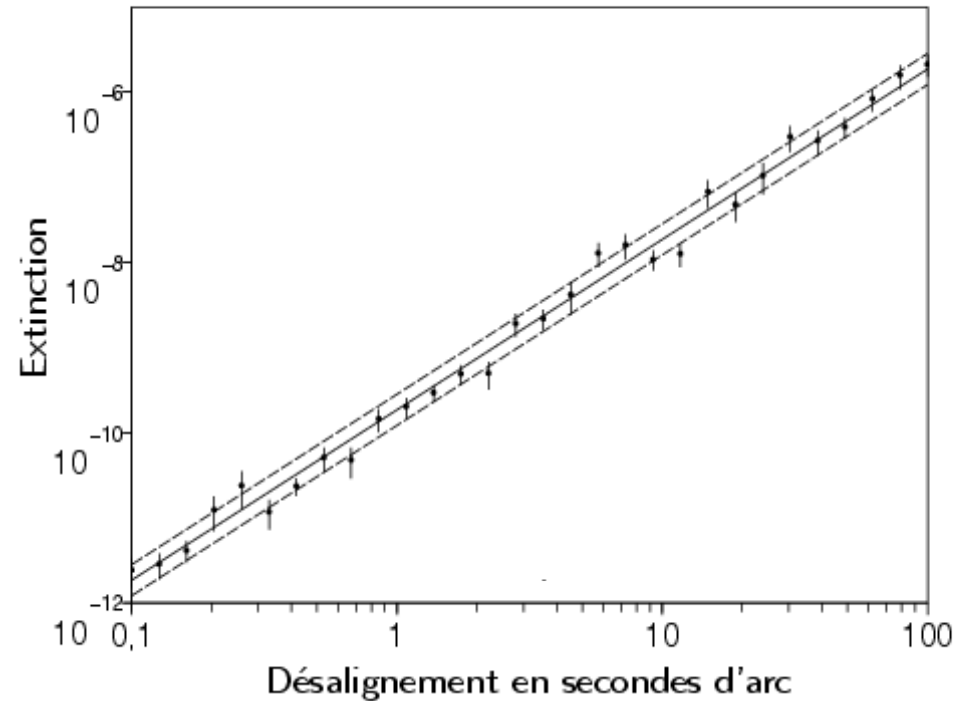
- Permet de traiter tout système optique
- Tirages de Monte-Carlo pour déterminer des tolérances d'alignement

1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLTIMATE
5. Stabilité !

Propriétés statistiques des tirages d'extinction



Tolérance d'alignement pour une configuration à 3 miroirs



### 3. Extinction interférométrique

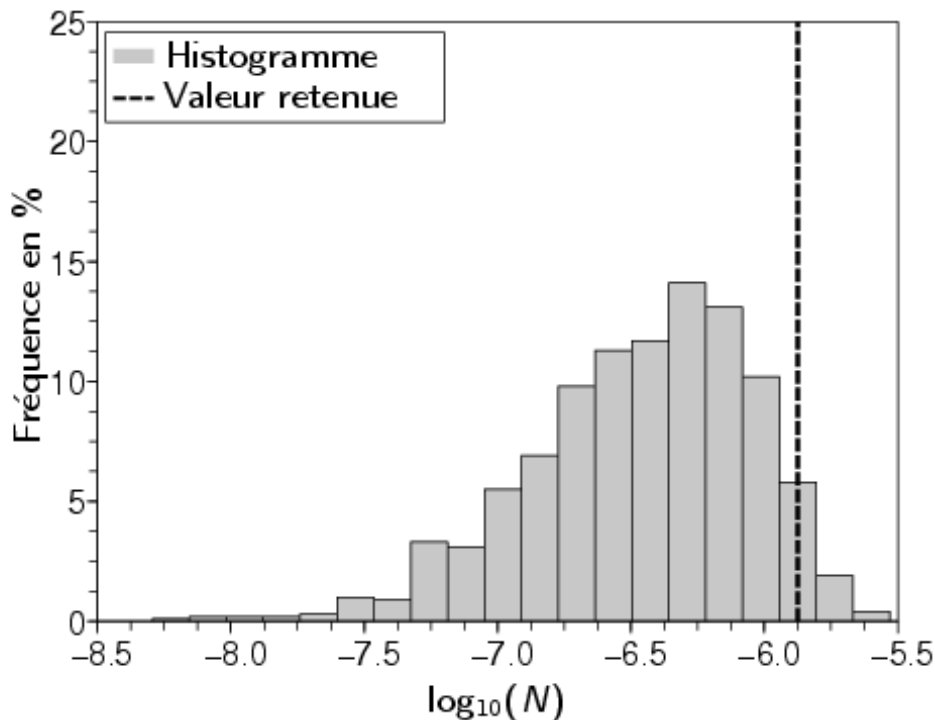
#### Polarisation : Modélisation systématique

#### Développement d'un modèle numérique

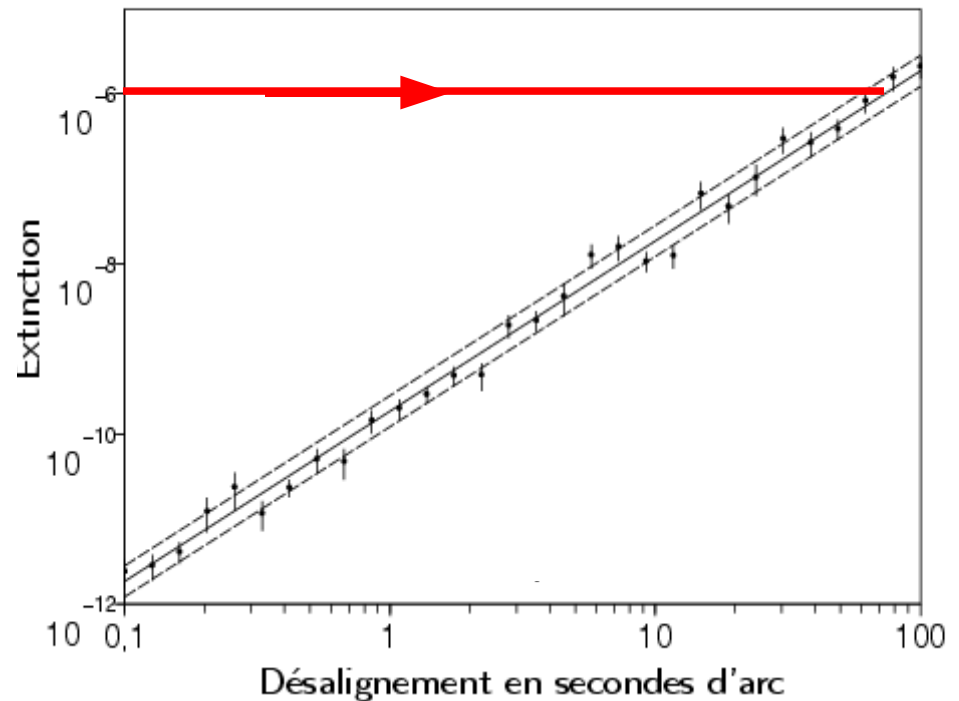
- Permet de traiter tout système optique
- Tirages de Monte-Carlo pour déterminer des tolérances d'alignement

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

Statistiques des tirages d'extinction



Tolérance d'alignement pour une configuration à 3 miroirs



### 3. Extinction interférométrique

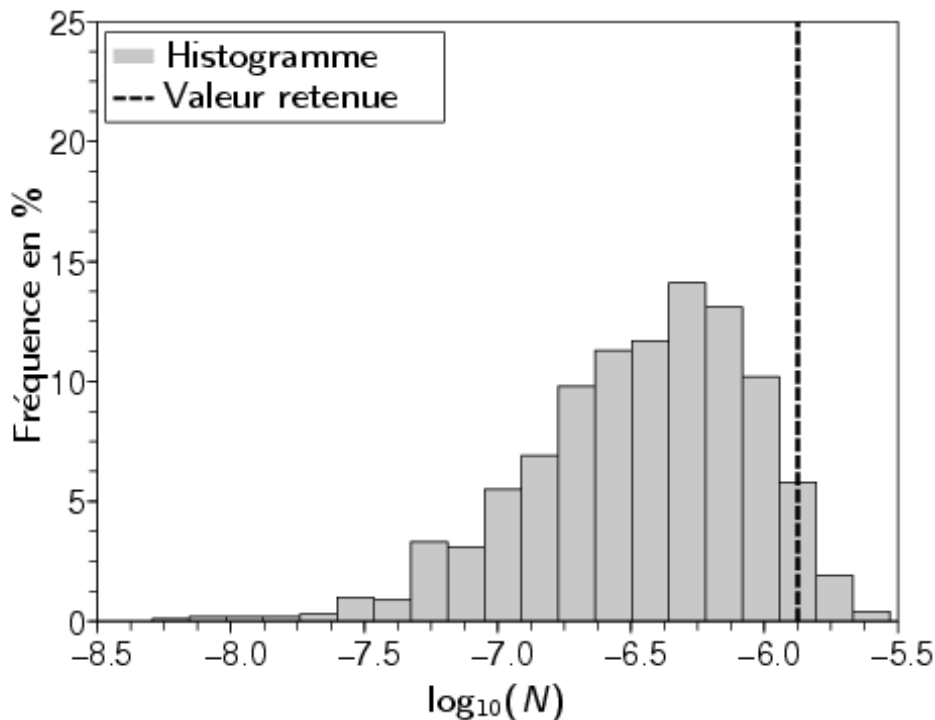
#### Polarisation : Modélisation systématique

#### Développement d'un modèle numérique

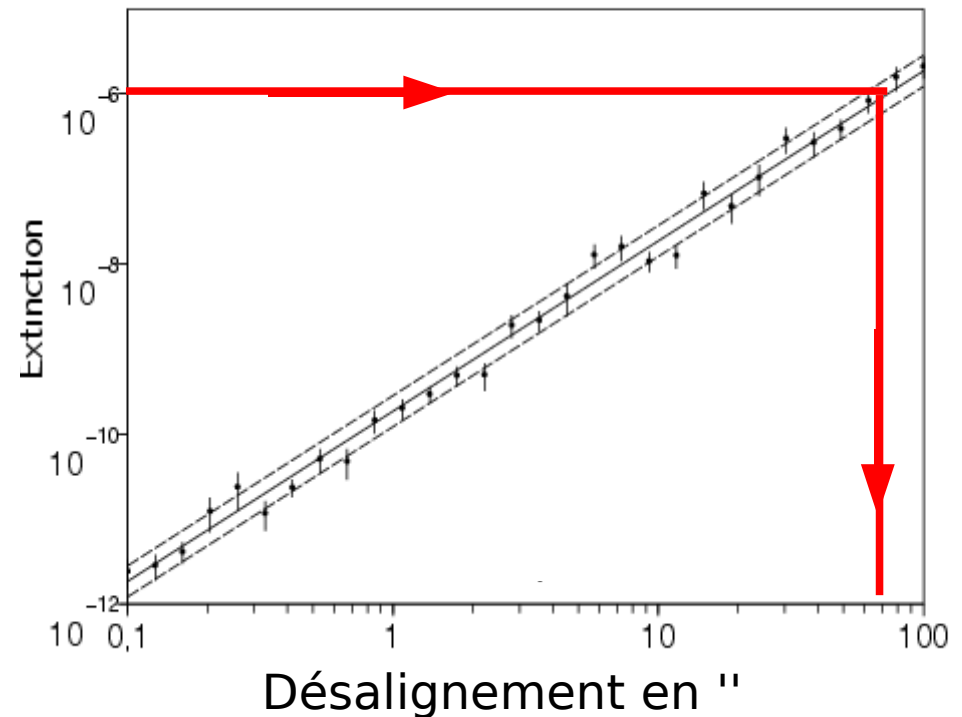
- Permet de traiter tout système optique
- Tirages de Monte-Carlo pour déterminer des tolérances d'alignement

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

Statistiques des tirages d'extinction



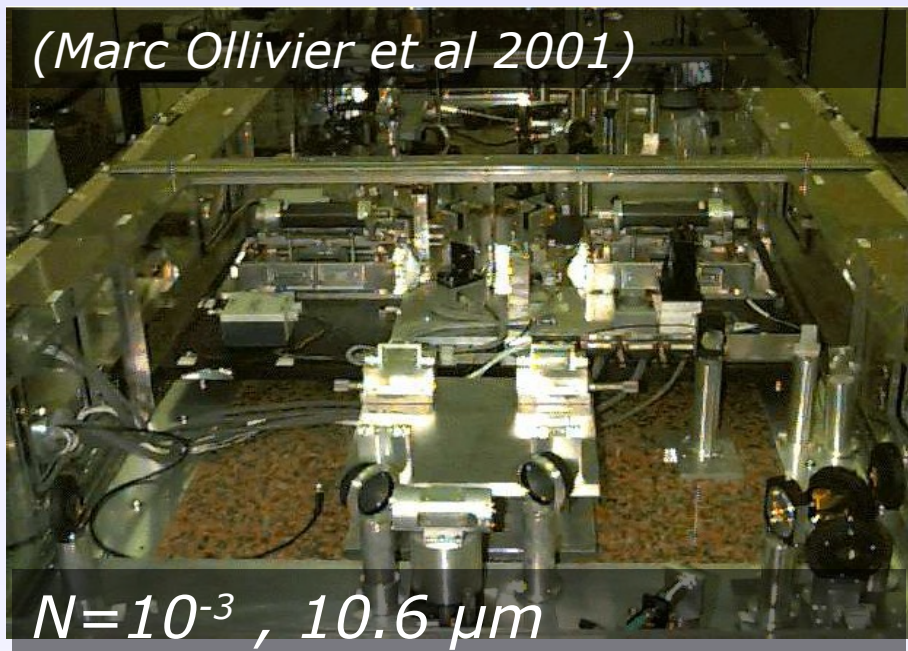
Tolérance d'alignement pour une configuration à 3 miroirs



## 4. NULLTIMATE

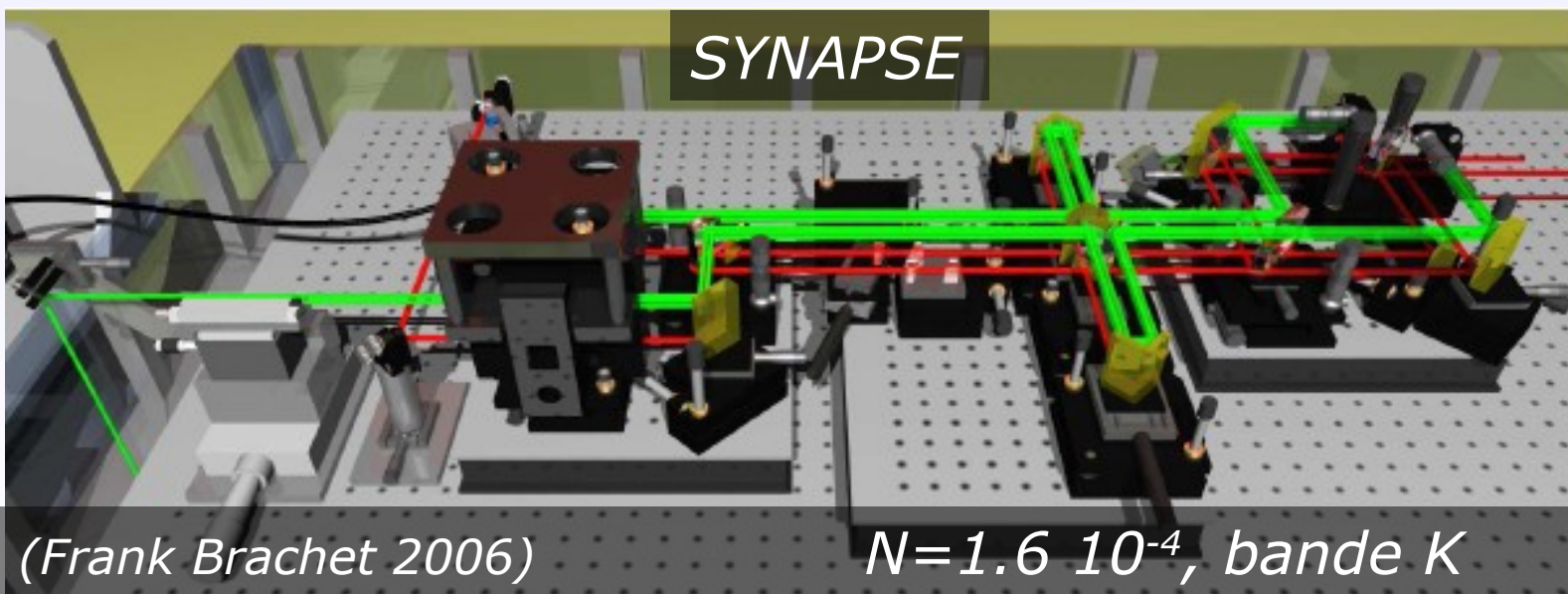
### Interférométrie annulante à l'IAS

*(Marc Ollivier et al 2001)*



$N=10^{-3}$ ,  $10.6 \mu\text{m}$

*SYNAPSE*



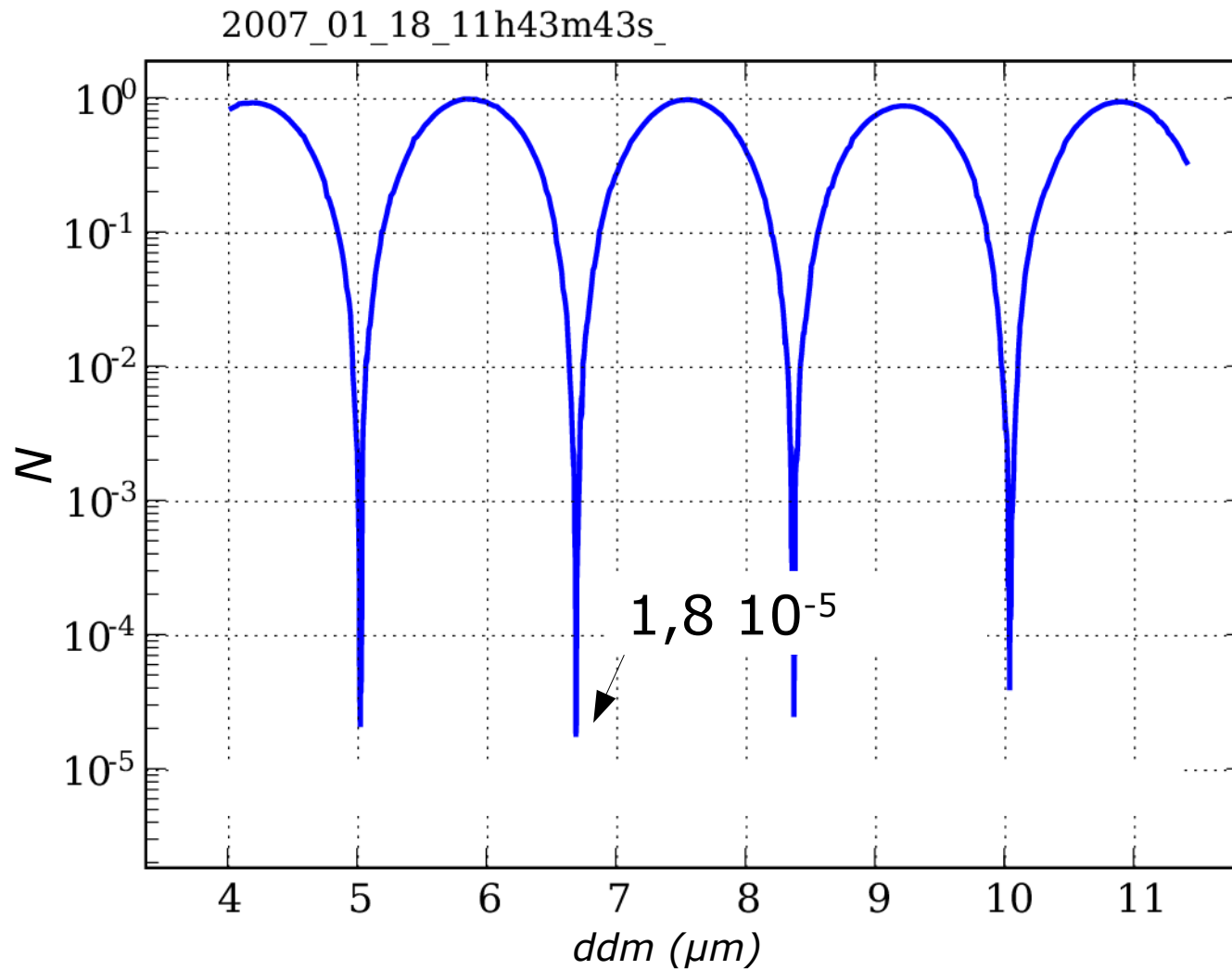
*(Frank Brachet 2006)*

$N=1.6 \cdot 10^{-4}$ , bande K

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

## 4. NULLIMATE

### Interférométrie annulante à l'IAS



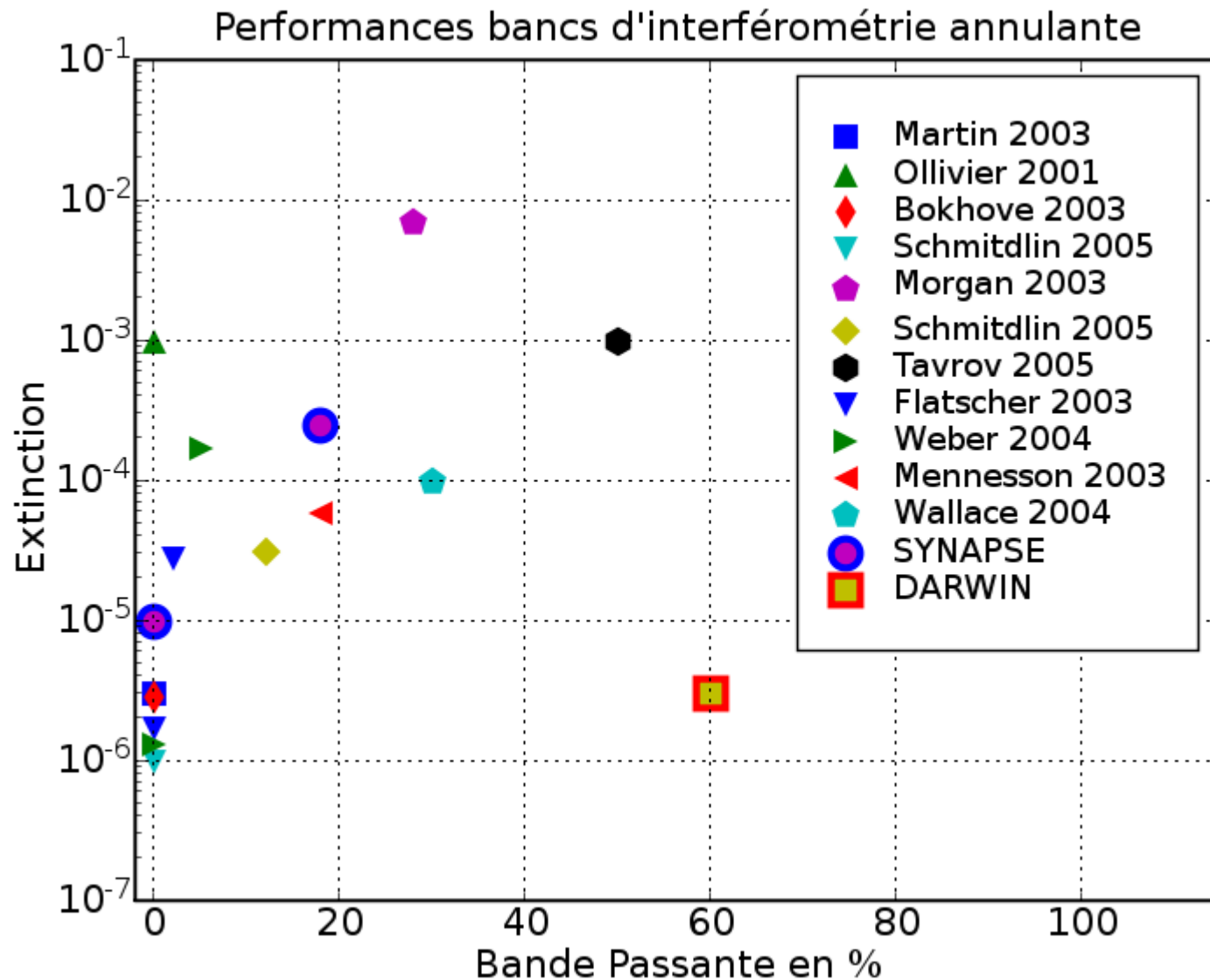
(Frank Brachet 2006)

$N = 1.6 \cdot 10^{-4}$ , bande K

1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLIMATE
5. Stabilité !

## 4. NULLTIMATE

### Interférométrie annulante dans le monde



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

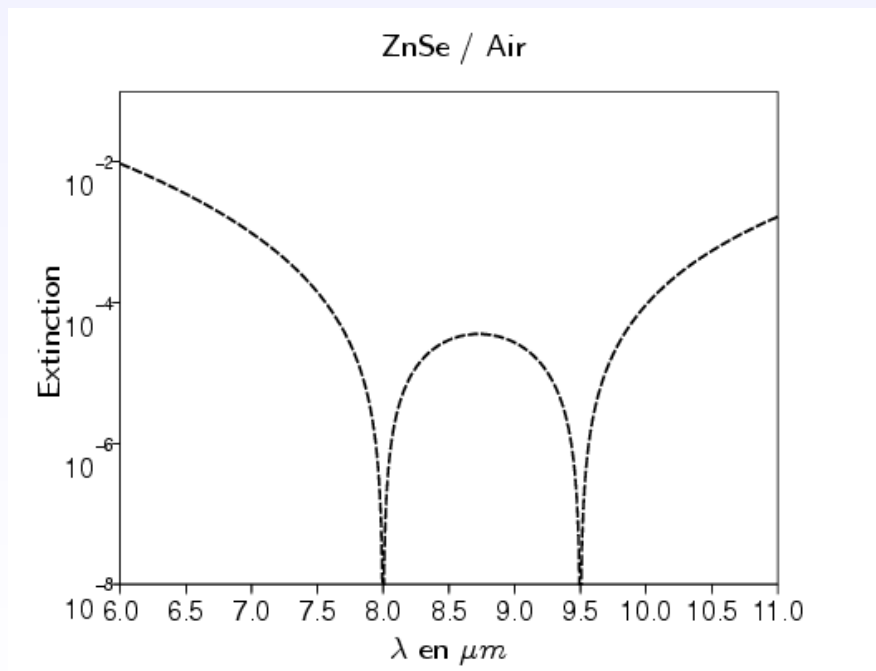




## 4. NULLTIMATE

### Une R&T proposé par l'ESA

- revue et sélection de déphaseurs achromatiques (APS)
- tester et comparer différents APS (x4)
- domaine spectral : 6-18  $\mu\text{m}$
- extinction :  $10^{-6}$
- test à au moins 2 longueurs d'ondes



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



## 4. NULLTIMATE

### Un interféromètre pour tester des APS

Projet NULLTIMATE :

- test de 4 APS
- 6-18 microns (spectre continu)
- $T = 100 \text{ K} \Rightarrow$  mesure de  $N=10^{-6}$

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

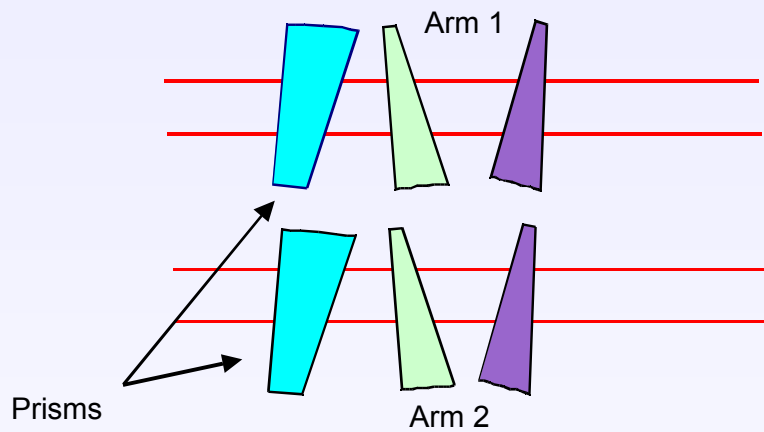


## 4. NULLTIMATE

### Un interféromètre pour tester des APS

Projet NULLTIMATE :

- test de 4 APS
- 6-18 microns (spectre continu)
- $T = 100 \text{ K} \Rightarrow$  mesure de  $N=10^{-6}$



Lames dispersives

Alcatel Alenia Space

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

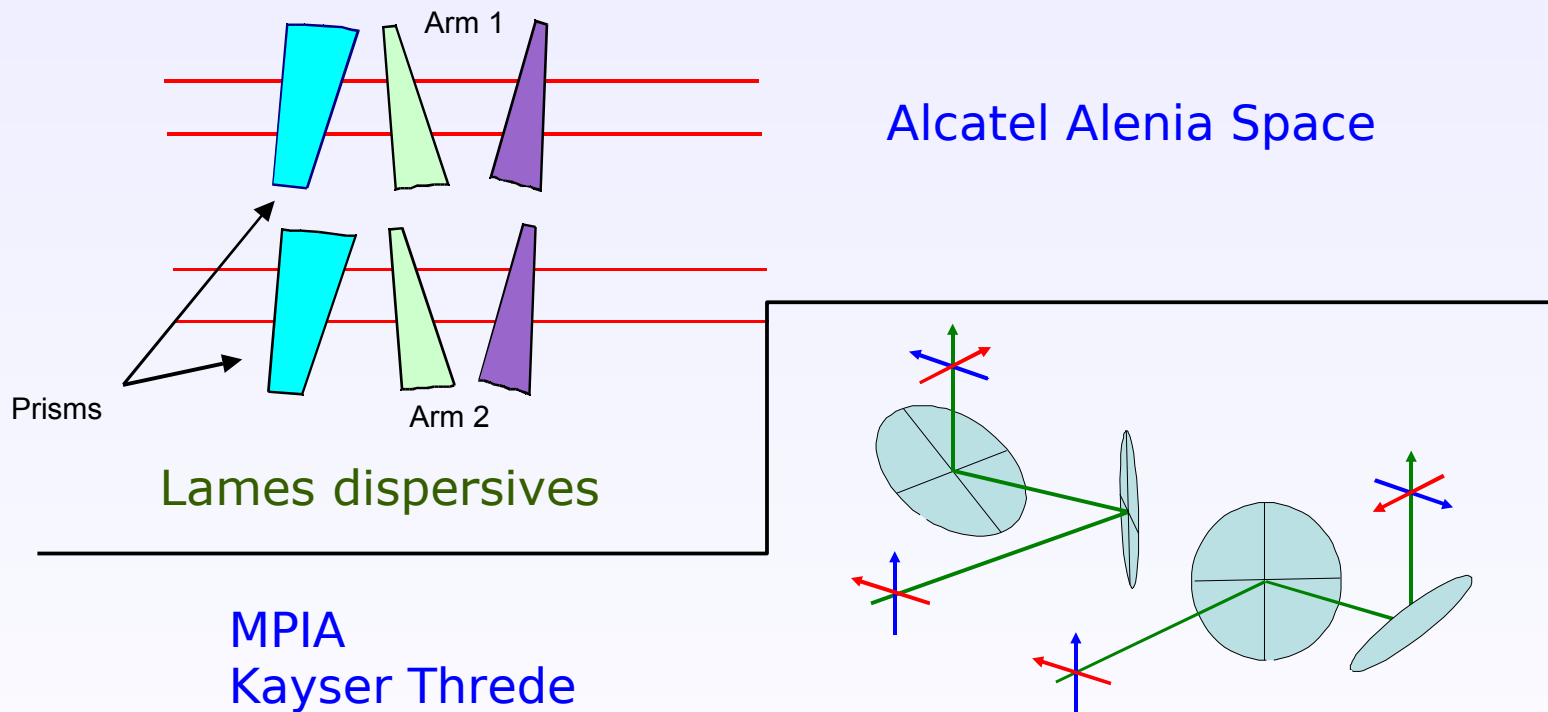


## 4. NULLTIMATE

### Un interféromètre pour tester des APS

Projet NULLTIMATE :

- test de 4 APS
- 6-18 microns (spectre continu)
- $T = 100 \text{ K} \Rightarrow$  mesure de  $N=10^{-6}$



Retournement du champ électrique

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

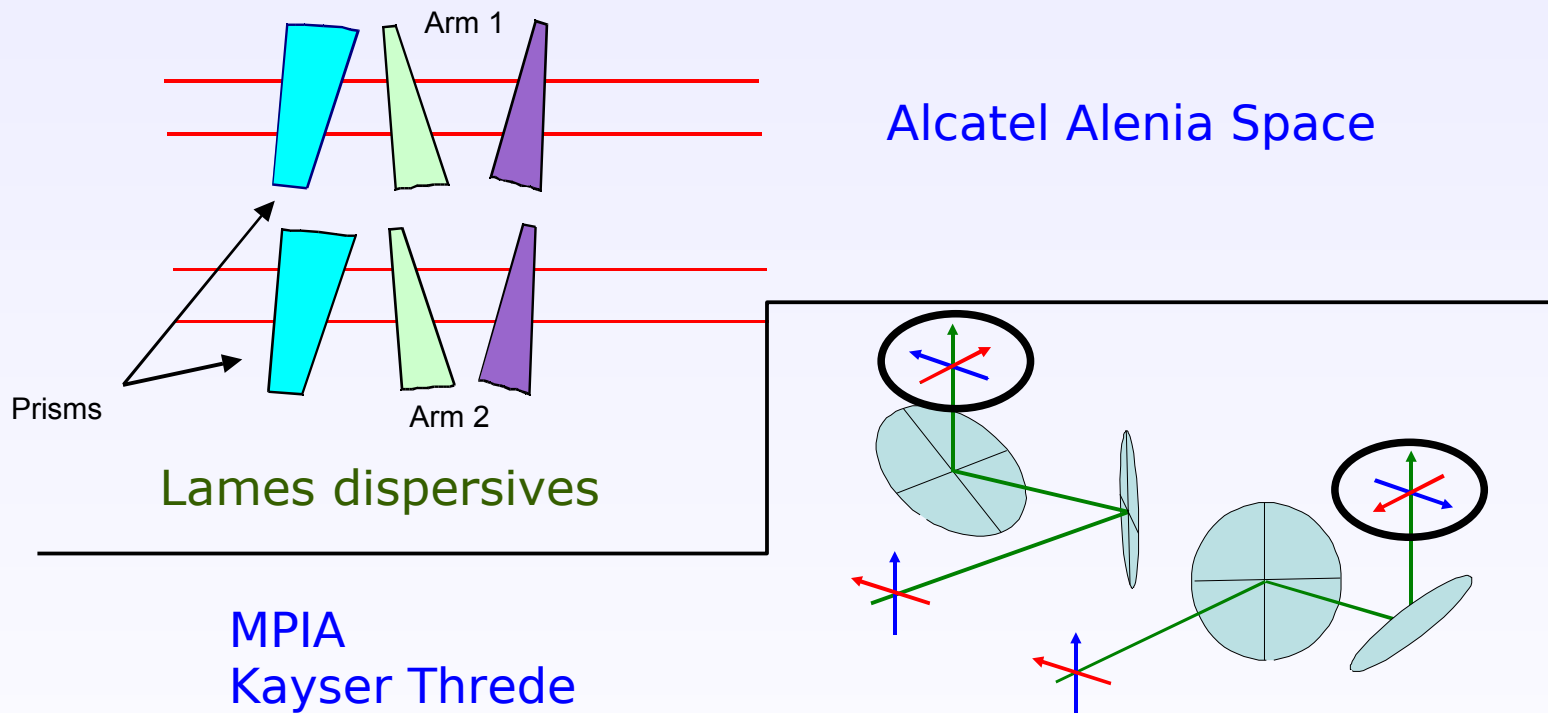


## 4. NULLTIMATE

### Un interféromètre pour tester des APS

Projet NULLTIMATE :

- test de 4 APS
- 6-18 microns (spectre continu)
- $T = 100 \text{ K} \Rightarrow$  mesure de  $N=10^{-6}$



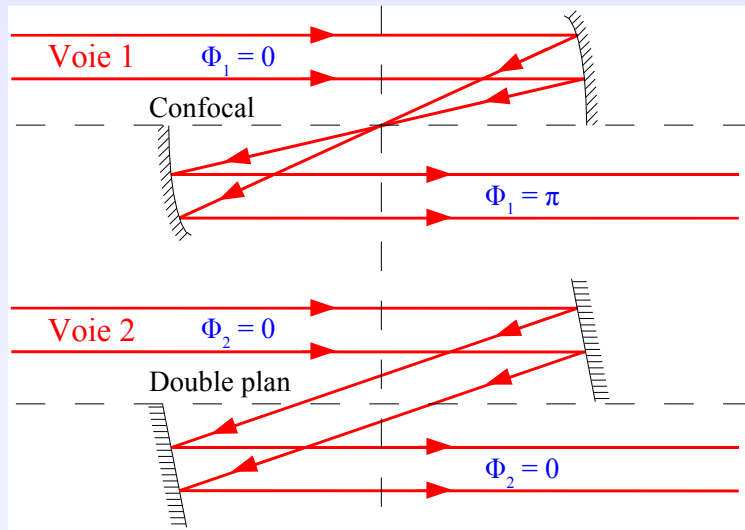
Retournement du champ électrique

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



## 4. NULLTIMATE

### Un interféromètre pour tester des APS



Observatoire de la  
Cote d'Azur

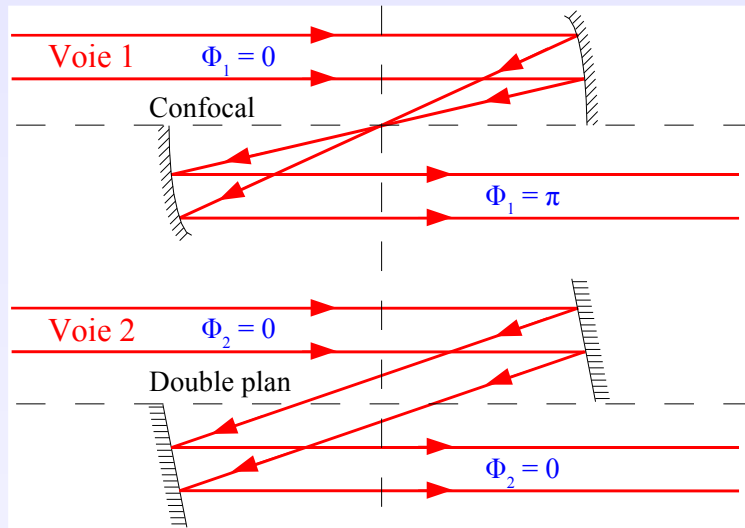
Passage par un foyer optique

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE**
- 5.Stabilité !



# 4. NULLTIMATE

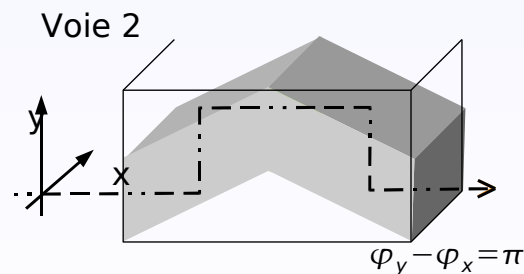
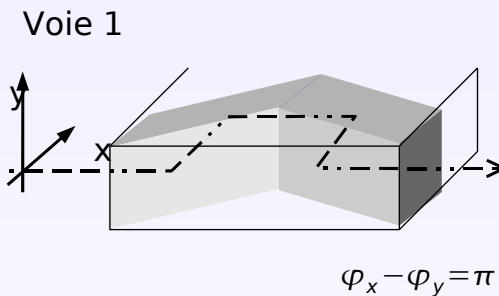
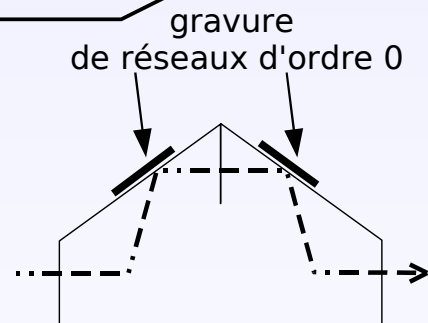
## Un interféromètre pour tester des APS



Observatoire de la  
Cote d'Azur

Passage par un foyer optique

Université de Liège  
CSL



Rhomboèdres de Fresnel améliorés

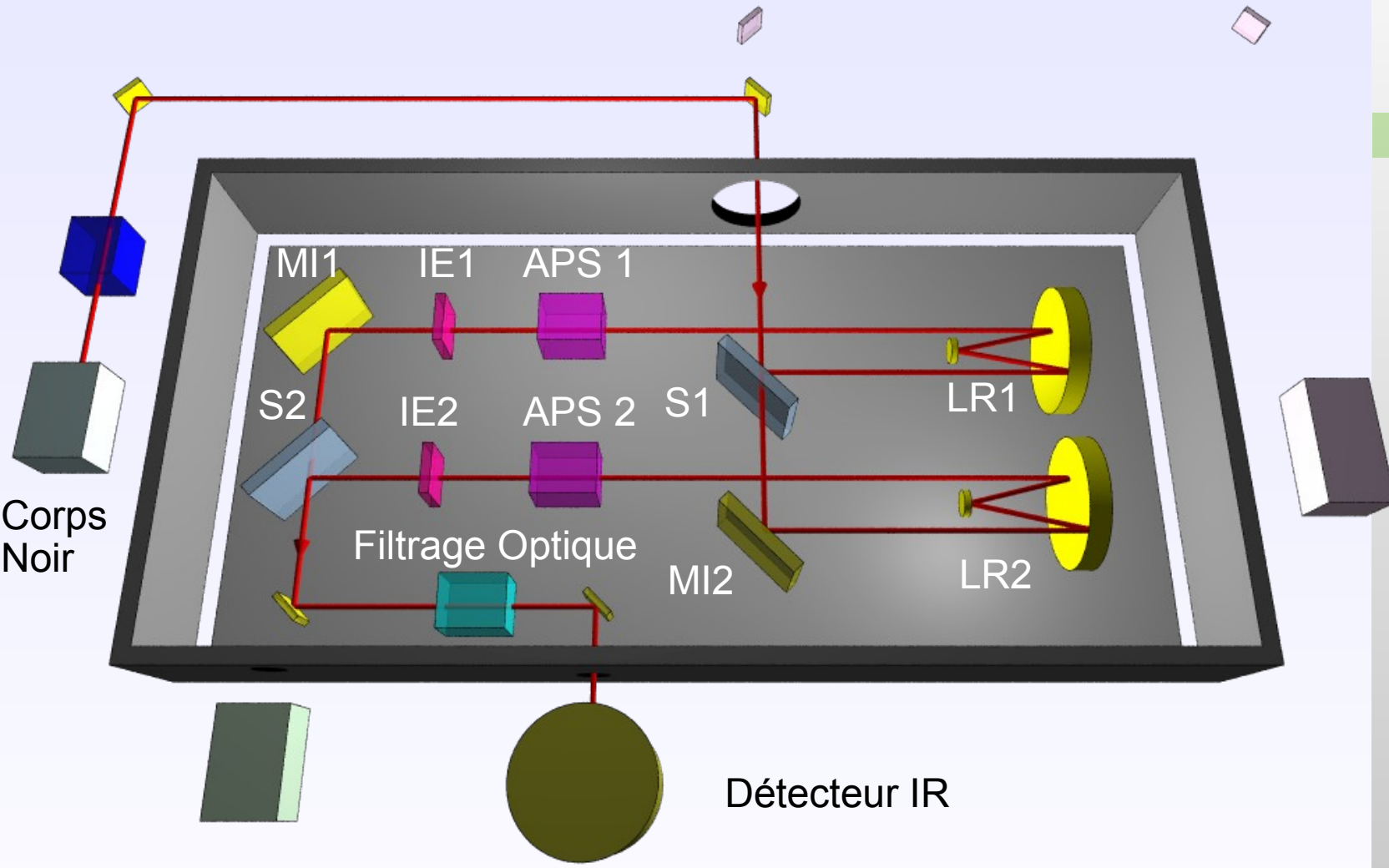
1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLTIMATE
5. Stabilité !



# 4. NULLIMATE

## Schéma de l'interféromètre cryogénique

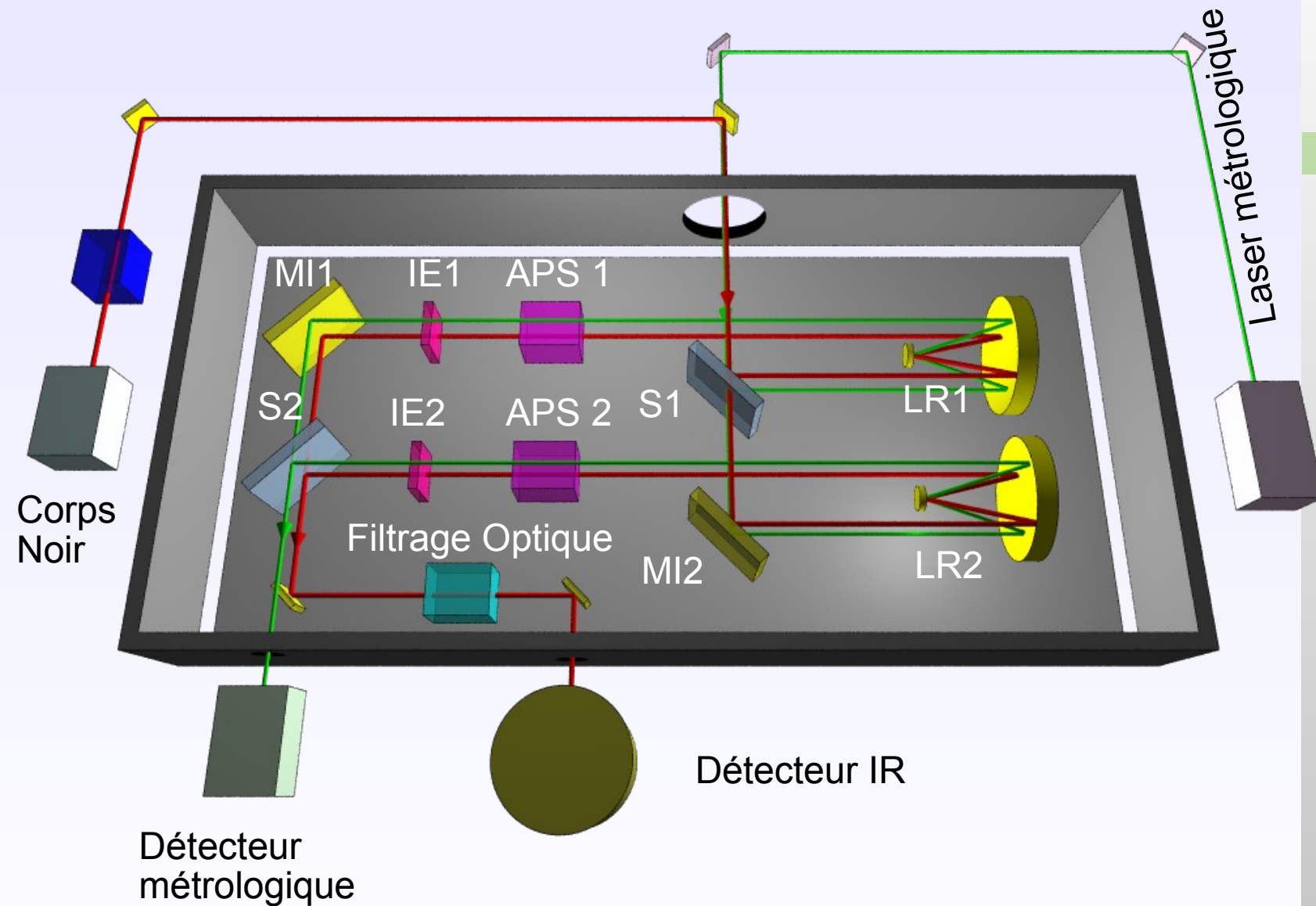
- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLIMATE**
- 5.Stabilité !





## 4. NULLIMATE

### Schéma de l'interféromètre cryogénique



1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLIMATE
5. Stabilité !

NULLIMATE



## 4. NULLTIMATE

### Alignement

Alignement des optiques :

$\lambda$	APSFC	APSDP	APSFR
6 $\mu\text{m}$	$\pm 32''$	$\pm 38''$	$\pm 42''$
11 $\mu\text{m}$	$\pm 28''$	$\pm 35''$	$\pm 40''$
18 $\mu\text{m}$	$\pm 33''$	$\pm 38''$	$\pm 43''$

=> Tolérance retenue  $\pm 30''$

=> À la recombinaison : parallélisme  $\pm 1,5$   
arcsec

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

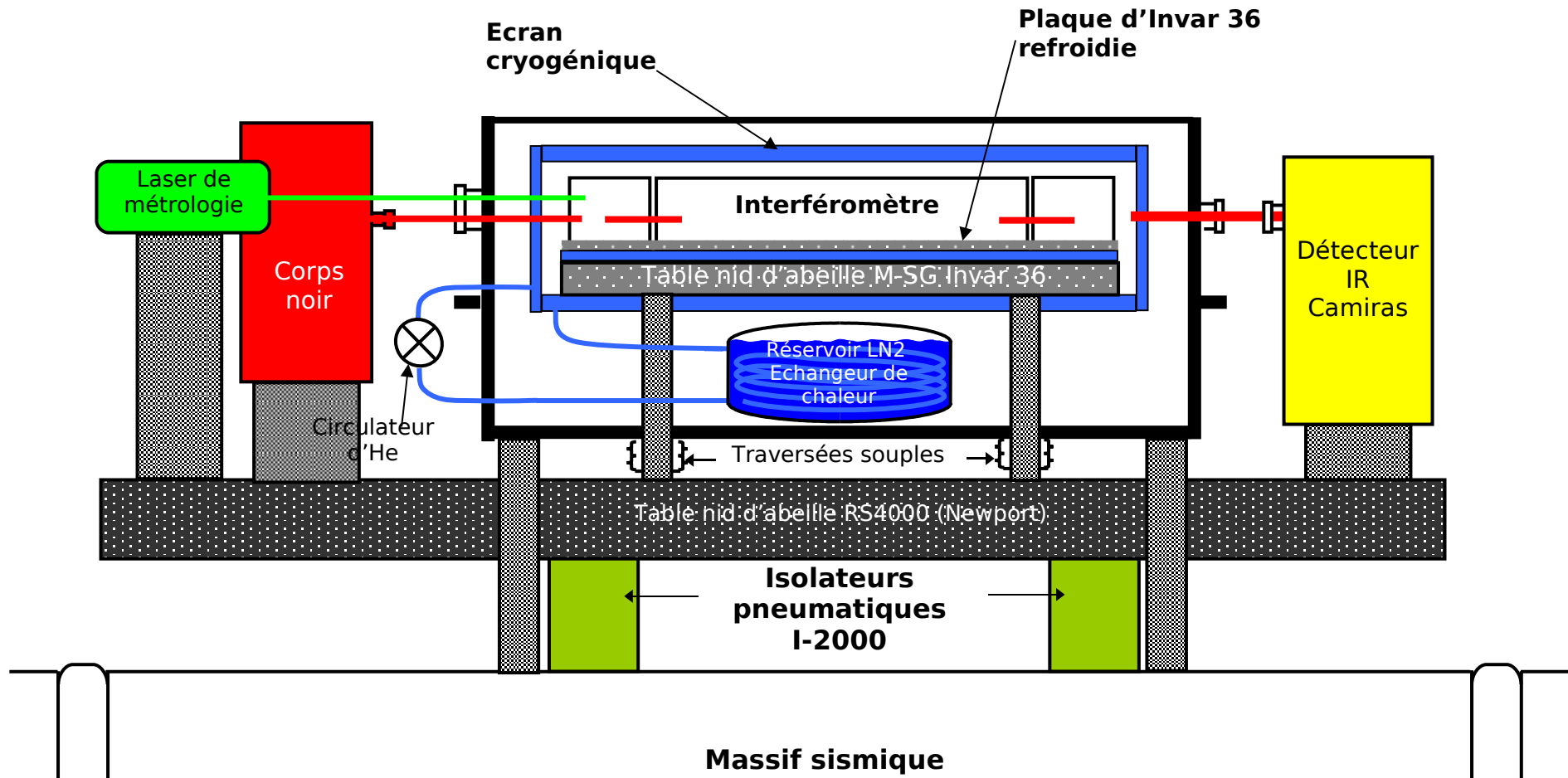


# 4. NULLIMATE

## Enceinte cryogénique

- **T = 100 K** (He Gaz à 77K + chauffage)
- vide : **10<sup>-6</sup> mbar** : pompage ionique

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLIMATE
- 5.Stabilité

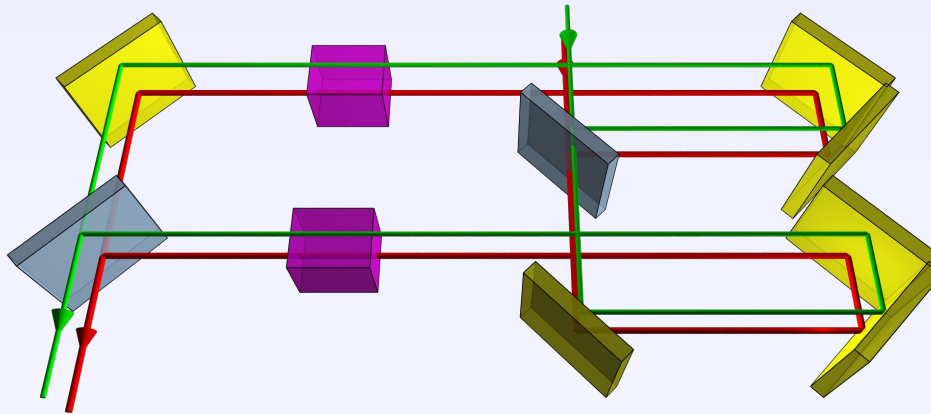


## 4. NULLTIMATE

### Programme futur

Étape à température ambiante :

- composants du commerce
- sauf séparatrice
- sauf ligne à retard :



-> tests monochromatiques : fortes extinctions

-> mesures de  $\varphi(\lambda)$

-> mesures polychromatiques : performances moyennes

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



## 5. Stabilisation de l'extinction

### Problème de stabilité (1)

- Variations lentes :
  - Fuites de l'étoile
  - Gain des détecteurs
- Une solution : détection synchrone
  - signal planète : modulé
  - signal de l'étoile : non modulé
  - à  $f$  la plus élevée possible

*(Mennesson et al 1997,2005)* =  
modulation interne

*(Absil et al 2003)* =  
modulation inhérente

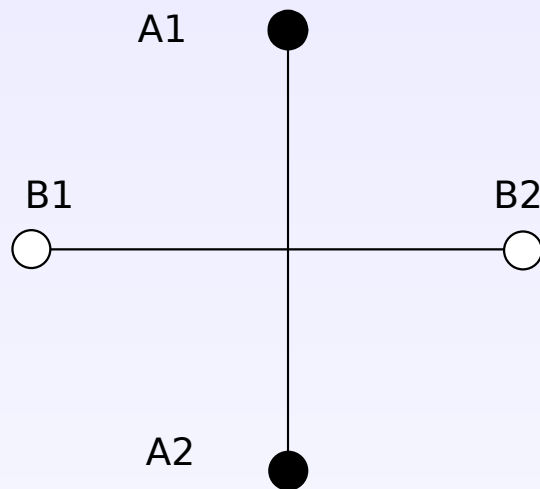
- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



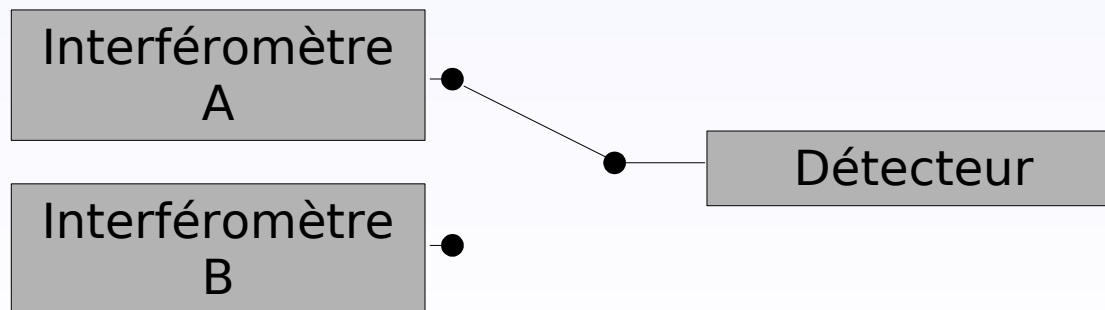
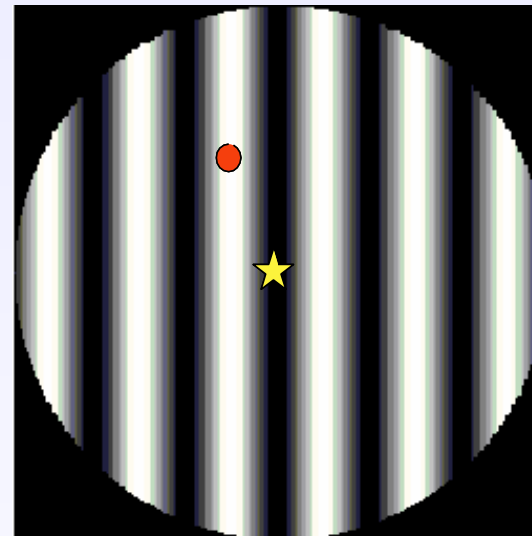
## 5. Stabilisation de l'extinction

### Problème de stabilité (1 suite)

Modulation interne principe



Deux sous interféromètres  
de Bracewell



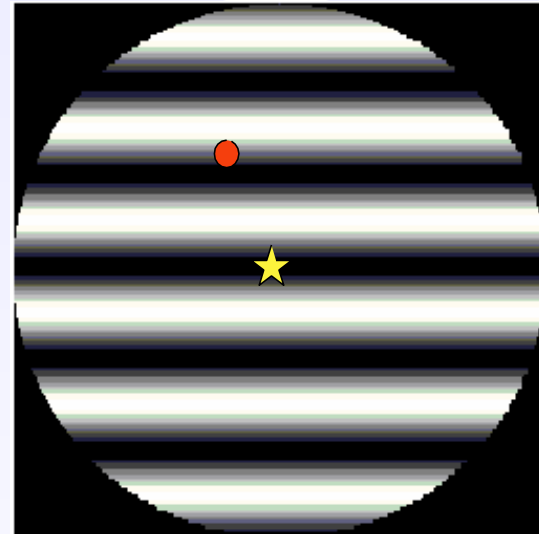
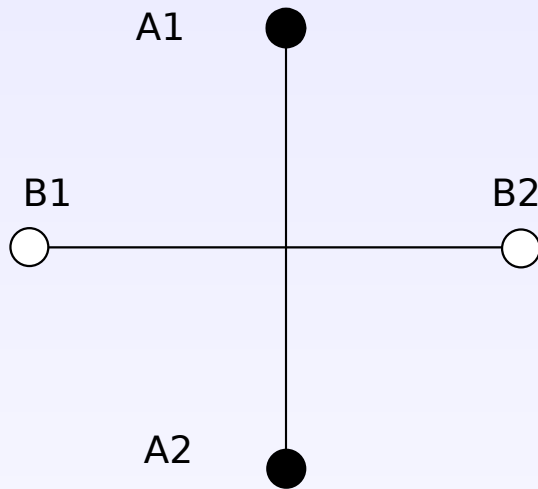
- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

# 5. Stabilisation de l'extinction

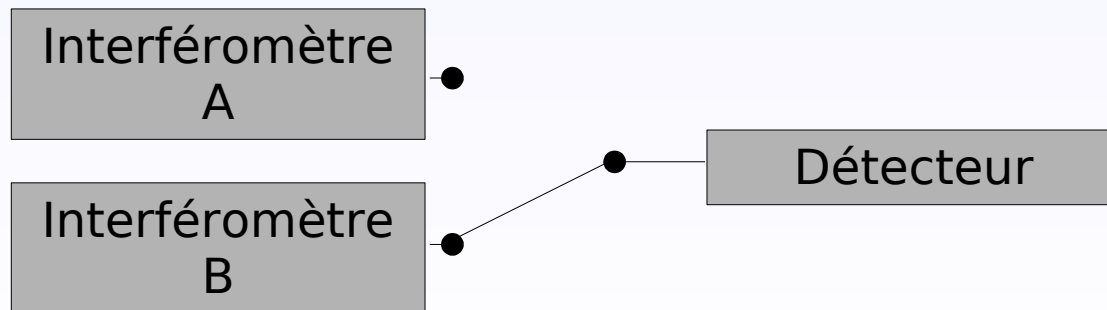
## Problème de stabilité (1 suite)

Modulation interne principe

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLIMATE
- 5.Stabilité !



Deux sous interféromètres de Bracewell

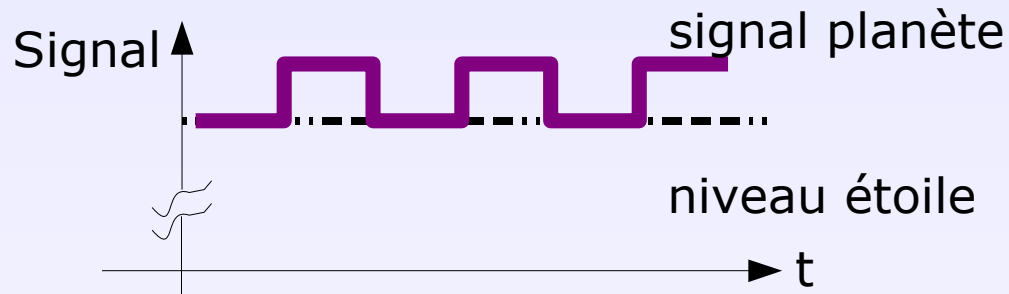


## 5. Stabilisation de l'extinction

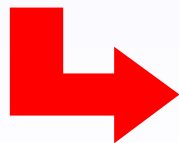
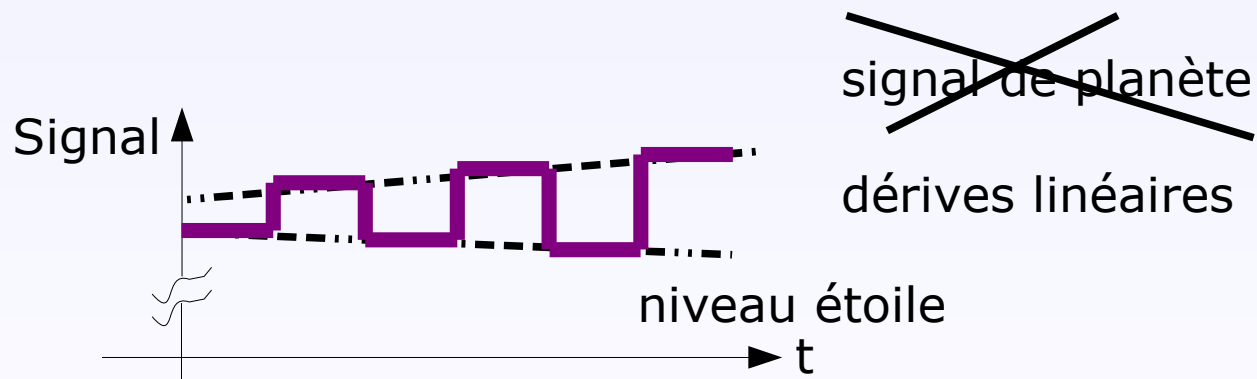
### Problème de stabilité (2)

*Cas sans dérive*

*(Lay 2004)*



*Cas avec dérive*



fausse planète

1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLTIMATE
5. Stabilité !





## 5. Stabilisation de l'extinction

### Problème de stabilité (3)

- Spécification de stabilité sur  $N$  :
  - En valeur absolue

$$\sigma_N(10 \text{ jours}) = 2,5 \times 10^{-9} (\lambda / 7 \mu m)^{3.37}$$

- En valeur relative

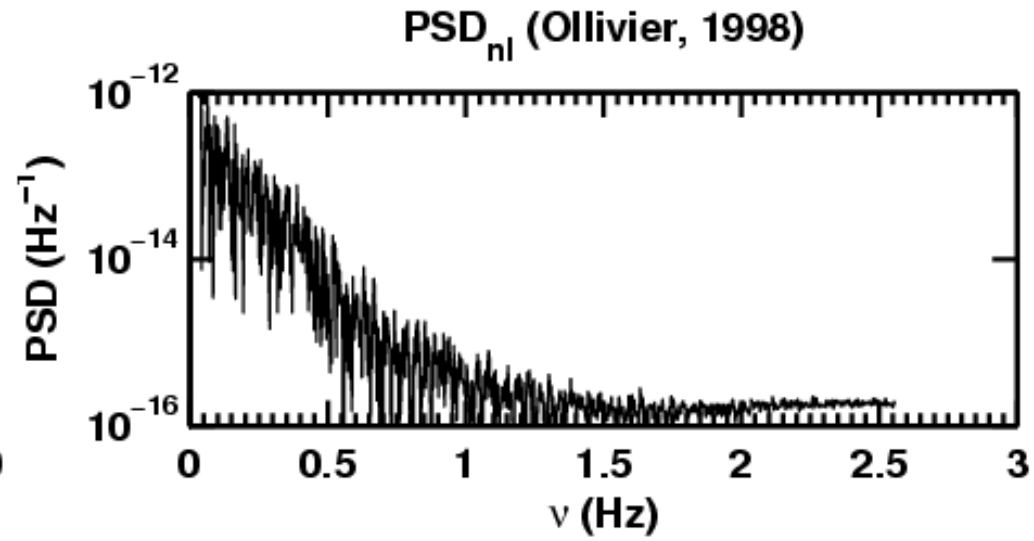
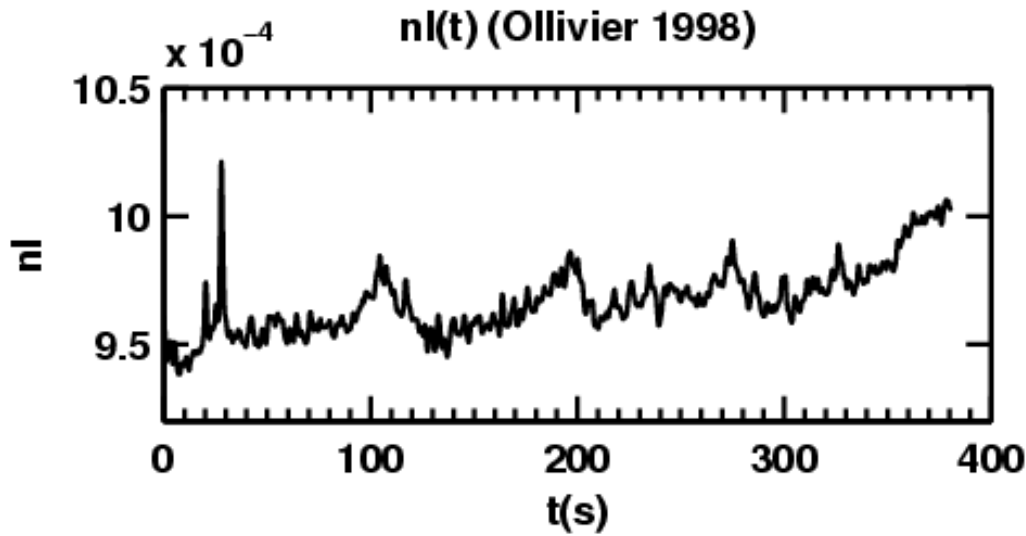
$$\frac{\sigma_N(10 \text{ jours})}{\langle N \rangle} = 2,5 \times 10^{-4}$$

(Chazelas et al 2006)

1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLTIMATE
5. Stabilité !



## Instabilité instrumentale



- Bruit en  $1/f$
- **Solution envisagée** : asservissements
  - $d_{dm}$
  - $\Delta I$
  - Base de l'interféromètre
  - ....

## 5. Stabilisation de l'extinction

### Asservissements

- Solution classique :
  - Métrologie dédiée au paramètre à asservir
  - Défauts :
    - Pas la même  $\lambda$
    - Pas exactement le même chemin optique
  - Conséquence : possibilité de dérives
  - **Avantage : souvent rapide**
- **Proposition** : métrologie sur le signal lui même

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLIMATE
- 5.Stabilité !



## 5. Stabilisation de l'extinction

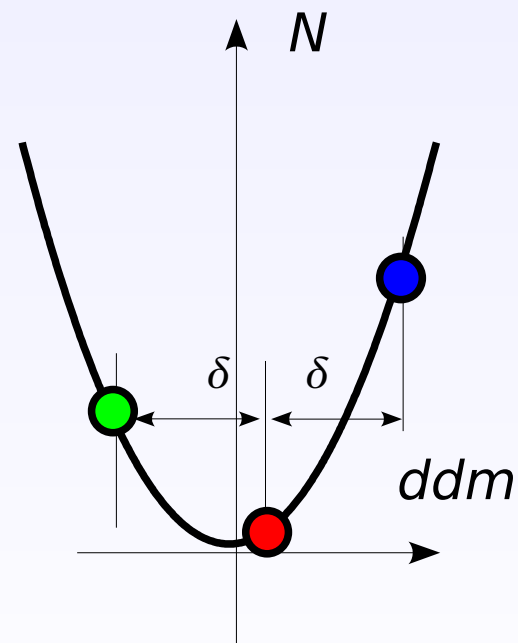
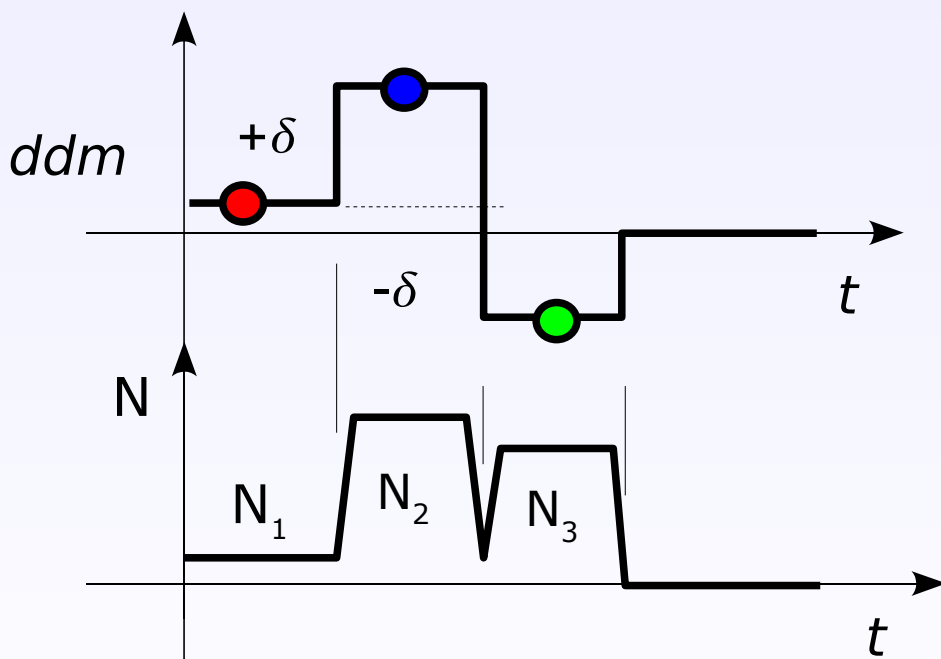
### Asservissement par modulation

- Phase et intensité :
  - effets quadratiques sur le nul

$$N = K_1 ddm^2 + K_2$$

$$N = K_3 dl^2 + K_4$$

$$ddm_{cor} = \delta \frac{N_3 - N_2}{2(N_2 + N_3) - 4N_1}$$



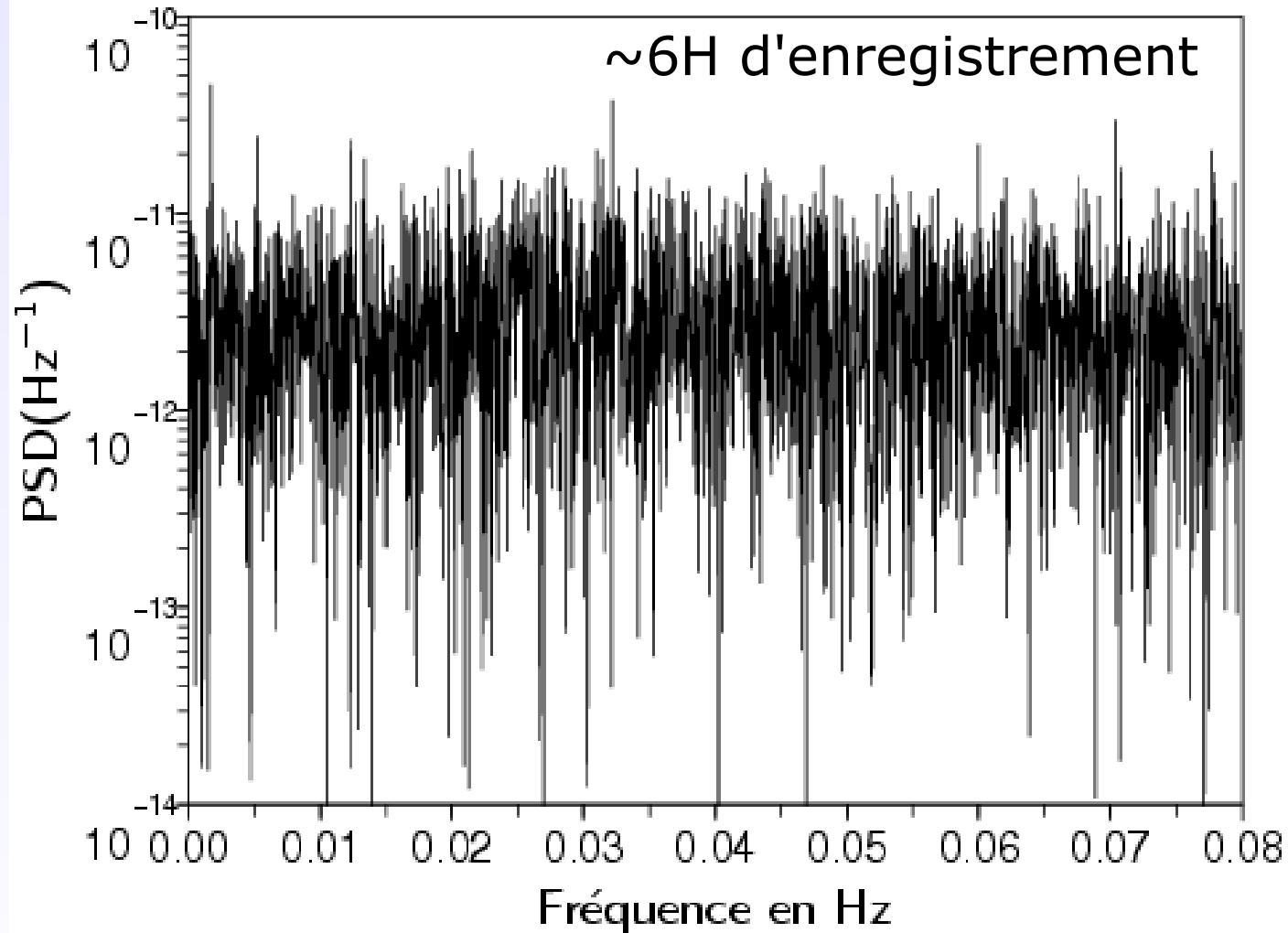
*(Schmidtlin et al 2005)*

1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLTIMATE
5. Stabilité !

## 5. Stabilisation de l'extinction

### Modulation expérimentale

Spectre de bruit de  $N$  (SYNAPSE 2006)



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

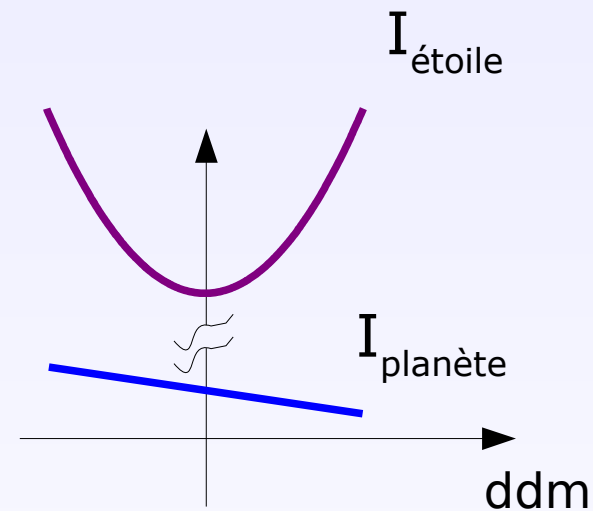


## 5. Stabilisation de l'extinction

### Application à l'instrument

- Biais avec une planète :
  - déphasage différent : flux non quadratique :

- Le plus souvent linéaire
- Décalage du zéro en ddm
- Typiquement :
  - <  $10^{-4}$  nm (TBC)
- Erreur  $F_{\text{planète}}$  (TBC)

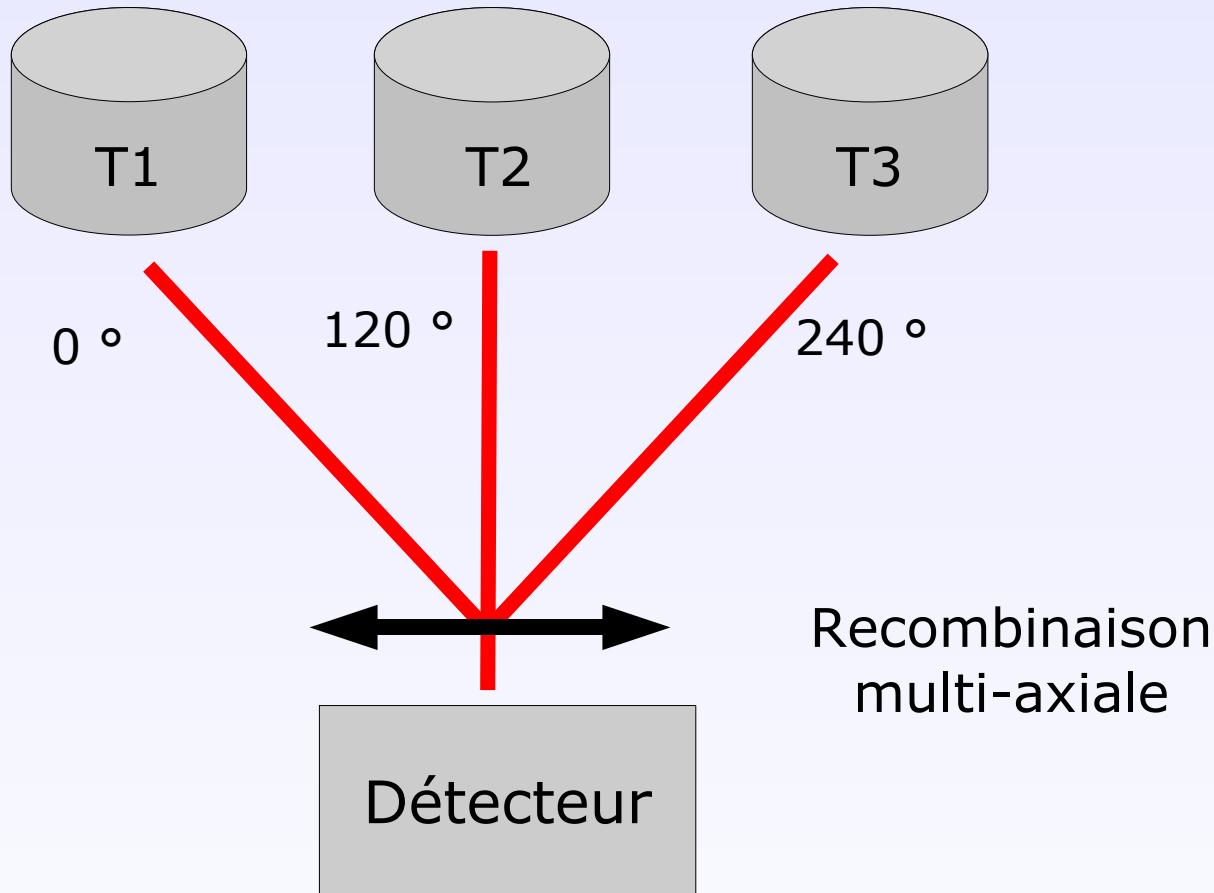


1. Des planètes
2. Interférométrie annulante
3. Extinction
4. NULLIMATE
5. Stabilité !



# 5. Stabilisation de l'extinction

## Application à l'instrument



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLIMATE
- 5.Stabilité !

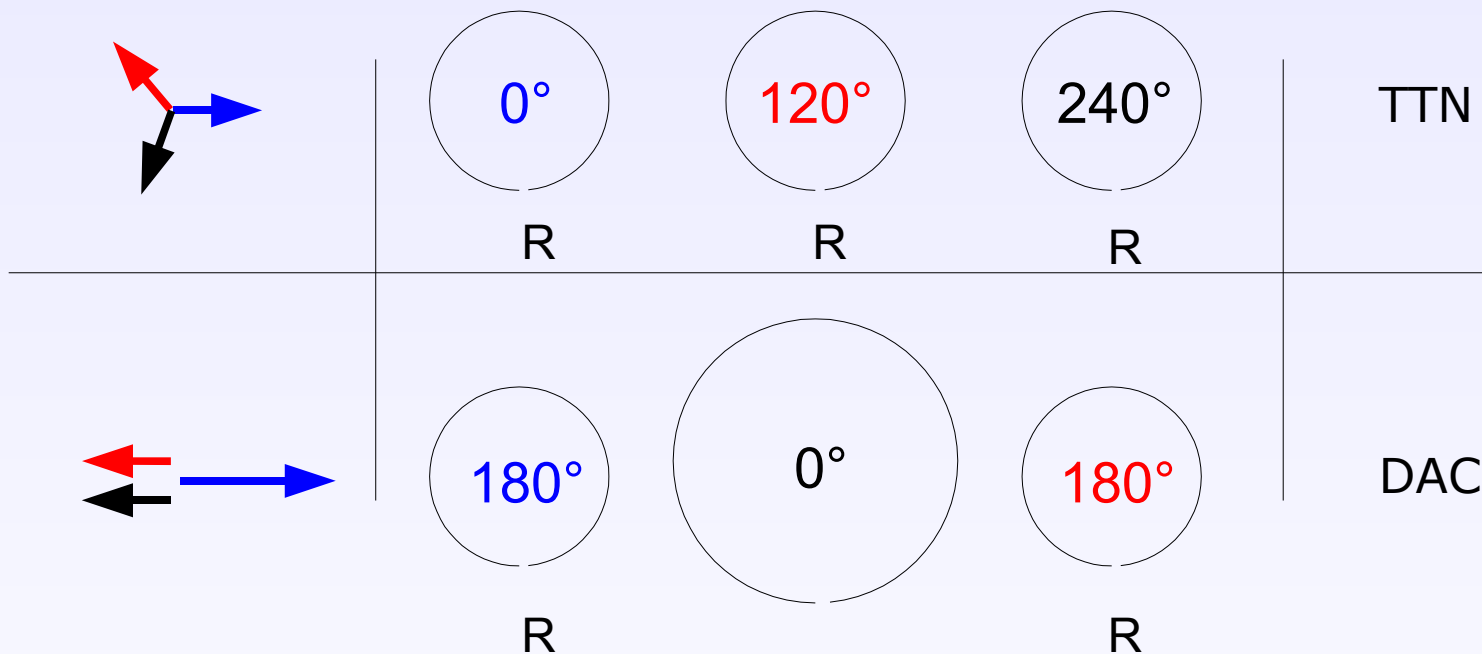


## 5. Stabilisation de l'extinction

### Application à l'instrument

À trois ondes :

- dégénérescence des combinaisons



- La modulation peut stabiliser l'extinction
- Mais  $d\text{dm} \neq 0$  et  $dI \neq 0$
- Pas de problèmes similaire à 2 ondes

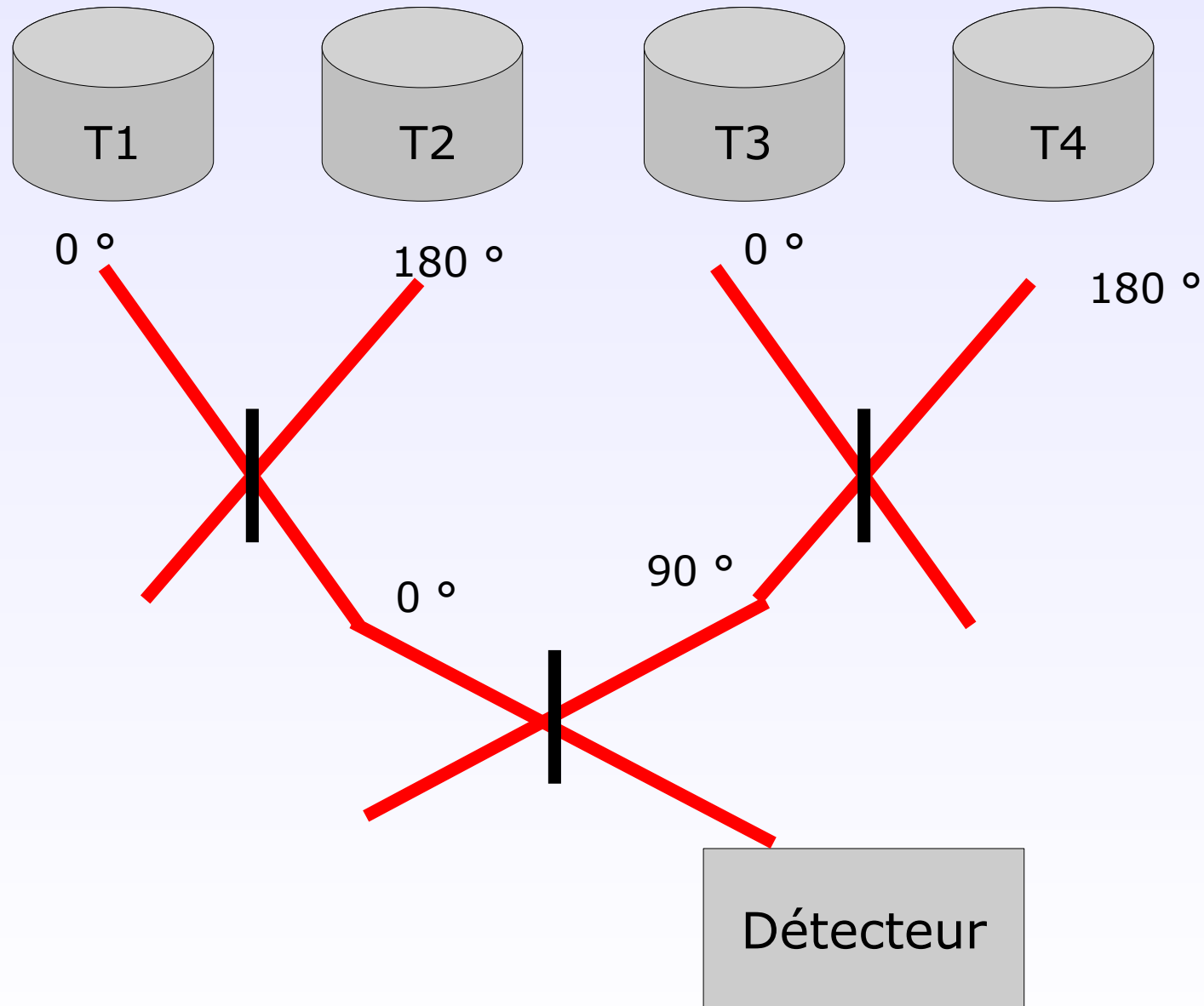
- Des planètes
- Interférométrie annulante
- Extinction
- NULLTIMATE
- Stabilité !





## 5. Stabilisation de l'extinction

### Application à l'instrument



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !

## Conclusion (1)

- Conception du banc NULLTIMATE
  - conception optique
  - dimensionnement
  - tolérancement (Polarisation)
  - études expérimentales des certains mécanismes
  - faisabilité de la mesure  $\varphi(\lambda)$  d'un APS
- Étude de l'interférométrie annulante
  - mise en évidence d'un problème de stabilité
  - étude théorique et expérimentale d'une solution

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



## Conclusion (2)

La route est longue jusqu'à NULLTIMATE

« mais la pente est forte »

La route est encore longue jusqu'à DARWIN

### **MAIS :**

- nouvelles configurations (Emma)
- méthodes pour vaincre les dérives

- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLTIMATE
- 5.Stabilité !



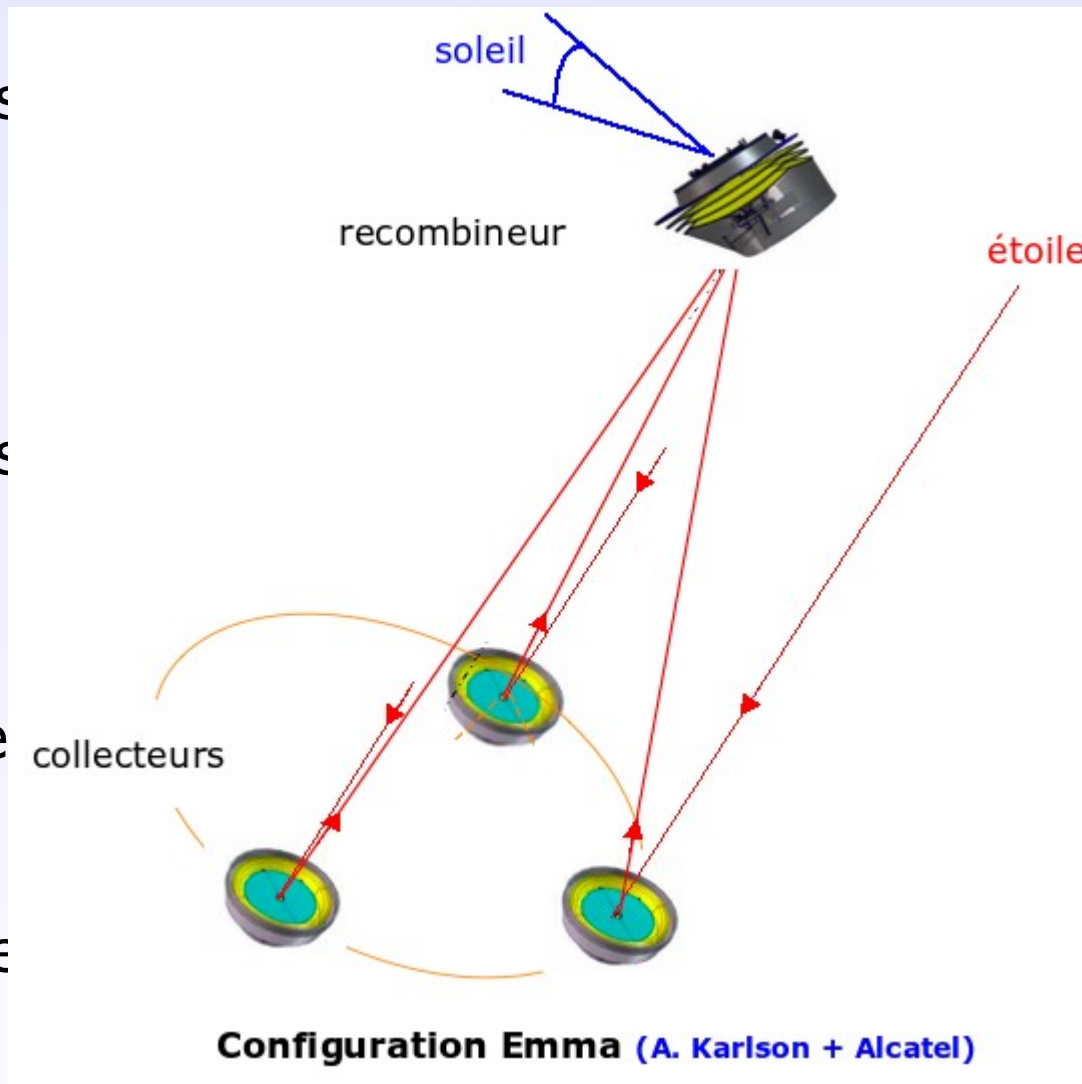
## Conclusion (2)

La route es

La route es

**MAIS :**

- nouvelle
- méthode



- 1.Des planètes
- 2.Interférométrie annulante
- 3.Extinction
- 4.NULLIMATE
- 5.Stabilité !

## Remerciements

### **IAS :**

Alain Léger, Marc Ollivier, Michel Decaudin, Alain Labèque, Frank Brachet, Pavel Gabor, Sophie Jacquinod, Gilles Morinaud, J-J Fourmond, Yuying Longval, Michel Lefebvre, Denis Barbet, Philippe Duret, Gérard Michaud, Christine Nicolas

Le service administratif dans son ensemble

**ESA :** Zoran Sodnick

**ALCATEL :** Marc Barillot, Xavier Rejeaunier, Rodolphe Krawczyk, Thierry Viard

**OCA :** Jean Gay, Yves Rabbia

**IO :** Thierry Lépine, Jean Louis Meyzonette

**LPUB :** Jacques Mangin, Gregory Gadret

**L'ensemble des membres du consortium  
NULLTIMATE**

- 1.Des planètes**
- 2.Interférométrie annulante**
- 3.Extinction**
- 4.NULLTIMATE**
- 5.Stabilité !**

