

Du laboratoire aux exoplanètes ...



Étude et développement d'un déphaseur achromatique pour l'interférométrie en frange noire

Frank Brachet



*sous la direction d'Alain Léger
et de Marc Ollivier*



Plan



1. La recherche d'exoplanètes
2. Vers une détection directe : la mission Darwin
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. Mesures et résultats
6. Conclusions et perspectives

Plan



1. La recherche d'exoplanètes
2. Vers une détection directe : la mission Darwin
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. Mesures et résultats
6. Conclusions et perspectives

Un cadre d'étude large ...

Exoplanétologie

Recherche de la
vie dans l'Univers

... une approche progressive

✓ Existe-t-il des planètes

en dehors du Système Solaire ?

1995 : 1^{ère} détection, 51 *Peg* (*Mayor & Queloz, 1995*)

2000 : 1^{er} transit exoplanétaire, HD209458b

(*Charbonneau et al., 1999 ; Henry et al., 1999*)

✓ Accumuler des statistiques

... au 14 décembre 2005 :

- 146 systèmes planétaires détectés
- 170 planètes
dont 161 par la méthode des vitesses radiales
- 18 systèmes multiples (55 *Cnc* : 4 planètes)

↪ Détecter des exoplanètes telluriques

☞ détections indirectes

☞ vitesses radiales : 1 m/s (Terre : 9 cm/s)

☞ transits :

☞ 2006 : CoRoT (CNES)

☞ 2009 : Kepler (NASA)

↳ Ces exoplanètes sont-elles habitables ...

1. Détection directe ... habitées ?

2. Étude complète, analyse spectrale

↳ Recherche de **bio-signatures**

↳ Vie basée sur la chimie du carbone,
en solution dans l'eau

↳ Critères :

↳ O_2 , CO_2 , H_2O (visible) (Owen, 1980)

↳ O_3 , CO_2 , H_2O (infrarouge) (Angel, 1986)

Objectif : caractériser des exoplanètes



Plan



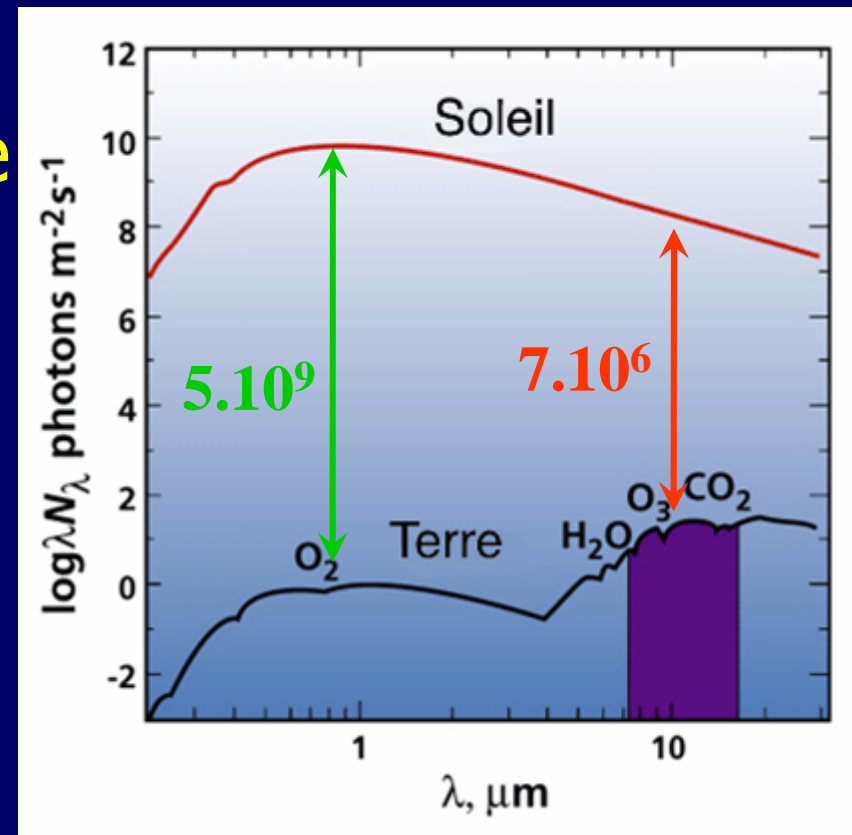
1. La recherche d'exoplanètes
2. **Vers une détection directe : la mission Darwin**
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. Mesures et résultats
6. Conclusions et perspectives

Enjeux et motivations



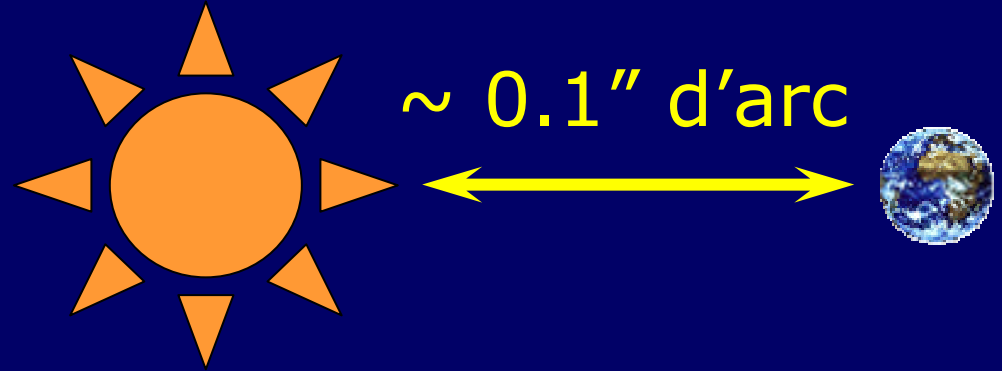
- ➔ Détection directe d'exoplanètes
 - ➔ Exoplanétologie des planètes géantes et telluriques
 - ➔ Analyse spectrale et recherche d'éventuelles bio-signatures
- 3 objectifs, mais des contraintes majeures ...

Contraste étoile / planète



Contraste étoile / planète

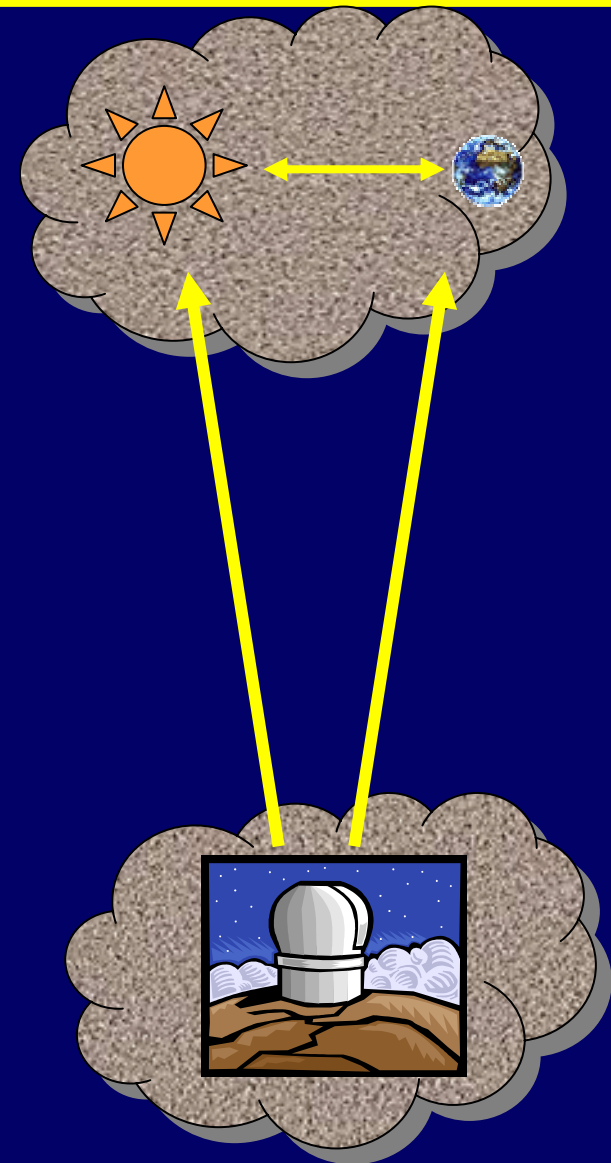
Résolution angulaire



Contraste étoile / planète

Résolution angulaire

Lumières zodiacale et exozodiacale

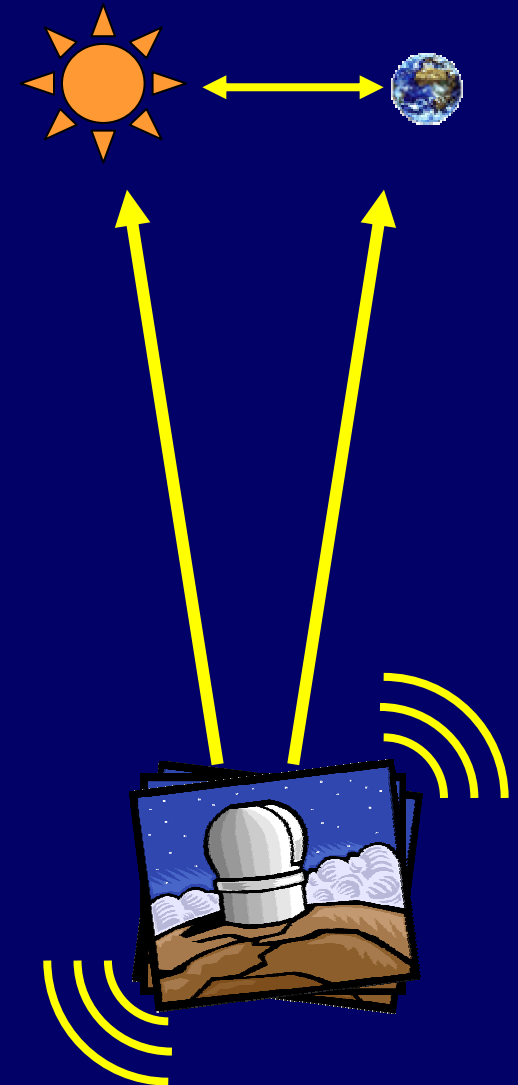


Contraste étoile / planète

Résolution angulaire

Lumières zodiacale et exozodiacale

⇒ contrainte instrumentale :
Stabilité durant les observations



Solutions possibles



Visible : télescope "classique" + coronographe

↳ mission TPF-C (*NASA*)

Infrarouge : interféromètre en frange noire

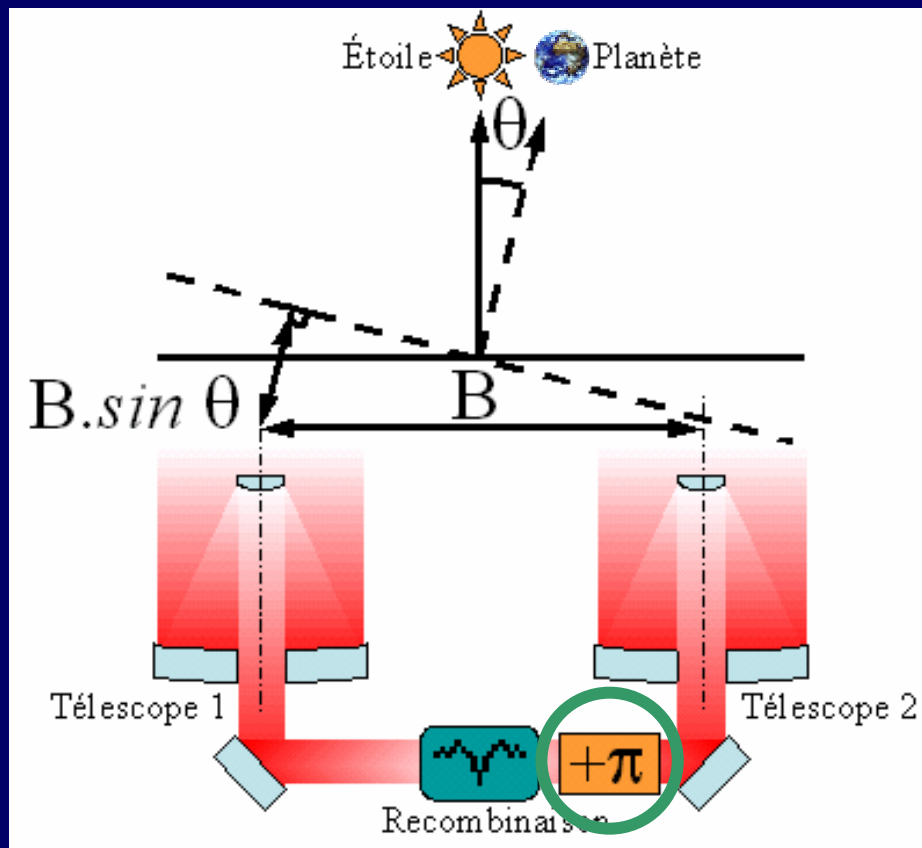
↳ mission Darwin (*ESA*)

↳ mission TPF-I (*NASA*)

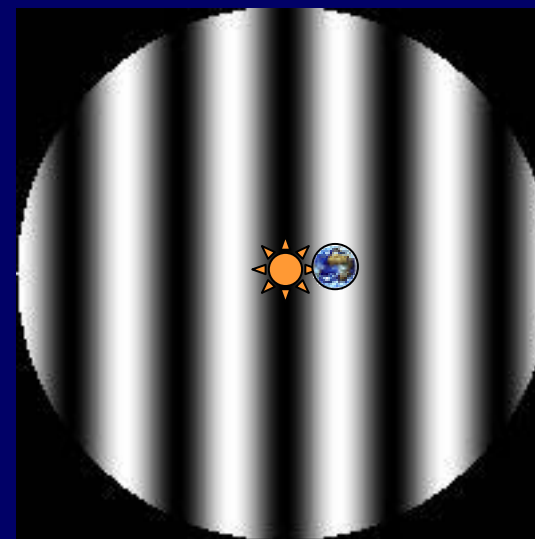
... une solution pour Darwin (1)



↳ Interférométrie en "frange noire"



Interféromètre de Bracewell (1978)



1 " d'arc

$\lambda = 10 \mu\text{m}$, $B = 10 \text{ m}$, $\theta = 0,1 \text{ " d'arc}$

↳ Interférométrie en "frange noire"

Taux de réjection :

$$\rho = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$$

Objectif :

10^5

ou

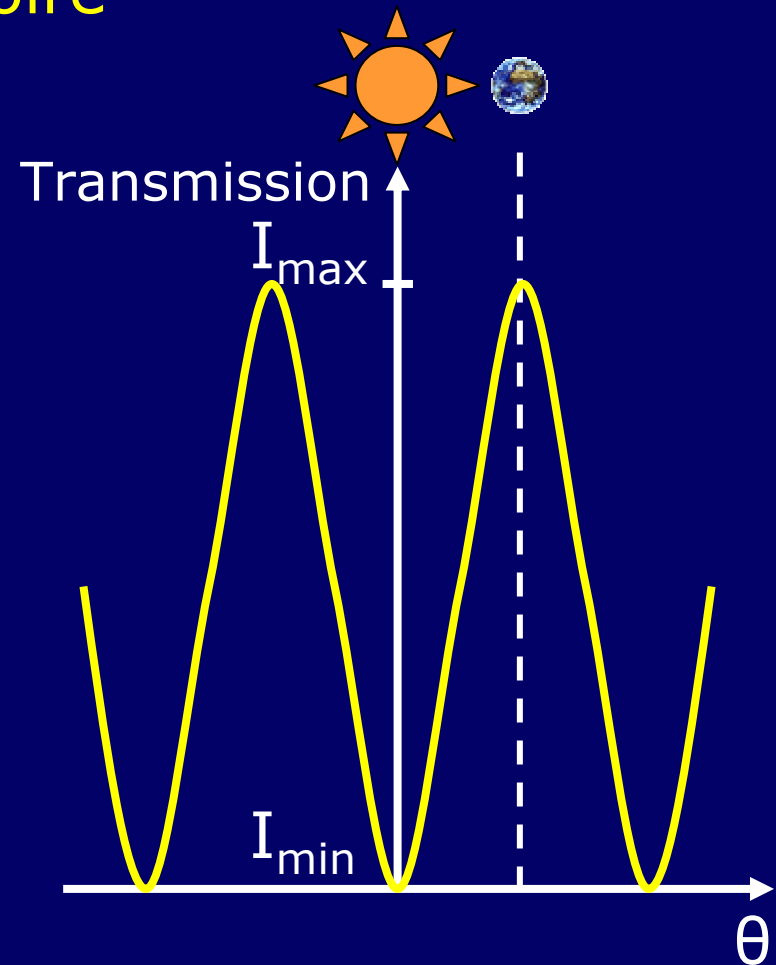
Fuites stellaires (*Nulling*) :

$$N = \frac{1}{\rho} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}$$

Objectifs :

10^{-5}

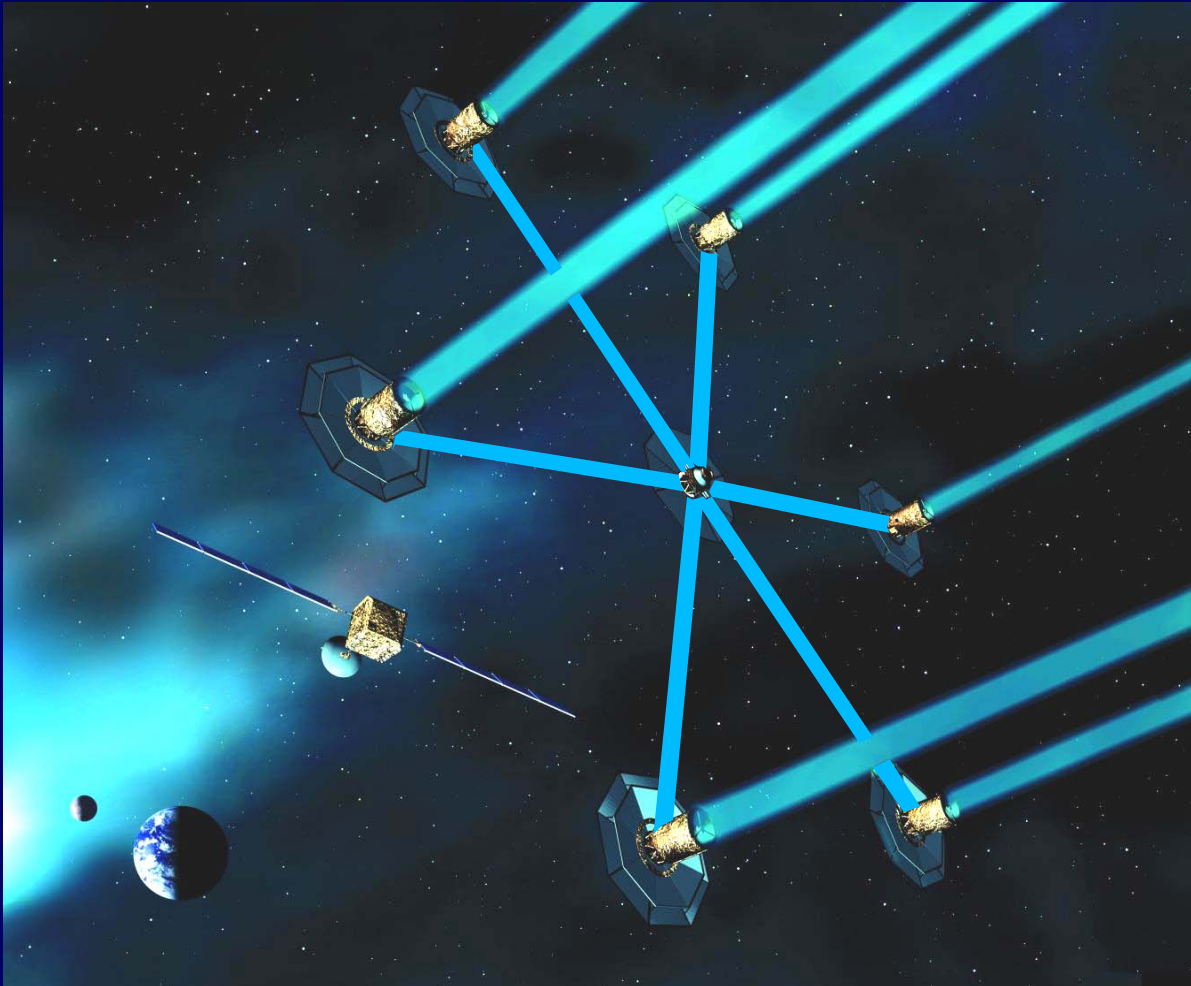
mais $\sigma_N \approx 2,5 \cdot 10^{-9}$!



La mission Darwin (1)



☞ Interféromètre spatial (base variable de 50 à 500 m)



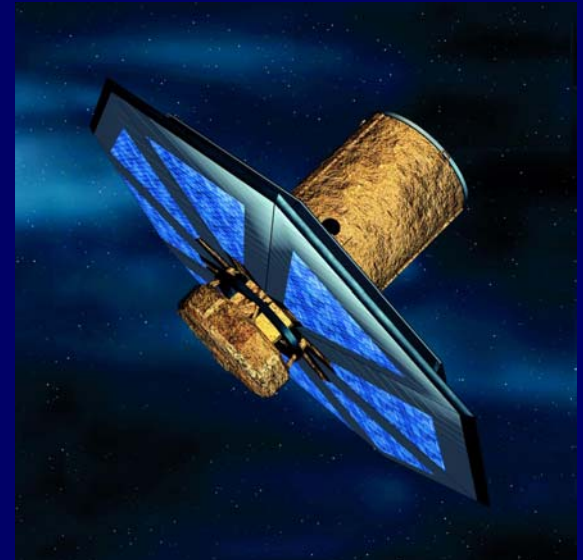
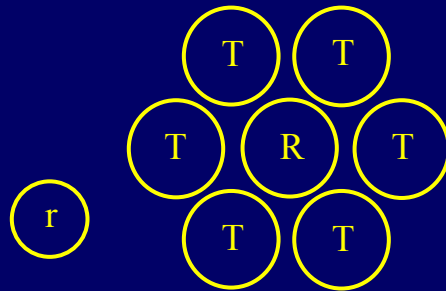


La mission Darwin (2)

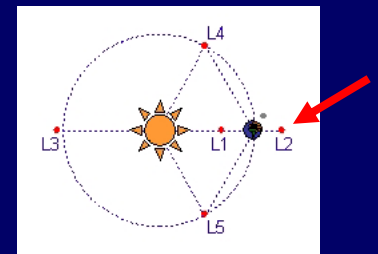


- Flottille de 6 télescopes, 1 recombineur central et 1 relais

Une configuration possible !



- Taux de réjection de qq 10^4 à 10^5
- Spectroscopie basse résolution : $R = 20$ à 50
- Observations entre 6 et 20 μm (déphasage achromatique)
→ Signatures de O_3 , H_2O et CO_2 (Angel, 1986)
- Orbite autour du point de Lagrange L2



Plan

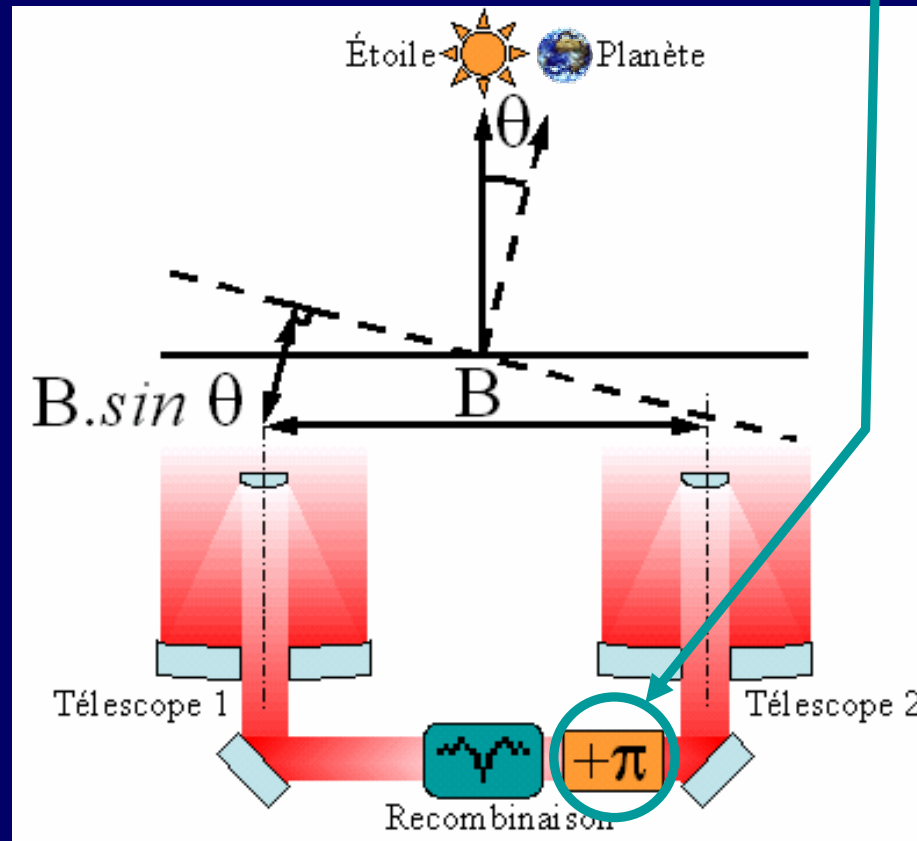


1. La recherche d'exoplanètes
2. Vers une détection directe : la mission Darwin
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. Mesures et résultats
6. Conclusions et perspectives

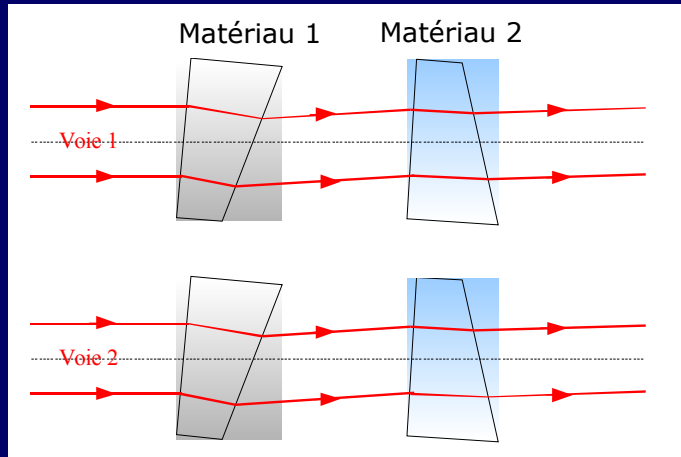
Déphasage achromatique (1)



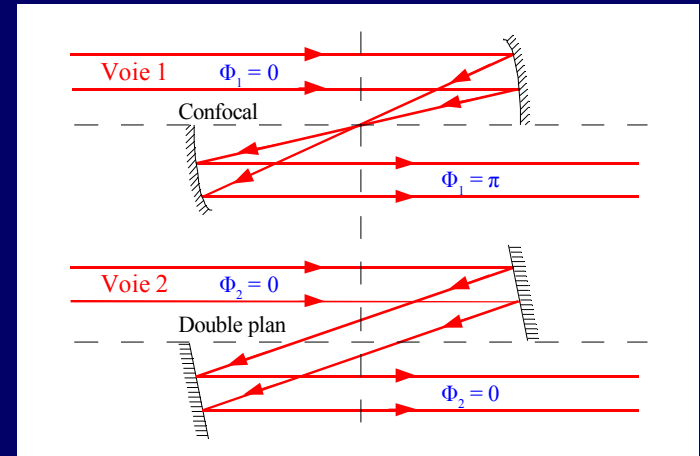
“Éteindre” l'étoile \Leftrightarrow déphaser de π
sur $[\lambda_{\min} ; \lambda_{\max}]$



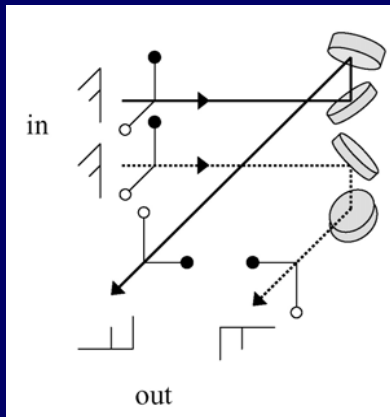
De multiples solutions ...



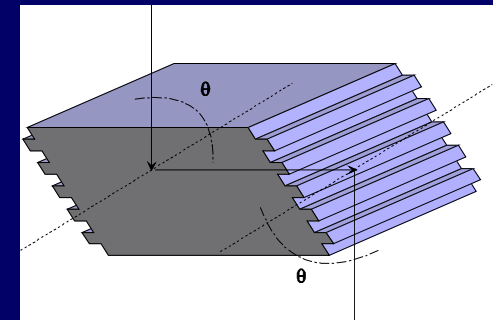
Lames dispersives



Passage par un foyer optique (effet Gouy)
(Gay & Rabbia, 1996)



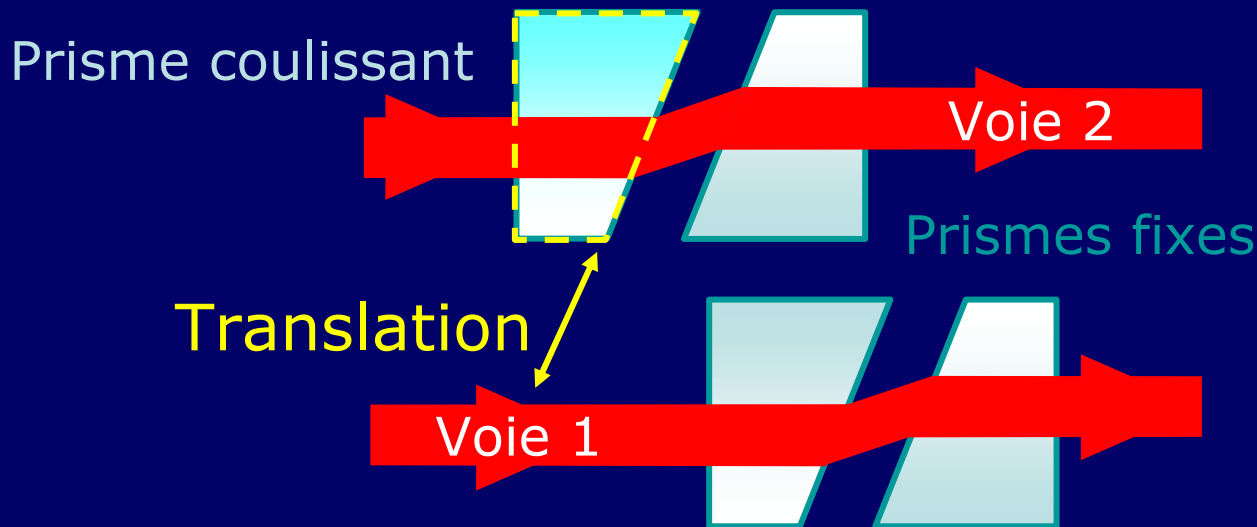
Retournement du champ électrique
(Serabyn et Colavita, 2001)



Réseaux sub-lambdas
(Mawet et al., 2003)

... une solution particulière de lames dispersives

Principe des prismes déphaseurs



Translation du prisme coulissant

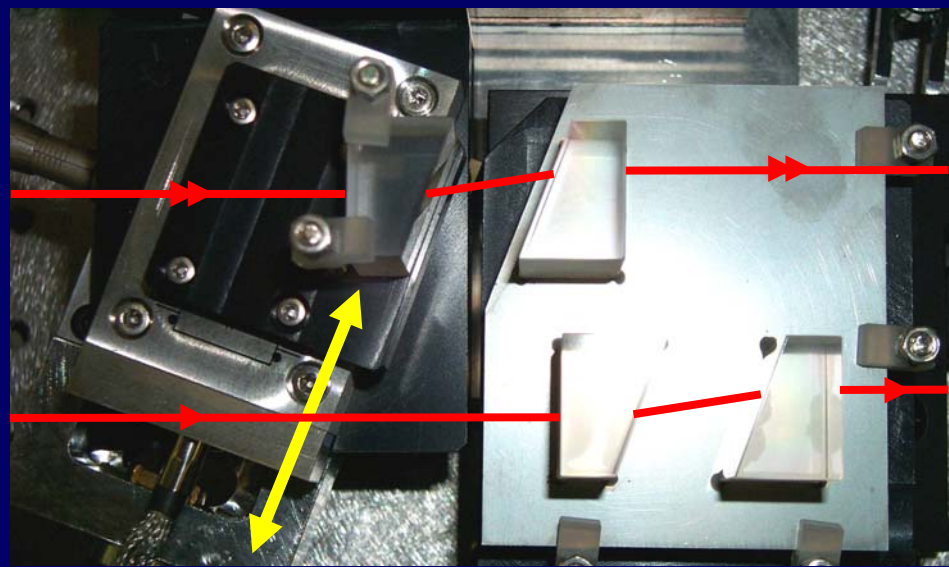
⇒ Variation de l'épaisseur de matériau différentielle e
ET de la différence de marche $d\Delta m$
entre les voies de l'interféromètre

Déphasage achromatique (4)

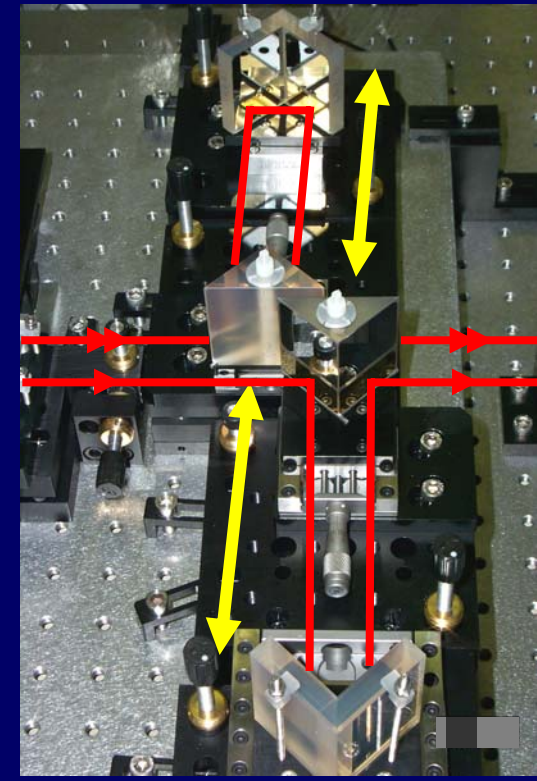


Déphasage :
$$\Delta\phi(\lambda, e, ddm) = \frac{2\pi}{\lambda} [e(n_{\text{prisme}}(\lambda) - n_{\text{air}}) + ddm n_{\text{air}}]$$

⇒ Espace de 2 paramètres : e et ddm



Prismes déphaseurs

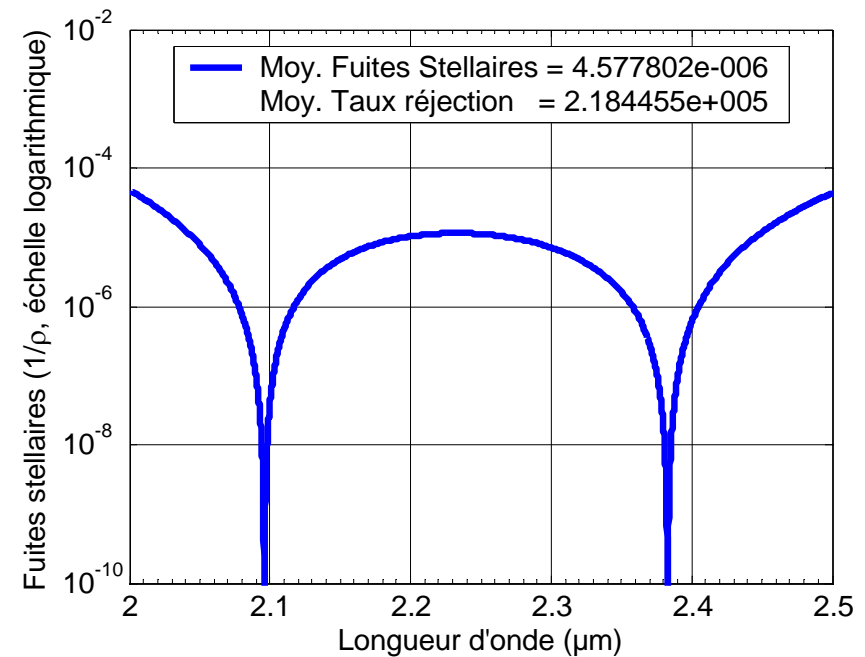
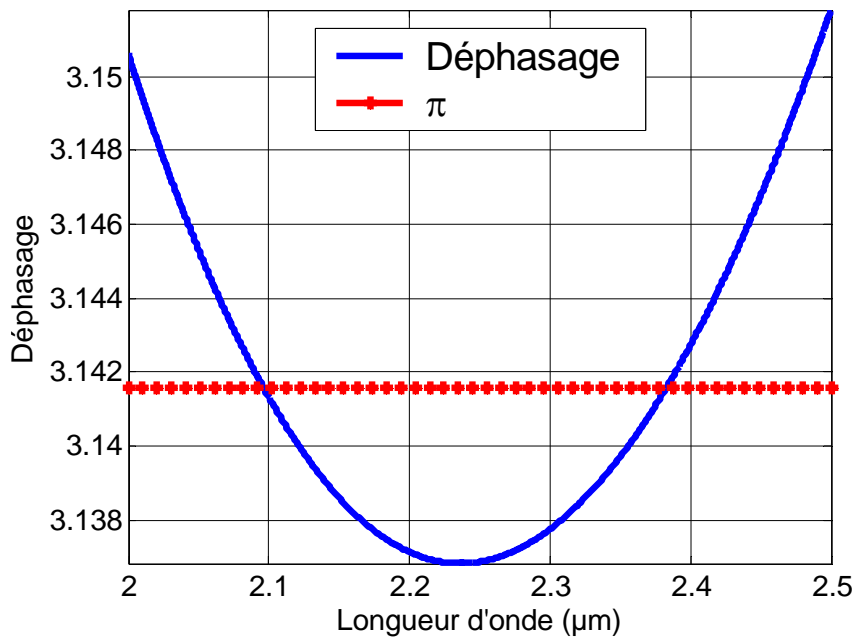


Lignes à retard

Déphasage achromatique (5)



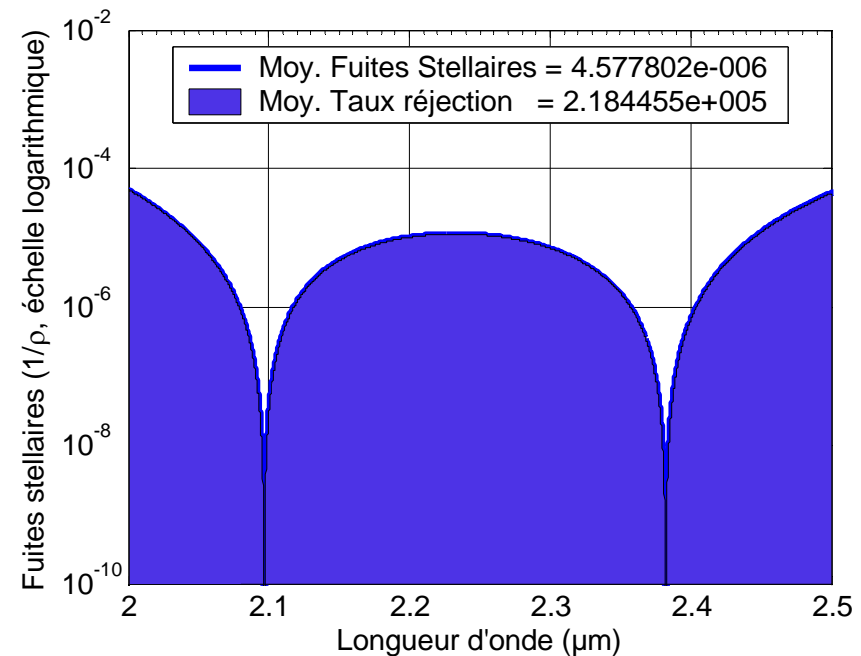
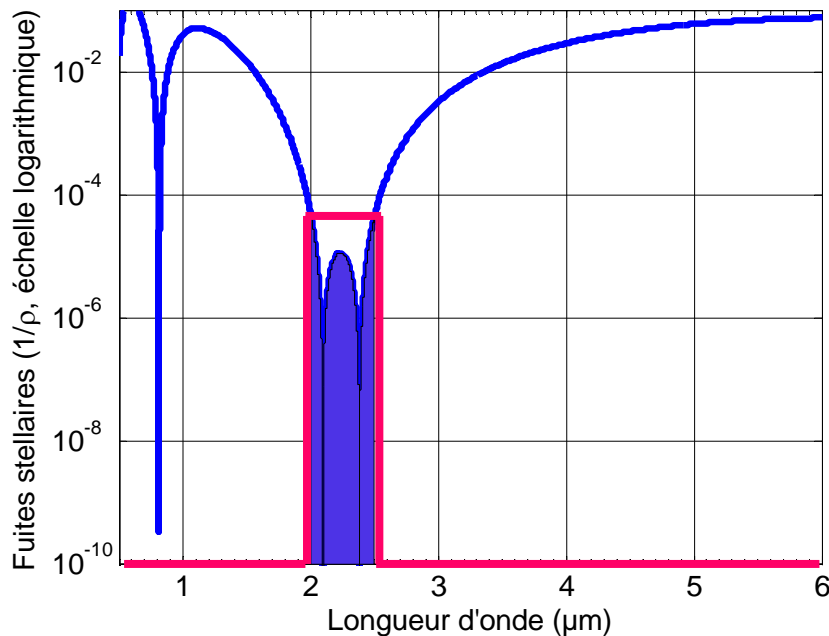
- Détermination du couple optimal (e , d , m)
- Achromatisation sur $[\lambda_{\min} ; \lambda_{\max}]$



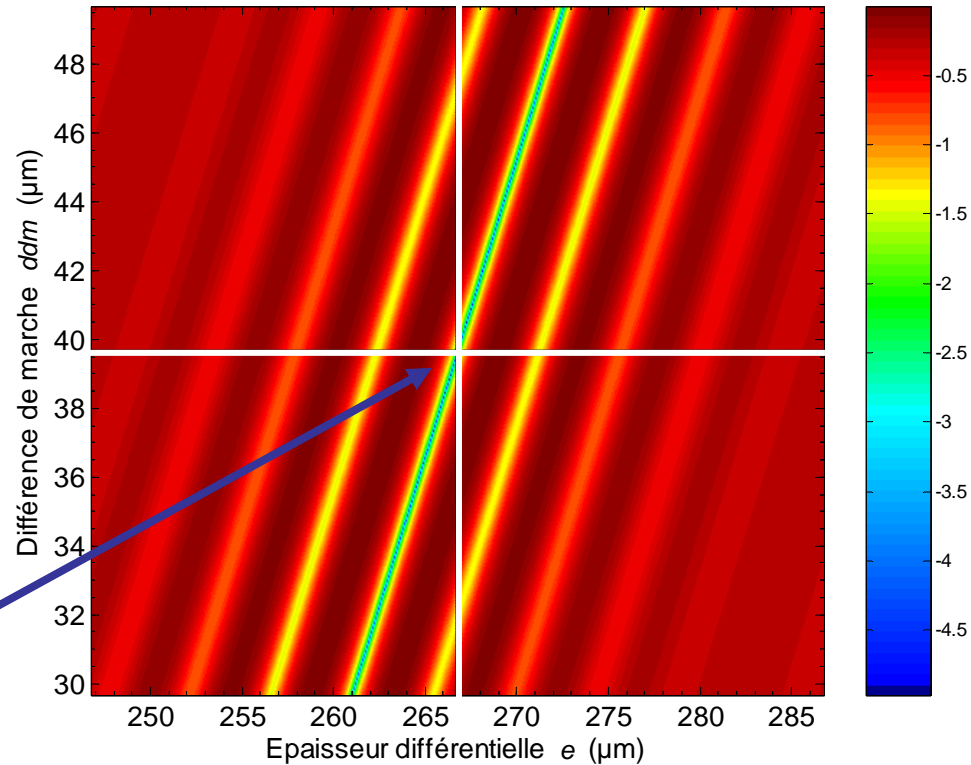
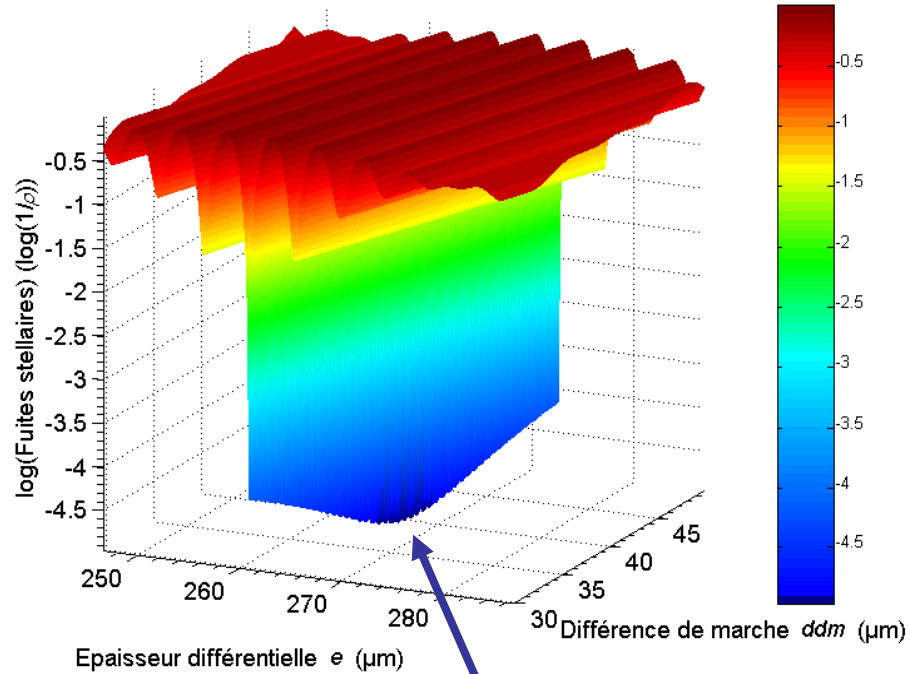
Déphasage achromatique (6)



- Détermination du couple optimal (e , d dm)
- Achromatisation sur $[\lambda_{\min} ; \lambda_{\max}]$

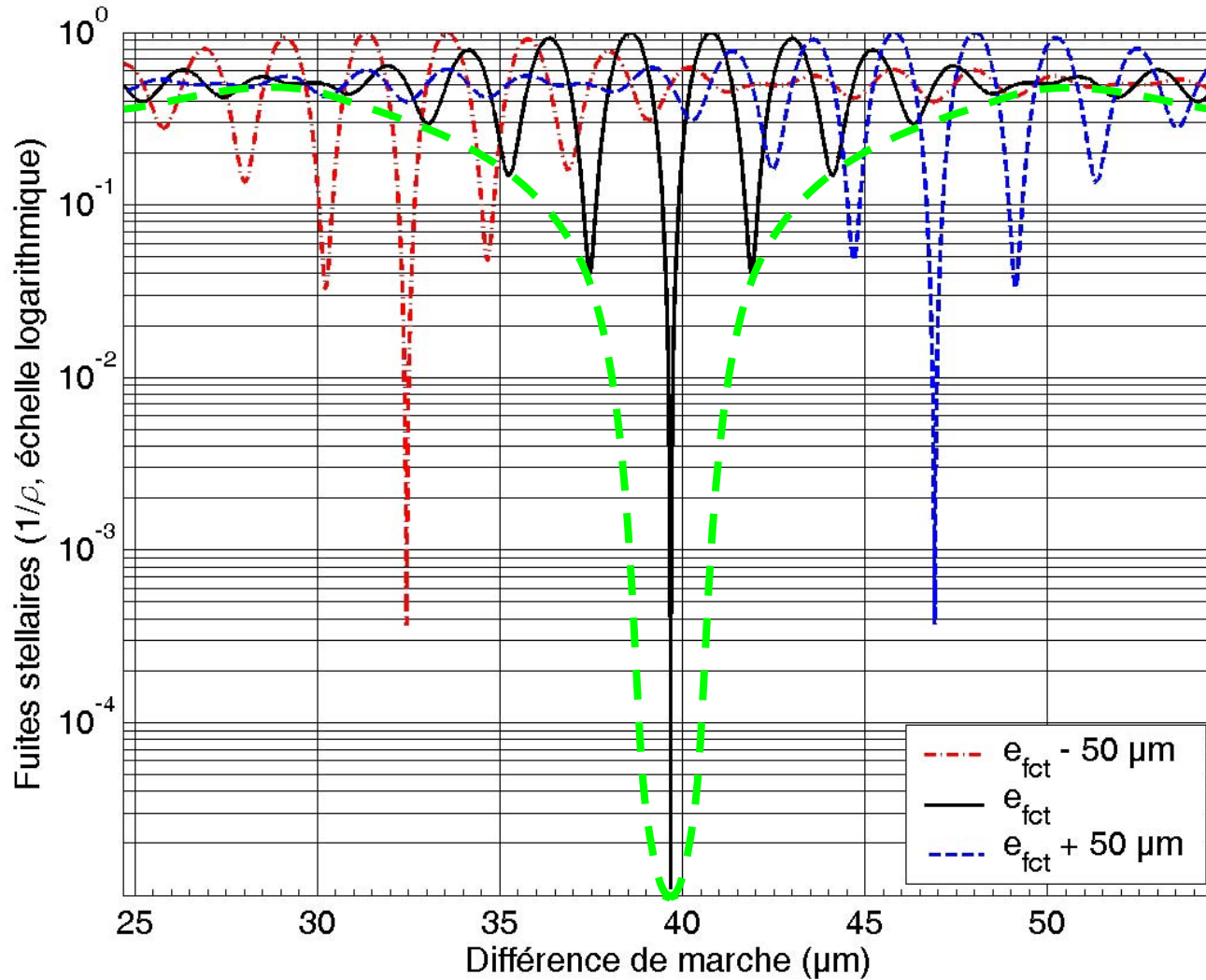


Point de fonctionnement (1)



Point de fonctionnement

Point de fonctionnement (2)





Plan



1. La recherche d'exoplanètes
2. Vers une détection directe : la mission Darwin
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. Mesures et résultats
6. Conclusions et perspectives



Le banc SYNAPSE (1)



Symmetric **N**uller for **A**chromatic **P**hase **S**hifters **E**valuation

Objectifs :

- **Obtenir de fortes réjections (qq 10^4) :**
 - en proche infrarouge (bandes K et L)
 - en bande large ($\Delta\lambda/\lambda = 18\%$)
- **Tester différents déphaseurs achromatiques :**
 - Lames dispersives (prismes)
 - Passage par un foyer optique
- **Étudier la stabilité de la réjection**

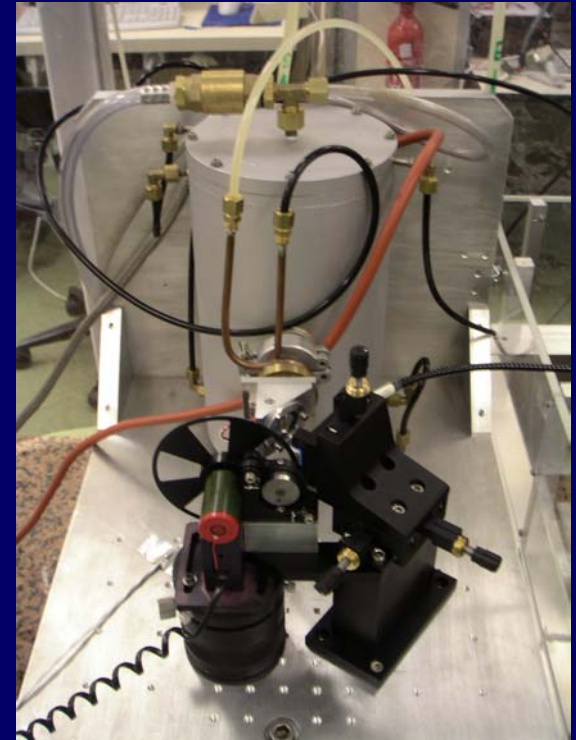
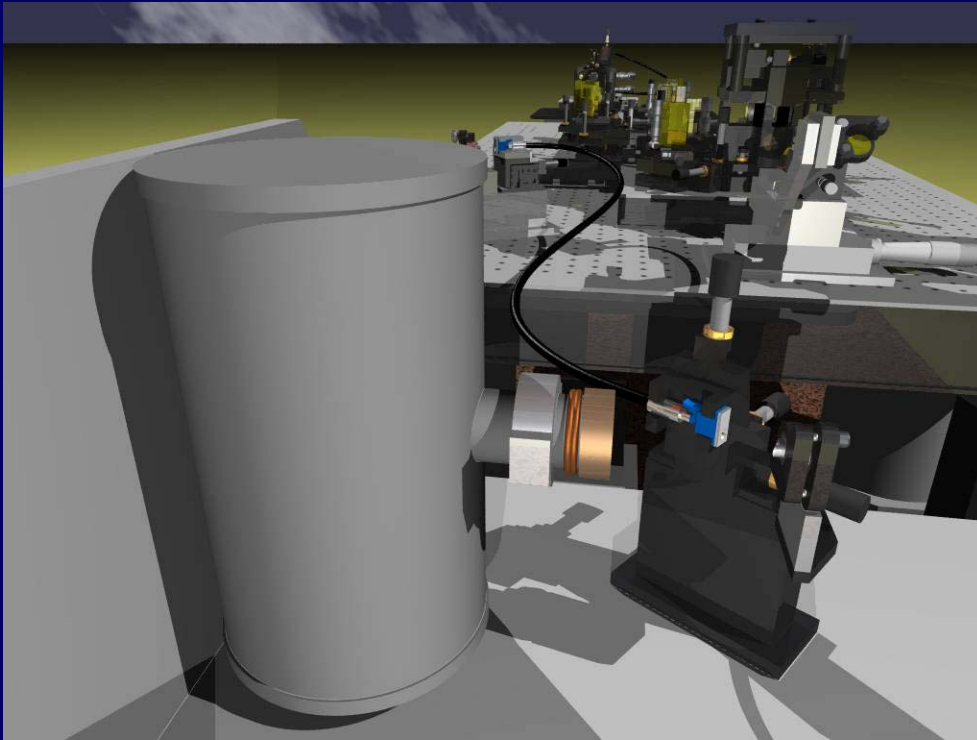
Le banc SYNAPSE (2)



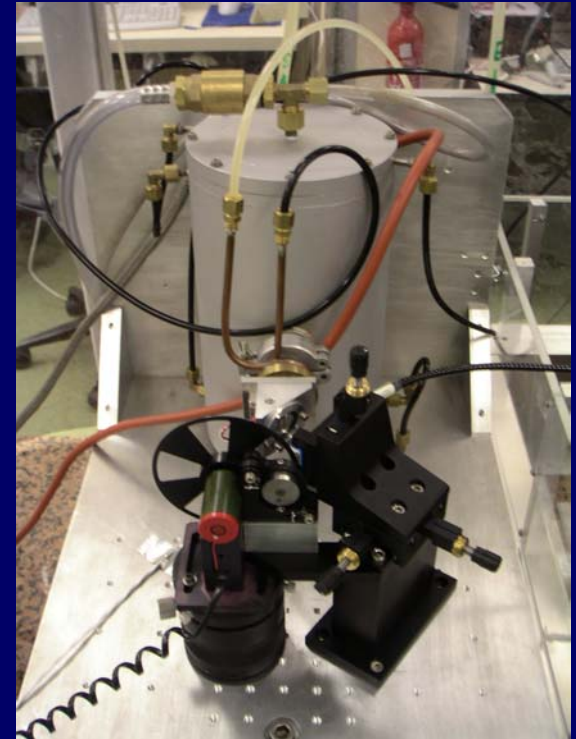
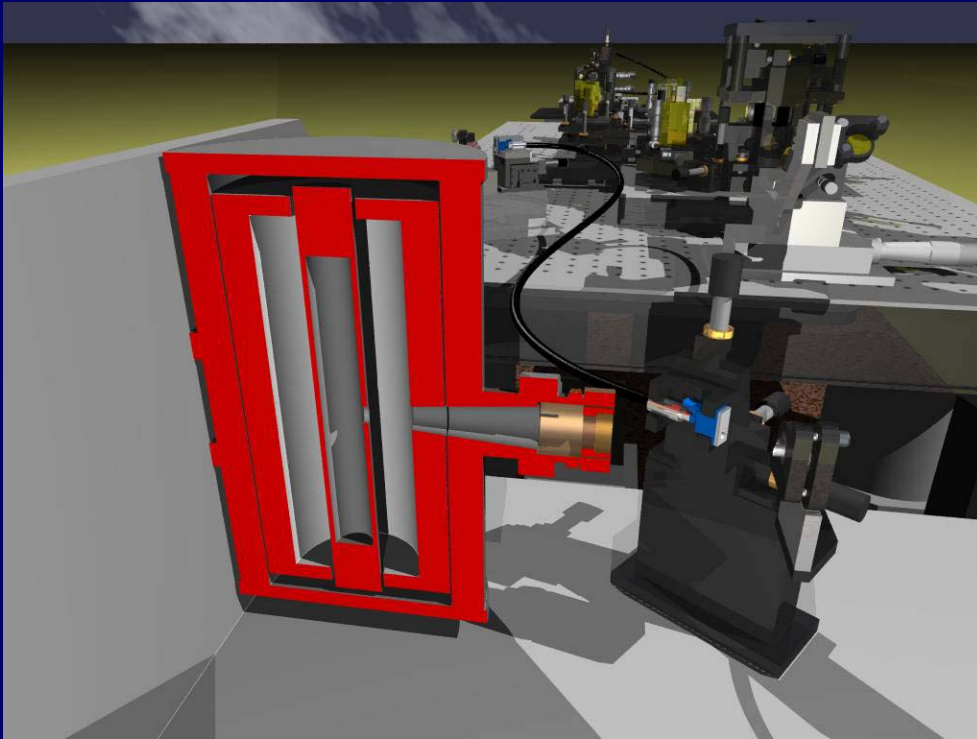
1^{er} élément : une "étoile"
un "corps noir" à 2000 K



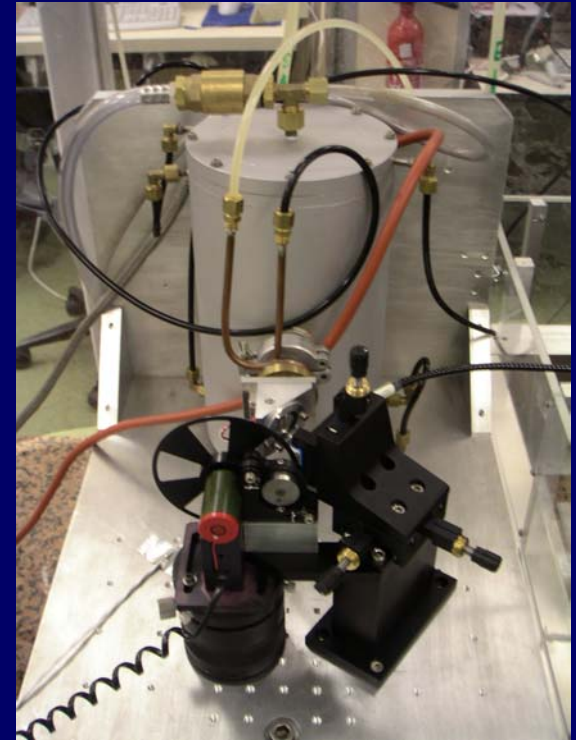
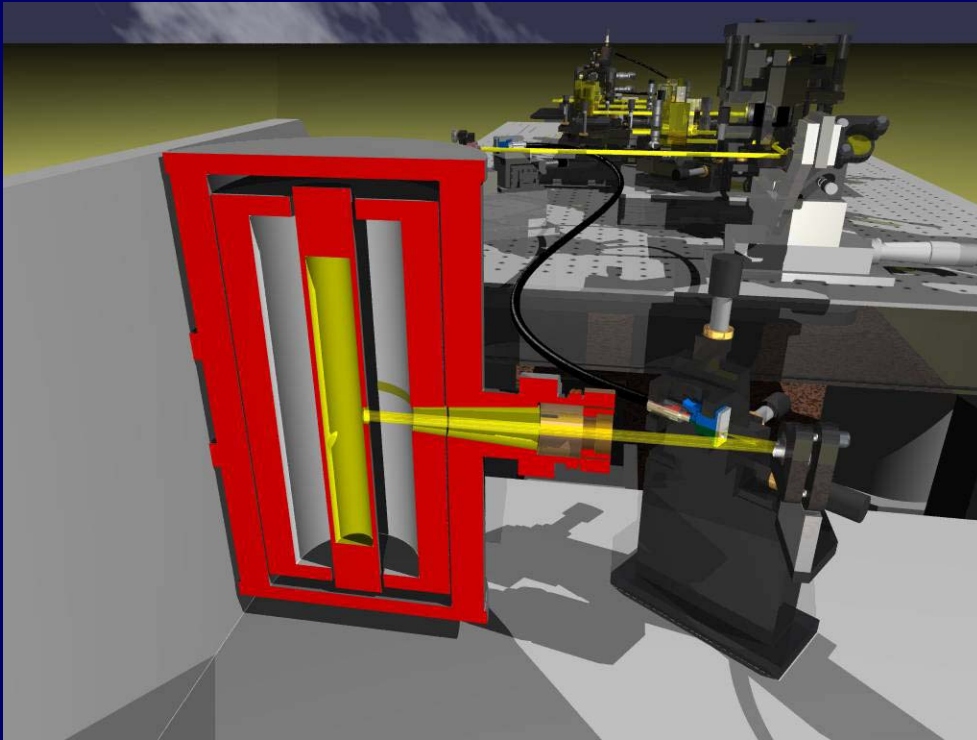
Corps noir



Corps noir



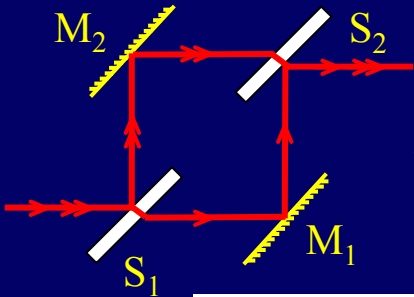
Corps noir



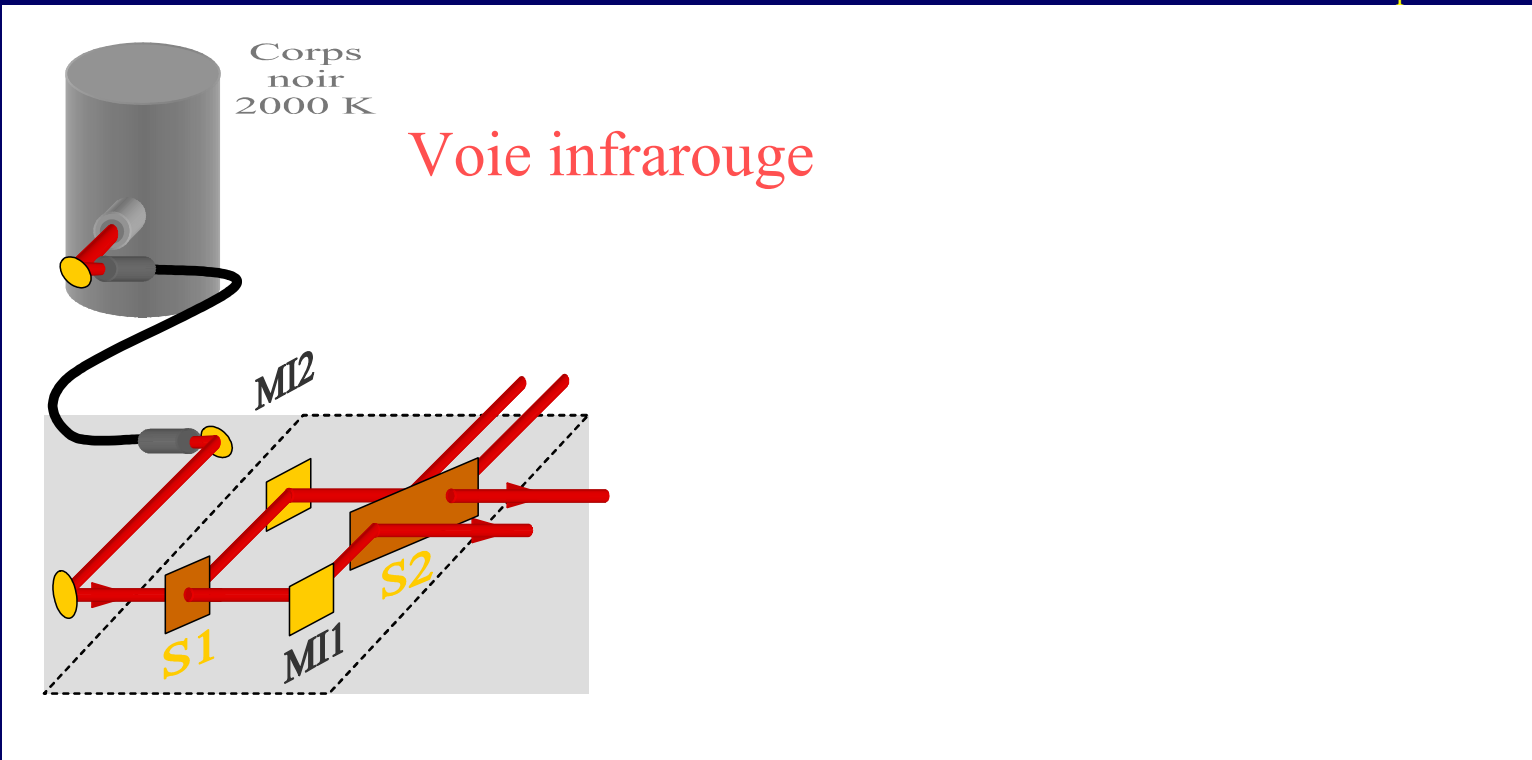
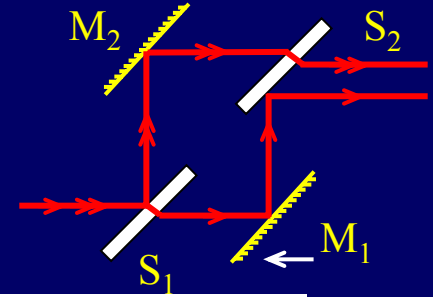
Le banc SYNAPSE (3)



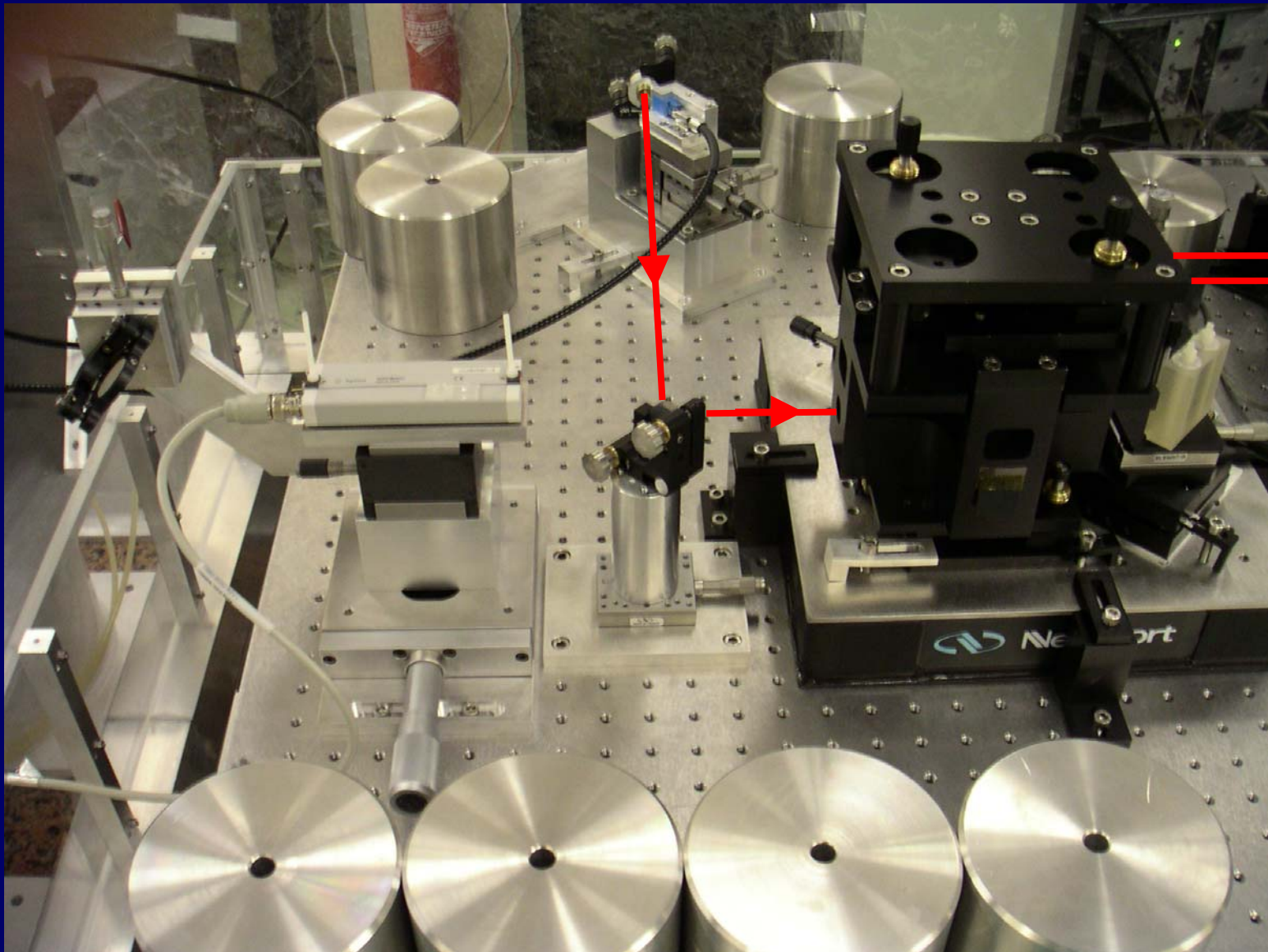
2^{ème} élément : deux télescopes ↔ deux faisceaux



Interféromètre de Mach-Zehnder modifié
(Serabyn et al., 2000)



Injection et « séparatrice »

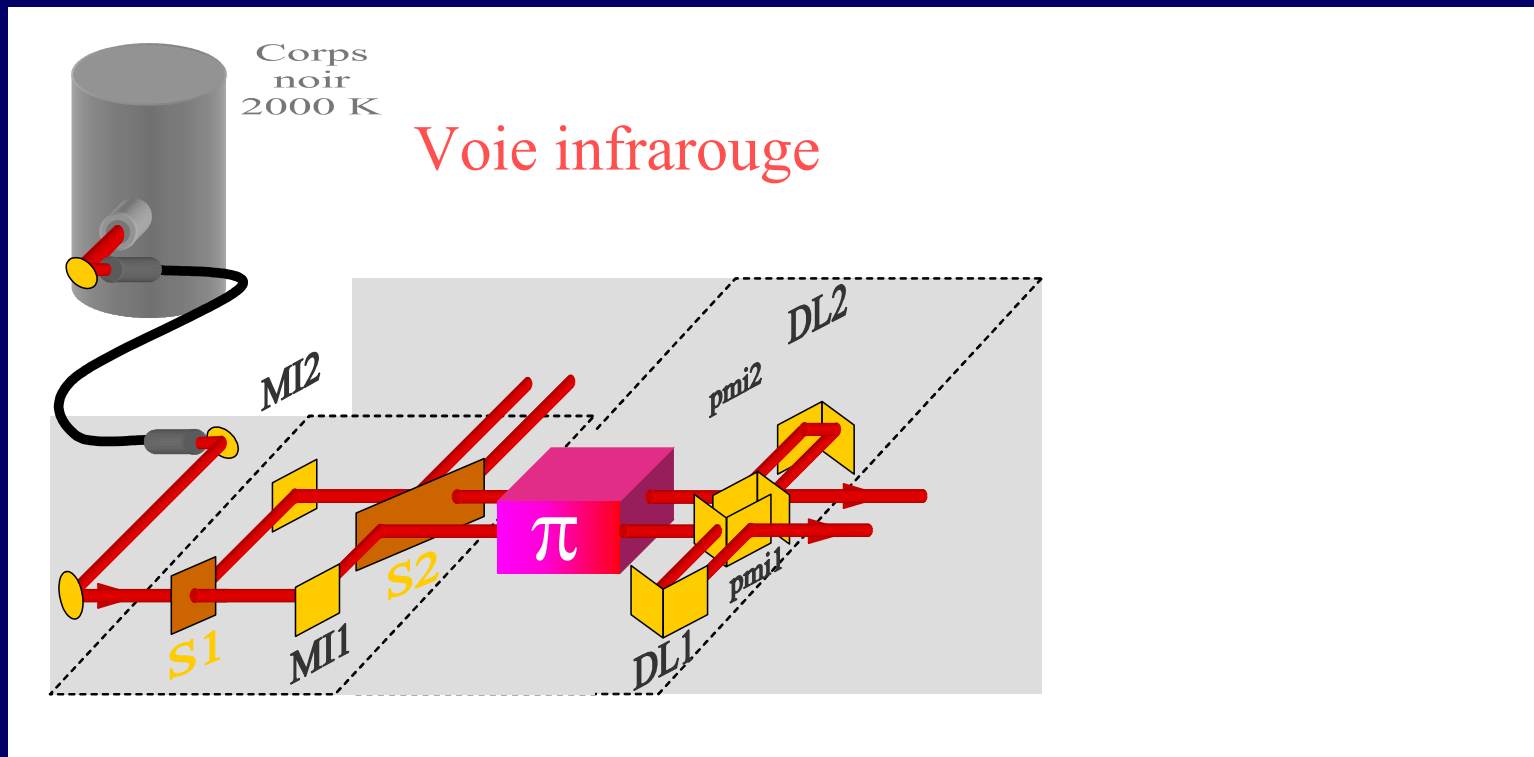


Le banc SYNAPSE (4)

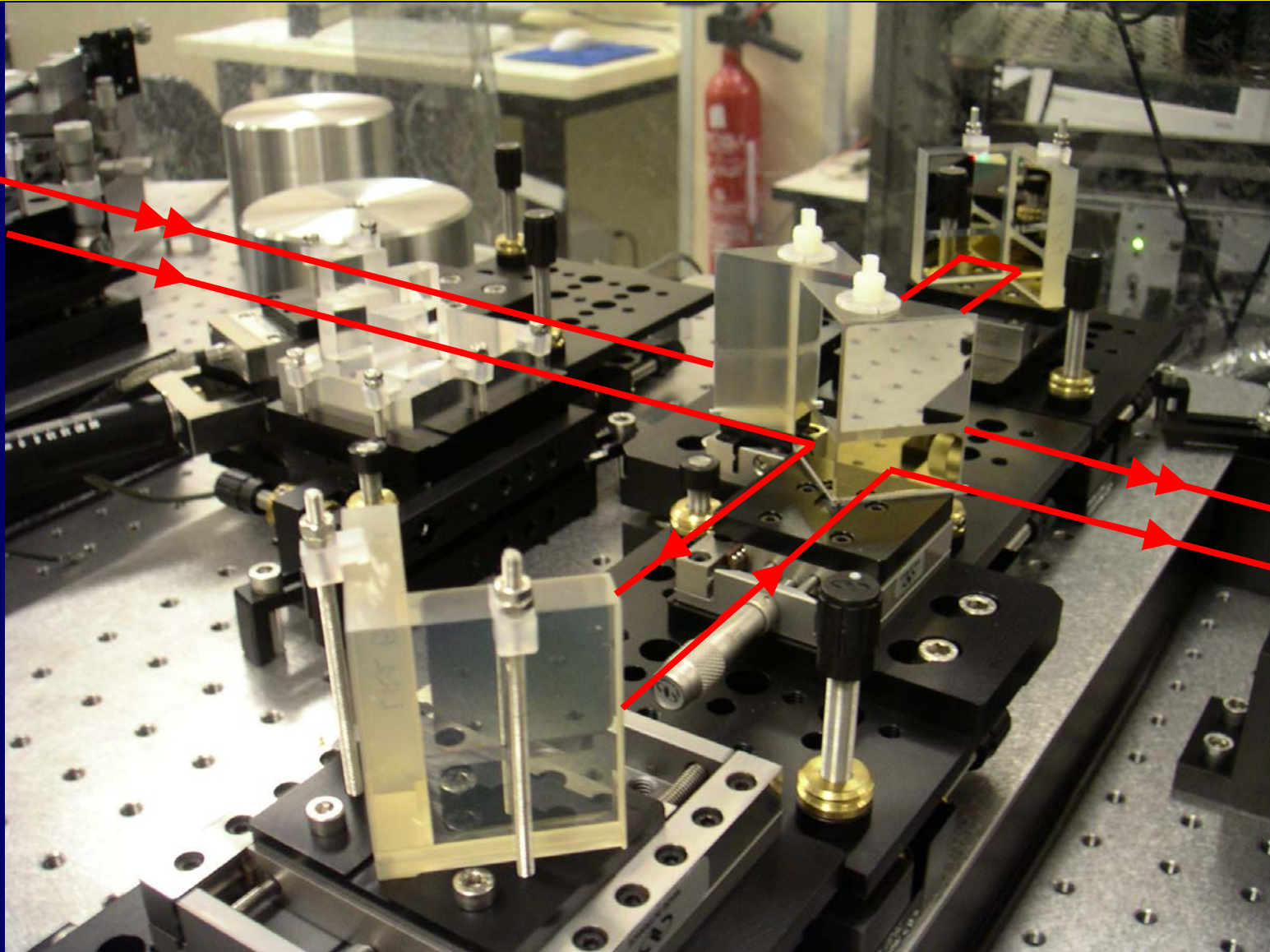


3 et 4^{èmes} éléments :

- un déphaseur achromatique : 4 prismes en fluorine (CaF_2)
- deux lignes à retard



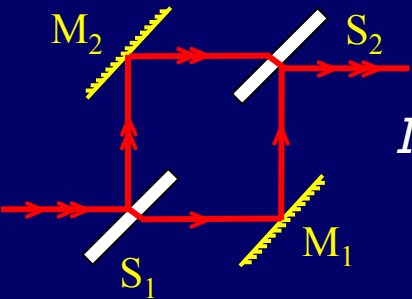
Déphaseur et lignes à retard



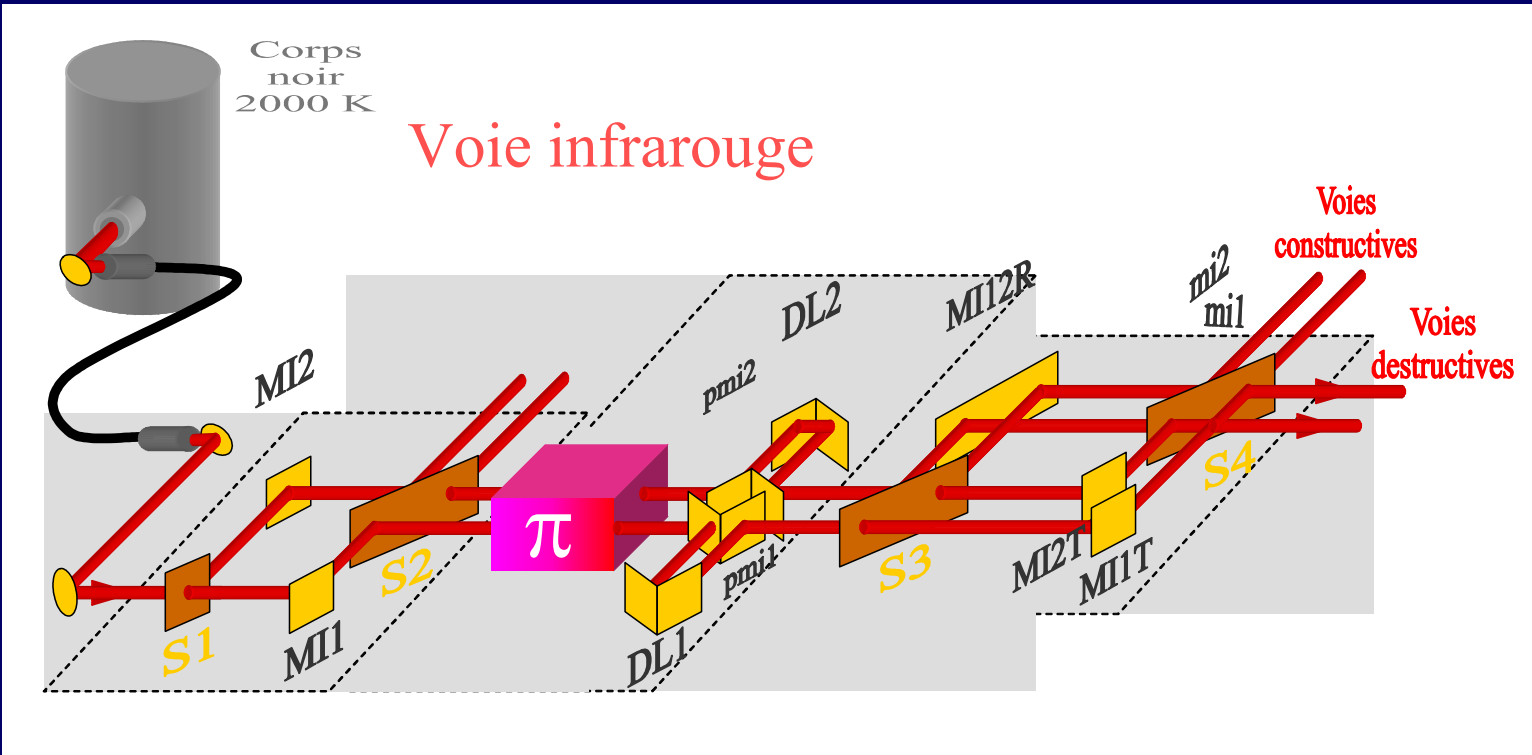
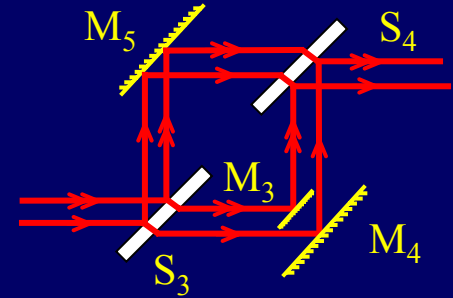
Le banc SYNAPSE (5)



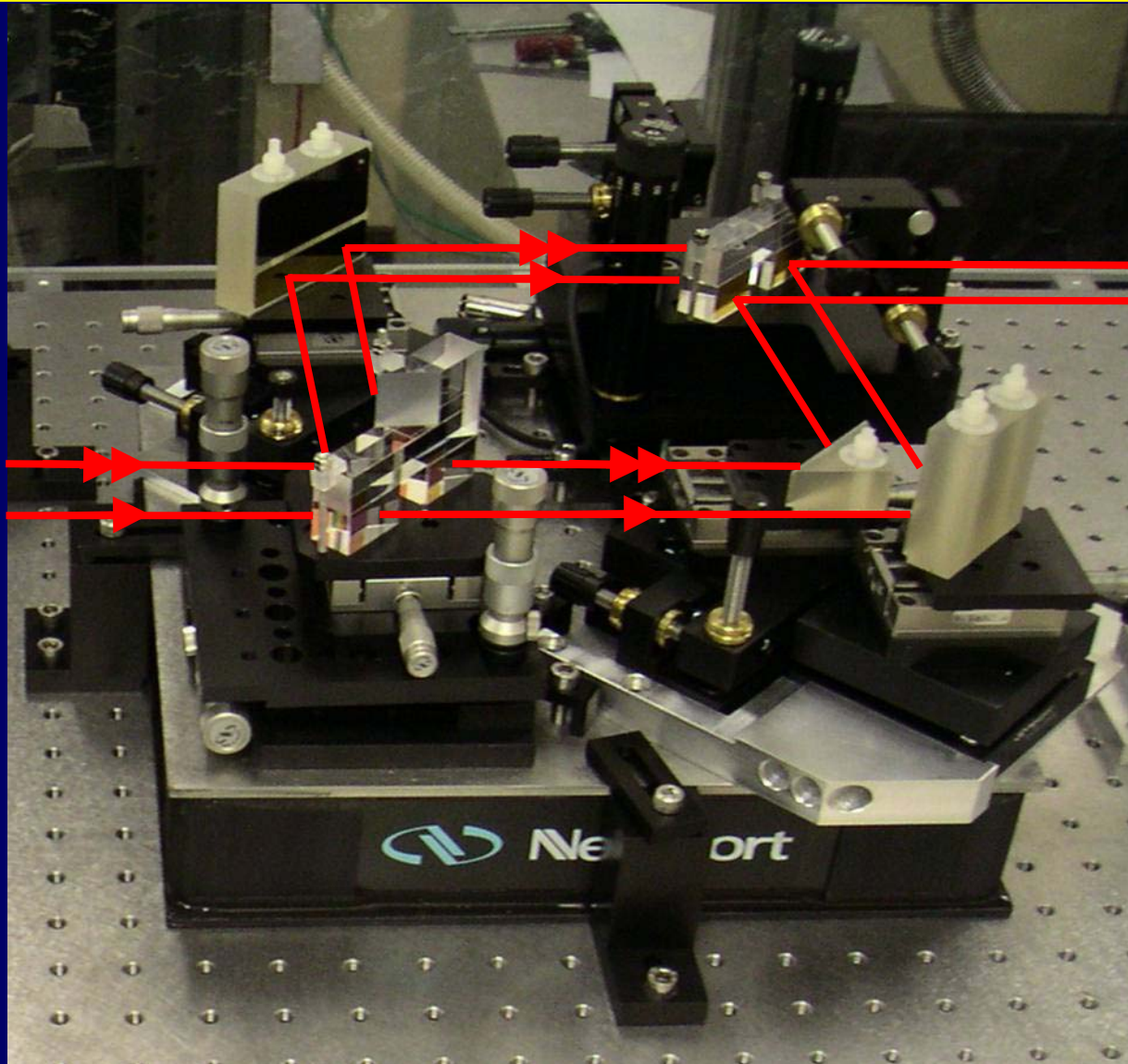
5^{ème} élément : un système de recombinaison



Interféromètre de Mach-Zehnder modifié
(Serabyn et al., 2000)



« Recombinatrice »

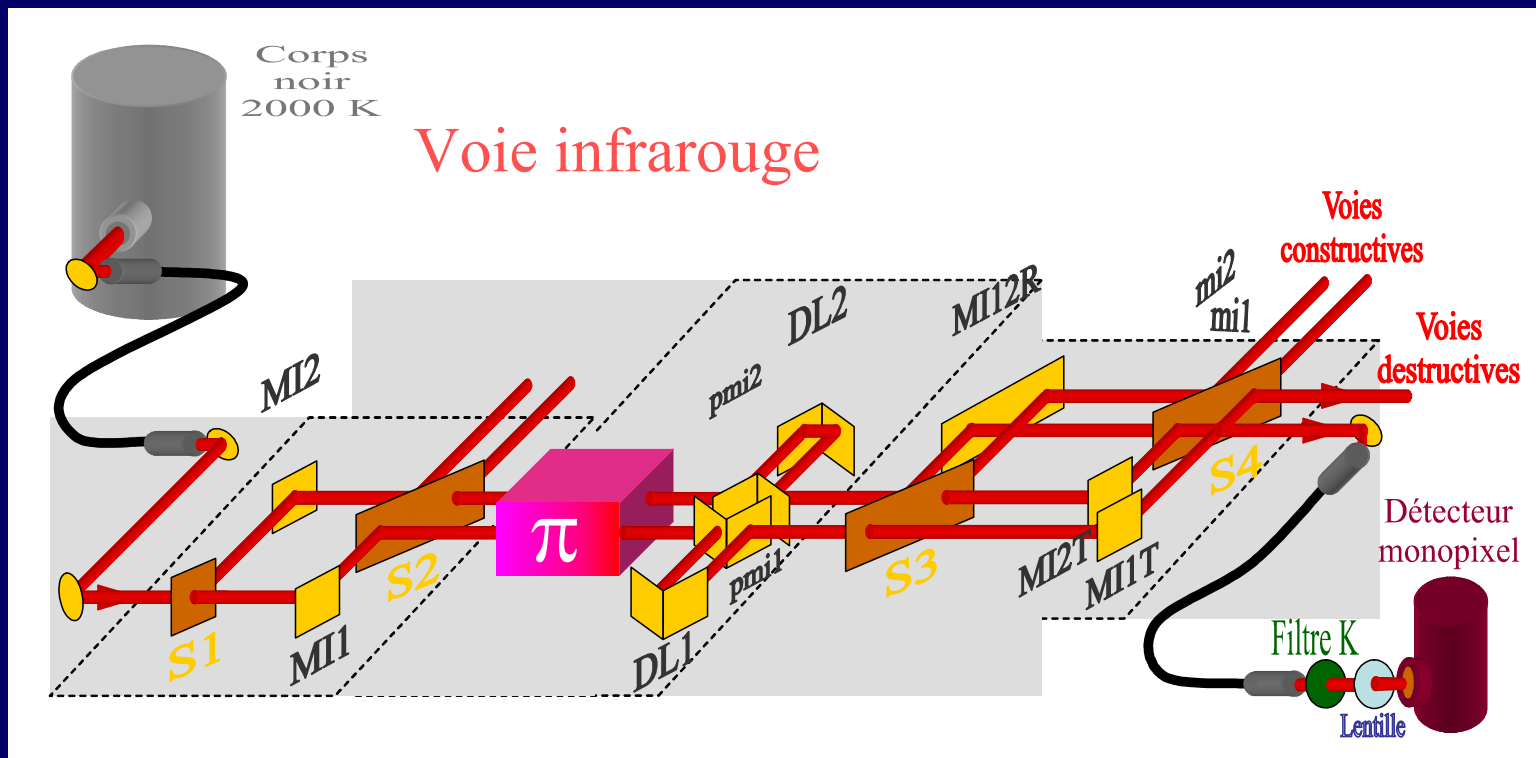


Le banc SYNAPSE (6)

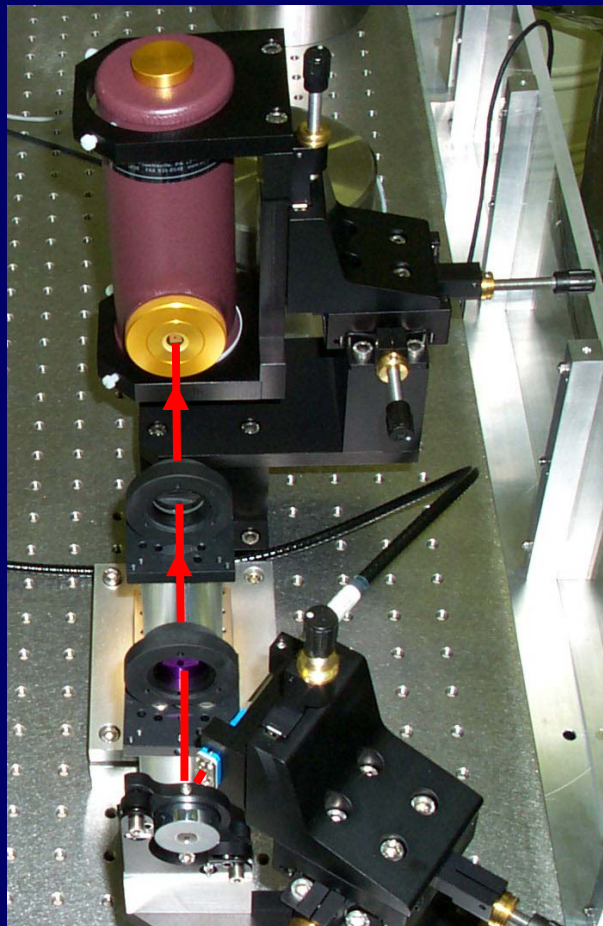


6^{ème} élément : un système de détection

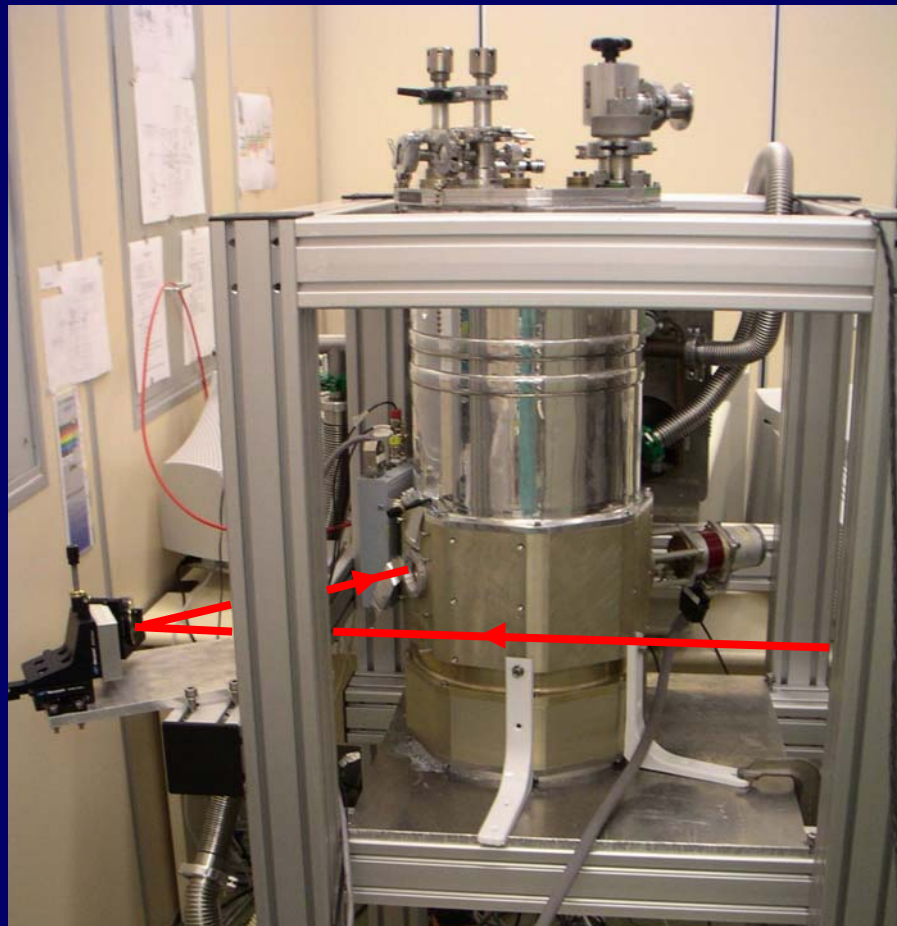
un détecteur monopixel InSb et la caméra CIRCUS



Systemes de détection



Détecteur monopixel



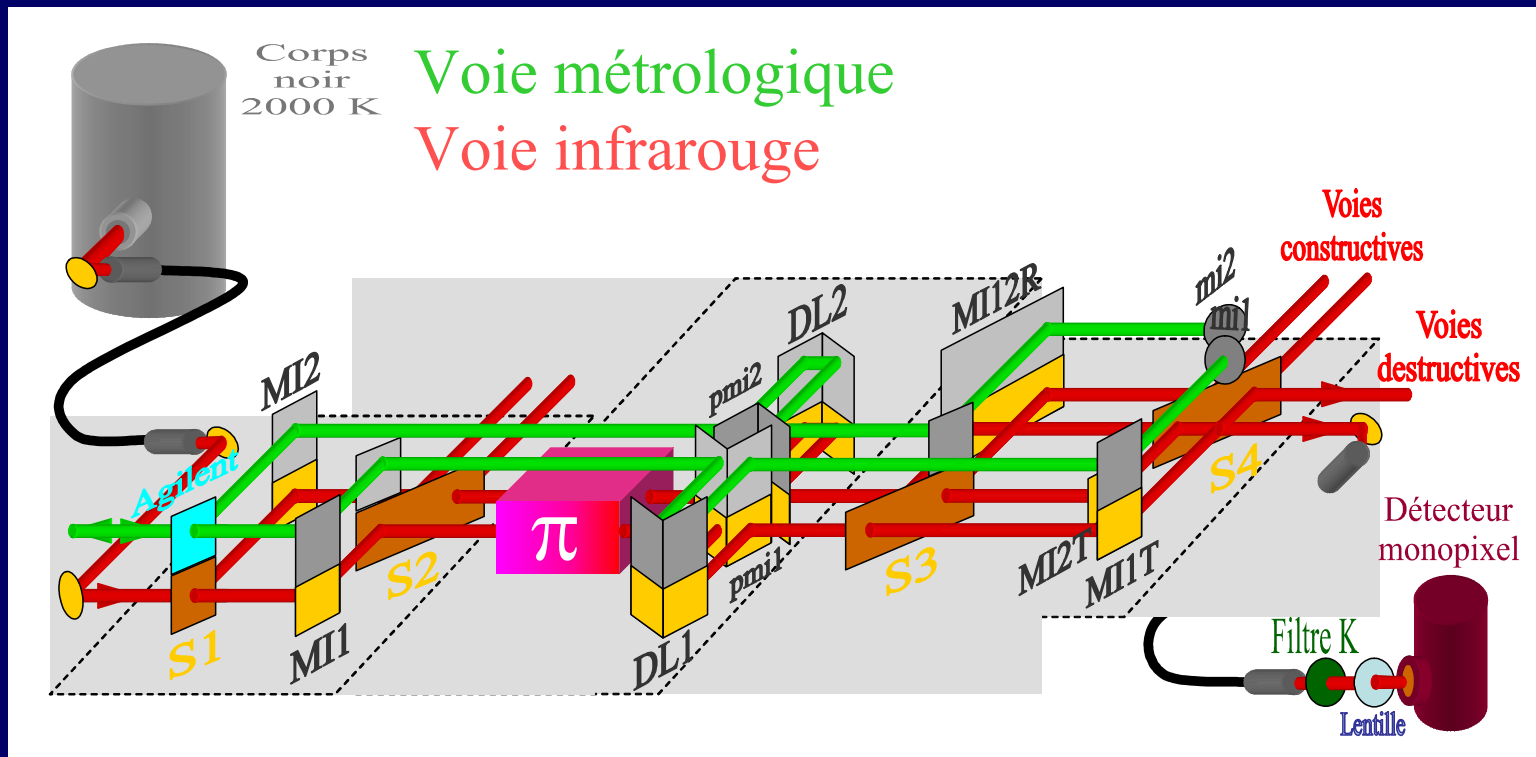
Caméra CIRCUS

Le banc SYNAPSE (7)



7^{ème} élément : un système de métrologie Interféromètre de Michelson (*Agilent*)

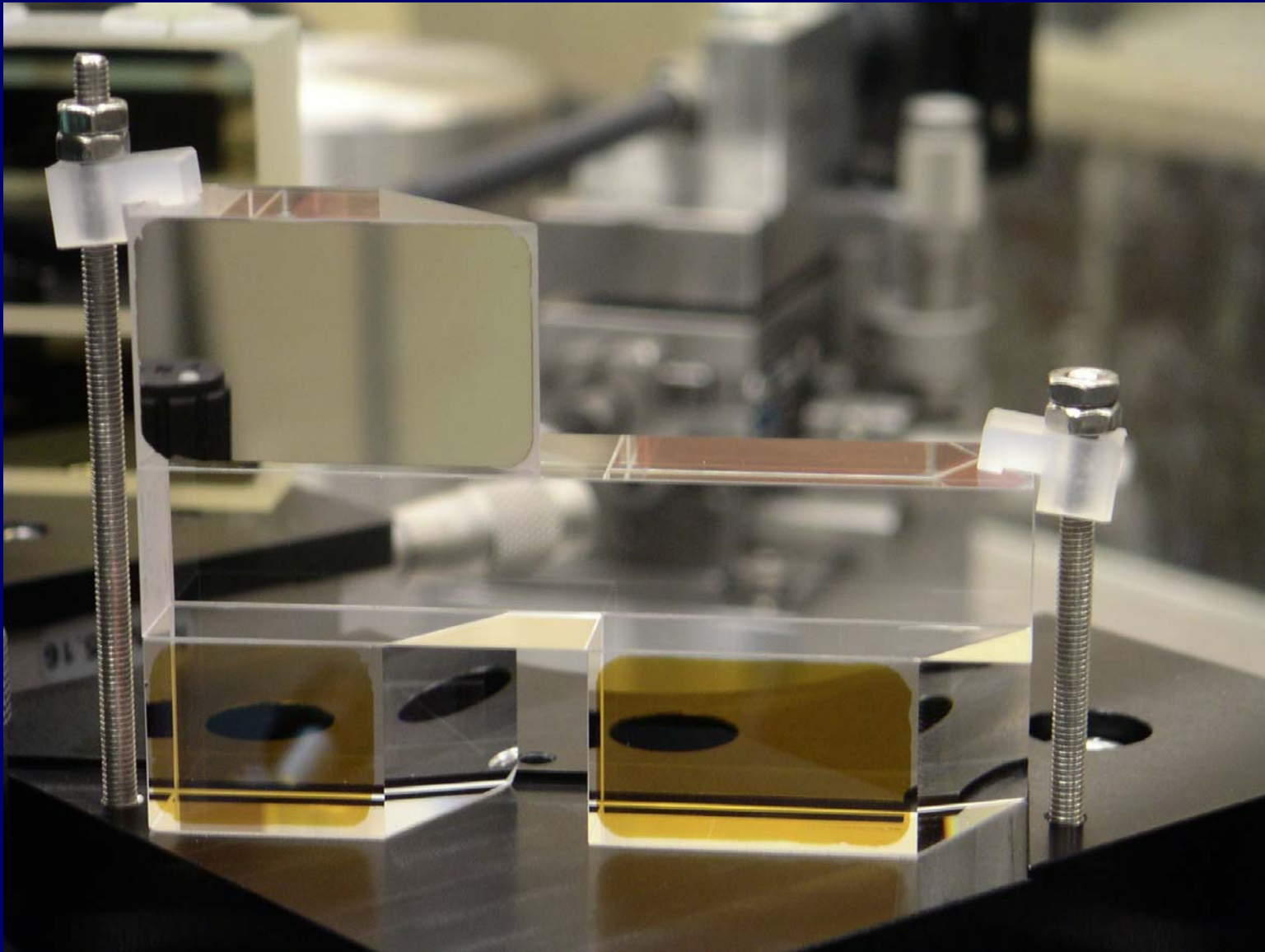
Autres spécifications : Traitements Silicium, Or et Argent
Bandes K (2-2,5 μm) et L (3-4 μm)



Le banc SYNAPSE (8)



Séparatrice

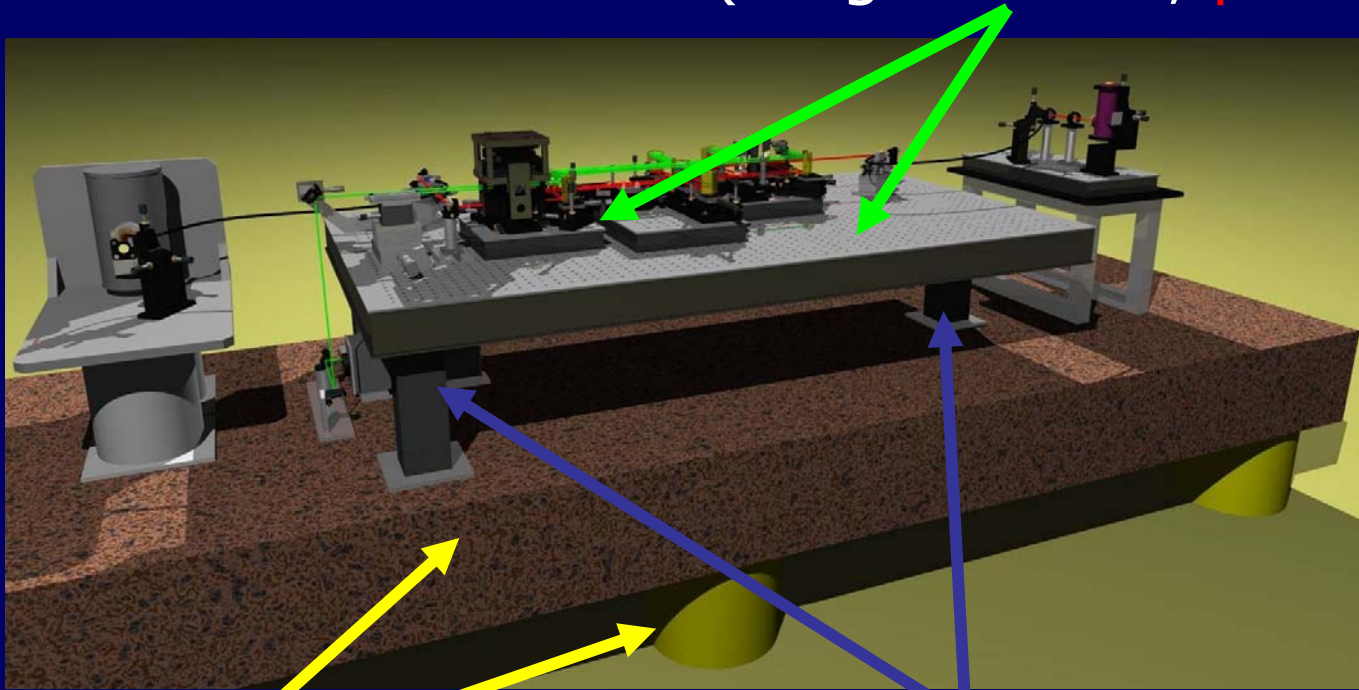


Vibrations



Amortissement des vibrations :

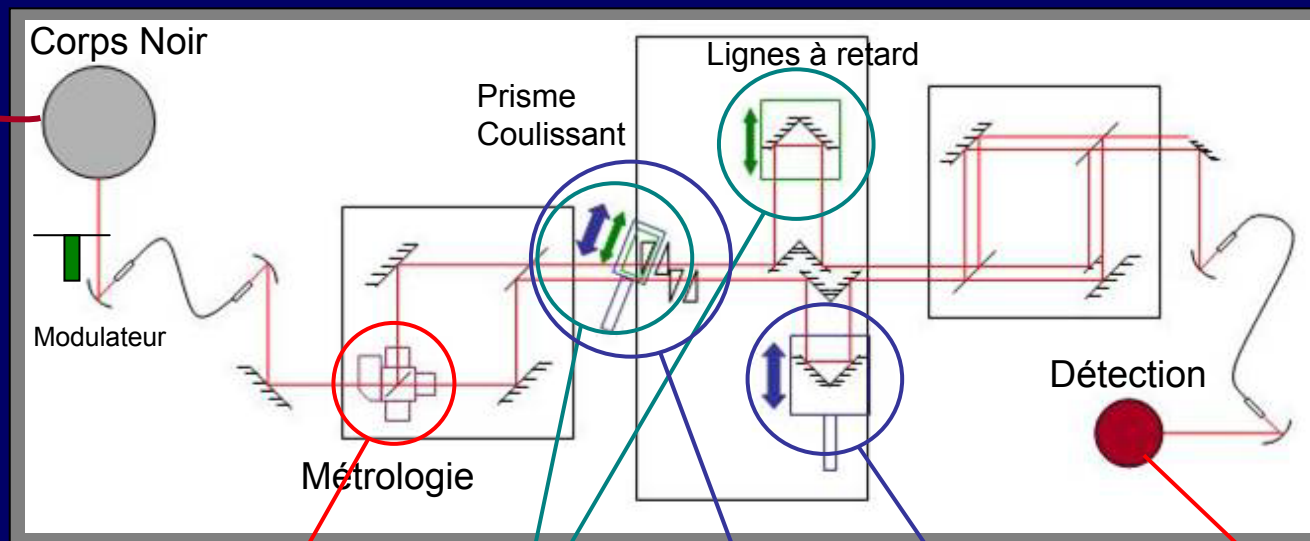
Tables à structure en nid d'abeille
(étages 3 et 4, **passifs**)



Pieds piézoélectriques (étage 2, **actif**)

Marbre sur pieds pneumatiques (étage 1, **passif**)

Contrôle du banc (1)



Alimentation
Corps Noir



PC Contrôle
Corps Noir



PC Données
Métrologie

Contrôleur
Piézo

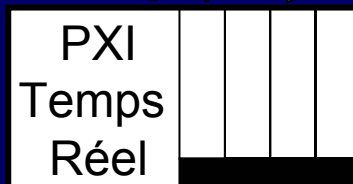
Contrôleur
Moteur
Prisme

Contrôleur
Moteur
Ligne à retard

Détection
Synchrone



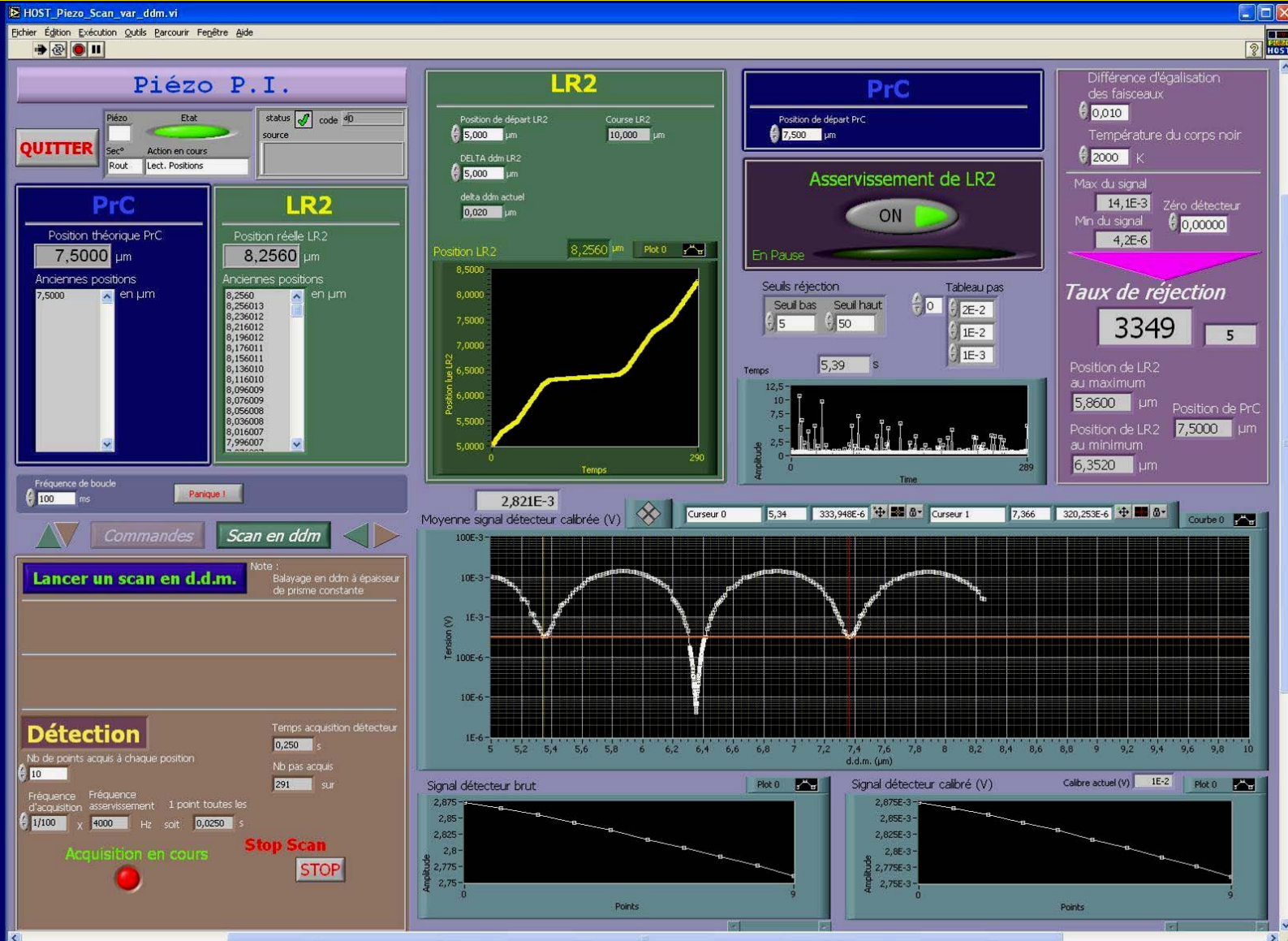
PC Contrôle
Général



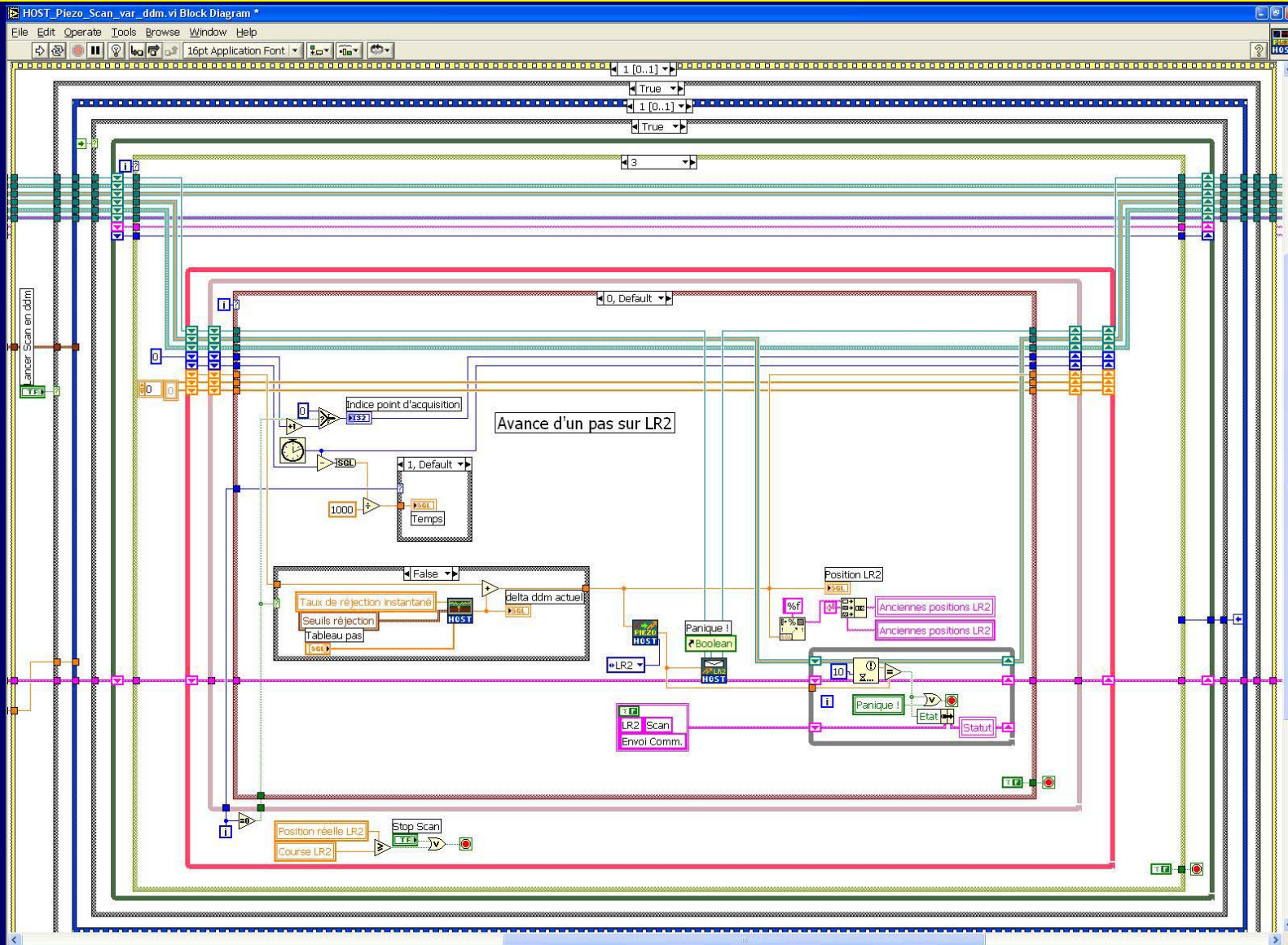
Asservissement

TCP / IP

Contrôle du banc (2)



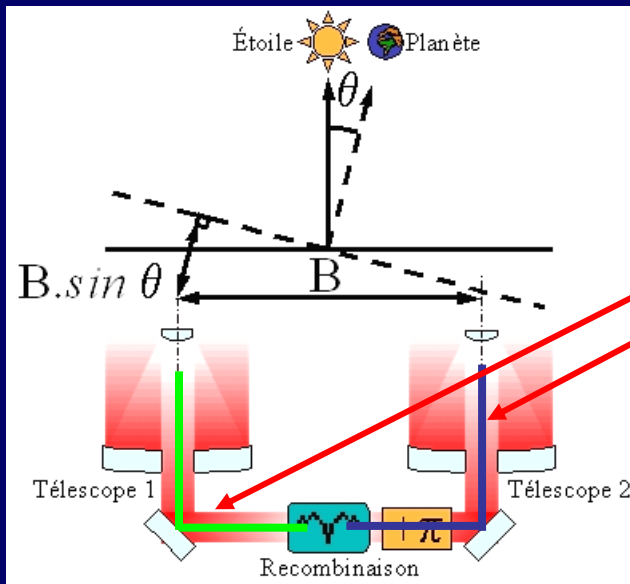
Contrôle du banc (2)



Asservissement

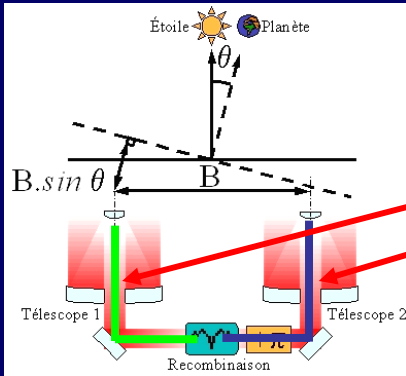


Égalité des chemins optiques $\approx 2 \text{ nm}$ pour $\rho=10^5$

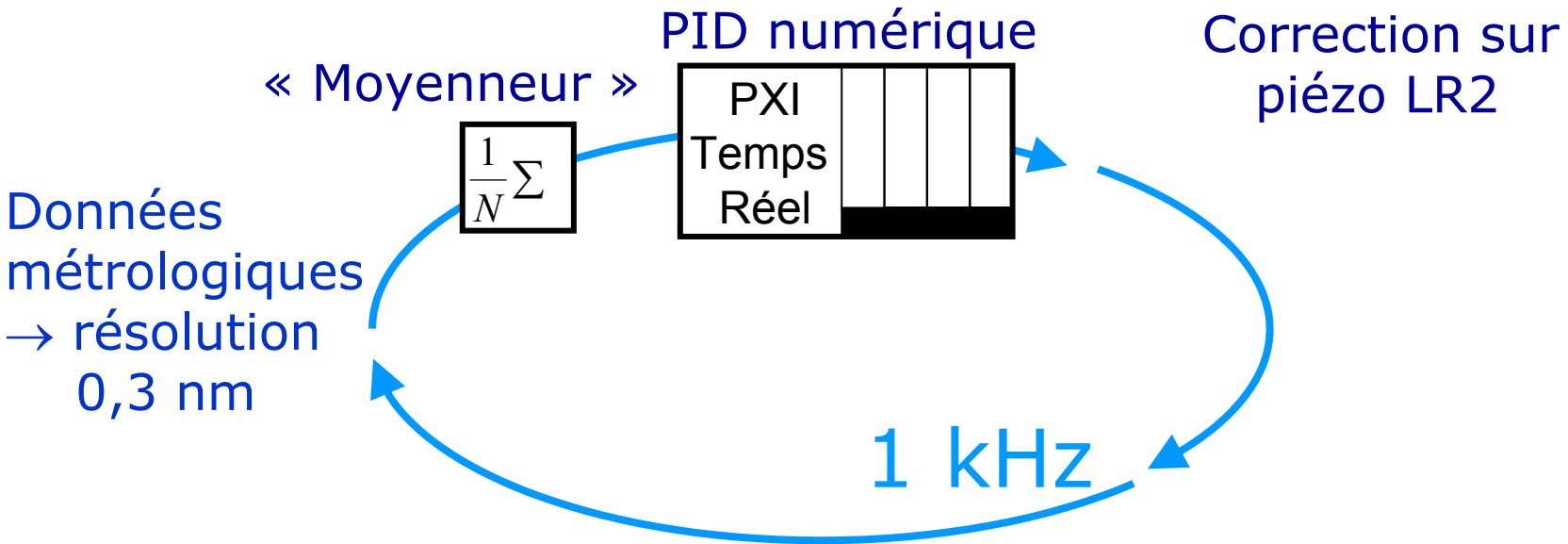


Asservissement

Égalité des chemins optiques $\approx 2 \text{ nm}$ pour $\rho = 10^5$

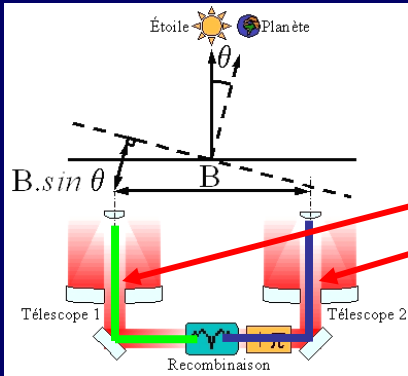


Le principe de l'asservissement

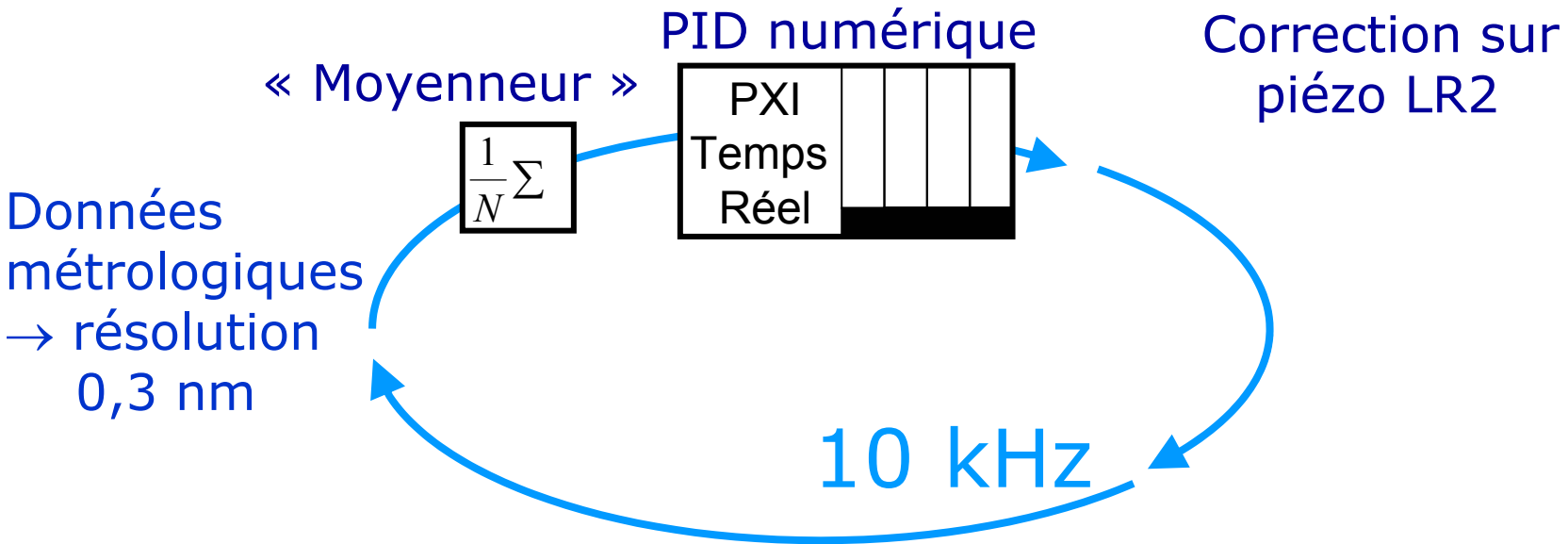


Asservissement

Égalité des chemins optiques $\approx 2 \text{ nm}$ pour $\rho = 10^5$

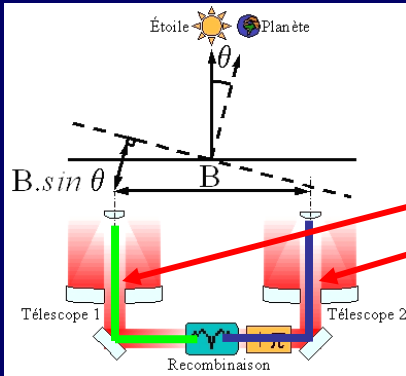


Le principe de l'asservissement

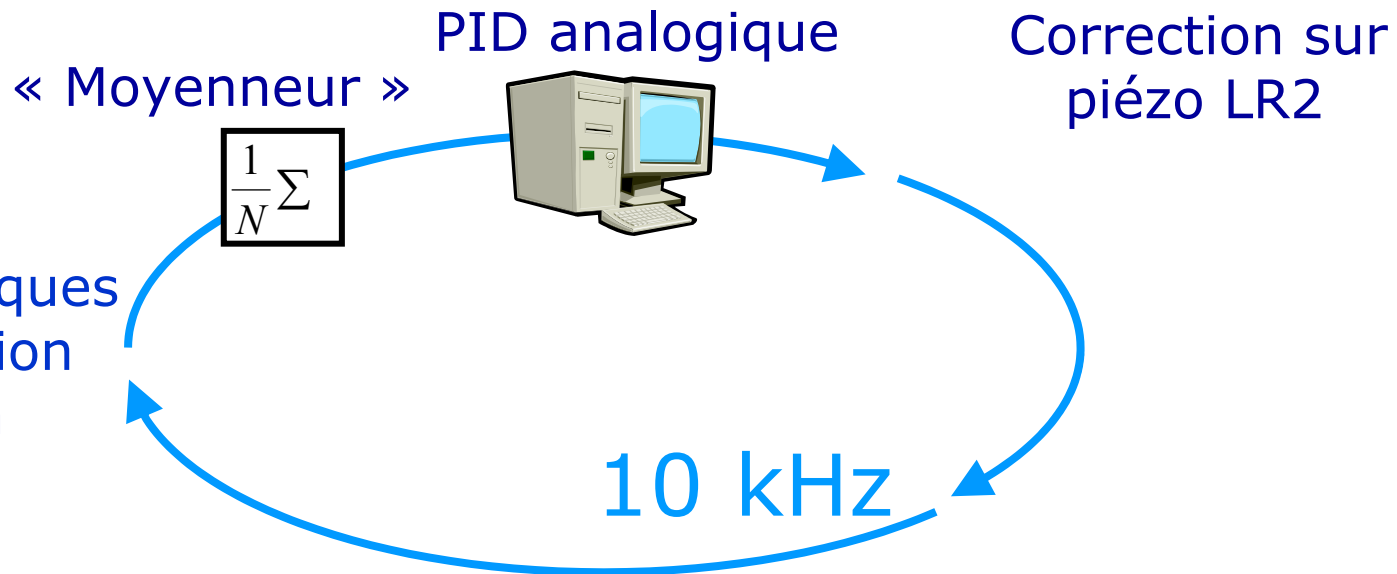


Asservissement

Égalité des chemins optiques $\approx 2 \text{ nm}$ pour $\rho = 10^5$

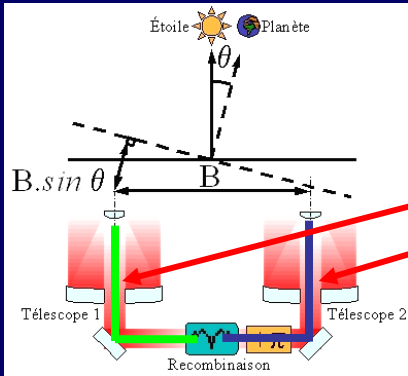


Le principe de l'asservissement

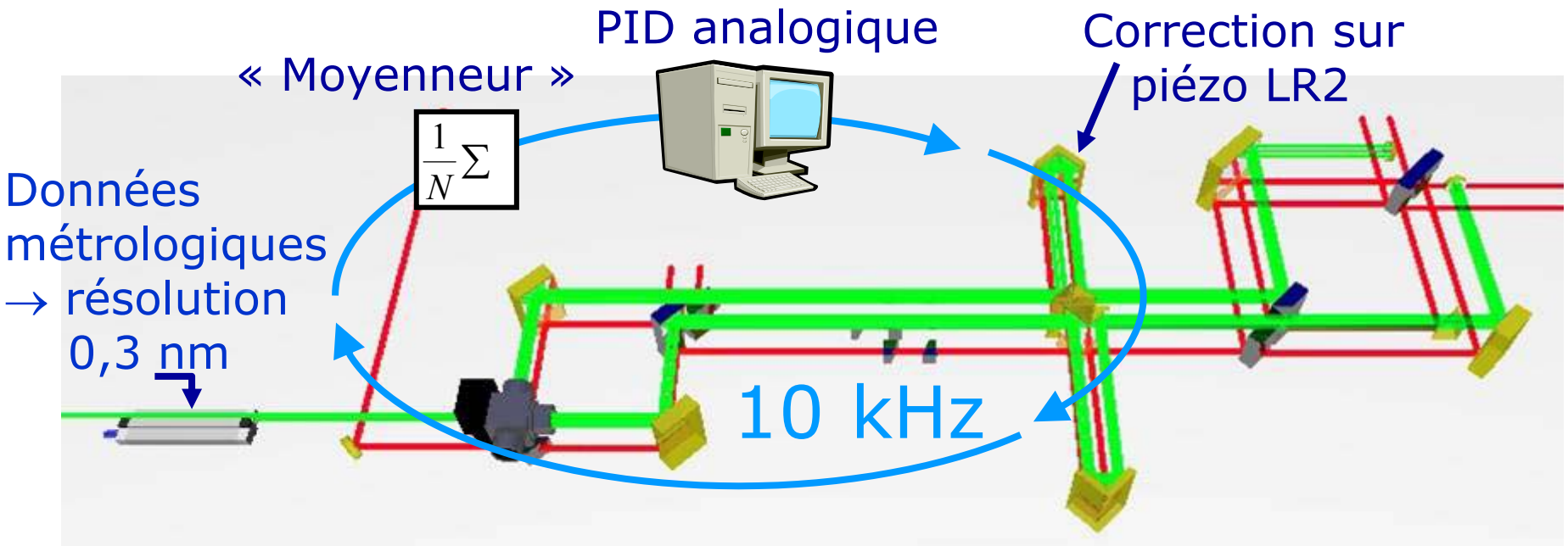


Asservissement

Égalité des chemins optiques $\approx 2 \text{ nm}$ pour $\rho = 10^5$



Le principe de l'asservissement





La salle dite « des marbres »

Environnement



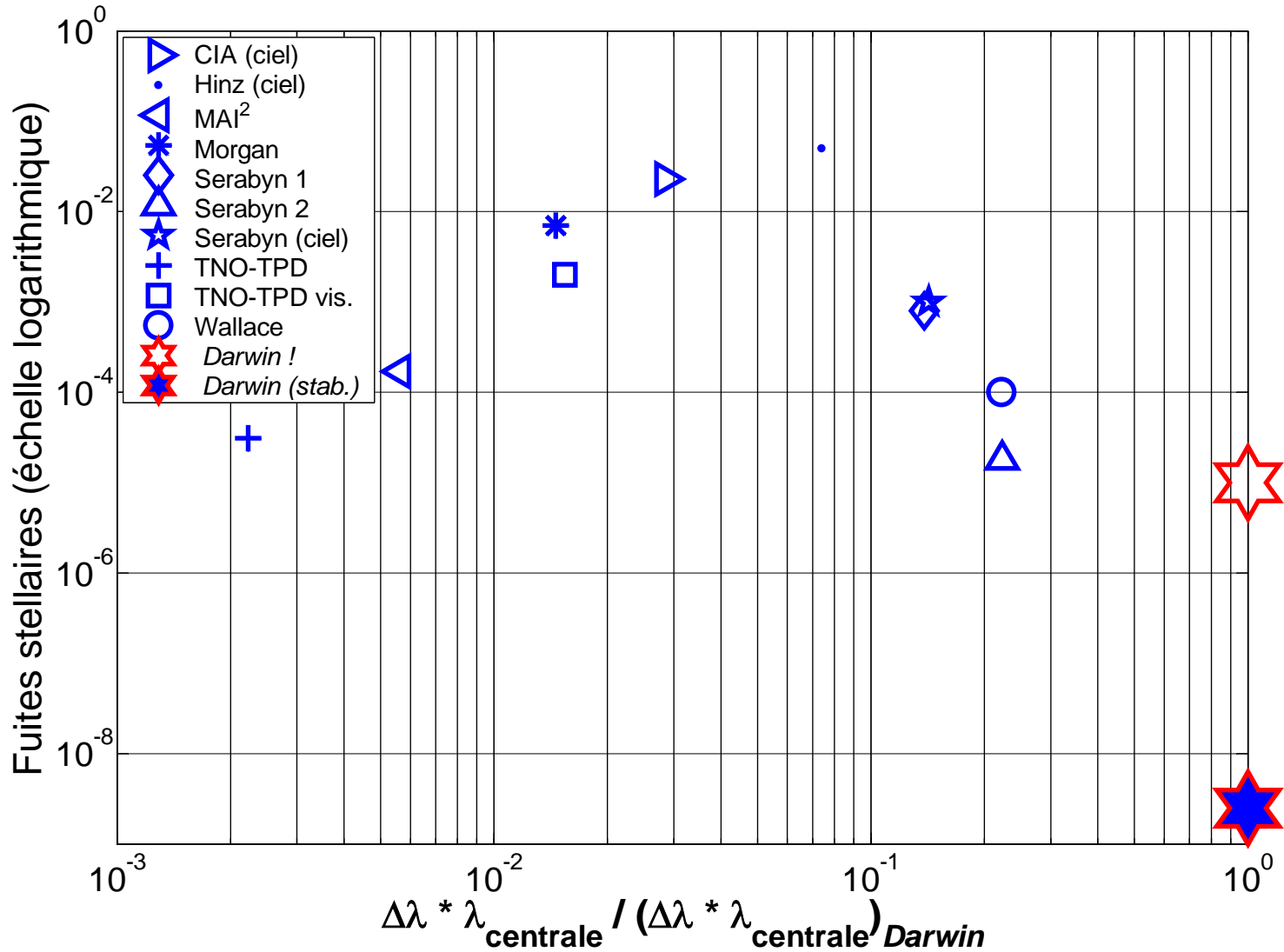


Plan

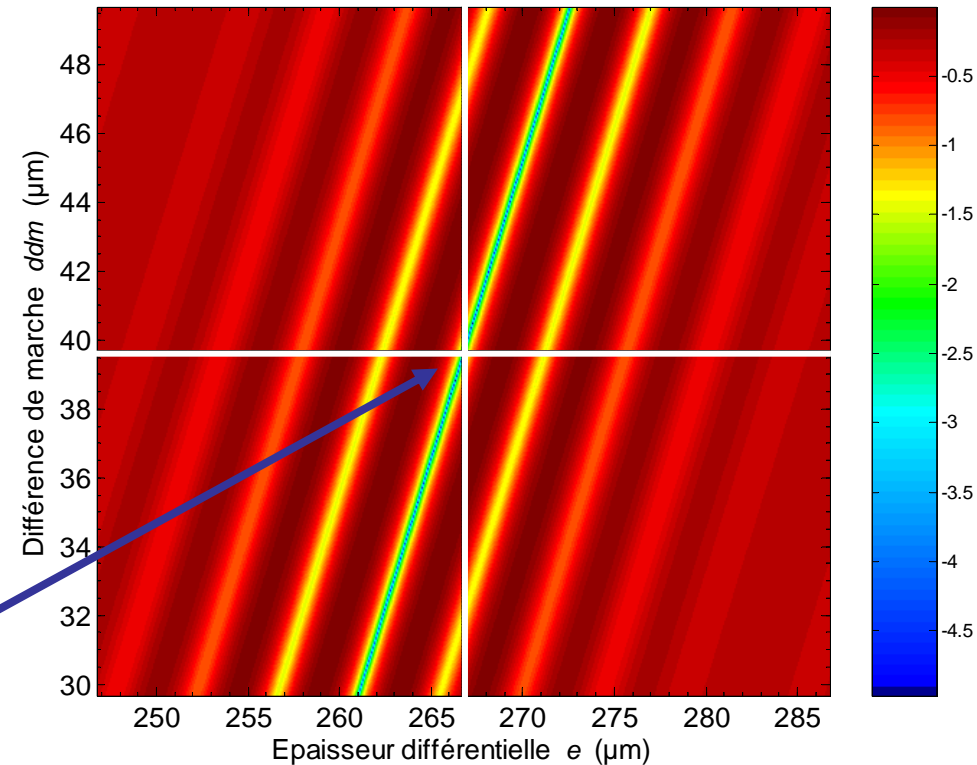
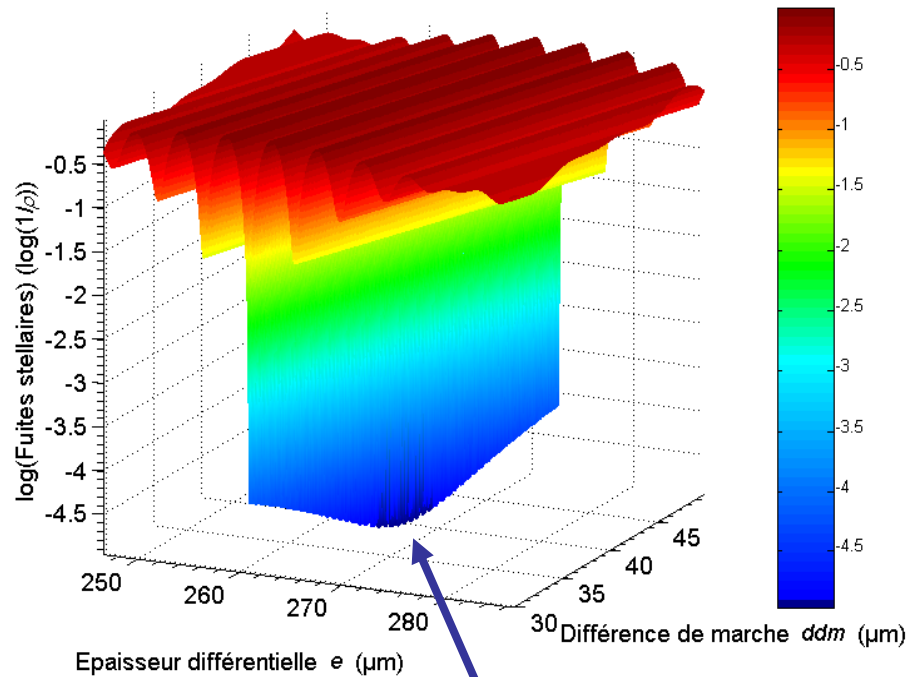


1. La recherche d'exoplanètes
2. Vers une détection directe : la mission Darwin
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. **Mesures et résultats**
6. Conclusions et perspectives

État de l'art, avant SYNAPSE ...

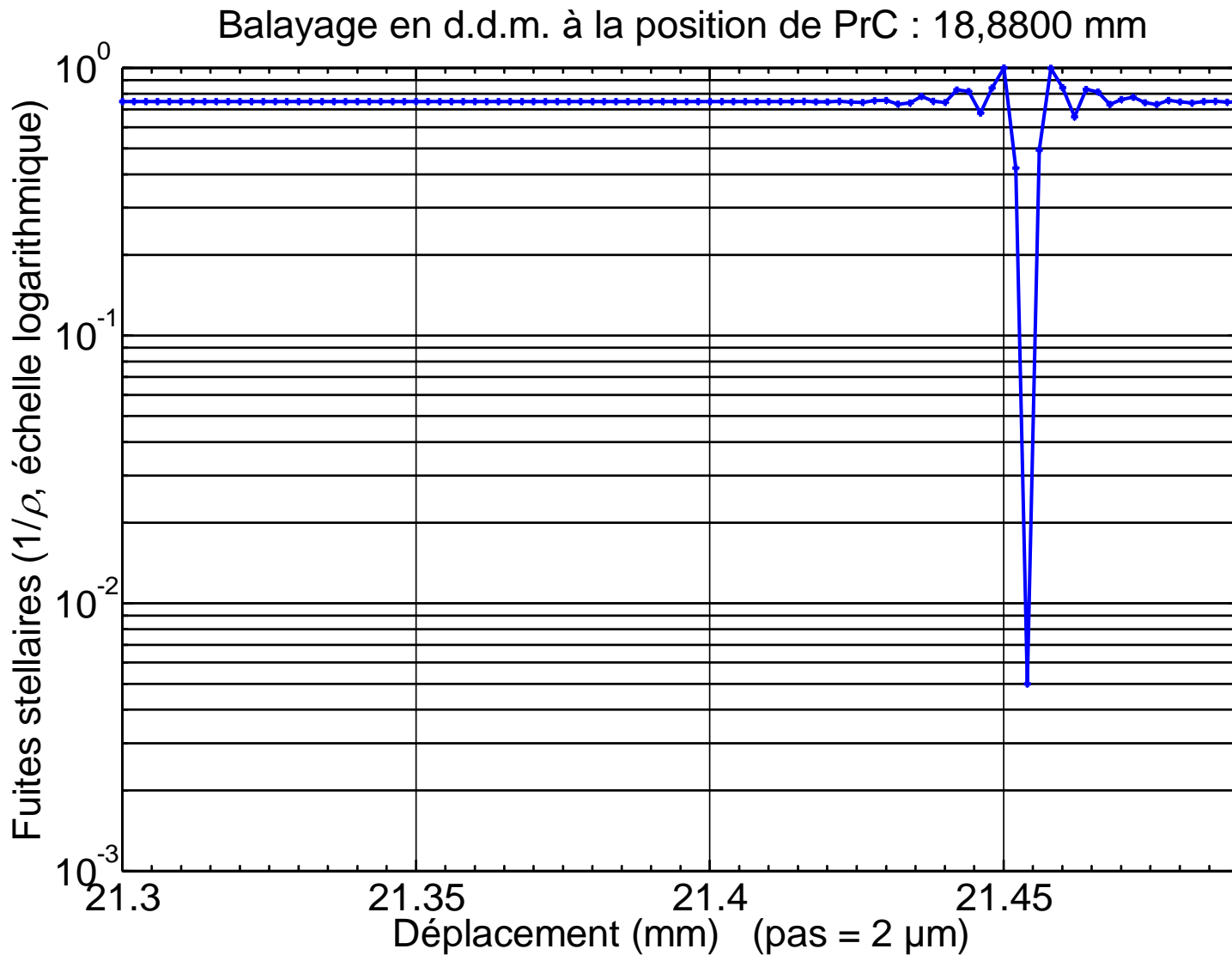


Recherche du point de fonctionnement (1)

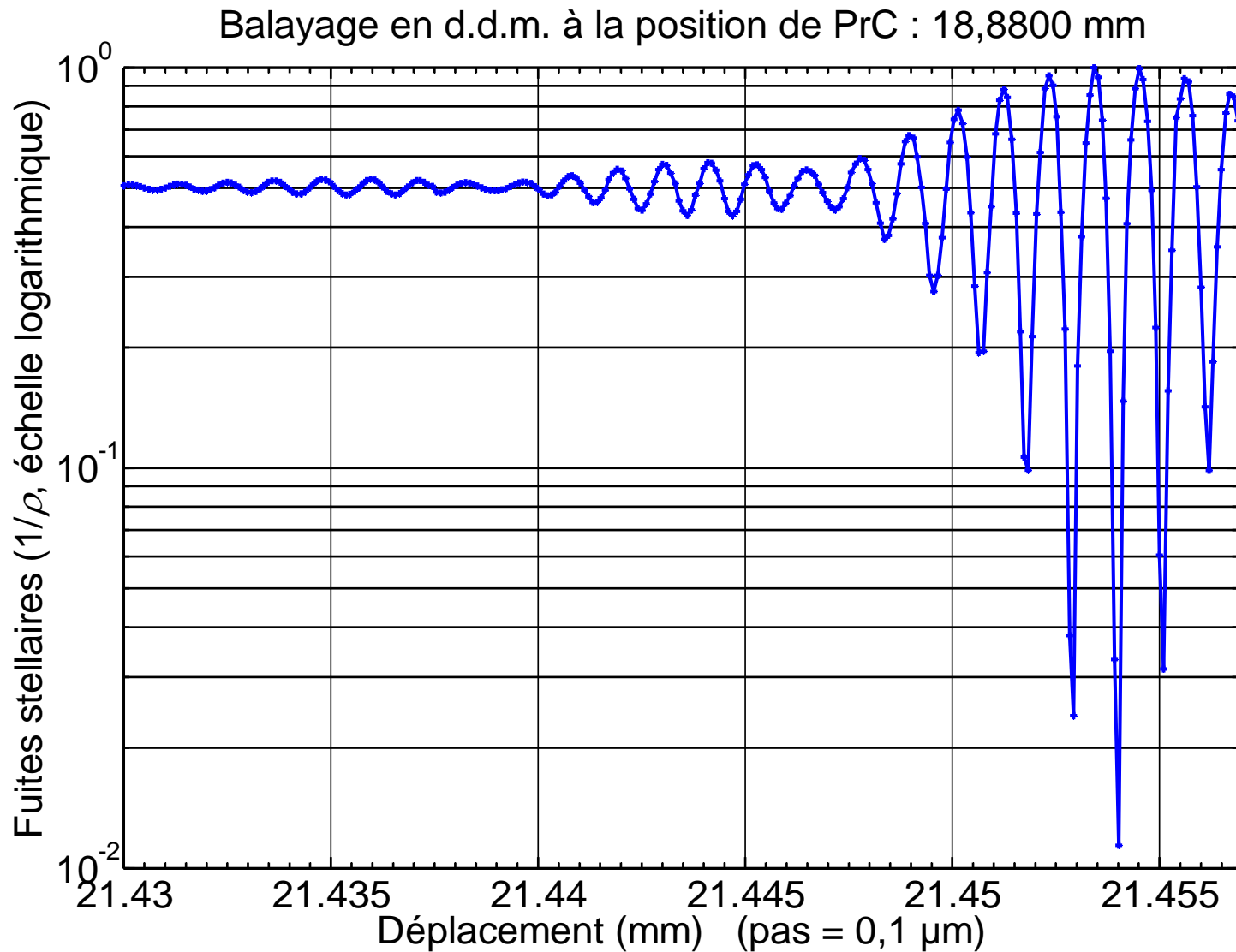


Point de fonctionnement

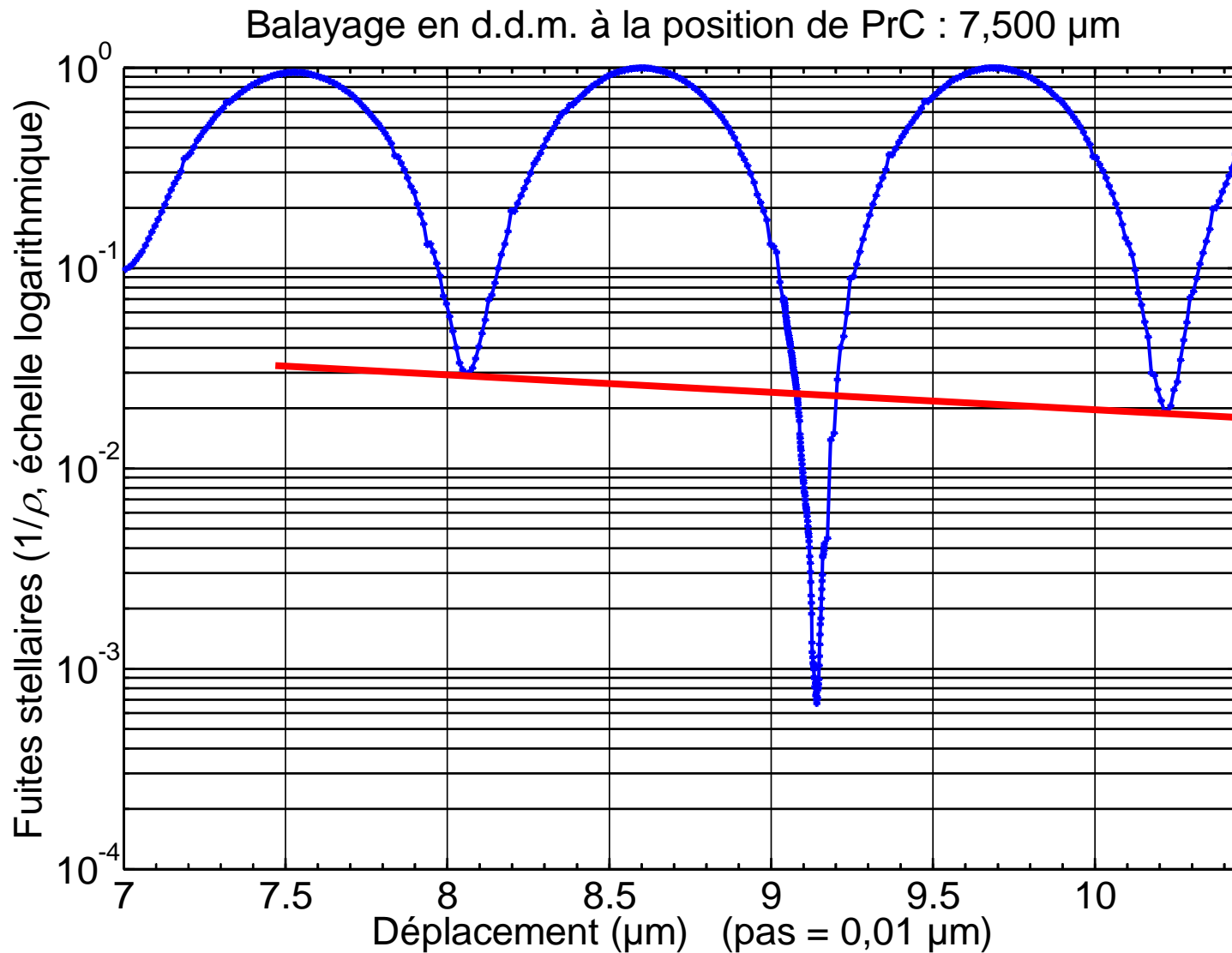
Recherche du point de fonctionnement (1)



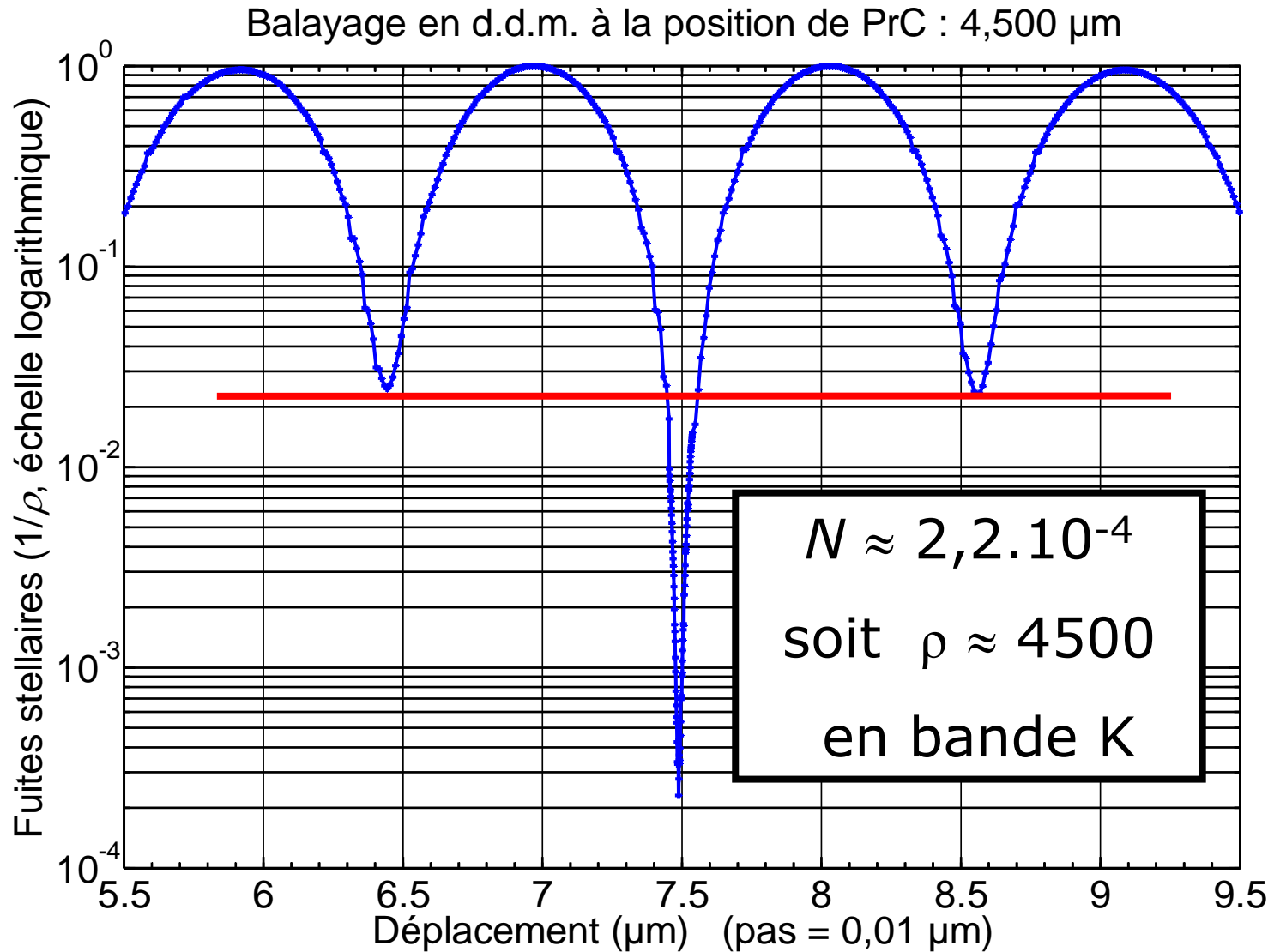
Recherche du point de fonctionnement (2)



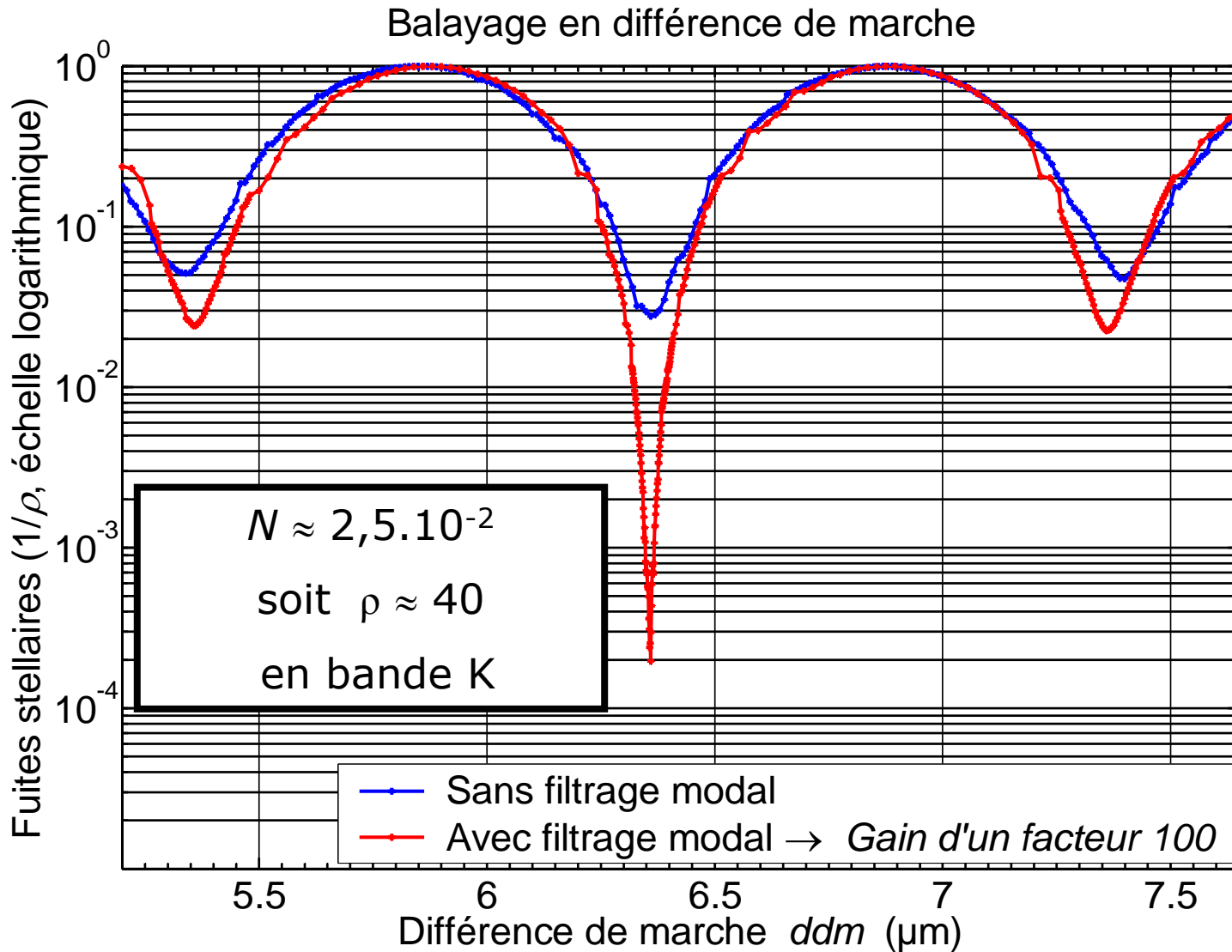
Recherche du point de fonctionnement (3)



Recherche du point de fonctionnement (4)



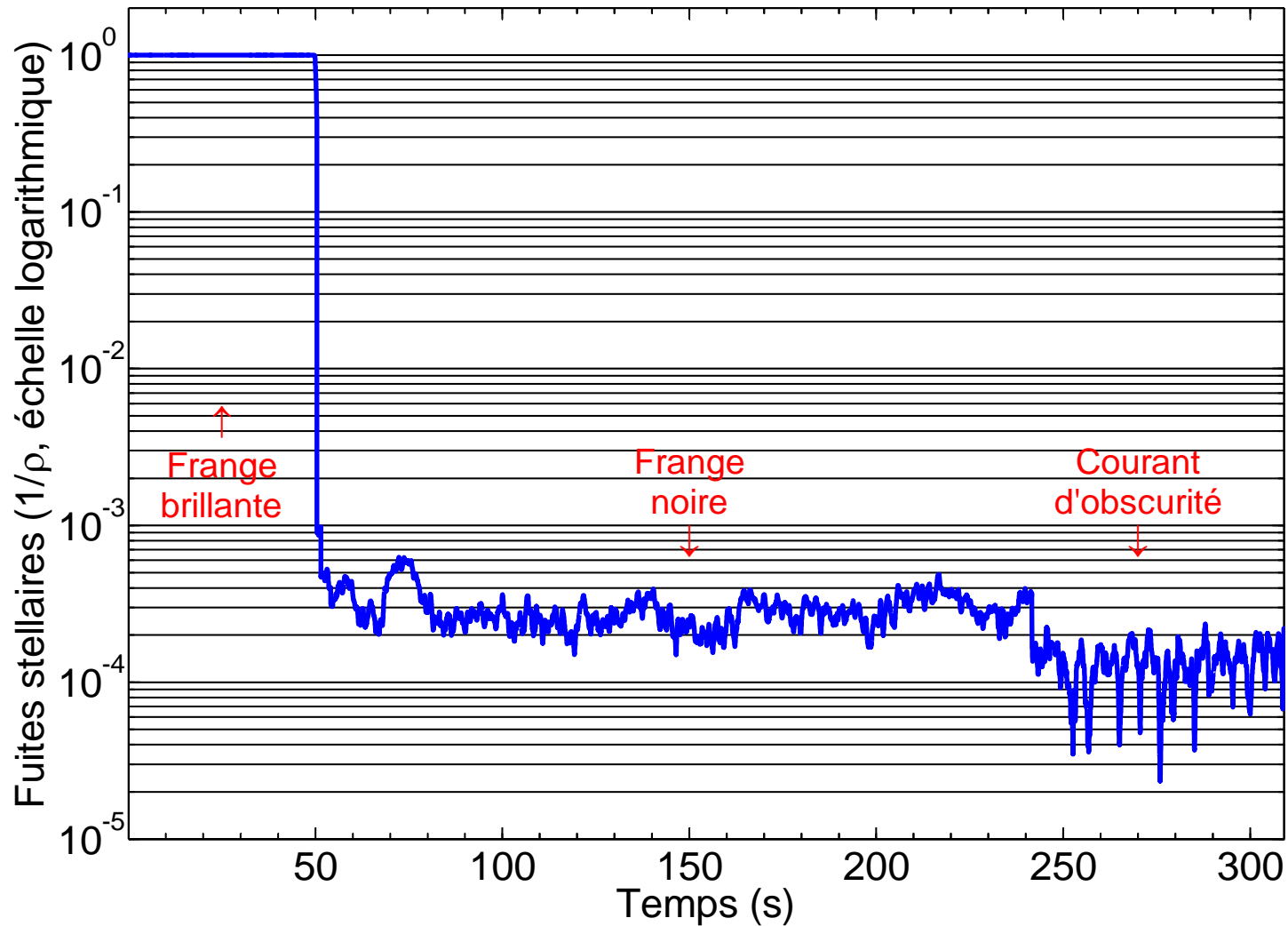
Rôle du filtrage modal



Taux de réjection (1)



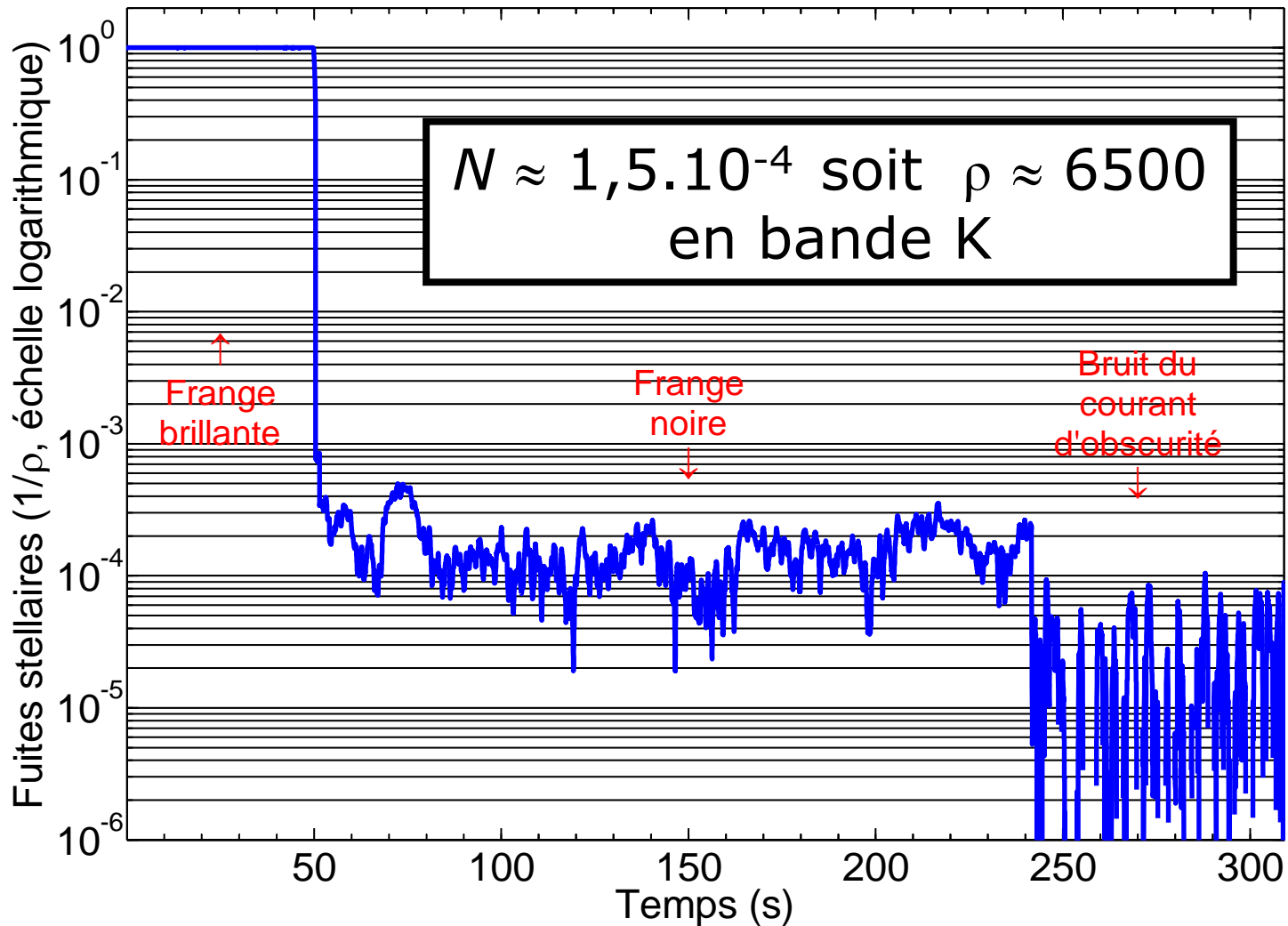
Enregistrement temporel du signal interférométrique



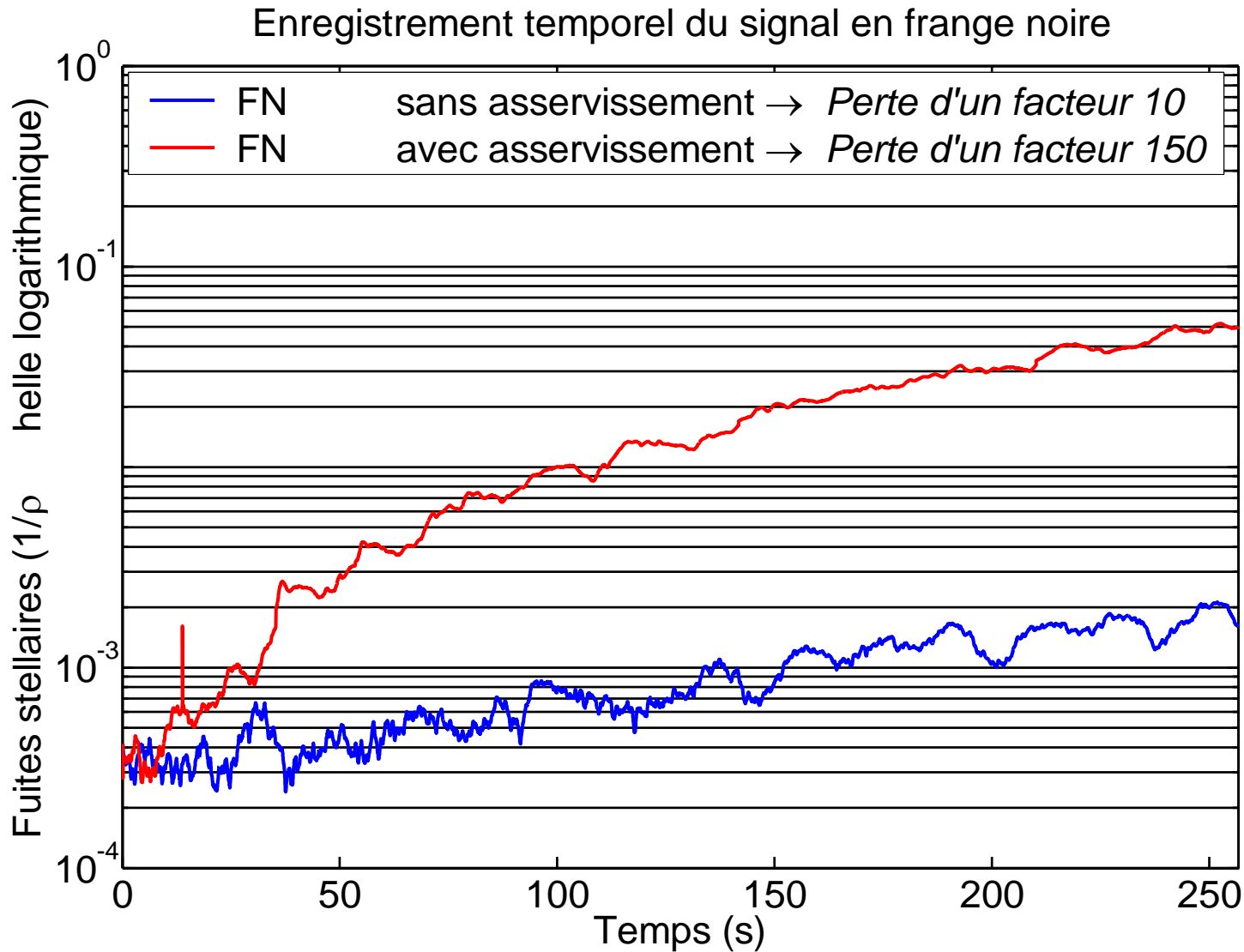
Taux de réjection (2)



Enregistrement temporel du signal interférométrique



Stabilité de la réjection (1)



Stabilité de la réjection (2)



Hypothèse :
$$N = \frac{1}{\rho} \approx \frac{(\Delta\phi)^2}{4} \quad \text{avec} \quad \Delta\phi = 2\pi \frac{ddm}{\lambda} + \text{cste}$$

avec N : fuites stellaires

ρ : taux de réjection

$\Delta\phi$: déphasage

ddm : différence de marche

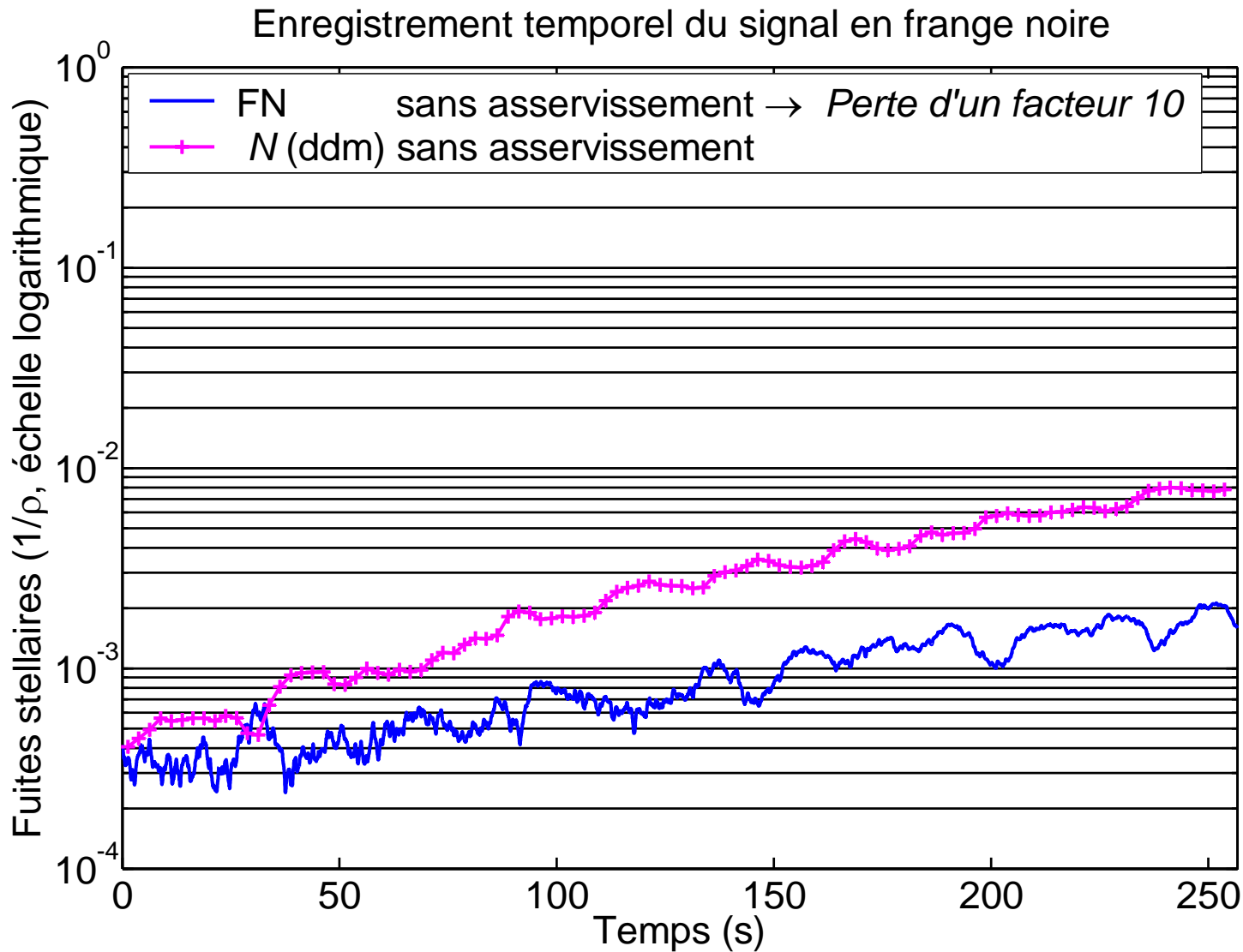
λ : longueur d'onde

contient les autres termes agissant sur le déphasage (flux, ...)

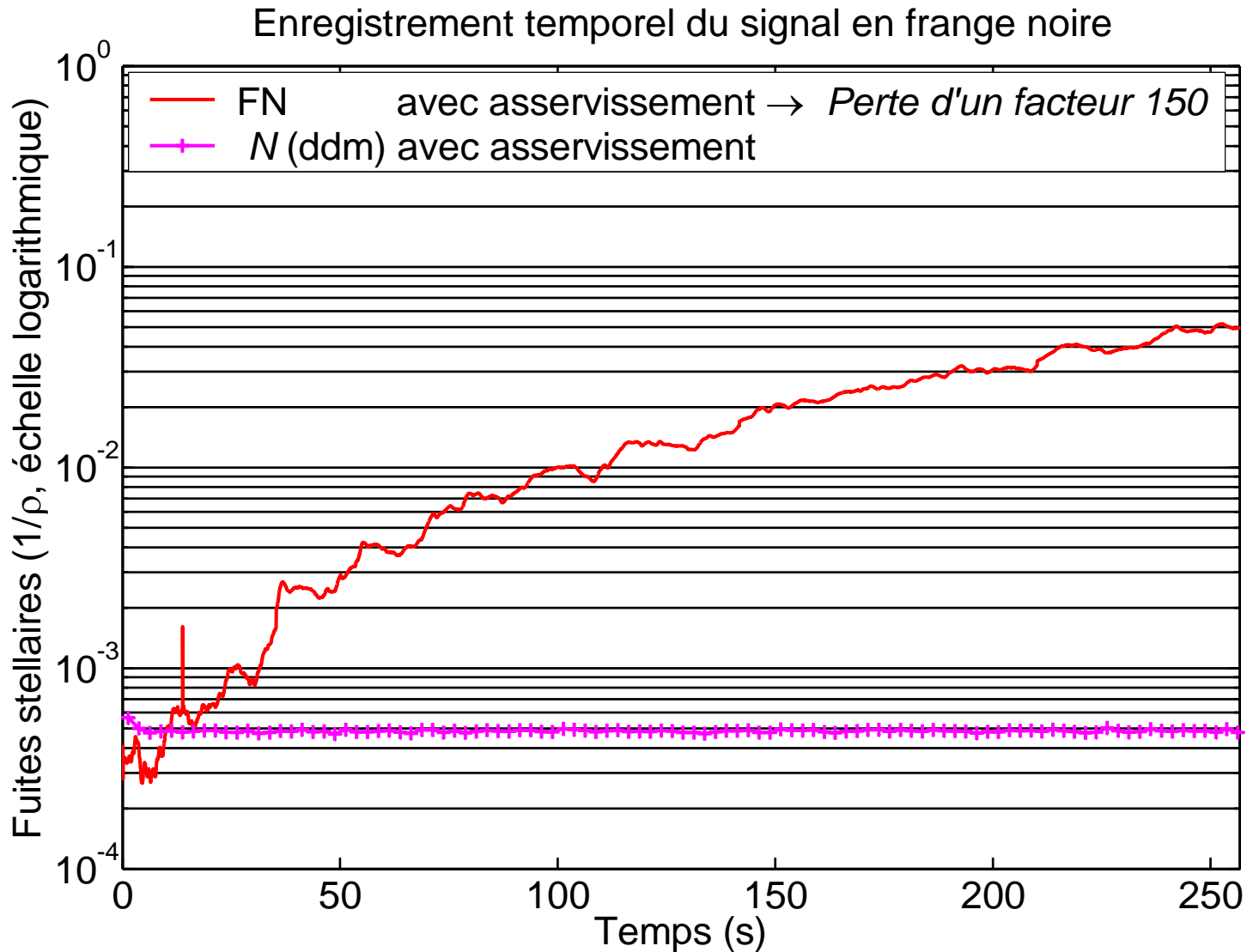
d'où

$$N \propto ddm^2$$

Stabilité de la réjection (3)

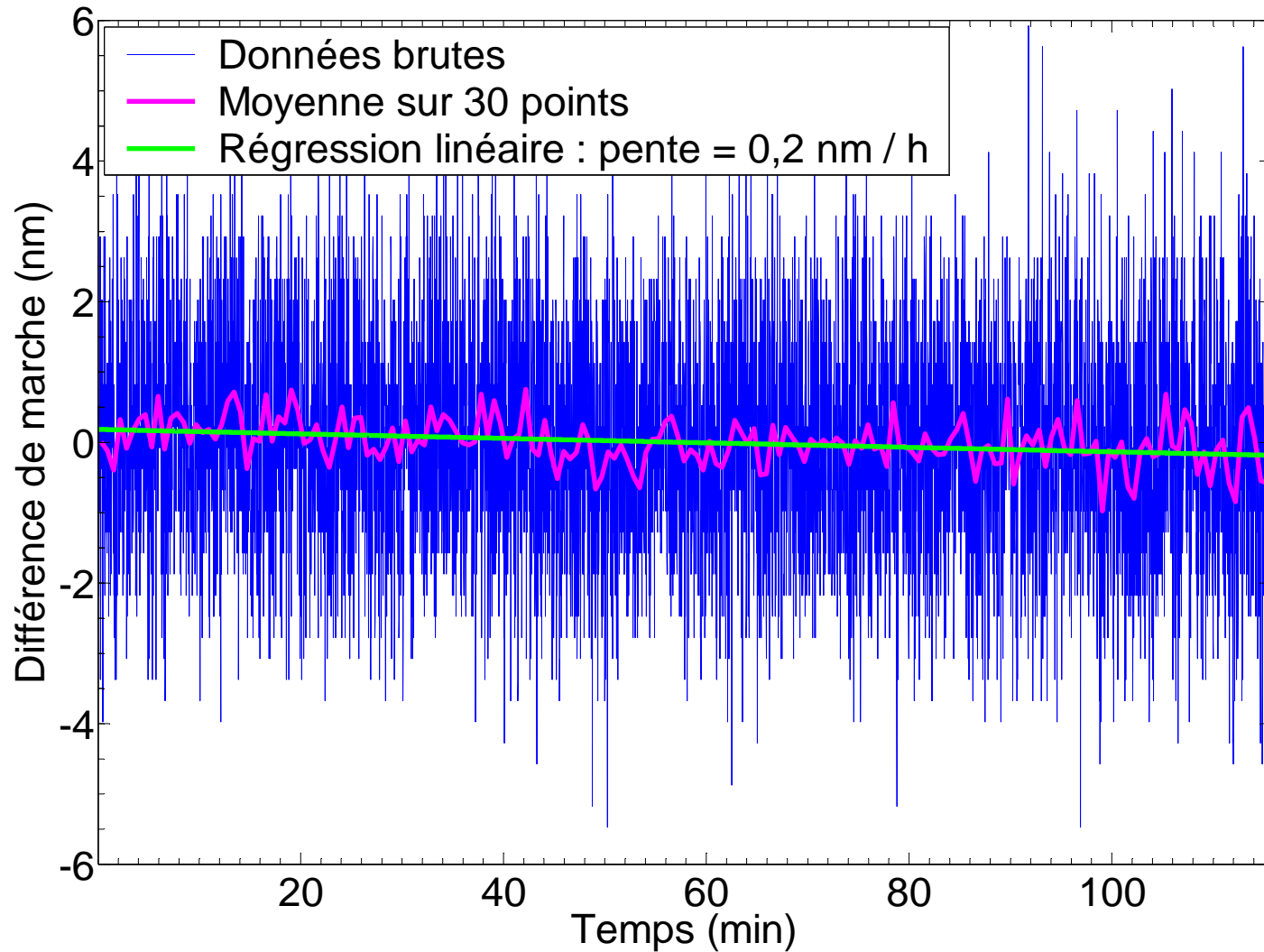


Stabilité de la réjection (4)



Performances de l'asservissement en différence de marche (1)

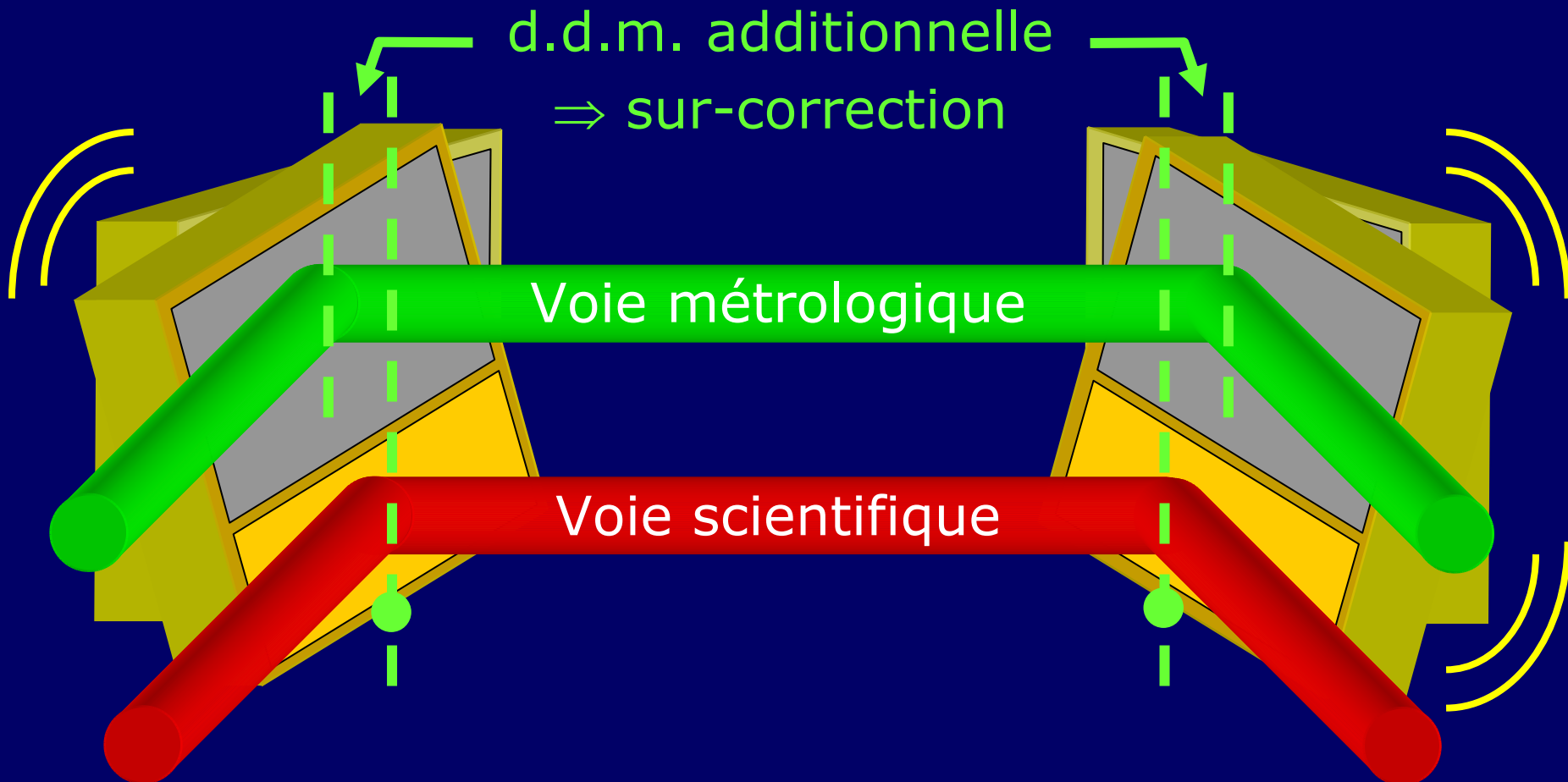
Données métrologie *Agilent*



Performances de l'asservissement en différence de marche (2)



Hypothèse : d.d.m. vue par la voie scientifique amplifiée à cause d'un effet de levier sur les optiques



Modulation de la d.d.m. (1)



Objectif : mesurer la d.d.m. grâce au signal scientifique

$$N(ddm + \delta ddm) - N(ddm - \delta ddm) = \frac{4\pi^2}{\lambda_{\text{moyenne}}^2} \cdot ddm \cdot \delta ddm$$

Principe :

$$\Delta N \approx \text{cste} \cdot ddm \cdot \delta ddm$$

avec N : fuites stellaires **mesurées** (signal détecteur)

ddm : différence de marche **inconnue**

δddm : différence de marche additionnelle,
connue

λ_{moyenne} : longueur d'onde moyenne, **connue**

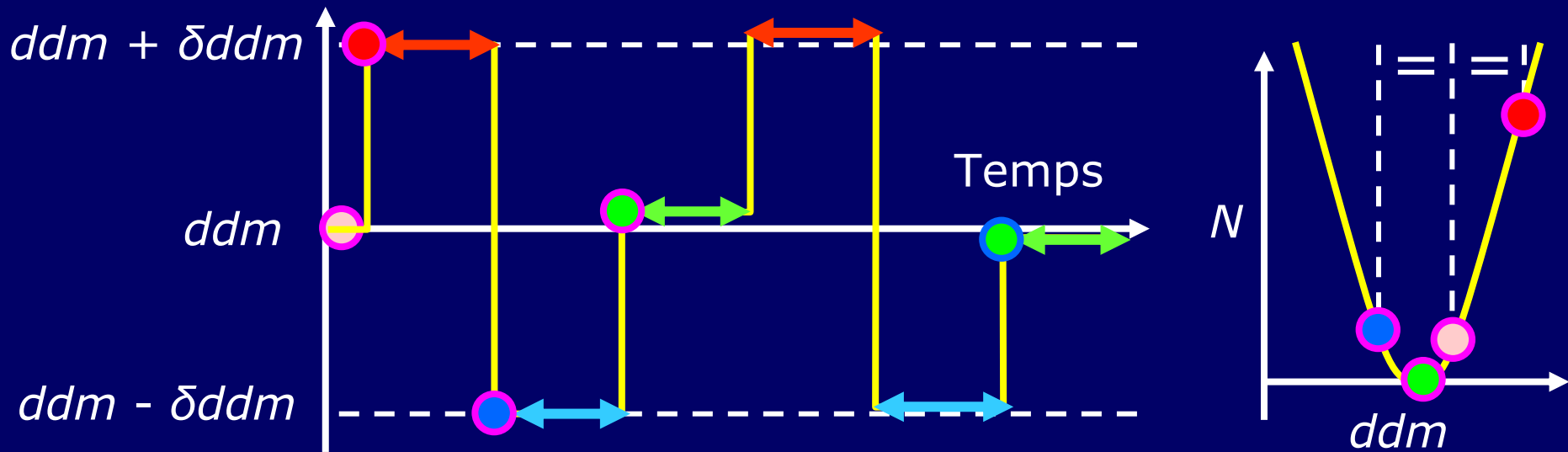
d'où

$$\Delta N, \text{ signal d'erreur} \propto ddm$$

Modulation de la d.d.m. (2)



Mise en pratique, pour une correction à qq Hz



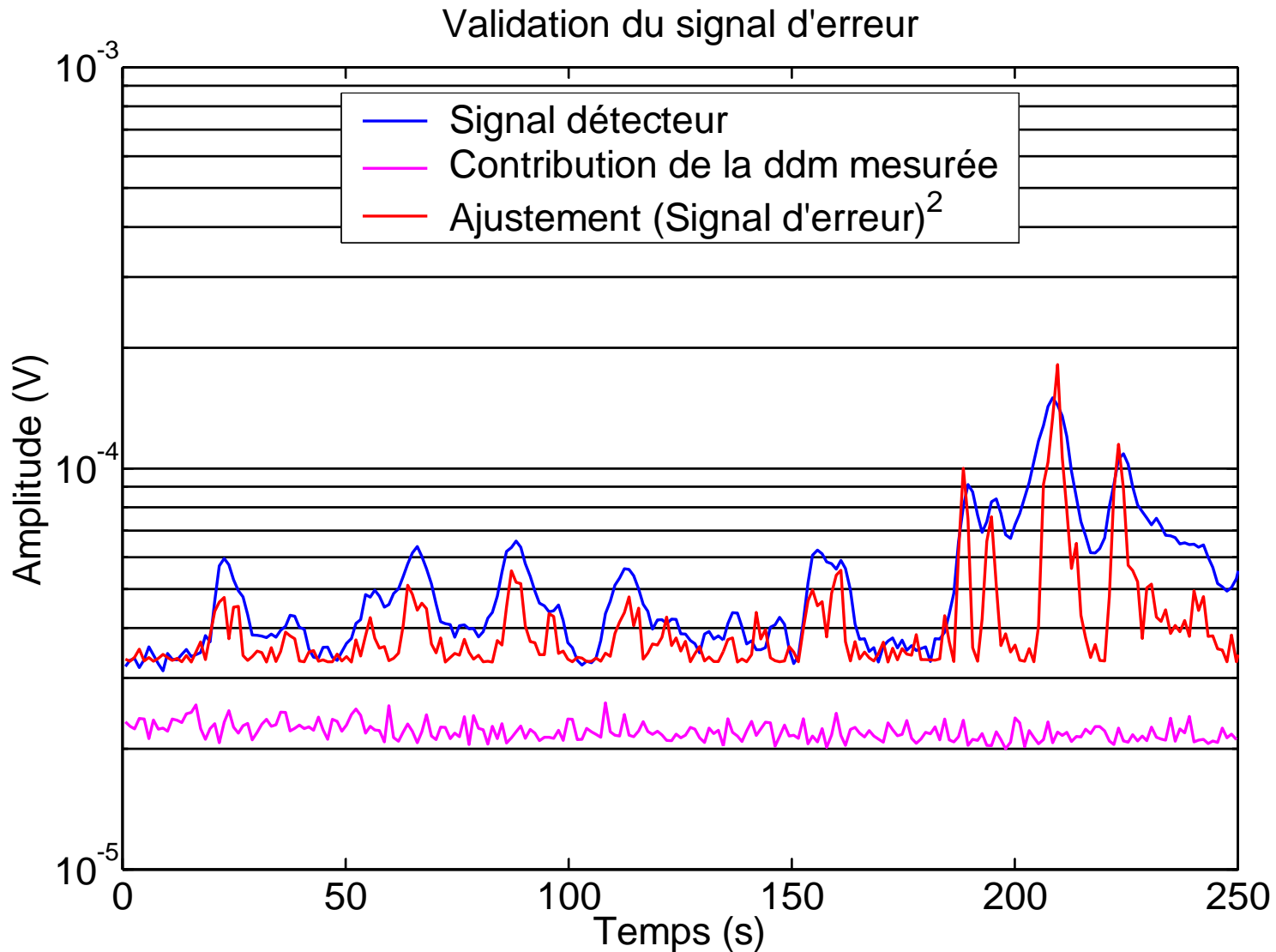
avec \longleftrightarrow mesure de $N (ddm + \delta ddm)$

\longleftrightarrow mesure de $N (ddm - \delta ddm)$

\bullet calcul de ΔN et correction de la d.d.m.

\longleftrightarrow mesure de $N (ddm \text{ corrigée})$

Modulation de la d.d.m. (3)



Plan



1. La recherche d'exoplanètes
2. Vers une détection directe : la mission Darwin
3. Étude d'un déphaseur achromatique
4. Environnement de test : le banc SYNAPSE
5. Mesures et résultats
6. **Conclusions et perspectives**



Conclusions (1)



1. Une mission de détection directe :

Darwin

2. Un composant central : le **déphaseur
achromatique**

☞ Flexibilité de la méthode des lames dispersives

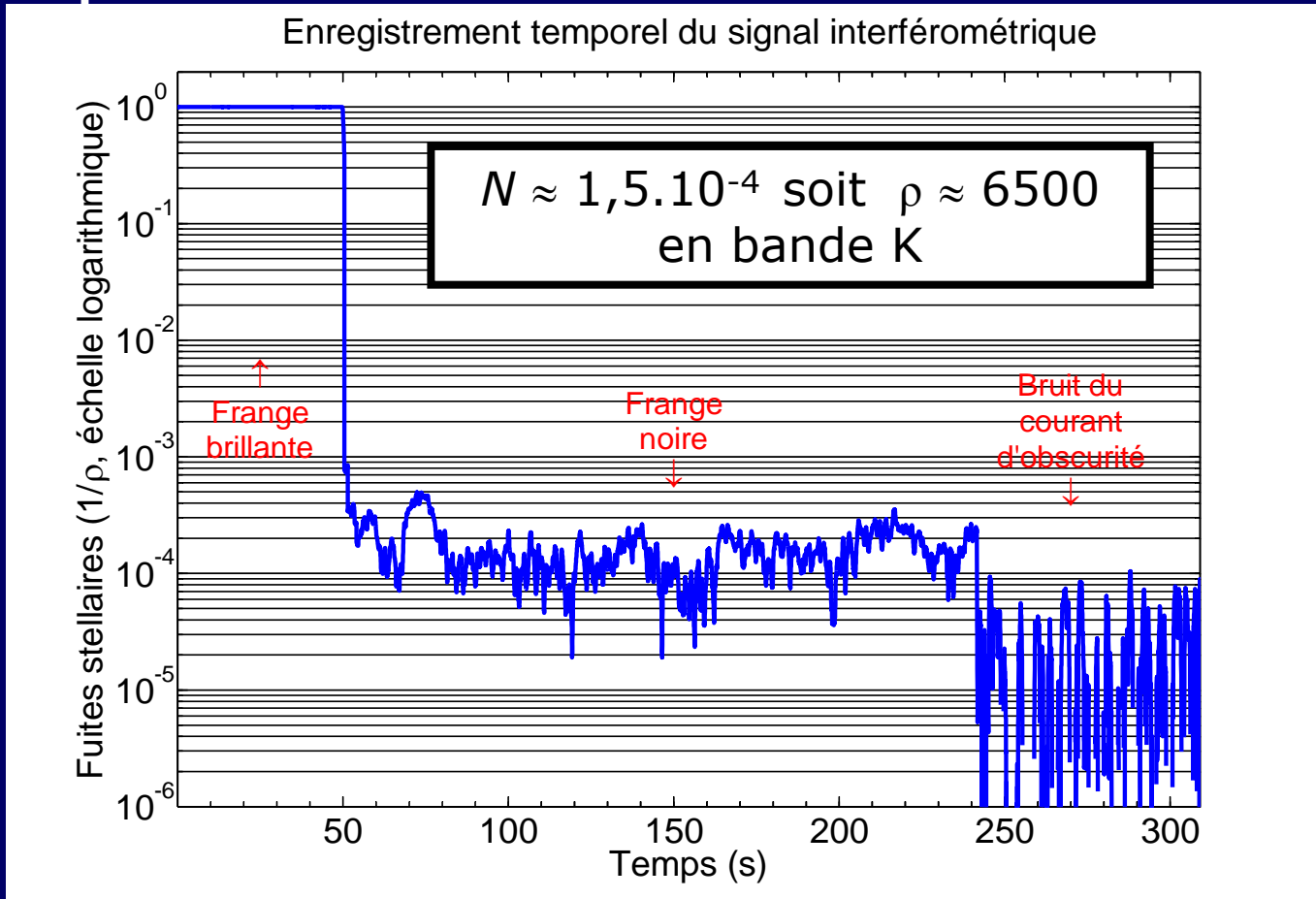
3. Un environnement de test : **SYNAPSE**

☞ Stabilité du banc essentielle pour caractériser
correctement les déphaseurs

Conclusions (2)



4. Résultats : obtention de réjections de quelques milliers sur des bandes larges





Conclusions (3)



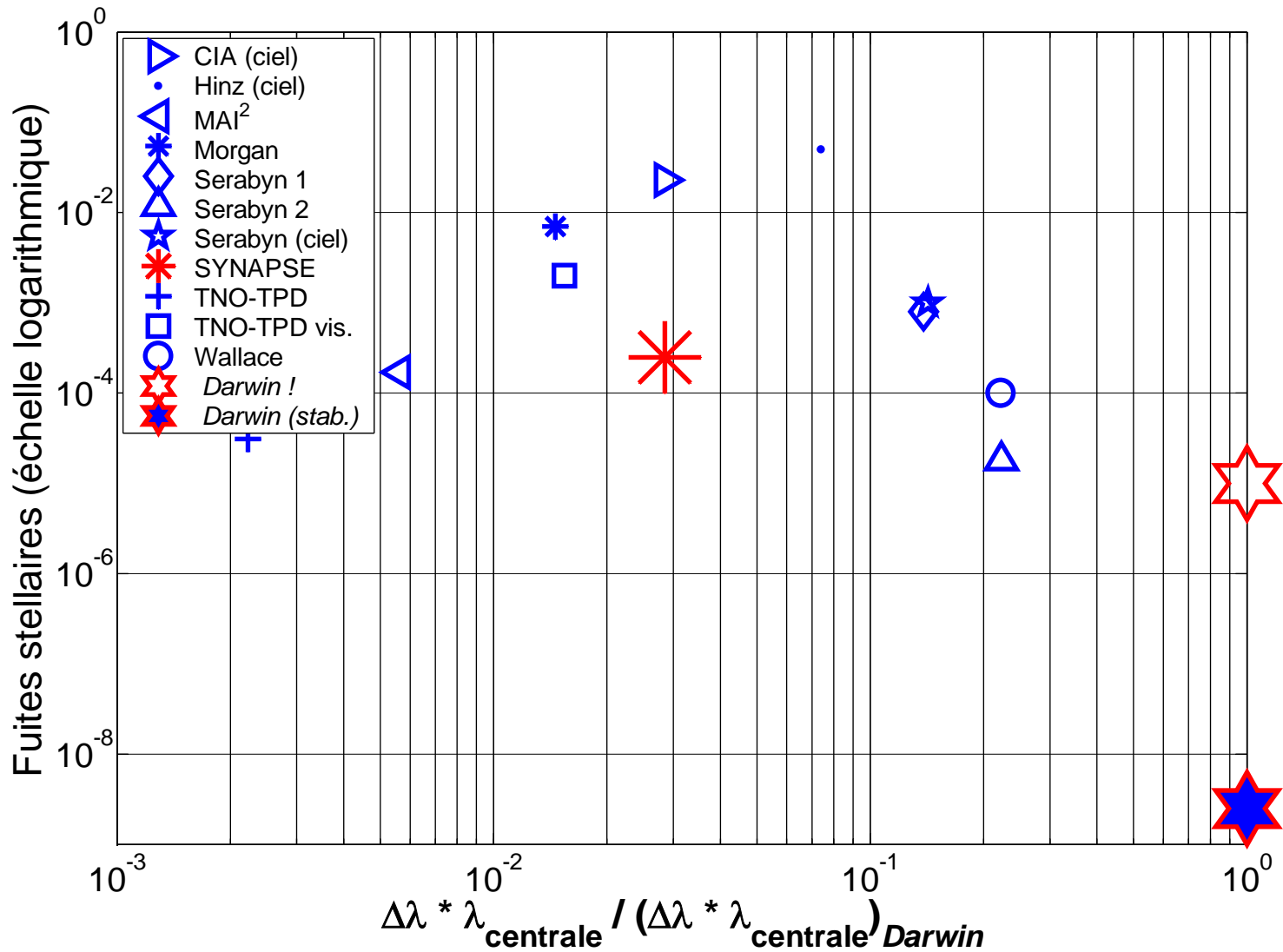
4. **Résultats** : obtention de réjections de quelques milliers sur des bandes larges

5. **Enjeux et enseignements** :

- ☞ stabilité de la réjection **critique**
- ☞ superposition des voies de métrologie et des voies de mesure ?
- ☞ modulation de la d.d.m. suffisante ?

1. Poursuite des réglages de la modulation
2. Test d'un déphaseur basé sur le passage par un foyer optique
3. Utilisation d'un corps noir à 10 000 K ou de CIRCUS ...
4. Test de la charge utile d'un démonstrateur

Perspective !

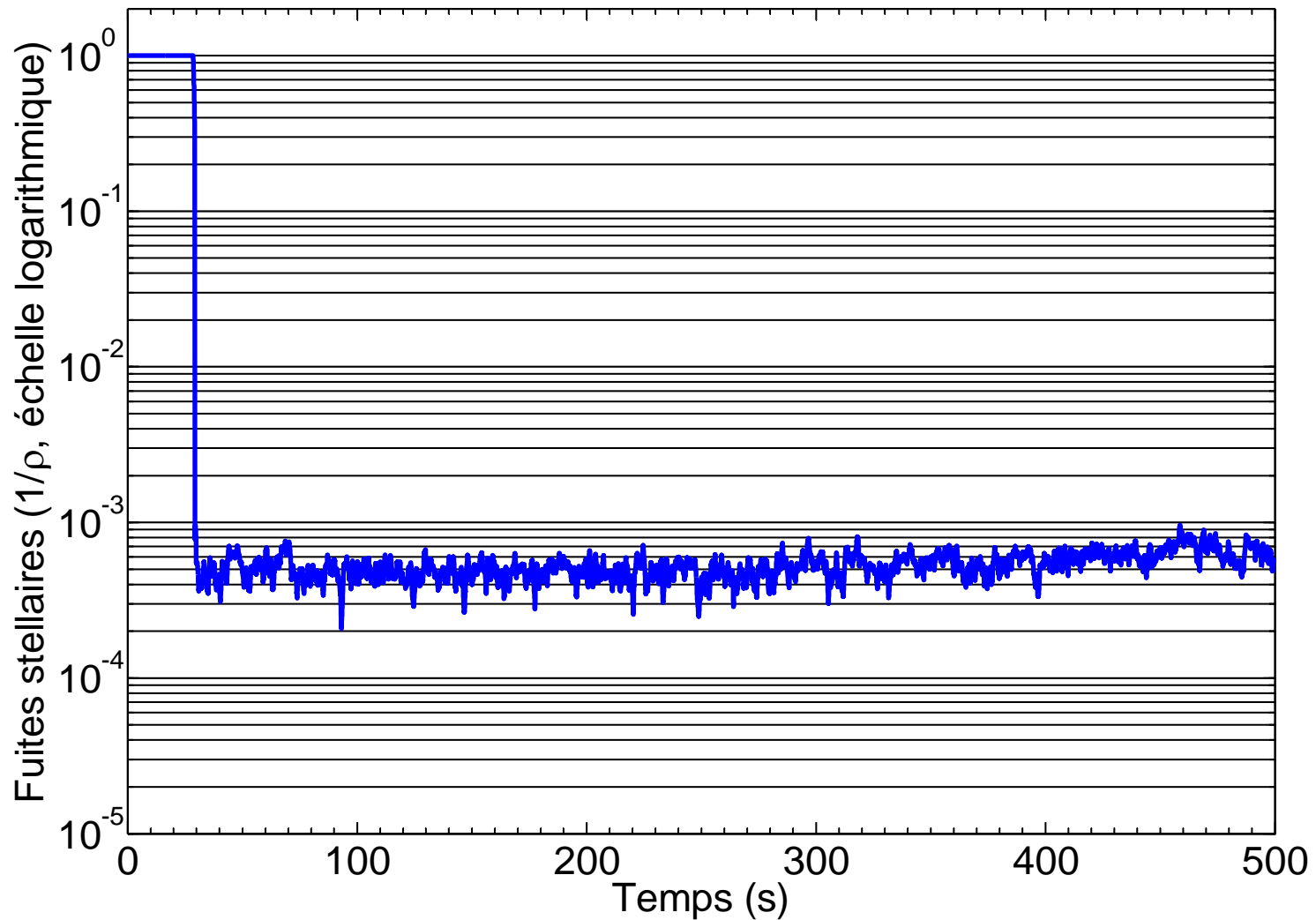




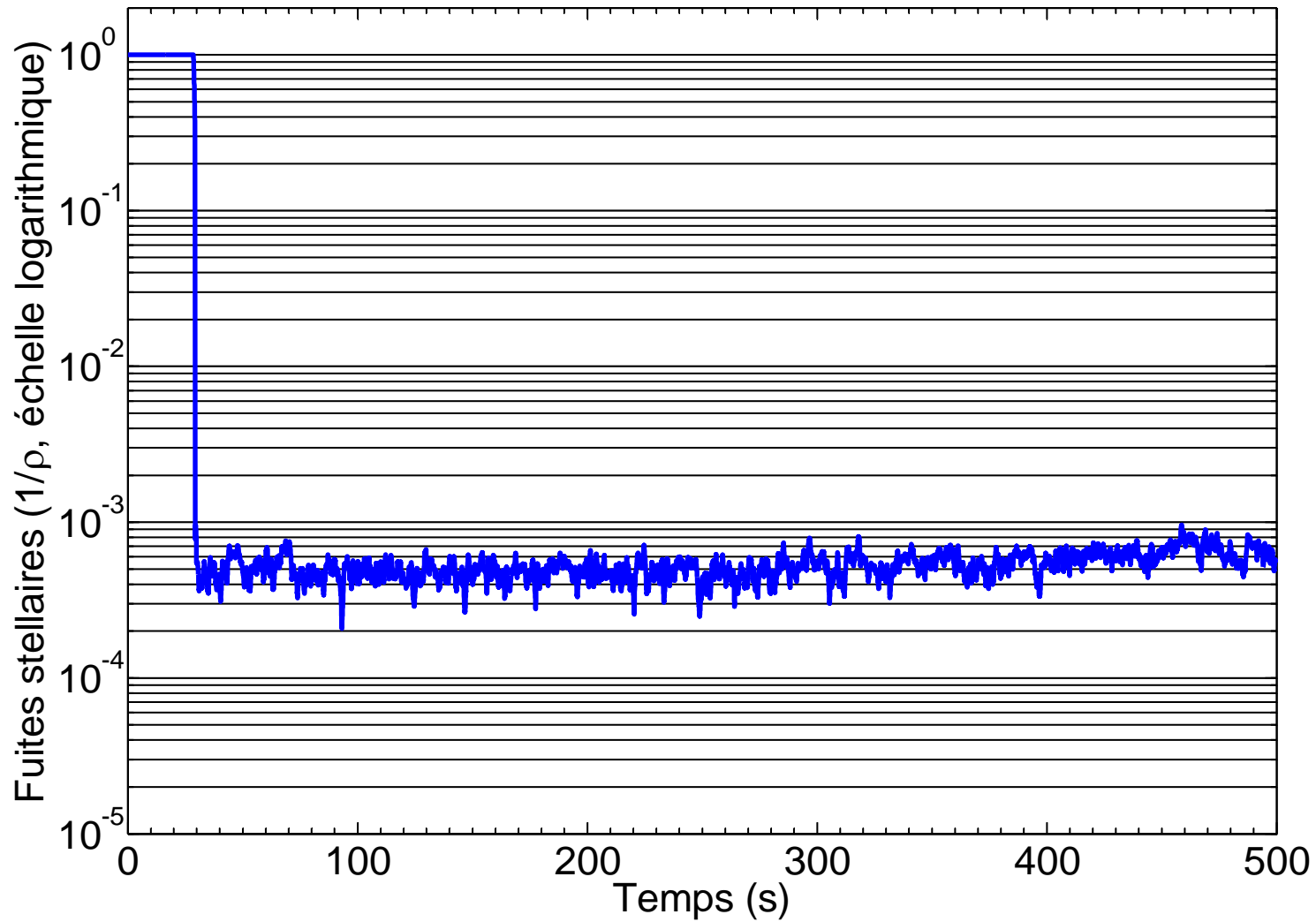
Merci de votre attention ...



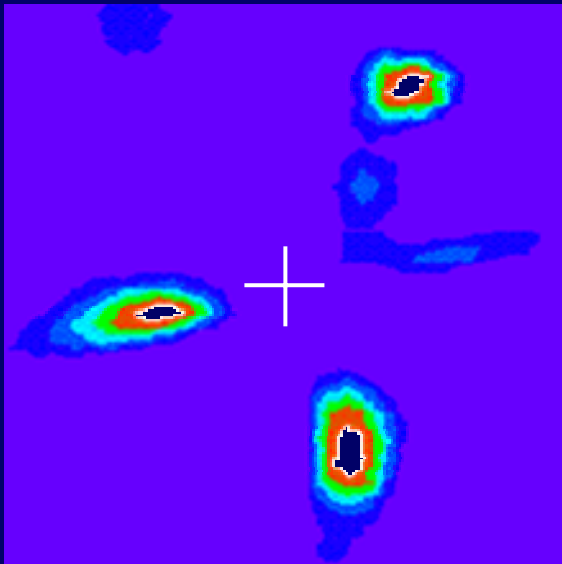
Enregistrement temporel du signal interférométrique



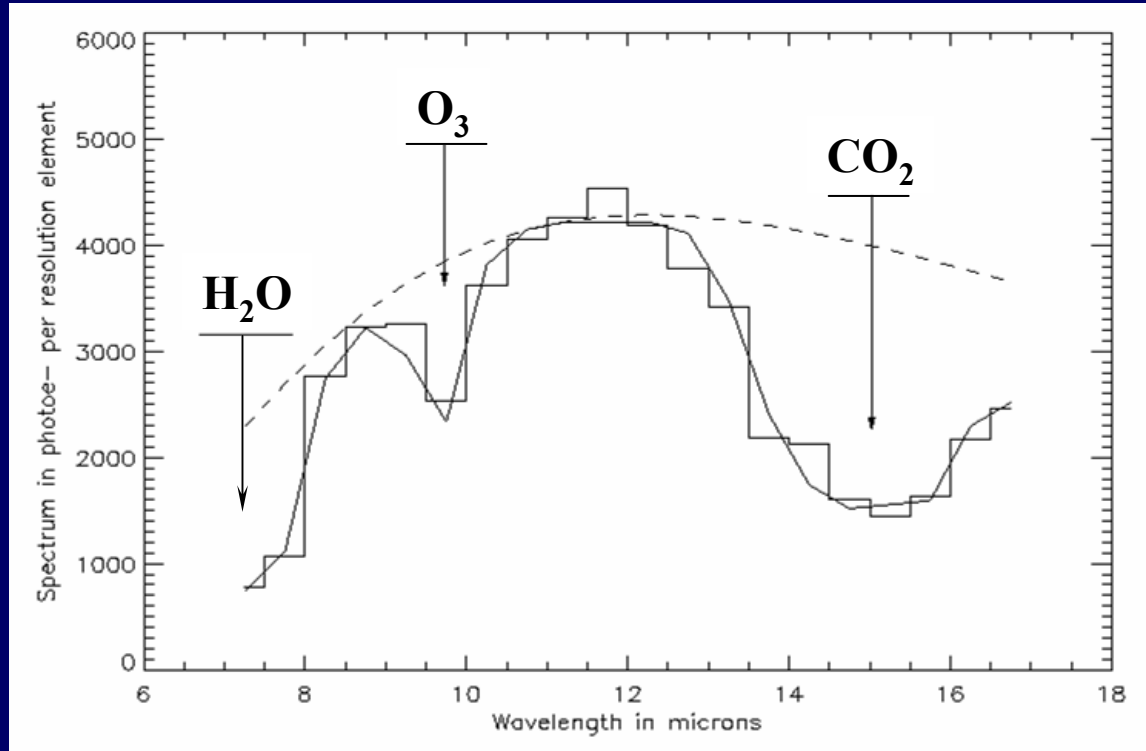
Enregistrement temporel du signal interférométrique



Capacités de la mission



Imagerie



Analyse spectrale

(d'après Mennesson & Mariotti, 1997)

Passage par un foyer optique

