



# Interférométrie destructive: du sol à l'espace

Olivier Absil  
IAGL, Université de Liège  
Séminaire GRIL, 22 mars 2005

# Plan de l'exposé

- Nulling au sol: GENIE
  - Objectifs
  - Principe et difficultés du nulling au sol
  - Design préliminaire
  - Performances attendues (GENIEsim)
  - Applications scientifiques
  - Perspectives antarctiques...
- Nulling dans l'espace: Pégase
  - Objectifs de la mission
  - Design préliminaire et performances attendues
  - Applications scientifiques

# Darwin TRP: it's a long way...

## ➤ En cours ou déjà terminé

- Interferometer Constellation Control (Astrium, F) (Alcatel, Cannes, F)
- Interferometer Constellation Deployment (Astrium, UK)
- Formation Flying RF S/S (Alcatel, F)
- High Precision Optical Metrology (Astrium, F)
- Fringe Sensor (Kayser-Threde, D)
- FIR Linear Detector Array (Acreo, S)
- Achromatic Phase Shifter (IAS, F)
- Optical Delay Line (TNO-TPD, NL) (Contraves, CH)
- Single Mode Fibers (Astrium, D) (TNO-TPD, NL)
- FEEP and ion engines (various)
- Sorption Cooler (University of Twente, NL)
- Reconstruction of Exosolar System Properties from Nulling Interferometer Data for Darwin (Alcatel, F)
- Te glass development (TNO, NL)
- FINCH integration (Astrium, D)

## ➤ Études prévues

- Fibre Optics Wavefront Filtering (multi-axial beam combination).
- High Stability Optical Bench (mechanical stability).
- Formation Flying Ground Testbed (on-ground verification of formation flying).

# Préparation de Darwin: manips astro

## ➤ Technologie

- ▶ Validation technique nulling → **nuller sol** + labo
- ▶ Vol en formation → **mission spatiale** + labo
- ▶ Fibres, beam-combiners, contrôle, ... → labo

## ➤ Programme scientifique

- ▶ Caractérisation préliminaire des cibles
- ▶ Disques exozodiacaux → **nuller sol** (et/ou espace?)
- ▶ Identification préliminaire d'exo-Terres → ?

## ➤ Exploitation scientifique

- ▶ Traitement données → devra être testé...
- ▶ Besoin d'impliquer la communauté → **nuller sol**

# I. Le nulling au sol

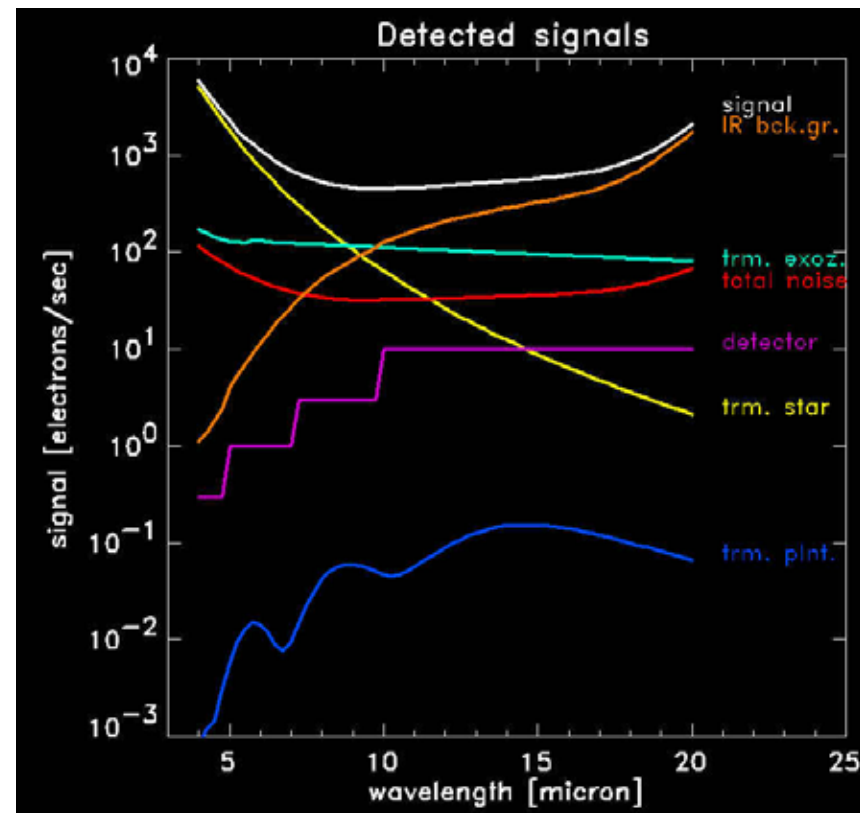


# GENIE: un projet ESA-ESO

- « Letter of Agreement » ESA-ESO (2001)
  - ▶ Volonté (politique) des deux institutions de collaborer
- Pré-étude au sein de l'ESA/ESTEC
  - ▶ Définition des objectifs
    - Design, construction et opération d'un nuller sol
    - Développement et test de la technologie Darwin
    - Caractérisation des exozodis autour cibles Darwin
    - Instrument scientifiquement utile, ouvert à la communauté
  - ▶ Étude préliminaire du design et des performances
  - ▶ Invitation to Tender (2003)
- 2 phases A concurrentielles (2004)
- Évaluation en cours à l'ESA et l'ESO

# Objectif ESA: disques exozodiacaux

- Émission intégrée: ~300x le signal d'une Terre
- Contexte Darwin:
  - Source de **bruit** marginalement dominante
  - Techniques de modulation n'éliminent pas la partie **asymétrique**
  - Pourraient empêcher la détection des Terres

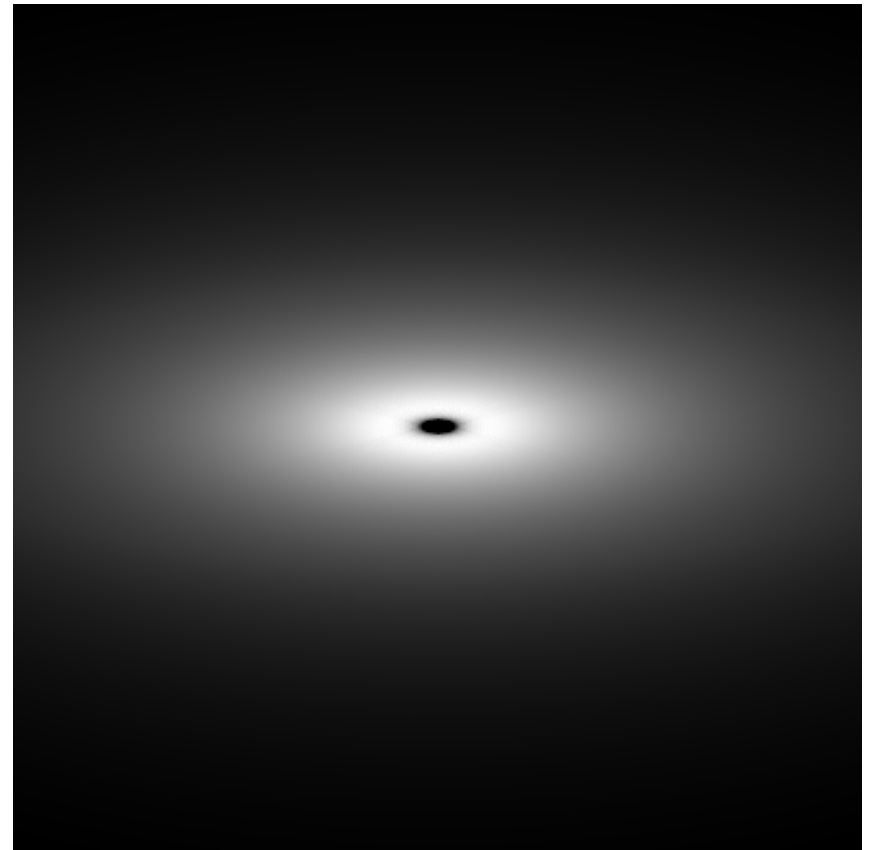


DARWIN: Détection d'une Terre à 10 pc

Densité	Détection	O <sub>3</sub> spectro
1 zodi	6.5 heures	3.9 jours
10 zodi	14.4 heures	8.3 jours
<b>100 zodi</b>	<b>93 heures</b>	<b>52 jours</b>

# Exozodi: le « design driver »

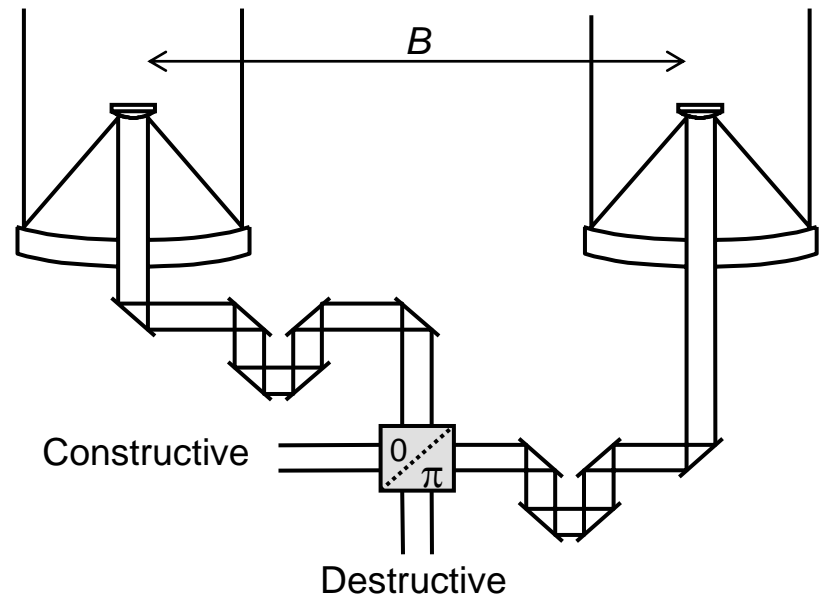
- Disques optiquement fins
- Objectif: sensibilité de 20 zodis jusque 20pc
- Contraste:
  - ▶  $10^4$  en bande L'
  - ▶  $10^3$  en bande N
- **Bande L'** sélectionnée par les deux consortia à cause du fond thermique
- Résolution nécessaire:
  - < 1AU à 20pc
  - < 50 mas
  - **base > 16 m**



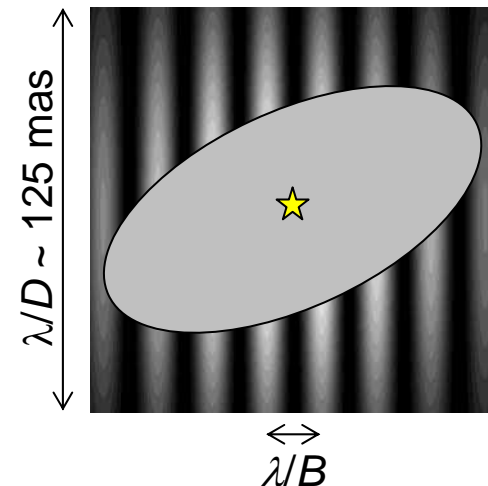


# Nulling de Bracewell: principe

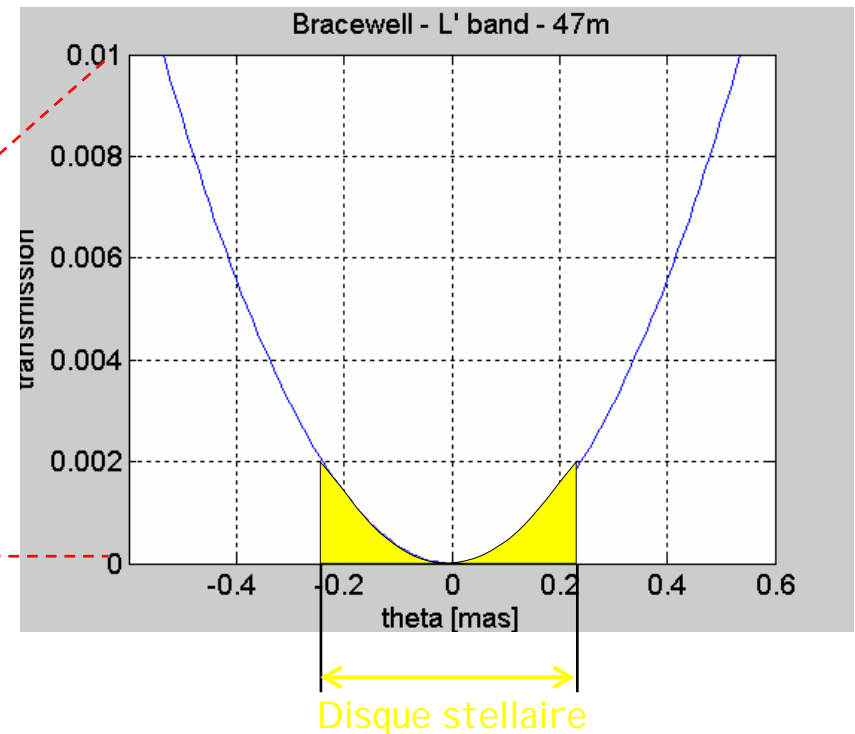
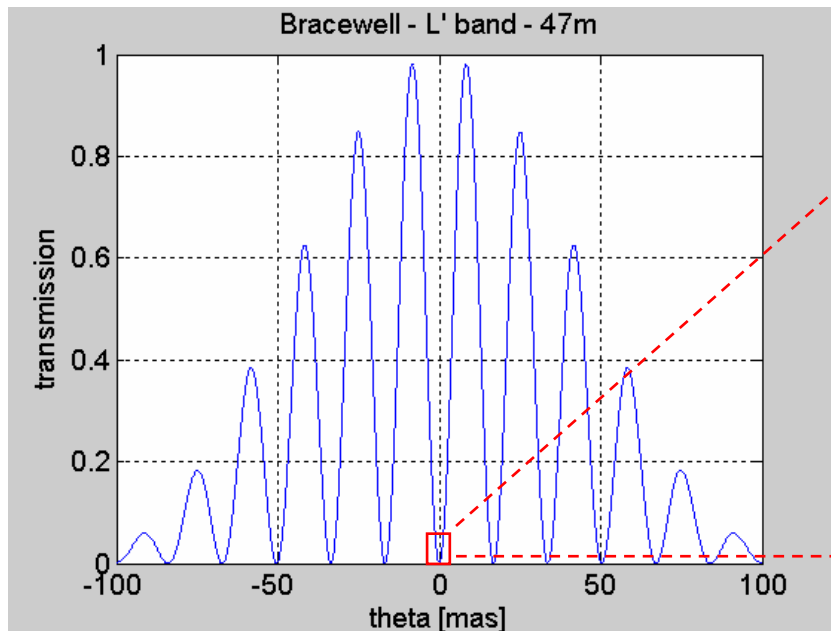
- Interféromètre caractérisé par sa **carte de transmission**
- Recombinaison en plan pupille → **pas d'image**
- Intégration du flux transmis **sur tout le champ** de l'interféromètre
- Méthodes de **calibration** nécessaires pour distinguer les différentes contributions



Carte de **transmission**



# Taux de réjection stellaire



➤ Taux de réjection stellaire:

$$\rho = \frac{4}{\pi^2} \left( \frac{\lambda / B}{\theta_*} \right)^2$$

➤ Soleil à 20 pc ( $\theta_* = 0.23\text{mas}$ ):

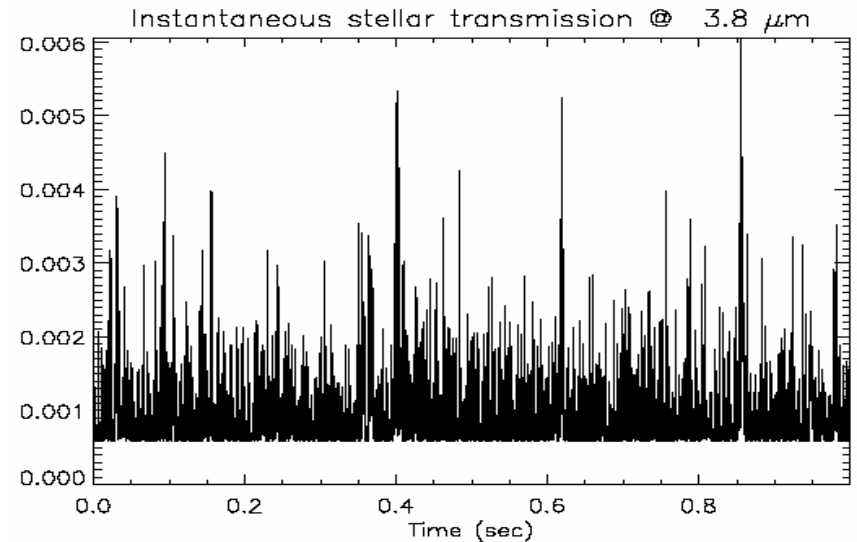
➤ UTs:  $B = 47\text{ m} \Rightarrow \rho = 2116$

➤ ATs:  $B = 16\text{ m} \Rightarrow \rho = 17836$

➤ Fuites stellaires « géométriques »

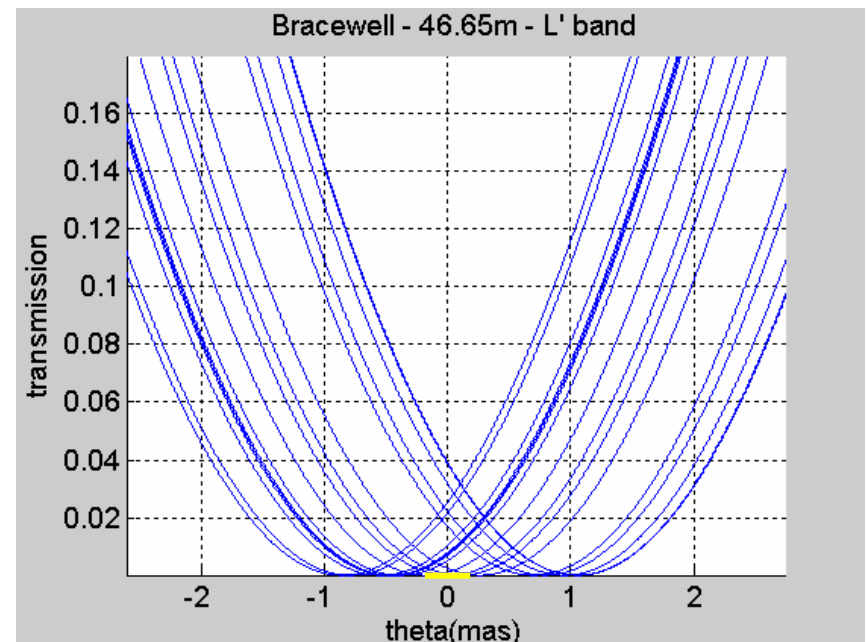
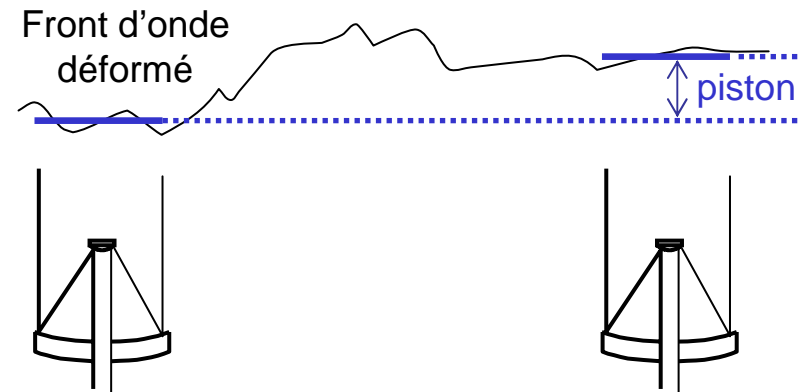
# Principales difficultés

- Turbulence atmosphérique:
  - Piston
  - Dispersion
  - Erreurs de front d'onde
  - Scintillation
  - ...
- Fond thermique IR
- Effets instrumentaux:
  - Polarisation
  - ...
- Sources de fuites stellaires  
« instrumentales »



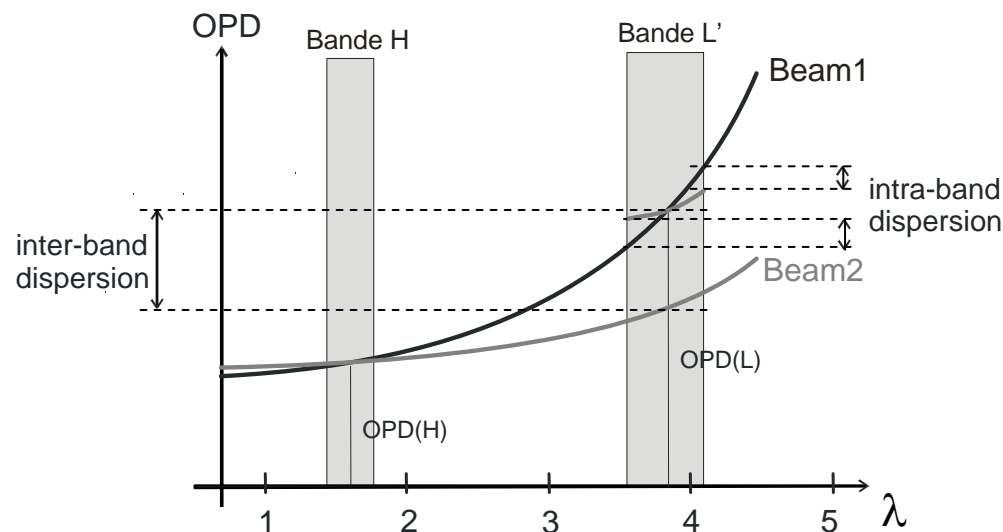
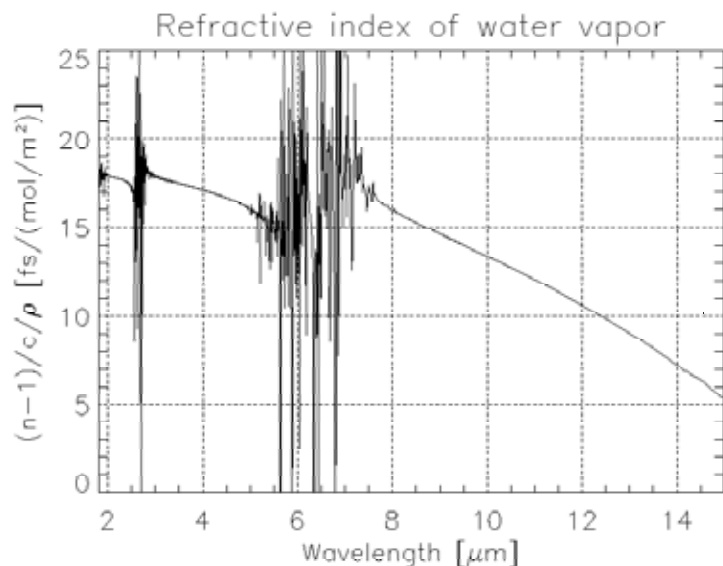
# Atmosphère: effet piston

- Fluctuations de l'indice de réfraction de l'air
- Piston = composante **achromatique**, produite par l'air sec ( $\sim 20\mu\text{m}$  RMS  $\rightarrow$  6 franges!)
- Besoin d'un suiveur de franges
  - **FINITO**: 3T, bande H
  - **PRIMA**: 2T, bandes H/K
  - Perfo:  $\sim 150$  nm RMS  $\rightarrow$  nulling  $\sim 10^{-2}$
  - Besoin d'un suiveur de frange dédié



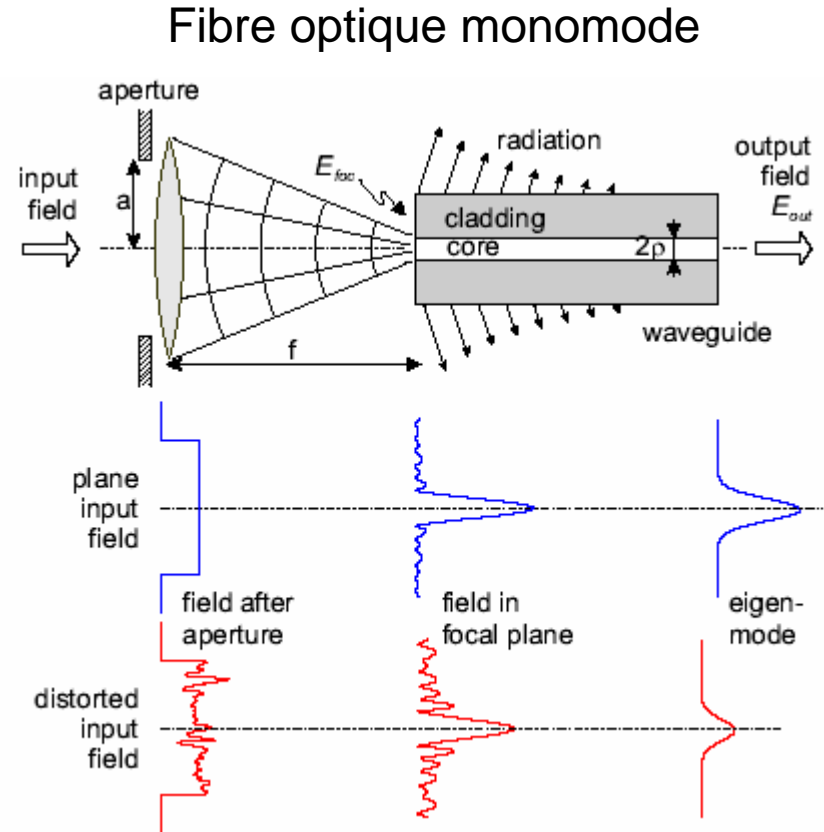
# Atmosphère: dispersion longitudinale

- Fluctuations de la densité de colonne de vapeur d'eau
- Indice de réfraction dépend de la longueur d'onde
- Ajoute une composante chromatique au piston
- Dispersion pas corrigée en bande L' →  $\Delta\text{OPD} \approx 2 \mu\text{m}$  RMS → nulling  $\sim 1$
- Besoin d'un correcteur dédié



# Atmosphère: erreurs de front d'onde

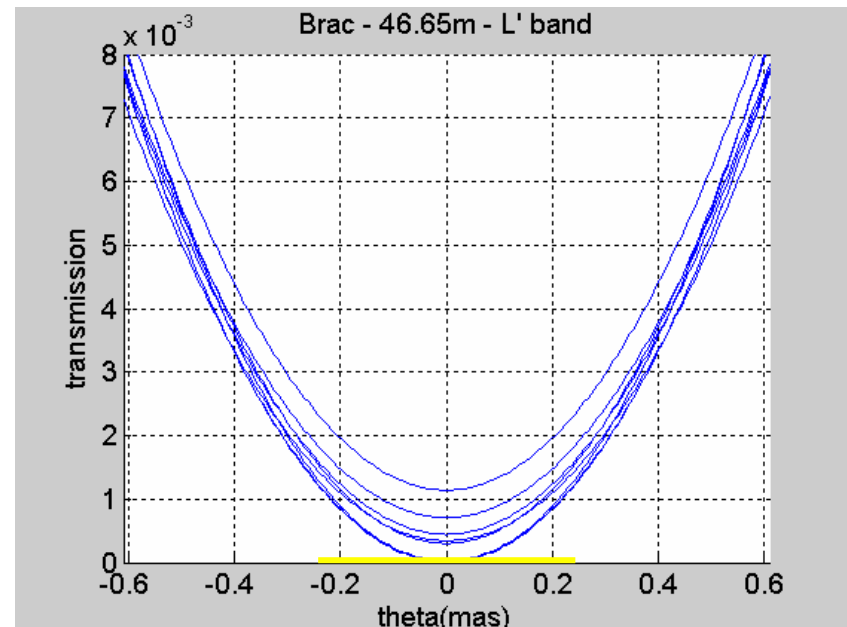
- Projection du champ électromagnétique sur le **mode fondamental** de la fibre
- Erreurs de **phase** → erreurs d'**intensité**
- Front d'onde en entrée caractérisé par rapport de **Strehl** et erreurs de **tip-tilt**
- Approximation: énergie couplée dans la fibre  $\approx$  rapport de Strehl (valide pour  $\text{Strehl} > 0.3$ )



# Atmosphère: fluctuations d'intensité

- Correction préalable du front d'onde:
  - ▶ MACAO sur UTs
  - ▶ STRAP sur ATs
- Influence faible de la scintillation
- Fluctuations résiduelles  $\sim 10\%$   $\rightarrow$  nulling  $\sim 10^{-3}$
- Besoin d'une correction supplémentaire

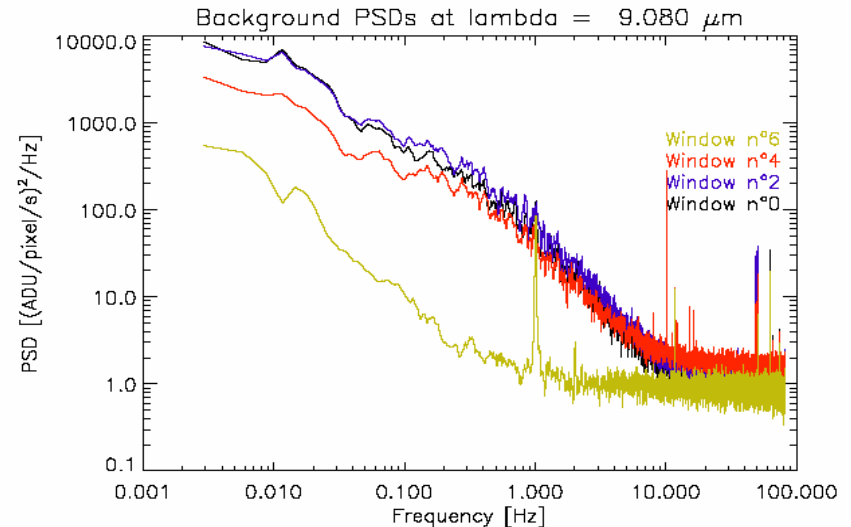
	Moyenne	RMS
Tip-tilt	0 mas	14 mas
Strehl L'	0.80	0.05
Couplage	0.58	0.044



# Atmosphère: fond thermique

- Rayonnement de fond
  - ▶  $10^4$  exozodi en bande L'
  - ▶  $10^7$  exozodi en bande N
- Soustraction cruciale
- Fluctuations à toutes les fréquences
  - ▶ Échantillonnage rapide du fond thermique
- Résidu  $< 10^{-8}$  semble très critique en bande N
- GENIE: choix bande L'
- Soustraction du background reste critique

	L'	N
Total stellar signal [Jy]	3.1	0.51
Total exozodi signal [Jy]	$3.0 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-4}$
Sky brightness [Jy/as <sup>2</sup> ]	5.0	690
VLTI brightness [Jy/as <sup>2</sup> ]	115	21300
GENIE brightness [Jy/as <sup>2</sup> ]	29	5320
Total bckg signal [Jy]	1.8	2550
Final stellar leakage [el/s]	$1.0 \times 10^4$	$1.5 \times 10^3$
Final exozodi signal [el/s]	$3.6 \times 10^2$	$4.1 \times 10^3$
Final bckg signal [el/s]	$4.8 \times 10^6$	$2.7 \times 10^{10}$
Shot Noise [el/s <sup>1/2</sup> ]	$2.2 \times 10^3$	$1.7 \times 10^5$
Time for SNR = 5 [sec]	950	40000

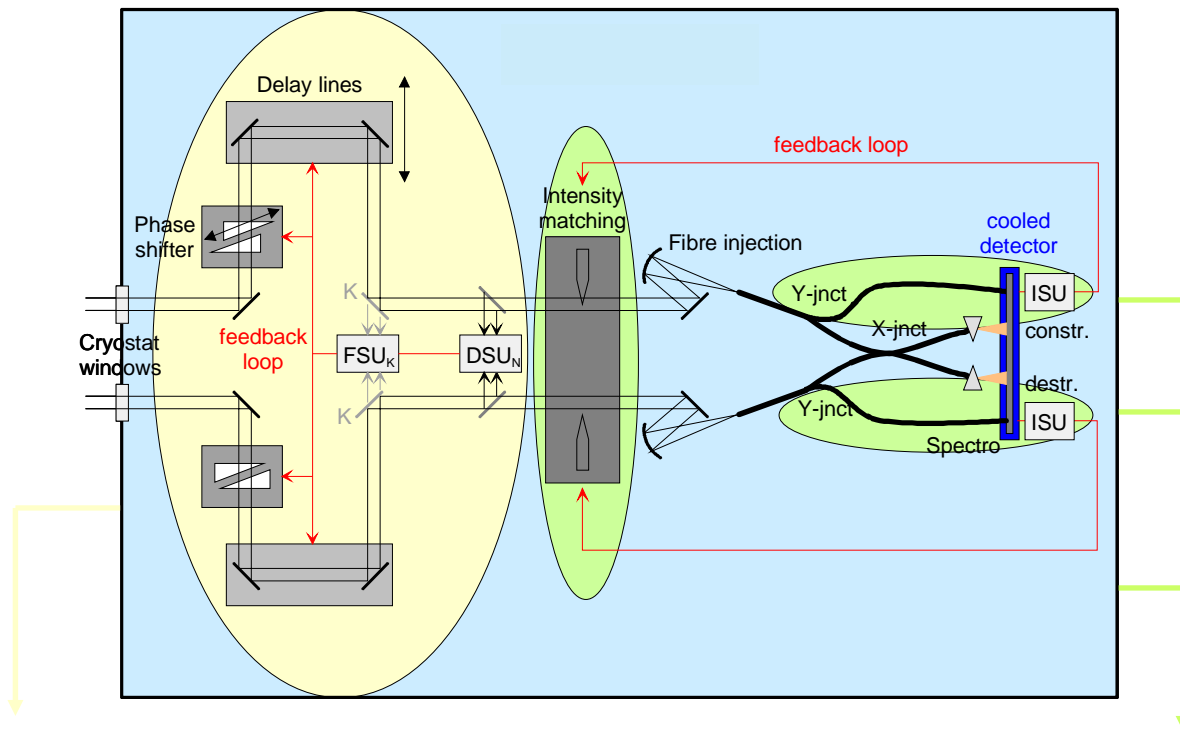




# Polarisation: l'inconnue...

- VLT: 21 miroirs
  - Coatings non identiques (âges, matériaux)
  - Réflections à différentes inclinaisons (+ courbures)
  - Polarisation linéaires ressortent elliptiques...
  - Effet très mal connu aujourd'hui → tests prévus
- Effet sur GENIE
  - Effet supposé stable dans le temps → calibration
  - Sinon, travailler sur seulement 1 polarisation...

# Design conceptuel (!pas réel!)



## Contrôle du cophasage

- ▶ Senseurs de franges en bande H/K
- ▶ Mesure « lente » de dispersion ( $L'$ )
- ▶ Ligne à retard courte et rapide
- ▶ Correcteur de dispersion (prismes)

## Contrôle de l'intensité

- ▶ Voies photométriques
- ▶ Détecteurs mono-pixel
- ▶ Correcteur d'intensité (couteaux) avant l'injection

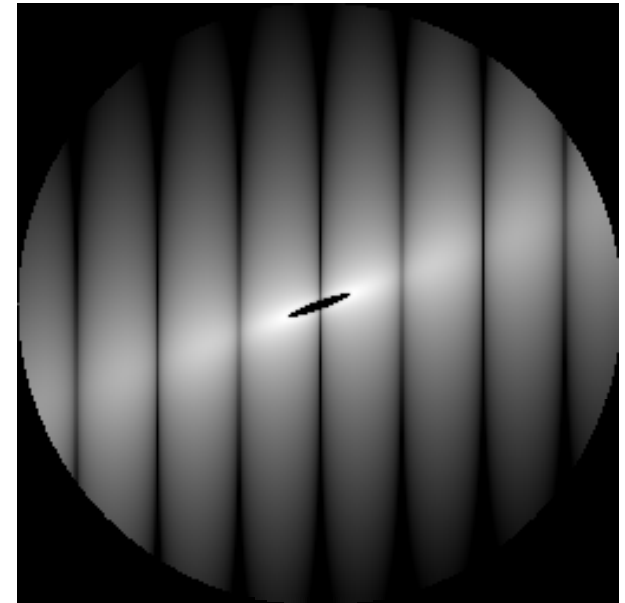
# Estimation des perfo: GENIEsim

## ➤ Objectifs de GENIEsim

- Définir les fonctions, les modes opératoires et les calibrations nécessaires pour GENIE
- Définir les specs de haut niveau
- Quantifier l'impact de l'atmosphère
- Comparaison de différents concepts / designs
- Estimation des **performances** de GENIE
- Simuler des scénarios d'observation
- Tester la réduction et l'analyse des données
- Communiquer les connaissances de l'ESA vers les partenaires (scientifiques et industriels)

# Principe de GENIEsim

- Intégrale dans le plan du ciel
  - Former une **image de la scène** (étoile, exozodi, planète, ...)
  - Calculer la carte de transmission instantanée (avec toutes erreurs)
  - Flux en sortie = **série temporelle**
    - Fuites stellaires: intégrale 2D analytique
    - Transmission exozodi: intégrale 2D numérique (pixels)
    - Planète = source ponctuelle
    - Fond thermique ajouté comme une source incohérente
  - **Pas de ray-tracing!!!**
  - **Fonctionnement par blocks**



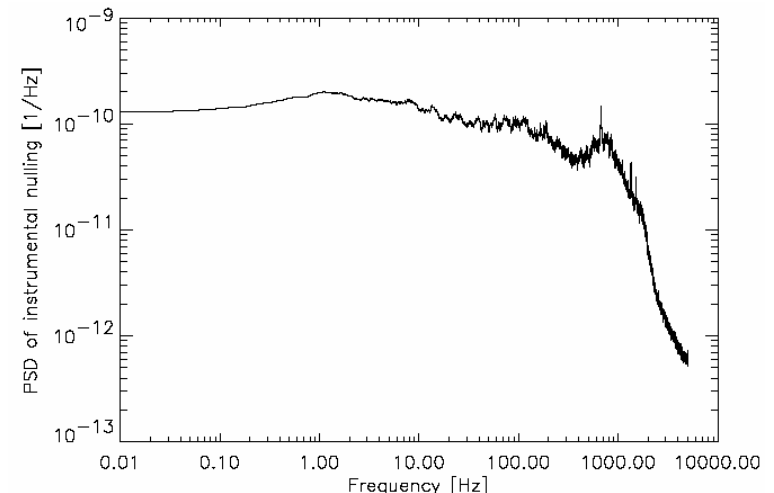
# Simulation des sous-systèmes (VLTI)

- Simulations dans le domaine fréquentiel (Densités Spectrales de Puissance – PSD, fonctions de transfert)
- **MACAO**: système d'AO pour le VLTI (UTs)
  - Corrige les 60 premiers Zernike à 350 Hz
  - Le miroir bimorphe introduit du piston à haute fréquence
  - Strehl bande K: ~50% avec fluctuations ~10% RMS
  - Tip-tilt résiduel ~ 15 mas RMS
- **STRAP**: correcteur de tip-tilt pour les ATs
  - Performance typique: ~60 mas RMS ? (pas encore validé)
- **FINITO / PRIMA-FSU**
  - Senseurs de franges pour 2 ou 3 télescopes
  - Bandes H et/ou K
  - Correction effectuée par les lignes à retard du VLTI (“lentes”)
  - Performance pour  $V < 9$ : ~150 nm RMS d'OPD résiduel

# Simulation des sous-systèmes (GENIE)

- **Suiveur de franges**
  - Corrige les fluctuations rapides d'OPD restantes (en H et K, ~20 kHz)
  - Ligne à retard rapide dédiée: actuators piezo
  - Performance typique: ~10 nm RMS sur étoile de magnitude K=5
- **Correcteur de dispersion**
  - Senseur de frange supplémentaire en bande L'
  - Correction dispersion inter-bande: ligne à retard (~100 Hz)
  - Correction dispersion intra-bande: prismes diélectriques mobiles (~100Hz)
  - Performance: ~10 nm RMS en bande L' pour K=5
- **Correcteur des intensités**
  - Fibres dédiées pour mesurer le flux couplé (~1 kHz)
  - Actuators = iris variables avec l'injection
  - Performance: ~1.5% en bande L'

	worst case	best case
Piston	16 nm @ 20 kHz	5 nm @ 15 kHz
Inter-band	14 nm @ 250 Hz	9.3 nm @ 125 Hz
Intra-band	3.3 nm @ 250 Hz	2.3 nm @ 125 Hz
Intensity	1.4% @ 1 kHz	1.4% @ 1 kHz
Mean total nulling	$8.0 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-4}$
Mean instr. nulling	$3.3 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-5}$
RMS instr. nulling	$4.5 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$



# Sources de bruit: résumé

- **Bruit de photon**
  - Principalement dû au background
- **Bruit de détecteur**
  - Lectures multiples non destructives pour réduire RON
- **Fuites stellaires géométriques**
  - Introduisent un biais qu'il faut calibrer
- **Fuites stellaires instrumentales**
  - Introduisent également un biais
    - Boucles temps réel pas assez performantes ( $\sim 10^{-4}$ )
    - Calibration supplémentaire nécessaire
  - Bruit de variabilité: s'améliore avec le temps
- **Soustraction du fond thermique**
  - On suppose mesure simultanée du background
    - Multi-champs
    - Modulation de phase

# Calibrations: fuites géométriques

- Fuites géométriques:  $\sim 10^{-3}$
- Calibration à  $\sim 1\%$  requise
- Contribution déterministe:  
$$N = \pi^2/4 (B\theta_*/\lambda)^2$$
- Demande connaissance du diamètre à 0.5%
  - Interférométrie:
    - Étoiles à peine résolues (diamètre  $< 1$  mas)
    - AMBER (résolution 1 mas)  $\rightarrow$  précision OK jusque  $\sim 10$  pc
    - Modèle assombrissement centre-bord  $J \rightarrow L'$
    - GENIE mode constructif: résolution pas suffisante
  - Brillance de surface:  $\sim 1\%$

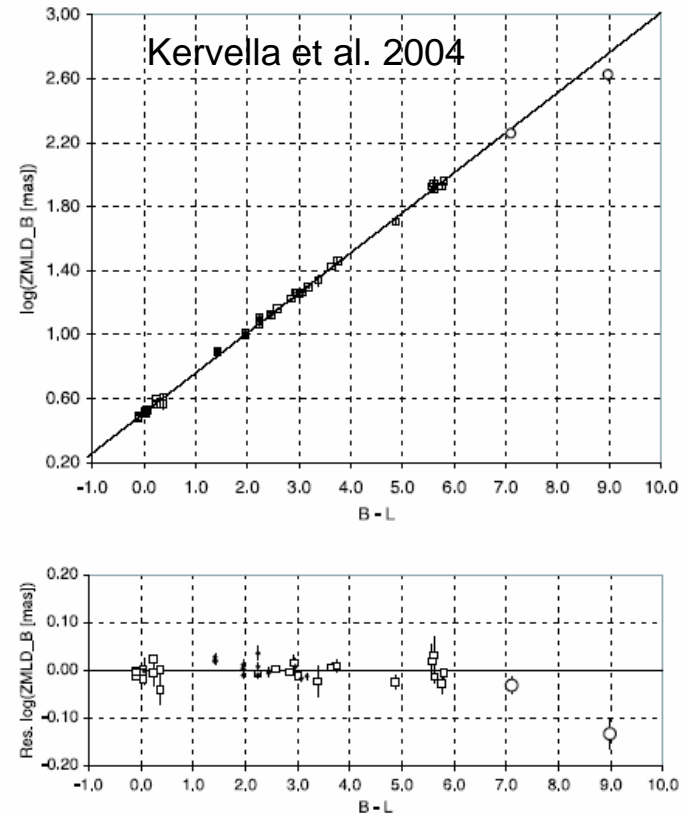


Fig. 1. Linear fit of the surface brightness relation  $\log \text{ZMLD}_B(B-L)$  (upper part), and the corresponding residuals (lower part). The intrinsic dispersion in the relation is  $\pm 0.004$  on  $\log \text{ZMLD}$ , equivalent to a systematic error of less than 1% in the predicted angular diameters. The open circles designate GJ 699 and *Proxima*, which were excluded from the fitting procedure.



# Calibrations: fuites instrumentales

- Fuites stellaires instrumentales:  $\sim 10^{-4}$
- Calibration à  $\sim 10\%$  requise
- Méthode classique: étoiles de calibration
- Choix du calibrateur:
  - Fuites géométriques négligeables  $\rightarrow$  non résolu
  - Même performances  $\rightarrow$  même flux et même couleur (H $\rightarrow$ L')
  - Incompatible!
  - Calibrateur = copie conforme de la cible, sans disque
- Précision de calibration limitée par la connaissance du diamètre
- En pratique:

$$Z(\lambda) = S_t(\lambda) - \frac{\pi^2 B^2 \theta_t^2}{4\lambda^2} F_t(\lambda) - \left( S_c(\lambda) - \frac{\pi^2 B^2 \theta_c^2}{4\lambda^2} F_c(\lambda) \right)$$

- Avec  $S_t$  (target) et  $S_c$  (calibrator) déjà soustraits du background

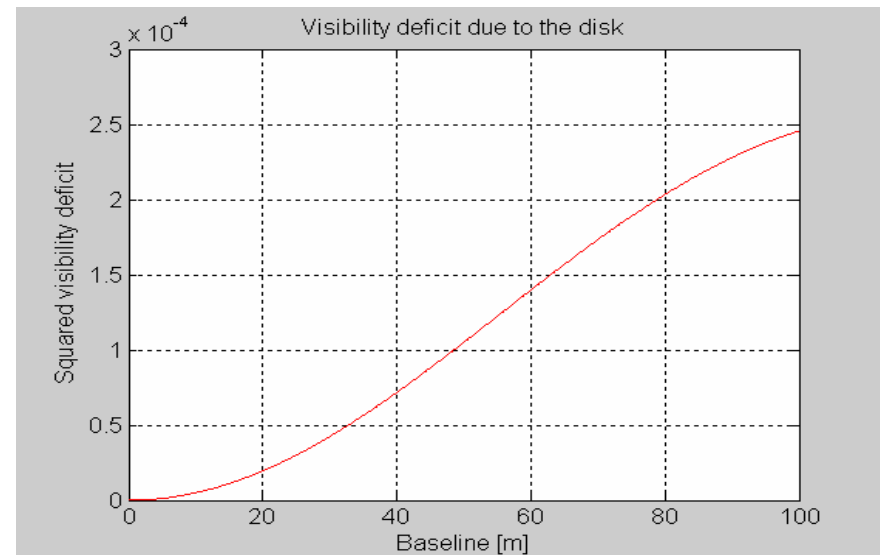
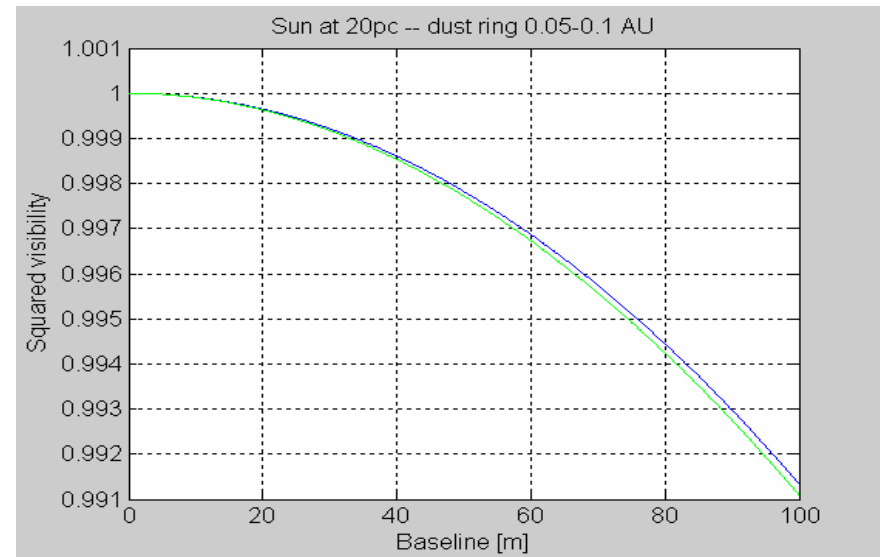
# Détection d'exozodis: performances

- Soleil à 20pc, intégration sur toute la bande L'
- Sensibilité en nombre de zodis avec et sans calibration
- Sensibilité ultime limitée par connaissance diamètre!
- 50 zodi → pertinent pour Darwin
- Configuration à plus de 2 télescopes (nulling en  $\theta^4$ ) serait intéressante (mais bcp plus compliquée)

	worst case	best case
20-zodi signal [e-]	$1.3 \times 10^6$	$1.3 \times 10^6$
Photon noise [e-]	$1.9 \times 10^5$	$1.9 \times 10^5$
Detector noise [e-]	$4.9 \times 10^3$	$4.9 \times 10^3$
Variability noise [e-]	$1.5 \times 10^4$	$7.2 \times 10^3$
Calibrated geom. leakage [e-]	$4.4 \times 10^5$	$2.2 \times 10^5$
Raw instr. leakage [e-]	$1.6 \times 10^7$	$4.5 \times 10^6$
Calibrated instr. leakage [e-]	$4.8 \times 10^5$	$2.9 \times 10^5$
Zodis for SNR=5 (raw)	1200	350
Zodis for SNR=5 (calibrated)	53	31

# Nulling vs. $V^2$ ?

- Une mesure donne dans les deux cas un point de visibilité (ou « point de nulling »)
- Nulling de  $10^4$  équivalent à mesure de visibilité à  $10^{-4}$  (même specs sur le contrôle)
- Différence: atténuation étoile
  - $V^2$ : fit de la courbe de visibilité « en aveugle » → demande diamètre connu à  $\sim 10^{-4}$  !!
  - Nulling: relaxe connaissance requise de l'étoile-cible non résolue (en plus de réduire son bruit de photon)
  - Nulling: reste à connaître diamètre à  $\sim 1\%$

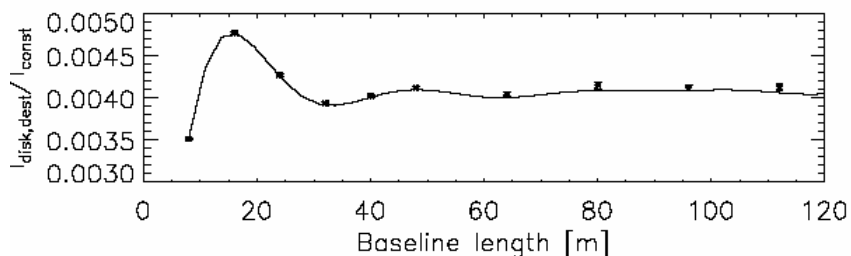
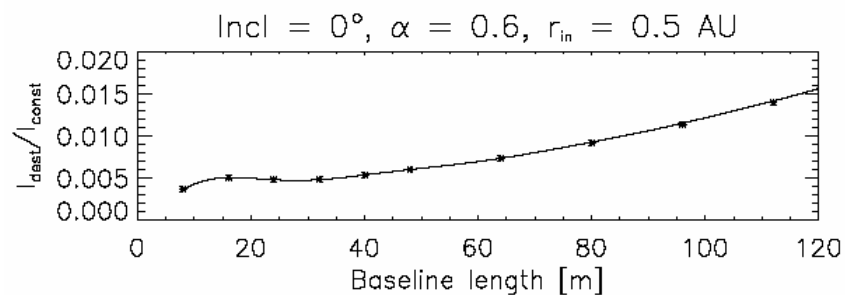


# Applications scientifiques

- Disques de débris
- Disques autour d'objets jeunes
- Binaires haut contraste, naines brunes, EGPs
- Mesures de « visibilités » à très haute précision
- Étoiles non résolues
- AGNs brillants

# Exemple 1: disques de débris

- Zeta Leporis: ▶ 10 observations avec 10 bases AT-AT « bien réparties »  
 ▶ au passage au méridien, lors de 10 nuits successives  
 ▶ 20 min d'intégration en bande L'



Ligne: rapport de nulling théorique.  
 Données: observations simulées.

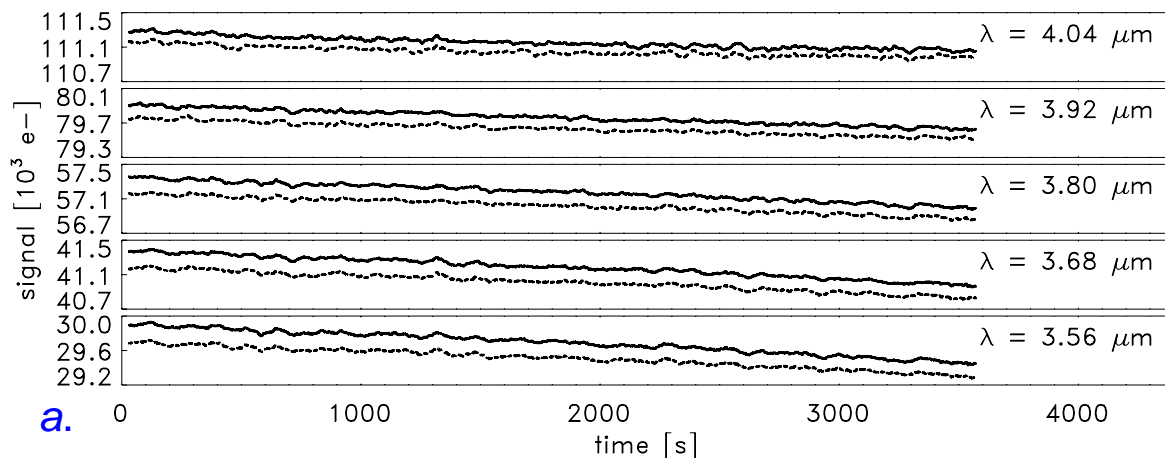
Trois paramètres du disques ont été ajustés aux observations:

- Rapport de luminosité  $L_d/L_s$
- Exposant de loi de densité  $\alpha$
- Rayon interne du disque  $r_{in}$

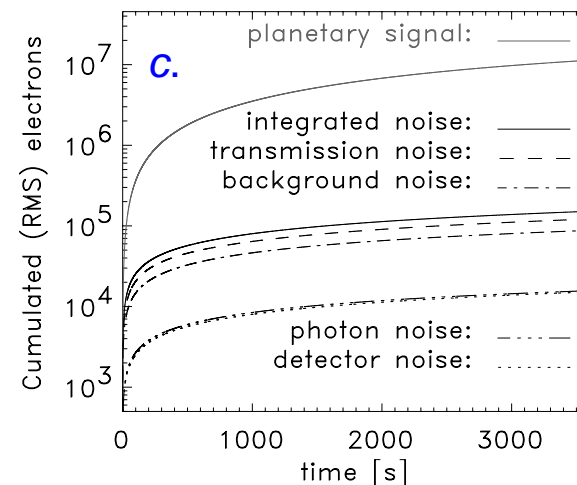
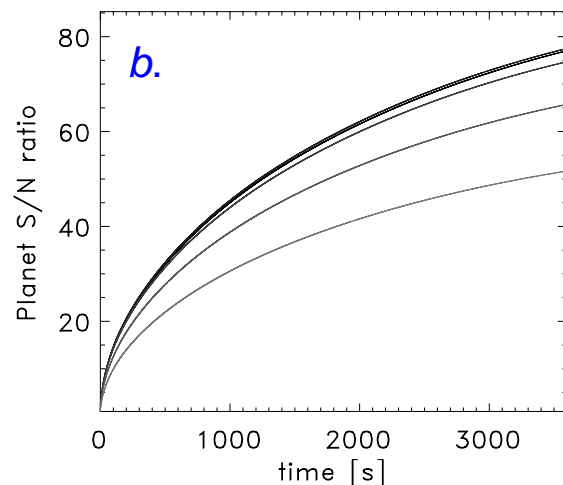
	Modèle	Ajusté	Erreur ( $1\sigma$ )
$L_d/L_s$	1.7e-4	1.694e-4	0.003e-4
$\alpha$	0.60	0.593	0.004
$r_{in}$ [AU]	0.5	0.4988	0.0006

# Exemple 2: Jupiters chauds

- Système tau Boo:
  - Tau Boo a: F7V, 17pc
  - Tau Boo b:  $\sim 1 R_{\text{jup}}$   
 $0.046 \text{ AU}$   
 $\sim 1600 \text{ K}$
  - Séparation: 3.2 mas



- Observations:
  - UT2-4 (89m), bande L'
  - Observation: 1h
  - $50 < \text{SNR} < 80$
  - Calibration des fuites stellaires: mieux que 1%



- Solutions envisagées: modulation d'OPD / calibration spectrale

# Exemple 3: étoiles non résolues

- Fuites stellaires très sensibles au diamètre
- Exemple:
  - Soleil à 100pc (0.09mas), base de 200m:  
fuites géométriques  $\sim 3e-4 \rightarrow$  mesurable!
  - Pas d'accès à l'assombrissement centre-bord
- Applications possibles:
  - Mesure de pulsations
    - Céphéides jusque qq kpc
    - delta Scuti jusque qq 100pc
    - ...
  - Binaires très serrées

# Perspectives Antarctiques

- Conditions atmosphériques exceptionnelles
- Principaux avantages pour GENIE:
  - Turbulence très lente
    - Améliore les performances de contrôle
    - Rend les systèmes de contrôle « faisables »
  - Fond de ciel peu brillant
    - Pas besoin de télescopes de 8m
  - Possibilité d'un interféromètre « dédié »
    - Choix d'une base optimisée (réduire fuites géométriques)
    - Aspects polarisation (réduire nombre de réflexions, ...)
- Long terme: exoterres KEOPS

	Dome C	Paranal
Fringe sensor freq [Hz]	1900	20000
RMS OPD [m]	4,86E-09	1,58E-08
Disp. sensor freq [Hz]	2	500
RMS inter-band [nm]	1,38E-09	8,39E-09
RMS intra-band [nm]	1,84E-09	1,99E-09
Intensity sensor freq [Hz]	--	1000
RMS intensity mism.	1,30E-02	1,41E-02
Mean total nulling (mes)	1,08E-03	2,12E-03
Mean instr. nulling (mes)	3,51E-05	2,30E-04
Null stability (10 sec)	3,96E-05	3,12E-04
<b># of zodis (SNR=5)</b>	<b>61</b>	<b>337</b>



## II. Le nulling dans l'espace



# Pégase: le contexte

## ➤ **CNES:**

- Mission démonstration vol formation (→ technologie)
- Appel à idées à la communauté pour une charge utile scientifique sur la mission
- Basé sur des technologies mini/micro-satellites
- 2 à 3 satellites « free flying »
- Date de lancement espérée: 2010-12
- Enveloppe: 150 – 200 M€

## ➤ **Buts CNES:**

- Préparation des futures grandes missions de vol en formation (LISA, Darwin, XEUS, ...)
- Objectifs militaires (observation de la Terre)

# Pégase: les partenaires

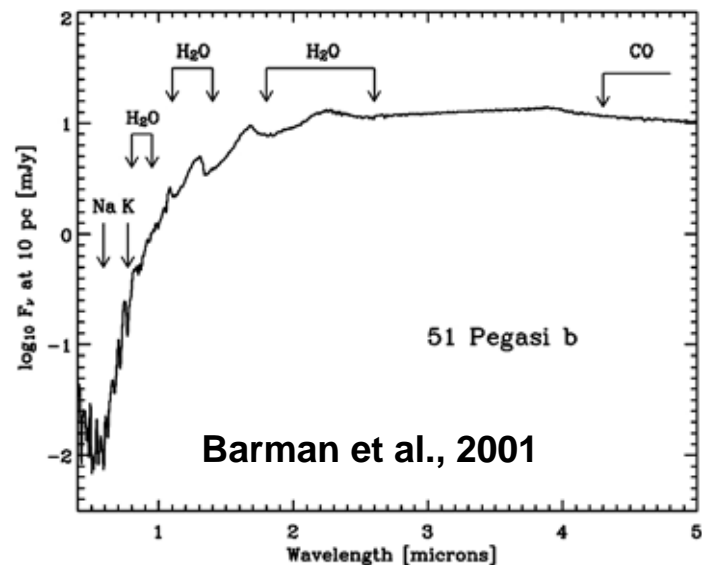
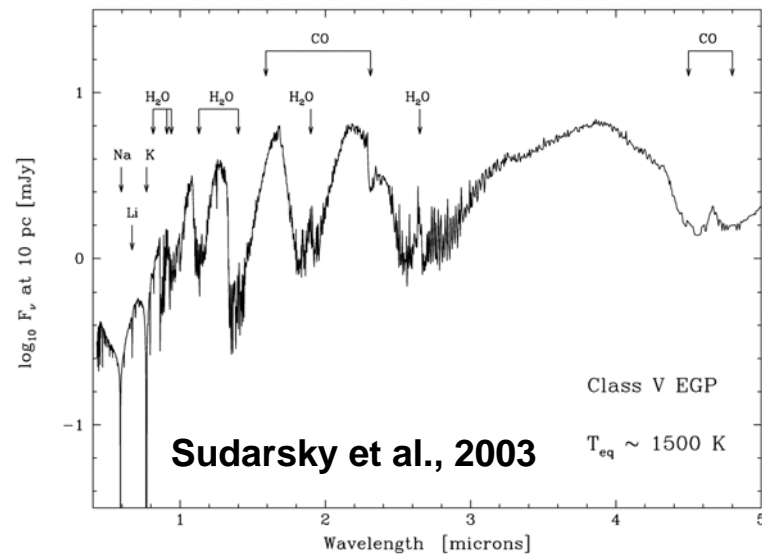
## ➤ Un consortium de labos français et européens

- ▶ **IAS Orsay**  
*A. Léger (PI), M. Ollivier...*
- ▶ **LESIA – Observatoire de Paris**  
*D. Rouan, A. Boccaletti, V. Coudé du Foresto...*
- ▶ **LUTH – Observatoire de Paris**  
*J. Schneider, D. Pelat...*
- ▶ **GEMINI – Observatoire de la Côte d'Azur**  
*D. Mourard, J. Gay, Y. Rabbia...*
- ▶ **ONERA**  
*G. Rousset, F. Cassaing...*
- ▶ **Université de Liège**  
*J. Surdej, O. Absil, P. Riaud...*
- ▶ **Alcatel Space – Cannes**  
*X. Leyre, E. Thomas...*
- ▶ **CRAL – ENS Lyon**  
*F. Allard, I. Baraffe...*
- ▶ **LAOG – Observatoire de Grenoble**  
*F. Malbet, C. Dougados, E. Herwats, ...*
- ▶ **Observatoire de Genève**  
*S. Udry*
- ▶ **Instituto des Astrofisica de Canarias**  
*M. Edouardo*

+ collaborations possibles avec ESA (SMART 3) / JPL (StarLight) ???

# Objectif principal: Pégasides

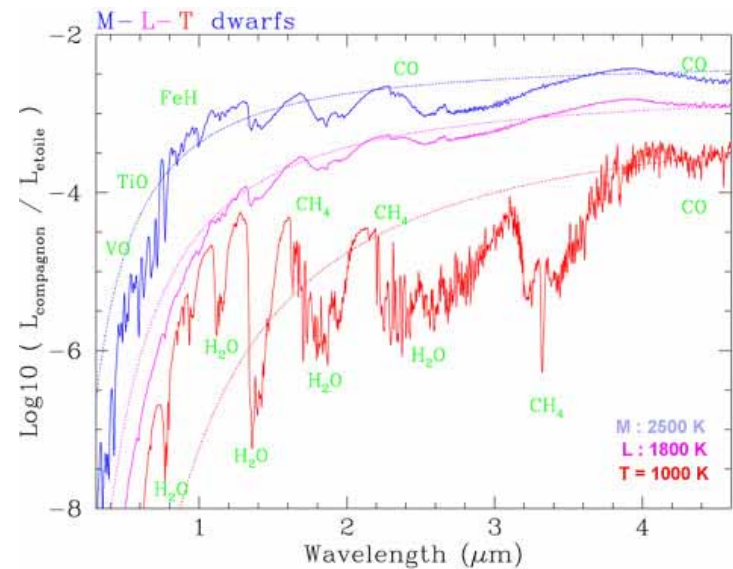
- On connaît actuellement:
  - $M \sin i$
  - Demi grand axe + excentricité
  - Période + éphémérides
- On aimerait connaître:
  - Paramètres physiques (structure)
    - Masse ( $\sin i$ ) et rayon
  - Atmosphère ?
    - Composition
    - Irradiation, mécanismes chauffage
    - Thermalisation
    - Nuages, dynamique
- Besoins
  - Spectroscopie
    - 1.5 $\mu\text{m}$  à 5 $\mu\text{m}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ )
  - Haute résolution
    - 1 mas  $\rightarrow$  300m @ 3  $\mu\text{m}$
  - Haute dynamique
    - $10^3$  à  $10^5$   $\rightarrow$  nulling



# Autres objectifs

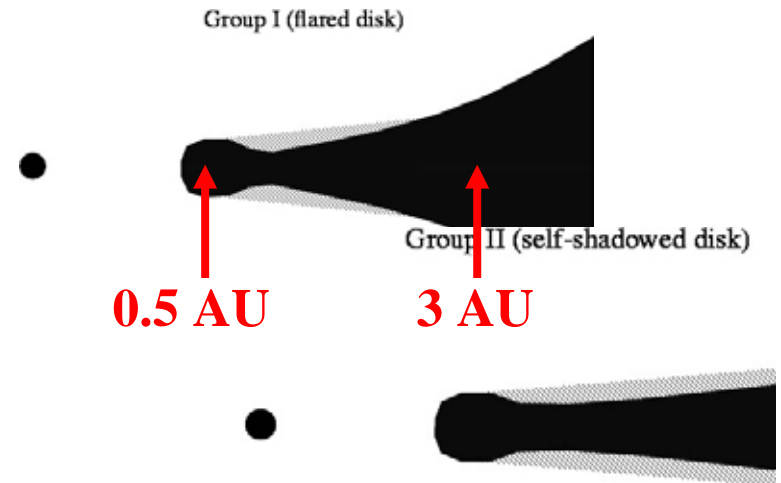
## ➤ Naines brunes

- Processus de formation et structure interne?
- Étude de système liés pour avoir accès à la masse
- Évolution avec l'âge
- Spectro IR →  $T_{\text{eff}}$  et rayon
- Physique atmosphérique
- 5 cibles déjà identifiées

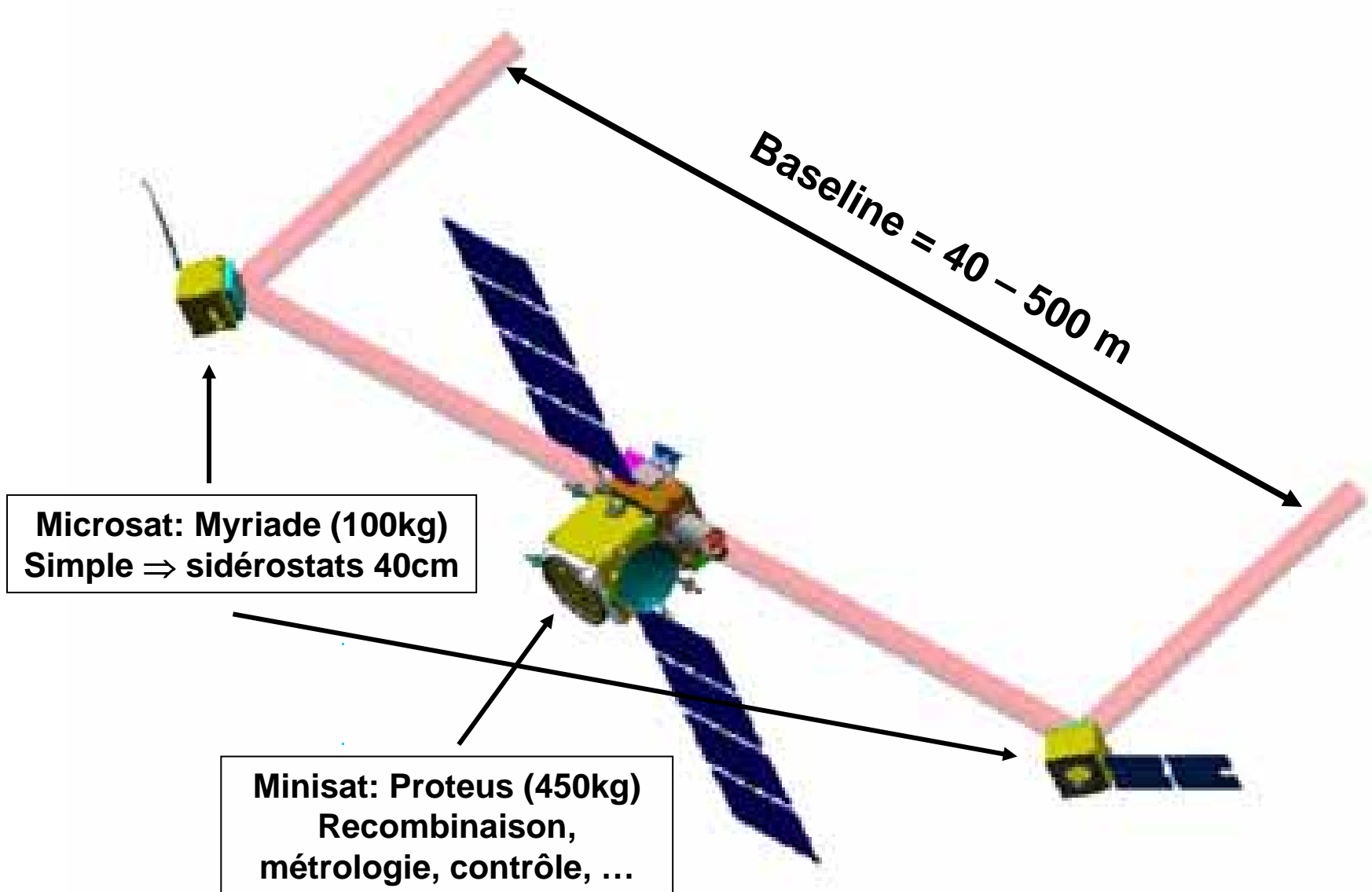


## ➤ Disques circumstellaires

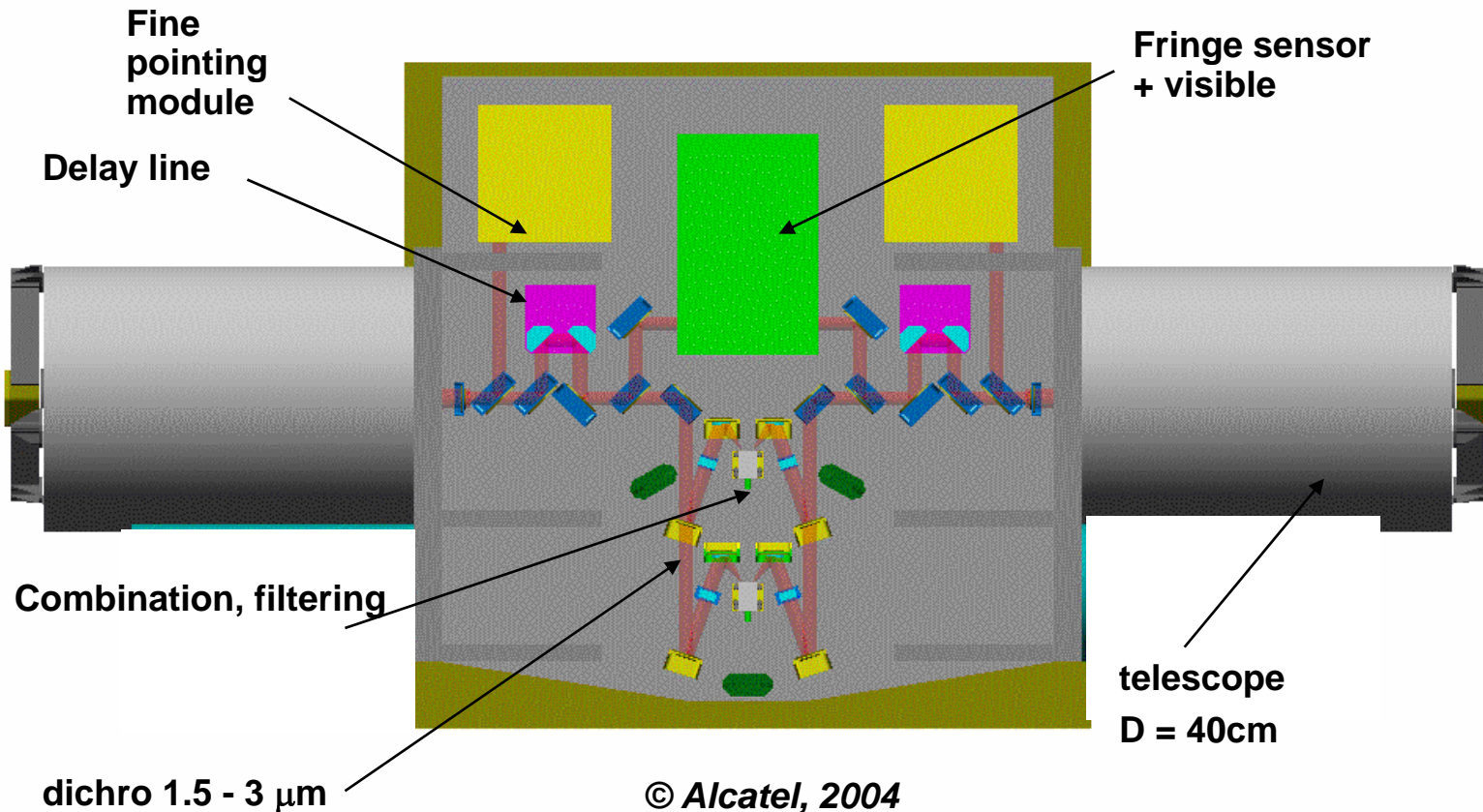
- Zone interne
- Interactions disque – étoile
- Gaps (cf. Emilie)



# Configuration de vol



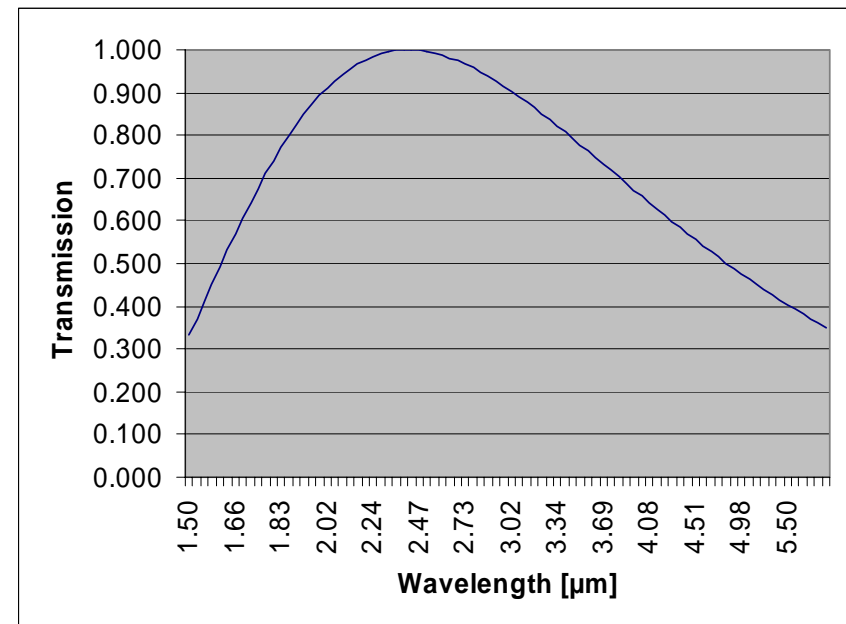
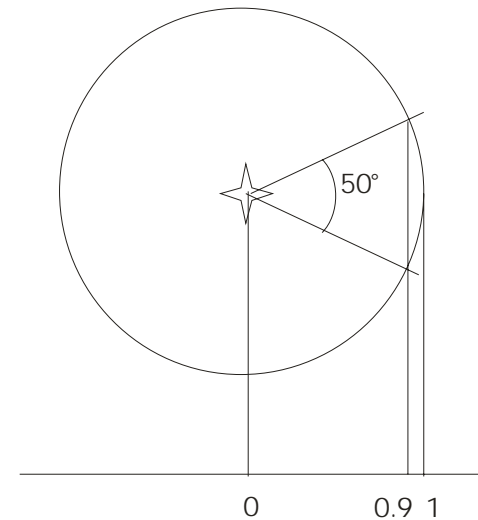
# Bus PROTEUS



- Suiveur de franges:  $\sim 2.5$  nm
- Tip-tilt:  $\sim 40$  mas RMS
- Temp. optiques:  $\sim 100 \pm 1$  K
- Voie infrarouge nulling +  $V^2$
- Possibilité de voie visible (couplée au fringe tracker?)

# Procédure d'observation

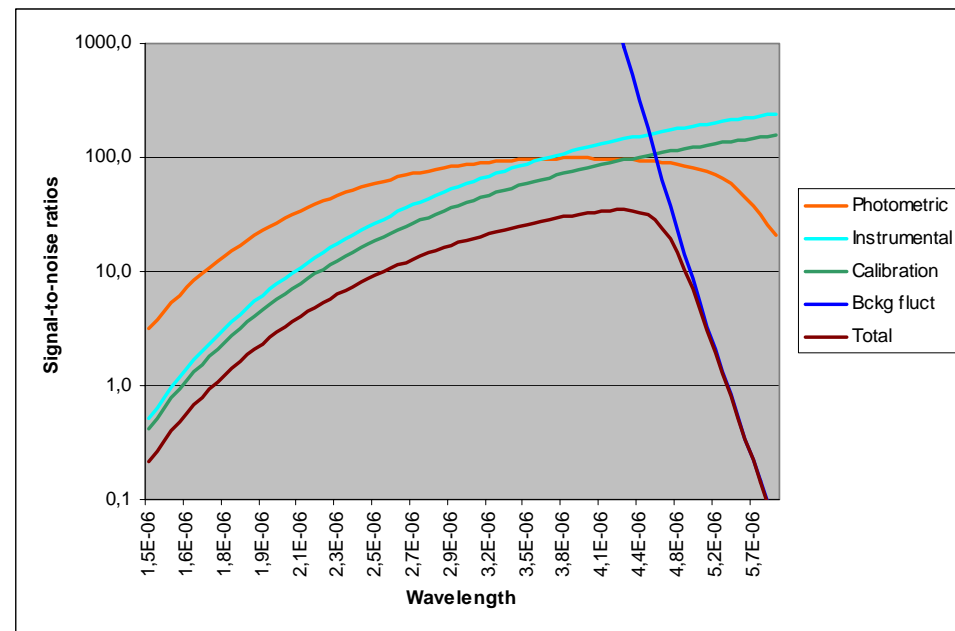
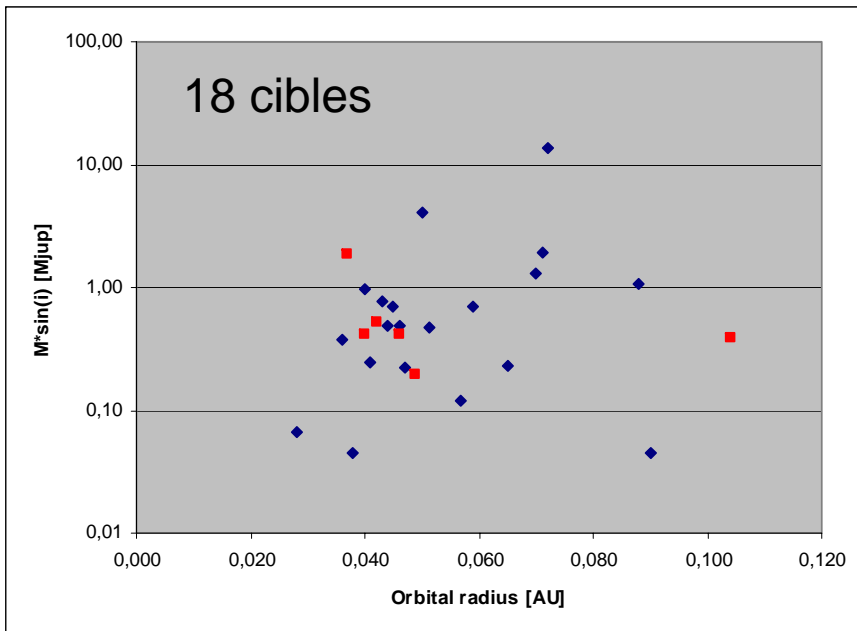
- Observation à élongation max
  - Réduire la taille de la base
  - Minimiser fuites stellaires
  - ~10h d'observations
  - Détection des phases
  - Minimiser manœuvres
- 1 (ou 2) bases
- 3 orientations
- Pas de calibration sur étoile de référence
  - Demande grande stabilité instrumentale





# Perfos: détection de Pégasides

- Simu rayonnement thermique et réfléchi (albédo 0.1)
- Spectre de corps noir (énergie IR totale OK)
- Exemple: HD209458b en 10h de pose
- SNR > 10 pour R=60 sur la bande 2.5 – 4.9  $\mu\text{m}$
- Calibration optimiste (0.3% sur diamètre)



# Conclusions et perspectives

- 1ère étape: nulling sol
  - Démonstration technique et technologique
  - Difficultés assez similaires à celles de Darwin:
    - Fond thermique
    - Contrôle OPD, tip-tilt (dispersion, intensité)
    - Réduction données, ...
  - Survey des exozodi autour des cibles Darwin
  - « General user instrument »
- 2ème étape: nulling espace
  - Vol en formation et opération simultanée d'un nuller
    - Acquisition des franges
    - Lignes à retard spatiales, ...
  - Détection et spectro de Jupiters chauds
  - Naines brunes, disques, ...
- 3ème étape: DARWIN (Cosmic Vision 2020)