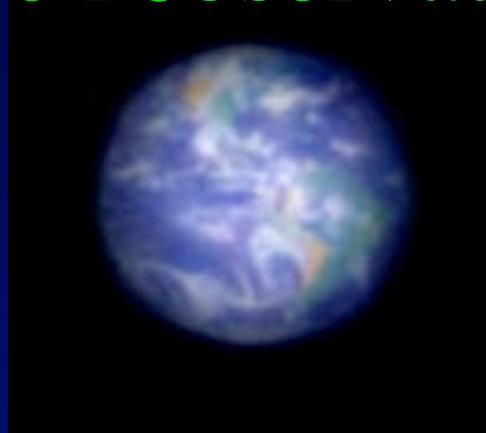


Collège de France

Chaire d 'Astrophysique Observationnelle

# Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- Cours à Paris les mercredis du 31 Mars au 26 Mai
- Détails sur [www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html)
- les fichiers des projections 2001-2002 et 2003-2004 sont affichés sur [www.oamp.fr/lise](http://www.oamp.fr/lise)

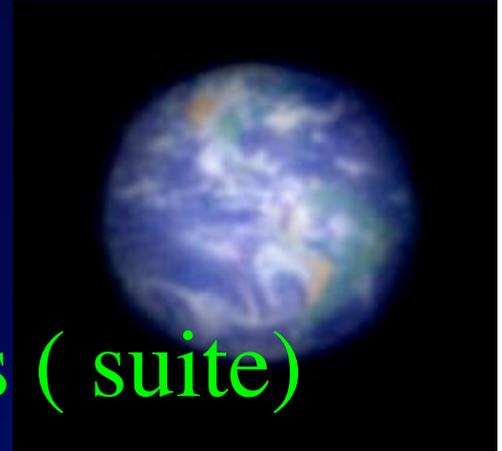
# Programme

affiché sur: [www.college-de-france.fr/](http://www.college-de-france.fr/)

- 19 Mai :
  - Mise en cohérence et en phase des interféromètres et hypertélescopes: la méthode des tavelures dispersées
  - Séminaire: Pierre Kervella, Observatoire Européen Austral "Premières observations de Céphéides avec l'interféromètre du VLT »
- 26 Mai
  - Mise en cohérence et en phase des interféromètres et hypertélescopes: la méthode des tavelures dispersées ( suite)
  - Séminaire: à préciser

Aujourd'hui :

Mise en cohérence et en phase des  
interféromètres et hypertélescopes:  
la méthode des tavelures dispersées ( suite)



Séminaire à 17h30: Premières interférences  
avec l'hypertélescope prototype Carlina

# ESO: Overwhelmingly Large telescope (OWL)

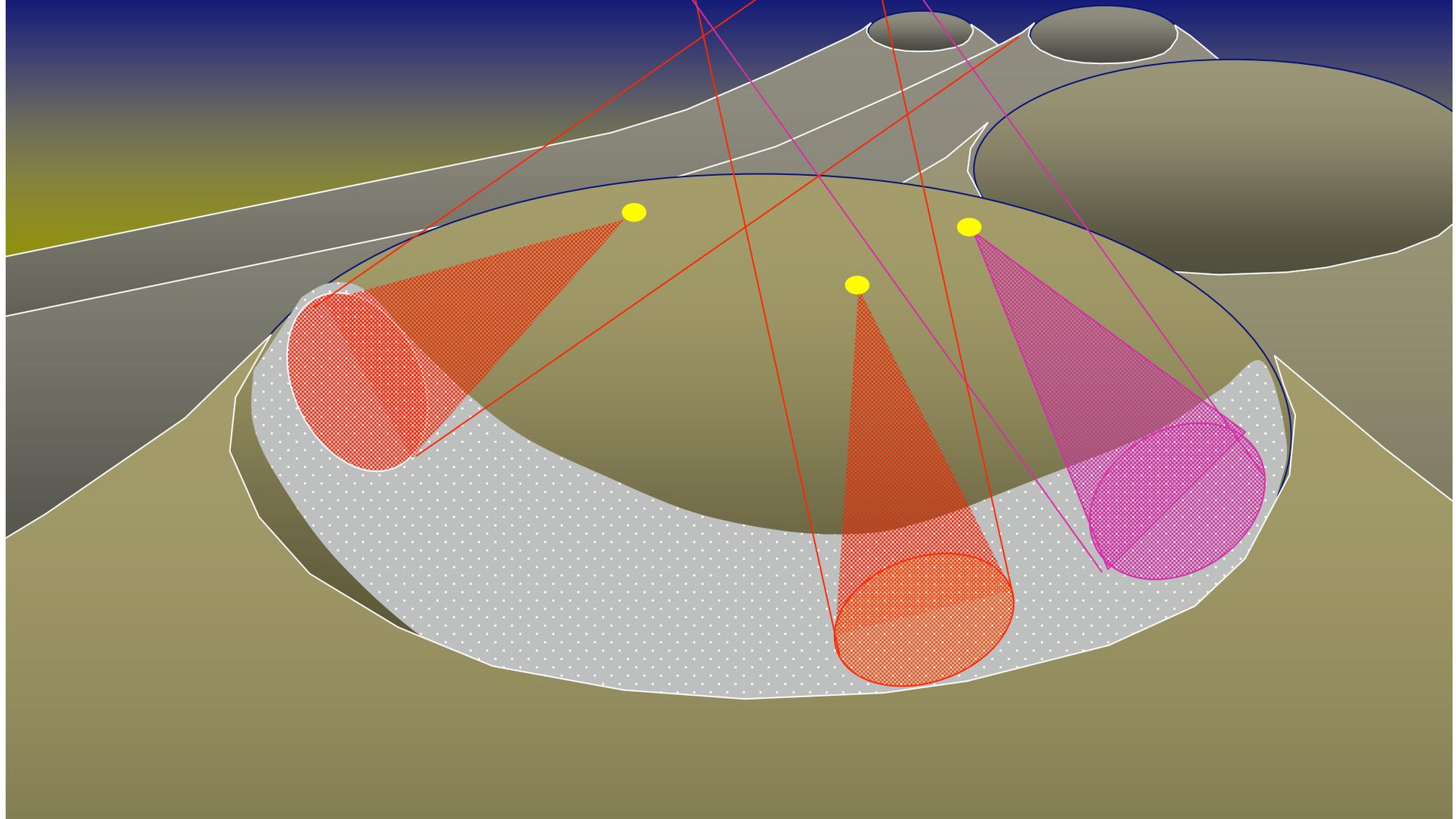
- Diamètre 100 m, surface 7 000 m<sup>2</sup>
- Magnitude 35 à 38, avec optique adaptative
- Étude en cours



# hypertelescope CARLINA kilometrique

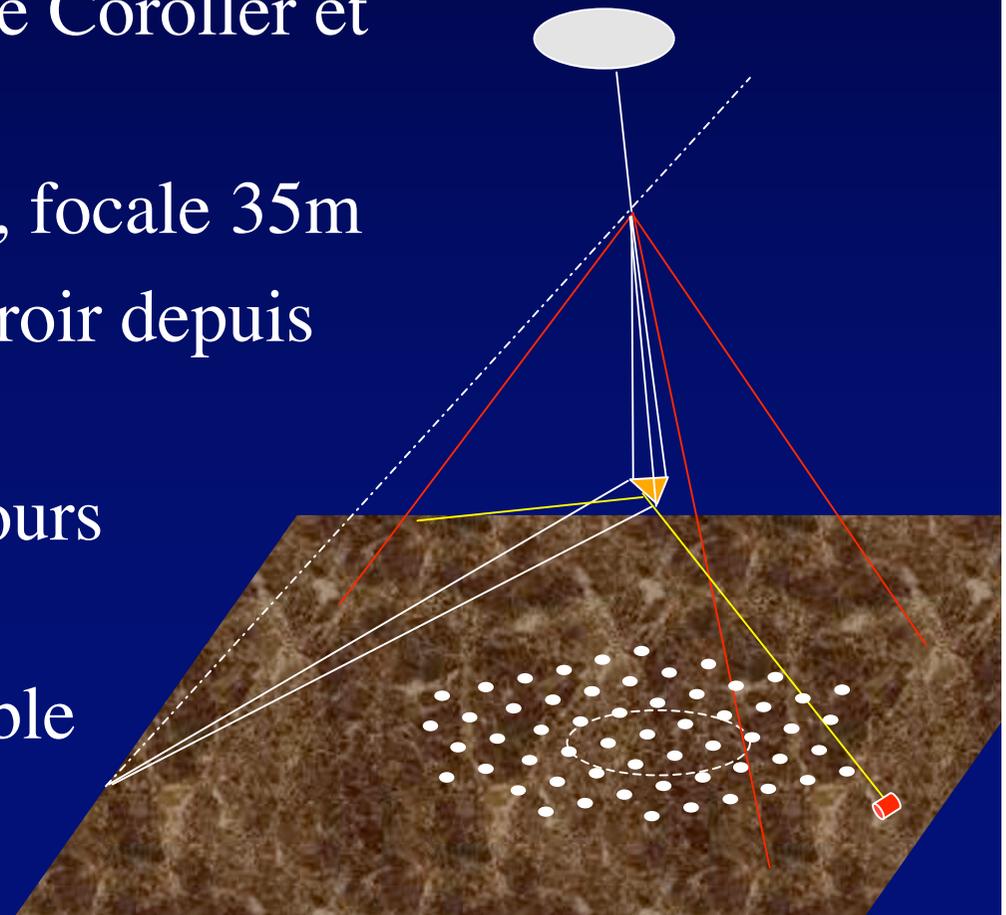
10,000 miroirs de 1m, étalés sur 5 km

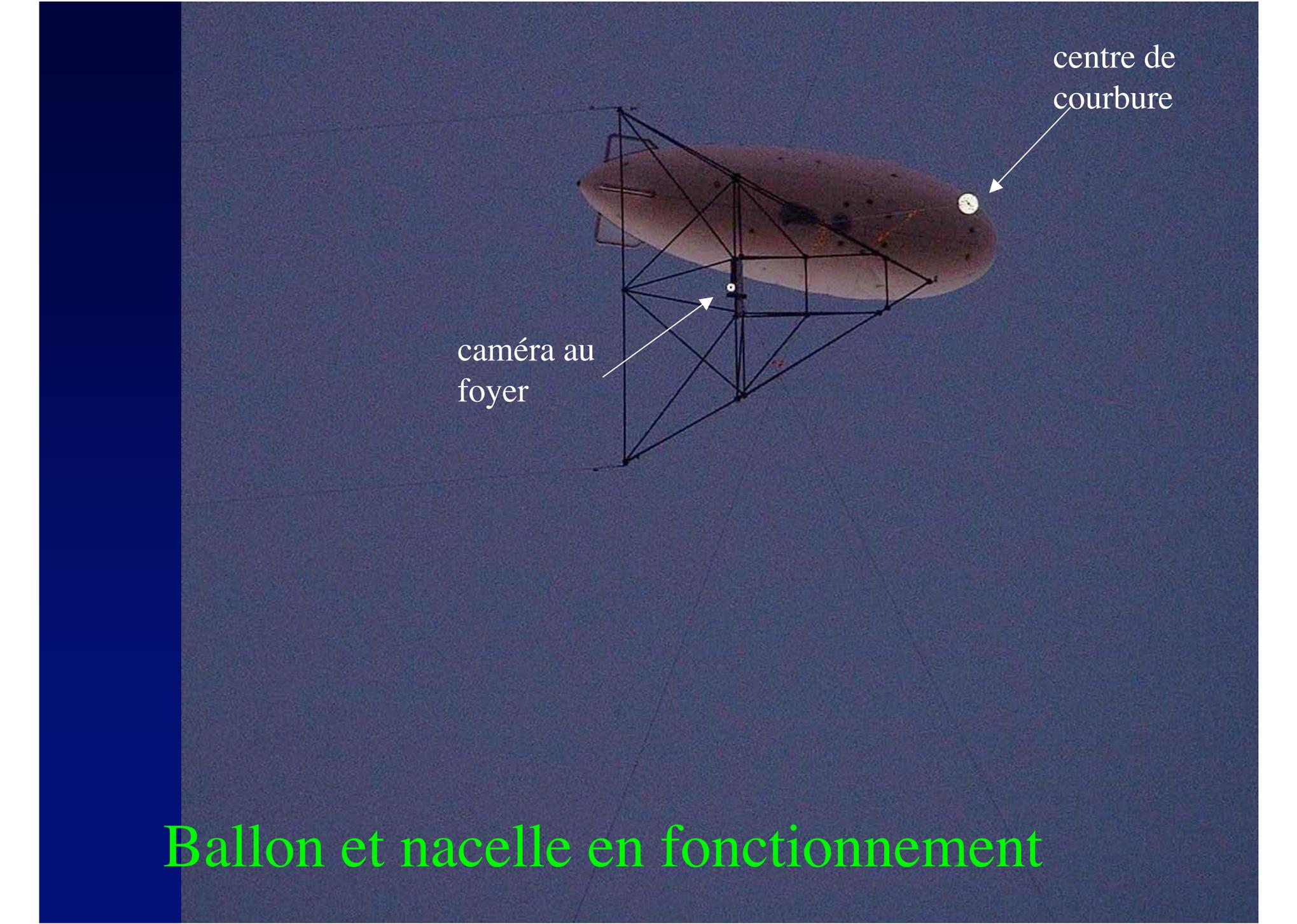
Imagerie mag. 38, cosmologie



# Prototype Carlina à l'Observatoire de Haute Provence

- Étudié et construit en 2 ans par H. Le Coroller et J. Dejonghe ( Le Coroller et al., A&A 2004)
- Ouverture diluée de 17,5 m, focale 35m
- Fonctionne avec un seul miroir depuis 3/2004
- Éléments additionnels en cours d'installation
- Déménageable et extrapolable



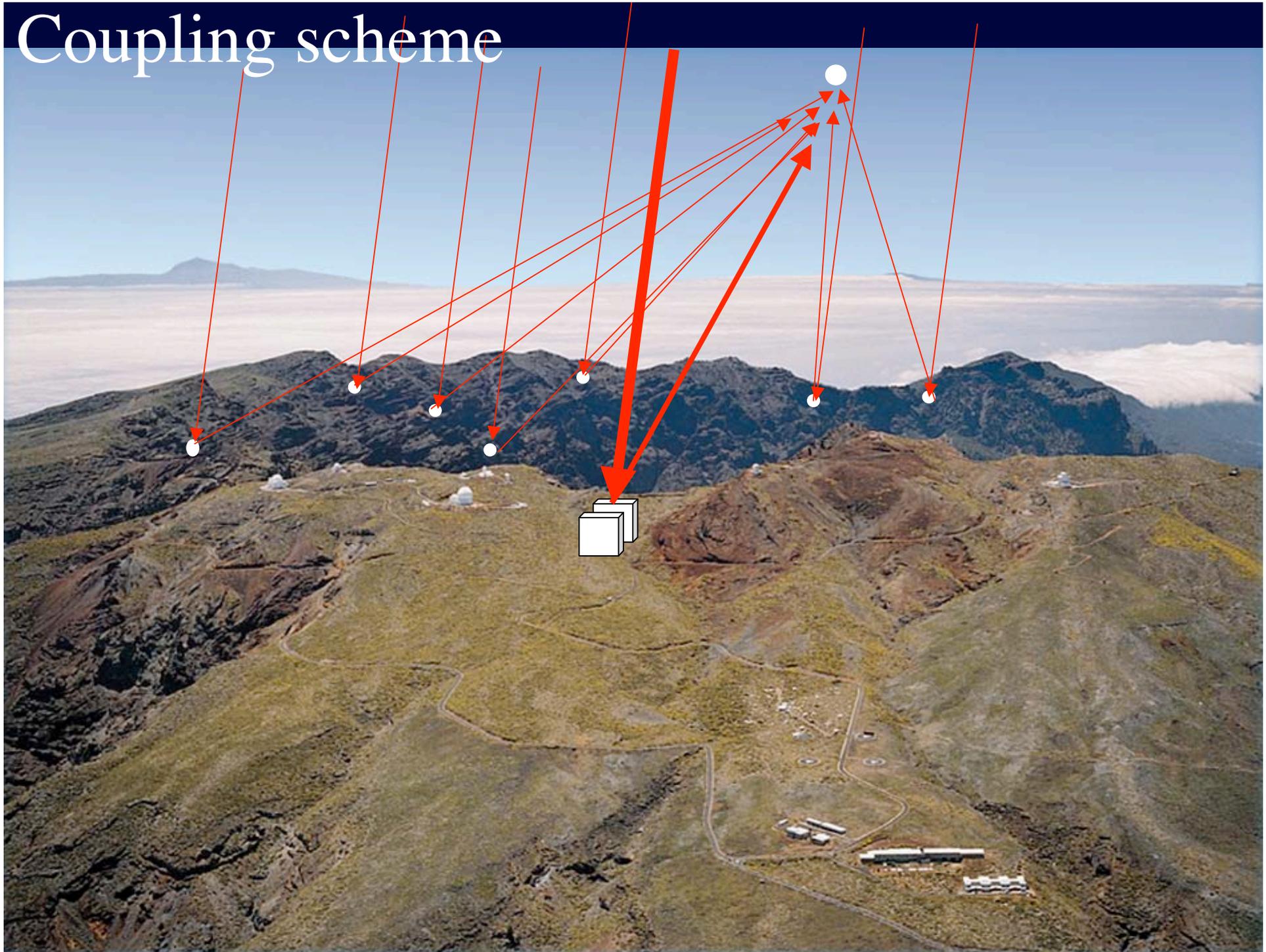


caméra au  
foyer

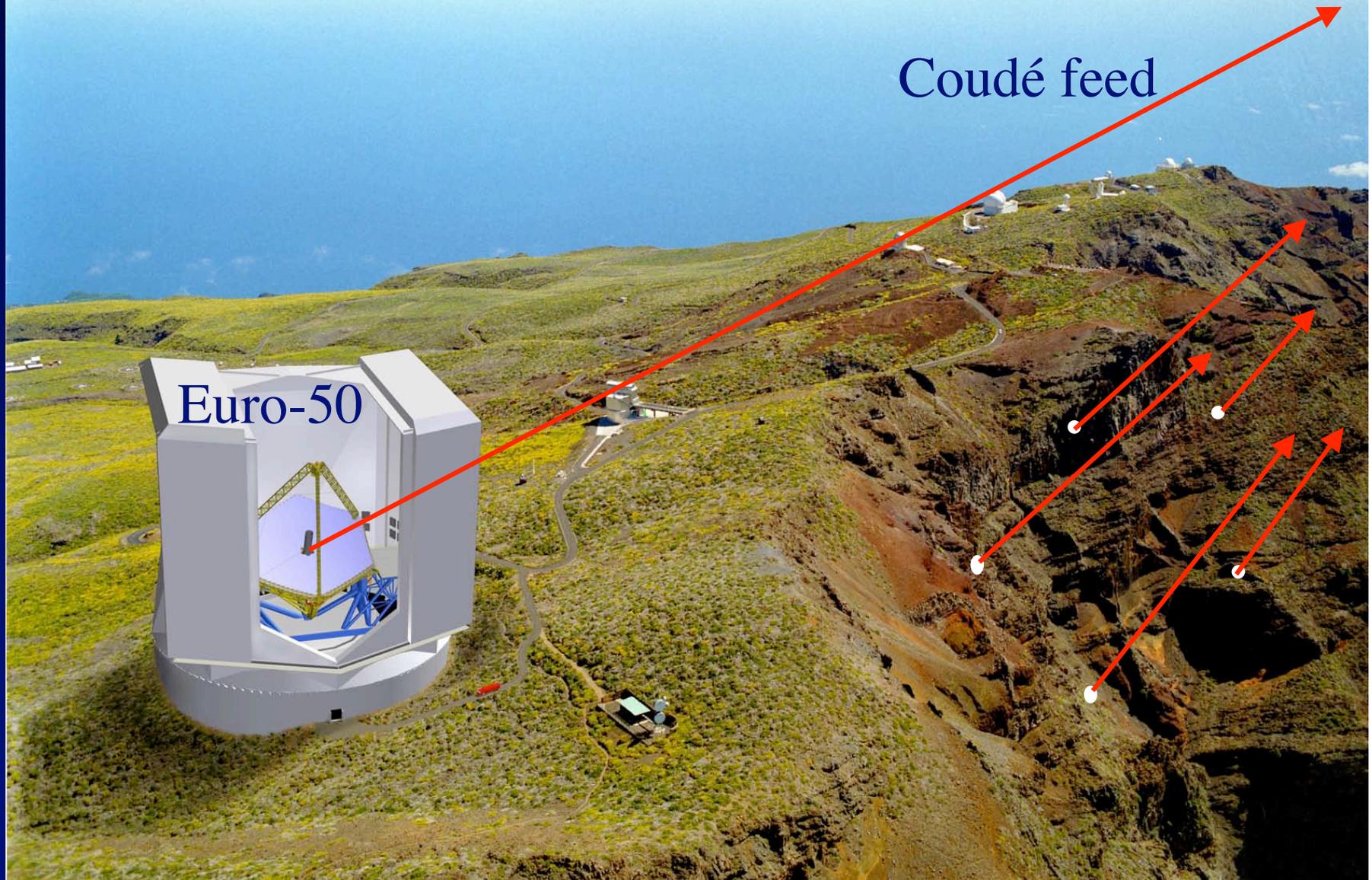
centre de  
courbure

Ballon et nacelle en fonctionnement

# Coupling scheme



# Roque de las Muchachos, Canarias



# Exo-Earth Discoverer:

a hypertelescope version proposed for DARWIN/TPF

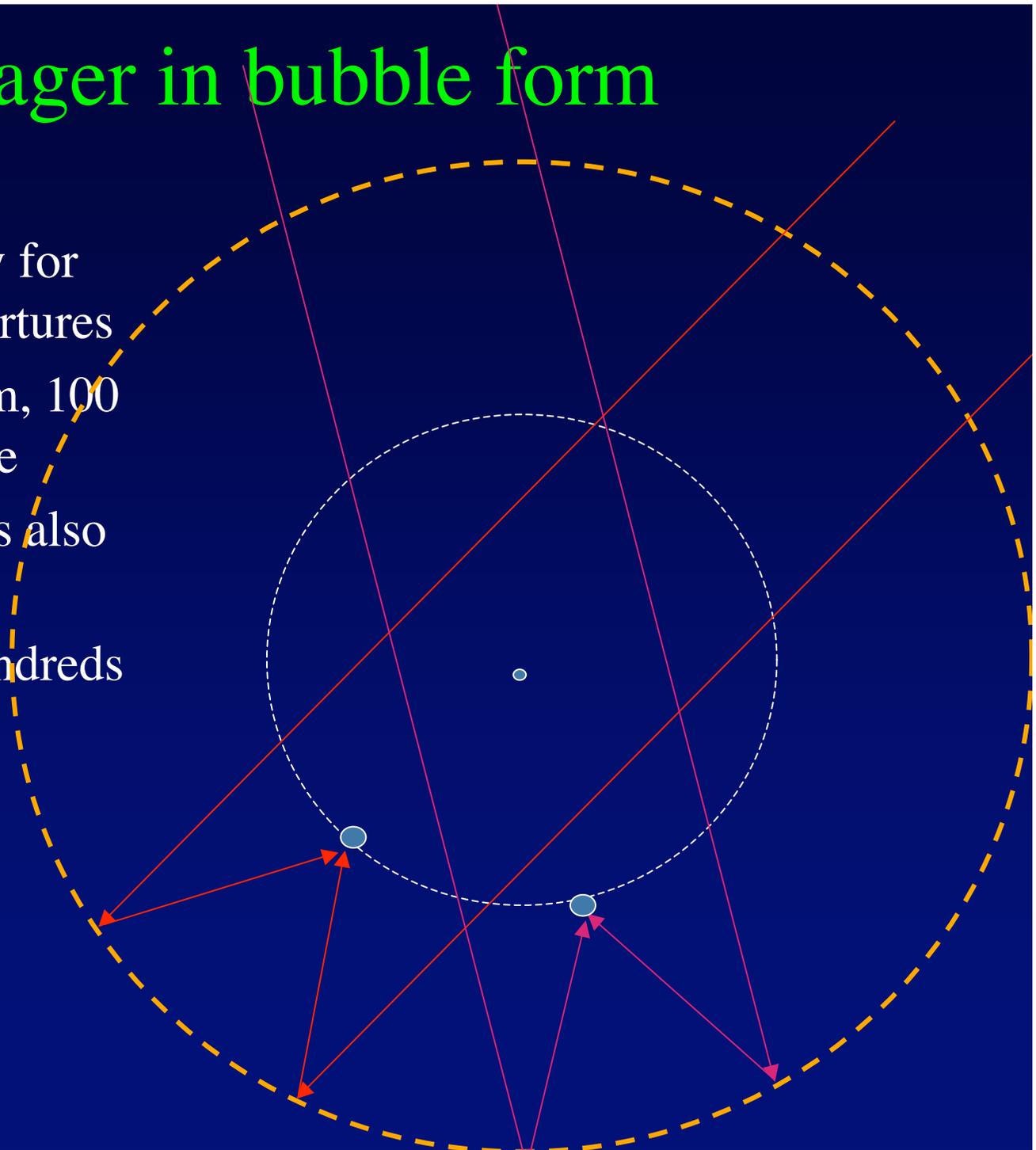
100 -1000m flotilla of 37 mirrors, 0.8m size



artist concept by Boeing /SVS

# Exo-Earth Imager in bubble form

- 400 km bubble array for 100km effective apertures
- 10,000 mirrors of 3m, 100 per effective aperture
- 1-km diluted flotillas also as focal correctors
- Static observing, hundreds of exo-Earths simultaneously



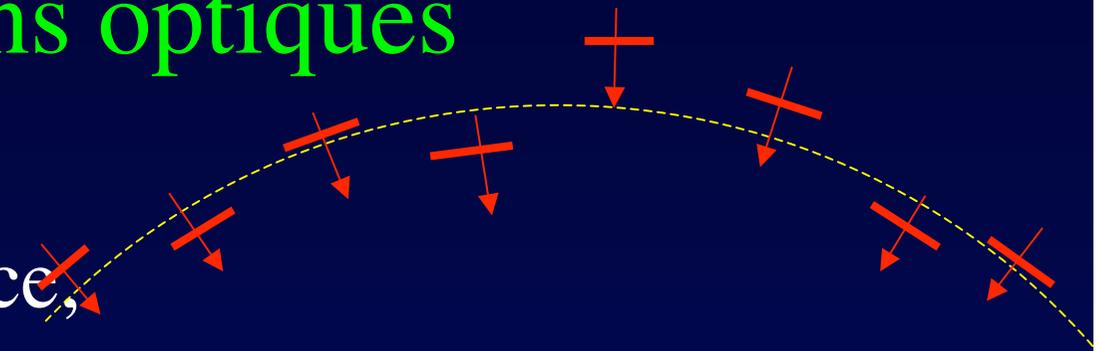
## Il faut mesurer les erreurs de piston ...

- Le senseur de Shack-Hartmann le fait pour une onde continue...
  - ...en cartographiant les pentes locales des bosses
- Le senseur de courbure ( Roddier ) le fait aussi pour une onde continue...
  - ... en cartographiant la courbure locale
- Mais cela ne mesure pas les marches d 'escalier.... dans les interféromètres

# Égaliser les chemins optiques

- Essentiel pour:

- mettre en cohérence,  
et ainsi obtenir les interférences
- mettre en phase: tache d'Airy



- Tolérances:

- $\lambda^2 / \Delta\lambda$  pour cohérence
- $\lambda/4$  pour mise en phase
- $\lambda/1000$  ou  $\lambda/5000$  pour coronographie exo-planétaire
- $\lambda/10$  pour coronographie exo-planétaire avec



## Une solution:

### étendre le principe des franges dispersées

- Utilisé par Michelson avec deux ouvertures
- Informatisé par L.Koechlin au « Grand Interféromètre à 2 Télescopes » ( GI2T)
- Utilisable pour  $N$  ouvertures par paires
- Ou avec une hiérarchie de triplets ( Pedretti et al, 1999)
- Extension à  $N$  ouvertures globalement étudiée par V.Borkowski ( thèse le 3 Juin ) et F.Martinache

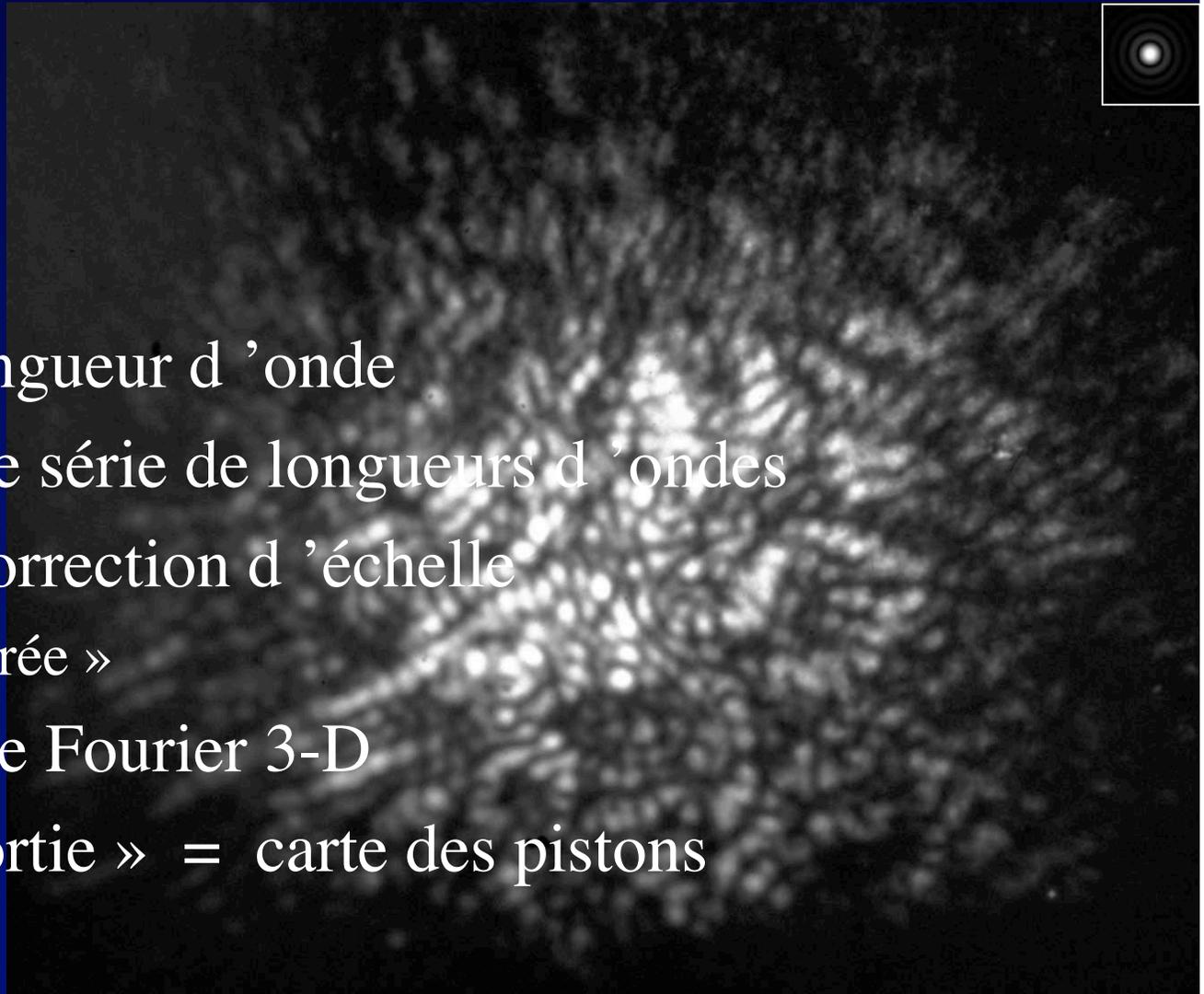
# Méthode des tavelures dispersées: principe

- Image tavelée
- Fonction de la longueur d 'onde
- Enregistrées à une série de longueurs d 'ondes
- Empilées après correction d 'échelle
  - => « cube d 'entrée »
- Transformation de Fourier 3-D
- => « cube de sortie » = carte des pistons
- a

# Méthode des tavelures dispersées: principe

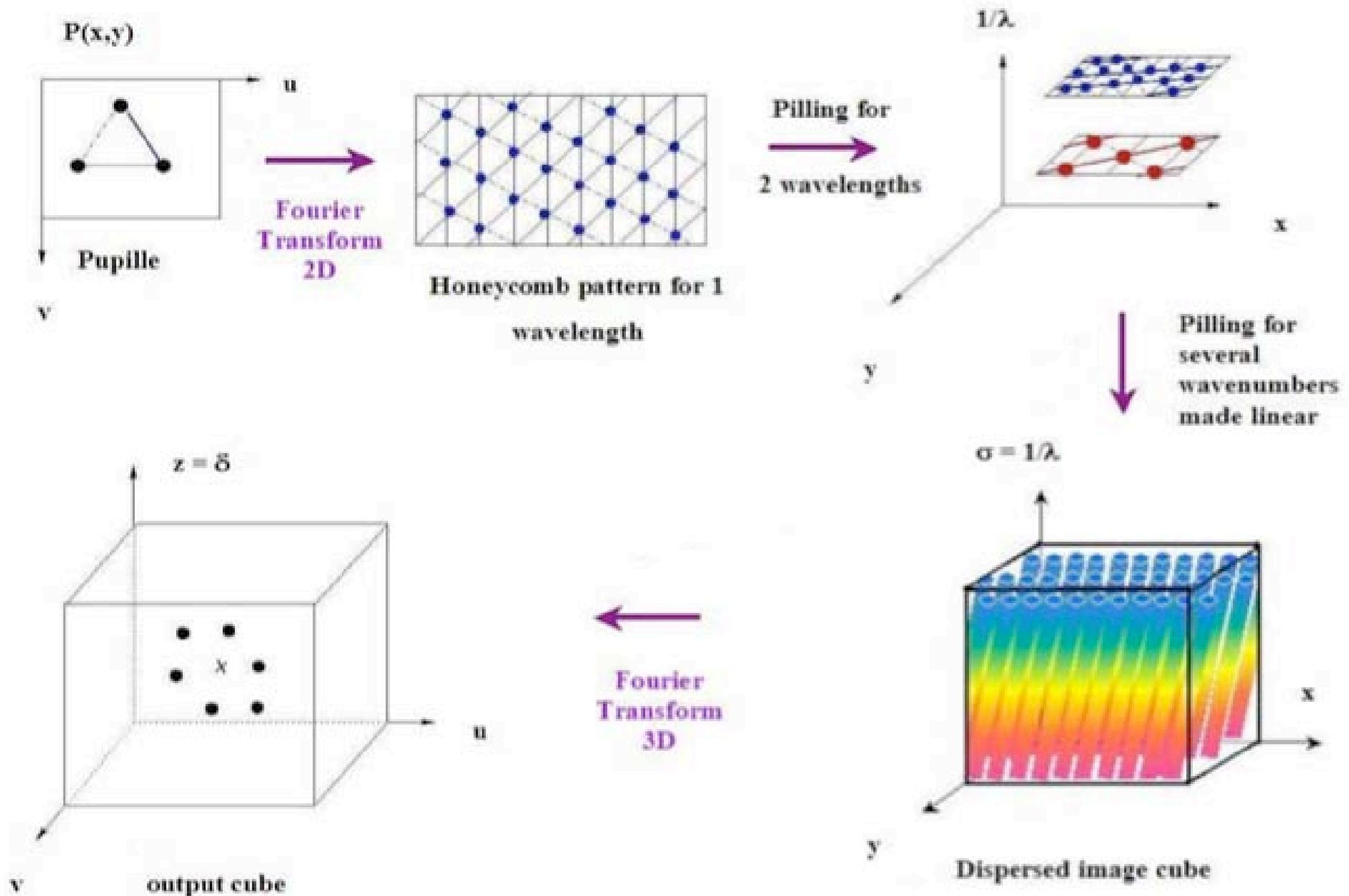
Tache  
d'Airy

- Image tavelée
- Fonction de la longueur d'onde
- Enregistrées à une série de longueurs d'ondes
- Empilées après correction d'échelle
  - => « cube d'entrée »
- Transformation de Fourier 3-D
- => « cube de sortie » = carte des pistons



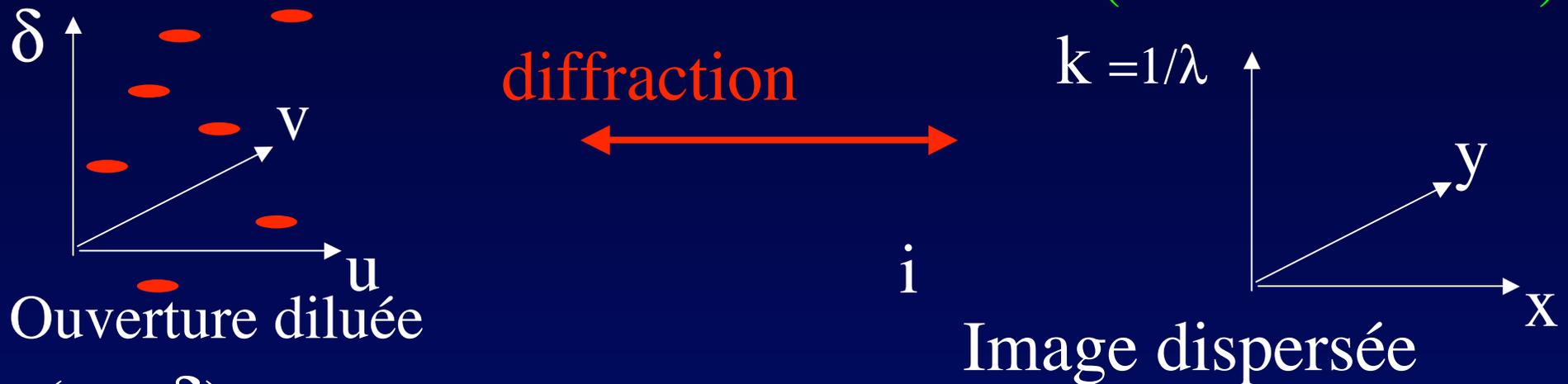
# Principe ( dessin V. Borkowski)

V. Borkowski, A. Labeyrie, F. Martinache and D. Peterson



# Formalisme des « tavelures dispersées »

(Martinache 2004)



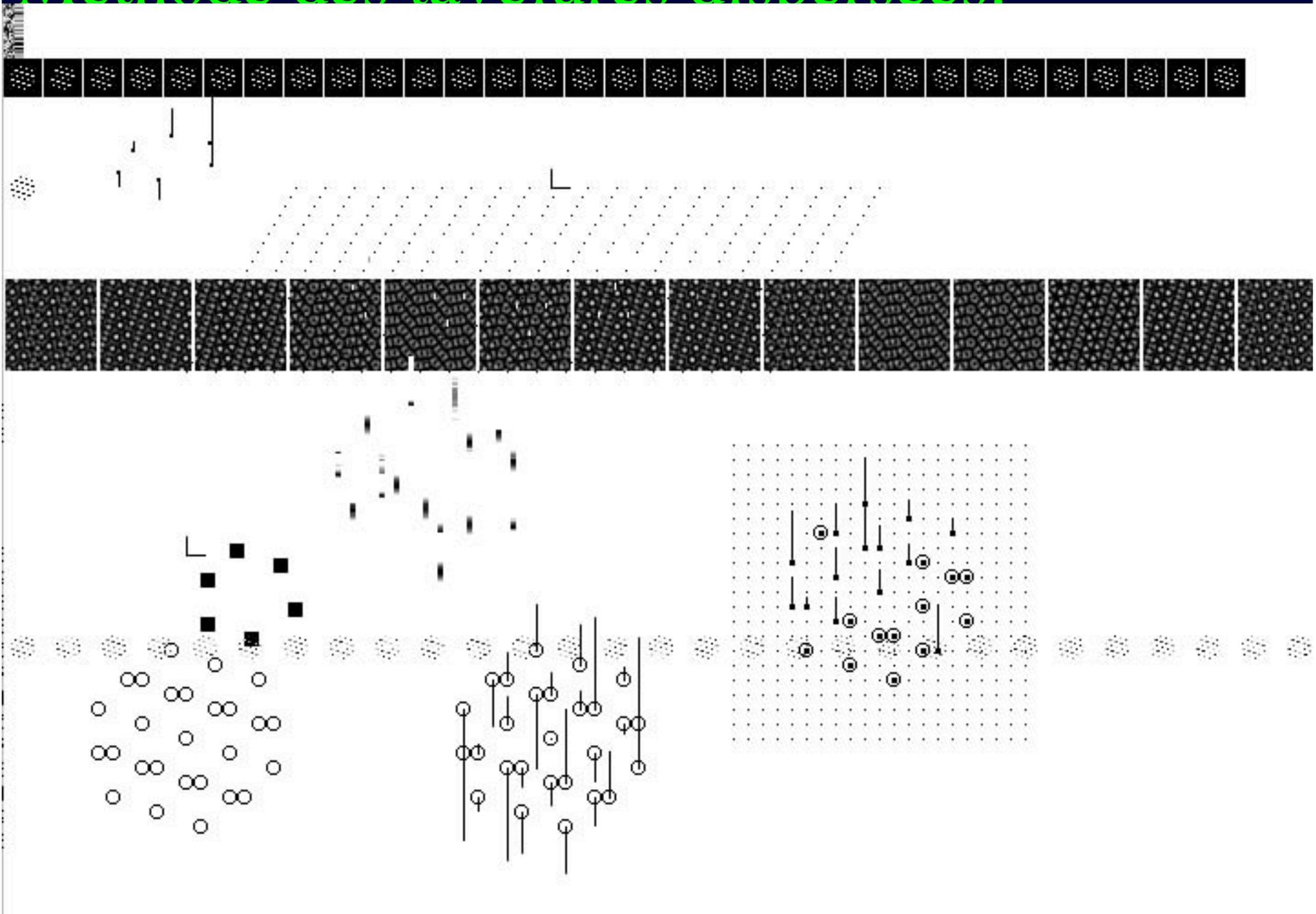
$$I(x, y, k) = |TF|^2[\tau(u, v, \delta)]$$

- La TF de l'image dispersée est l'autocorrelation de  $\tau(u, v, \delta)$ , tridimensionnelle
- Inversible pour calculer  $\delta(u, v)$  si :
  - Ouverture non redondante

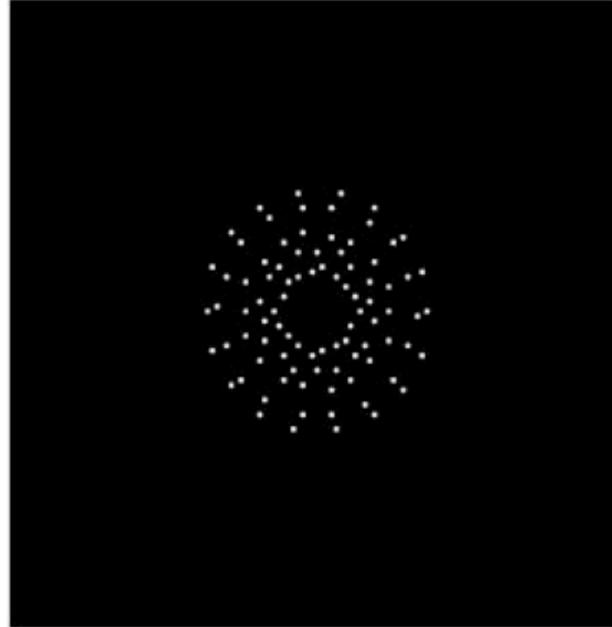
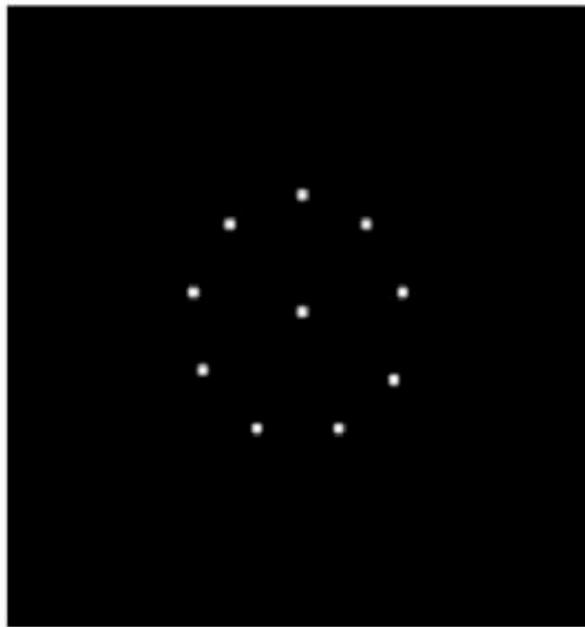
# Exploitation du cube de sortie

- Pic(s) dans chaque colonne
- Indique(nt) erreur(s) de piston pour chaque paire d'ouverture

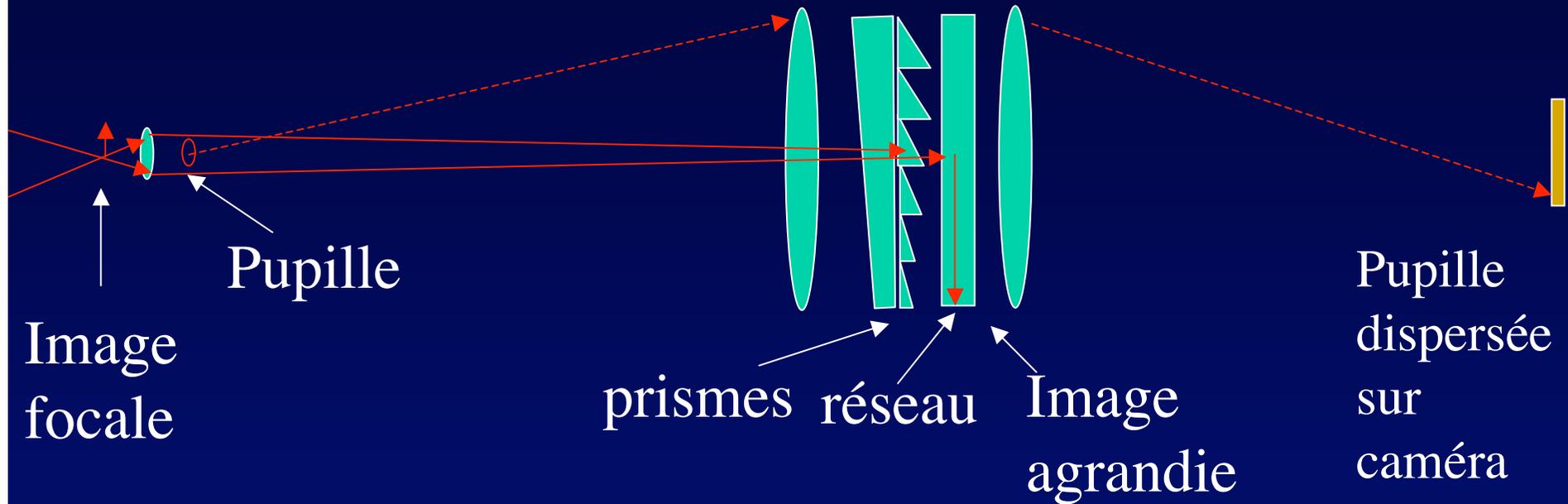
# Méthode des tavelures dispersées:



# Ouverture autocorrélée



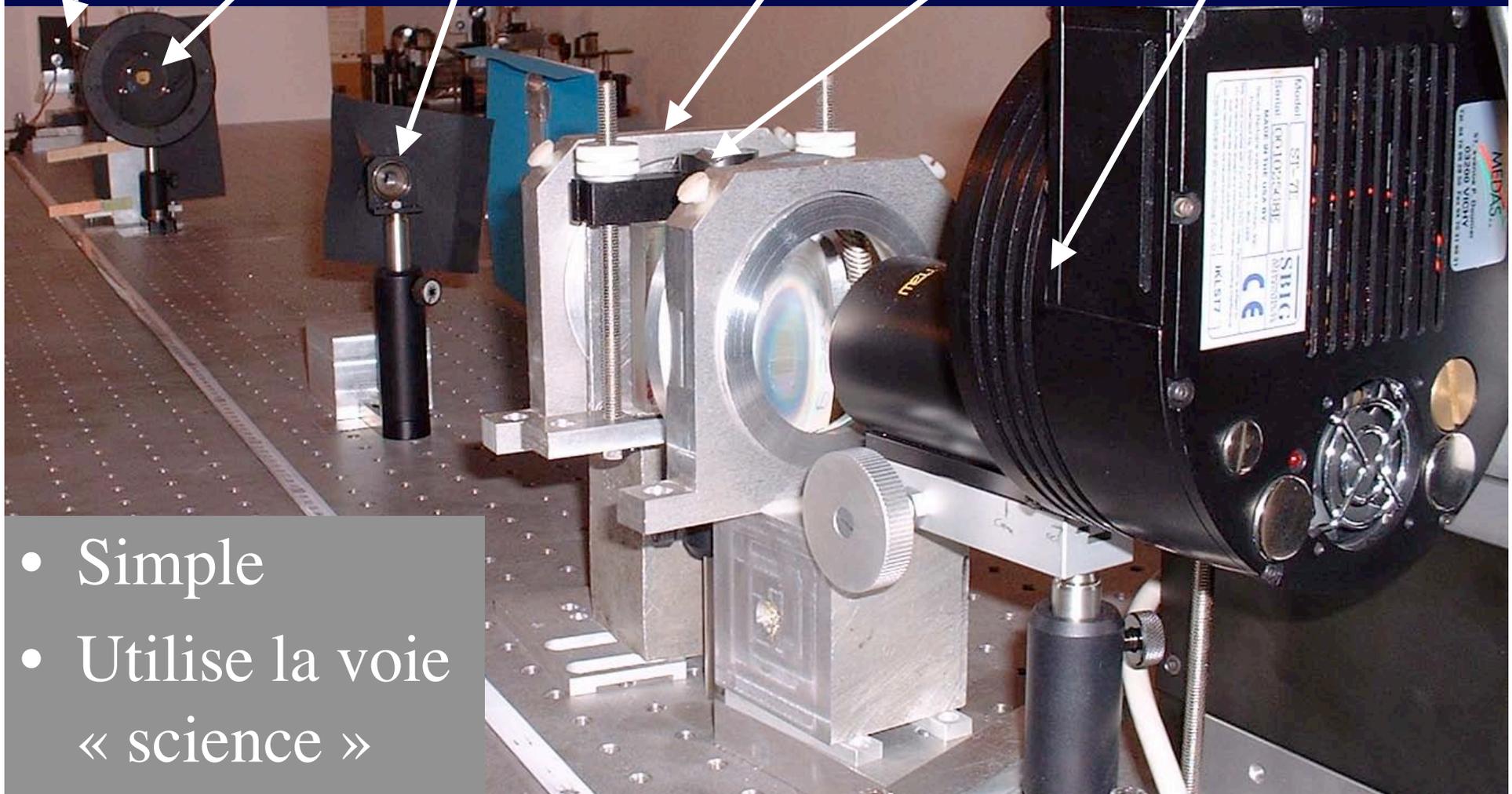
# L 'instrument : un « spectrographe éclateur »



- Spectre de la pupille éclaté par trame de prismes
- => un spectre pour chaque speckle
- Cube d 'entrée mis en forme dans l 'ordinateur

# Disperseur de tavelures (« speckle disperser »)

Étoile artificielle    Ouverture multiple    Objectif microscope    Multi-prisme    réseau    caméra

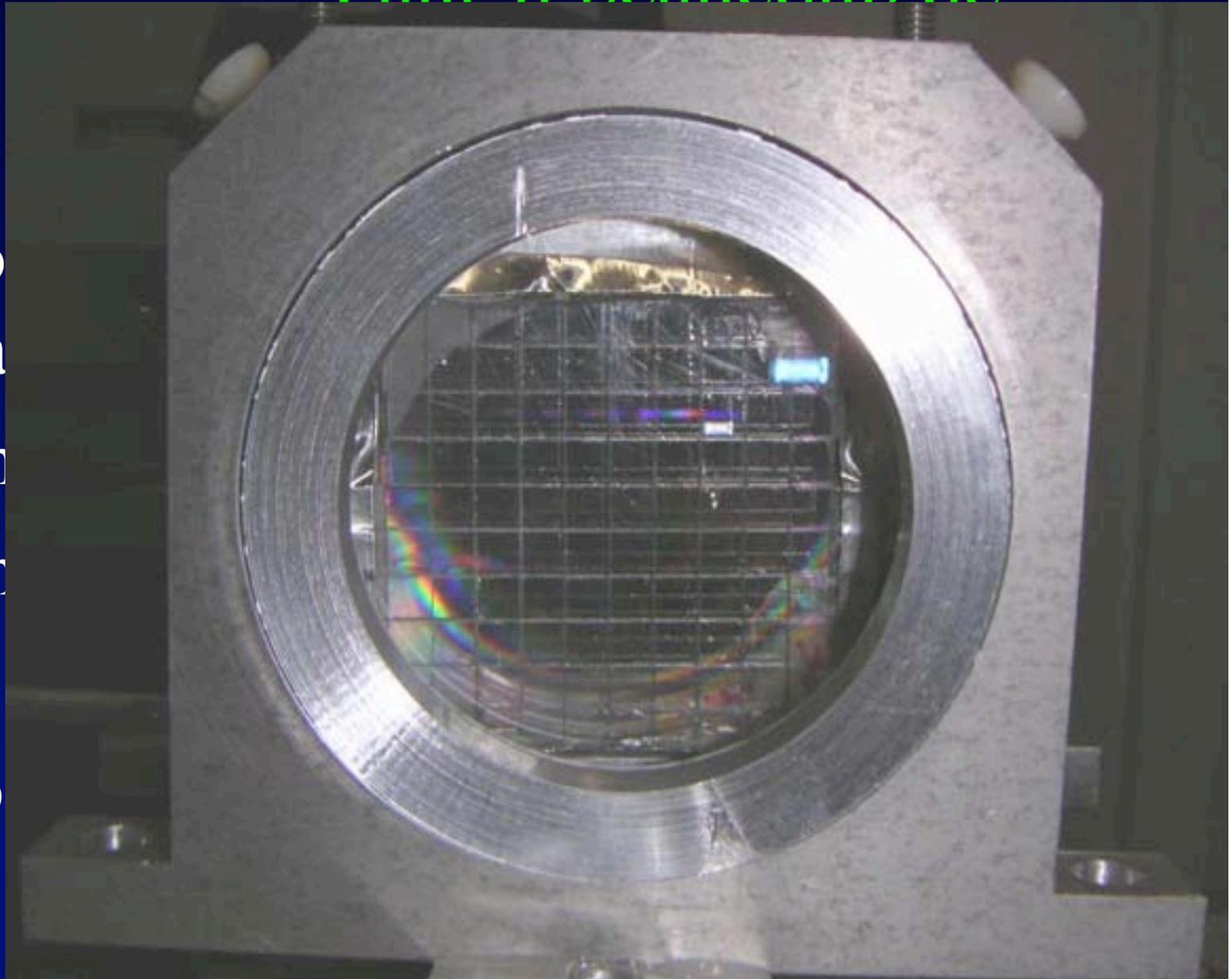


- Simple
- Utilise la voie « science »

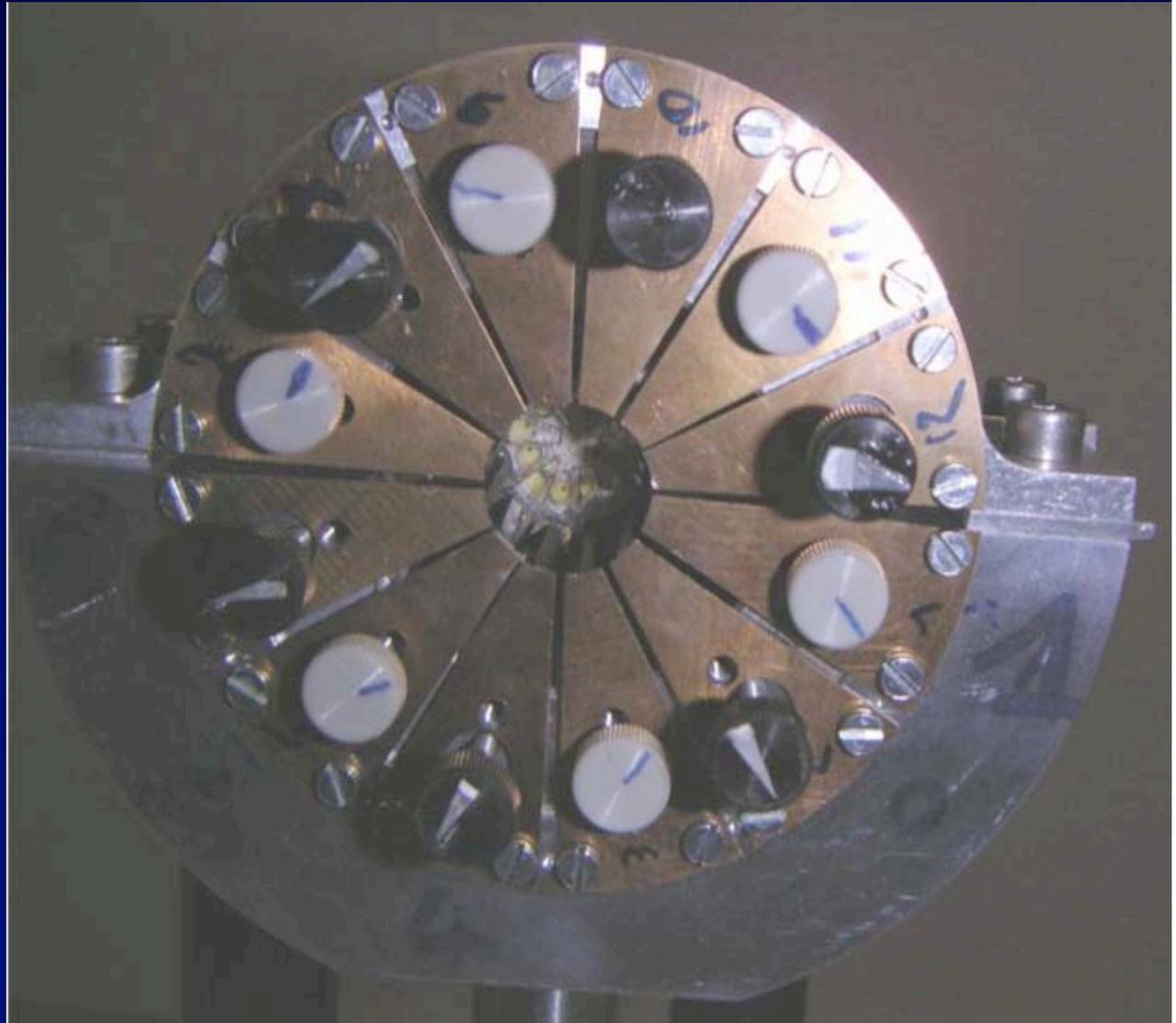
# Méthode des tavelures dispersées: Faut-il beaucoup de

lumière

- Un photo
- Hartma
- Peut-on
- Problèm
- ... puis
- ... en b



# Simulateur en laboratoire: actuateurs de piston



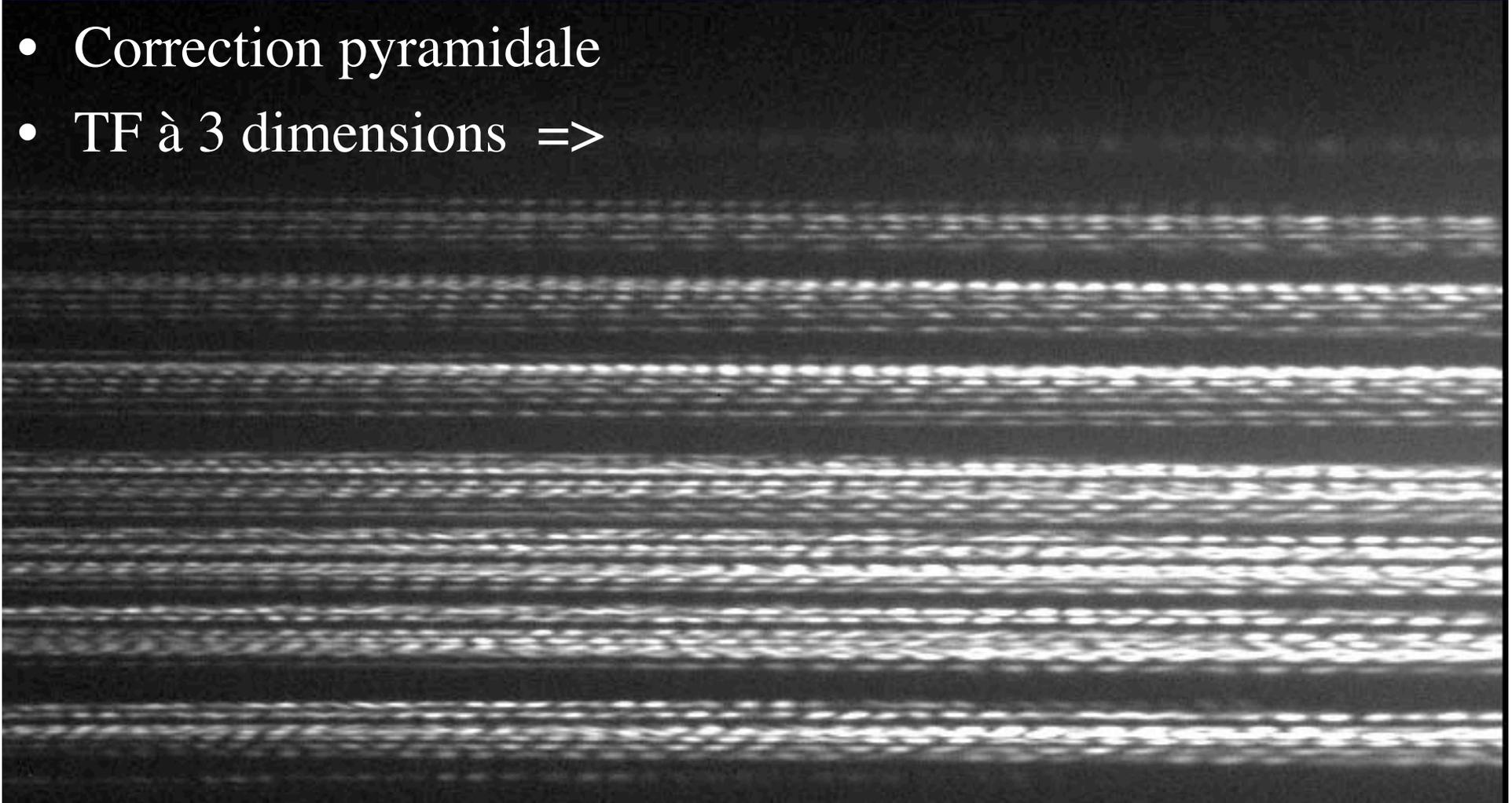
# Image par 12 ouvertures en cercle



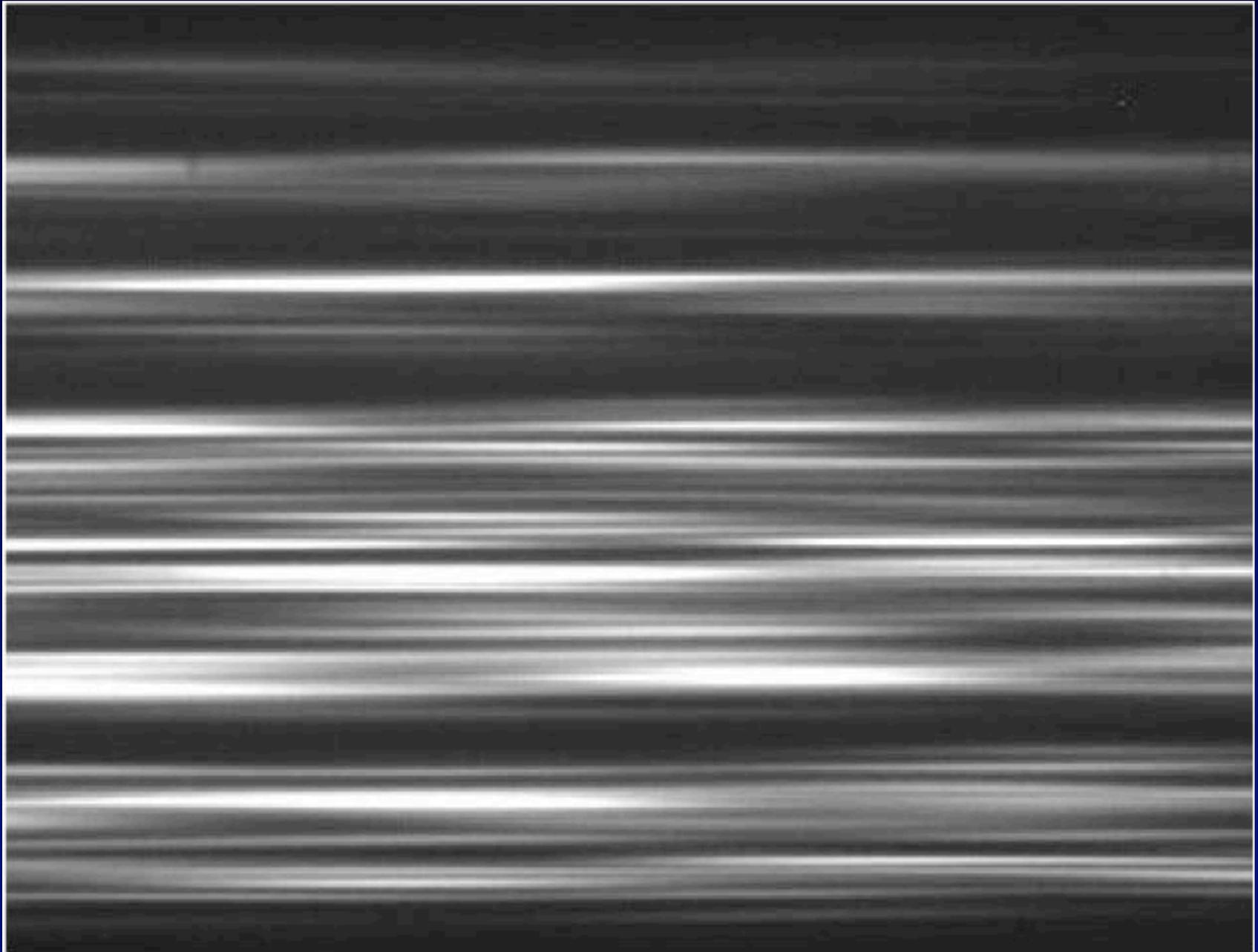
# Senseur de piston à « speckles dispersés »

(thèse en cours de V.Borkowski)

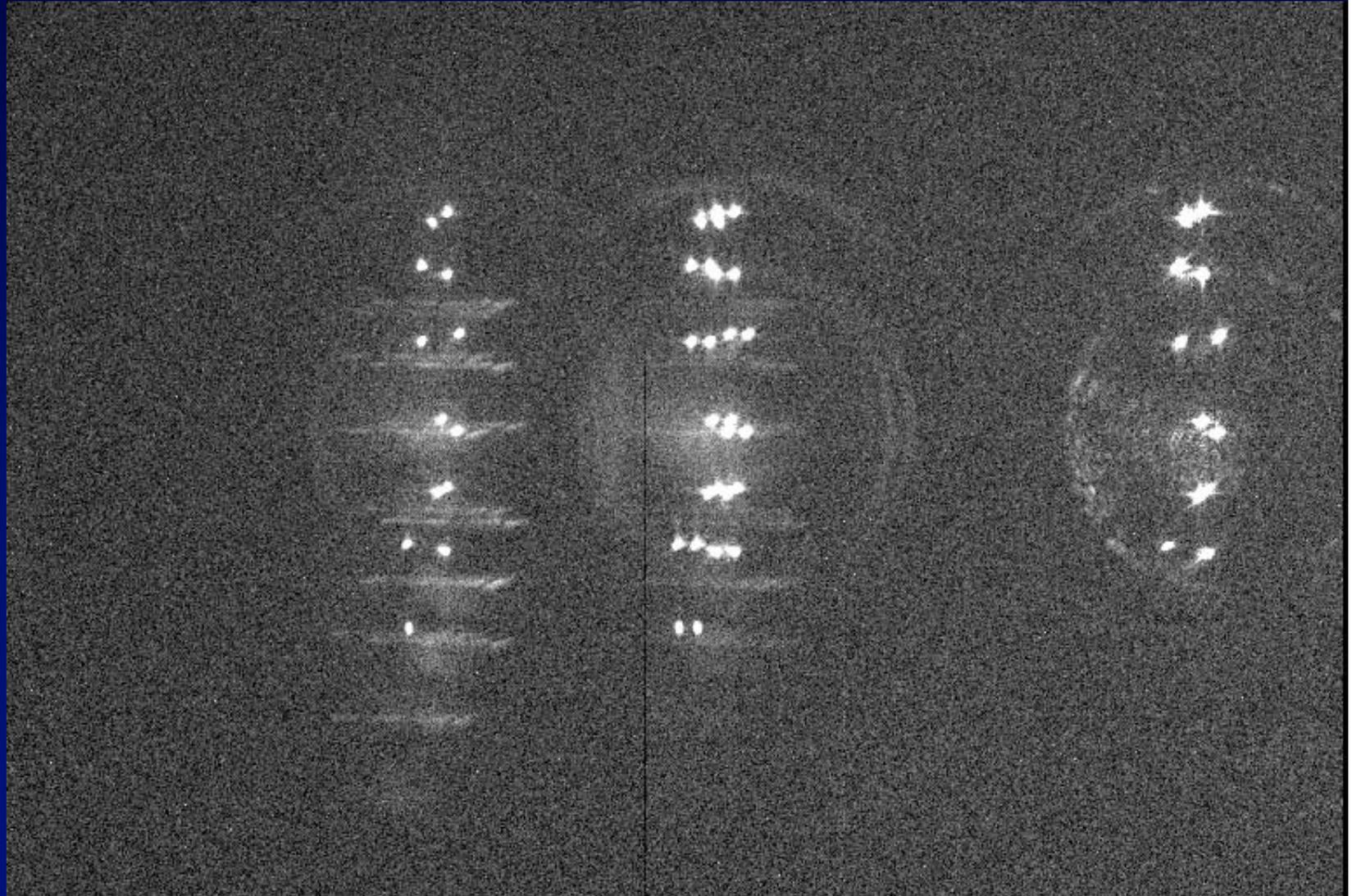
- Spectre de chaque speckle  $\Rightarrow$  image  $(x, y, \lambda)$
- Correction pyramidale
- TF à 3 dimensions  $\Rightarrow$



# Faibles erreurs de piston



# Calibration spectrale

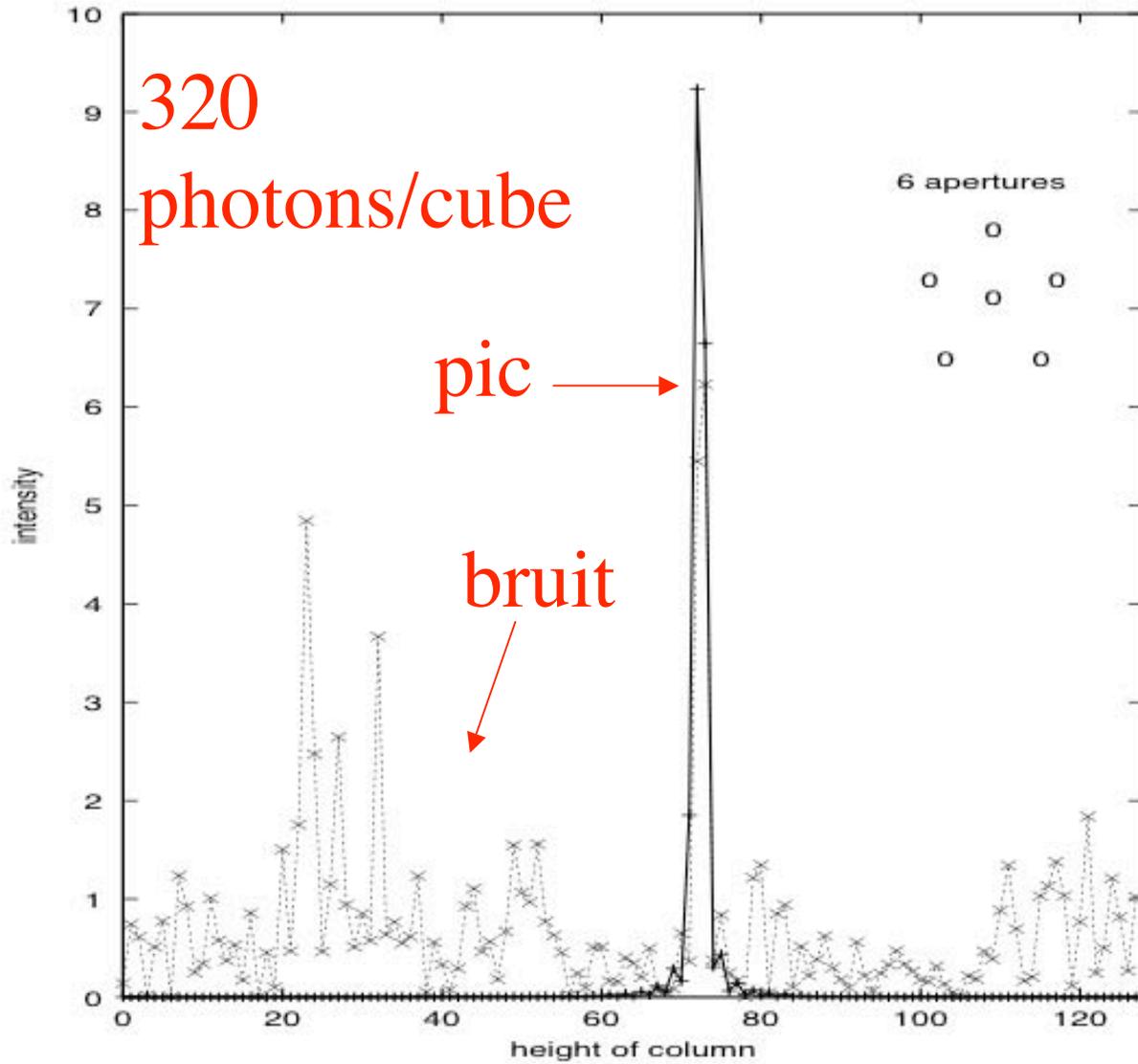


# Méthode des tavelures dispersées: Faut-il beaucoup de lumière ?

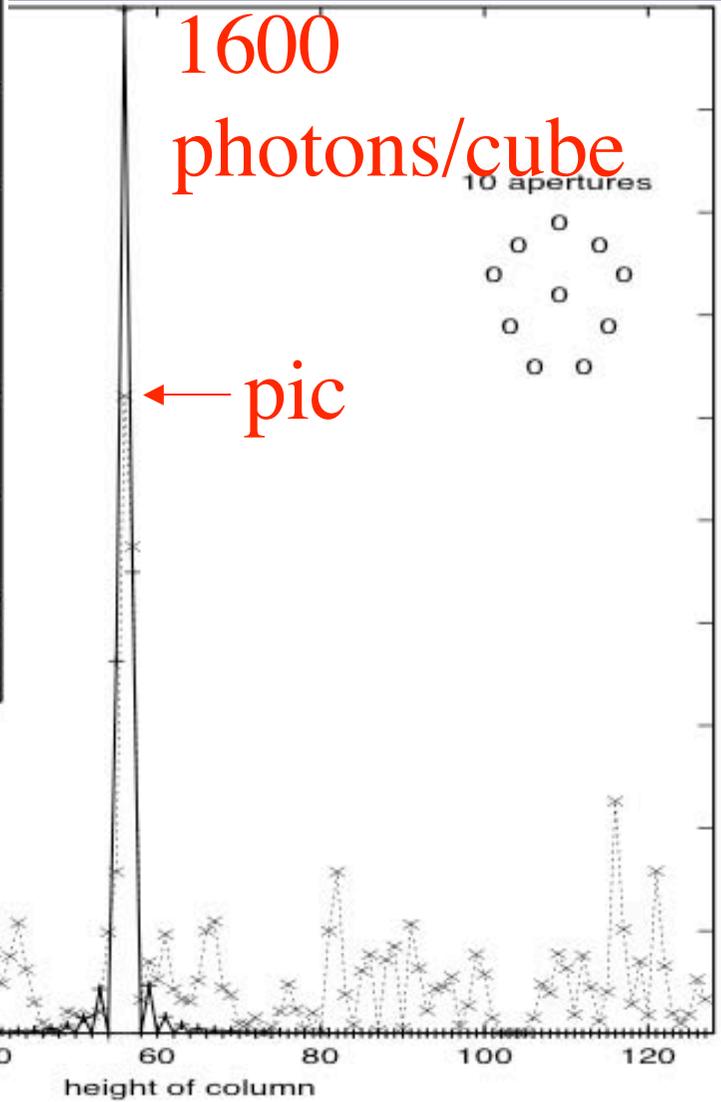
- Un photon par turbule suffit pour Shack-Hartmann
- Peut-on faire aussi bien ?
- Problème attaqué par simulation numérique...
- ... puis par calcul analytique ...
- ... en bon accord

# Méthode des tavelures dispersées: Faut-il beaucoup de lumière ?

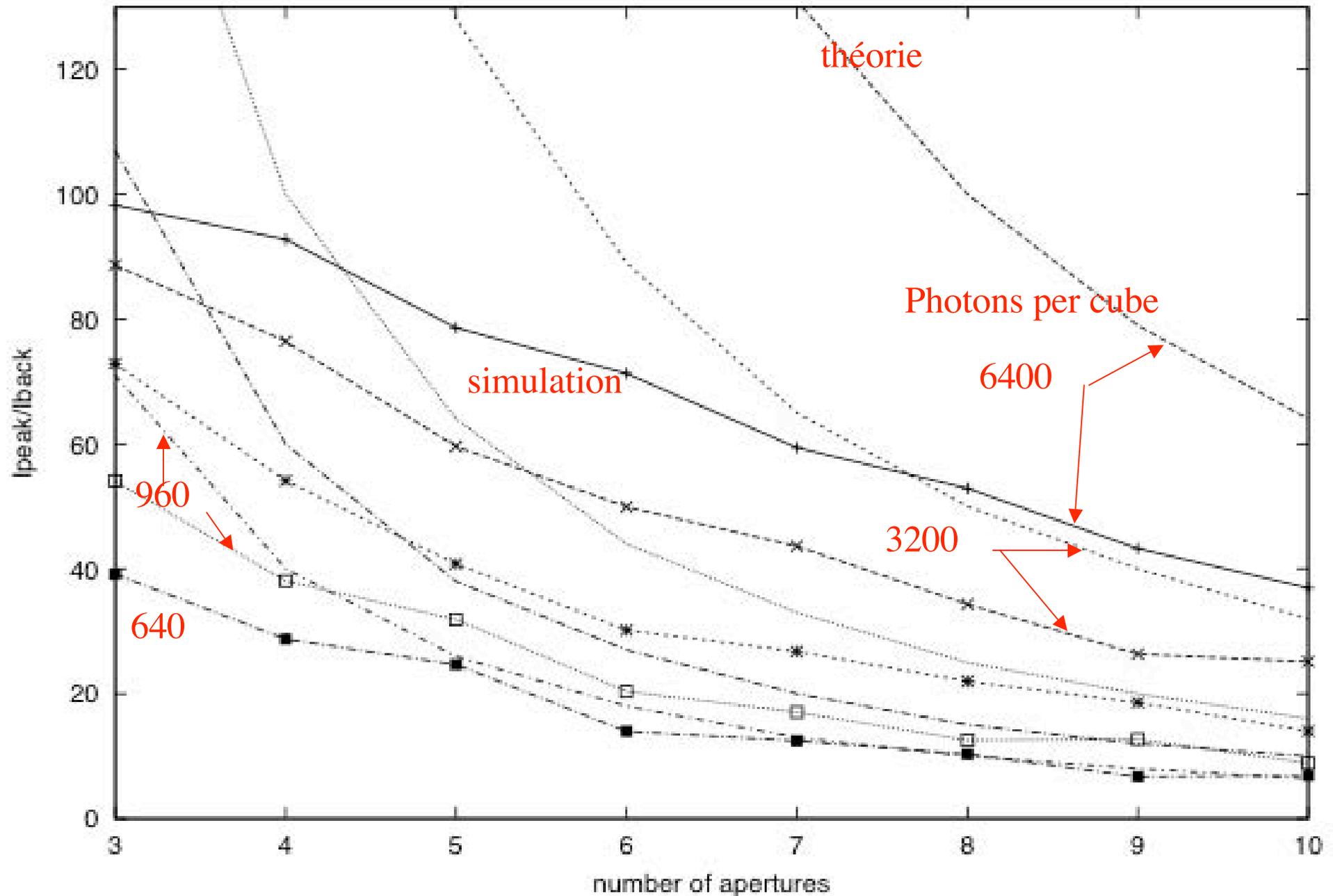
- Un photon par turbule suffit pour Shack-Hartmann
- Peut-on faire aussi bien ?
- Problème attaqué par simulation numérique...
- ... puis par calcul analytique ...
- ... en bon accord



Cube de sortie:  
Profils de colonnes

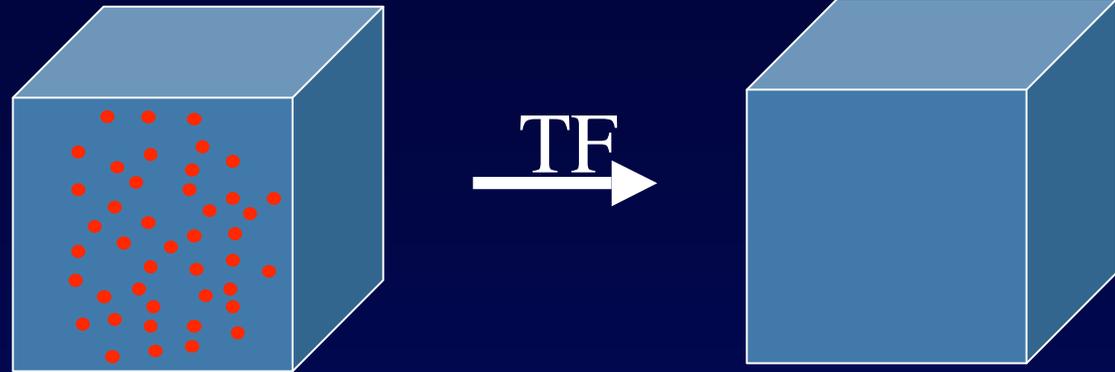


# Bruit dans le cube de sortie



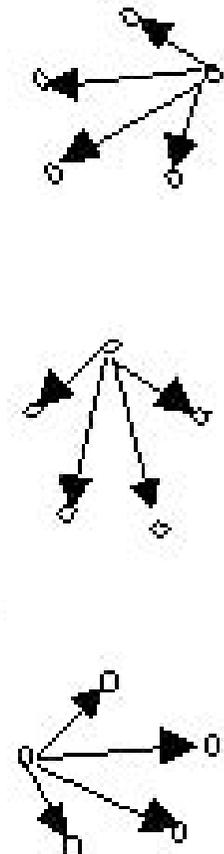
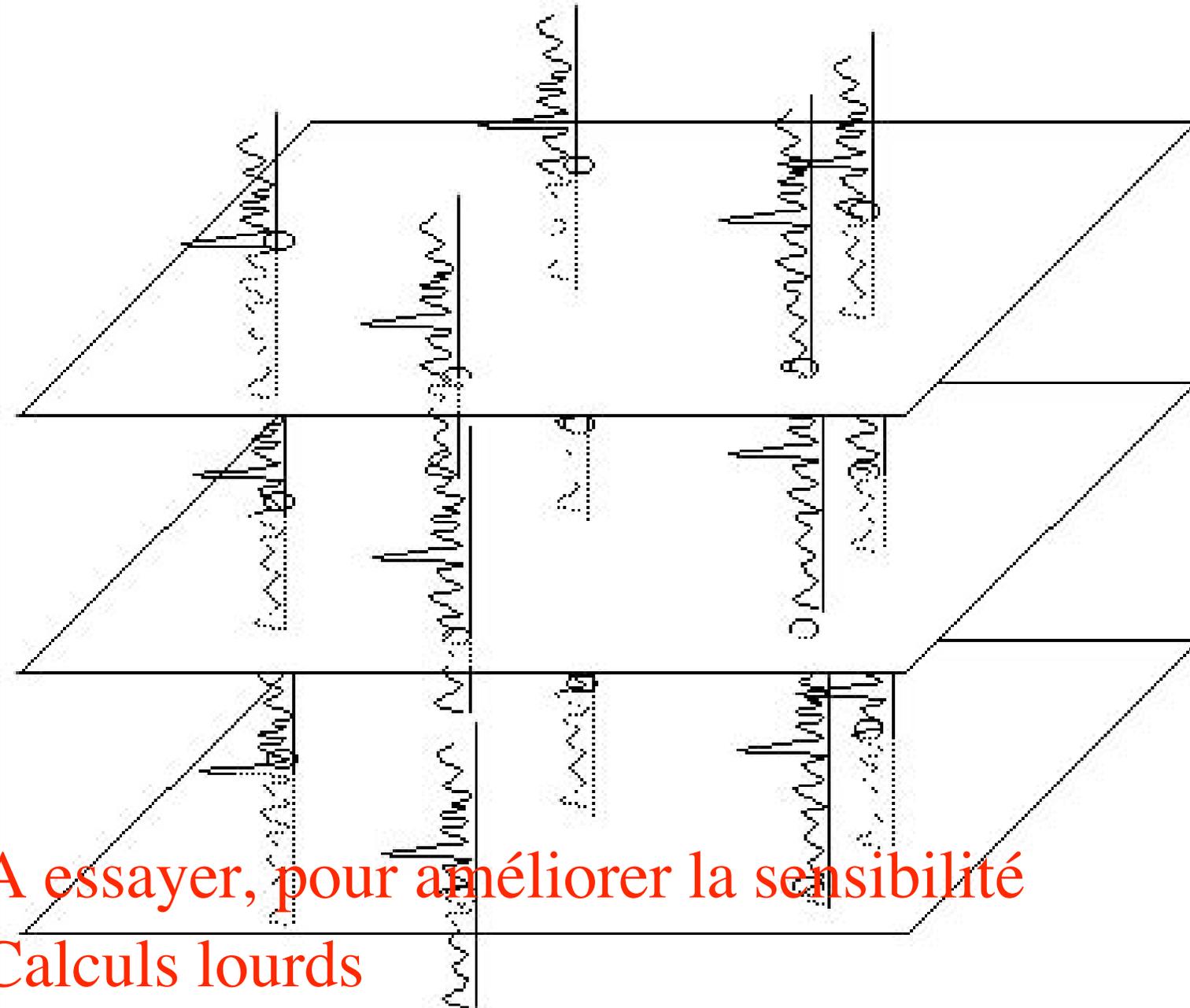
# Bruit de photons

( Borkowski et al. A&A, 2004)



The contributing complex amplitudes being randomly phased, the average modulus of this background is  $\sqrt{P}$ , if  $P$  is the number of photons in the Dirac cloud. The modulus of the central speckle, corresponding to the central dot of the high level pattern (i.e. with an infinite number of photons), which is the 3-dimensional auto-correlation of the piston map, is  $P$  since it receives phased contributions. The modulus of the "signal dots", being  $N$  times fainter at high illumination levels, is therefore  $P/N$ . Their signal/background modulus contrast is therefore  $(P/N)/\sqrt{P} = \sqrt{P}/N$ , and the intensity contrast is  $I_{peak}/I_{back} = P/N^2$ . The detection of a given signal dot with appreciable confidence requires that this contrast be significantly higher than 1, a condition which may be written  $P > N^2$ .

# Traitement du cube de sortie par N-tuple corrélation



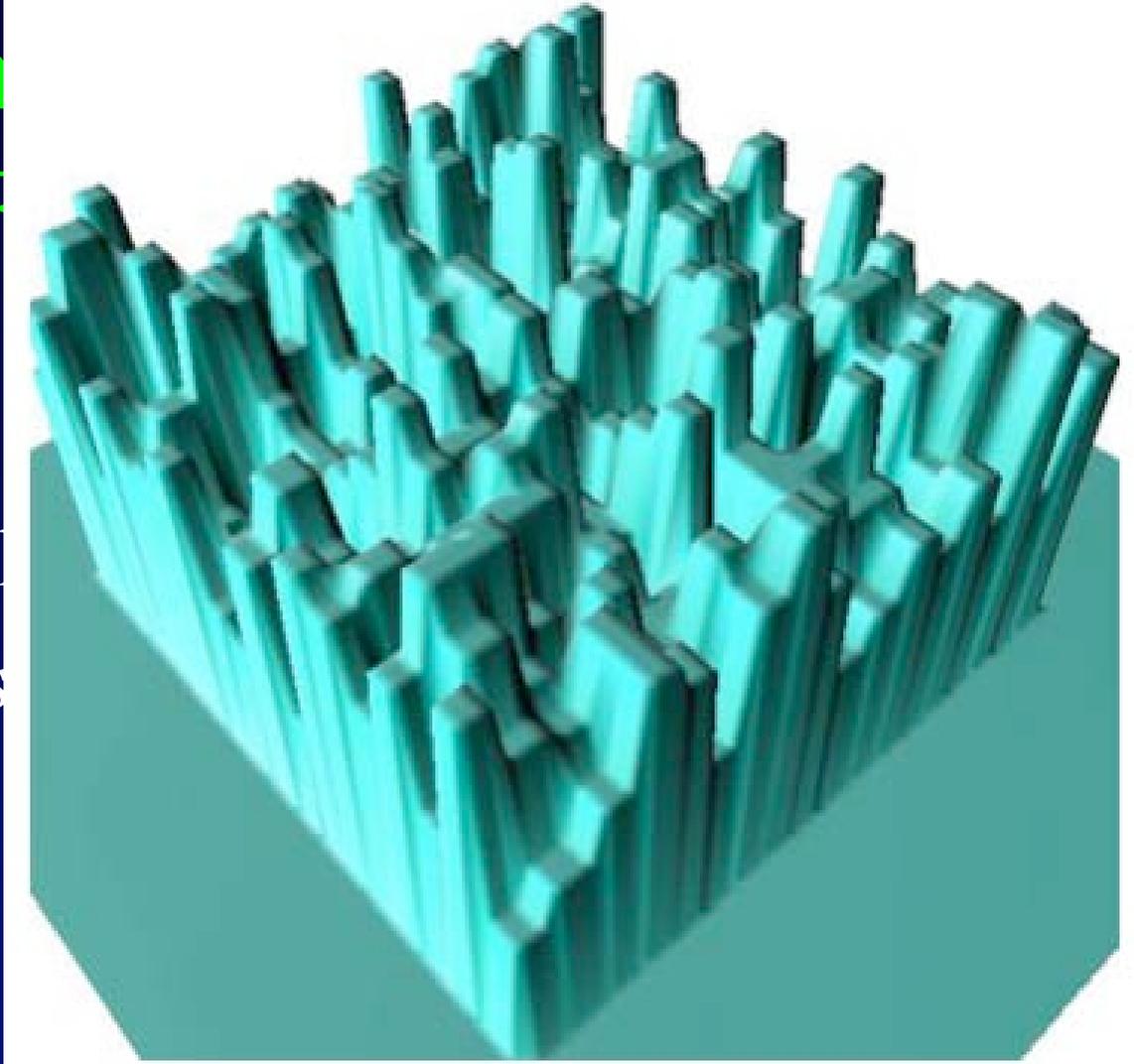
- A essayer, pour améliorer la sensibilité
- Calculs lourds

# Ouverture redondante: simulations de Frantz Martinache

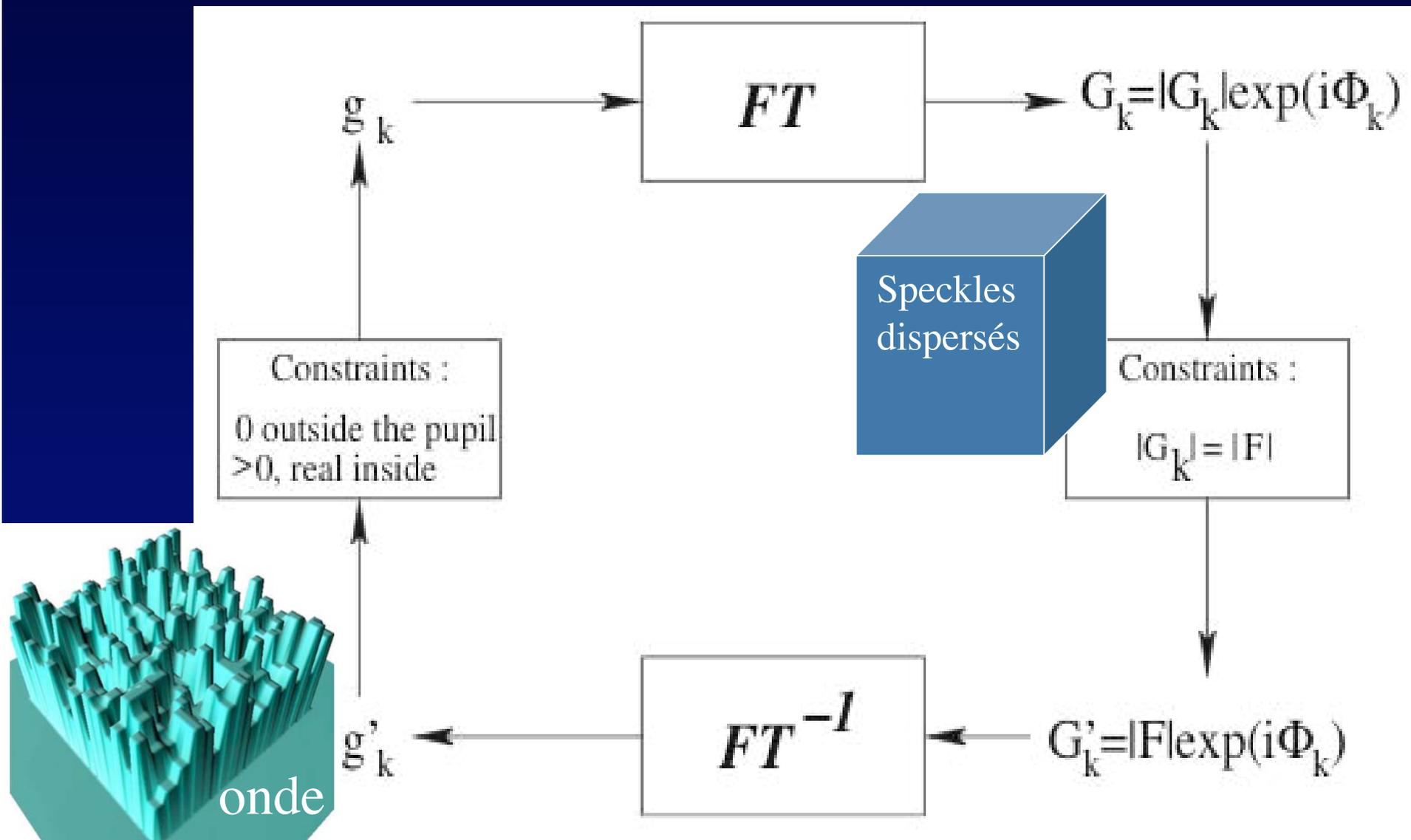
- Algorithme de Gerchberg-Saxton ou Fienup 3D
- Convergence reconstruit l'ouverture à partir du cube de sortie ( )

# Ouverture redondante simulations de FEM

- Algorithme de Gerstl
- Convergence reconstruite  
de sortie ( )

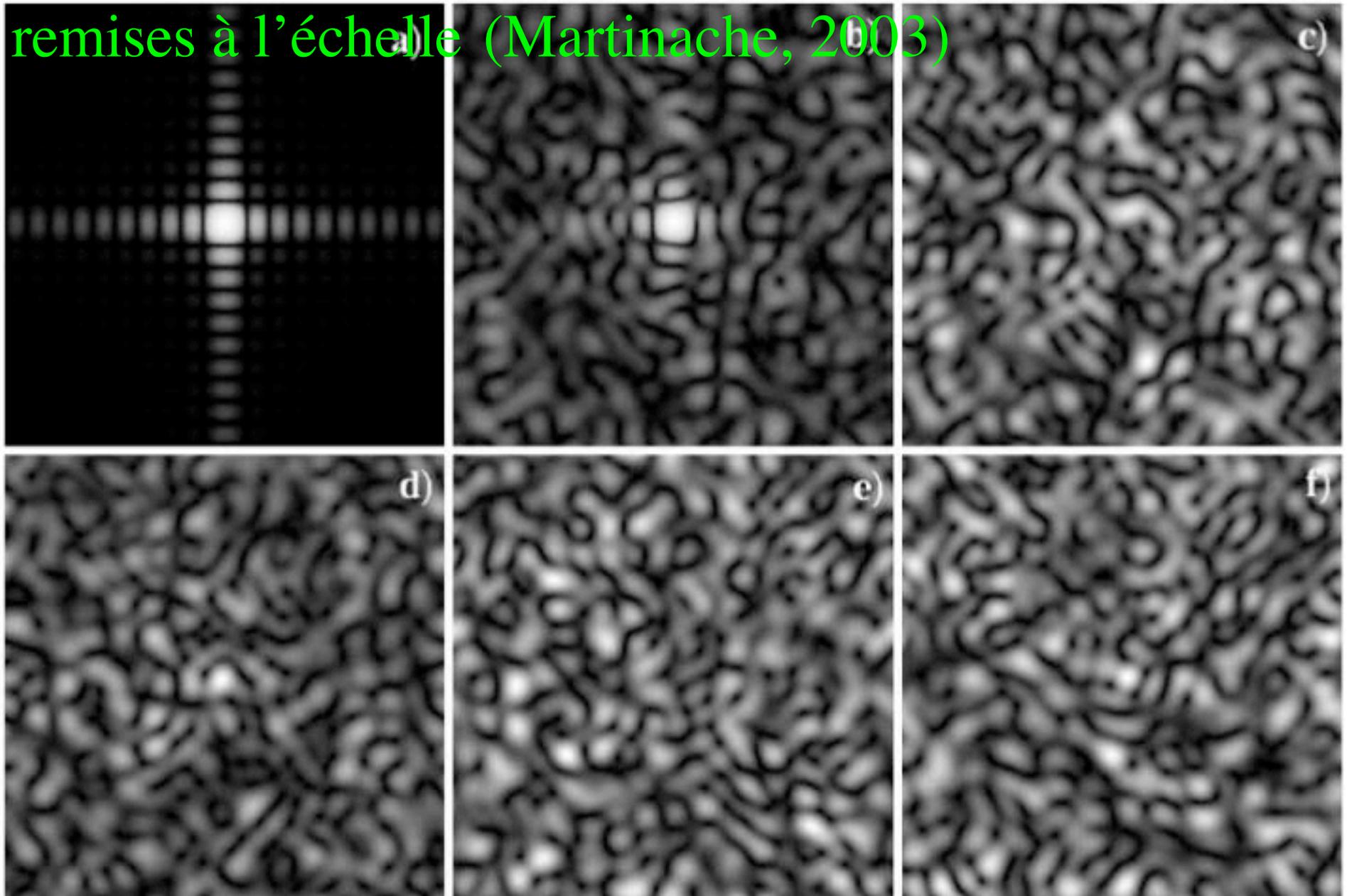


# Reconstruction de l'onde bosselée par algorithme Fienup 3D (Martinache 2003)



# Images à longueurs d'ondes décroissantes,

remises à l'échelle (Martinache, 2003)



# Conclusions

## Senseur d 'onde par « tavelures dispersées »

(thèse de V.Borkowski le 3 Juin à l'OHP)

- Bonne sensibilité
- utilisable pour coronagraphie adaptative ( Borkowski et al. A&A 2004)
- Utilisable pour ouvertures redondantes et miroirs mosaïques
- Essais entamés sur montage
- Opérationnel pour Carlina en 2005 ?