

MOTORISATION DIRECTDRIVE POUR NOS TELESCOPES

Par C.CAVADORE

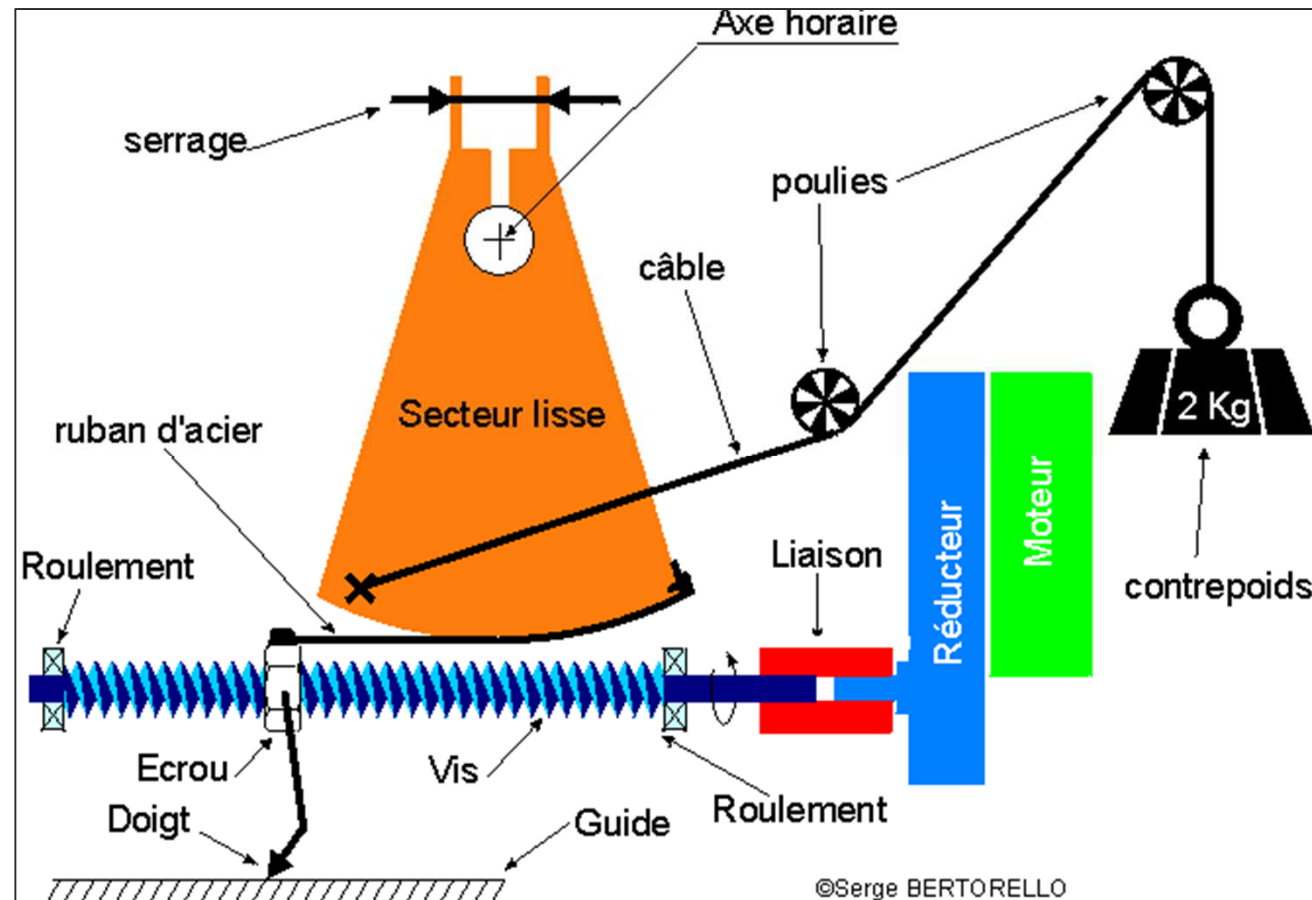
ALCOR-SYSTEM

RCE 2014 – Samedi 8 Nov – 17h30

Pourquoi motoriser un télescope ?

- Pour compenser le mouvement de la terre ($15^\circ/\text{h}$)
 - Observation visuelle
 - Les Objets sont faiblement lumineux : suivi précis pour prise d'images et accumulation des photons
 - Suivre des objets mobiles dans le ciel (comètes, astéroïdes, Lune...)
- Pour pointer automatiquement un objet dans le ciel grâce à ses coordonnées

Motorisation à « l'ancienne » 1955-1990



- Faible cout, assez précis si pièces bien usinées
- Mais pas de « Goto », et rembobinages requis

Motorisation à « l'ancienne » 1990 - ...



- Roues et vis
- Couteux et beau
- Pointe sur 360°
- Techno de taille mécanique difficile à maîtriser

- ▣ Erreur périodique !
- ▣ Lié à la qualité d'usinage
- ▣ Réglages été / hiver
- ▣ Jeu aller retour sur l'axe Delta ou blocage !



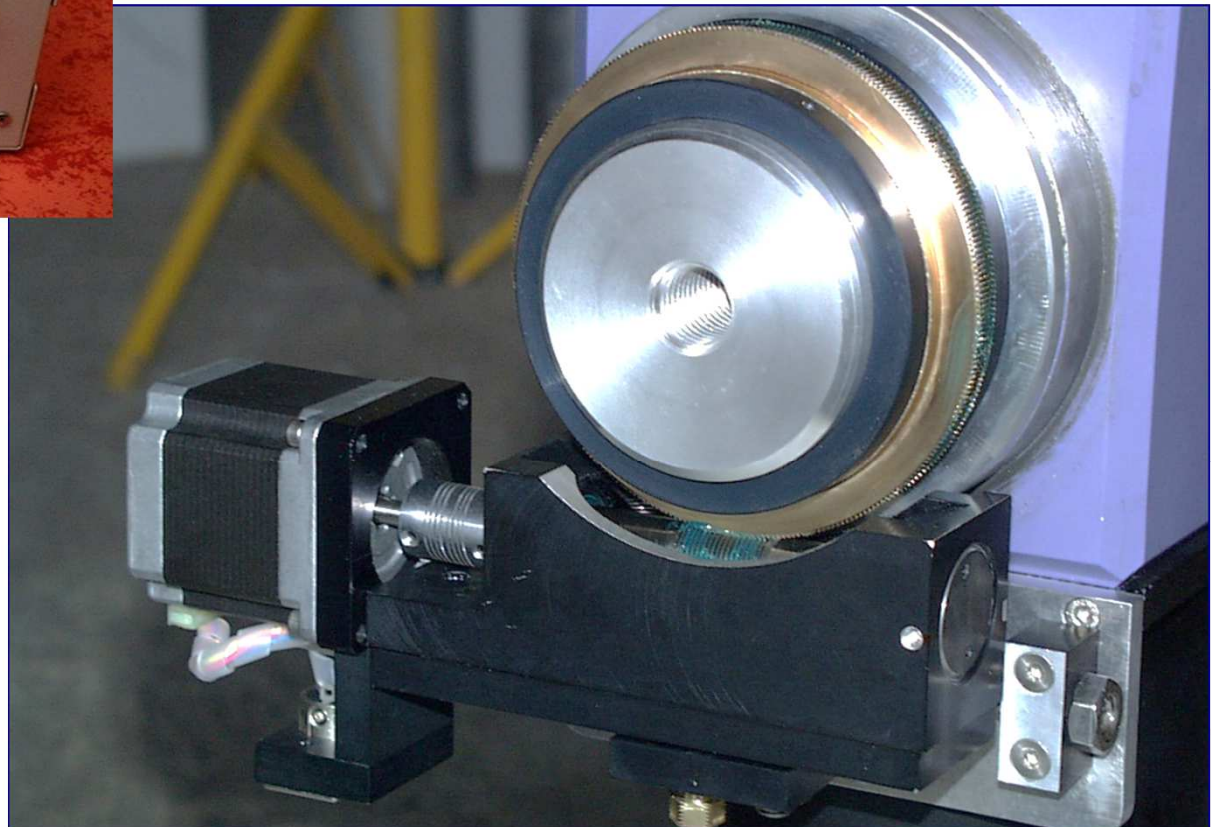
Motorisation à « l'ancienne »



- Moteurs pas à pas
- Rustique mais assez efficace en « Go-to »

▣ Jeux en Delta :

- ▣ Sensible au vent
- ▣ Rappels aller-retour problématiques
- ▣ Réglages été-hiver
- ▣ Bruit / résonances
- ▣ Vitesses très lentes..



TRASSUD



ZX4



ZX7

AXIS Instruments



F20A



F60a

MEADE



LX200

ARCANE



A40

GEMINI



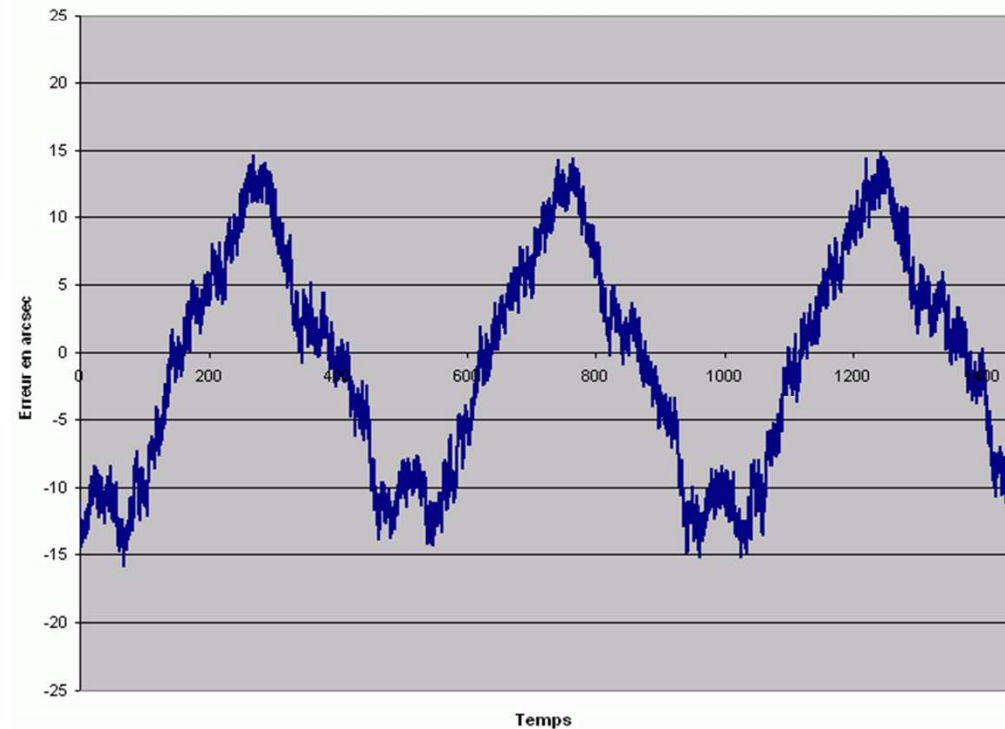
G42 +

Caractéristiques générales:

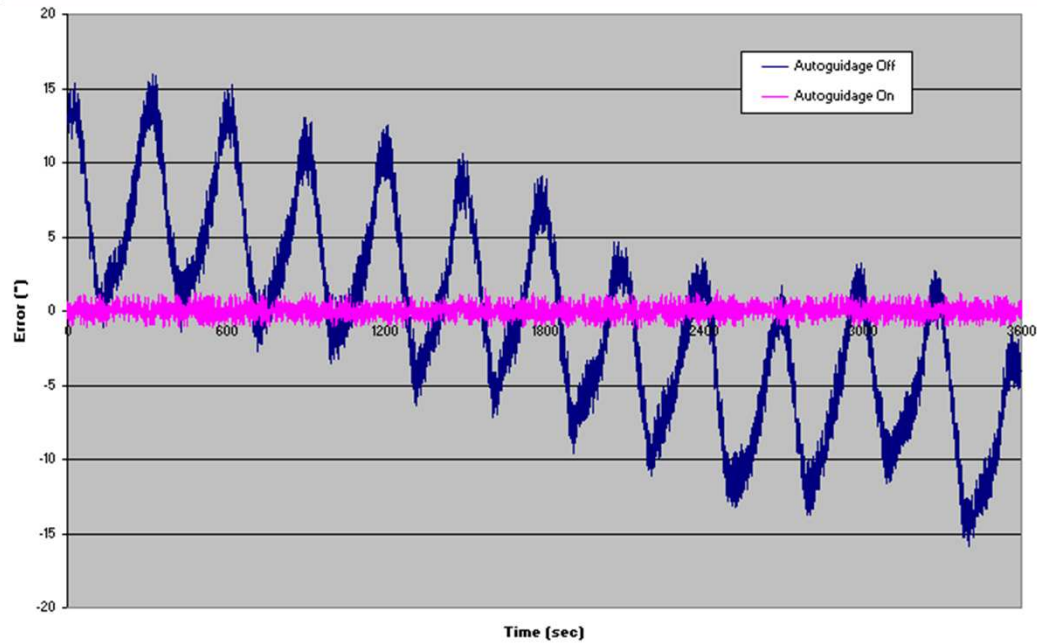
Rotation de la vis sans fin: 1 tour/ 8minutes

L'erreur périodique ..

8" LX200 (janvier 1997)



- ❑ Pas de contrôle usine et de qualification du système
- ❑ Résultats aléatoires (facteur chance)



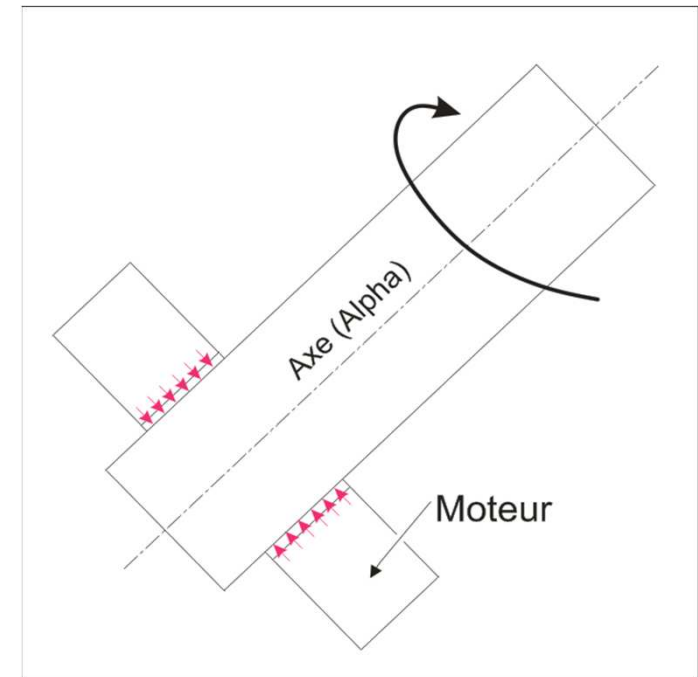
TDM ?

- Coût supplémentaire non négligeable
- Limité à la vitesse théorique sidérale
- « Emplâtre » + usine à gaz

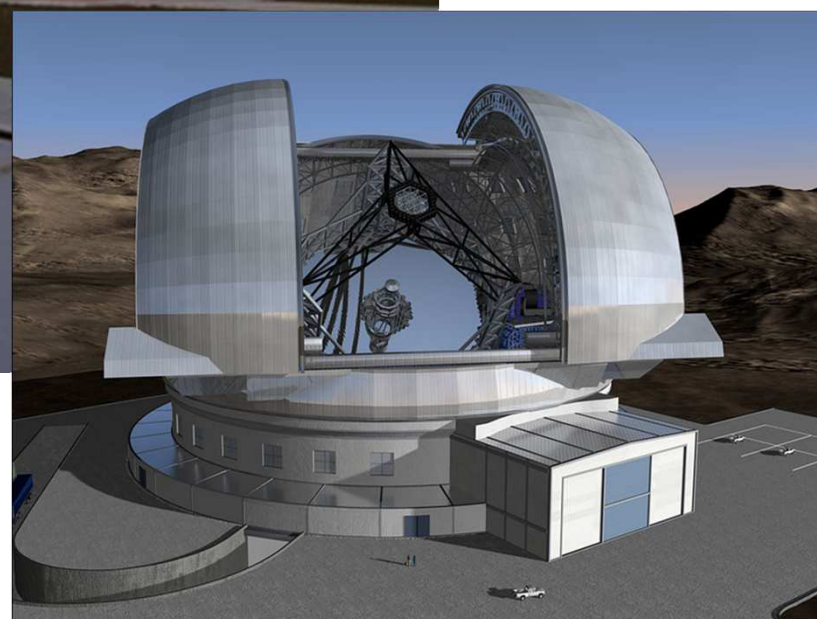
Motorisation direct-drive

- Pas de mécanique
 - Pas de vis, de pignons, pas de jeux... Elimination d'éléments mécaniques
 - Transmission de la force par champ magnétique.
 - Asservissement en **boucle fermée**
- Arrivée dans la fin des années 90
 - Grâce à la :
 - La puissance de calcul en temps réel des processeurs.
 - L'augmentation de résolution des codeurs de position.
 - Direct-drive = pilotage direct sur l'axe

Motorisation direct-drive



VLT/E-ELT : direct-drive sur les deux axes



Télescope de classe 2.5m

- Direct-drive sur les deux axes azimut et élévation
- Pilotage informatisé
- 35t de masse mobile
- Deux moteurs en élévation



Direct-drive sur les télescopes classe 1m à 2m



Télescope 1.2 m

Pointage ultra-rapide
À 30°/Sec



PLANEWAVE CDK-700

Altaz - telescope

**ALCOR
SYSTEM**



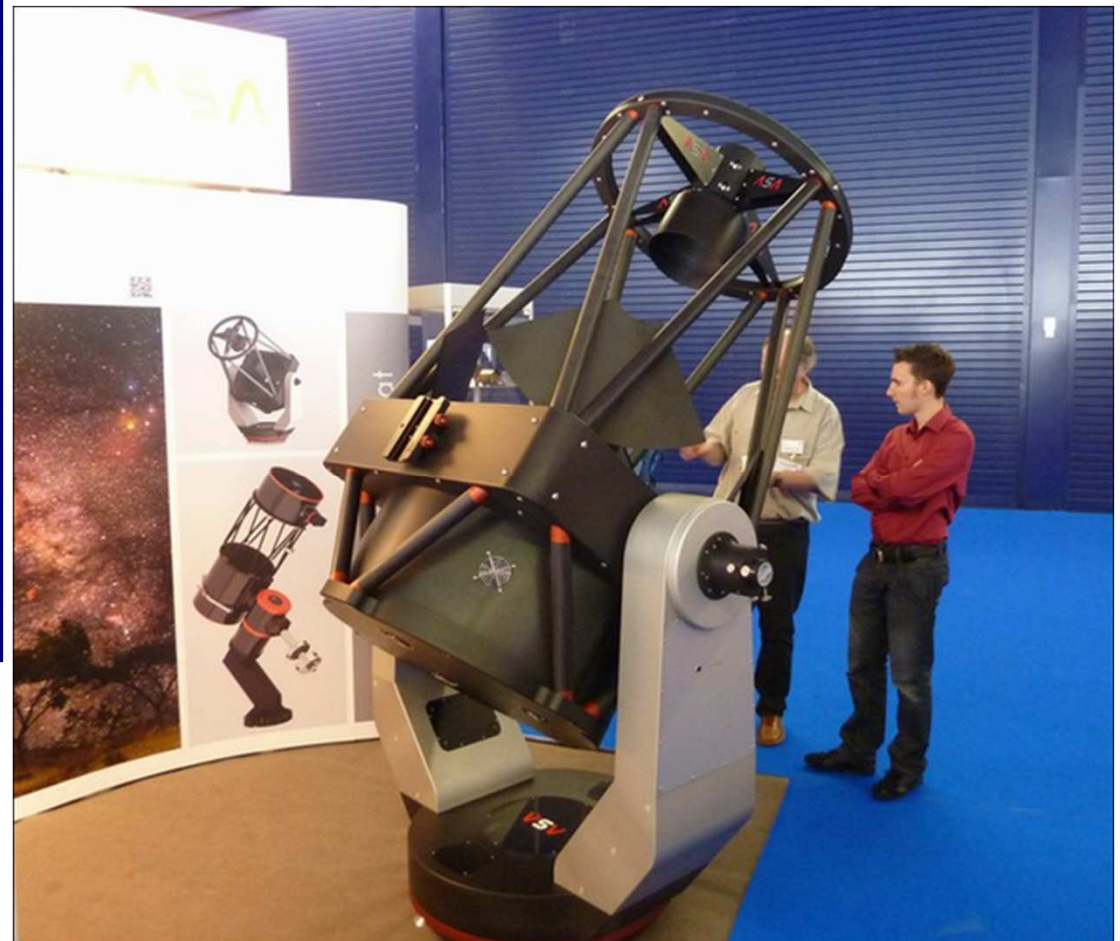
NTM-500



**ALCOR
SYSTEM**



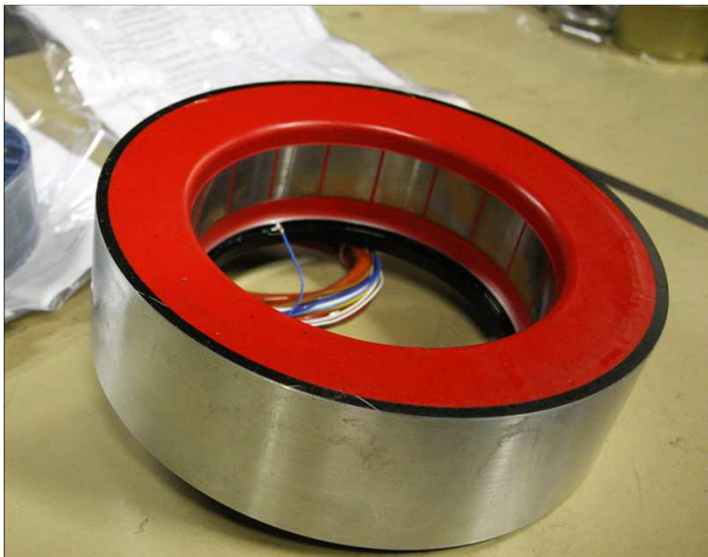
- DDM-85
- 700 mm ALT-AZ (proto)



- Montures sans FREINS !
- Couple trop faible

Premier prototype ALCOR-SYSTEM (2010)

- VMA 200 Modifiée
- Prise en mains des technologies
- Première monture directdrive Française





NOVA 120

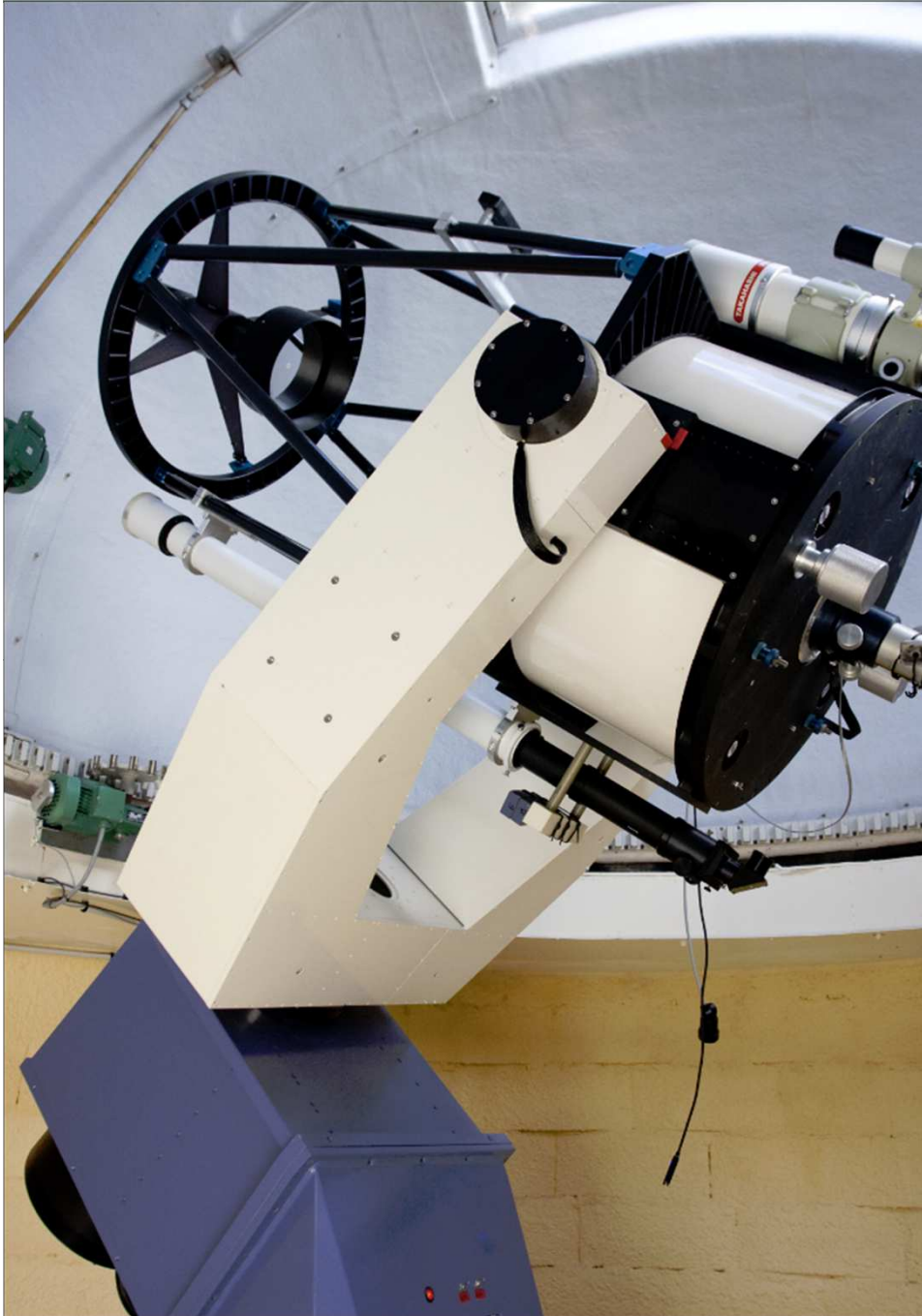
- Charge utile : 120 kg
- Codeurs 42 millions de pas/t
- Moteurs à haut couple
- Monture allemande
- Freins sur chaque axe
- Logiciel dédié ASCOM



NOVA 120



- Chili à SpaceObs (A.Maury)
- Client Panaméen en mode remote
- Pas de caméra de guidage installée !
- Fonctionne tous les soirs
- T400 mm F3.5 + FLI 16803



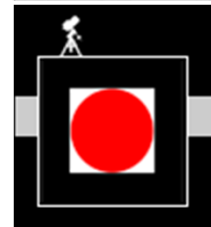
Télescope 600 mm VALMECA

Monture fourche
RC f/8

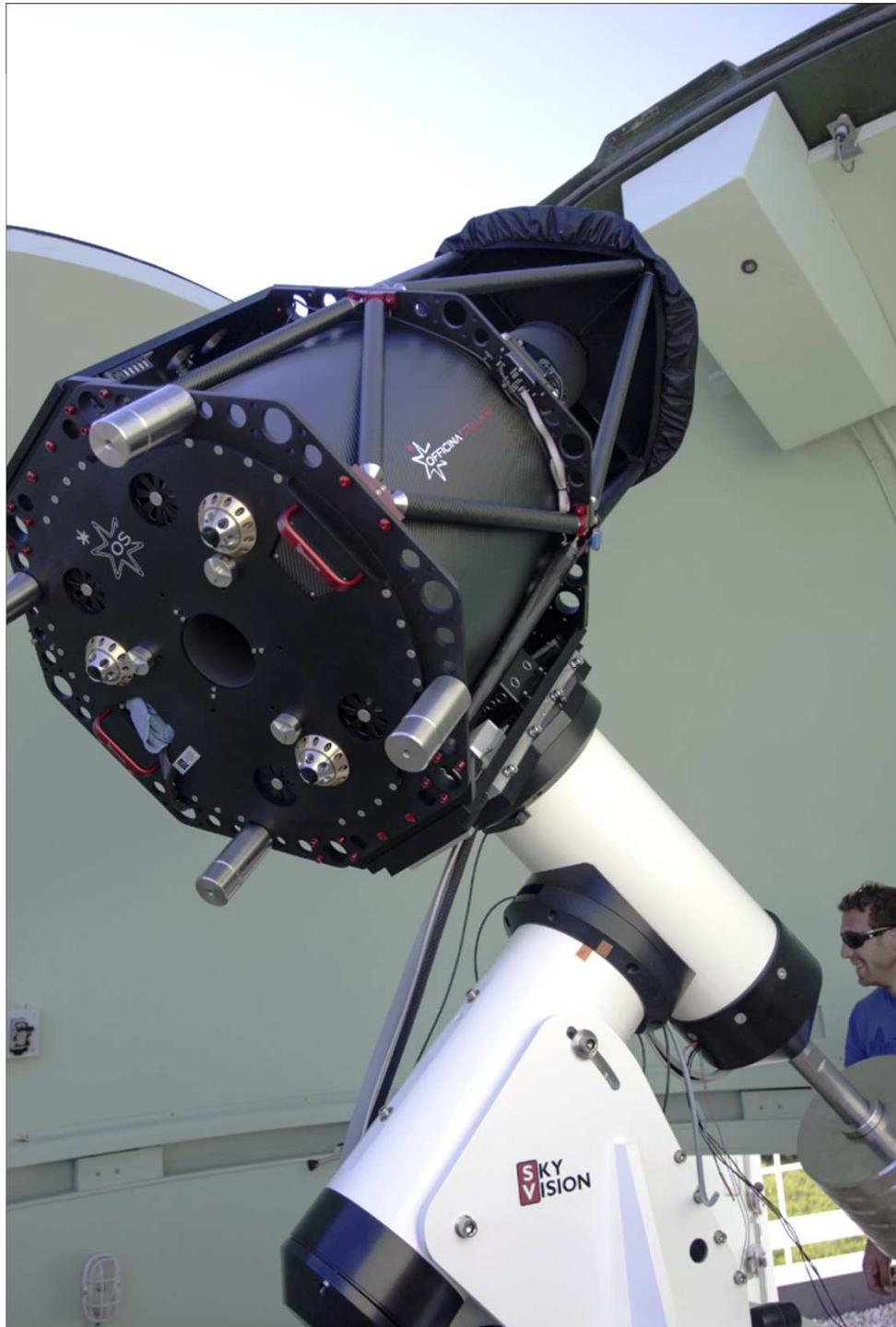
Direct-drive sur les deux
axes



NOVA 200 (Obs Mars, 07320)



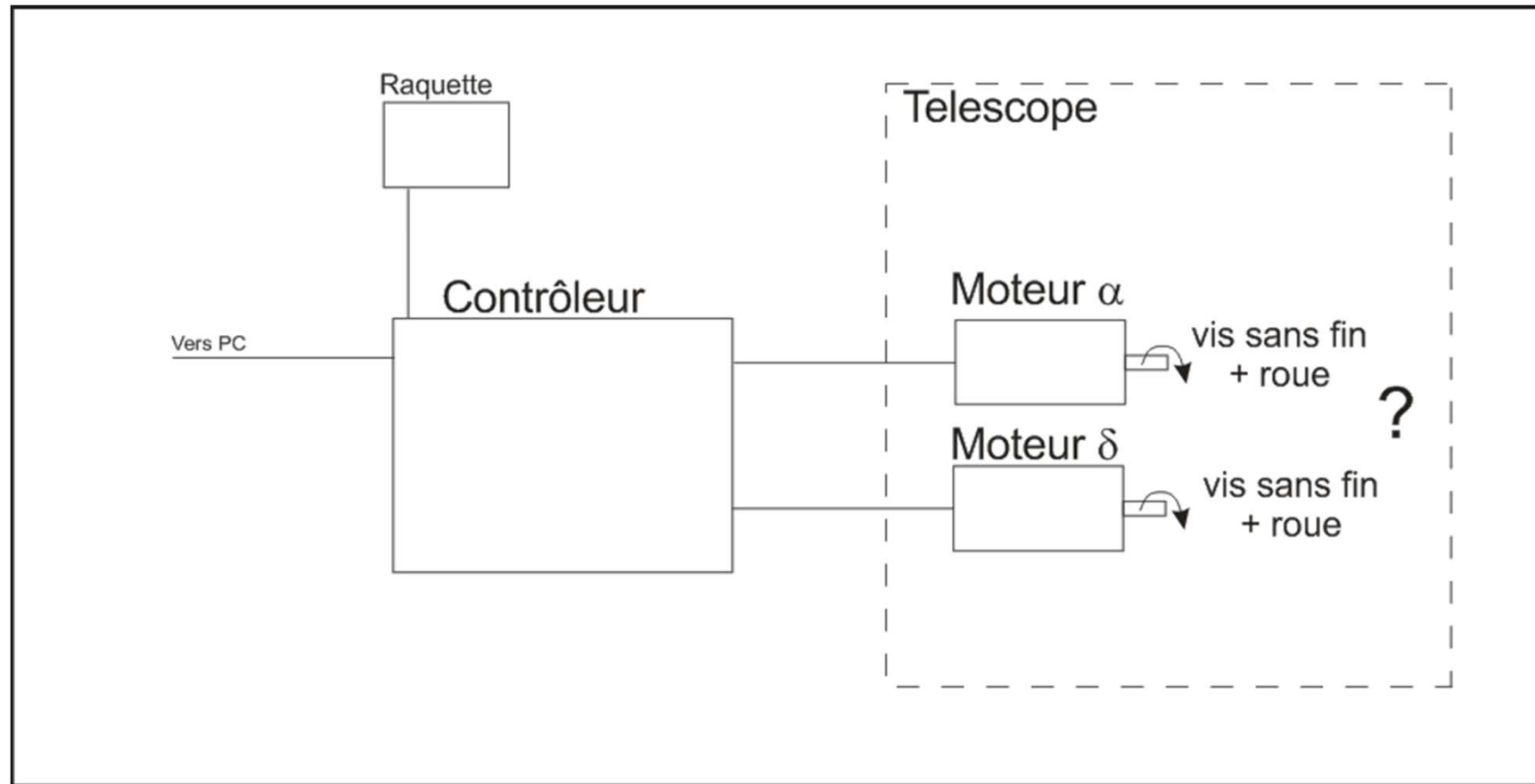
- Poids 200 Kg
- Charge utile 200Kg
- Axes de 160 mm
- 600 mm F8 Officina Stellare
- Tube 120kg
- 10°/sec



Les valeur ajoutées du Direct-Drive ?

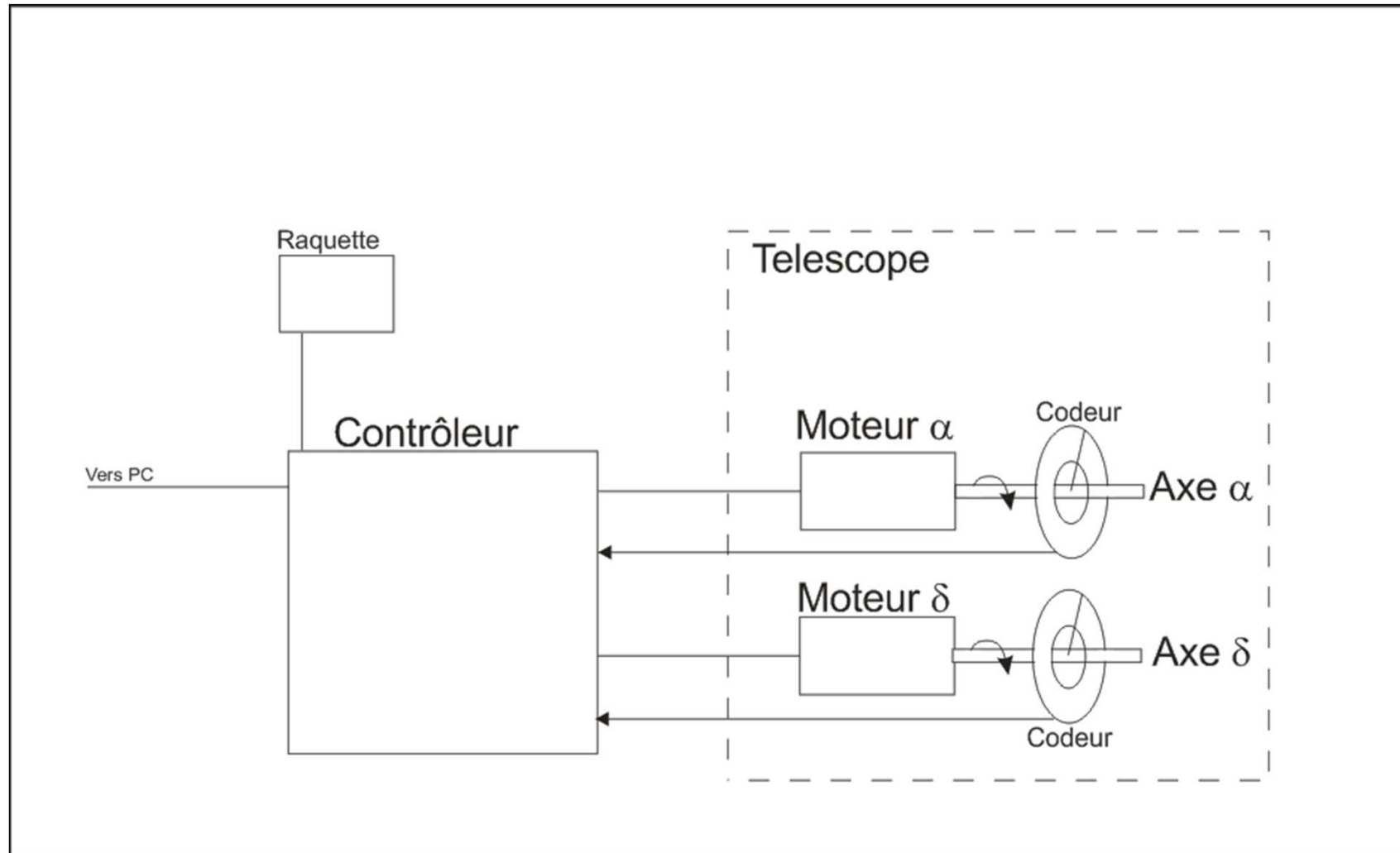
- Pointer un télescope précisément et rapidement
- Réaliser du suivi sidéral et des images sans guidage
- Simplifier la conception mécanique de l'entraînement.
- Faible consommation
- Zéro erreur périodique
- Grande dynamique de vitesse ($100^\circ/\text{sec}$ à $0.1''/\text{h}$)
 - Pointage ultra rapide
 - Suivre des satellites
 - Suivre des objets se déplaçant lentement sur le ciel ($<5''$ par heure)
 - Vitesses Alpha/delta variables en fonction du modèle de pointage et de la réfraction (vitesse de modèle).
- Boucle de contrôle fermée sur le codeur à 10 KHz

Systeme classique : boucle ouverte



- Boucle ouverte : ce qui se passe réellement en bout d'axe n'est pas connu.

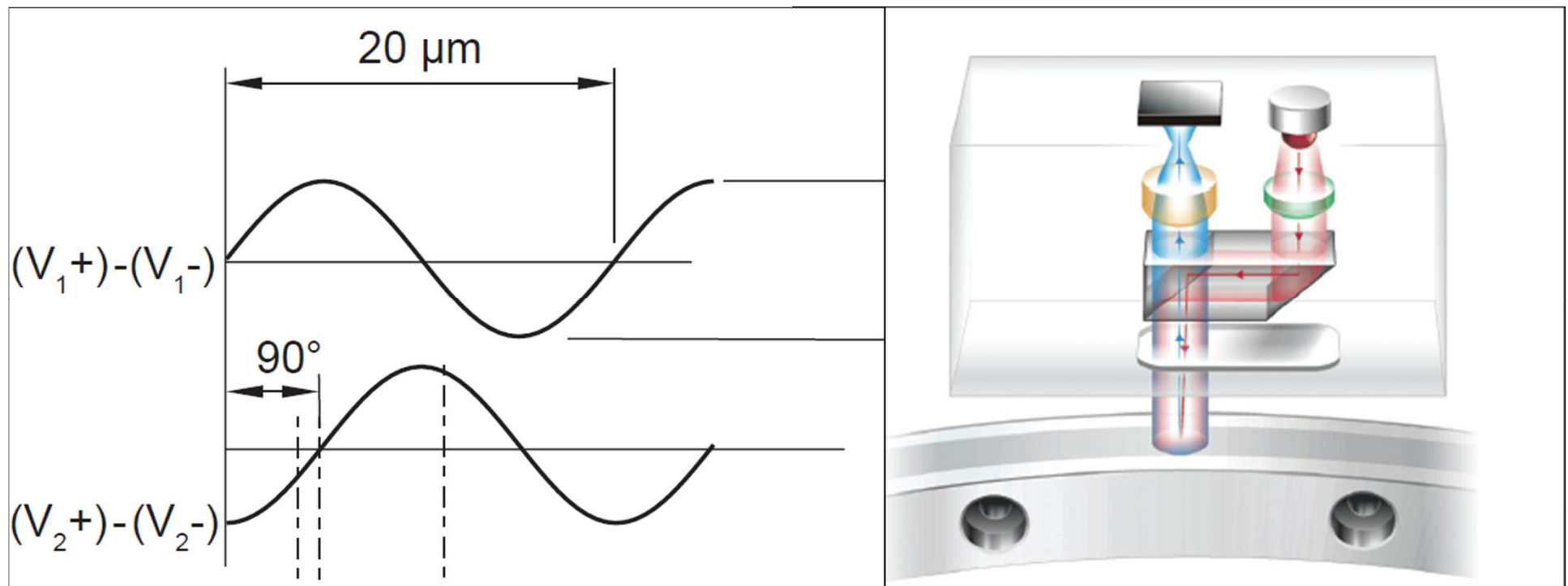
Systeme boucle fermée



- Boucle fermée : ce qui se passe en bout d'axe est connu grâce aux codeurs.

Les codeurs

- L'élément clef
 - Mesurer un angle de rotation très précisément
 - Un par axe
 - Ils sont optiques, (tête de lecture) sans contacts et interpolés.
 - Sortie Sin/Cos analogique puis numérisation dans un interpolateur compteur.
 - Marque de référence pour l'initialisation



A quoi cela ressemble ?

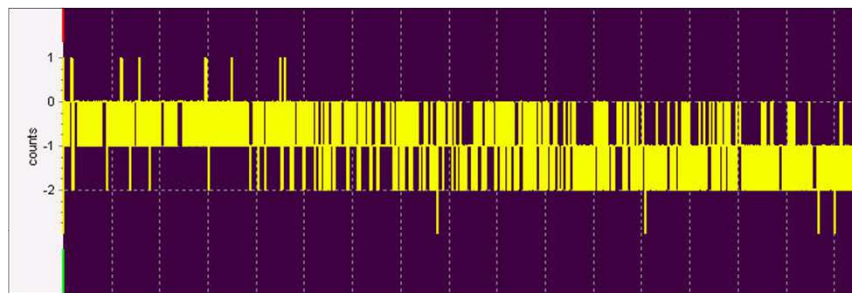


- Monter un anneau, et une tête de lecture
- Positionnement de la tête de lecture avec
 - Un outillage livré et un indicateur d'état à LED

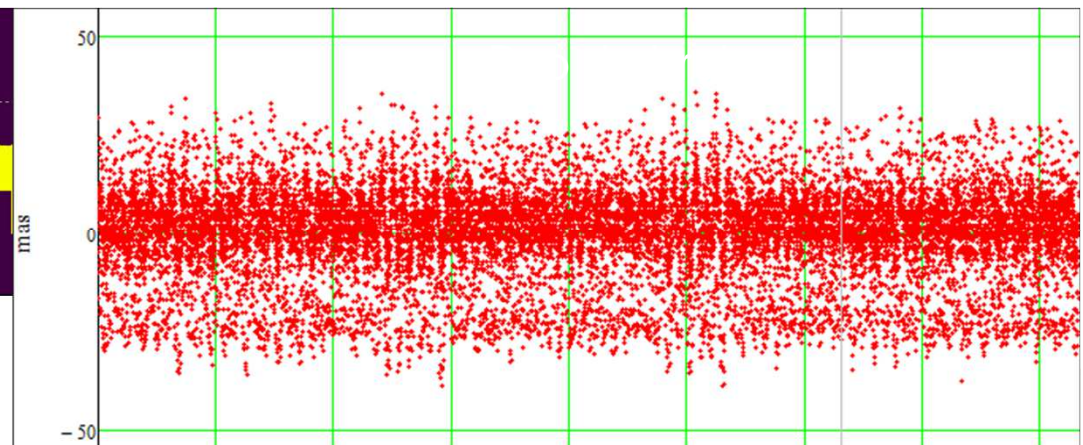
Les codeurs

- Anneau de $\varnothing 100$ à 200 mm, interpolateur 10 bits
- Ex : Un anneau de $\varnothing 202.127$ mm possède 63500 marques de $20\mu\text{m}$
- Interpolateur 10 bits = 63500×1024 65,3 millions de pas par tour
- Résolution de $0.0199'' = \sim 20$ mas (1/50 d'arc-sec)
- Attention :
 - Vitesse max de lecture (> dizaines de degrés par seconde)
 - Bruit des codeurs – doit être de 1 LSB, pas plus !
- Codage relatifs, semi-absolus et absolus

Trop de bruit



Pas de bruit



Le moteur

- ▣ « Brushless motor » / moteur couple
- ▣ Moteur 3 phases (AC)
- ▣ « Frameless torque motor »
 - Pas de balais
 - Moteur couple : fort couple à faible vitesse
 - Sans roulement
 - Faible inertie
 - Pas d'hystérésis, pas d'élasticité
 - Efficacité : pas de pertes du à la transmission mécanique.
 - Pas d'usure des pièces.
 - Pas de connexion mécanique entre le rotor et le stator.

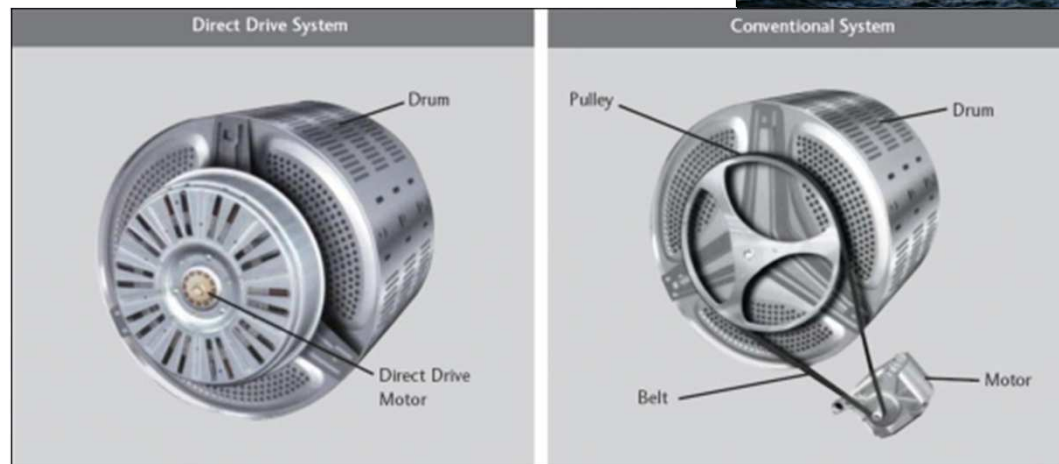
A quoi cela ressemble ?



A quoi cela ressemble ?

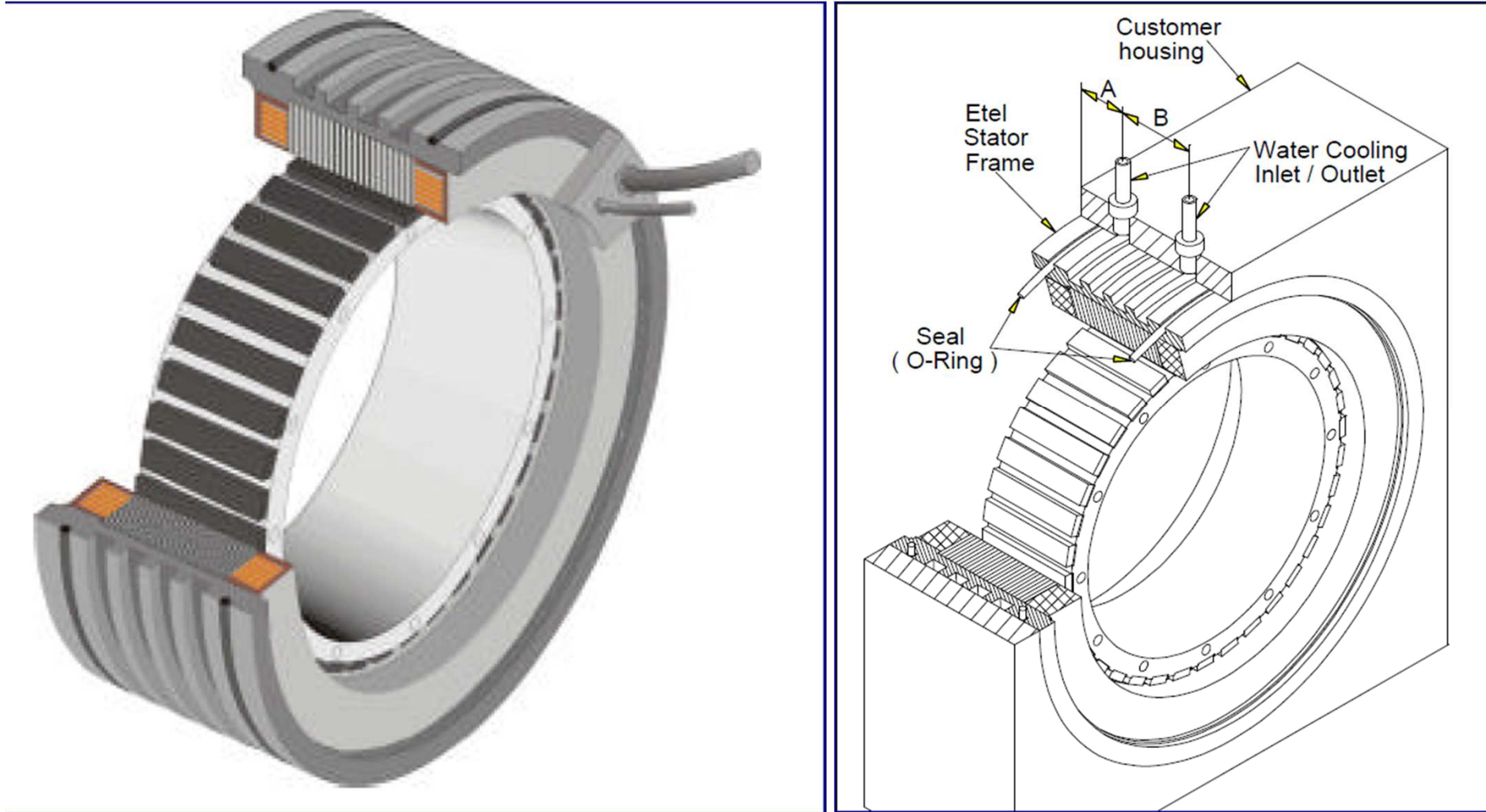


Applications des moteurs couples



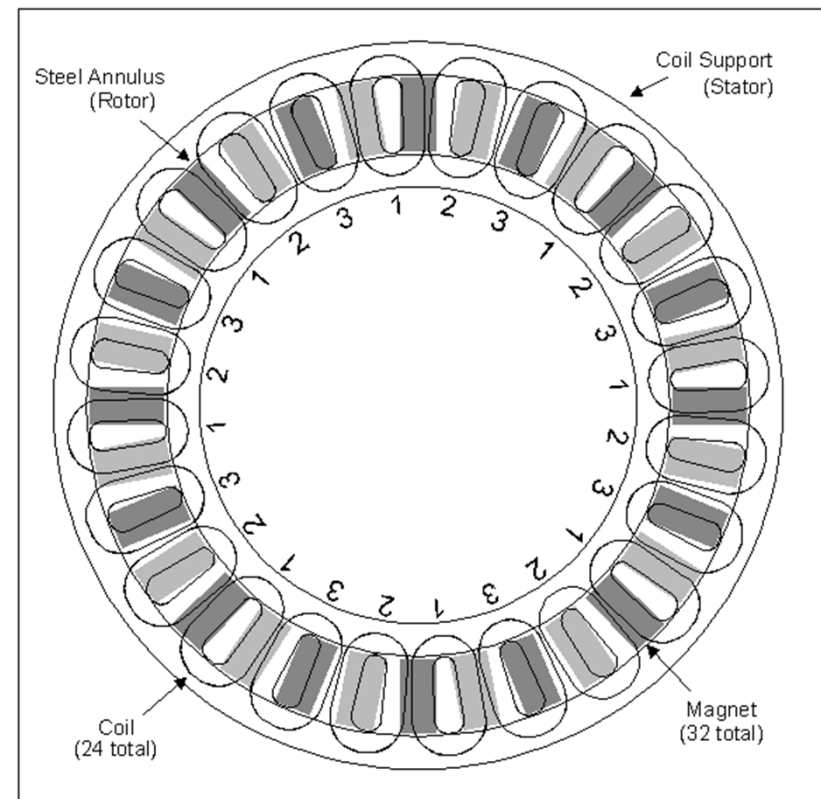
A quoi cela ressemble ?

Architecture axiale



Le moteur

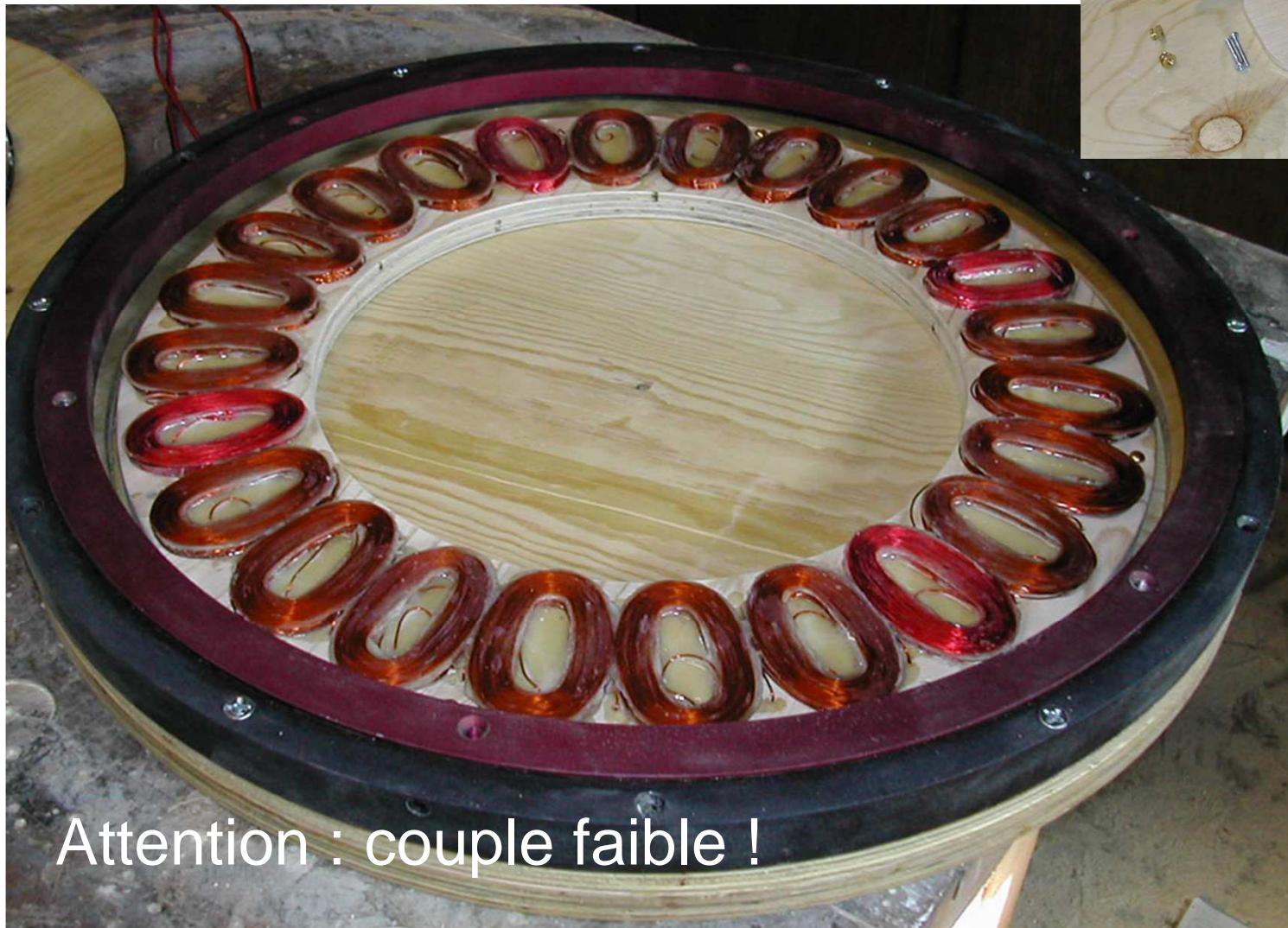
- Architecture radiale (aimants) ex CDK700
- Nombre de pôles = 16



Couple = 11 N.m

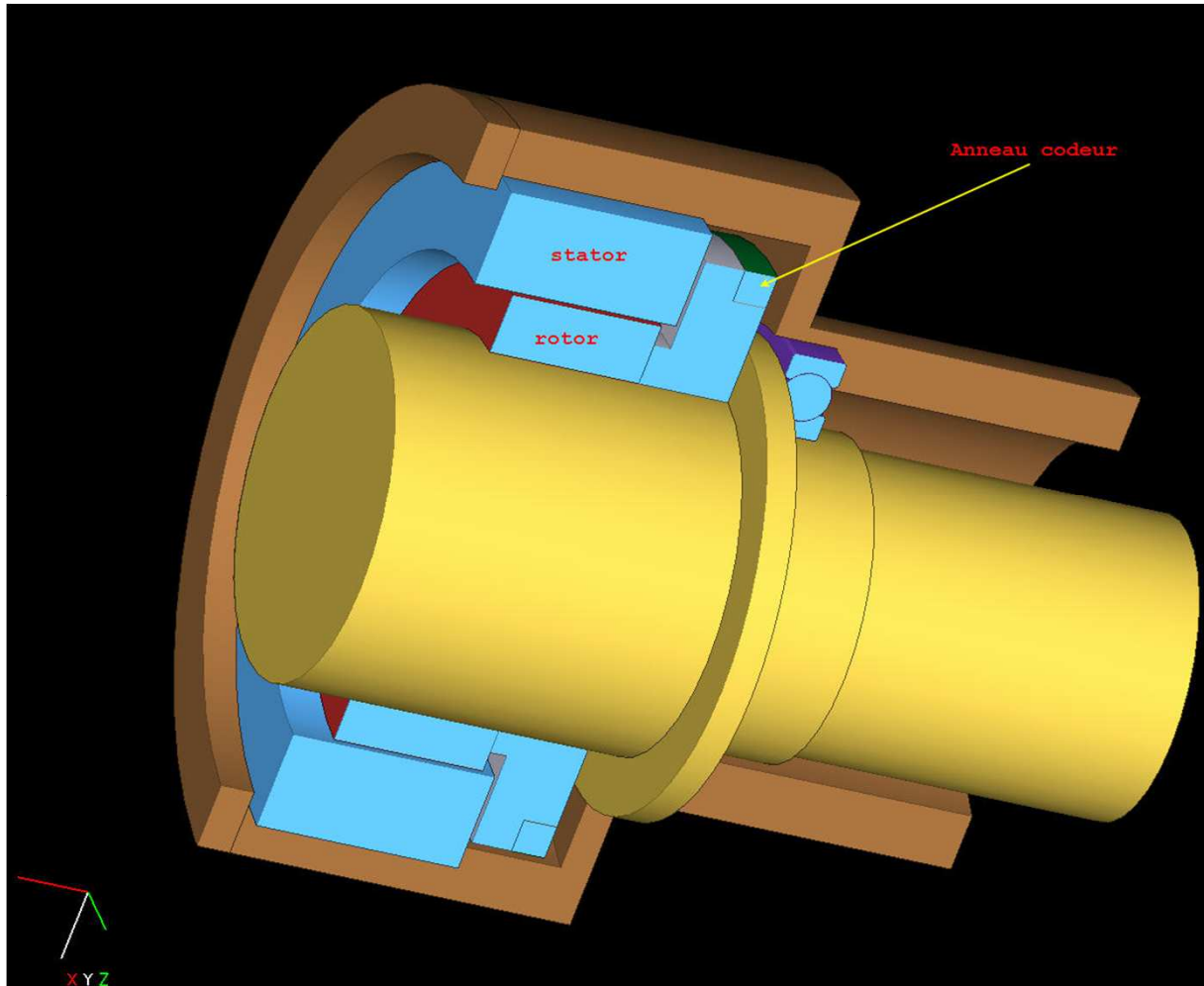
Le moteur

Architecture axiale (bobines)



Attention : couple faible !

Implémentation moteur-codeur

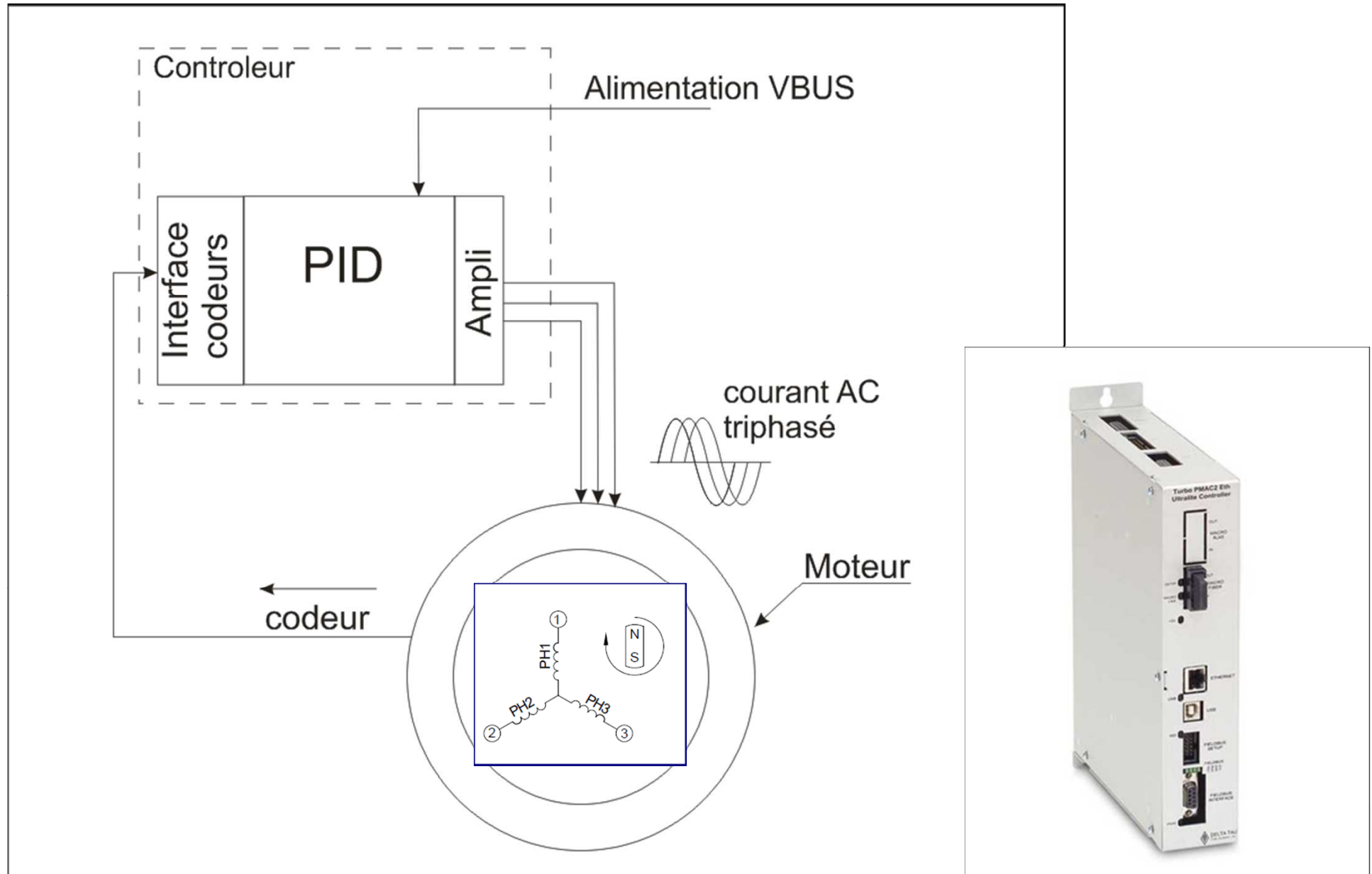


- Rotor
- Stator
- Codeurs

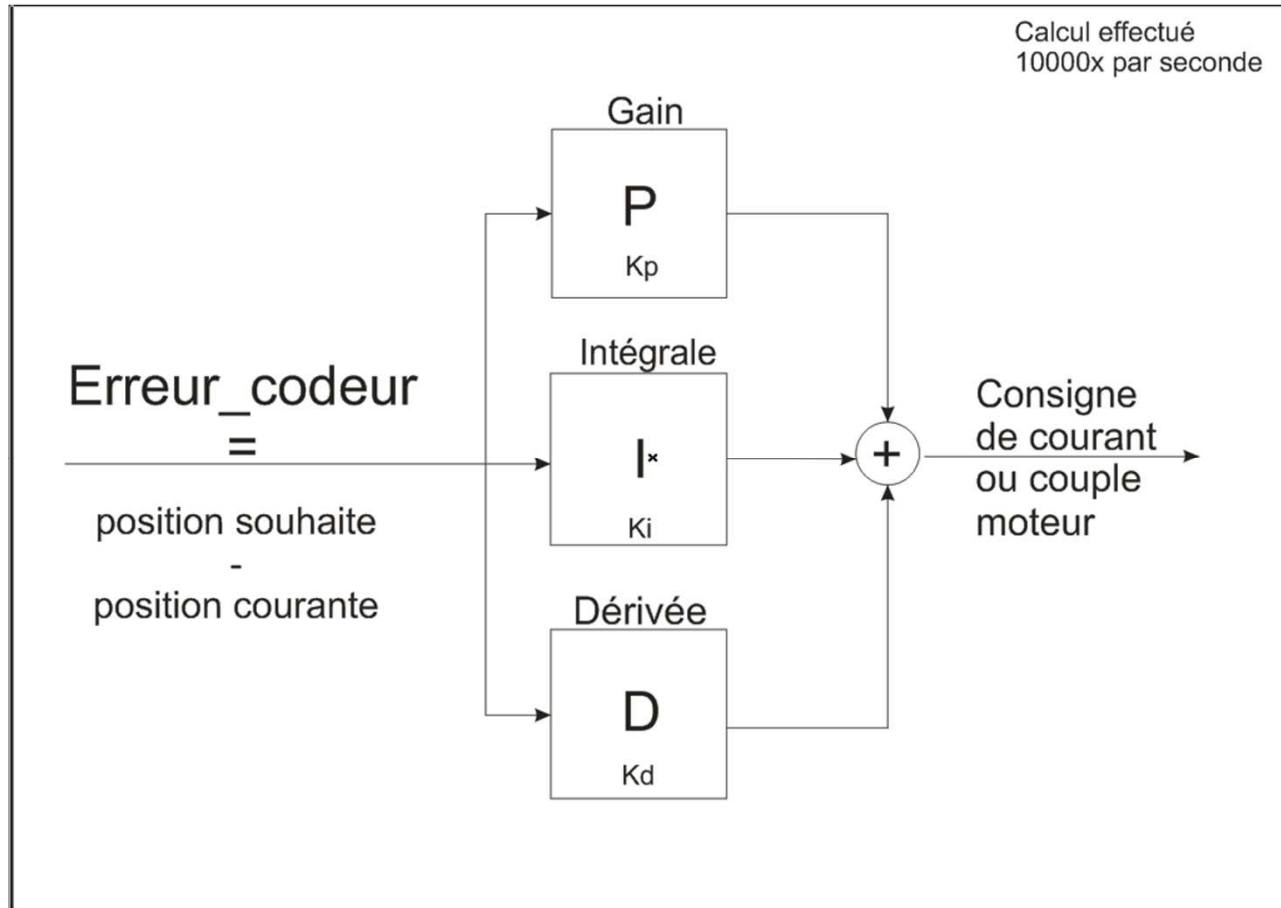
Moins de pièces
mécaniques

Attention : axe libre, un dispositif de freinage est souhaitable

Le contrôleur moteur/codeur



Asservissement de trajectoire avec P.I.D en boucle fermée

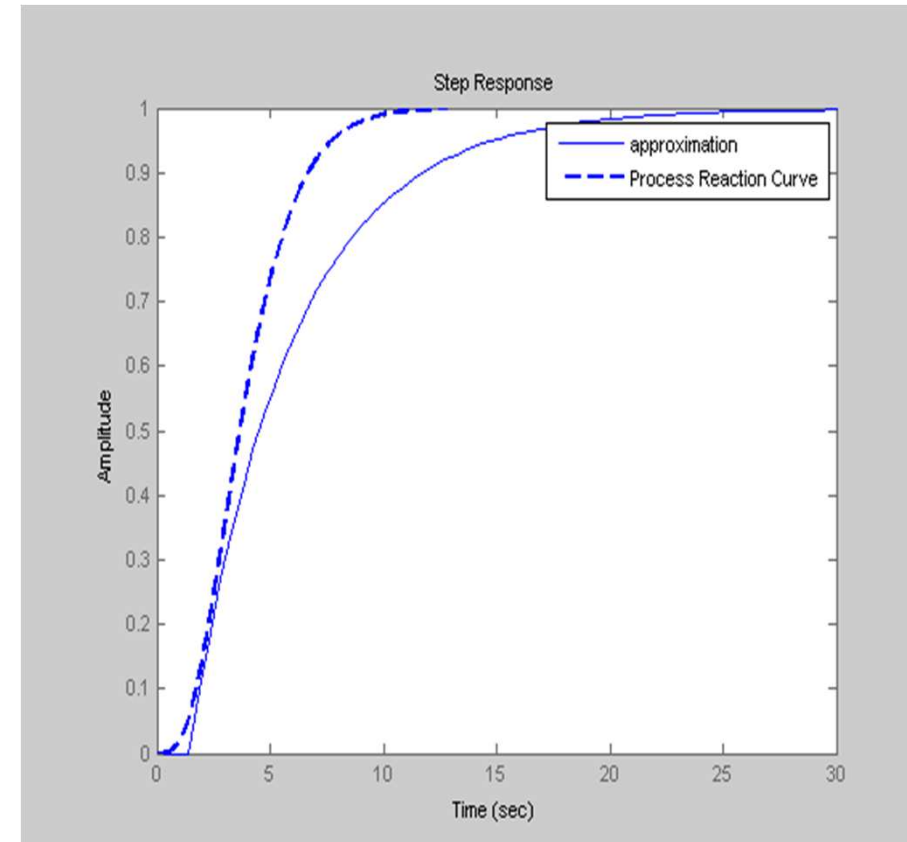
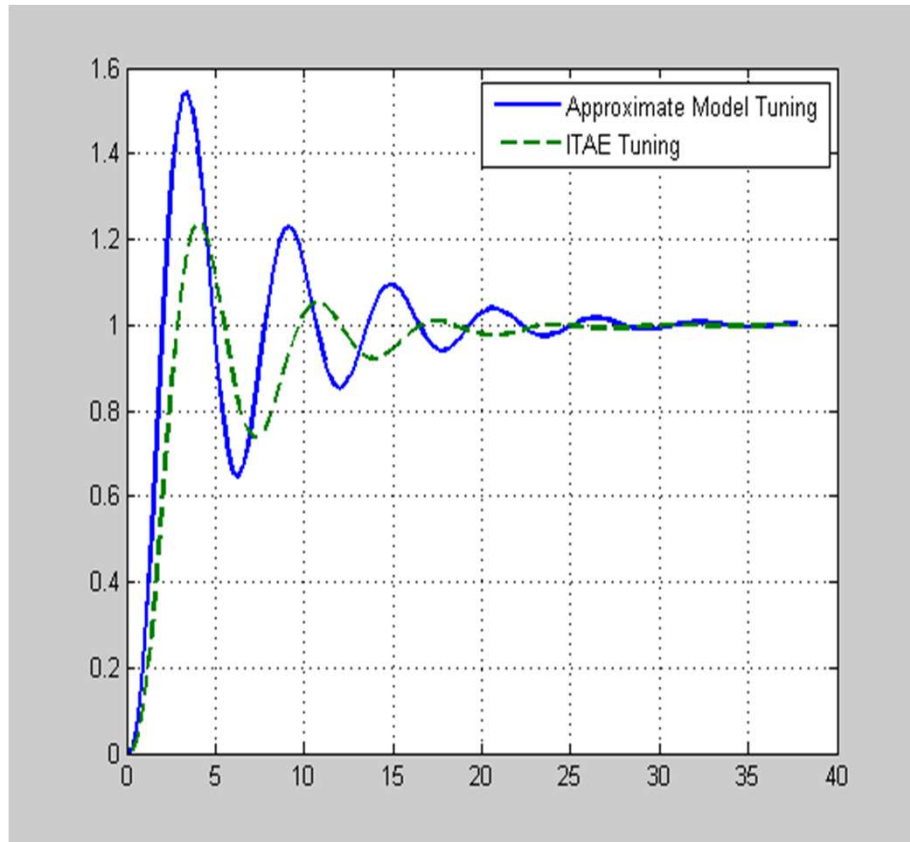


Réglages des paramètres de PID peuvent dépendre:

- De la vitesse
- De la charge sur le télescope.
- Détermine la stabilité du système

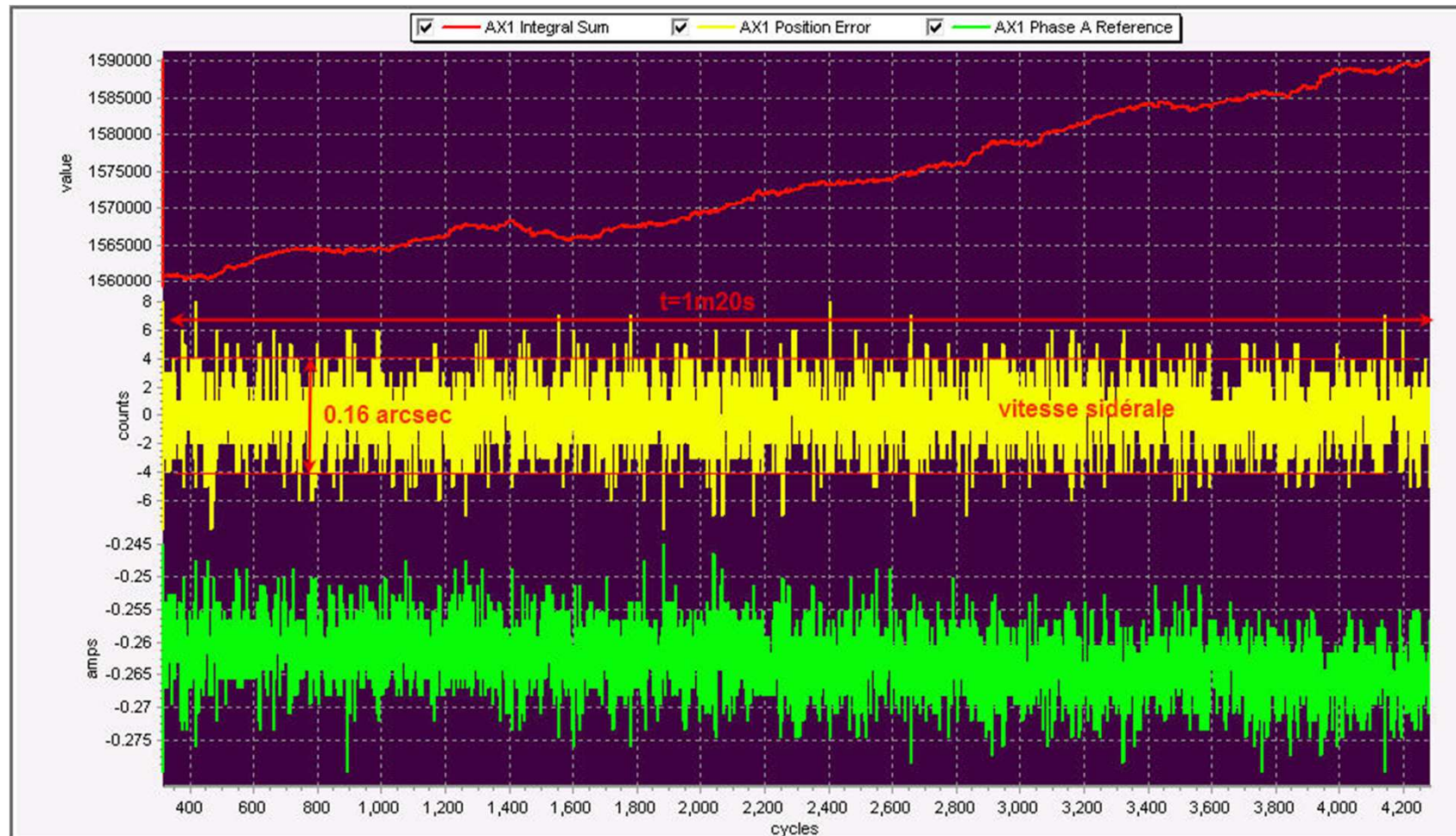
$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Asservissement de trajectoire avec PID en boucle fermée



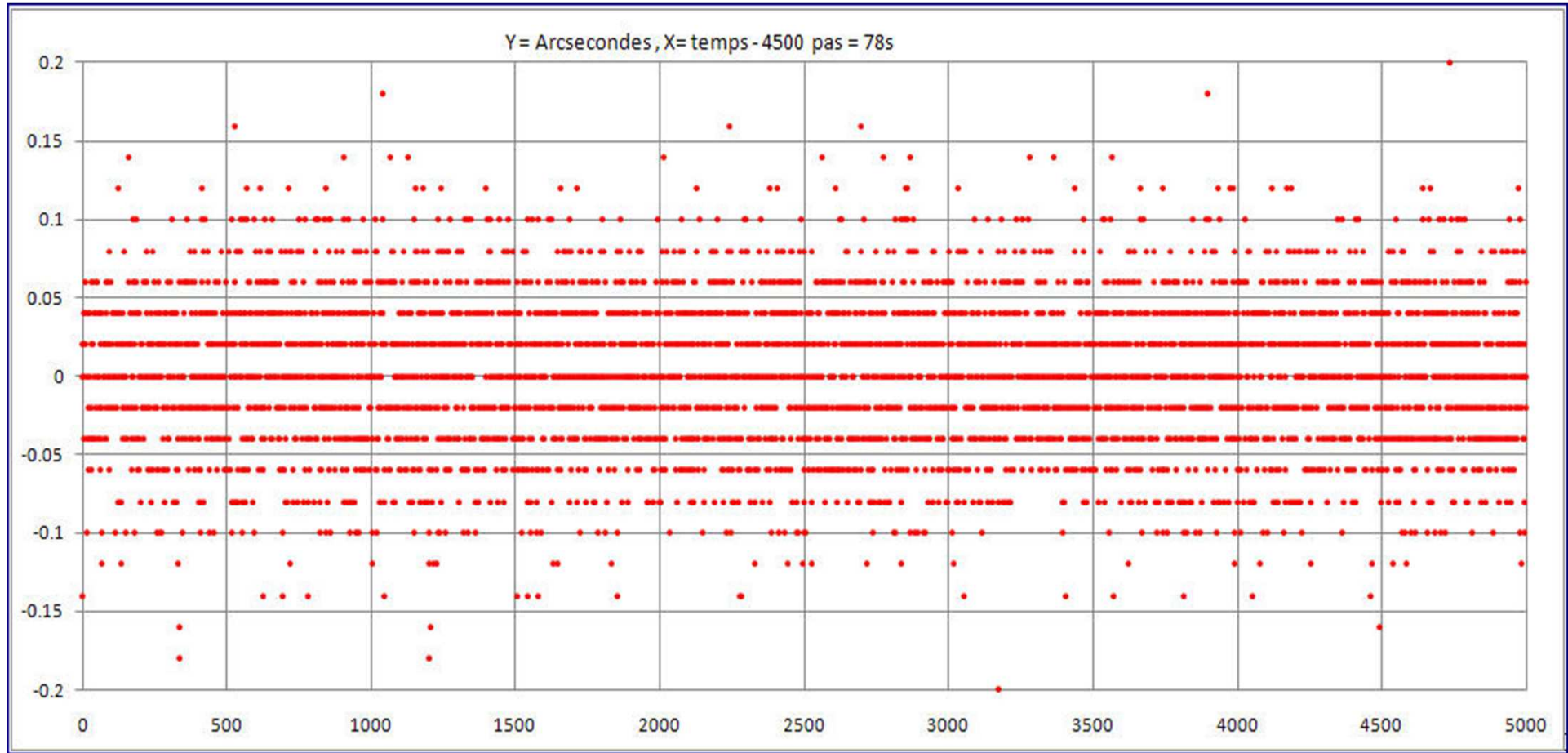
- On cherche : Un asservissement stable, rapide, réactif et robuste aux perturbations externes
- On évite : Oscillations, axe « mou » ou bruyant
- Outils de diagnostic (diagramme de Bode)

Résultat de réglage de PID



- Stable, précis sur les codeurs
- Consommation : moins de 5W par axe (télescope équilibré)

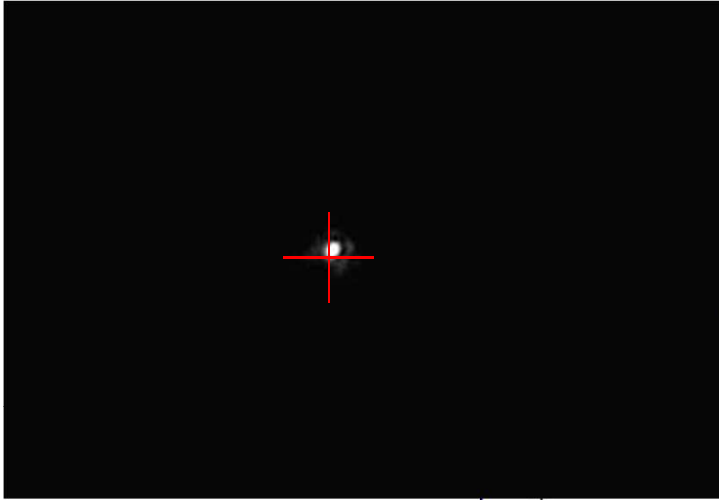
Réglage du PID : vitesse sidérale



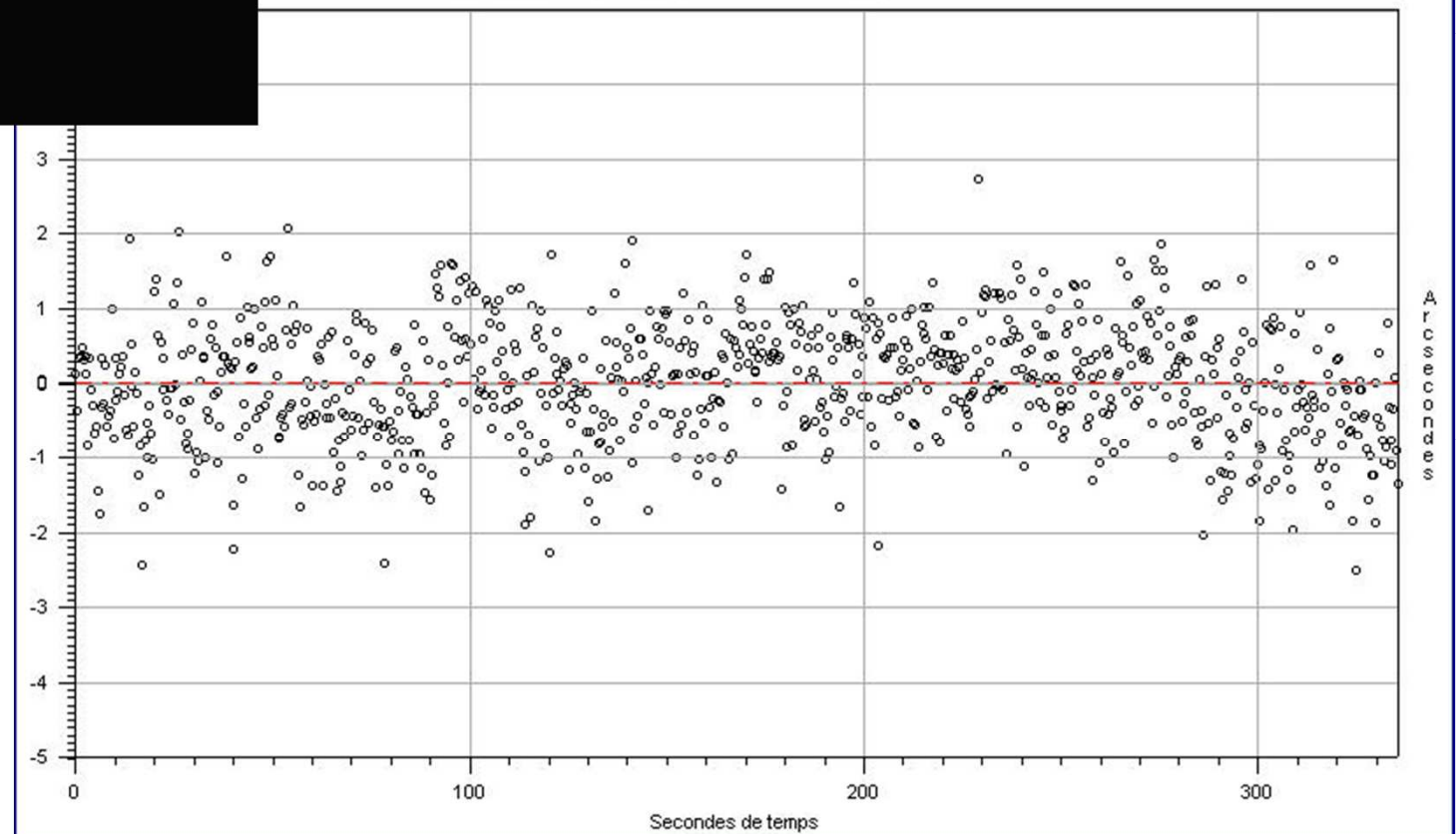
- ▣ Erreur de 0.12" RMS avec vitesse sidérale

Tests sur le ciel

- ▣ Mesure de la position d'une étoile à l'équateur céleste, 10 images/sec
- ▣ Camera DMK + PRISM
- ▣ Focale de 5 mètres
- ▣ « Tip-tilt » du à la turbulence



s H:\directdrives\Tests_sur_le_ciel\05_Mars_10_Barlow3x\arcturus2_alpha.txt



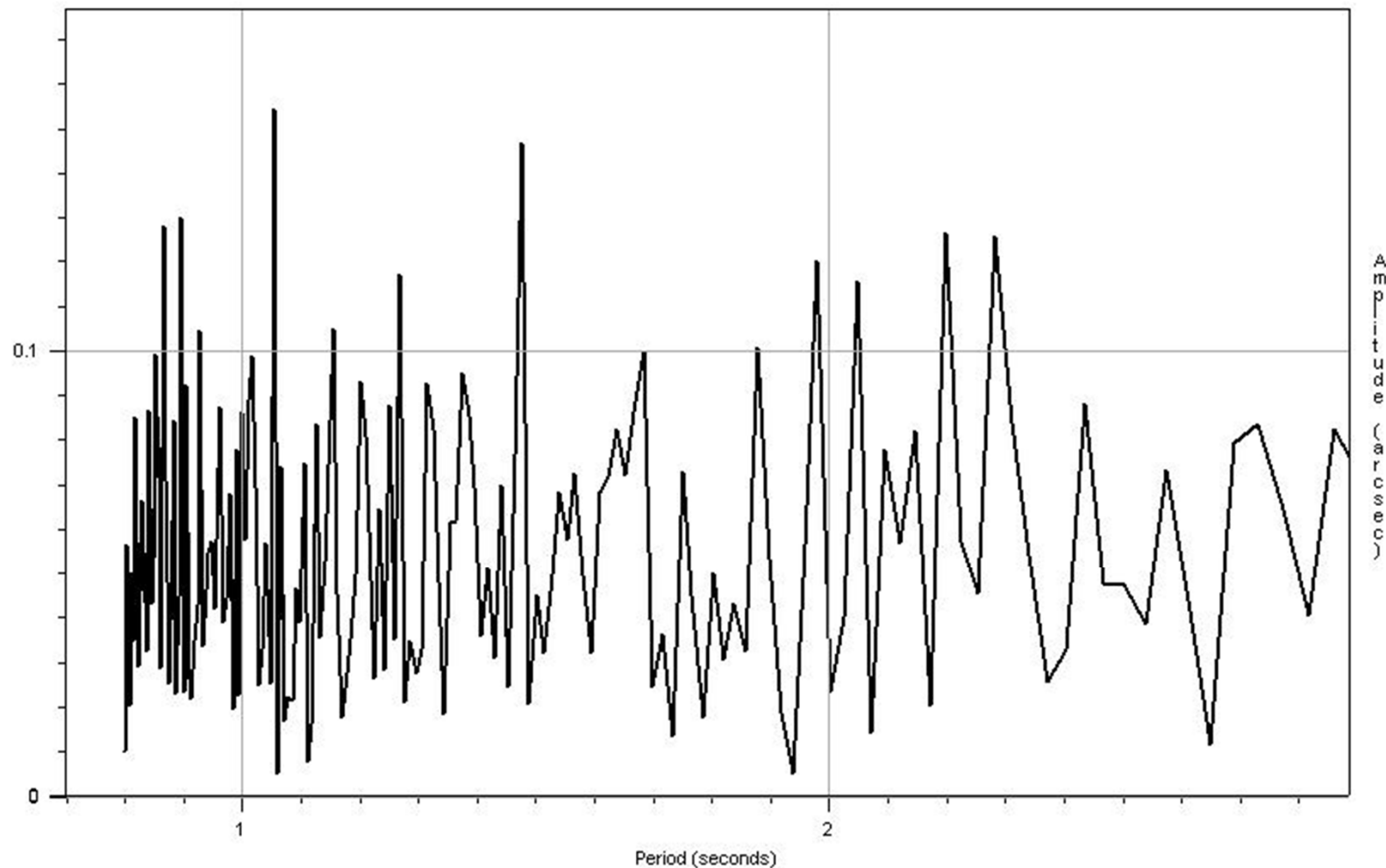
RESULTATS

- ▣ Zéro Erreur périodique
- ▣ Pas d'oscillations

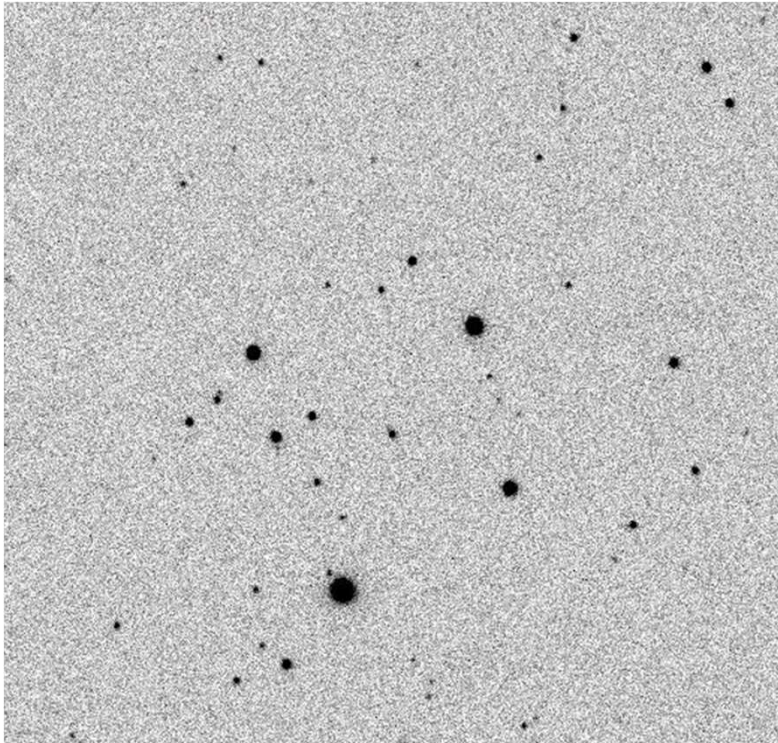
Tests sur le ciel

- ▣ Analyse spectrale par FFT pour trouver des pics d'oscillation
- ▣ Ici rien n'est visible, donc pas d'oscillations basse fréquence

Spectral Intensity (FFT)E:\Projets\Motorisations HW\directdrives\Tests_sur_le_ciel\05_Mars_10_Barlow3x\arcturus2_alpha.txt



Suivi sans guidage sur longue pose



- ▣ Focale de 1800mm, pixel de 7.4 μ m
- ▣ Echelle de 0.9" par pixel
- ▣ Poses de 600s
- ▣ Suivi SANS guidage
- ▣ Attention
 - ▣ Mise en station soignée
 - ▣ Pas de flexions de l'optique dans le tube
 - ▣ Réglage vitesse sidérale
- ▣ Elongation faible (avec seeing de 2.5")

Netteté					
Nbre d'étoiles	219		Seeing	2.53"	
	Median	Moyenne	Rms	Min	Max
FWHM	2.98	2.96	0.34	1.76	4.09
Angle (°)	-72	-40	60	-90	89
Elongation	16.4 %	22.4 %	18.0 %	0.8 %	113.0 %
* Unité = pixel					
OK					

« **Ca marche !** »

Réalisation du modèle de pointage par pointage sur des champs

Champs

Angle horaire Min (h) -9.0
Angle horaire Max (h) -0.5
Hauteur min (°) 20.0
Declinaison max (°) 80.0
Declinaison min (°) -5.0
Nbre étoiles pour astr. 100

Secteur du ciel à balayer
 Tout le ciel
 Coté Ouest du ciel
 Coté Est du ciel

Ecart en angle horaire (h) 1.3
Ecart en Declinaison (°) 15.0
Delai après pointage (sec) 10.0

Camera
Temps de pose (sec) 10.0
Fenêtre
 1:1 1:2 1:4

Binning
 1x1 2x2 3x3

Catalogue d'étoiles
 GSC-ACT
 USNO A2
 UCAC 2
 TYCHO II

Options
 Parcours aléatoire
 Sauver les images
Répertoire

N°	Angle H. Theo	Delta App. Theo	Angle H. Mes	Delta App. Mes	Distance
1	-02h53m28.100s	-00°01'19.98"	-02h53m14.570s	-00°01'53.44"	3.4 arcmin
2	-01h34m38.380s	-00°01'03.65"	-01h34m23.580s	-00°01'18.45"	3.7 arcmin
3	-04h09m47.860s	+14°58'50.32"	-04h09m44.300s	+14°58'28.92"	55.9 arcsec
4	-02h50m58.610s	+14°59'12.80"	-02h50m55.970s	+14°58'35.41"	53.5 arcsec
5	-01h32m09.652s	+14°59'22.64"	-01h32m06.855s	+14°59'01.54"	45.7 arcsec
6	-05h25m16.300s	+29°58'46.04"	-05h25m26.670s	+29°58'39.96"	2.7 arcmin
7	-04h06m26.050s	+29°59'18.39"	-04h06m39.060s	+29°58'49.96"	2.9 arcmin
8	-02h47m37.450s	+29°59'33.93"	-02h47m51.680s	+29°58'51.67"	3.2 arcmin
9	-01h28m48.980s	+29°59'41.33"	-01h23m03.662s	+29°59'03.68"	3.2 arcmin
10	-06h39m53.000s	+44°58'35.14"	-06h40m30.610s	+44°58'26.26"	6.7 arcmin
11	-05h21m03.269s	+44°59'15.84"	-05h21m40.980s	+44°58'44.12"	6.7 arcmin
12	-04h02m14.330s	+44°59'37.92"	-04h02m52.910s	+44°58'49.47"	6.9 arcmin
13	-02h43m25.230s	+44°59'50.36"	-02h44m05.531s	+44°58'48.95"	7.2 arcmin
14	-01h24m36.480s	+44°59'56.78"	-01h25m17.790s	+44°59'03.98"	7.3 arcmin
15	-07h53m37.460s	+59°58'32.80"	-07h55m05.523s	+59°58'07.60"	11.0 arcmin
16	-06h34m49.380s	+59°59'09.59"	-06h36m16.610s	+59°58'22.10"	10.9 arcmin
17	-05h16m00.065s	+59°59'35.90"	-05h17m27.360s	+59°58'33.39"	11.0 arcmin
18	-03h57m11.560s	+59°59'53.91"	-03h58m40.670s	+59°58'44.66"	11.2 arcmin
19	-03h54m00.000s	+60°00'00.00"	?	?	Echec : Reconnaissance des listes
20	-01h19m33.480s	+60°00'11.64"	-01h21m06.769s	+59°59'16.90"	11.7 arcmin
21	-07h48m38.430s	+74°59'09.79"	-07h52m31.960s	+74°58'23.37"	15.2 arcmin
22	-06h29m51.740s	+74°59'31.71"	-06h33m43.230s	+74°58'22.05"	15.0 arcmin
23	-05h11m03.599s	+74°59'52.32"	-05h14m55.600s	+74°58'25.50"	15.1 arcmin
24	-03h52m13.550s	+75°00'08.74"	-03h56m11.300s	+74°59'17.64"	15.4 arcmin
25	-02h33m22.990s	+75°00'21.14"	-02h37m26.020s	+74°59'17.58"	15.8 arcmin
26	-01h14m31.880s	+75°00'28.86"	-01h18m39.000s	+74°59'40.67"	16.0 arcmin

Parcours des champs terminé ! Il a duré 21.5 minute(s) et 1/26 champs ont échoués...

Créer la liste des champs Démarer Nbre champs : 26 champs

ARTEMIS CCD ATIK-460ex -> -15.0°C [...]

ARTEMIS CCD ATIK-460ex

- ▣ Pointage du ciel sur différents champs pour établir le modèle
- ▣ 50 champs en 1/2h

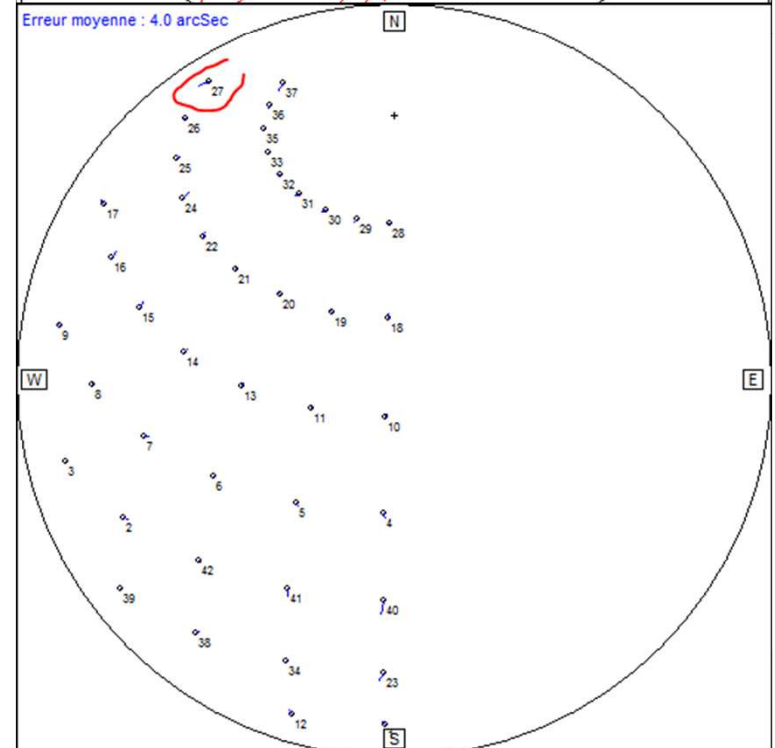
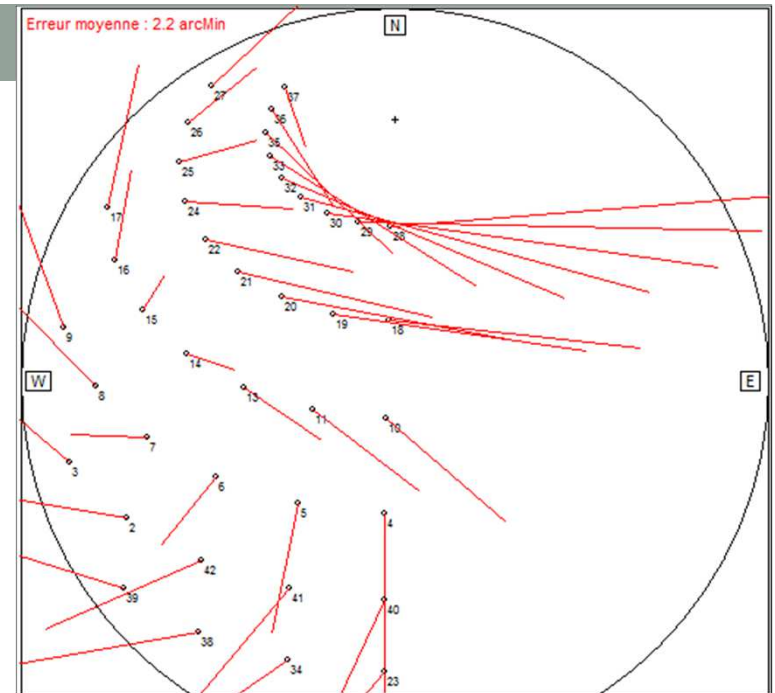
Modèle de pointage

Activer dans le calcul			
Erreur de collimation	<input checked="" type="checkbox"/>	Décalage horaire (IH)	-6.6 arcMin
Perpendicularite Alpha,Delta	<input checked="" type="checkbox"/>	Décalage delta (ID)	9.1 arcSec
Erreur axe polaire Nord-Sud	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur de collimation -Axe delta/optique(CH)	2.8 arcMin
Erreur axe polaire Est-Ouest	<input checked="" type="checkbox"/>	Non perpendicularité axes Delta/Alpha (NP)	-1.9 arcMin
Erreur due à la flexion de tube	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur d'alignement polaire azimutal (MA)	-1.6 arcMin
Erreur due à la flexion de fourche	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur d'alignement polaire hauteur (ME)	2.5 arcMin
Erreur porte à faux axe Delta	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur due à la flexion de tube (TF)	-2.4 arcMin
Erreur due à la flexion axe Delta	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur due à la flexion de fourche (FO)	-1.5 arcMin
Erreur perpendicularité dynam.	<input type="checkbox"/>	Erreur due porte à faux l'axe delta (DAF)	-3.4 arcMin
Erreur codeur Alpha (Cos)	<input type="checkbox"/>	Erreur due à la flexion de l'axe delta (DAB)	-9.2 arcSec
Erreur codeur Alpha (Sin)	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur de non perpendicularité dynam. (DNP)	N/D
Erreur codeur Delta (Cos)	<input type="checkbox"/>	Erreur centrage codeur Alpha-cos (HCEC)	N/D
Erreur codeur Delta (Sin)	<input checked="" type="checkbox"/>	Erreur centrage codeur Alpha-sin (HCES)	50.6 arcSec
	<input type="checkbox"/>	Erreur centrage codeur Delta-cos (DCEC)	N/D
	<input type="checkbox"/>	Erreur centrage codeur Delta-sin (DCES)	-28.3 arcSec
	<input type="checkbox"/>	Résidu en ALPHA	2.6 arcSec
	<input type="checkbox"/>	Résidu en DELTA	3.7 arcSec
	<input type="checkbox"/>	Résidu TOTAL (avant=2.2 arcMin)	4.5 arcSec

Latitude (degrés) : 45.538

Calcul...

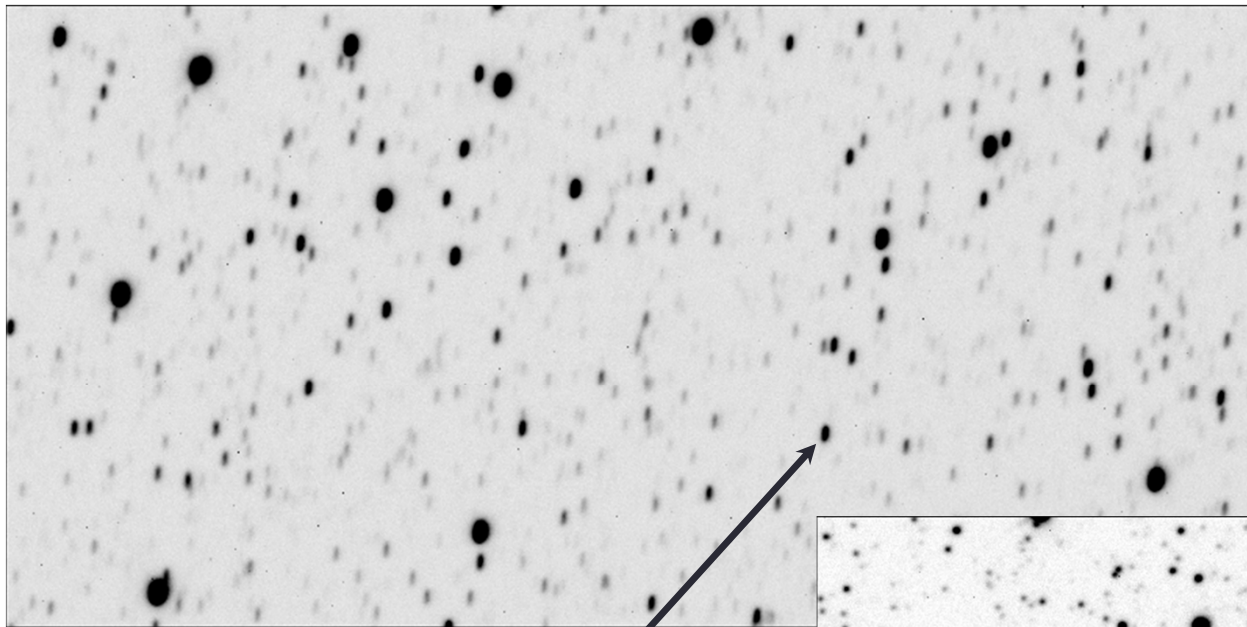
Sauver fichier des resultats (.cor)



- ▣ Passage de 2.2' à 4.5 '' rms d'erreur
- ▣ Erreur de mise en station et de flexion de tube compensées au premier ordre.
- ▣ Erreur excentrement codeurs
- ▣ Sert au modèle de vitesse

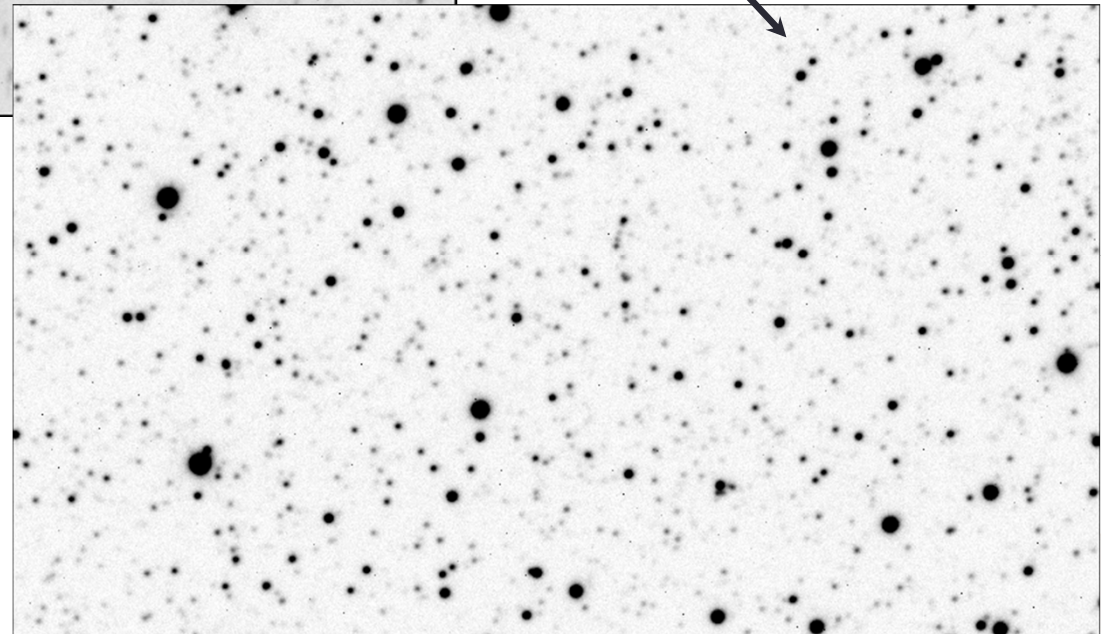
Modèle de vitesse

- Calculé à partir du modèle de pointage

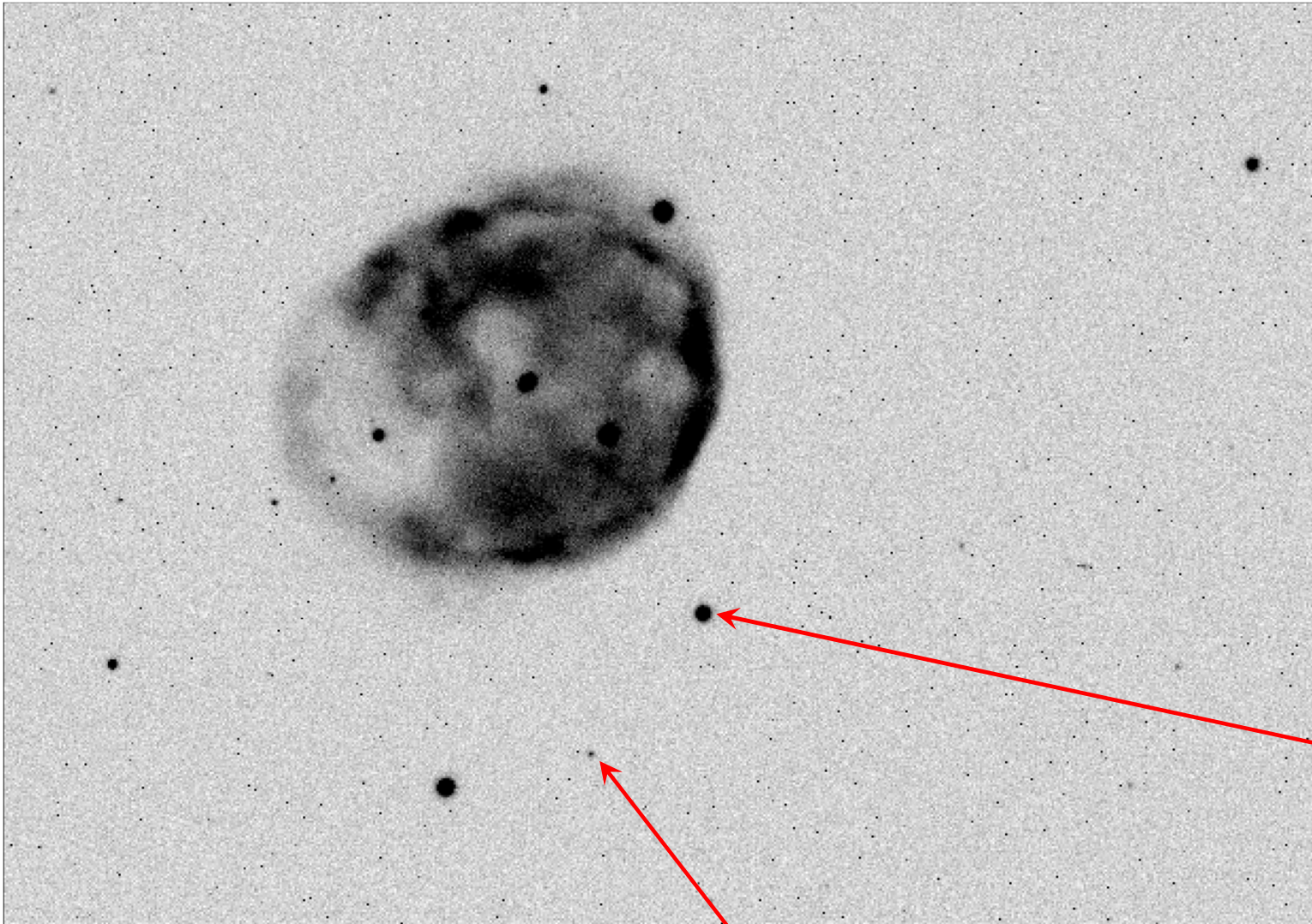


600s, sans modèle de vitesse

600s, avec modèle de vitesse

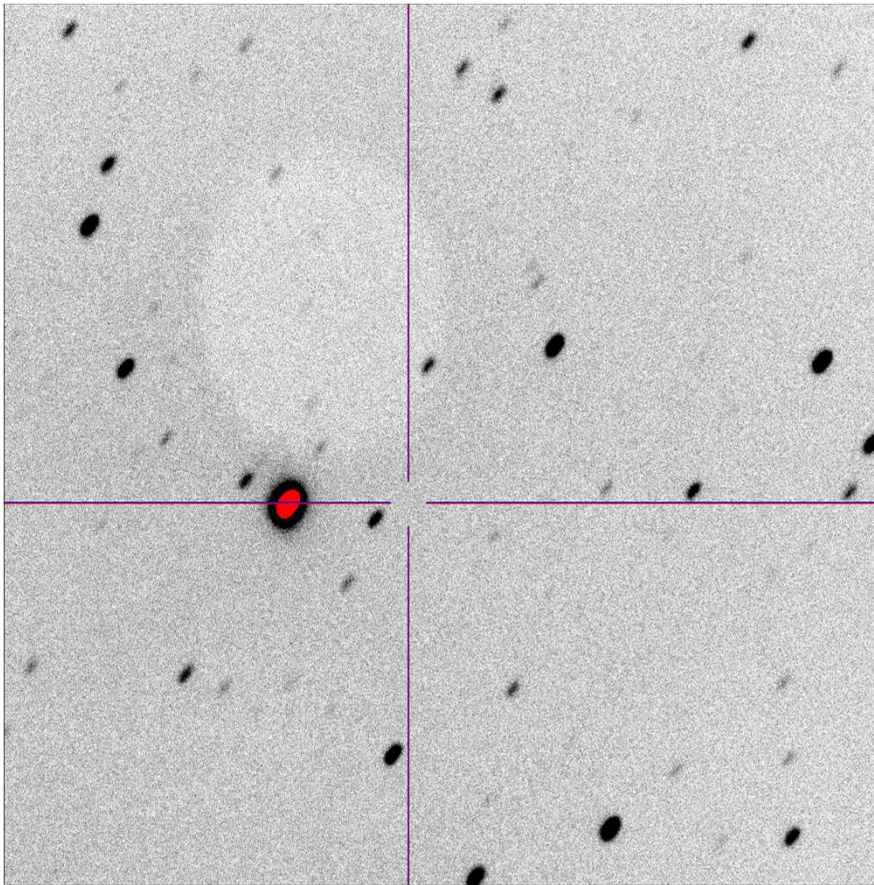


Pose de 900s sans guidage : 1.2"/pixel (Nova 120)

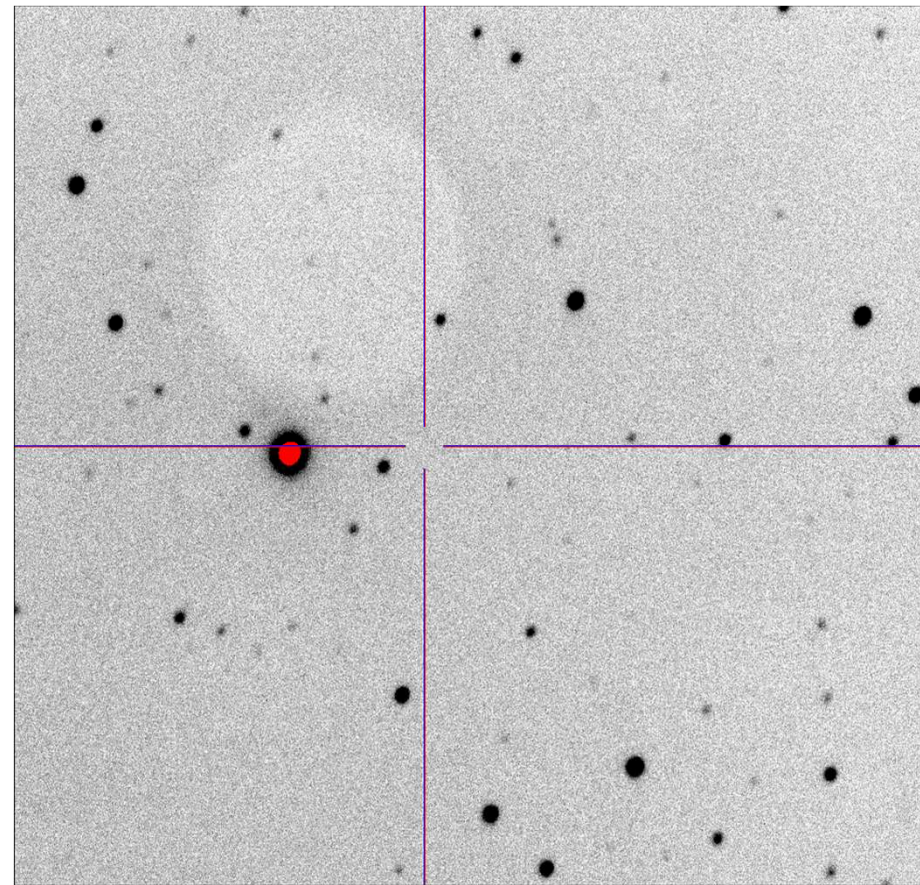


Correction de vitesse (réfraction)

- A $+10^\circ$ au dessus de l'horizon



Sans compensation de réfraction

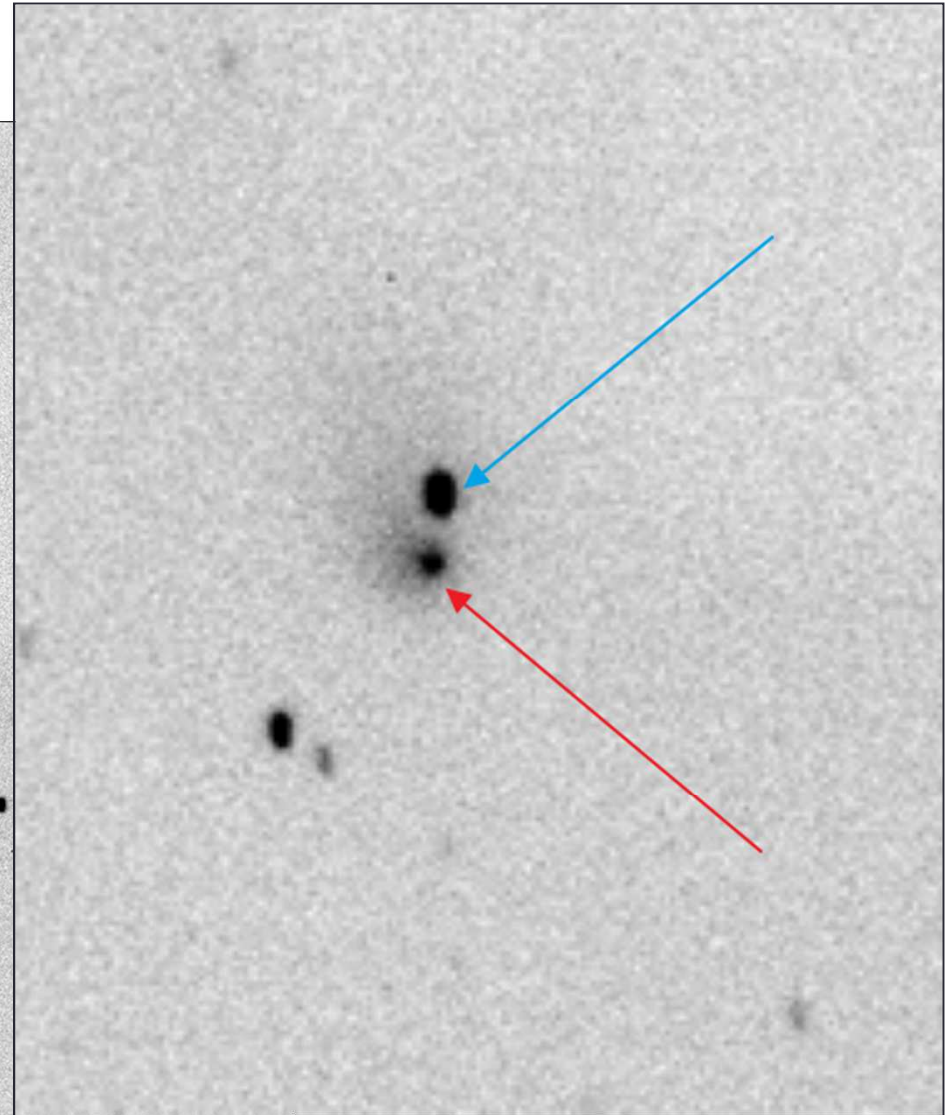
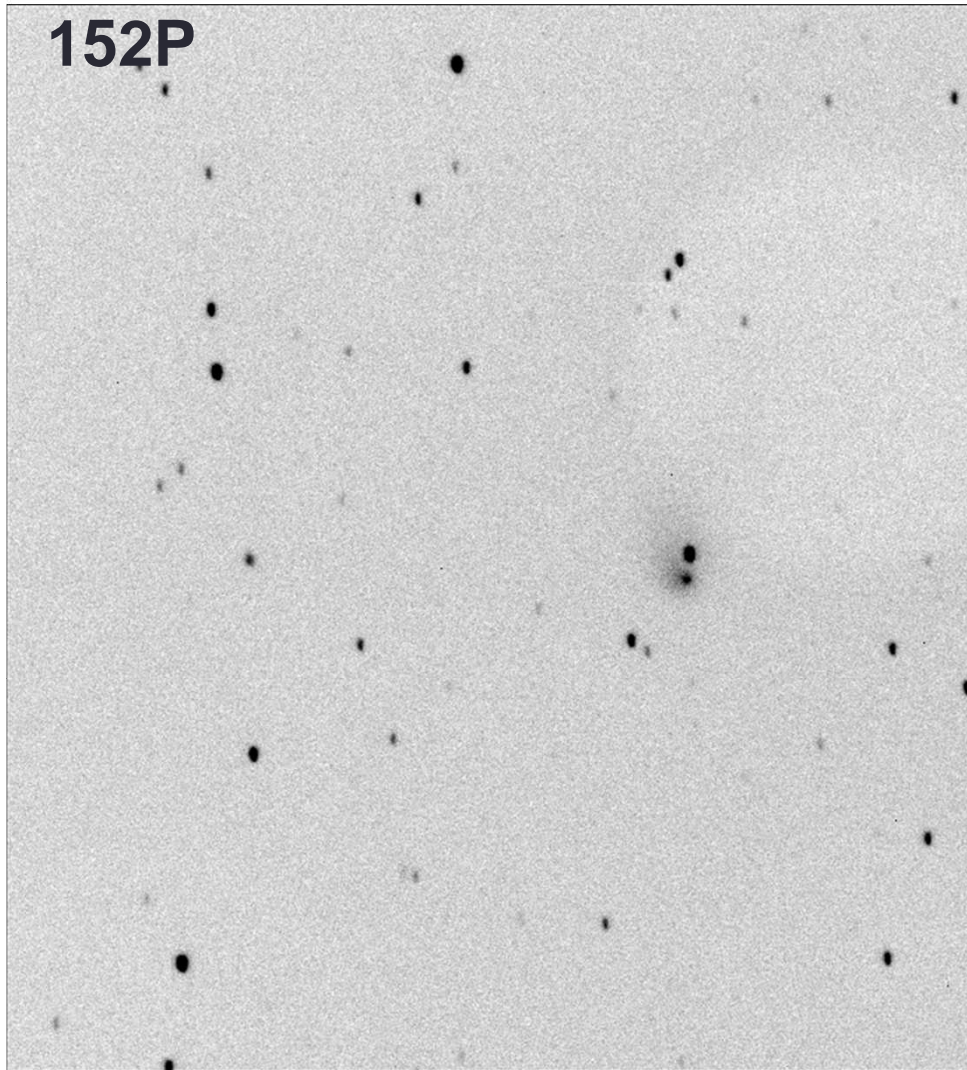


Avec compensation de réfraction

Objets mobiles : comète

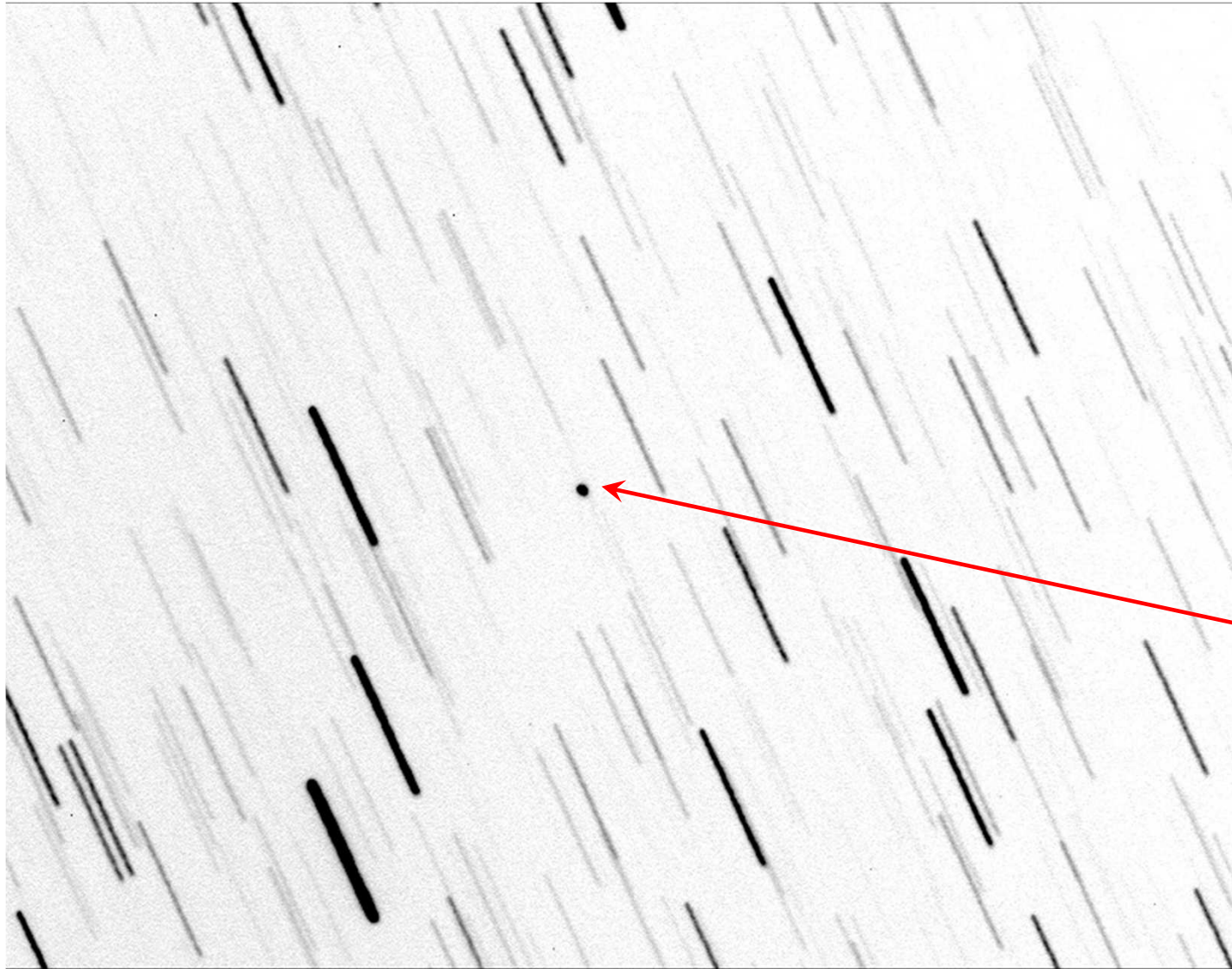
Comète

152P



**ALCOR
SYSTEM**

Objets mobiles : astéroïde rapide



- 2006DP14
- 0.08 ua
- 10 min de pose
- 12 arcmin/h

Pilotage de la monture

DDR ASTRO - Panneau de contrôle [1.0.7 28/10/2013]

Configuration Déconnecter Options Quitter A propos

Etat système
Alpha **Connecté** Delta **Connecté**
Axe mode "suivi" + Axe mode "suivi" +

Equinoxe 2000 Er. Pos.

ALPHA (app.)	23h58m38.226s	-0.03"
DELTA (app.)	+135°38'09.78"	-0.03"
Angle HOR.	+00h19m29.330s	

AZIMUT +536°31'09.61"
HAUTEUR -00°03'15.27"

Erreur totale 0.03"

Vitesse ALPHA (app.)	-14.9" /sec	49 mW
Vitesse DELTA (app.)	0.0" /sec	75 mW

Etat système : En cours de suivi sidéral [Tube Est]
+ Modèle de pointage inactif

ASCOM Standards for Astronomy

Coordonnées de pointage Eq 2000.0 Apparent

Alpha = 00 h 00 m 00.000 s
Delta = 00 ° 00 ' 00.000 " N **ALLER!**

Offsets
Direction ALPHA 0 Unités " ' ° **ALLER!**
Direction DELTA 0 unités " ' ° **ALLER!**

STOPPER LE POINTAGE

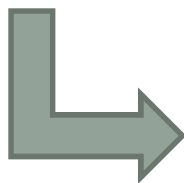
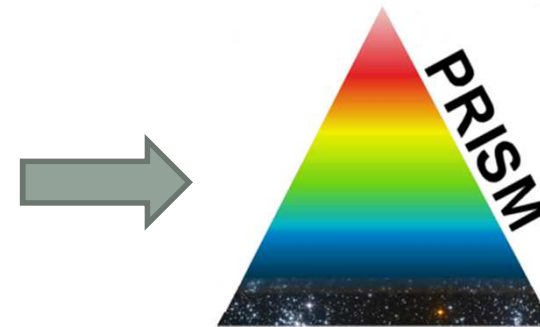
Vitesse Parking
Angle hor. (h) 1.00 DEC (°) -10.00
Parker la monture

Calibrer sur une position **Cal.**
Trouver la position **→**
Calibration codeurs abs. **OK**

Vitesse : 0.7 "/sec
Arrêt suivi sidéral

Vecteur vitesse différentielle
Prédéfini
 Aucune
 Vitesse lunaire
 Vitesse solaire
 Vitesse utilisateur
 Vitesse comète/astéroïde

Vitesse différentielle (arcsec/h)
Direction ALPHA 0



File Edit Display Orientation Input Tools Telescope Help

Look North Look East Look South Look West Look Up Move Up Move Down Move Left Move Right Zoom In Zoom Out 100° x 100°

Computer Clock 11:14:11 pm November /04/ 2013 Go Backward Step Backward Stop Step Forward Go Forward 1x (realtime) Show Stars Show Variable Stars

Telescope ASCOM Telescope Driver
Start Up Tools Shut Down
Pointing at sidereal rate

Click position
Center Cross Hairs
Set Track Rates Add Pointing Sample
h for: Find

Quelques résultats

- Monture direct-drive N120
- A distance (sans personne)
- T400 F3.5
- **Pas de caméra de guidage**
- Atik 383L+ / roue a filtre
- Dans le Sud de la France
- Poses individuelles de 5, 8 ou 10 minutes.
- Poses cumulées de plusieurs heures réparties sur plusieurs nuits.
- Opéré a distance (300km)

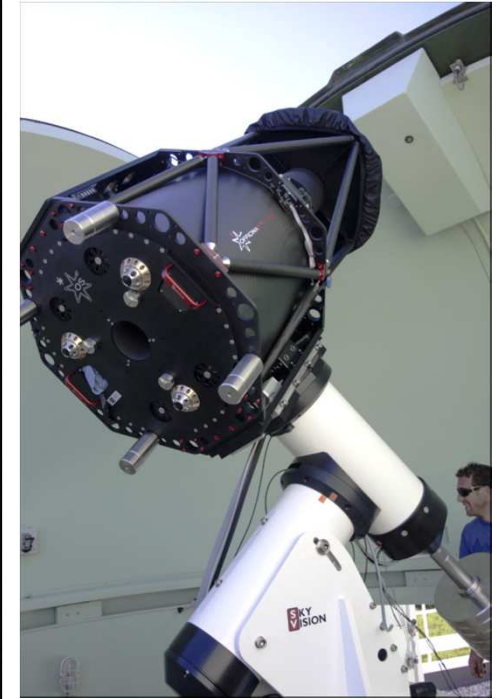
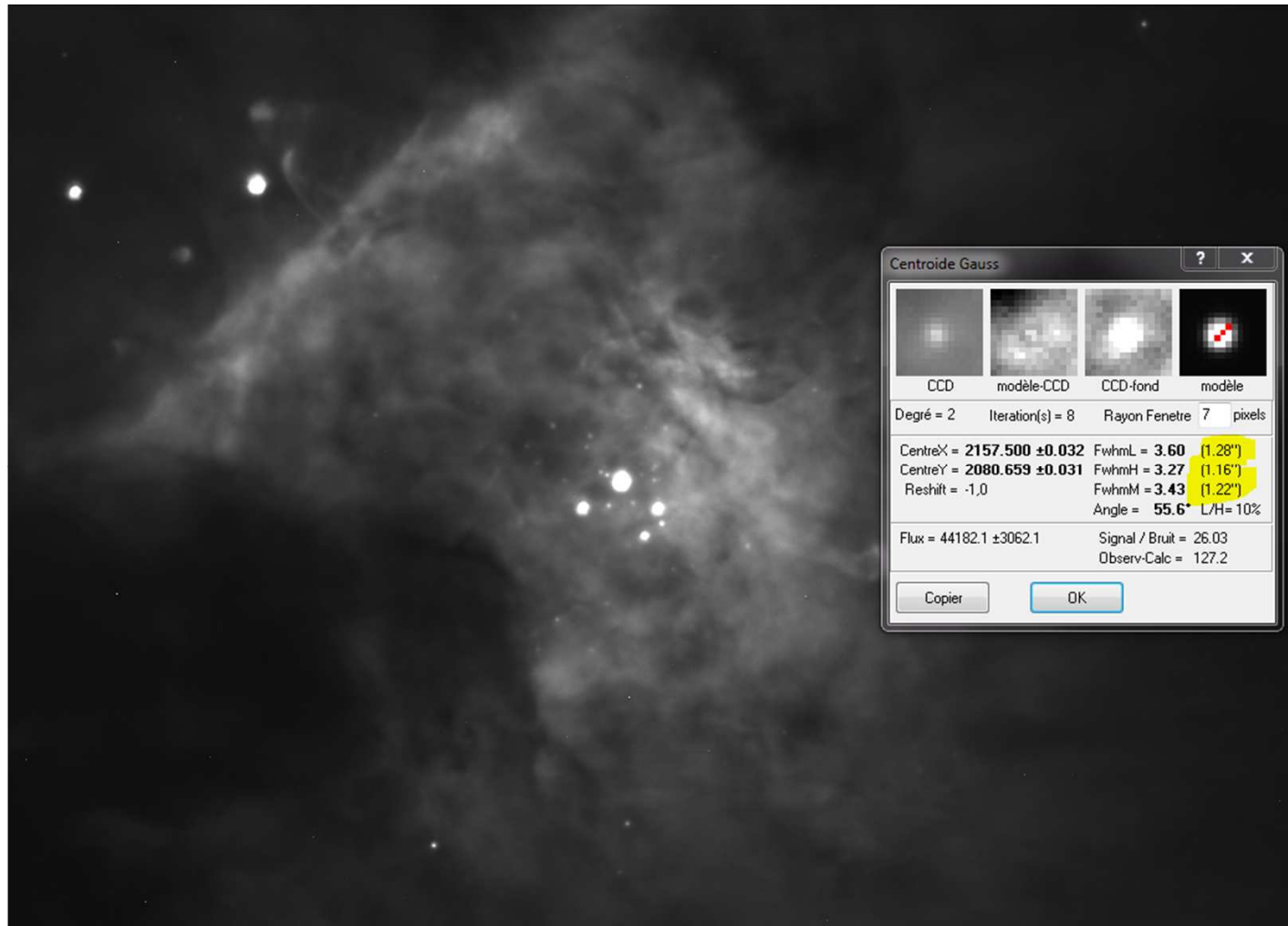






Pas de guidage

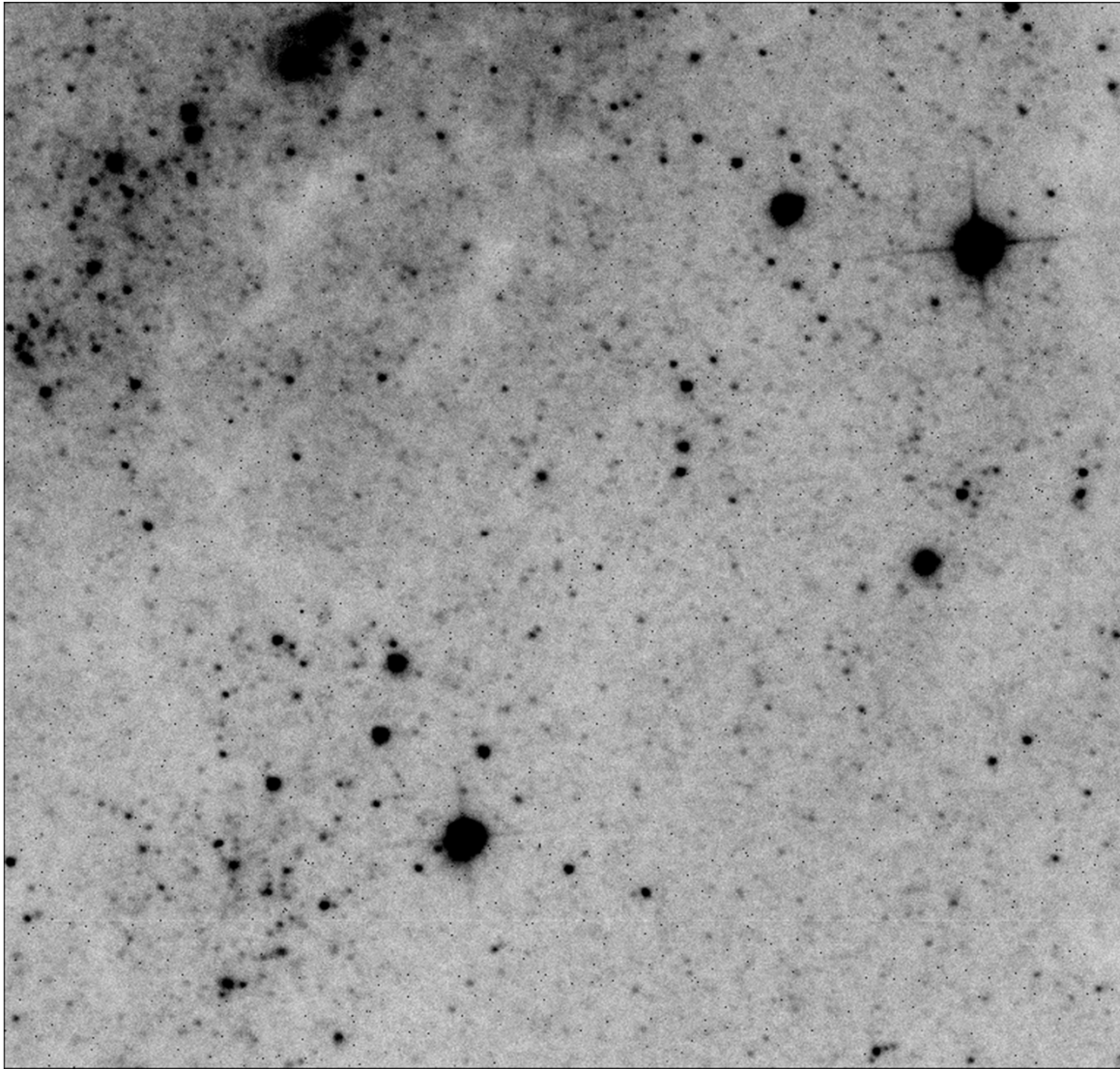
NOVA 200 : T600 F=5215 mm, 0.35"/pixel



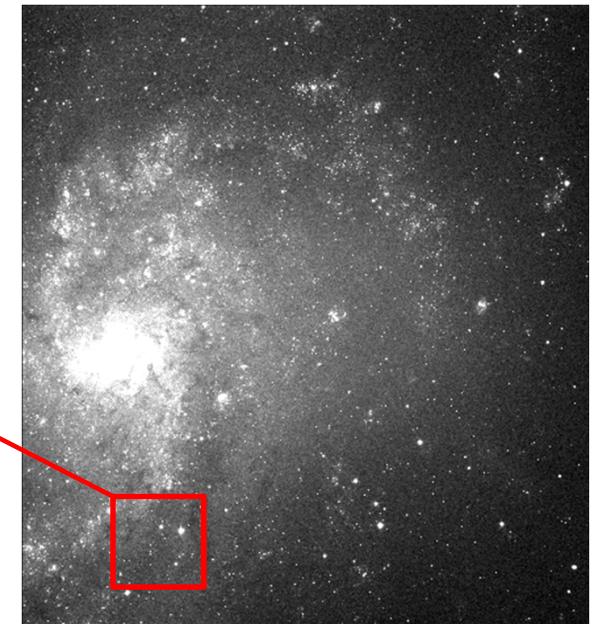
Obs Mars

- ▣ 1.2 " de largeur à mi hauteur
- ▣ Pas de vibrations, ni d'altération d'image
- ▣ 4.5" résidus après modèle de pointage

NOVA 200 : T600 F=5215 mm, 0.35"/pixel



- Image de 600s de pose pas de guidage.
- M33 : 4' x 5' de champ



Conclusion

- Concept validé et performant
- Plus de roue, vis et pignons : pas de jeux, ni d'erreurs de taille
- Suivi parfait
- Possibilités de suivi différentiel :
 - Modèle de pointage, objets se déplaçant lentement, vitesse de modèle de pointage, compensation de la réfraction
- Va sans doute se généraliser
- Cout ?
 - Pour un télescope ≥ 500 mm pas plus qu'un système roue et vis.
 - Pour des télescope < 500 mm, les couts sont plus important qu'un système classique vis sans fin/roue
- Electronique et logiciel délicats

MERCI de votre attention

Des questions ?