

MOTORISATION DIRECTDRIVE POUR NOS TELESCOPES

Par C.CAVADORE

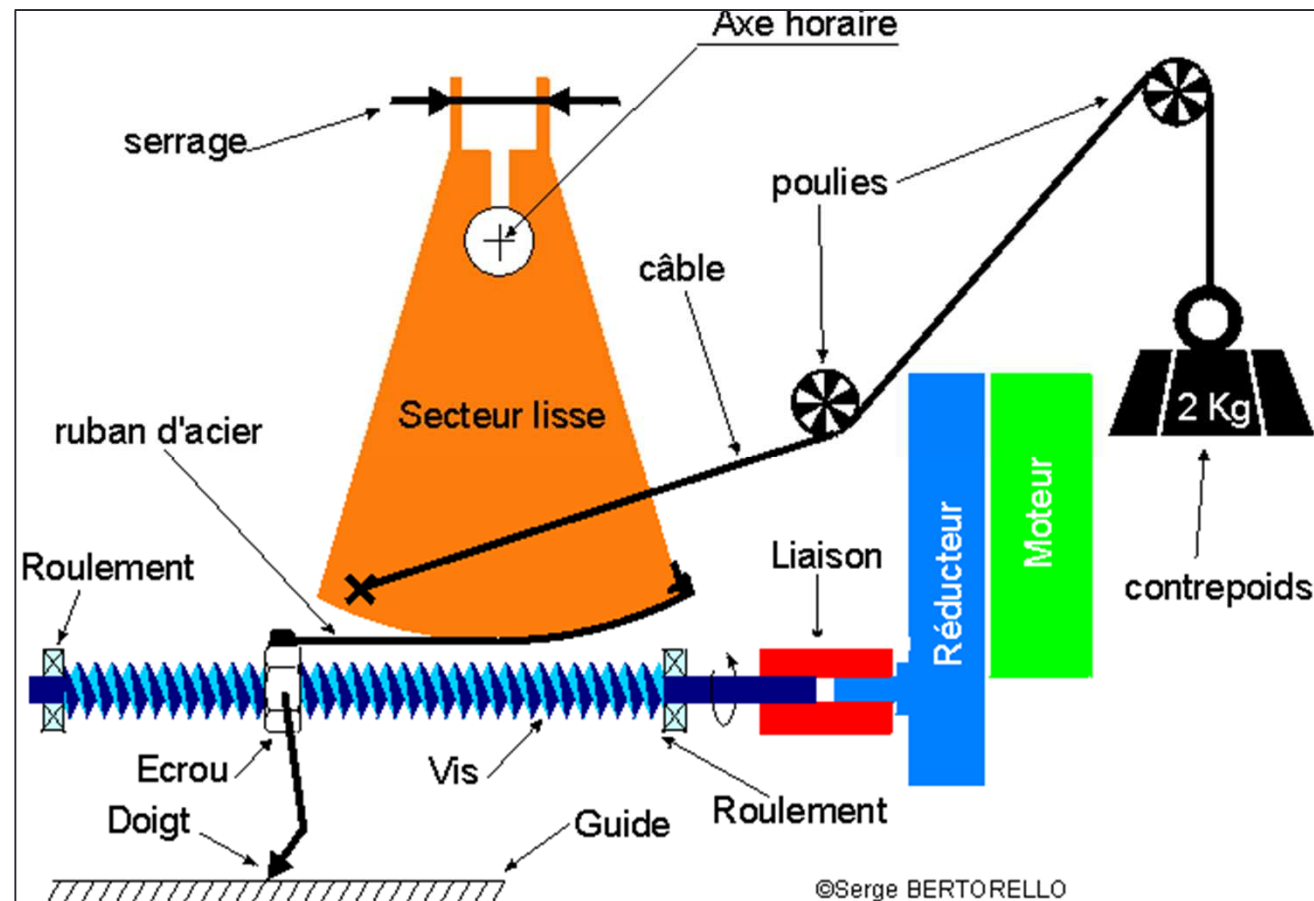
ALCOR-SYSTEM

WETAL 2013 – 10 Nov

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



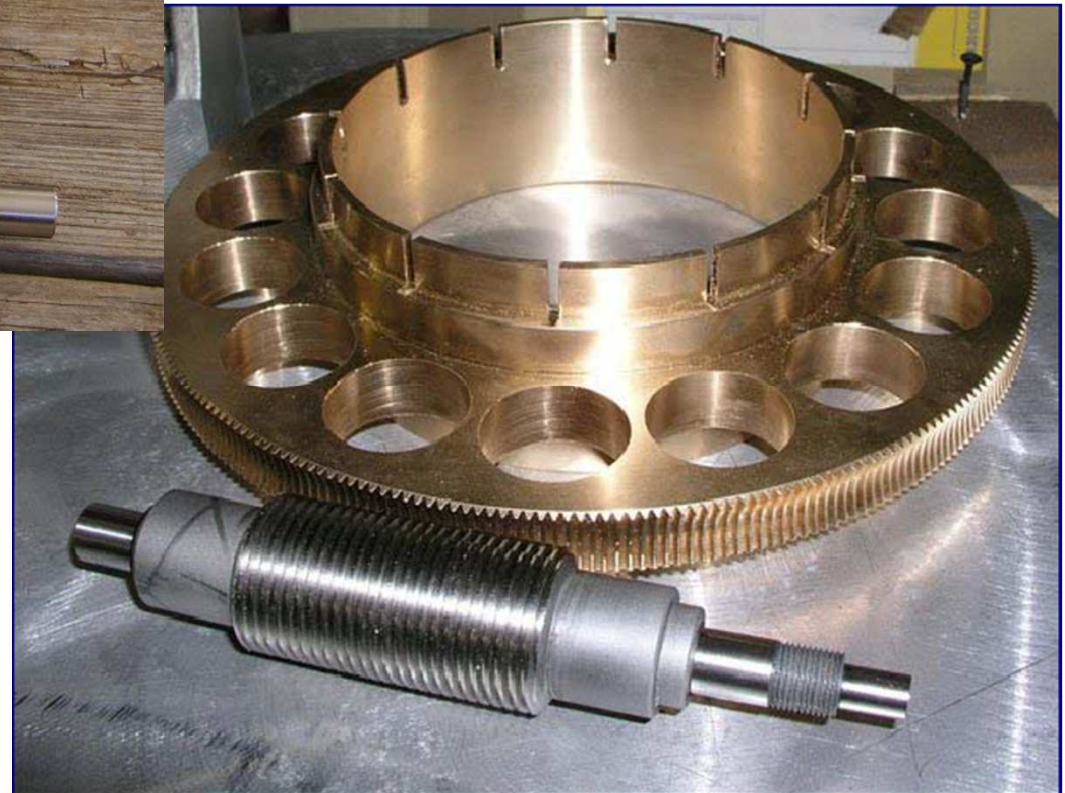
- Faible cout, assez précis si pièces bien usinées
- Mais pas de « Goto », et rembobinages requis

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



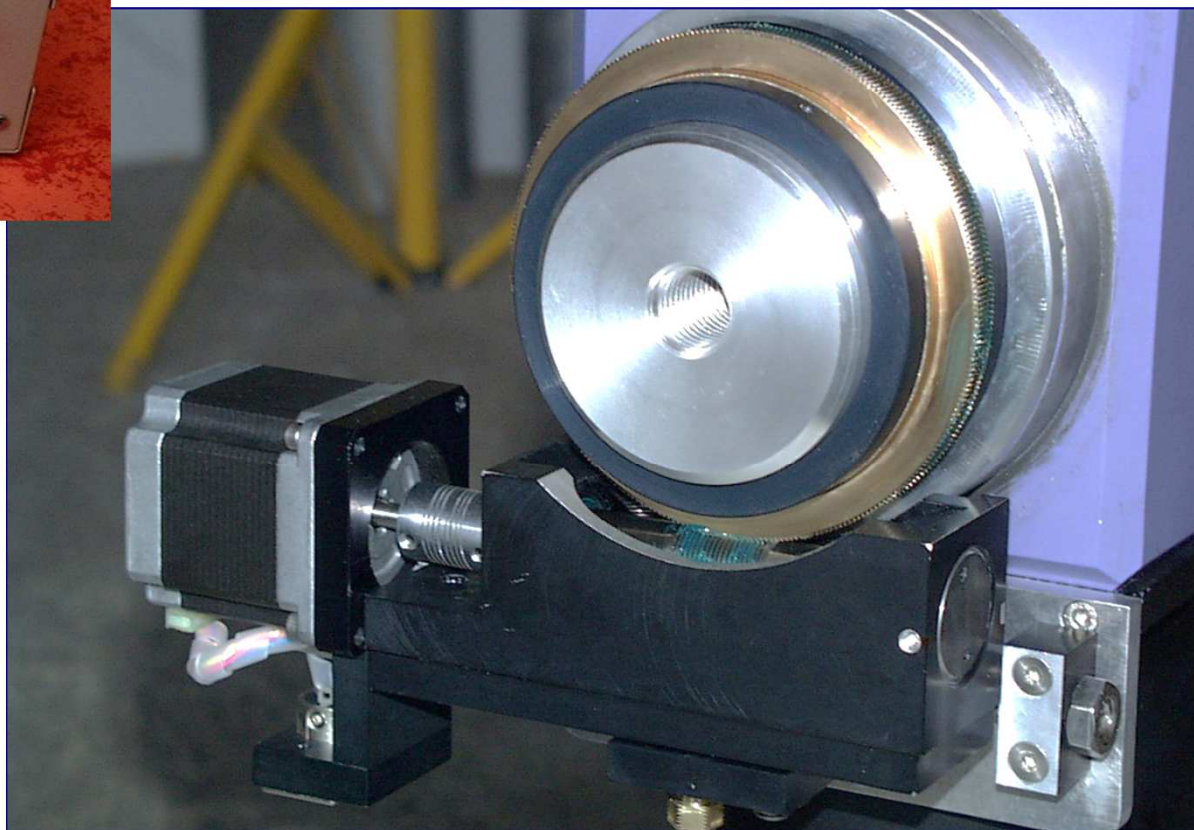
Motorisation à « l'ancienne »



- 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 / résonnances
- ▣ Vitesses très lentes..



TRASSUD



ZX4



ZX7

AXIS Instruments



F20A



F60a

MEADE



LX200

ARCANE



A40

GEMINI



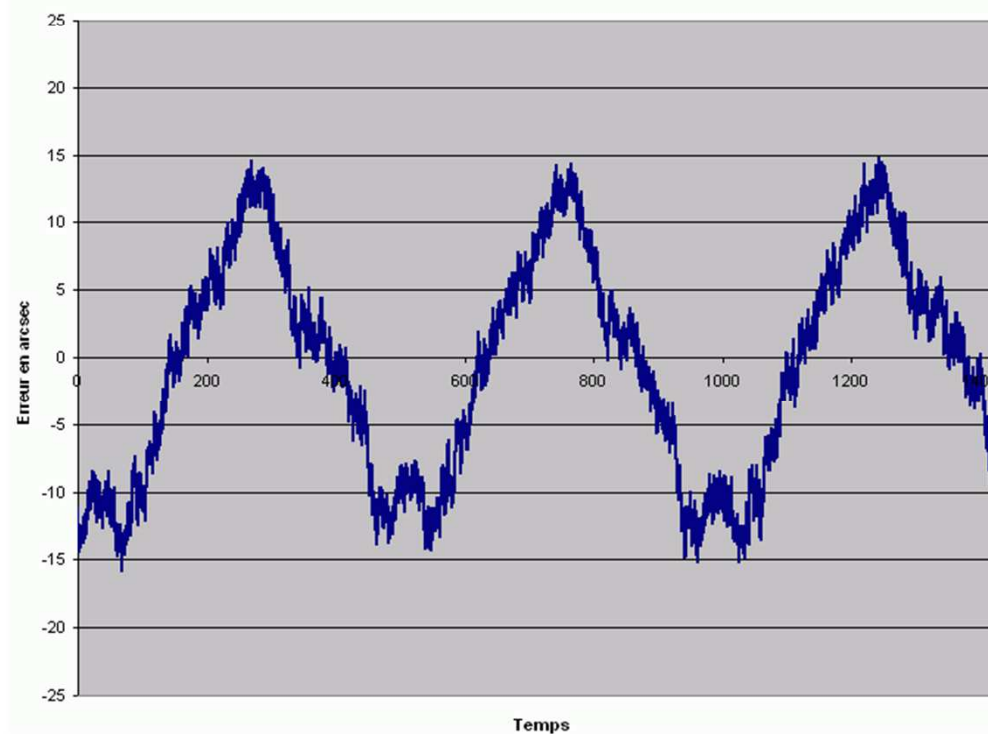
G42 +

Caractéristiques générales:

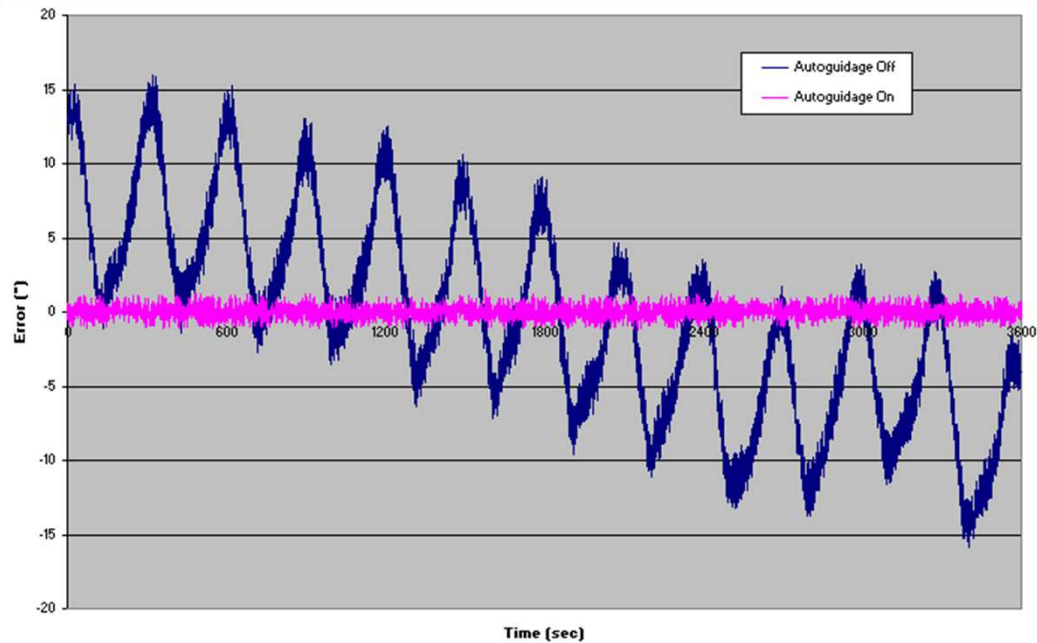
Rotation de la vis sans fin: 1 tour/ 8minutes

L'erreur périodique ..

8" LX200 (janvier 1997)



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



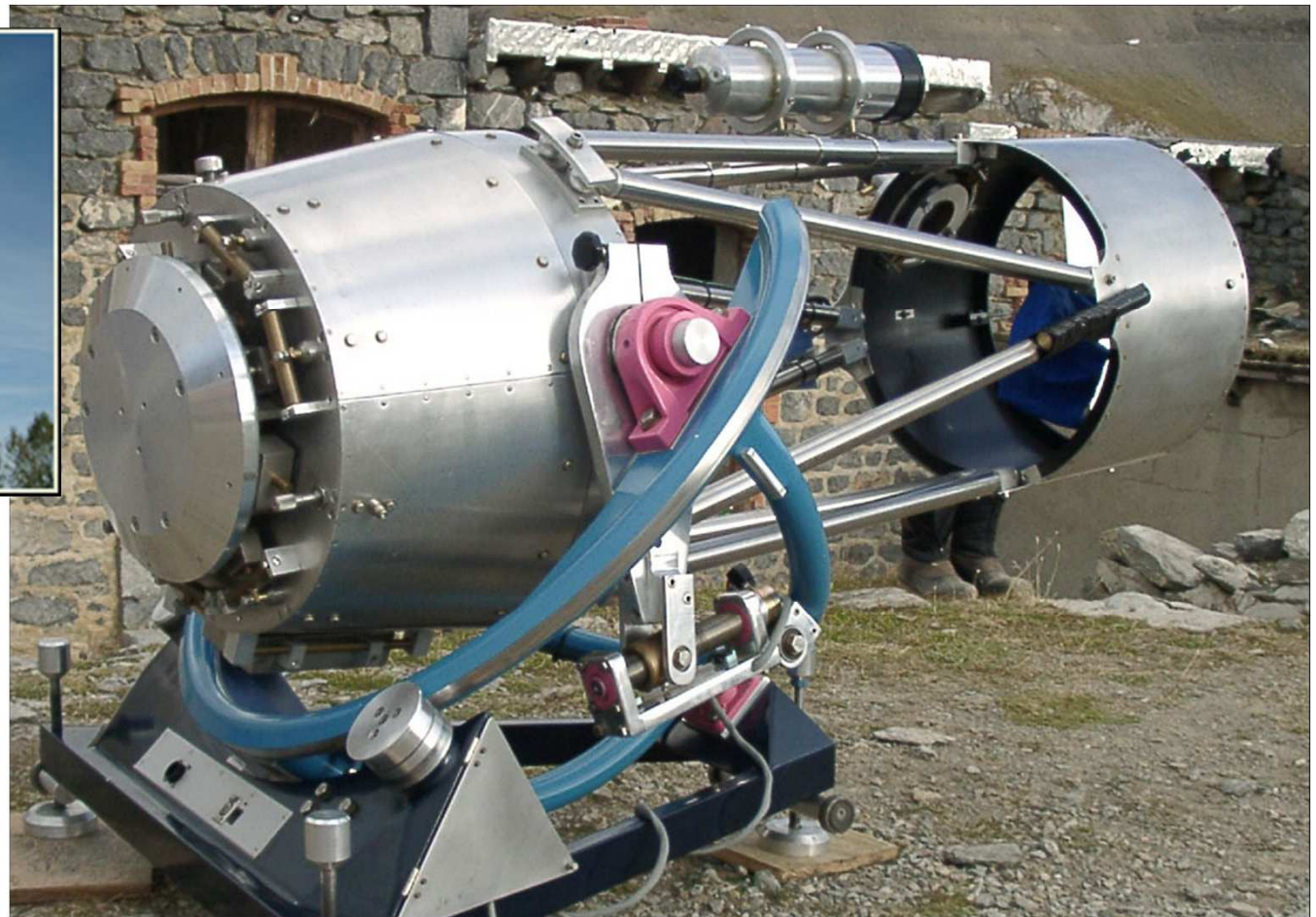
TDM ?

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



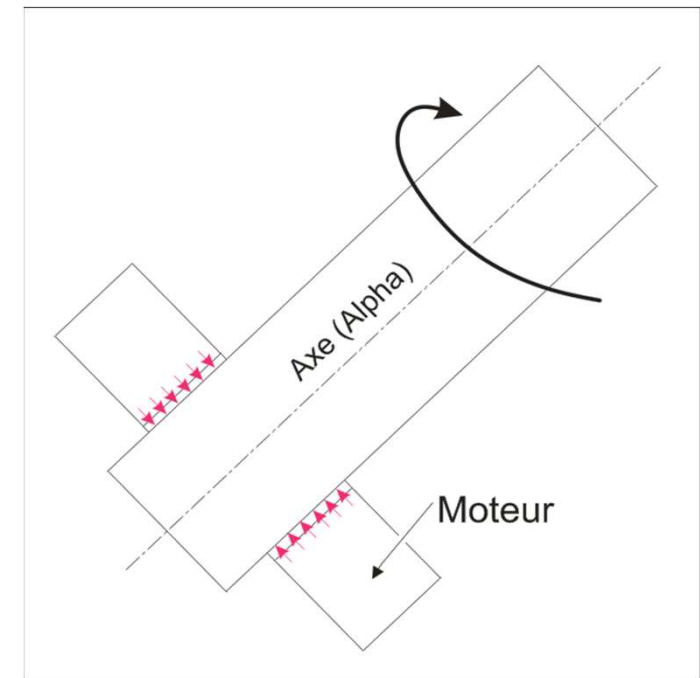
Télescope « friction drive »

- Efficace mais :
 - Glissements
 - Moteurs pas a pas ...
 - Encore des engrenages



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

VLT : 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 moteur en élévation



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



Télescope 1.2 m

Pointage ultra-rapide
À 30°/Sec

**ALCOR
SYSTEM**



PLANEWAVE CDK-700

Altaz-telescope

ASTELCO NTM-500



ASA

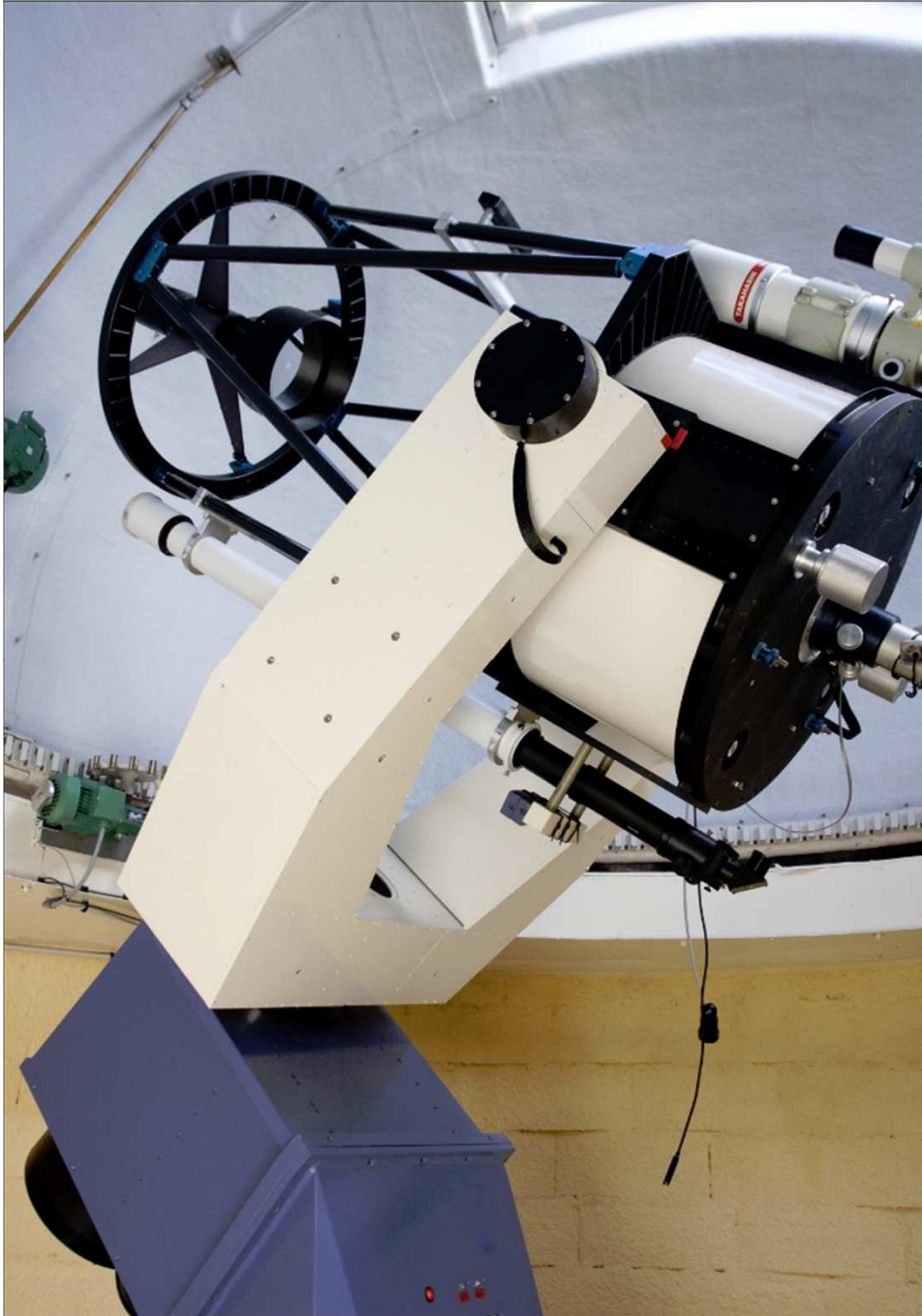
DDM-85





Sky Vision / Alcor-Sytem

NOVA 120



Télescope 600 mm

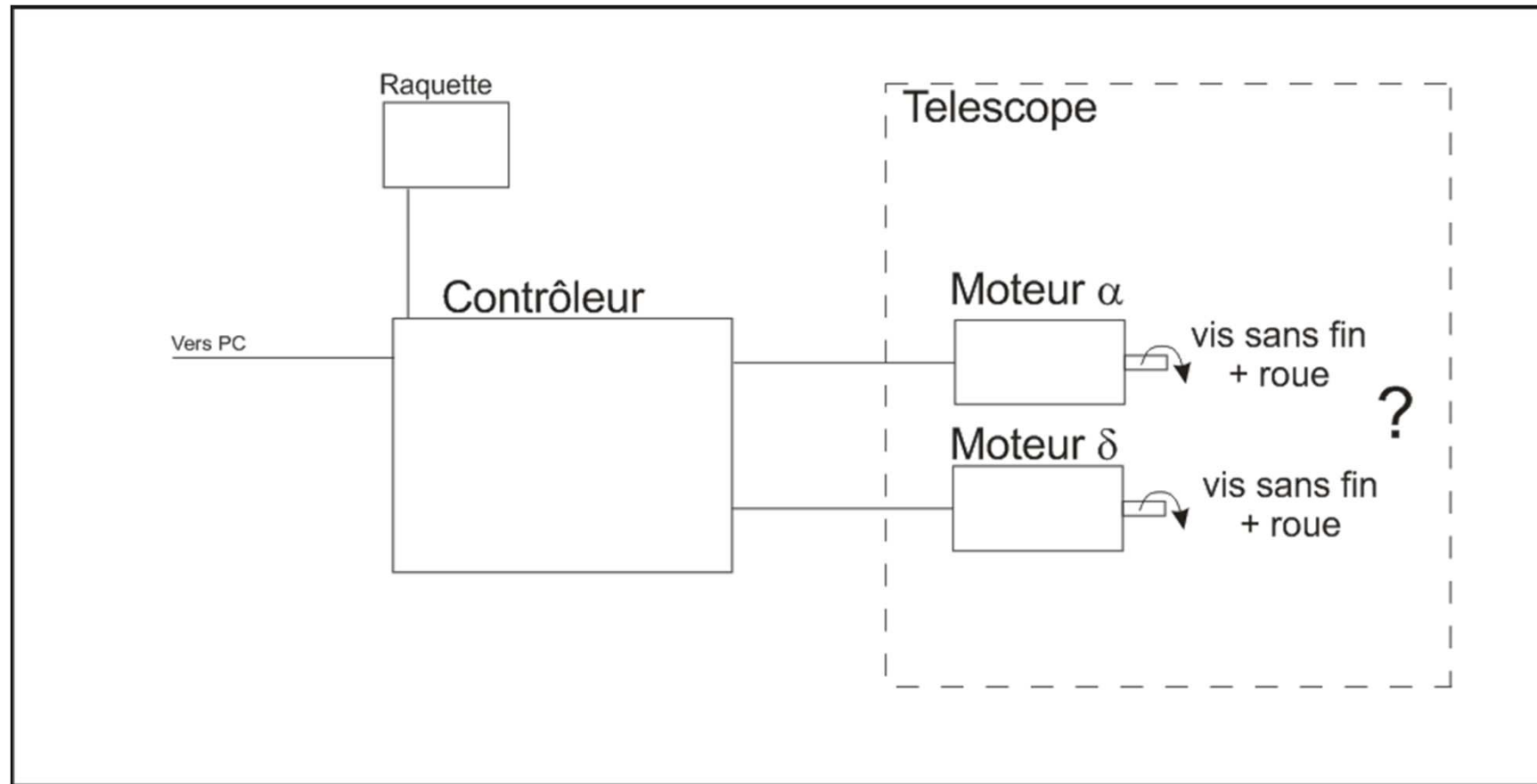
Monture fourche

Direct-drive sur les
deux axes par
ALCOR-SYSTEM

Les valeur ajoutées du Direct-Drive ?

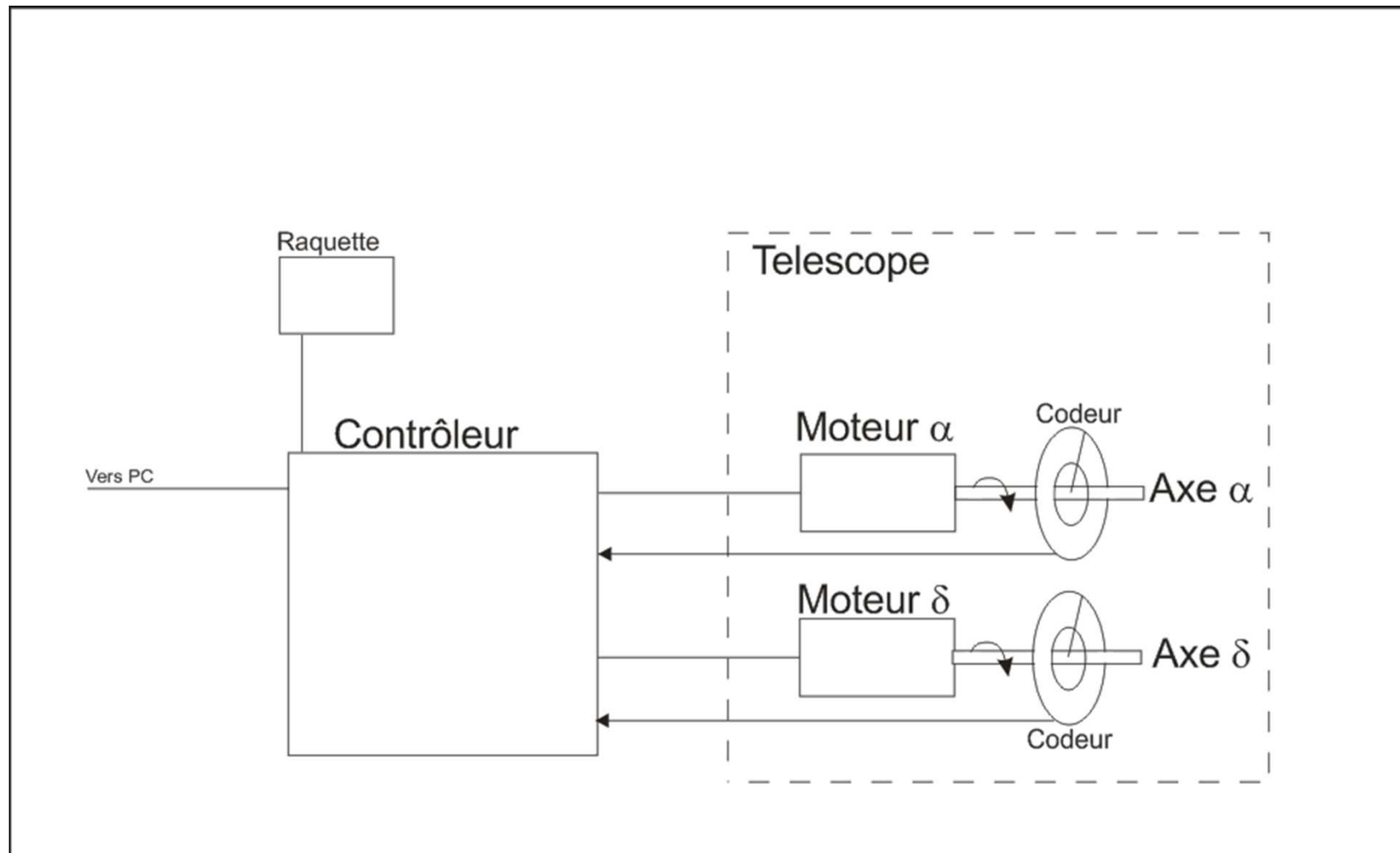
- Pointer un télescope précisément et rapidement
- Réaliser du suivi sidéral et des images sans guidage
- Simplifier la conception mécanique de l'entraînement.
- Faible consommation
- Zéro erreur périodique
- Grande dynamique de vitesse ($100^\circ/\text{sec}$ à $0.1''/\text{h}$)
 - Pointage ultra rapide
 - 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.

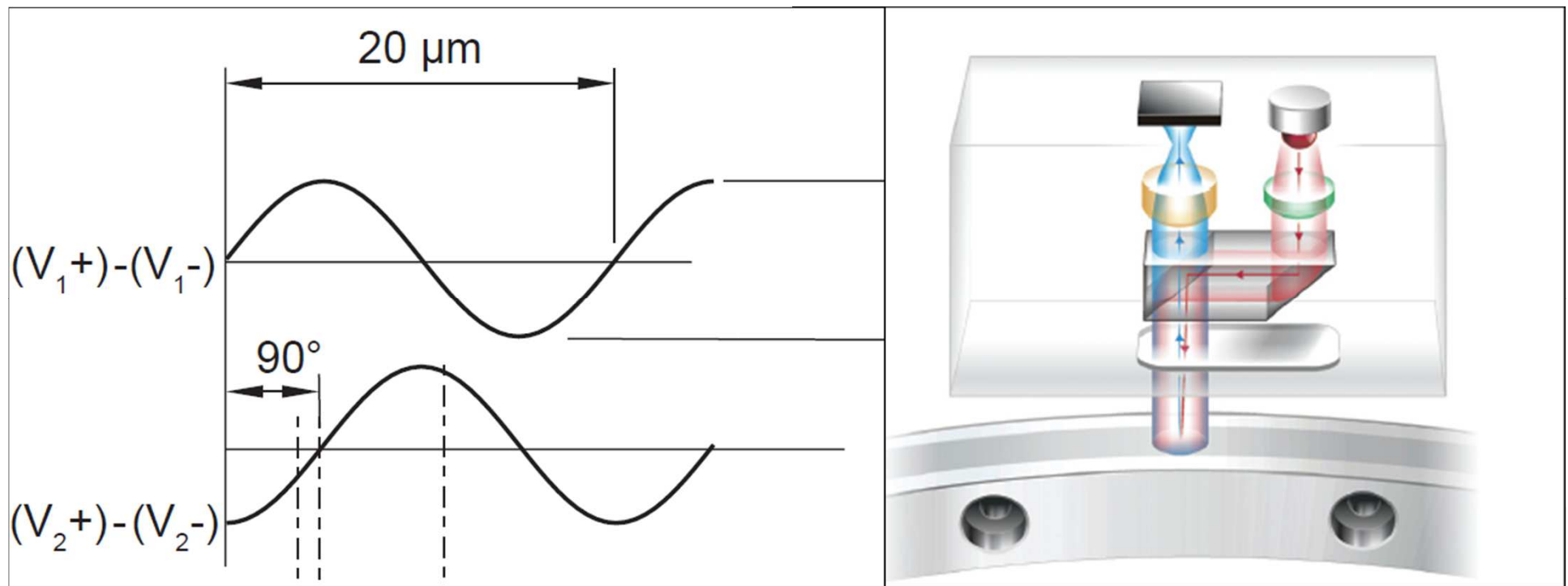
Systeme boucle fermée



- 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 ?

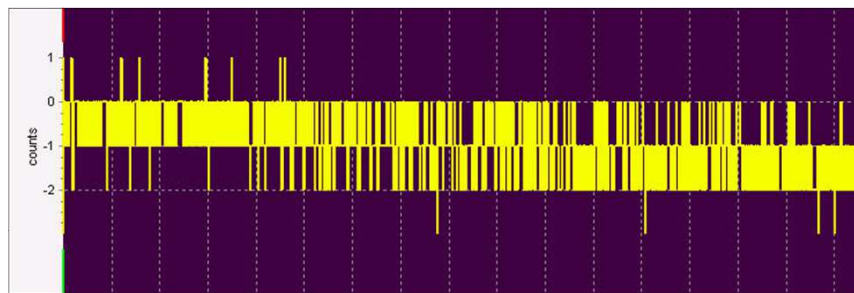


- Monter un anneau, et une tête de lecture
- Positionnement de la tête de lecture avec
 - Un outillage livré et un indicateur d'état à LED

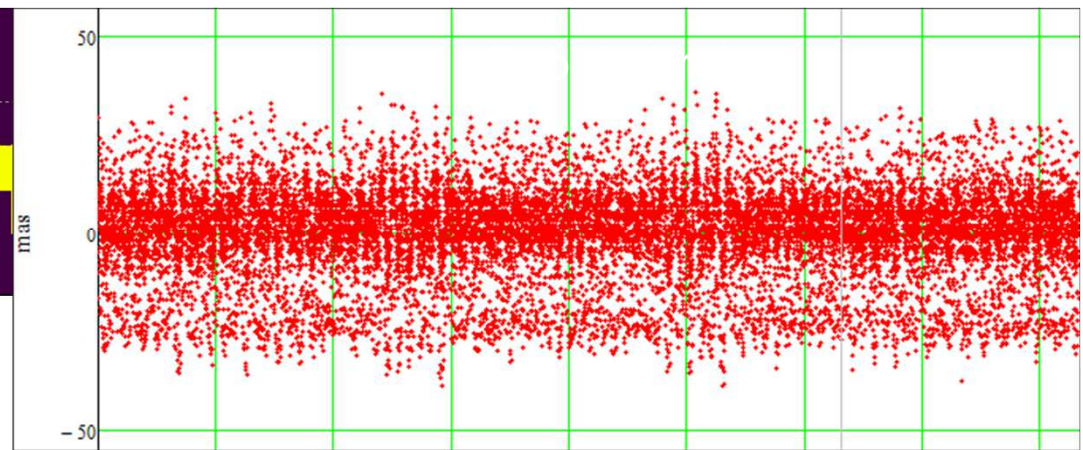
Les codeurs

- Anneau de Ø100 à 200 mm, interpolateur 10 bits
- Ex : Un anneau de Ø202.127mm possède 63500 marques de 20µm
- 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



SYSTEM

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.

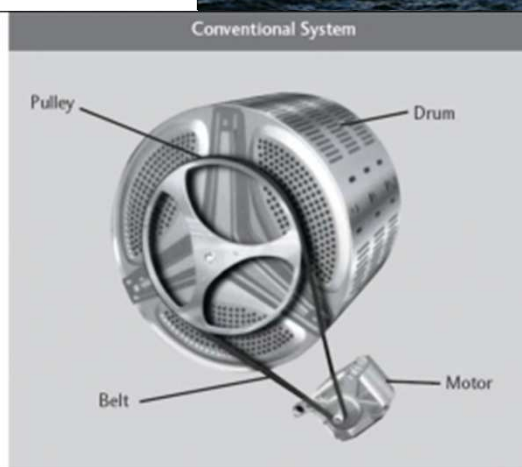
A quoi cela ressemble ?



A quoi cela ressemble ?

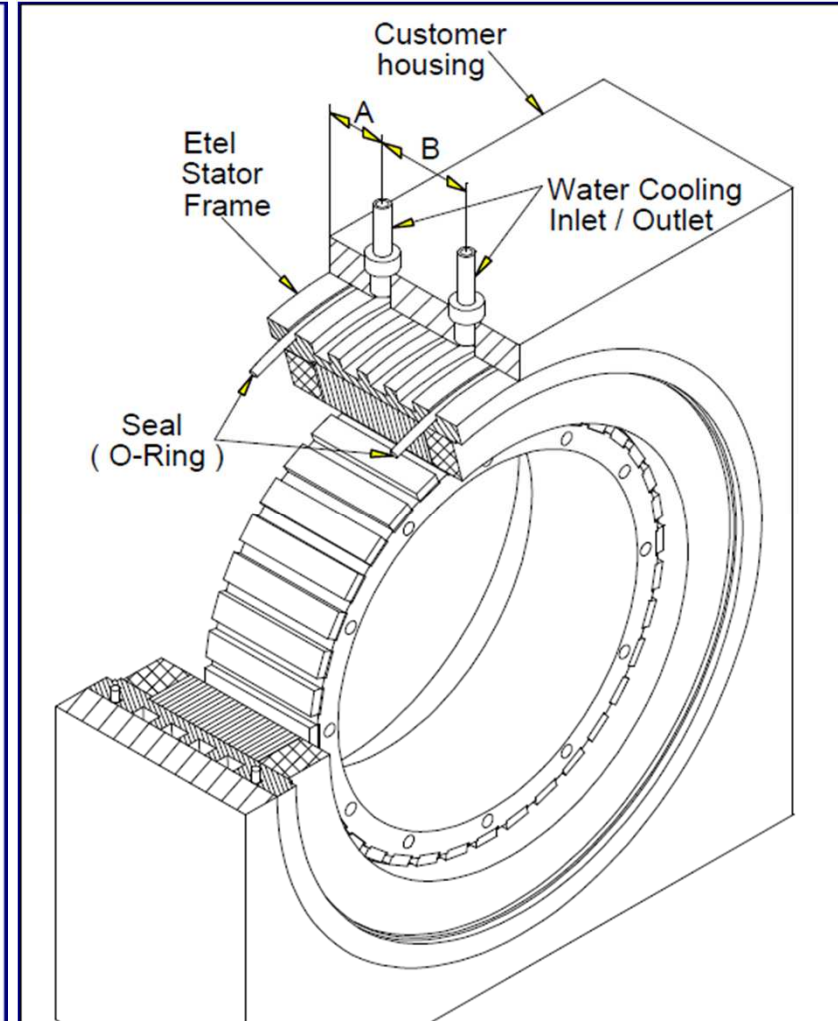
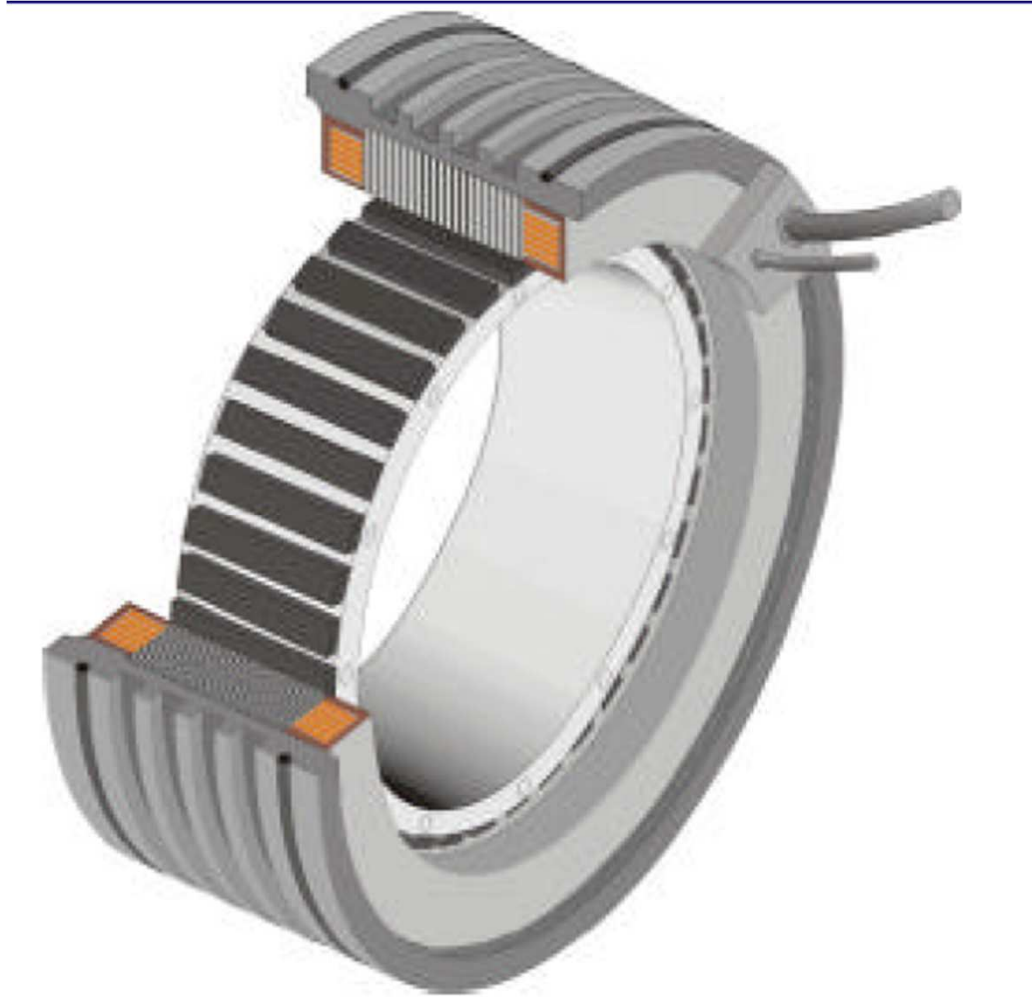


Applications des moteurs couples



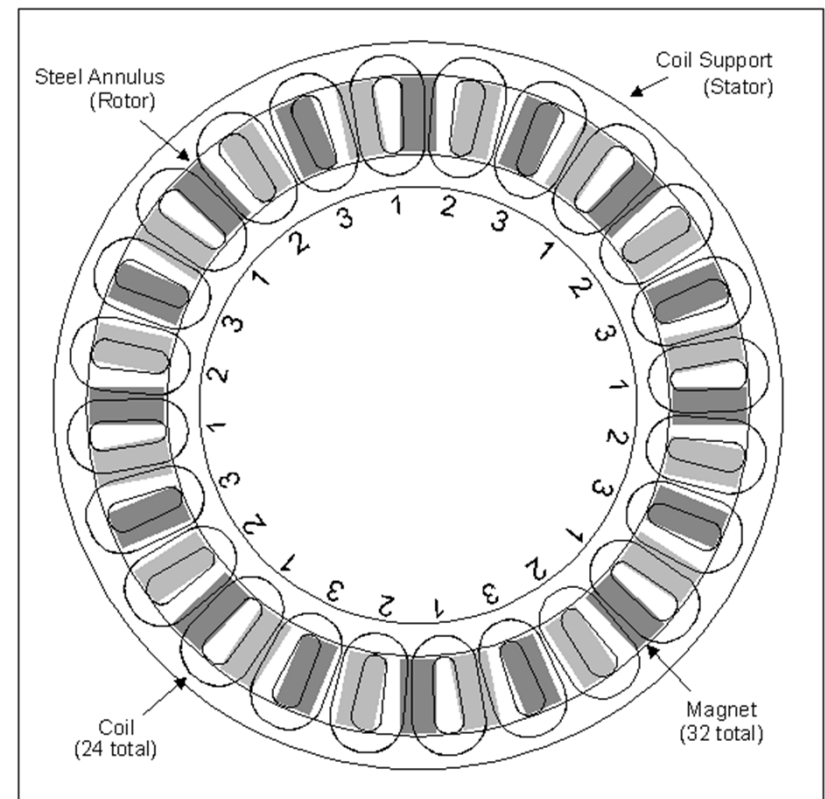
A quoi cela ressemble ?

Architecture axiale



Le moteur

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



Couple = 11 N.m

Le moteur

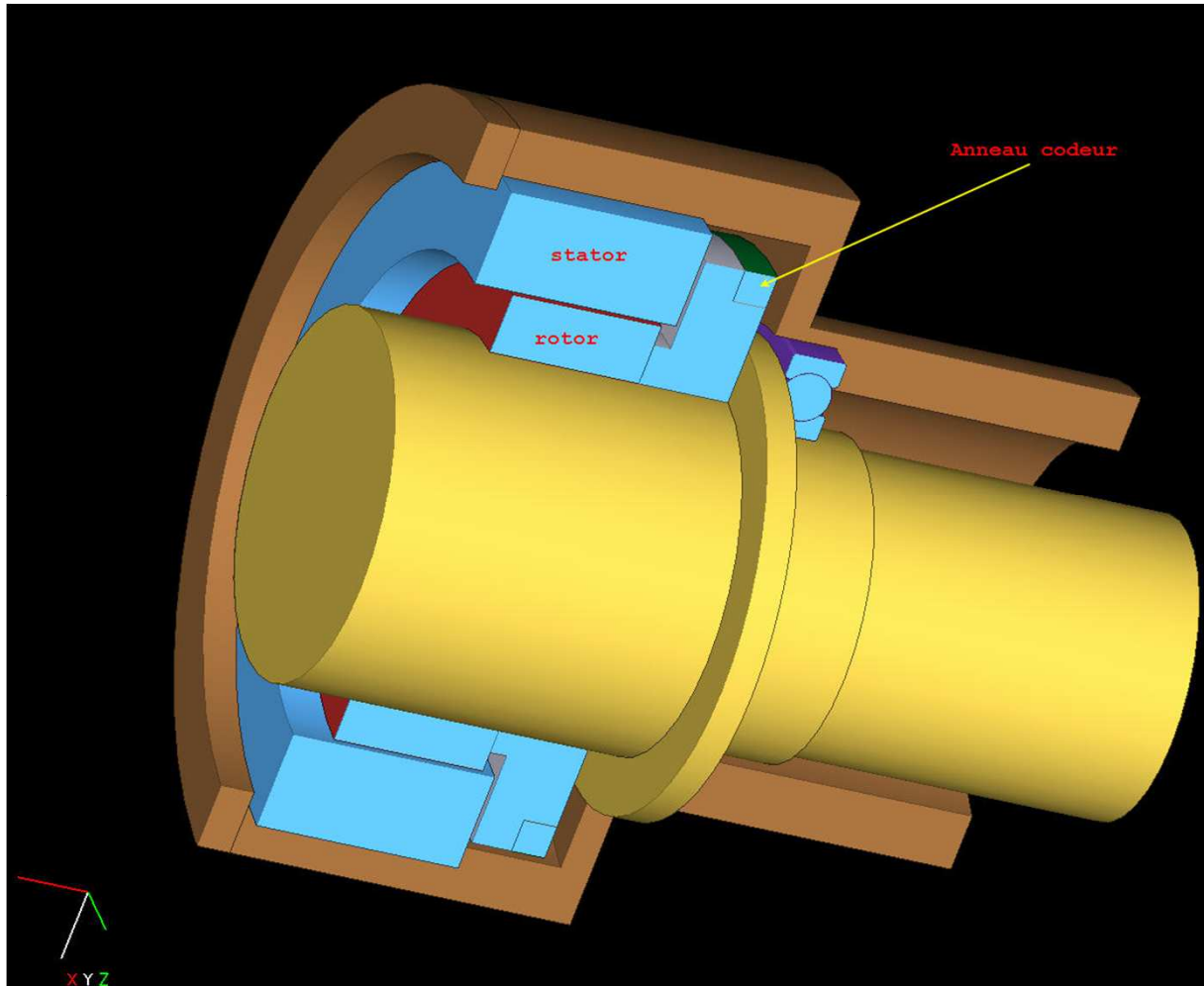
Architecture axiale (bobines)



Attention : couple faible !



Implémentation moteur-codeur



- Rotor
- Stator
- Codeurs

Moins de pièces
mécaniques

Attention : axe libre, un dispositif de freinage est souhaitable

Dimensionner le moteur

(à première approximation)

$$\dot{w} = \frac{\text{Couple} - \text{Frottements}}{I}$$

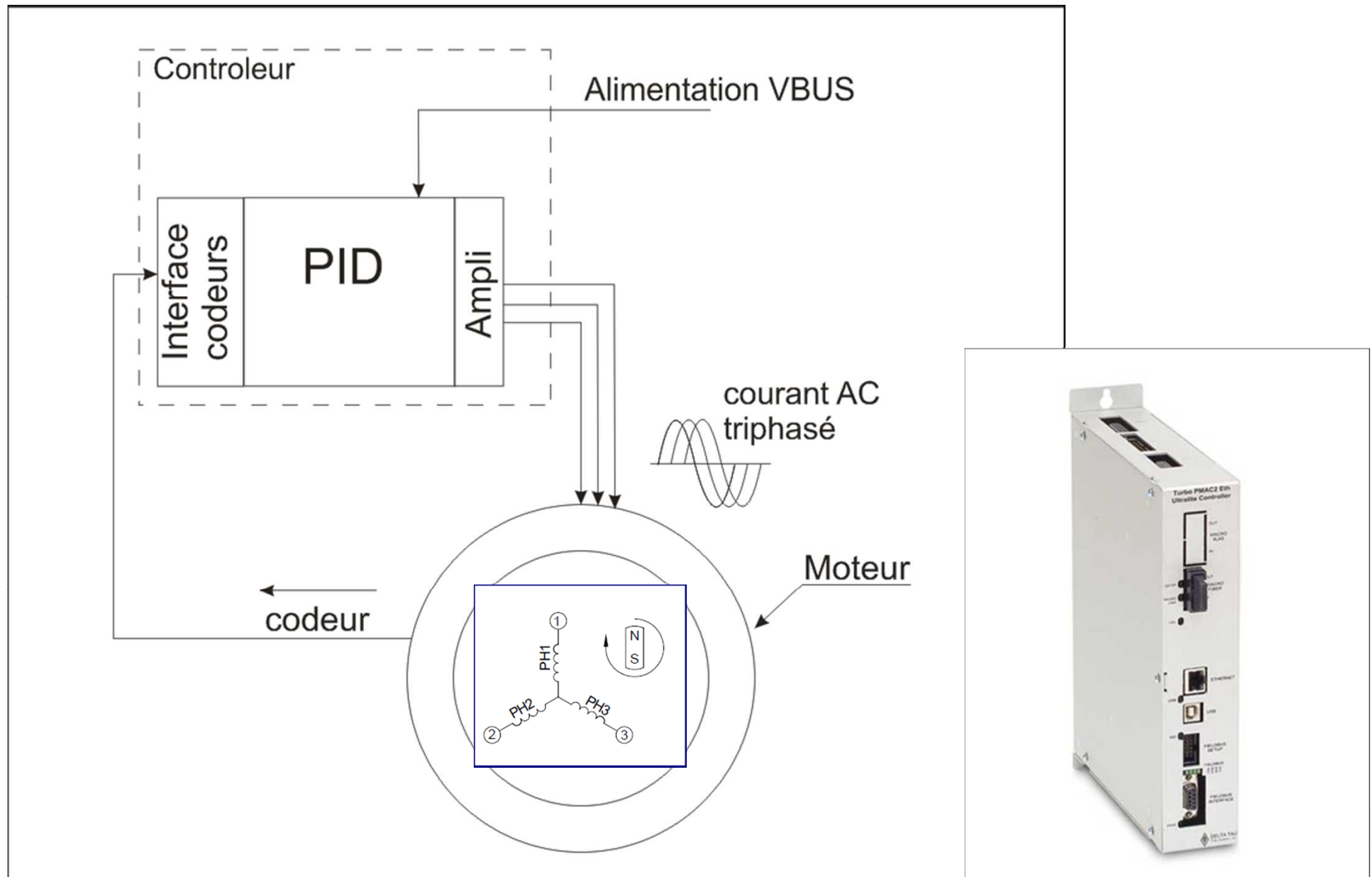
- \dot{w} : accélération angulaire en rad/s²
- w : vitesse en rad/s
- Couple : moteur en N.m
- Frottements : système en N.m
- I : Moment d'inertie (kg.m²) autour de l'axe
(distance d'une masse au carré / à un axe)

Ex : Moteur 10 N.m
 I : 40 kg.m²
 F : 0.3 N.m

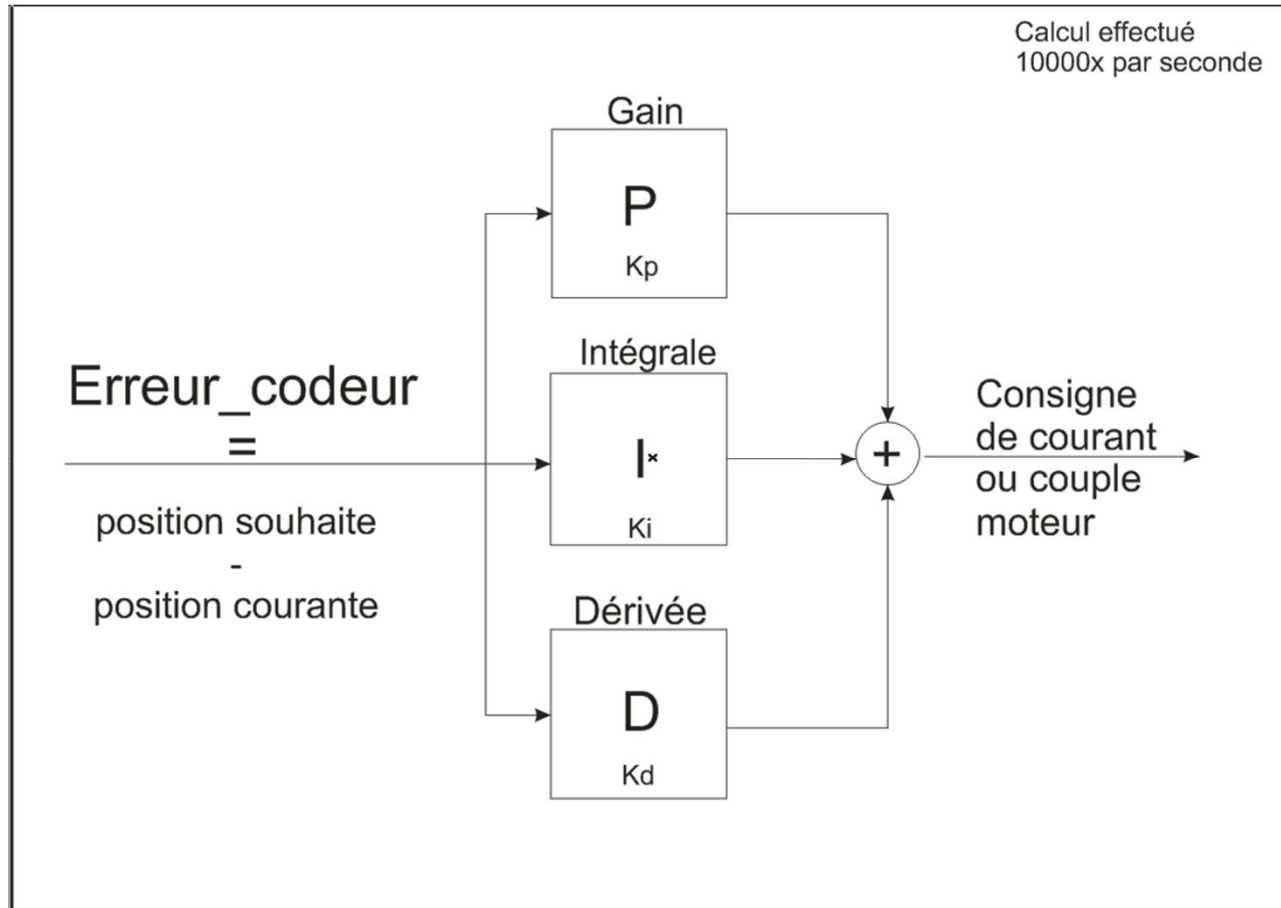
$\dot{w} = 13.8^\circ / \text{s}^2$ soit une vitesse de 13.8°/s après 1s au démarrage

Attention : couple trop faible = pas de rigidité de l'axe, pas de marge

Le contrôleur moteur/codeur



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

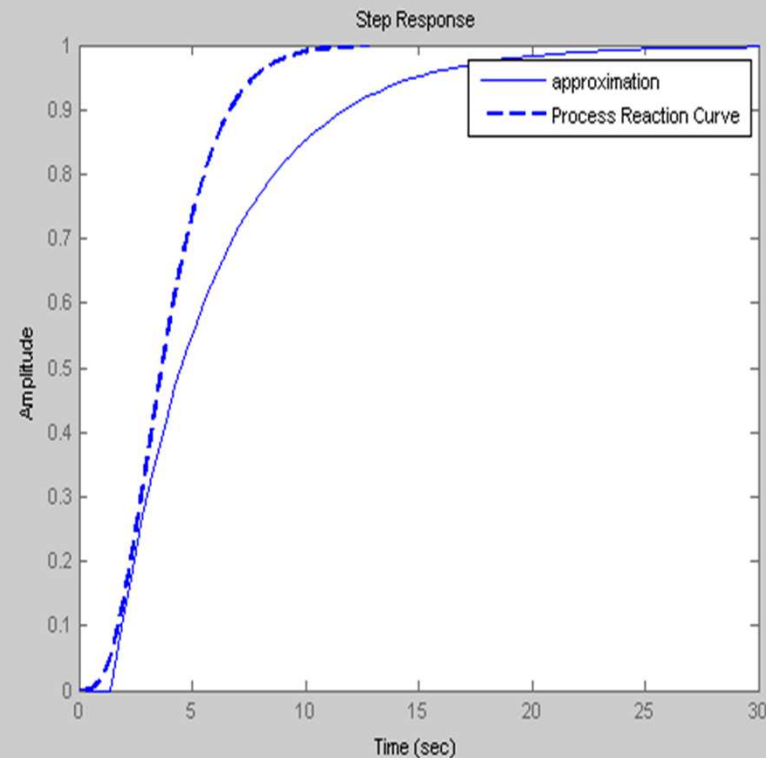
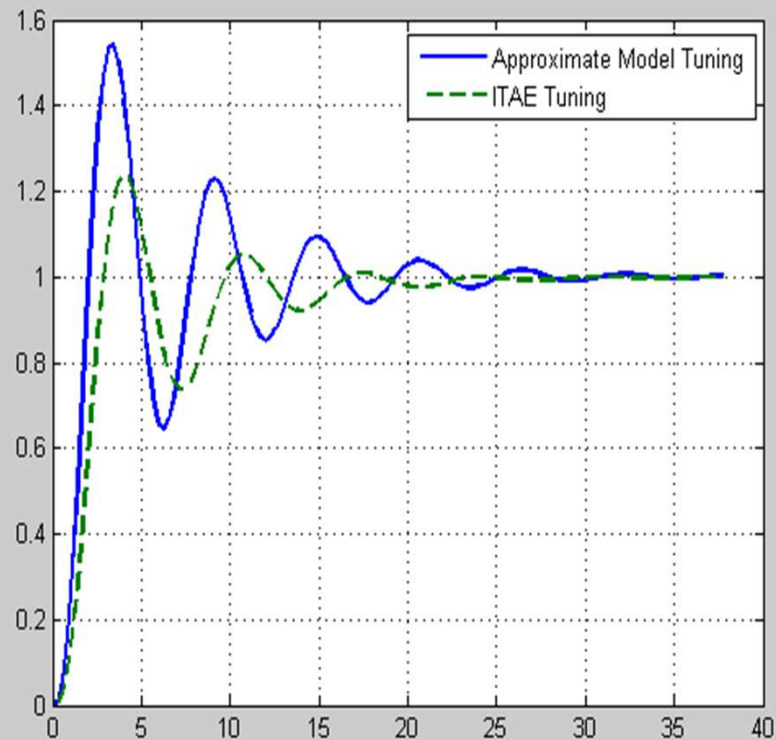


Réglages des paramètres de PID peuvent dépendre:

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

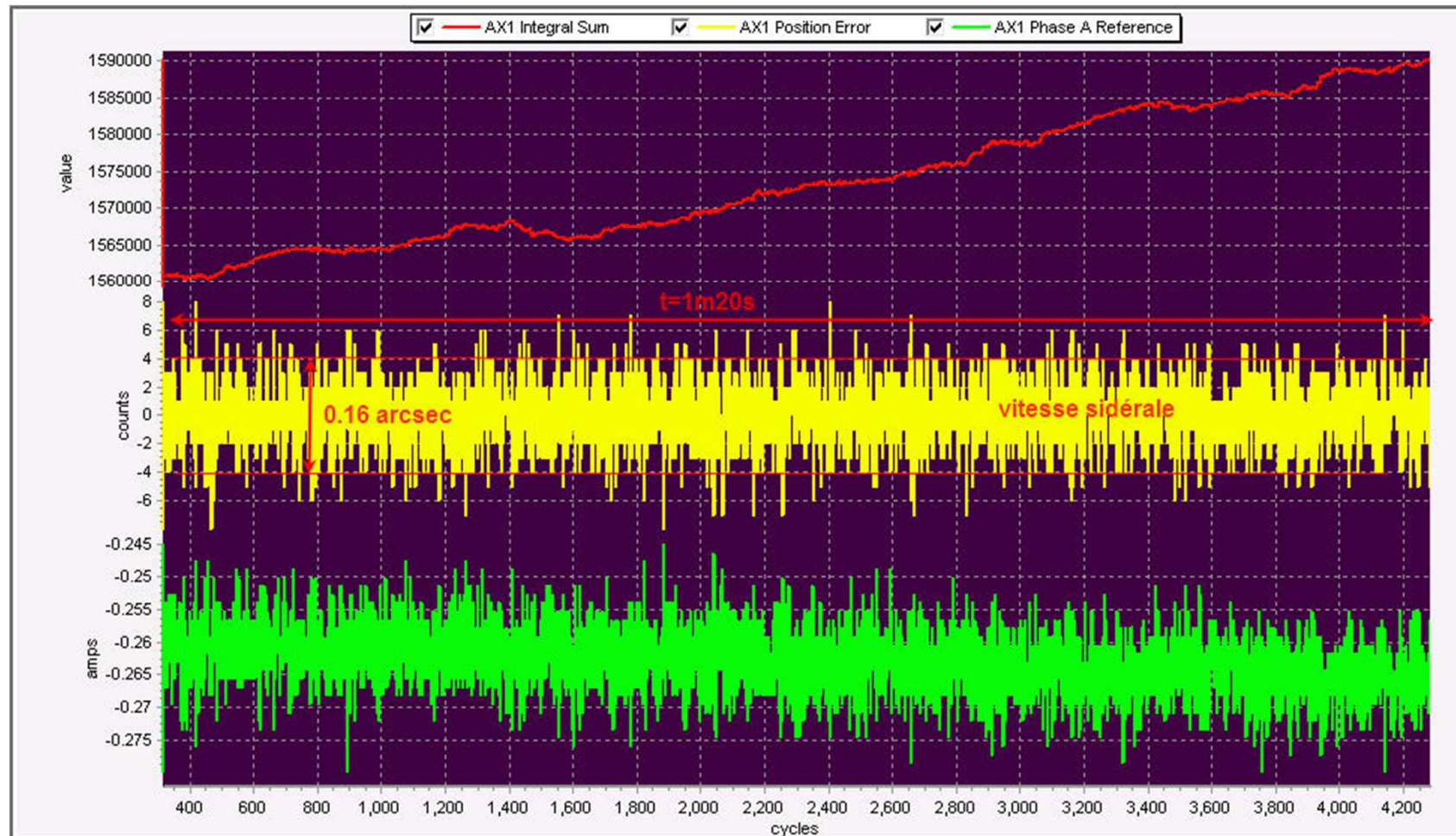
$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Asservissement de trajectoire avec PID en boucle fermée



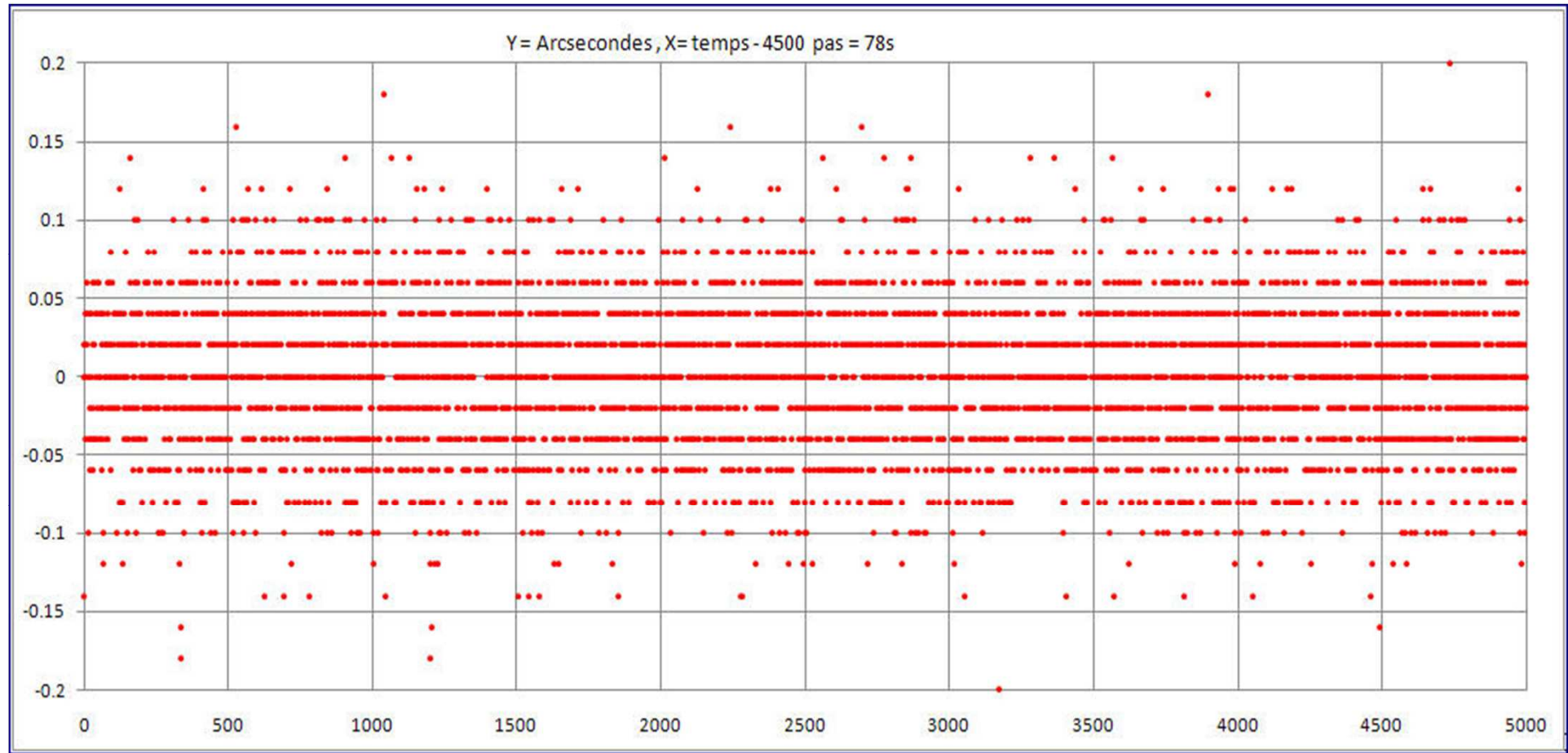
- On cherche : Un asservissement stable, rapide, réactif et robuste aux perturbations externes
- On évite : Oscillations, axe « mou » ou bruyant
- Outils de diagnostic (diagramme de Bode)

Résultat de réglage de PID



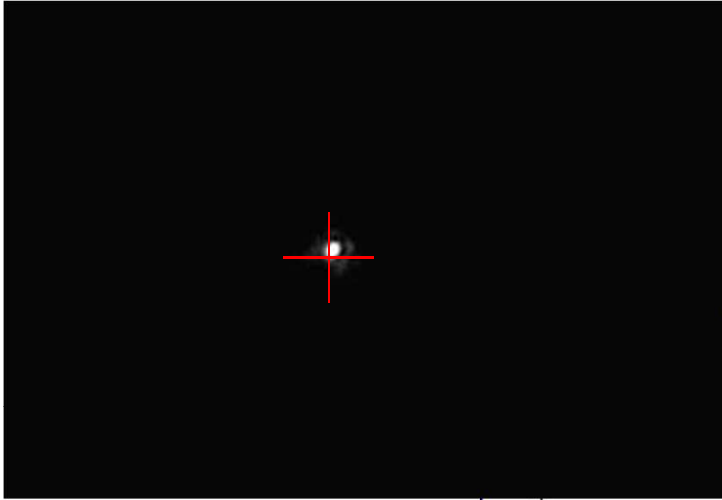
- Stable, précis sur les codeurs
- Consommation : moins de 5W par axe (télescope équilibré)

Réglage du PID : vitesse sidérale



- ▣ Erreur de 0.12'' RMS avec vitesse sidérale

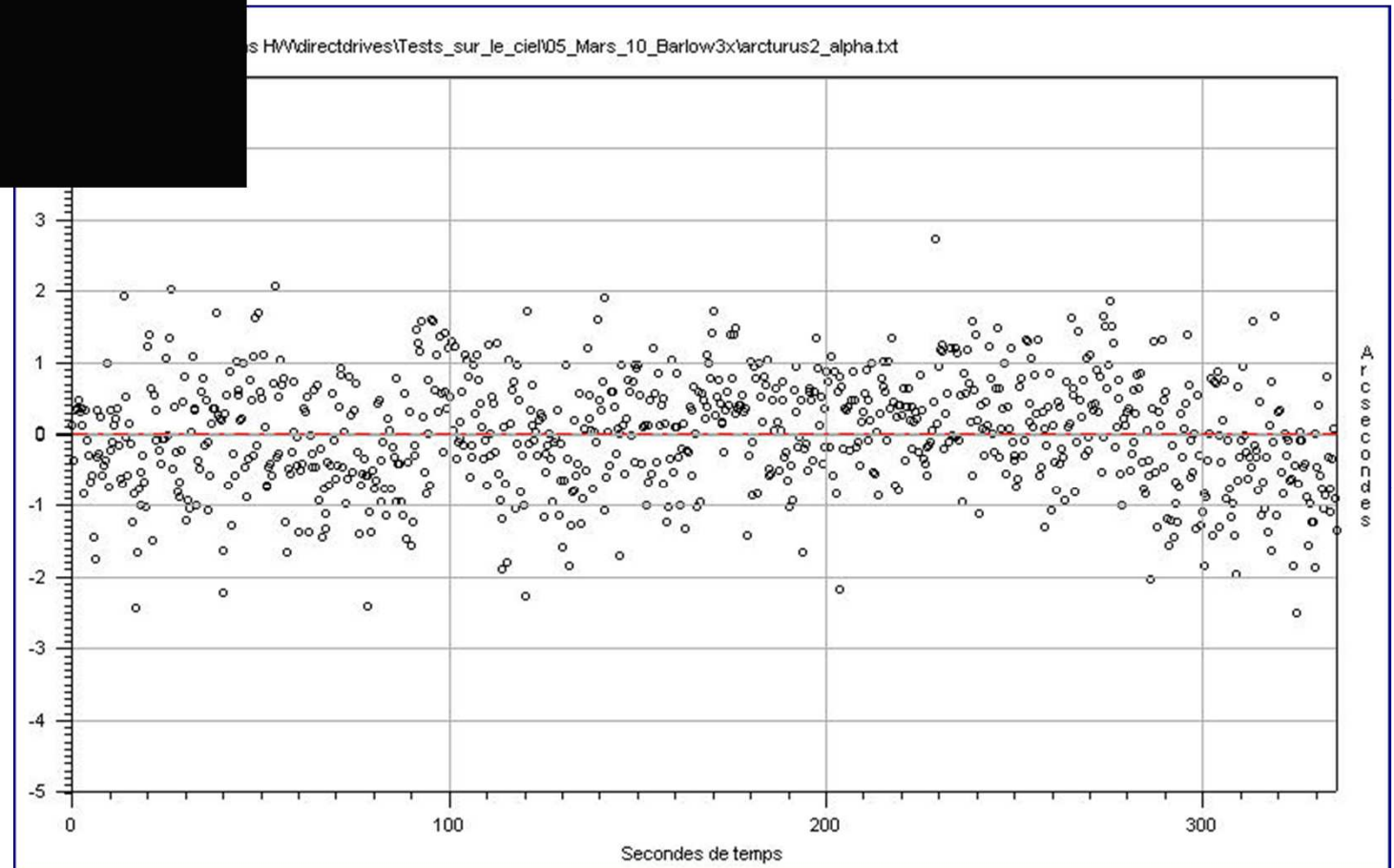
Tests sur le ciel



- ▣ 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

RESULTATS

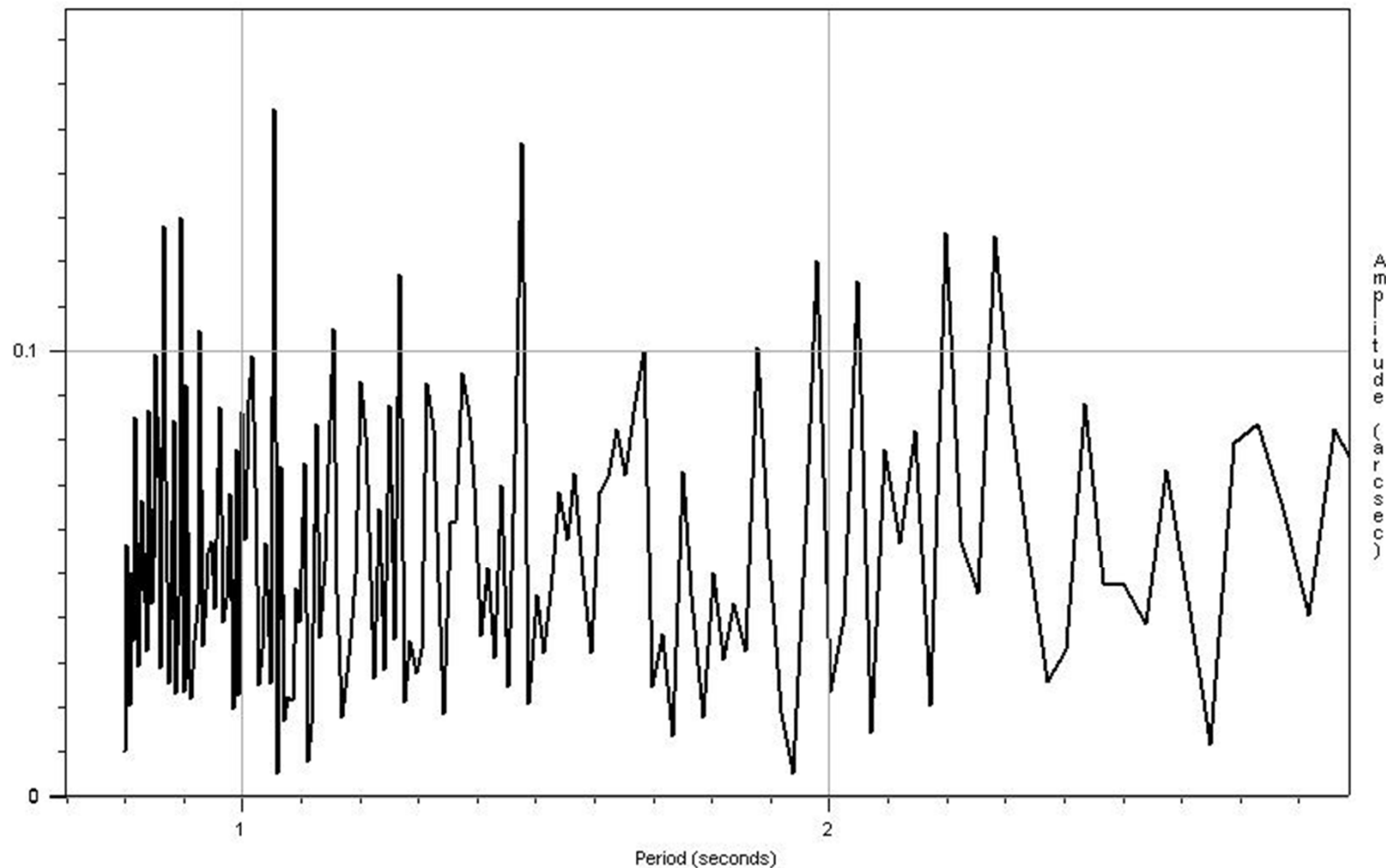
- ▣ Zéro Erreur périodique
- ▣ Pas d'oscillations



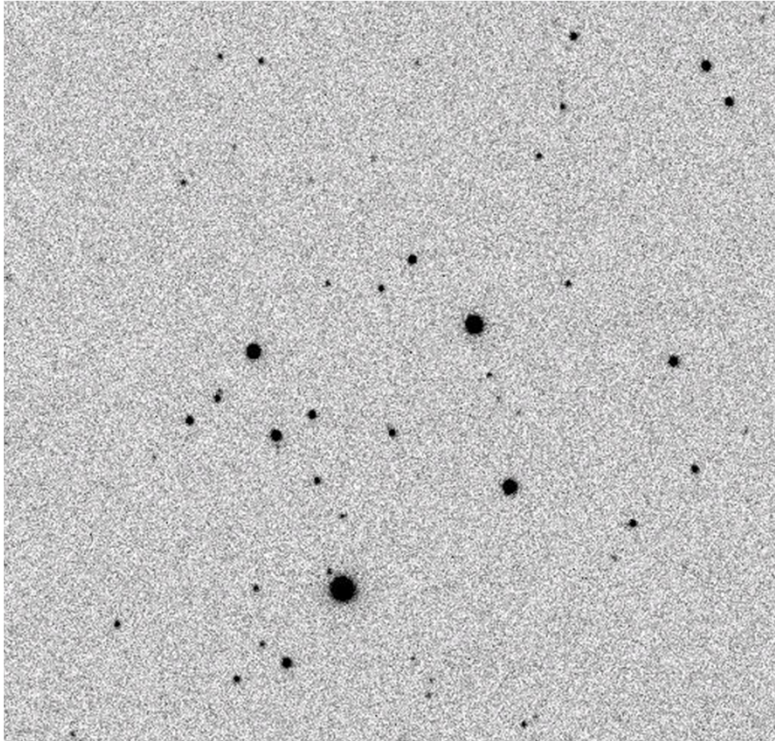
Tests sur le ciel

- ▣ 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 7.4μm
- ▣ Echelle de 0.9" par pixem
- ▣ 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 ! »

Modèle de pointage

TU : 05/10/2012 04:16:47 Alloué > 30 708 248 -> Log désactivé, Processus 0x000346C [7]

Caméras Telescope/observatoire Fenêtre Options Aide

ha= 06h26m05s Delta= +20°46'50" 05/10/2012 04:13:13 TU [Window1.mapsky] UAI A86 Albignieux [France]

Réalisation du modèle de pointage par pointage sur des champs

Champs

Angle horaire Min (h) -3.0
Angle horaire Max (h) -0.5
Hauteur min (°) 20.0
Declinaison max (°) 80.0
Declinaison min (°) -5.0
Nbre étoiles pour astrom. 100

Secteur du ciel à balayer
☐ Tout le ciel
☐ Côté Ouest du ciel
☒ Côté Est du ciel

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

Camera

Temps de pose (sec) 10.0
Fenêtre 1:1
Binning 1x1

Catalogue d'étoiles
☒ GSCACT
☐ 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"	-01h32m06.895s	+14°59'01.54"	45.7 arcsec
6	-05h25m16.300s	+29°58'46.04"	-05h25m28.670s	+29°58'39.96"	2.7 arcmin
7	-04h06m26.050s	+29°59'18.39"	-04h06m30.060s	+29°58'49.96"	2.9 arcmin
8	-02h47m37.450s	+29°59'33.93"	-02h47m51.680s	+29°58'51.67"	3.2 arcmin
9	-01h29m48.980s	+29°59'41.33"	-01h29m03.662s	+29°59'08.68"	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°59'37.82"	-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°59'09.98"	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	-02h54m00.000s	+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 Démarrer Nbre champs : 26 champs

ARTEMIS CCD ATIK-460ex -> -15.0°C

ARTEMIS CCD ATIK-460ex

Temps:

Pose en sec. 5 Bouclage ☐
Bouclage infini ☐

Nbre de boucles 10 Délai (s) 1

BinX: 1 BinY: 1 ☒ Lier

Exp. Longue Exp. courte

Fichier Fenêtre Camera Temp. CCI

X1	Y1	X2	Y2
1	1	2749	2199

Def. fenêtre Entrer

1/2 frame 3/4 frame 1/4 frame

- Monochrome - Entiers(16bits signés) [Zoom = 1]

Modèle de pointage

Calcul du Modèle de pointage

Liste étalons | **Calculs** | Graphiques | Projection des erreurs

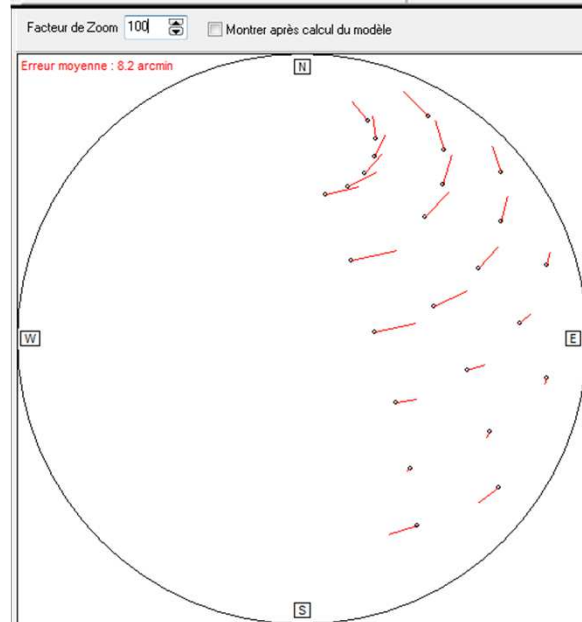
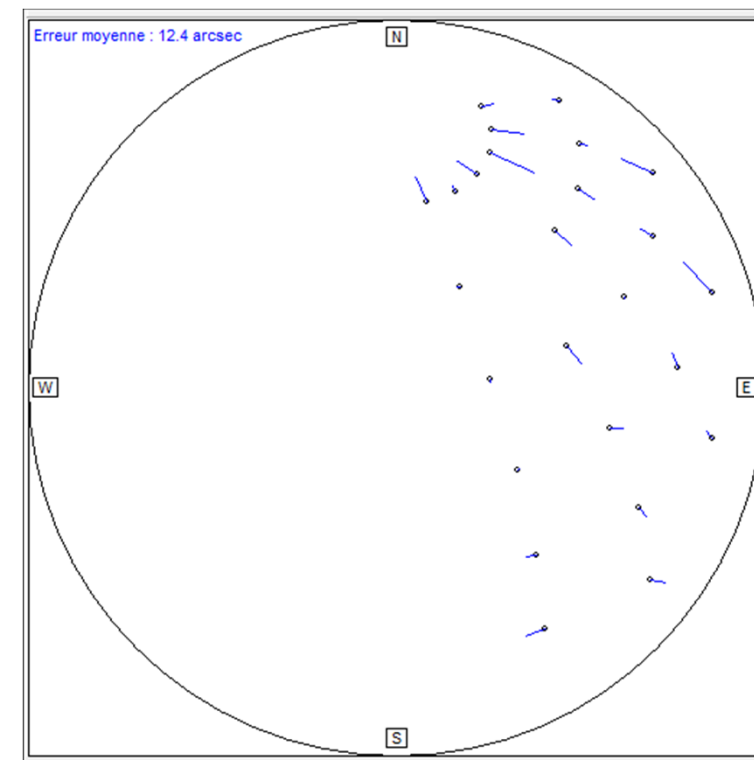
Activer dans le calcul

Erreur de collimation ☒
 Perpendicularité Alpha, Delta ☒
 Erreur axe polaire Nord-Sud ☒
 Erreur axe polaire Est-Ouest ☒
 Erreur due à la flexion de tube ☒
 Erreur due à la flexion de fourche ☒
 Erreur due à la flexion axe delta ☒

Degré du polynôme : 0
 Latitude (degrés) : 45.5

Sauver fichier des résultats (.cor)

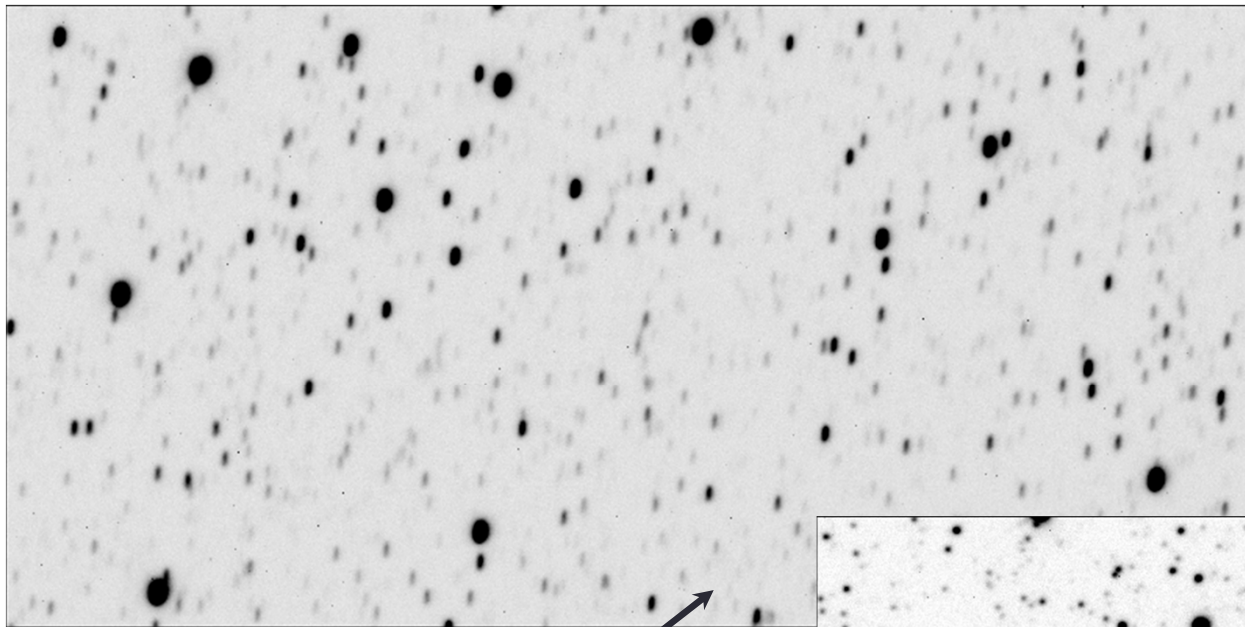
Décalage horaire (IH)	-13.5 arcmin
Décalage delta (ID)	39.2 arcsec
Erreur de collimation -Axe delta/optique(CH)	10.5 arcmin
Non perpendicularité axes Delta/Alpha (NP)	9.8 arcmin
Erreur d'alignement polaire azimutal (MA)	-23.5 arcsec
Erreur d'alignement polaire hauteur (ME)	33.6 arcsec
Erreur due à la flexion de tube (TF)	46.5 arcsec
Erreur due à la flexion de fourche (FO)	-35.3 arcsec
Erreur due à la flexion de l'axe delta (DAF)	30.8 arcsec
Résidus en ALPHA	5.2 arcsec
Résidus en DELTA	13.5 arcsec
Résidus TOTAL (avant=8.2 arcmin)	14.5 arcsec



- Passage de 8.5' à 12" rms d'erreur
- Erreur de mise en station et de flexion de tube compensées au premier ordre.

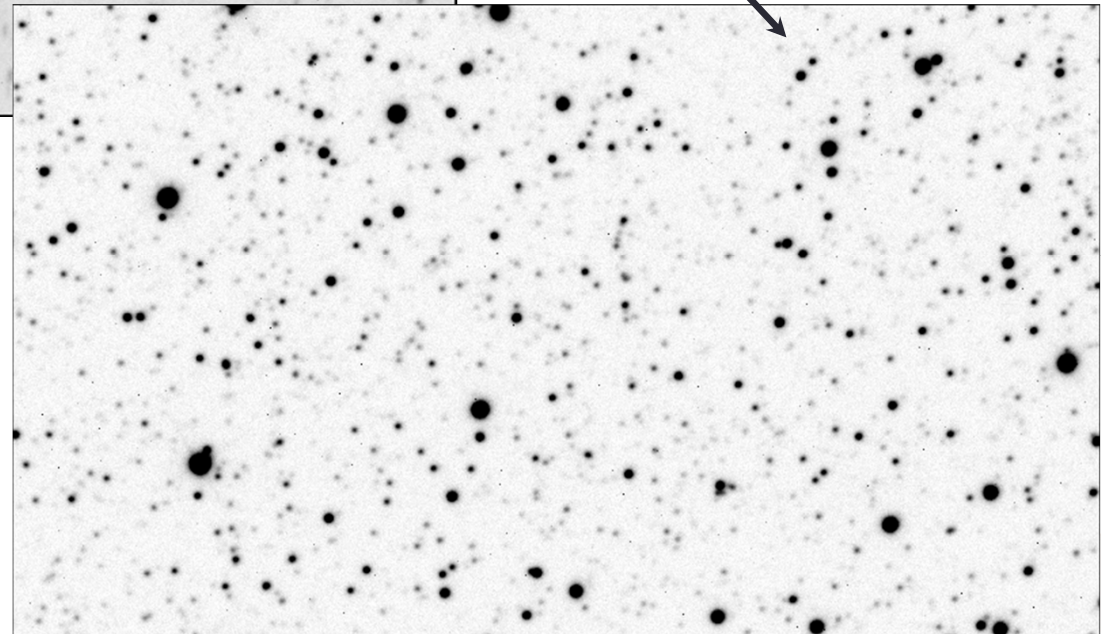
Modèle de vitesse

- Calculé à partir du modèle de pointage



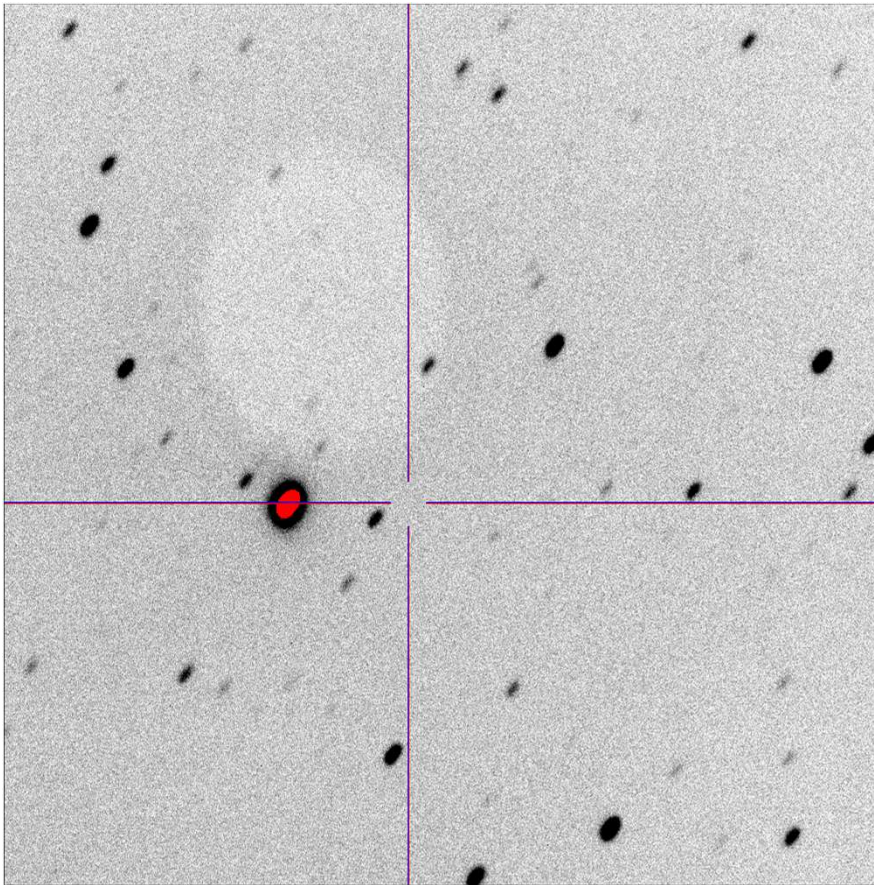
600s, sans modèle de
vitesse

600s, avec modèle de
vitesse

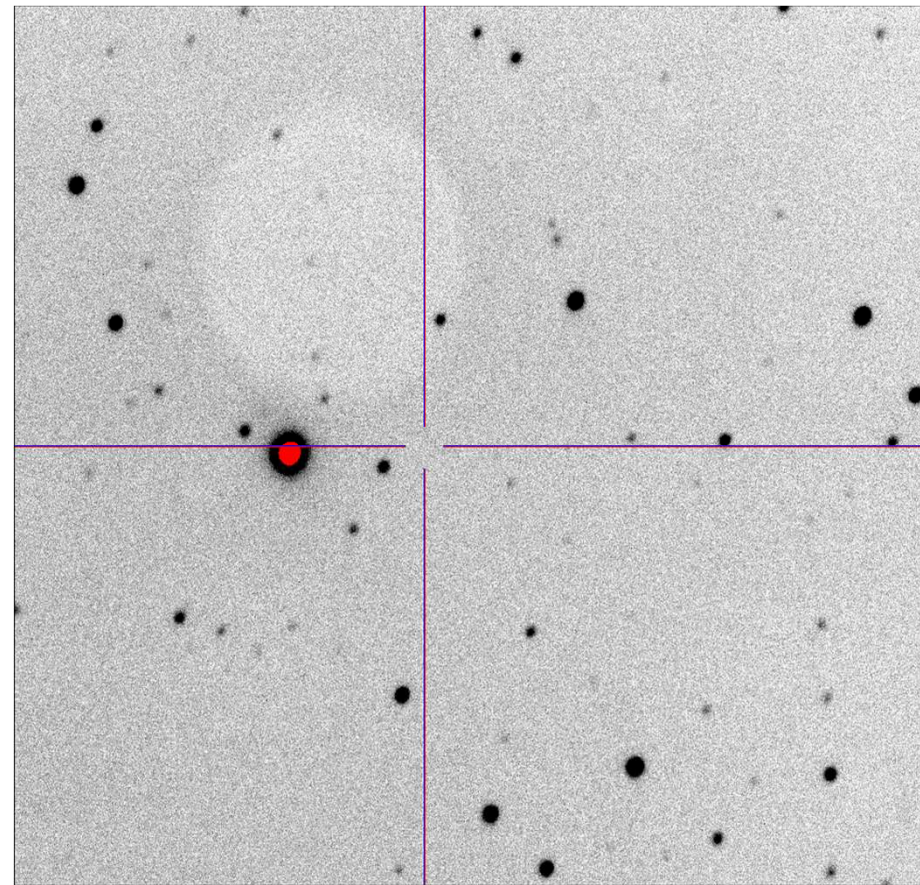


Correction de vitesse (réfraction)

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



Sans compensation de réfraction

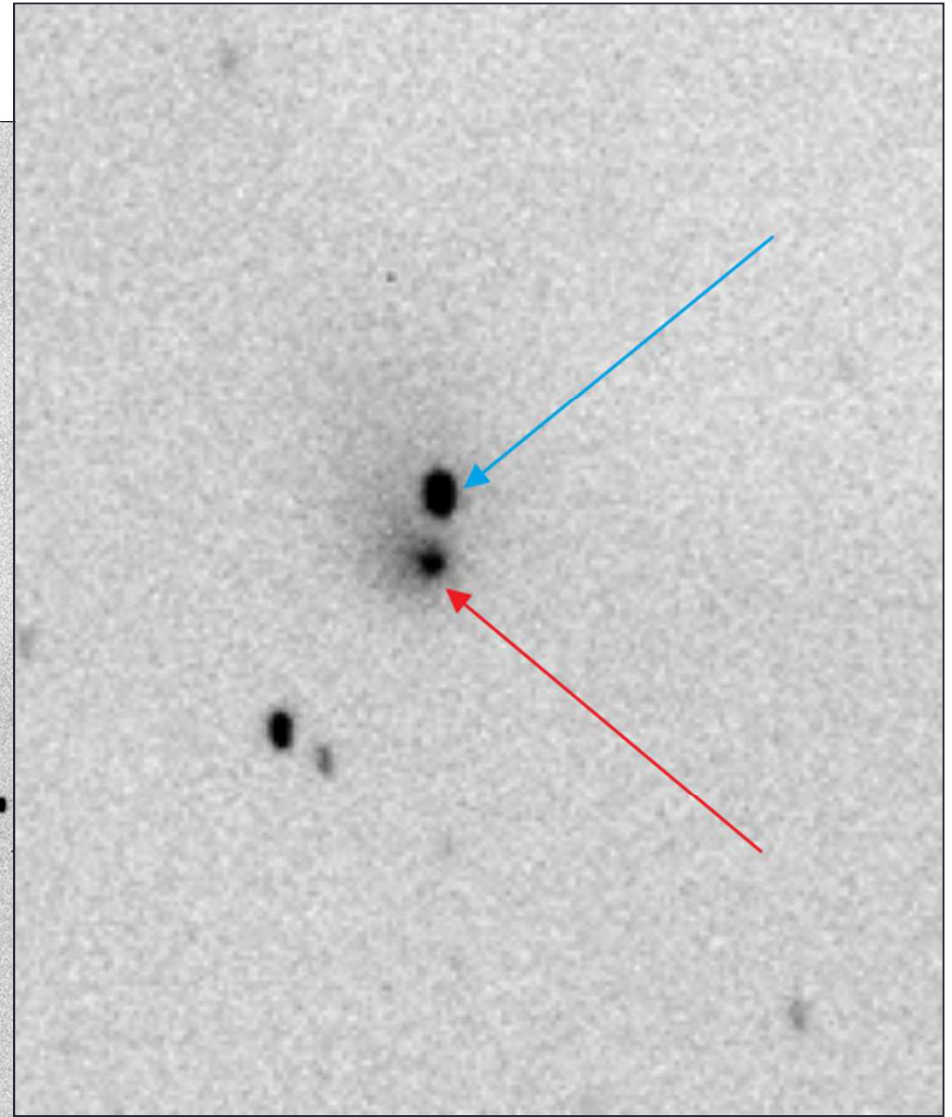
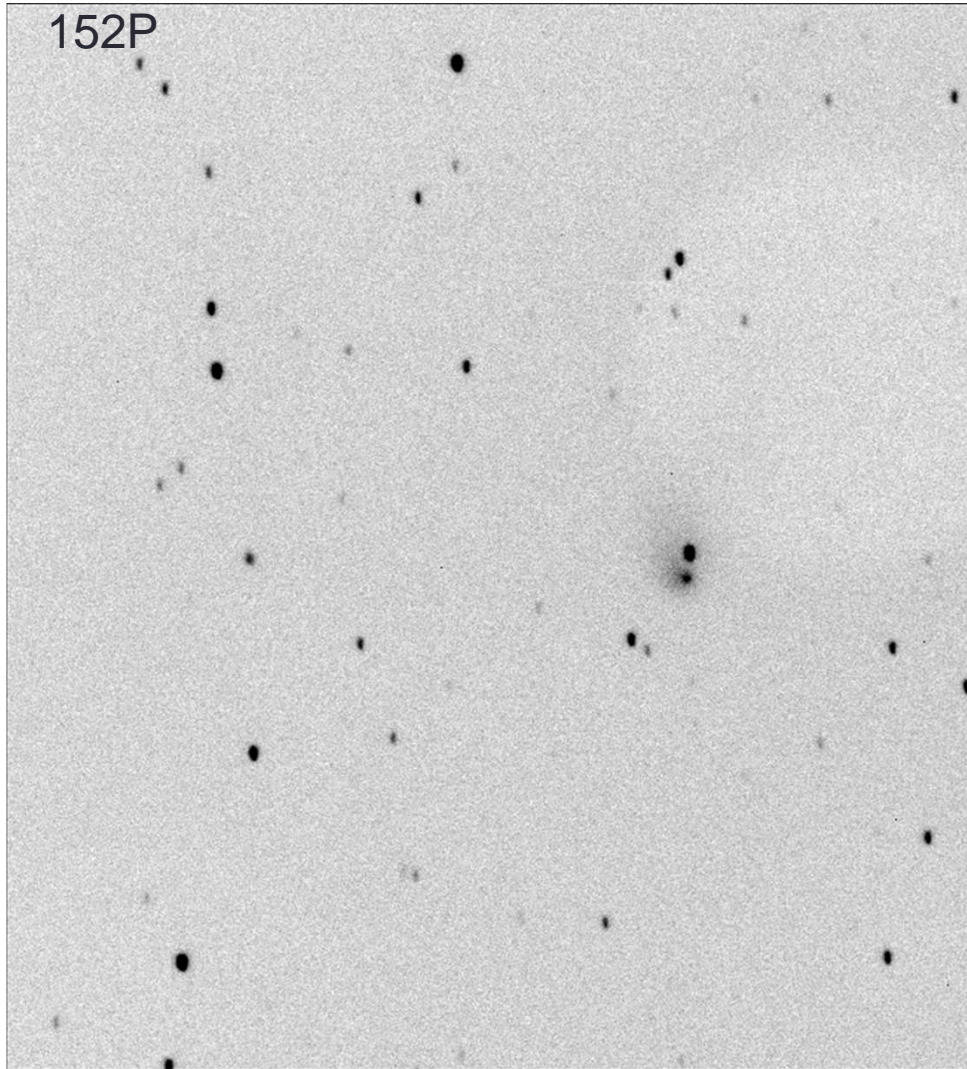


Avec compensation de réfraction

Objets mobiles

Comète

152P



**ALCOR
SYSTEM**

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

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

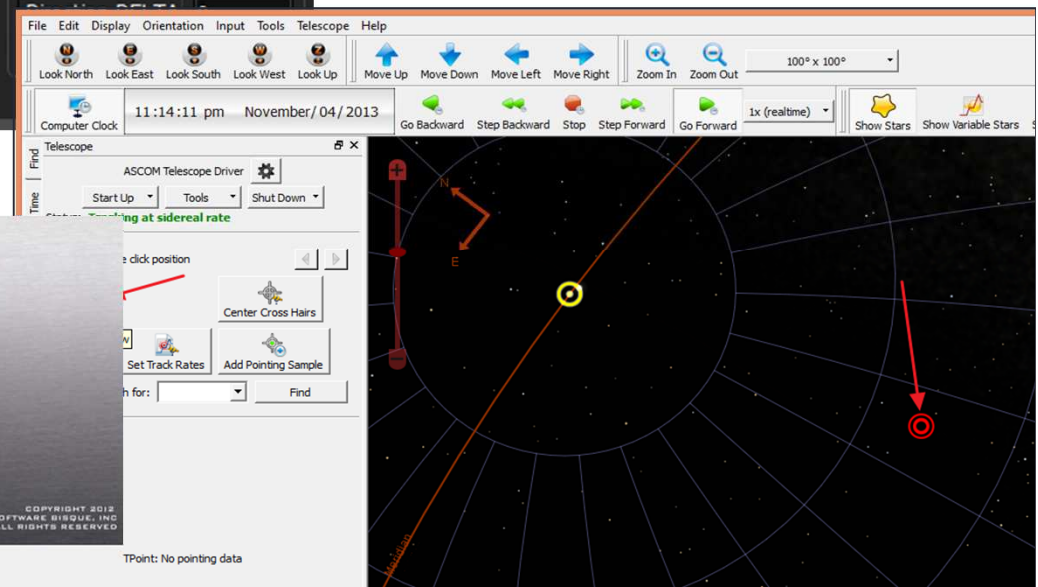
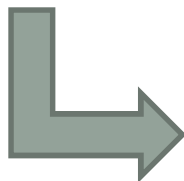
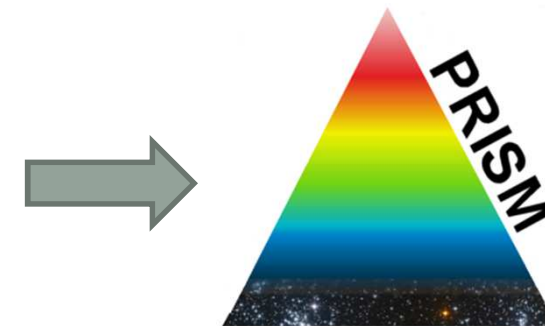
Calibrer sur une position **Cal.**
 Trouver la position **OK**
 Calibration codeurs abs.

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

ASCOM Standards for Astronomy

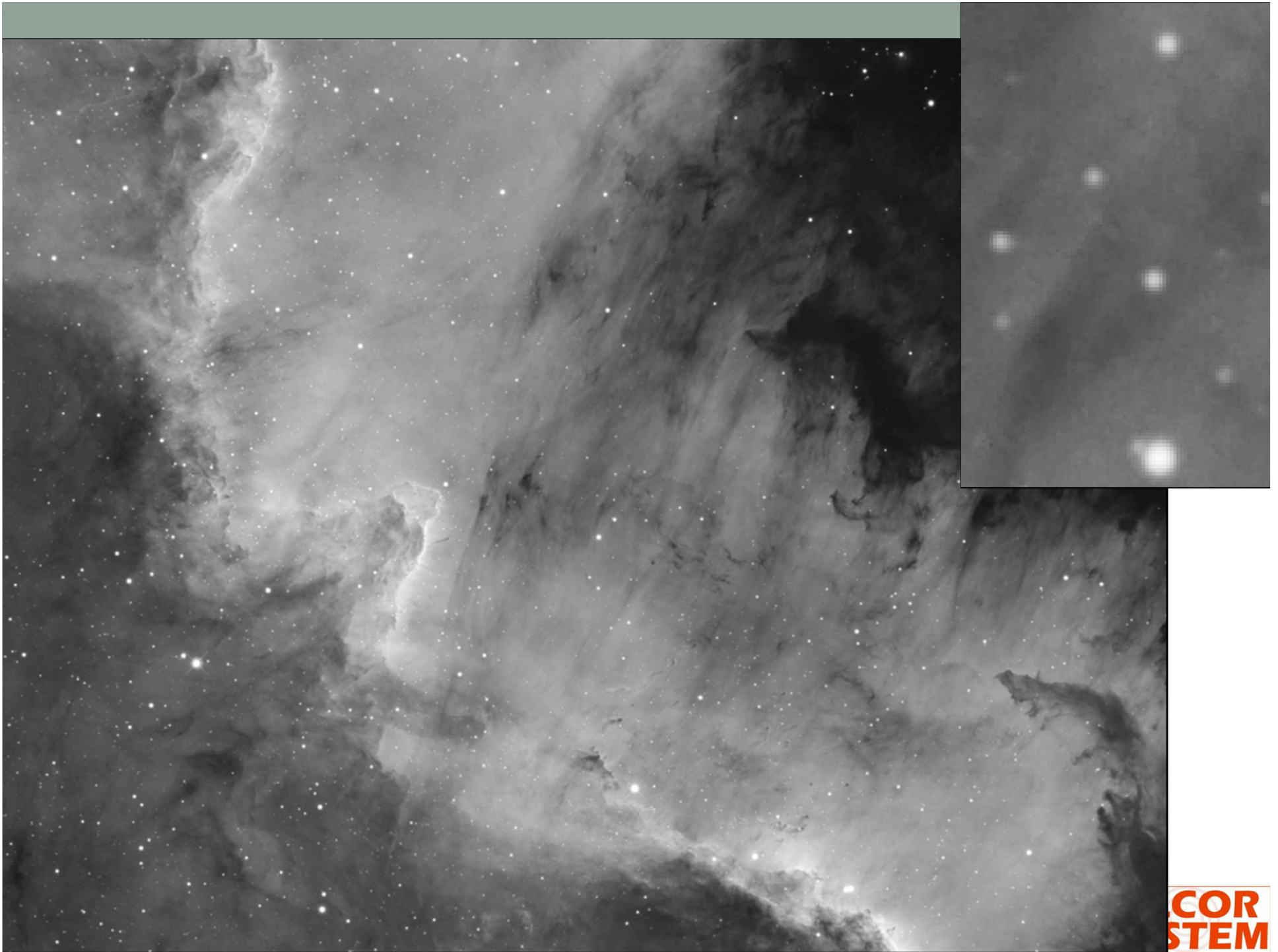


Quelques résultats

- 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)







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

MERCI de votre attention

Des questions ?