

# CORRECTION DE TILT D'UNE OPTIQUE ADAPTATIVE

Système conçu pour le VLT par le DESPA, Observatoire de Paris-Meudon.

*(Adapté du sujet Mines-Ponts 2003)*

## Présentation du système

En instrumentation astronomique, un système d'optique adaptative (OA) permet de corriger les effets des turbulences de l'atmosphère. Celles-ci provoquent des fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction des couches de l'atmosphère traversées par la lumière, et sont à l'origine des déformations des surfaces d'onde reçues par le télescope. Il en résulte non seulement une déformation instantanée des images, mais également un « flou » dû aux variations de la surface d'onde pendant le temps de pose. La Figure 1 ci-dessous compare deux images du centre galactique prises dans l'infrarouge, l'une sans correction (à gauche), l'autre avec correction par la première optique adaptative astronomique : le système « Pueo » du télescope Canada-France-Hawaï.

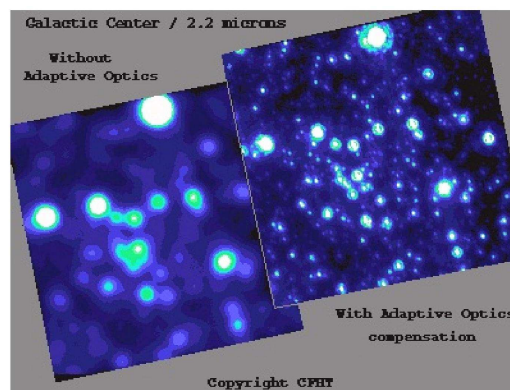


FIG. 1 – Correction de turbulence par Optique Adaptative.

Nous étudierons ici un sous-système de l'optique adaptative du Very Large Telescope européen (VLT) : cf. Figure 2 et Figure 3. Le schéma de principe d'une optique adaptative est présenté Figure 4 : la surface d'onde provenant de l'objet astronomique et déformée par l'atmosphère est reçue par les miroirs primaire puis secondaire du télescope. La lumière est séparée par une lame dichroïque (un miroir partiellement réfléchissant), et envoyée pour partie sur la caméra CCD où se forment les images, pour l'autre partie sur un analyseur de surface d'onde (ASO). Celui-ci fournit une estimation de la déformation de la surface d'onde. Un calculateur temps-réel en déduit les commandes à appliquer aux actionneurs de l'optique adaptative.

Pour des raisons de traitement du signal et de technologie des miroirs adaptatifs, on décompose la surface d'onde déformée en modes, c'est à dire qu'on la projette sur une base orthonormée de fonctions. Les premiers modes sont un « piston » (une constante, soit un mode d'ordre zéro), et deux basculements orthogonaux (modes d'ordre un) : tip-tilt en anglais et tilts en jargon technique de l'astronomie. Le mode piston est indifférent et n'est pas corrigé. Les tilts représentent 90% de l'énergie de déformation. Les modes d'ordre compris entre 2 et une valeur maximale choisie par les concepteurs peuvent être corrigés par un miroir déformable, dont la technologie est généralement à base de matériaux piézoélectriques. Ce miroir ne peut presque pas corriger les tilts. Il est donc bien préférable de confier cette

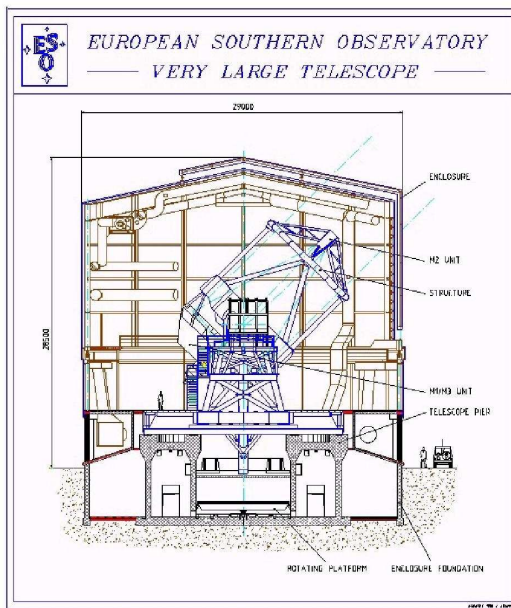


FIG. 2 – Structure générale du VLT.

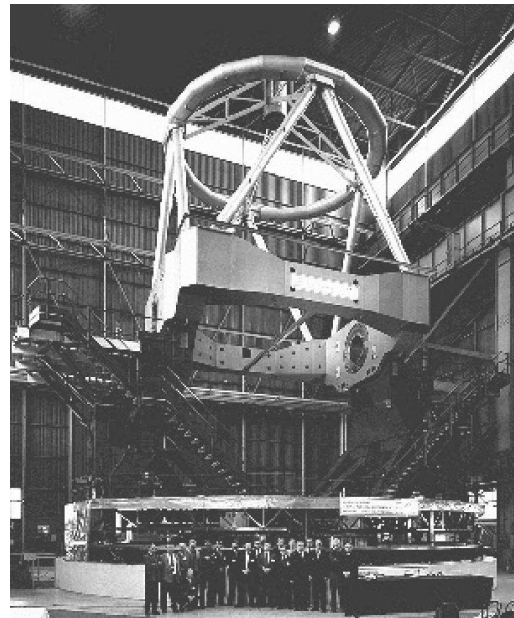


FIG. 3 – Le VLT en cours de montage.

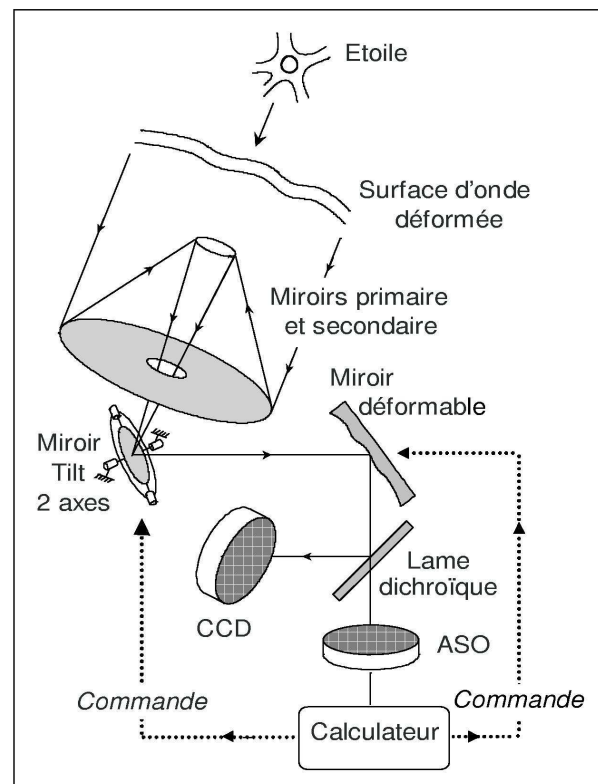


FIG. 4 – Schéma de principe d'une optique adaptative.

fonction à un sous-système séparé commandant un miroir plan par deux rotations orthogonales. l'objet de cette étude est le système d'optique adaptative, et plus particulièrement le sous-système de correction de tilt (Tip-Tilt Mirror, ou TTM) conçu pour le VLT par le Département de Recherche Spatiale (DESPA) de l'Observatoire de Paris-Meudon.

L'asservissement de position angulaire du miroir doit satisfaire les performances énon-

cées dans le tableau 1 extrait du cahier des charges. L’objet de ce TD est de vérifier plus particulièrement le critère de précision.

Fonction de service	Critère	Niveau
FS1 : Corriger les défauts de tilt	Amplitude maximale	5°
	Précision	< 0.1%
	Rapidité	$t_R < 0.1\ s$
	Stabilité	stable

TAB. 1 – Extrait du CdCF.

## Étude du système de correction de tilt

Le système de correction de tilt est détaillé sur la figure 5. Il comprend un système mécanique supportant le miroir, deux moteurs actionnant le système mécanique, un amplificateur de puissance, deux capteurs angulaires et diverses cartes électroniques réalisant des soustractions ou des transformations des signaux.

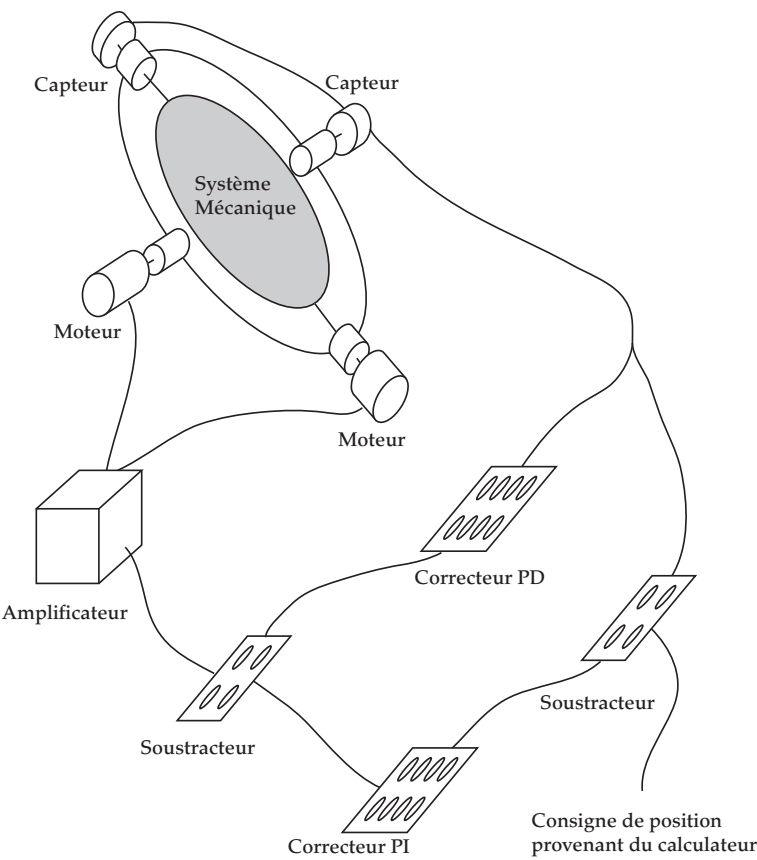


FIG. 5 – Schéma de principe du correcteur de tilt.

Des études pour chaque système ont permis de proposer des modèles de comportement pour chacun des éléments du système :

- le système mécanique peut-être modélisé par l’équation suivante :

$$\theta(t) + T.\frac{d\theta}{dt}(t) + \frac{J}{k}\frac{d^2\theta}{dt^2}(t) = \frac{1}{k}.C(t)$$

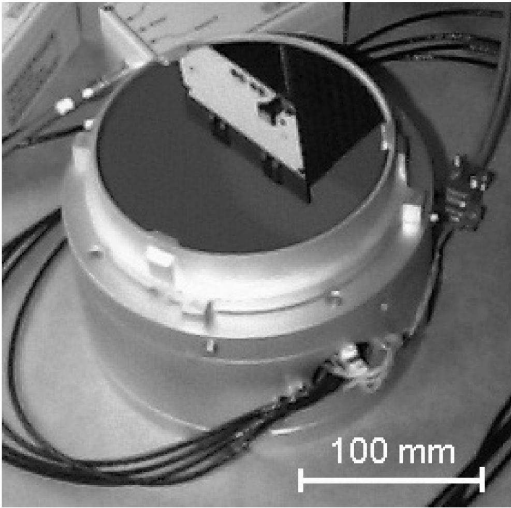


FIG. 6 – Prototype du « Tip-Tilt Mirror » du VLT.

où  $\theta(t)$  est l'angle de rotation et  $C(t)$  est le couple moteur (raideur  $k = 24 \text{ N.m/rad}$ , amortissement  $T = 10^{-3}$ , inertie  $J = 3.6 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ ).

- le moteur électrique, alimenté par une intensité  $I_m$ , sera simplement modélisé par un gain :  $K_3 = 1.2 \text{ N.m/A}$ .
- l'amplification de puissance se comporte comme un gain  $K_2 = 0.1 \text{ A/V}$ .
- le capteur de position se comporte comme un gain  $K_4 = 4125 \text{ V/rad}$ .
- le correcteur PD (proportionnel-dérivé) est construit pour définir la loi entrée  $e_5$ — sortie  $s_5$  :

$$s_5(t) + T_5 \cdot \frac{ds_5}{dt}(t) = K_5 \cdot \frac{de_5}{dt}(t)$$

où  $T_5$  [s] et  $K_5$  [1] sont des constantes de réglage du système.

- Le correcteur PI (proportionnel-intégral) est construit pour définir la loi entrée  $\varepsilon_1$ — sortie  $e_2$  :

$$K_1 \cdot \left( \varepsilon_1(t) + T_1 \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dt}(t) \right) = T_1 \cdot \frac{de_2}{dt}(t)$$

où  $T_1$  [s] et  $K_1$  [1] sont des constantes de réglage du système.

- le convertisseur permet de fournir une image en volt de la consigne de position en radian. Il se comporte comme un gain indentique au capteur  $K_4 = 4125 \text{ V/rad}$ .
1. Compléter le schéma bloc fonctionnel figure 7 décrivant le système en indiquant dans chaque boîte le nom du sous-système.
  2. Compléter les grandeurs d'entrée et de sortie de chaque boîte en précisant les unités des grandeurs.
  3. Calculer les transformées de Laplace des équations en supposant que le système est au repos à  $t < 0$  (Conditions initiales nulles).
  4. Déterminer les fonctions de transfert de chacun des composants. Proposer un nouveau schéma bloc contenant les fonctions de transfert.
  5. Modifier le schéma bloc obtenu pour obtenir un schéma bloc comportant deux boucles imbriquées l'une dans l'autre comme sur la figure 10. Déterminer les fonctions de transfert  $H_A$ ,  $H_B$ ,  $H_C$  et  $H_D$  (On pourra s'aider en remplissant le schéma intermédiaire de la figure 9).
  6. Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte de la première boucle :  $FTBO_1(p)$  en fonction de  $H_B$  et  $H_C$ .
  7. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée de la première boucle :  $FTBF_1(p)$  en fonction de  $H_B$  et  $H_C$ .
  8. Exprimer la réponse  $\theta(p)$  à une entrée  $E_2(p)$  en échelon de 1 V, en fonction de  $FTBF_1(p)$ . En déduire l'écart  $\varepsilon_2(p)$  pour la première boucle en fonction de  $H_B$  et  $H_C$ .
  9. L'entrée  $e_2$  et la sortie  $\theta$  n'étant pas dans la même unité, on adapte la notion de précision en considérant la première boucle précise si l'écart  $\varepsilon_2(p)$  converge vers 0. Déterminer si la première boucle est précise.
  10. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée du système complet :  $FTBF_2(p)$  en fonction de  $FTBF_1(p)$ ,  $H_A$  et  $H_D$ .
  11. Calculer la limite de la réponse à l'échelon  $\theta_c(t) = \theta_0 \cdot U(t)$  quand  $t$  tend vers l'infini. Le système est-il précis ?

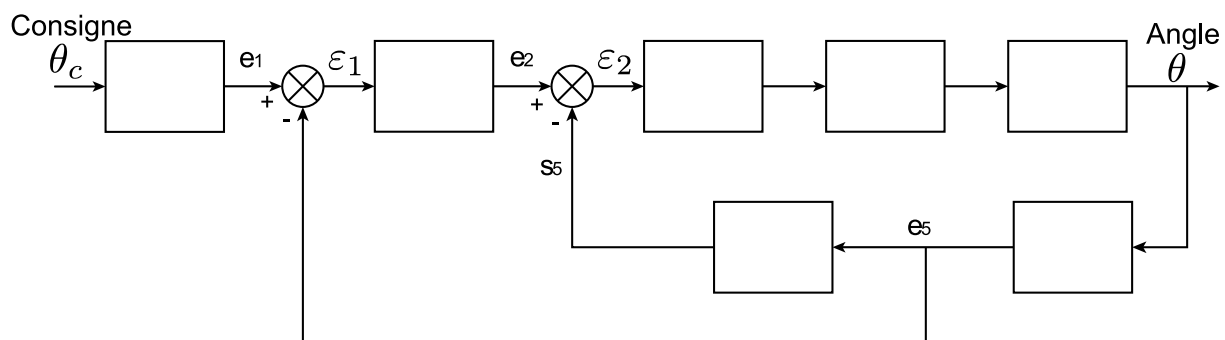


FIG. 7 – Schéma bloc fonctionnel question 1.

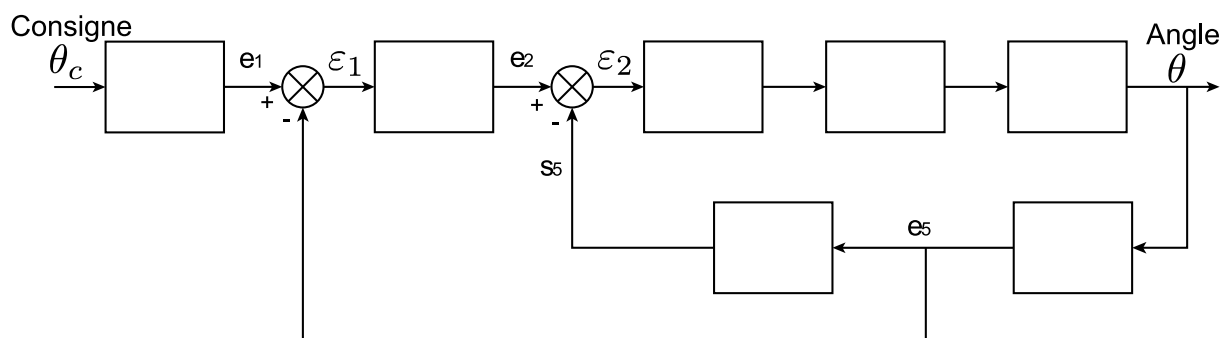


FIG. 8 – Schéma bloc question 4.

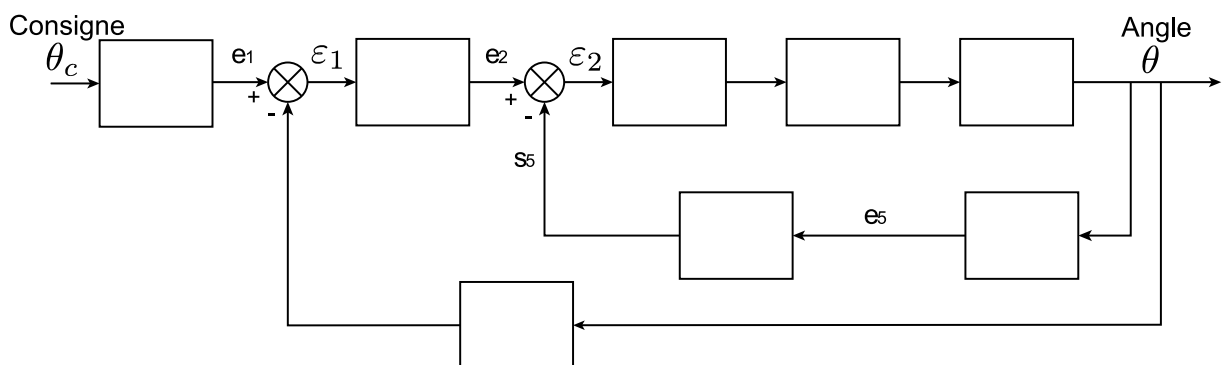


FIG. 9 – Schéma bloc intermédiaire question 5.

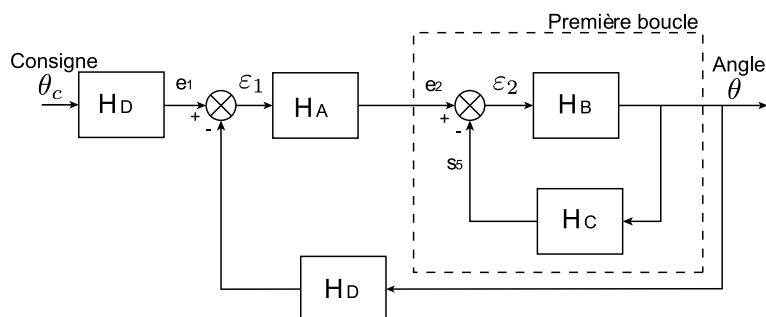


FIG. 10 – Schéma bloc question 5.