

---

## Examen Instrumentation : optique & chaîne de détection

---

- Examen sans document
- Durée : 2h30 ; conseil : pas plus de 10 minutes par question de cours.
- Barème indicatif : questions de cours  $\simeq 1/4$ , problème  $\simeq 3/4$
- Les différentes parties du problème sont *très largement indépendantes* les unes des autres.
- Rédaction : concise et précise, svp, avec des schémas clairs et pertinents.
- Donner une expression analytique avant toute application numérique.

---

### Petit formulaire utile mais incomplet

- le pouvoir de résolution théorique du réseau s'écrit  $\mathcal{R}_{\text{th}} = m N_{\text{tr}}$
  - le pouvoir de résolution réel est limité par  $\mathcal{R} = \frac{\sin i \pm \sin i'}{\cos i'} \frac{f}{\ell}$
- 

### 1. Questions de cours

- 1.1. Citer les différents foyers d'un télescope (pour le visible ou l'infrarouge). Les comparer, en explicitant les critères de comparaison.
- 1.2. On caractérise la turbulence sur un site d'observation par les paramètres  $r_0$  et  $v_0$  : en donner la signification.  
On caractérise un système d'optique adaptative entre autres par le nombre d'actuateurs et la fréquence de fonctionnement : que dimensionnent ces propriétés ?
- 1.3. Expliciter le principe de l'interférométrie en astronomie. Quelle information ressort de la courbe de visibilité ci-jointe (Fig. 1).

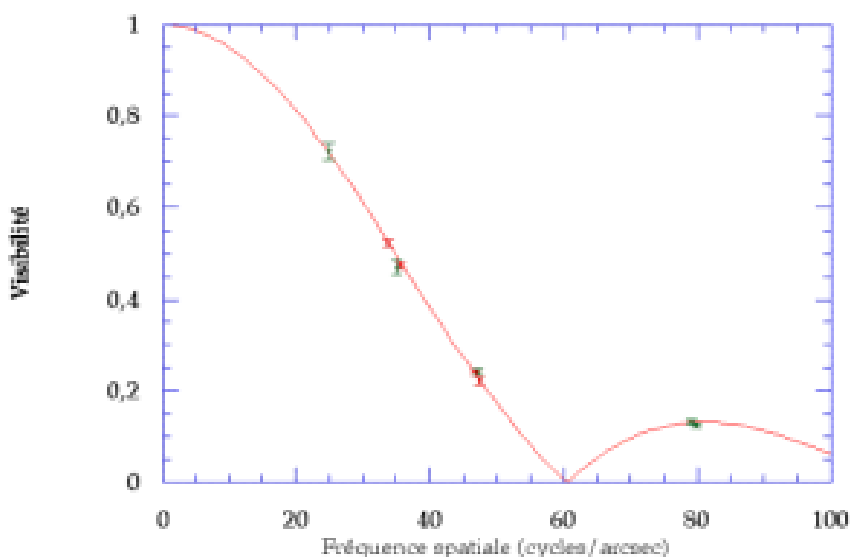


Figure 1: Courbe de visibilité de l'étoile  $\alpha$  du Bouvier.

## 2. Problème : quelques dimensionnements de l'instrument FLAMES/GIRAFFE

FLAMES est un instrument pour la spectrométrie multi-objets, équipant le foyer Nasmyth d'un des télescopes du VLT. FLAMES apporte un pouvoir de résolution spectrale moyen dans le domaine spectral entre 370 et 950 nm. Il peut atteindre des cibles dans un rayon de 25 minutes d'angle sur le ciel. FLAMES alimente 2 spectromètres : GIRAFFE et UVES. On ne s'intéressera par la suite qu'à GIRAFFE.

GIRAFFE fonctionne selon 3 modes de *spectro-imagerie*. Quel que soit le mode, l'information spectrale est dispersée le long du grand côté du CCD, et l'information des fibres est quant à elle distribuée le long du petit côté du CCD.

- Mode Medusa : 132 cibles du champ sont sélectionnées par autant de fibres. Ces fibres sont positionnables séparément, à mieux que 0.2" près. Chaque fibre recueille 1.2" sur le ciel. Le pouvoir de résolution spectrale peut monter à 18000.
- Mode IFU (IFU = integral field unit). Chaque IFU comporte 20 microlentilles, chacune alimentant une fibre ; et 15 IFU permettent d'imager autant de sources étendues sur le ciel. Chaque microlentille recueille un champ carré de 0.52" de côté sur le ciel. Le pouvoir de résolution spectrale varie de 9000 à 30000.
- Mode ARGUS : les fibres sont nourries par une galette rectangulaire de microlentilles ( $22 \times 14$



Figure 2: Mode Medusa : support des têtes de fibres positionnables, chacune à l'extrémité d'un bras mobile, au foyer Nasmyth.

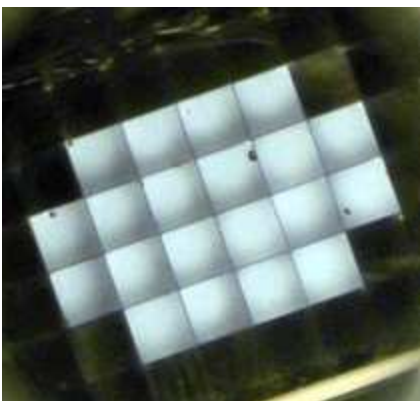


Figure 3: Mode IFU : avec une galette de 20 microlentilles alimentant chacune 1 fibre optique.

microlentilles ; 8 microlentilles (2 par coin) ne sont pas fibrées). Ces microlentilles, identiques à celles du mode IFU, recueillent chacune un champ carré sur le ciel de  $0.52''$  de côté.

Le *réseau* de GIRAFFE possède les caractéristiques suivantes : blazé à  $63.5^\circ$ , 316 traits  $\text{mm}^{-1}$ . Le faisceau qui l'illumine a un diamètre de 18 cm. L'instrument est ouvert à  $f/5$ . GIRAFFE possède un seul *capteur* : un CCD de dimension  $4\text{k}\times 2\text{k}$ , avec des pixels de  $15\ \mu\text{m}$  de côté.

### 2.1. L'instrument : les fibres de FLAMES et le spectromètre GIRAFFE

- Faire un schéma du mode Medusa, avec quelques fibres sélectionnant les cibles et alimentant le spectromètre, et faire un schéma de ce que voit le CCD.
- Quel mode choisir pour, respectivement, l'observation d'un amas de galaxies lointain, d'un amas de galaxies proche dont les objets sont résolus, ou de sources stellaires ?
- Pour quelle(s) raison(s) pratique(s) le nombre de fibres du mode Medusa est-il inférieur à celui des 2 autres modes ?

### 2.2. Alimentation des fibres au foyer Nasmyth

FLAMES est situé au foyer Nasmyth d'une unité du VLT. Le diamètre du collecteur vaut 8 m. Le faisceau est ouvert à  $f/15$ . Le champ non vigneté a un diamètre de 7.15 minutes d'angle.

- Déterminer la focale du foyer Nasmyth, puis le diamètre linéaire du champ non vigneté.
- En mode Medusa, les microlentilles, positionnées *très* légèrement en amont du foyer Nasmyth, convertissent le faisceau ouvert à  $f/15$  en faisceau ouvert à  $f/5$ . Faire un schéma optique, sans respecter d'échelle, avec une lentille équivalente pour le collecteur de signal ouvert à  $f/15$ , une microlentille et sa fibre, puis avec une lentille équivalente à l'ensemble {collecteur + microlentille}. Déterminer le diamètre des fibres du mode Medusa correspondant aux caractéristiques de ce mode.
- En mode IFU ou Argus, ce sont les microlentilles, positionnées *très* proches du foyer Nasmyth, qui découpent le champ. En supposant qu'elles sont au foyer, déterminer leur taille. Justifier a posteriori l'hypothèse.

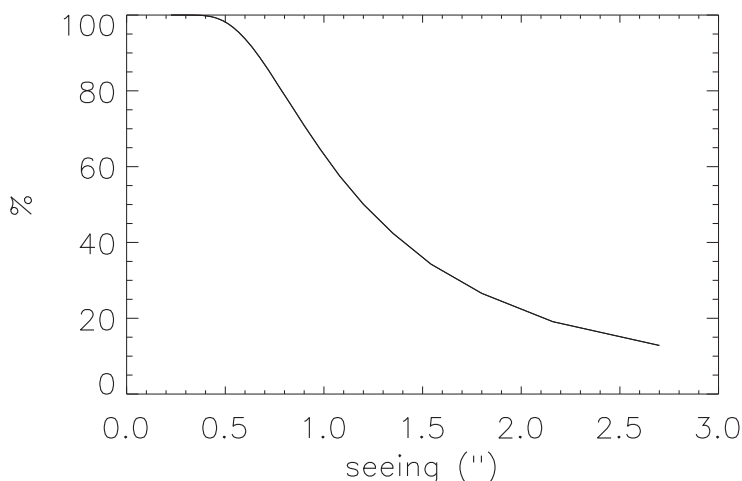


Figure 4: Pourcentage du flux collecté par la fibre, en fonction du seeing, pour une fibre d'entrée collectant  $1.2''$  sur le ciel.

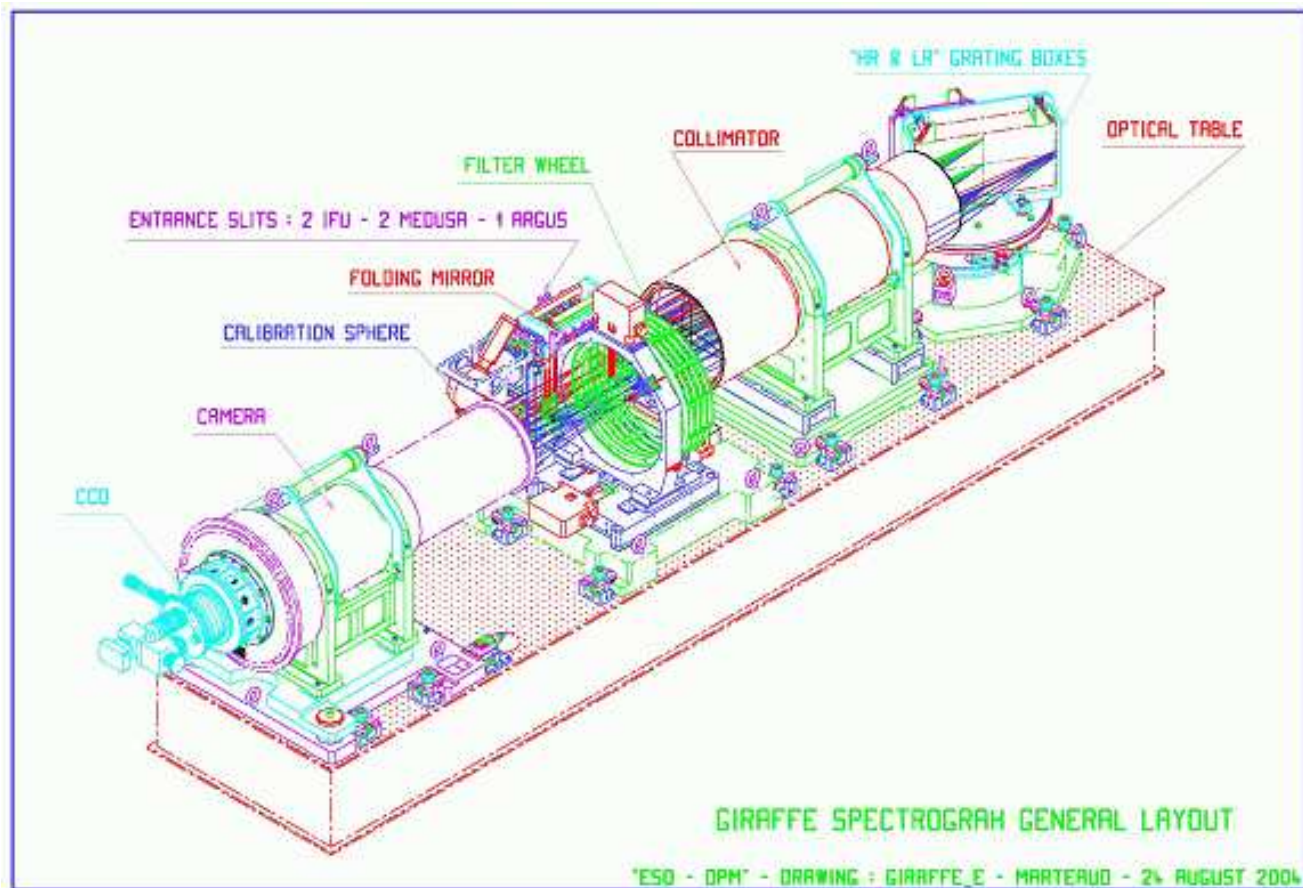


Figure 5: Schéma optique. Lexique : entrance slit = fente d'entrée ; grating = réseau ; filter wheel = roue à filtres.

### 2.3. Mode Medusa : influence du seeing

- Comparer l'ouverture angulaire collectée sur le ciel par une fibre à la tache de diffraction en lumière visible. Commenter.
- On rappelle que le seeing mesure la largeur à mi-hauteur de la tache image élargie par la turbulence. A l'aide de la figure 4, estimer la fraction de flux perdu en fonction du seeing, pour un très bon seeing (0.5"), un seeing moyen (1"), et un mauvais seeing (1.6"). Par quoi se traduit la perte de flux ?
- La nouvelle génération de spectro-imageur travaillera en proche infrarouge et comportera en entrée une optique adaptative. Quels avantages seront apportés ?

### 2.4. Schéma optique du spectromètre

La figure 5 donne le schéma optique du spectromètre.

- Pourquoi le réseau est-il incliné ? Son angle de fonctionnement vaut  $63.5^\circ$  : qu'est-ce qui contraint cette valeur ?
- Préciser le rôle du collimateur (collimator). Combien de passages le faisceau effectue-t-il via le collimateur ?
- Préciser le rôle de l'optique de chambre (camera).

### 2.5. Résolution spectrale et intervalle spectral (1)

Remarque : on ne s'intéresse pas, dans cette partie ni dans celle qui suit, à quantifier l'évolution de la dispersion avec la longueur d'onde ; on se contente d'estimer des valeurs moyennes sur le spectre accessible à GIRAFFE

- a. En limite bleue, aux alentours de 375 nm, le réseau travaille à l'ordre 15. A quel ordre apparaît le spectre aux alentours de 930 nm ?
- b. Le schéma optique de GIRAFFE permet-il d'observer plusieurs ordres simultanément ?
- c. Déterminer, de ce qui précède, l'intervalle spectral moyen  $\Delta\lambda$  accessible en une pose. A quoi servent les filtres du spectromètre (Fig. 5) ?
- d. Qu'est-ce qui dimensionne le pouvoir de résolution spectrale ? Déterminer par ce biais le diamètre des fibres en mode Medusa, et comparer au résultat obtenu à la question **2.2**.

### 2.6. Résolution spectrale et intervalle spectral (2)

La caméra a une taille de 2k x 4k, et un pixel (carré) représente 0.3" sur le ciel le long de la dimension spatiale.

- a. Déterminer la taille en *pixel* d'une image monochromatique via une fibre d'alimentation, selon le mode.
- b. Déterminer le nombre maximal de telles images monochromatiques sur la caméra. Par la suite, on note  $\mathcal{N}$  ce nombre. Faire l'application numérique pour chaque mode.
- c. Exprimer  $\mathcal{N}$  en fonction de l'élément de résolution  $\delta\lambda$  et de la largeur spectrale admissible sur le CCD  $\Delta\lambda$  d'une part, et d'autre part en fonction du pouvoir de résolution spectrale  $\mathcal{R}$  et du rapport  $\lambda/\Delta\lambda$ . Commenter ce résultat.
- d. La documentation de GIRAFFE montre que  $\lambda/\Delta\lambda$  varie entre 12 et 24. Montrer que cela est en accord avec le pouvoir de résolution annoncé, ainsi qu'avec les dimensionnements de la question **2.5**.
- e. Exprimer la meilleure résolution accessible  $\delta\lambda$  en nm puis en  $\text{km s}^{-1}$  par pixel.

### 2.7. Performances / signal et bruit

- a. On observe une source stellaire avec un rapport signal à bruit par pixel de 200. Estimer le nombre minimal de photoélectrons collectés.
- b. Le bruit de lecture est de l'ordre de  $10 e^-$  par pixel. En déduire la nature du bruit dominant pour la source stellaire précédente, puis le rapport signal/bruit pour une galaxie 10, 100 fois moins lumineuse.
- c. Pour un objet très peu lumineux, il est nécessaire de tenir compte de diverses contributions au signal, dont le courant d'obscurité, qui représentent un flux  $\phi$  de photoélectrons de l'ordre de  $0.03 e^-/\text{s/pixel}$ . Déterminer alors le rapport signal à bruit pour une source donnant  $80 e^-$  pour une pose de 1000 s.
- d. Lorsque le soleil n'est pas très loin sous l'horizon, la luminosité du ciel contribue au spectre, en apportant l'information du spectre solaire.  
On souhaite, pour s'en affranchir, assurer que le signal du spectre solaire est inférieur au quart du bruit du spectre de l'objet étudié. En déduire le rapport de flux par pixel entre la source et le ciel. L'exprimer également en différence de magnitude, sachant que cette échelle est logarithmique, avec 2.5 magnitudes pour un contraste de flux d'un facteur 10.
- e. Parmi les sources précédentes, lesquelles peut-on observer et identifier lorsque le fond de ciel monte à  $10 e^-$  par pixel sur une pose ?
- f. Interpréter les informations de la figure 6, correspondant au mode Medusa. Discuter de l'influence de la magnitude, de la résolution, du temps de pose. Si besoin, annoter la figure et la joindre à la copie.

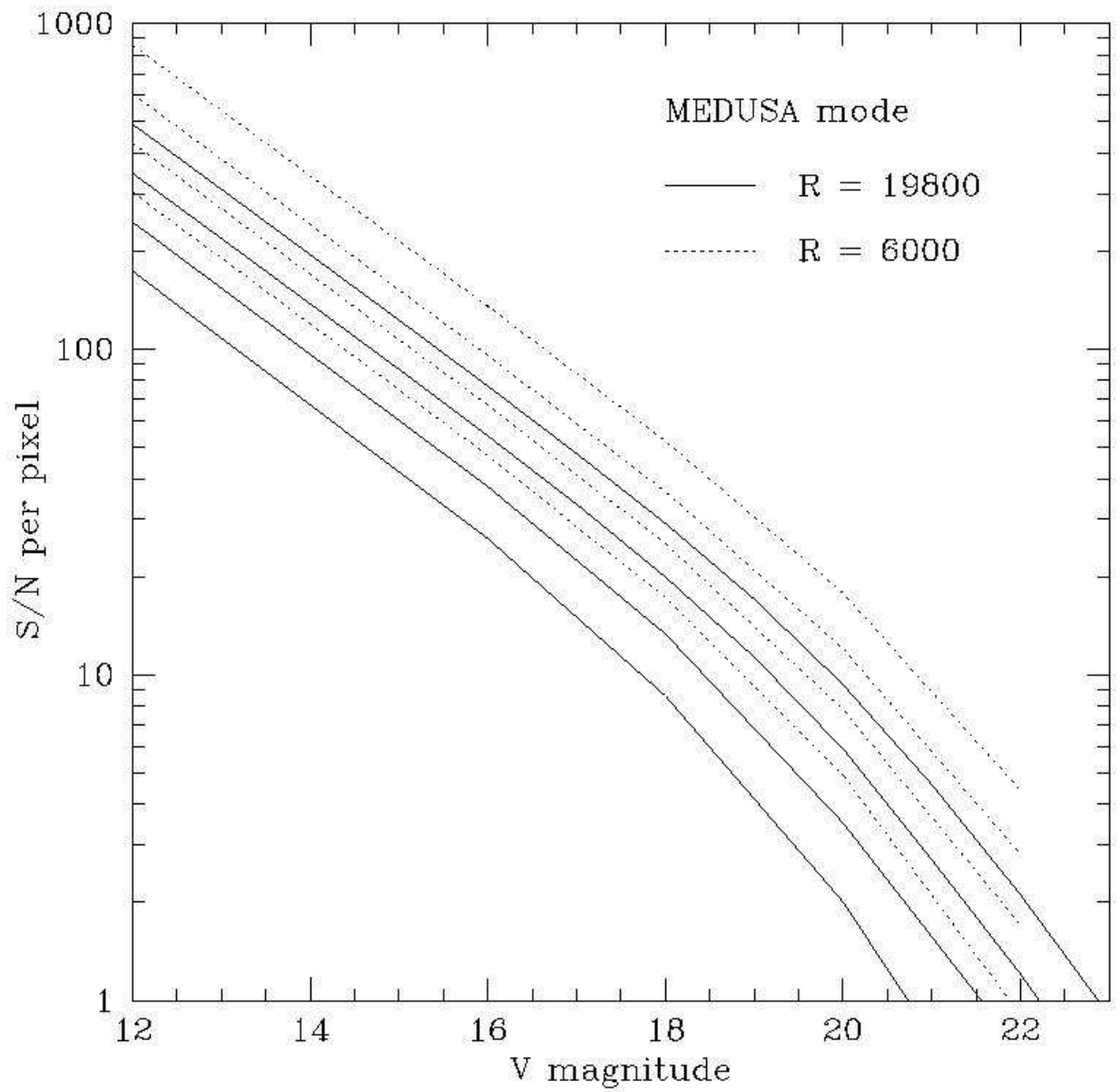


Figure 6: Evolution du rapport signal/bruit ( $S/N$ ) en fonction de la magnitude de l'objet, à divers pouvoirs de résolution spectrale, et pour différents temps de pose : 15, 30, 60 et 120 minutes.