

# Mastère M1 Observatoire de Paris

## Module « optique solaire » Examen 2008

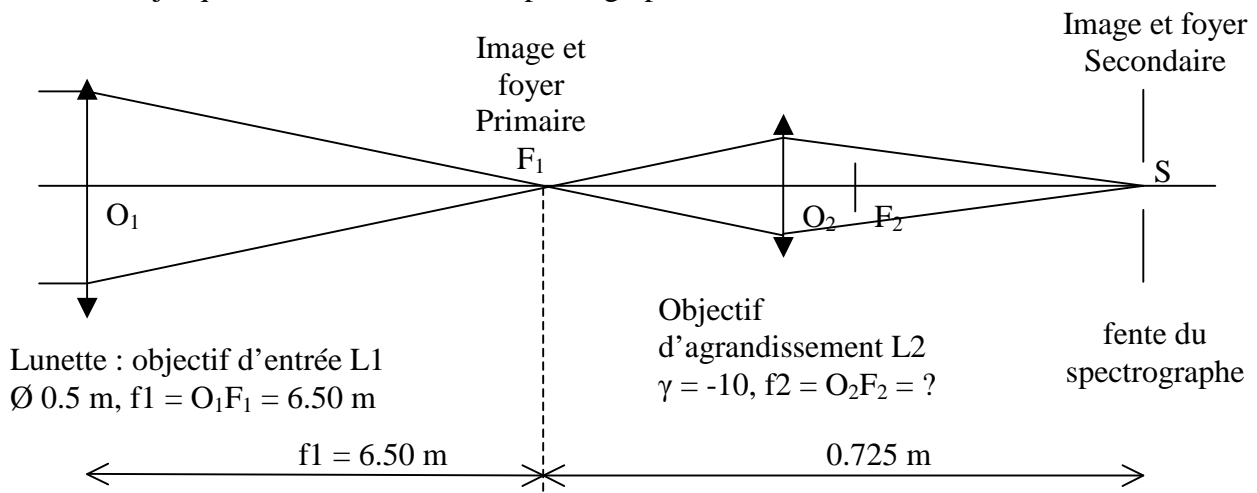
L'examen comporte :

- une série de 5 exercices pour un total de 10 points (de 10H à 13H, photocopié autorisé)
- une évaluation sur compte rendu des TD numériques sur 6 points
- une évaluation sur compte rendu des TP à la Tour Solaire de Meudon sur 4 points

Le compte rendu des TD numériques sera à rendre aux enseignants avant les vacances de Noël. Vous donnerez pour chaque exercice résolu la copie de vos programmes GDL, les résultats obtenus (sous forme de figures ou d'images), et vous commenterez les résultats.

### Exercice 1 : la lunette tourelle du Pic du Midi

La lunette tourelle du Pic du Midi est, sur le sol français, l'instrument qui donne les meilleures images de la surface solaire. Il s'agit d'une lunette astronomique à deux foyers (primaire, secondaire) couplée à un polarimètre et à un spectrographe. On donne le schéma (non à l'échelle) de la lunette jusqu'à la fente d'entrée du spectrographe.



Le diamètre de l'objectif L1 de la lunette mesure  $D = 0.5 \text{ m}$  de diamètre pour une focale  $f_1 = O_1F_1 = 6.50 \text{ m}$ . On s'intéresse tout d'abord au foyer primaire en F1.

- 1) Quel est le diamètre en mm de l'image du soleil au foyer primaire de la lunette (on donne le diamètre apparent du soleil sur le ciel : 32 minutes d'arc)
- 2) quelle est la dimension au foyer primaire, en mm, d'un granule solaire, sachant que la taille des granules est de 1 seconde d'arc ?
- 3) quel est le pouvoir séparateur de la lunette (ou diamètre angulaire de la tache de diffraction) en secondes d'arc à la longueur d'onde de  $550 \text{ nm}$  ?
- 4) quel flux lumineux reçoit on au foyer primaire, en  $\text{W/m}^2$ , sachant que le flux incident au niveau du sol est d'environ  $1300 \text{ W/m}^2$  (valeur appelée « constante solaire »), et qu'il n'y a aucune perte d'énergie dans l'instrument ?

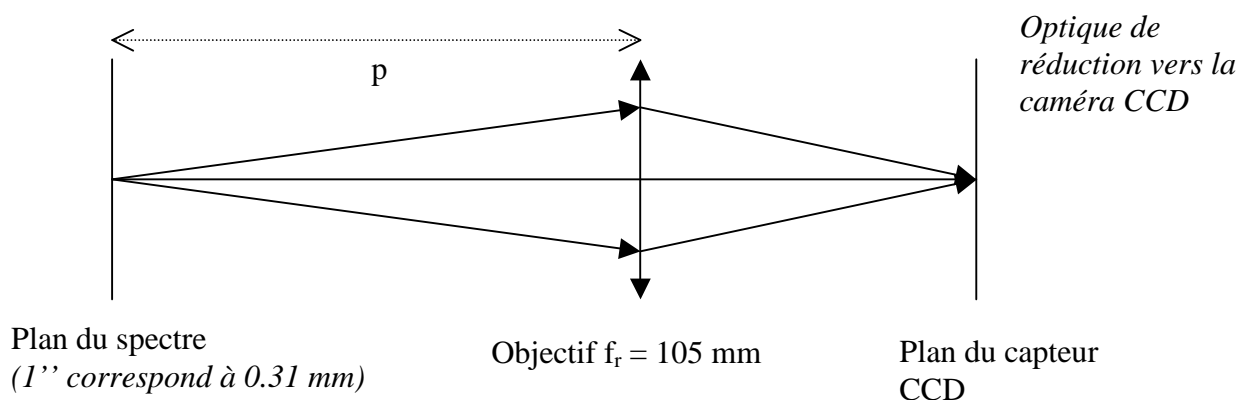
On s'intéresse maintenant au foyer secondaire en S. Pour alimenter le spectrographe, on veut agrandir l'image primaire 10 fois (c'est à dire porter la focale équivalente à 65 m au foyer secondaire) en utilisant un objectif convergent L2. On appellera  $f_2 = O_2F_2$  la distance focale de L2.

- 5) Sachant que l'on dispose d'une longueur  $F_1S = 0.725$  m entre le foyer primaire  $F_1$  de la lunette et la fente d'entrée du spectrographe S, quelle devra être la distance focale  $f_2 = O_2F_2$  de l'objectif utilisé pour avoir un grandissement  $\gamma = -10$  entre  $F_1$  et S ?
- 6) Quelle sera alors la dimension sur la fente S du spectrographe, en mm, d'un granule solaire de 1 seconde d'arc sur le ciel ?  
(réponse utile pour la suite : 1'' correspond à 0.31 mm)

### Exercice 2 : le spectrographe

La lunette alimente un spectrographe de 8 m de distance focale dont la fente d'entrée est placée au foyer secondaire de la lunette, de focale équivalente à  $F = 65$  m. Il utilise un réseau d'angle de blaze  $b = 63.5^\circ$  de 300 traits/mm et fonctionne dans des ordres d'interférence élevés voisins de 10. Les focales de ses miroirs collimateur et objectif de chambre sont égales à  $f = 8$  m. A l'aide de la formule des réseaux, traiter les questions suivantes :

- 1) L'image de la pupille d'entrée (il s'agit de l'objectif L1 de la lunette lui même) est rejetée à l'infini à l'entrée du spectrographe (c'est à dire au foyer secondaire ou la focale équivalente vaut  $F = 65$  m) par un dispositif non représenté sur le schéma. De ce fait, le miroir collimateur en forme une nouvelle image sur le réseau de diffraction qui se trouve situé en son foyer. Quel sera le diamètre de l'image de la pupille sur le réseau ?
- 2) En utilisant la formule des réseaux, donner les longueurs d'onde dans le blaze en Angströms (c'est à dire telles que  $i = i' = b$ ) pour les ordres 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 et 15
- 3) il n'y a pas de spectrographe pré disperser à l'ordre 1 pour isoler les ordres d'interférence. A la place, on utilise des filtres interférentiels étroits. En vous aidant de la question précédente, quelle devra être, en ordre de grandeur, la largeur en Angströms des filtres pour isoler convenablement un ordre d'interférence ?
- 4) calculer la dispersion du spectrographe  $dx/d\lambda$  en mm/Å dans les ordres 7 et 15
- 5) calculer la résolution spectrale du spectrographe en milli Å, toujours dans les ordres 7 et 15 lorsqu'on utilise une fente d'entrée de 0.5 seconde de largeur angulaire sur le ciel, que l'on transformera en largeur métrique (en mm) à partir du résultat de la question 6 du premier exercice.



- 6) Pour transférer le spectre (images bidimensionnelles  $x, \lambda$ ) sur le détecteur CCD, on utilise l'optique de transfert schématisée ci dessus, dont le but est de réduire la taille du spectre en

l'adaptant à celle de la cible CCD. Sachant que les pixels de la caméra ont une dimension carrée de 6.45 microns, quel facteur de réduction  $\gamma$  (attention : il est négatif) doit-on adopter pour avoir des pixels de 0.2 seconde d'arc dans la direction spatiale sur le détecteur ? Quelle devra être la distance  $p$  entre le spectre et l'objectif réducteur de focale  $f_r = 105$  mm pour parvenir à ce facteur de réduction ? (*réponse utile pour la suite :  $\gamma = -0.1$* )

- 7) Quelle sera avec ce même facteur de réduction la valeur du pixel dans le sens spectral (direction de la longueur d'onde) dans les ordres 7 et 15 ?
- 8) Sachant que le détecteur fait 1392 pixels (direction spectrale) x 1040 pixels (direction spatiale), de quel champ d'observation spatial (en secondes d'arc) et spectral (en Angströms) disposera t-on dans les ordres 7 et 15 sur le détecteur ?

### Exercice 3 : décomposition Zeeman de la raie CaI 6122 Å dans un champ magnétique

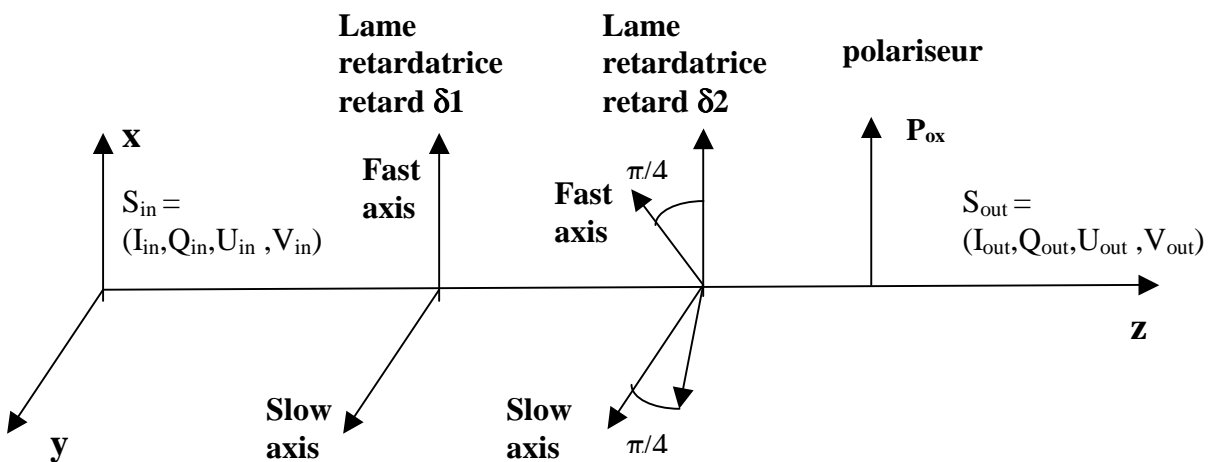
Pour la transition  $^3S_1 \rightarrow ^3P_1$  de la raie CaI 6122 Å:

On fera un schéma (arbre) montrant les sous niveaux hauts et bas. Identifier le nombre de transitions possibles  $\Delta m_j = 0, \pm 1$  entre les sous niveaux et les indiquer par des flèches ; identifier les composantes  $\sigma^-$ ,  $\pi$  et  $\sigma^+$

- 1) calculer le facteur de Landé des niveaux haut et bas
- 2) donner la séparation  $\Delta E$  entre les sous niveaux hauts en fonction du magnéton de Bohr  $\mu_B = e \hbar / 2 m$  et du champ magnétique B
- 3) donner la séparation  $\Delta E$  entre les sous niveaux bas en fonction du magnéton de Bohr  $\mu_B$  et du champ magnétique B
- 4) donner la variation d'énergie  $\Delta E_B = E_B - E_0$  de chaque sous niveau ( $E_B$  est l'énergie de la transition en présence du champ B) par rapport à l'énergie  $E_0$  sans champ magnétique
- 5) donner  $\Delta E_B$  pour les centres de gravité des composantes  $\sigma^-$ ,  $\pi$  et  $\sigma^+$  après avoir calculé le facteur de Landé équivalent  $g^*$ .

### Exercice 4 : le polarimètre

On veut pouvoir mesurer la polarisation circulaire et linéaire de la lumière. Pour ce faire, on choisit de placer au foyer primaire de la lunette deux retardateurs variables et un polariseur, avant d'injecter la lumière dans le spectrographe selon le schéma ci dessous.



Un retardateur variable est un dispositif qui permet, par application d'un champ électrique à un cristal liquide biréfringent, d'introduire un retard  $\delta$  choisi dans la gamme  $[0, 2\pi]$  entre les deux axes du cristal. Les axes du premier retardateur sont alignés avec les axes  $Ox$  et  $Oy$  (azimut  $\alpha_1 = 0$ ). Par contre, ceux du second retardateur font un angle  $\pi/4$  avec les axes  $Ox$  et  $Oy$  (azimut  $\alpha_2 = \pi/4$ , voir figure). Le polariseur ne laisse passer que la composante du champ électrique parallèle à l'axe  $Ox$ .

- 1) En se référant au cours, donner la matrice de Müller  $P_{ox}$  d'un polariseur d'axe  $Ox$ , la matrice de Müller  $T_\delta$  d'un retardateur de retard  $\delta$ , la matrice d'une rotation d'angle  $\pi/4$  et la matrice d'une rotation d'angle  $-\pi/4$
- 2) Montrer que le vecteur de Stokes sortant  $S_{out}$  est relié au vecteur de Stokes incident  $S_{in}$  par la relation  $S_{out} = P_{ox} R_{-\pi/4} T_\delta R_{\pi/4} T_{\delta 1} S_{in}$ .
- 3) Effectuer le produit matriciel et donner la matrice  $P_{ox} R_{-\pi/4} T_\delta R_{\pi/4} T_{\delta 1}$ . Montrer ensuite que le signal que l'on injecte dans le spectrographe à la sortie du polariseur est :  

$$I_{out} = \frac{1}{2} [ I_{in} + Q_{in} \cos(\delta 2) + \sin(\delta 2) ( U_{in} \sin(\delta 1) - V_{in} \cos(\delta 1) ) ]$$
 où  $I_{in}$ ,  $Q_{in}$ ,  $U_{in}$  et  $V_{in}$  sont les paramètres de Stokes de la lumière incidente (vecteur  $S_{in}$ )
- 4) L'observateur voudrait mesurer tous les paramètres de Stokes de la lumière incidente. Donner les différentes combinaisons linéaires des paramètres de Stokes qu'il obtient s'il impose pour  $\delta 1$  et  $\delta 2$  les couples de valeurs suivants :  
 $\delta 1 = 0, \delta 2 = 0$   
 $\delta 1 = 0, \delta 2 = \pi$   
 $\delta 1 = 0, \delta 2 = \pi/2$   
 $\delta 1 = 0, \delta 2 = 3\pi/2$   
 $\delta 1 = \pi/2, \delta 2 = \pi/2$   
 $\delta 1 = \pi/2, \delta 2 = 3\pi/2$

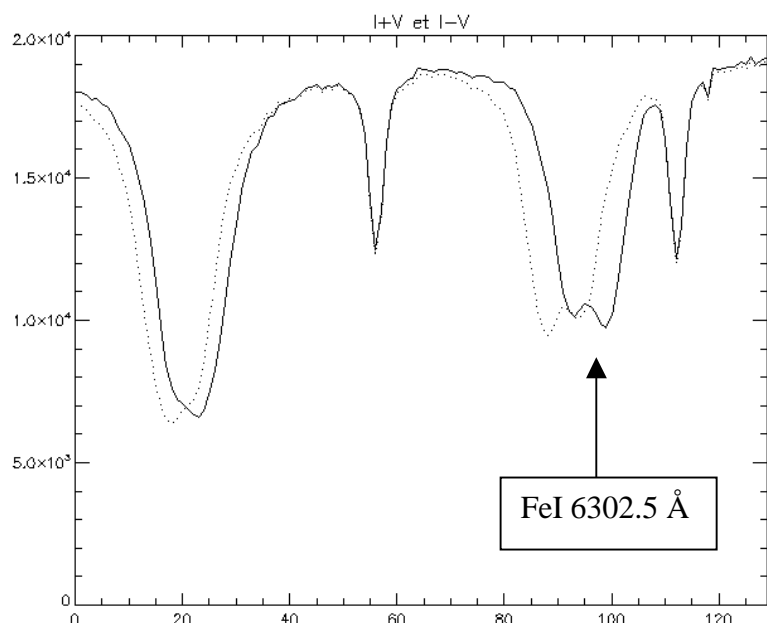
### Exercice 5 : application de la spectro polarimétrie à la mesure des champs magnétiques

L'observateur a obtenu avec le polarimètre et le spectrographe sur une région magnétisée solaire les informations spectrales des figures suivantes, dont il veut déduire le champ magnétique. Il s'intéresse tout d'abord au champ magnétique longitudinal  $B_{//}$  (projeté sur la ligne de visée). Il envisage de mesurer les décalages entre les profils I+V et I-V sur la raie FeI 6302.5 Å indiquée ci dessous, et dont le facteur de Landé équivalent est  $g^* = 2.5$ . La longueur d'onde, en abscisse, est donnée en nombre de pixels spectraux.

- 1) Détectez, par simple mesure graphique, le décalage en longueur d'onde  $\lambda_1 - \lambda_2$  entre les profils I+V et I-V, à mi hauteur, sachant que l'on a la correspondance suivante :  
 $1 \text{ pixel} = 0.0135 \text{ \AA}$
- 2) calculez ensuite la valeur du champ magnétique  $B_{//}$  longitudinal sachant que le décalage Zeeman vaut :  

$$\Delta\lambda_B = (\lambda_1 - \lambda_2)/2$$

$$= 4.67 \cdot 10^{-13} B_{//} g^* \lambda_0^2$$
 avec  $B_{//}$  en Gauss,  $\Delta\lambda_B$  et  $\lambda_0$  en Å ( $\lambda_0$  longueur d'onde de la raie, ici 6302.5 Å)



L'observateur dispose en outre des informations suivantes, qu'il a calculées à partir des observations des combinaisons de Stokes de l'exercice 4. Il s'intéresse toujours à la raie FeI à 6302.5 Å de facteur de Landé équivalent  $g^* = 2.5$ . En abscisse x, on a la longueur d'onde, en pixels. La correspondance entre le pixel et la longueur d'onde reste : 1 pixel = 0.0135 Å.

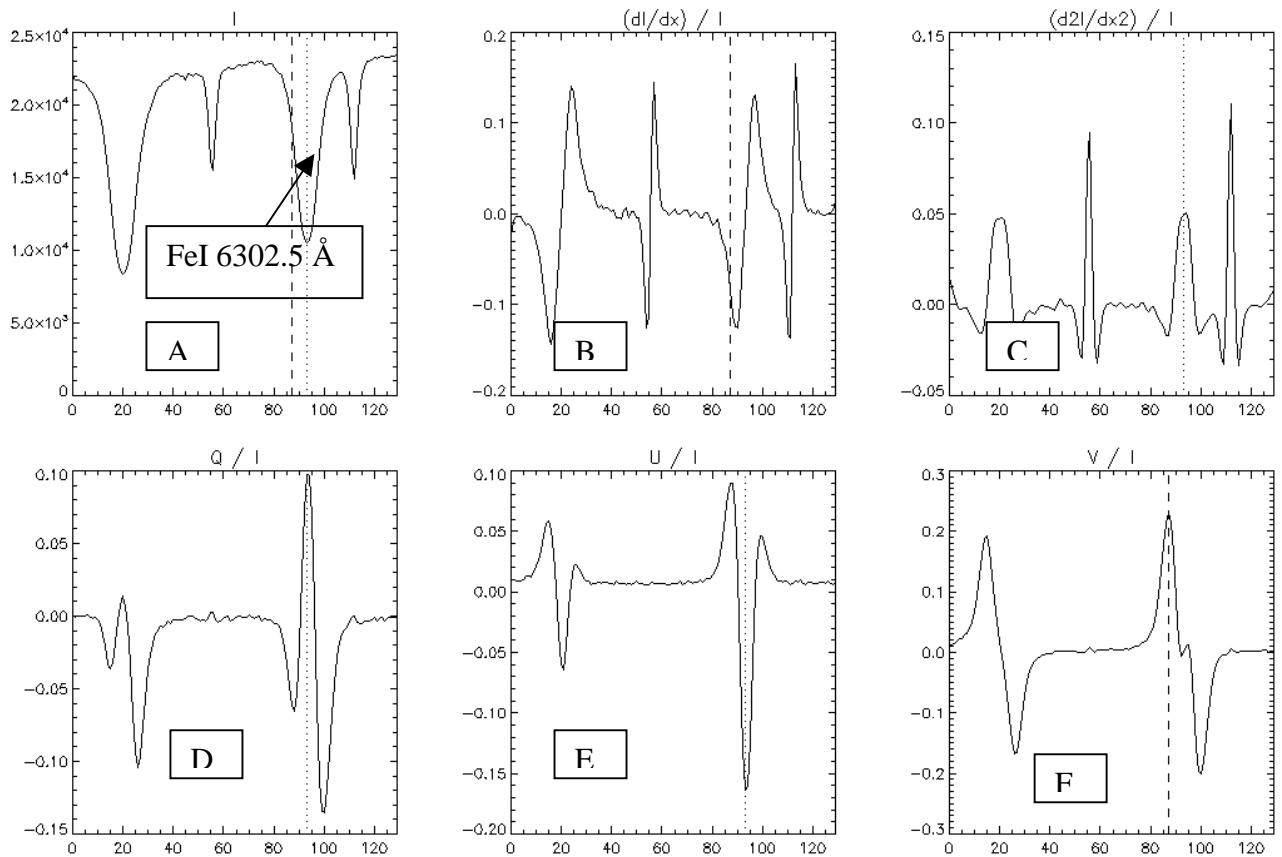


Figure A : intensité I (en unités arbitraires)

Les quantités suivantes sont sans unités (car normalisées à l'intensité I) :

Figure B : dérivée (1/I) (dI/dx)

Figure C : dérivée seconde (1/I) (d²I/dx²)

Figures D, E, F : taux de polarisation Q/I, U/I et V/I

L'observateur souhaite déterminer le champ magnétique vectoriel ( $B_{//}$ ,  $B_{\perp}$ ,  $\phi$ ) dans l'approximation des champs faibles, dans laquelle on a (cours):

Polarisation circulaire  $V/I = 4.67 \cdot 10^{-13} B_{//} g^* \lambda_0^2 (1/I) (dI/d\lambda)$

Polarisation linéaire  $[(Q/I)^2 + (U/I)^2]^{1/2} = 1/4 (4.67 \cdot 10^{-13} g^* \lambda_0^2)^2 B_{\perp}^2 (1/I) d^2I/d\lambda^2$

Et  $U/Q = \tan(2\phi)$

Dans ces formules, la longueur d'onde est exprimée en Å et les champs magnétiques en Gauss (1 Gauss =  $10^{-4}$  Tesla).  $\lambda_0$  est la longueur d'onde centrale de la raie (6302.5 Å).

La mesure de V/I et de (1/I) (dI/dλ) au point d'inflexion de la raie repéré par le trait vertical en tirés ( - - - ) sur la figure permet d'en déduire le champ longitudinal  $B_{//}$ .

La mesure de Q/I, U/I et (1/I) (d²I/dλ²) au centre de la raie repéré par le trait vertical en pointillés ( . . . ) sur la figure permet d'en déduire le champ transversal  $B_{\perp}$ . De Q/I et U/I, on déduit aussi l'azimut  $\phi$  du champ magnétique (à 180° près).

3) On demande, à l'aide de la figure, de déterminer  $B_{//}$  (en Gauss) à partir de la mesure de V/I et de (1/I) (dI/dλ) au point d'inflexion de la raie, puis  $B_{\perp}$  (en Gauss) et  $\phi$  (en degrés) à partir de la mesure de Q/I, U/I et (1/I) (d²I/dλ²) au centre de la raie.

4) Vous comparerez la valeur obtenue pour  $B_{//}$  à celle obtenue par la méthode de la question 2.

# Corrigé

## Exercice 1 : la lunette tourelle du Pic du Midi

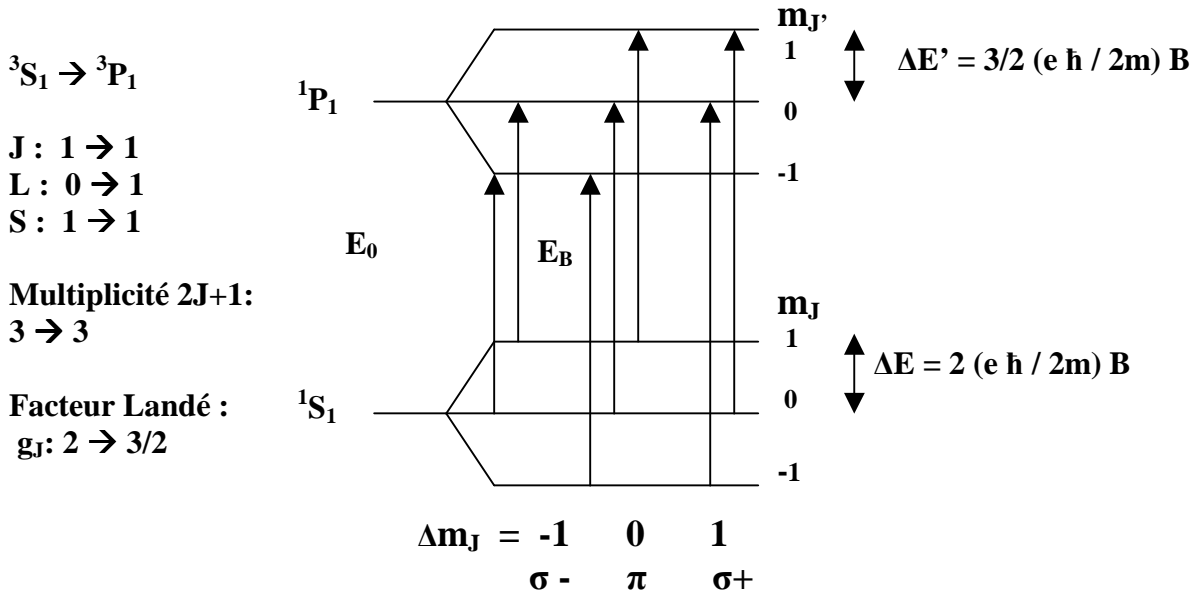
- 1) L'image solaire  $\Phi$  fait 60.5 mm de diamètre ( $\Phi = \alpha f_1$  avec  $\alpha = 32'$ ,  $f_1 = 6.5$  m)
- 2) On a 0.031 mm par seconde d'arc puisqu'on a la correspondance entre le diamètre solaire angulaire de  $32' = 1920''$  et son image de diamètre 60.5 mm au foyer de la lunette
- 3) Diamètre angulaire de la tache de diffraction  $\theta = 1.22 \lambda / D$  soit 0.28 arc sec avec  $D = 0.5$  m diamètre de la lunette dans le vert à  $\lambda = 550$  nm
- 4) Puissance reçue par l'objectif de la lunette de surface  $0.20 \text{ m}^2$  : 255 W, cette puissance se concentre sur la surface de l'image au foyer, soit sur  $2.87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ , ce qui donne un flux dans l'image de  $88700 \text{ W/m}^2$  soit  $8.87 \text{ W/cm}^2$  (cette valeur très élevée, 70 fois la constante solaire environ, implique d'évacuer la chaleur au foyer)
- 5) On utilise la relation de conjugaison algébrique  $-1/p + 1/p' = 1/f_2$  avec  $p < 0$ ,  $p' > 0$ , la relation  $p' - p = 0.725$  m et le grandissement souhaité  $\gamma = p' / p = -10$ , ce qui donne  $p' = -10 p$ , d'où l'on tire  $p = -0.725/11 = -66$  mm,  $p' = -10 p = +660$  mm ; de la relation de conjugaison il vient  $f_2 = 60$  mm.
- 6) Avec cet agrandissement de facteur 10, on tire de la seconde question que l'on a  $10 \times 0.031$  mm = 0.31 mm par seconde d'arc au foyer secondaire de la lunette.

## Exercice 2 : le spectro tourelle du Pic du Midi

- 1) Diamètre de l'image pupillaire sur le réseau  $D * f / F = 62$  mm ( $D = 0.5$  m diamètre de l'objectif de la lunette,  $F = 65$  m focale équivalente au foyer secondaire,  $f = 8$  m focale du collimateur)
- 2) La formule des réseaux donne  $2 d \sin b = k \lambda = 59662$  (avec  $\lambda$  en Å),  $d$  distance entre les traits (1/300 mm), d'où :  
Pour  $k = 7$ ,  $\lambda = 8523$  Å  
Pour  $k = 8$ ,  $\lambda = 7457$  Å  
Pour  $k = 9$ ,  $\lambda = 6629$  Å  
Pour  $k = 10$ ,  $\lambda = 5966$  Å  
Pour  $k = 11$ ,  $\lambda = 5423$  Å  
Pour  $k = 12$ ,  $\lambda = 4971$  Å  
Pour  $k = 13$ ,  $\lambda = 4589$  Å  
Pour  $k = 14$ ,  $\lambda = 4261$  Å  
Pour  $k = 15$ ,  $\lambda = 3977$  Å
- 3) On voit que les ordres sont distants dans le bleu de 300 Å environ. Pour les isoler convenablement sans superposition possible, il est recommandé de choisir des filtres de l'ordre de 100 Å de largeur à mi hauteur
- 4)  $dx/d\lambda = k f / d \cos b$ , d'où :  $dx/d\lambda = 3.8$  mm/Å pour  $k = 7$  ;  $dx/d\lambda = 8.1$  mm/Å pour  $k = 15$
- 5)  $\Delta\lambda = \Delta x d \cos b / f k$ , d'où  $\Delta\lambda = 41$  mÅ pour  $k = 7$  ;  $\Delta\lambda = 19$  mÅ pour  $k = 15$  avec  $\Delta x = 0.31$  mm / 2 = 0.155 mm (soit 0.5 arc sec sur le ciel)
- 6) On a au foyer secondaire (fente d'entrée du spectrographe) 0.31 mm par seconde d'arc. On a cette même valeur dans le spectre car les focales des collimateur et objectif de chambre du spectrographe sont égales (grandissement 1). La résolution souhaitée est de 0.2'', soit  $0.31 \times 0.2 = 62$  microns. Les pixels du détecteur ayant une taille de 6.45 microns, on voit qu'il faut adopter un facteur de réduction  $\gamma = -0.1$  environ. Pour calculer la distance à laquelle on doit placer la caméra et son objectif, on utilise la relation de conjugaison algébrique  $-1/p + 1/p' = 1/f_r$  sachant que l'on connaît  $f_r$  (105 mm) et le rapport de réduction  $\gamma = p' / p = -0.1$ . On obtient  $-11/p = 1/f_r$ , d'où  $p = -11 f_r = -1.15$  m

- 7) Avec ce facteur de réduction  $\gamma = -0.1$ , les dispersions deviennent 10 fois plus petites au niveau du plan du capteur CCD :  $dx/d\lambda = 0.38 \text{ mm}/\text{\AA} = 380 \text{ microns}/\text{\AA}$  pour  $k = 7$  et  $dx/d\lambda = 0.81 \text{ mm}/\text{\AA} = 810 \text{ microns}/\text{\AA}$  pour  $k = 15$ , ce qui donne un pixel spectral de  $17 \text{ m\AA}$  à l'ordre 7 et de  $8 \text{ m\AA}$  à l'ordre 15 (puisque  $1 \text{ pixel} = 6.45 \text{ microns}$ ).
- 8) Le champ spectral vaut  $1392 \times 17 \text{ m\AA} = 23.5 \text{ \AA}$  environ à l'ordre 7 et  $1392 \times 8 \text{ m\AA} = 11 \text{ \AA}$  environ à l'ordre 15  
Le champ spatial est de  $1040 \times 0.2'' = 208 \text{ secondes d'arc}$  environ

**Exercice 3 : décomposition Zeeman de la raie CaI 6122 \AA**



Il y a donc 3 composantes  $\pi$ , 2 composantes  $\sigma -$  et 2 composantes  $\sigma +$

Variation des niveaux d'énergie en présence de champ magnétique

$$\Delta E_B = E_B - E_0 = (e \hbar / 2m) B (3/2 m_{J'} - 2 m_J)$$

( $\Delta E_B = E_B - E_0 =$  énergie en présence de champ – énergie en l'absence de champ)

Ce qui donne pour les 7 transitions :

$\sigma - \quad \Delta E_B = E_B - E_0 = - 2 (e \hbar / 2m) B, - 3/2 (e \hbar / 2m) B, \text{ centre de gravité } -7/4 (e \hbar / 2m) B$

$\sigma + \quad \Delta E_B = E_B - E_0 = 2 (e \hbar / 2m) B, 3/2 (e \hbar / 2m) B, \text{ centre de gravité } 7/4 (e \hbar / 2m) B$

$\pi \quad \Delta E_B = E_B - E_0 = - 1/2 (e \hbar / 2m) B, 0, 1/2 (e \hbar / 2m) B, \text{ centre de gravité en } 0$

**Exercice 4 : le polarimètre du spectro tourelle**

- 1) matrices de Müller des éléments optiques

matrice de Müller  $P_{ox}$  d'un polariseur d'axe Ox

1/2	1/2	0	0
1/2	1/2	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

matrice de Müller  $T_\delta$  d'un retardateur  $\delta$

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	$\cos(\delta)$	$\sin(\delta)$
0	0	$-\sin(\delta)$	$\cos(\delta)$

Rotation d'angle  $\pi/4$

1	0	0	0
0	0	1	0
0	-1	0	0
0	0	0	1

Rotation d'angle  $-\pi/4$

1	0	0	0
0	0	-1	0
0	1	0	0
0	0	0	1

3) produit matriciel  $\mathbf{P}_{ox} \mathbf{R}_{-\pi/4} \mathbf{T}_{\delta 2} \mathbf{R}_{\pi/4} \mathbf{T}_{\delta 1}$

1	$\cos(\delta 2)$	$\sin(\delta 2) \sin(\delta 1)$	$-\sin(\delta 2) \cos(\delta 1)$
1	$\cos(\delta 2)$	$\sin(\delta 2) \sin(\delta 1)$	$-\sin(\delta 2) \cos(\delta 1)$
0	0	0	0
0	0	0	0

$\times 1/2$

D'où  $\mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} + \mathbf{Q}_{in} \cos(\delta 2) + \sin(\delta 2) ( \mathbf{U}_{in} \sin(\delta 1) - \mathbf{V}_{in} \cos(\delta 1) ) ]$

4)  $\delta 1 = 0, \delta 2 = 0 \quad \mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} + \mathbf{Q}_{in} ]$

$\delta 1 = 0, \delta 2 = \pi \quad \mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} - \mathbf{Q}_{in} ]$

$\delta 1 = 0, \delta 2 = \pi/2 \quad \mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} - \mathbf{V}_{in} ]$

$\delta 1 = 0, \delta 2 = 3\pi/2 \quad \mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} + \mathbf{V}_{in} ]$

$\delta 1 = \pi/2, \delta 2 = \pi/2 \quad \mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} + \mathbf{U}_{in} ]$

$\delta 1 = \pi/2, \delta 2 = 3\pi/2 \quad \mathbf{I}_{out} = 1/2 [ \mathbf{I}_{in} - \mathbf{U}_{in} ]$

Avec 6 mesures successives, il est ainsi possible de mesurer tous les paramètres de Stokes.

**Exercice 5** : application de la spectro polarimétrie à la mesure des champs magnétiques

1) On mesure un écartement à mi hauteur de 5 pixels environ = 0.068 Å

2)  $\Delta\lambda_B = 0.034\text{Å}$  donne  $B_{//} = 730$  Gauss

3) On mesure sur le graphique au point d'inflexion :  $(1/I) (dI/dx) = -0.10$  et  $V/I = 0.23$   
 au cœur de la raie :  $(1/I) (d^2I/dx^2) = 0.05$  ,  $Q/I = 0.10$  et  $U/I = -0.16$  d'où  $((Q/I)^2 + (U/I)^2)^{1/2} = 0.19$

En tenant compte du pixel spectral (1 pixel = 0.0135 Å), on a :

$(1/I) (dI/d\lambda) = -0.10/0.0135 = -7.4$  et  $(1/I) (d^2I/d\lambda^2) = 0.05/(0.0135)^2 = 274$

d'où l'on tire facilement  $B_{//} = 670$  Gauss,  $B_{\perp} = 1130$  Gauss et  $\varphi = -29^\circ$ .

4) les valeurs trouvées pour  $B_{//}$  doivent bien sûr être voisines, aux erreurs de mesure près.