



SPECTROPOLARIMÉTRIE : PROPOSITION D'UN NOUVEAU SÉPARATEUR F2

Mots-clés : Chromatisme, Co-spatialité solaire

Auteur	Claude LE MEN	
Lecteurs	Richard DOUET	
Approuvé/Accepté par	GUIDO CEPPATELLI	

Liste de diffusion (ordre alphabétique)

Pour application	Pour commentaires	Pour information
	C. Briand M. Collados E. Landi A. Lopez M. Semel	



Historique

Version	Révision	Date	Commentaires
1.0			

Documents associés

Nom du document	Référence du document



TABLE DES MATIERES

SPECTROPOLARIMÉTRIE : PROPOSITION D'UN NOUVEAU SÉPARATEUR F2

	page
1. Introduction	4
2. Rappel : performances actuelles de co-spatialité	5
2.1 La séparation F1	5
2.2 Les voies séparatrices F2	8
2.3 Performances actuelles	10
3. Principe de la méthode proposée	17
3.1 La séparation F1	18
3.2 Le séparateur post-F2	23
3.3 Performances améliorées	33
4. Étude technique d'implantation	37
4.1 La séparation F1	37
4.2 Le séparateur post-F2	41
4.3 Ressources	52
5. Conclusion	54



1. Introduction

La co-spatialité, le chromatisme transverse, les voies séparatrices... : des termes célèbres entre les communautés scientifiques et techniques tournant autour de Themis ; combien de mois de discussions ont engendrés ces sujets fameux ? Il est vrai que l'absence d'écrits sur ces sujets ne simplifie pas la justesse des débats. Il est donc temps de faire couler de l'encre sur ces sujets houleux : c'est ce que se propose de faire ce rapport.

Donc, dans un premier chapitre, ce rapport présente l'état actuel de la configuration de mesure polarimétrique, incluant : la séparation transverse de l'analyseur F1 et la séparation des voies I+S et I-S en F2 par les voies séparatrices. Cette présentation permet d'aborder de façon précise le calcul des incertitudes sur les paramètres opto-géométriques au foyer F2 (grandissement, mise au point, ...) et dans les spectrographes (grandissement, résolution spectrale, ...) ainsi que, bien évidemment, l'incertitude sur la co-spatialité.

Ce constat sur les performances actuelles étant fait, il était difficile à votre serviteur de s'arrêter sur une note négative sans faire une proposition concrète d'amélioration...on ne se refait pas. Le second chapitre présente donc une nouvelle méthode permettant d'améliorer considérablement les performances, tant sur la co-spatialité que sur les autres paramètres opto-géométriques. Cette méthode est présentée sous ses deux aspects : la séparation longitudinale par l'analyseur en F1 et la séparation des voies I+S et I-S sous le foyer F2 des spectrographes. De façon à comparer favorablement les performances de cette méthode par rapport à la méthode actuelle, le calcul des incertitudes sur les paramètres opto-géométriques et sur la co-spatialité est donné sur la même base que dans le chapitre précédent.

Enfin, le dernier chapitre présente une étude opto-mécanique exhaustive d'implantation de cette nouvelle méthode. Ainsi sont présentés : le schéma optique complet du nouveau séparateur « post-F2 », la vérification du respect des spécifications actuelles du télescope par ce séparateur et l'étude d'implantation de ce séparateur dans le télescope. En dernier lieu, ce rapport fournit un bilan des ressources nécessaires à cette implantation, ressources budgétaires, humaines et temporelles.



2. Rappel : performances actuelles de co-spatialité

2.1 La séparation F1

Le séparateur de l'analyseur est déjà décrit dans différentes documentations mais il n'est pas inutile de rappeler son fonctionnement. Ce séparateur est basé sur le principe du séparateur de polarisation de **Savart**, soient 2 lames de Spath (Calcite CaCO_3) identiques croisées entre-elles. La première lame dévie l'une des polarisations linéaires selon son faisceau extraordinaire et propage sans déviation l'autre polarisation selon son faisceau ordinaire. La seconde lame, croisée avec la première, agit de manière opposée de façon à dévier le faisceau non dévié par la première lame et réciproquement. Ce principe est illustré sur la figure 1. Ce procédé permet d'égaliser les 2 chemins optiques pour 2 lames de caractéristiques identiques ($\text{extraordinaire1}/\text{ordinaire2} = \text{ordinaire1}/\text{extraordinaire2}$).

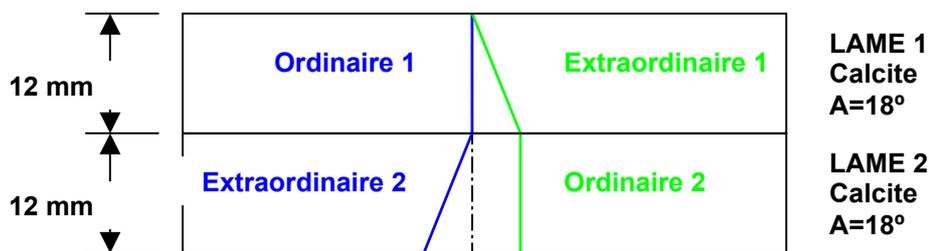


Figure 1 : Principe du Séparateur de Themis (Séparateur de Savart)

Les caractéristiques du séparateur de l'analyseur 2 sont rappelées en figure 1 :

- matériau : Calcite
- épaisseur : $e=12 \text{ mm} (\pm 0,05 \text{ mm})$
- angle de taille de l'axe optique : $A=18^\circ$

La configuration pratique de séparation utilisée dans le séparateur de Themis est illustrée en figure 2. La première lame est orientée à -45° de l'axe longitudinal de la fente et la seconde lame (croisée avec la première lame) à 45° de la fente. La direction de la séparation (faisceau extraordinaire de chaque lame) est représentée par un vecteur (vert pour la lame 1 et bleu pour la lame 2). Les axes de polarisation sont définis par la lame 1 : une polarisation alignée avec l'axe de séparation et l'autre perpendiculaire quelque soit l'angle Ω_{Sep} .

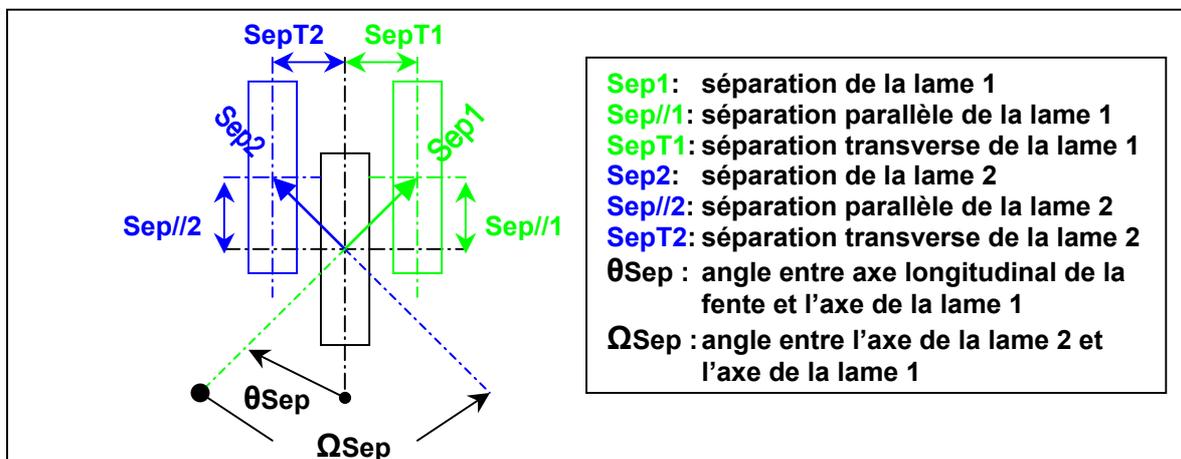


Figure 2 : Configuration du Séparateur transverse de l'analyseur Themis



La séparation Sep_i ($i=1$ pour la lame 1 et $i=2$ pour la lame 2) de chacune des lames en fonction de ses caractéristiques est donnée par :

$$Sep_i(\lambda) = e_i \cdot n^2(\lambda) \cdot \left(\frac{1}{n_o^2(\lambda)} - \frac{1}{n_e^2(\lambda)} \right) \frac{\sin 2A_i}{2} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{n^2(\lambda)} = \frac{\sin^2 A_i}{n_e^2(\lambda)} + \frac{\cos^2 A_i}{n_o^2(\lambda)}$$

où : e_i est l'épaisseur de la lame i , A_i est l'angle de taille de l'axe optique pour la lame i , $n_o(\lambda)$ et $n_e(\lambda)$ sont les indices de la Calcite respectivement ordinaire et extraordinaire,

Les séparations effectives respectivement transverse $SepT_i$ (perpendiculaire à la fente) et parallèle $Sep//_i$ (parallèle à la fente) sont alors fonction de l'angle θ_{Sep} du séparateur par rapport à la fente et de l'angle Ω_{Sep} entre les deux lames et sont données par les relations:

$$SepT_1(\lambda) = Sep_1(\lambda) \sin \theta_{Sep} \quad \text{et} \quad SepT_2(\lambda) = Sep_2(\lambda) \sin(180 - \theta_{Sep} - \Omega_{Sep})$$

$$Sep//_1(\lambda) = Sep_1(\lambda) \cos \theta_{Sep} \quad \text{et} \quad Sep//_2(\lambda) = -Sep_2(\lambda) \cos(180 - \theta_{Sep} - \Omega_{Sep})$$

Le séparateur transverse Themis est un cas particulier de ces relations pour : $\theta_{Sep} = -45^\circ$ et $\Omega_{Sep} = 90^\circ$ (voir figure 2). La séparation transverse est évidemment fonction de la longueur d'onde ainsi que la séparation parallèle. Le tableau 1 ci-dessous donne les valeurs de séparation transverse et parallèle du séparateur Themis pour trois valeurs de longueurs d'onde (400 nm, 650 nm et 900 nm) et pour les caractéristiques théoriques. Il apparaît clairement que la séparation est purement transverse mais que les deux images sont décalées parallèlement (~ 8 arcsec), et ce comme une fonction de la longueur d'onde.

Angle lame 1 / Fente	-45,00	degré	Angle entre Lames	90,00	degré	
LAME SÉPARATRICE 1			LAME SÉPARATRICE 2			
Épaisseur lame 1	12,00	mm	Épaisseur lame 2	12,00	mm	
Séparations:			Séparations:			
Lame (400 nm)	12,415	arcsec	Lame (400 nm)	12,415	arcsec	
Transverse (400 nm)	-8,779	arcsec	Transverse (400 nm)	8,779	arcsec	
Parallèle (400 nm)	8,779	arcsec	Parallèle (400 nm)	8,779	arcsec	
Lame (650 nm)	11,572	arcsec	Lame (650 nm)	11,572	arcsec	
Transverse (650 nm)	-8,182	arcsec	Transverse (650 nm)	8,182	arcsec	
Parallèle (650 nm)	8,182	arcsec	Parallèle (650 nm)	8,182	arcsec	
Lame (900 nm)	11,300	arcsec	Lame (900 nm)	11,300	arcsec	
Transverse (900 nm)	-7,990	arcsec	Transverse (900 nm)	7,990	arcsec	
Parallèle (900 nm)	7,990	arcsec	Parallèle (900 nm)	7,990	arcsec	
LONGUEUR D'ONDE:						
	400 nm		650 nm		900 nm	
Séparation transverse	17,558	arcsec	16,365	arcsec	15,981	arcsec
Séparation parallèle	0,000	arcsec	0,000	arcsec	0,000	arcsec
Décalage transverse	0,000	arcsec	0,000	arcsec	0,000	arcsec
Décalage parallèle	8,779	arcsec	8,182	arcsec	7,990	arcsec

Tableau 1 : Séparation Transverse et Parallèle du séparateur de polarisation Themis.



Le tableau 1 montre que les 2 images ne sont pas séparées longitudinalement mais oui décalées longitudinalement d'environ 8 arcsec (en fait de la moitié de la séparation transverse). Ceci induit un défaut de centrage de la fente F1 par rapport au centre du plateau F1 (présente) et donc une rotation non concentrique de cette fente. Le chromatisme transverse de la séparation est détaillé sur la figure 3 (séparateur de l'analyseur V1.0).

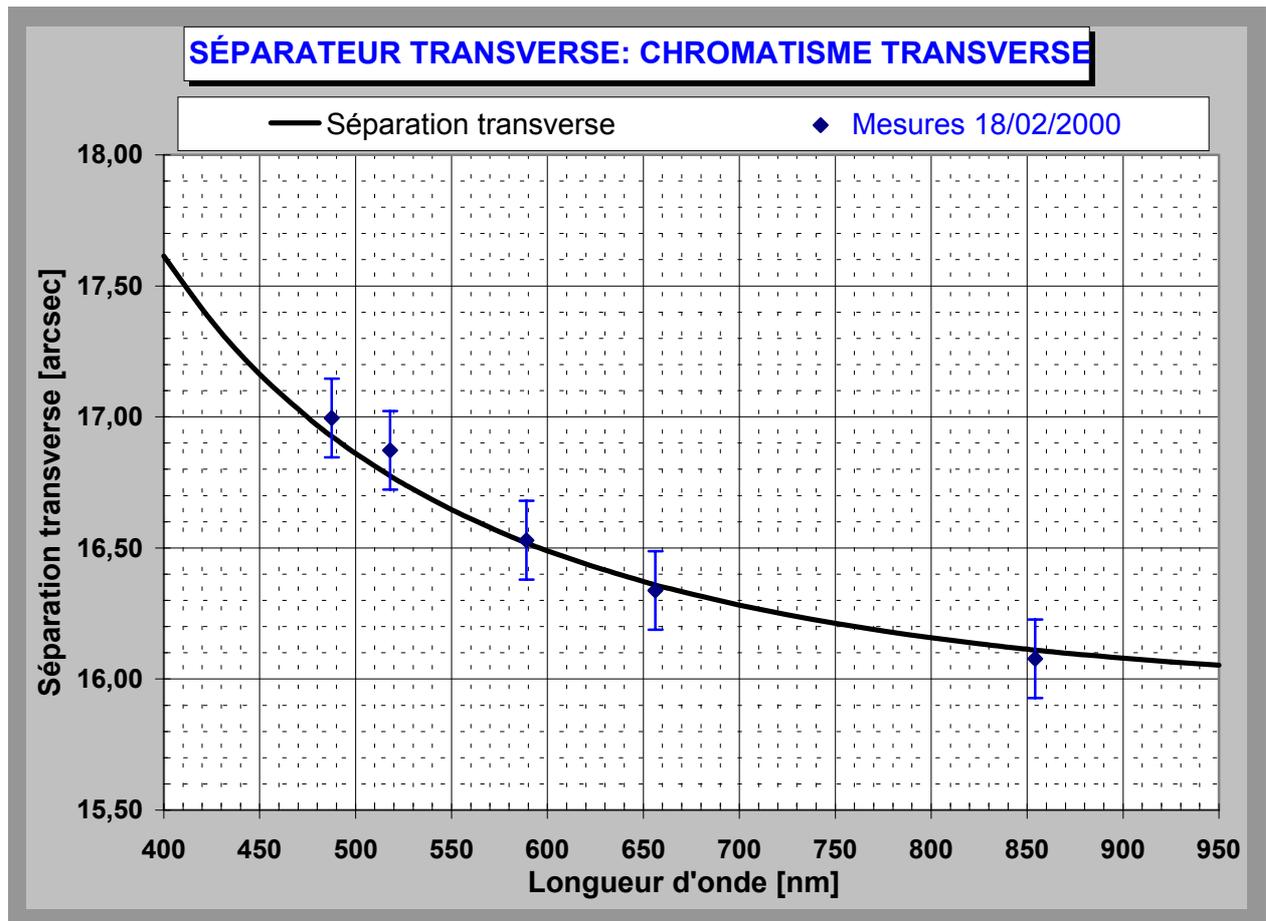


Figure 3 : Chromatisme transverse du séparateur de polarisation Themis

Il apparaît clairement sur cette courbe de la figure 3 que le chromatisme de la séparation est très important : 1 seconde d'arc de 500nm à 900 nm, -1,5 seconde d'arc de 400 à 900 nm. Il est donc évident qu'il va falloir corriger ce chromatisme pour pouvoir observer les deux voies de façon co-spatiale. De plus il est impossible de corriger ce chromatisme « en bloc » sur les deux voies. En effet le chromatisme de la séparation de chaque lame agit dans le sens opposé à celui de l'autre lame. Concrètement la valeur de la séparation est inversement proportionnelle à la longueur d'onde (la séparation est minimale dans l'infrarouge). Ceci explique deux implantations nécessaires sur le télescope qui sont :

- Nécessité des voies séparatrices : il faut séparer physiquement les deux voies pour corriger leur chromatisme individuellement. C'est l'objet du paragraphe suivant.
- Nécessité de limiter le champ en F1 : à partir du moment où l'on souhaite séparer physiquement les deux voies, il faut empêcher leur mélange en limitant le champ transverse à la valeur minimale de la séparation chromatique (choisie arbitrairement à 1100 nm).



2.2 Les voies séparatrices F2

Les voies séparatrices ont deux fonctions principales : la correction du chromatisme transverse (qui justifie la séparation) et le décalage longitudinal des deux images $I \pm S$. Le schéma de principe de ces voies séparatrices est donné en figure 4.

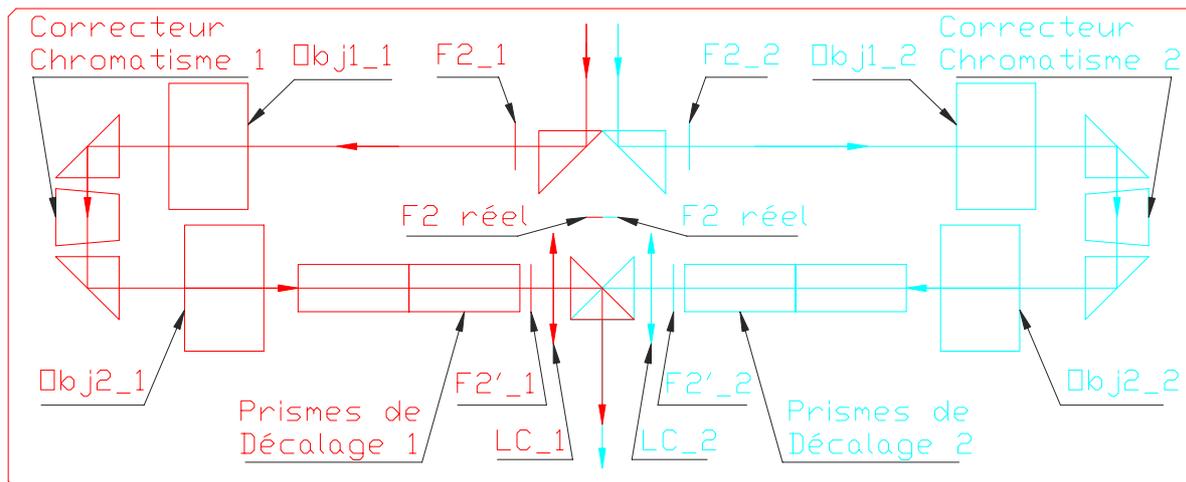


Figure 4 : Schéma de principe des Voies séparatrices F2 (non à l'échelle)

Le fonctionnement de ces voies séparatrices est simple (dans le principe) : les deux faisceaux $I \pm S$ sont séparés par deux prismes à angle droit qui coudent les faisceaux à angle droit, le faisceau $I+S$ vers la gauche (voie 1) et le faisceau $I-S$ vers la droite (voie 2). À partir de ce point, le fonctionnement des deux voies étant symétrique, la description se cantonnera à la voie 1. Après le renvoi à 90° , le foyer secondaire du télescope se forme au point $F2_1$. Ce foyer est repris et collimaté par un premier objectif $Obj1_1$. Après un nouveau renvoi à angle droit vers le bas, intervient la correction du chromatisme transverse de l'image. Le faisceau est de nouveau coudé à angle droit vers un second objectif $Obj2_1$ qui reforme l'image du foyer $F2_1$ au point $F2'_1$. Les deux objectifs ont, théoriquement, la même focale afin d'assurer un grandissement unité au système. C'est dans ce foyer $F2'_1$ qu'est placée la fente de la voie 1 (concrètement 3 fentes au choix : un quart, un demi ou une seconde d'arc). Après la fente, une lentille de champ reforme l'image de la pupille à l'infini et enfin, le faisceau est réinjecté dans le spectrographe par un dernier prisme à angle droit. La fonction des prismes de décalage est explicitée plus avant.

-Correction du chromatisme transverse :

La correction du chromatisme transverse est assurée (tant que faire ce peut) par un prisme dont les faces d'entrée et de sortie forment un angle α de façon à donner à ce composant un pouvoir disperser angulaire. Afin que cette dispersion angulaire se transforme en décalage chromatique de l'image (sans dispersion angulaire dans le plan image), le prisme correcteur est placé en faisceau collimaté (image à l'infini) et de plus proche de l'image de la pupille. En théorie, le choix adéquat du matériau (dispersion chromatique de son indice) et de l'angle du prisme α permet de créer un chromatisme transverse opposé au chromatisme transverse du séparateur Themis. Dans les faits, le choix du matériau étant évidemment discrétisé, il n'est pas possible d'obtenir l'exacte annulation du chromatisme mais au mieux de s'en approcher. La meilleure combinaison possible s'est arrêtée sur le choix de prisme en FK5 d'angle α égal à $2,0^\circ$. Les performances de cette correction sont discutées dans le paragraphe « Performances actuelles » ci-après.



-Décalage longitudinal des images $I \pm S$:

Le schéma de principe de cette fonction est donné en figure 5. Ce principe consiste en une translation symétrique et opposée des 2 voies par un jeu de 4 prismes à angle droit par voie. Après le premier prisme à angle droit, l'ensemble des trois prismes suivants peut être translaté de ± 8 mm afin d'ajuster la séparation longitudinale au champ. De façon générale il est laissée entre les deux extrémités des 2 champs un écart de 2 mm (1 mm par voie). Ce dispositif permet donc d'obtenir, moyennant réglage, les configurations actuelles dites « 2 fois 2 minutes » et « 2 fois 1 minute », la séparation de 2 minutes correspondant à la butée de séparation maximale possible. Les configurations actuellement utilisées sont :

- la configuration 2 x 2 minutes, soit par voie:
 - . champ de 2 minutes (33,6 mm),
 - . séparation de 1 minute (16,8 mm) + 1 mm, soit une valeur de 17,8 mm.
- la configuration 2 x 1 minute, soit par voie:
 - . champ de 1 minute (16,8 mm),
 - . séparation de 30 secondes (8,4 mm) + 1 mm, soit une valeur de 9,4 mm.

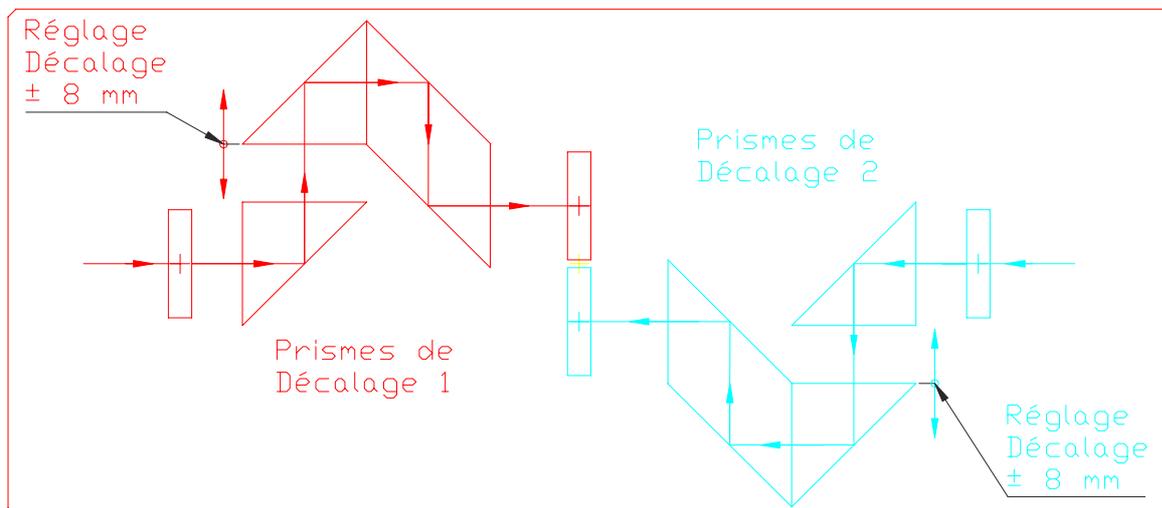


Figure 5 : Schéma de principe du décalage longitudinal des 2 voies $I \pm S$

En fait, toute configuration de champ est possible continûment dans la limitation de la course de 16 mm, soit de 2 minutes de champ comme maximum à 15 secondes de champ comme minimum. Mais il est important de noter que chacune de ces configurations nécessite un réglage non négligeable et une validation du réglage de l'ordre de 3 à 4 jours. Cette possibilité des voies séparatrices permet de distinguer 2 modes d'observations différents, injustement qualifiés de « 2 x 2 minutes » et « 2 x 1 minute ». En effet il faut distinguer le réglage des 2 champs par les voies séparatrices et la manière dont ces champs sont observés, à savoir un champ par caméra CCD ou les deux champs sur la même caméra. Ainsi il vient les deux catégories d'observations suivantes :

- Le mode « 1 champ par CCD » (2 CCD par raies) pour lequel les voies séparatrices sont réglées en « 2 x 2 minutes » et qui permet par changement du grandissement des CCD d'obtenir toutes combinaisons de champ de « 2 x 30 secondes » à « 2 x 2 minutes ».
- Le mode « 2 champs par CCD » (1 CCD par raie) pour lequel le champ souhaité sur la caméra doit être réglé au préalable par les voies séparatrices. Une manière de s'affranchir de cette limitation serait de retourner une des 2 images, mais ceci est une autre débat...



2.3 Performances actuelles

Dans ce paragraphe sont traités deux types de performances propres à la fonction des voies séparatrices F2 dans leurs configurations pratiques : d'une part, les performances opto-géométriques (images, pupilles, résolution spectrale, ...) ; d'autre part, les performances de co-spatialité en soit.

-Performances opto-géométriques :

Le fait d'avoir deux voies physiques possiblement différentes en pratique induit des différences de valeurs sur les paramètres images et pupilles. Ces différences provoquent des écarts sur le grandissement des 2 images, sur leur mise au point solaire et sur leur résolution spectrale à travers les spectrographes. Ces écarts sont détaillés ci-dessous.

a/ Grandissements des images

Les voies séparatrices sont essentiellement composées de 2 objectifs de 360 mm de focale chacune (voir figure 4). Le premier objectif collimate le faisceau et le second reforme le foyer F2. Dans un tel schéma optique le grandissement du système est donné par le rapport des focales des objectifs. Les objectifs en place ont les caractéristiques suivantes :

Marque : Schneider Kreuznach
Type : APO ARTAR 360 mm
VOIE 1 : OBJ 1_1 : focale réelle = $358,1 \pm 0,25$ mm
OBJ 1_2 : focale réelle = $356,8 \pm 0,25$ mm
→ **Grandissement 1: $\gamma_1 = 0,9964 \pm 0,0014$**
VOIE 2 : OBJ 2_1 : focale réelle = $356,6 \pm 0,25$ mm
OBJ 2_2 : focale réelle = $355,9 \pm 0,25$ mm
→ **Grandissement 2: $\gamma_2 = 0,9980 \pm 0,0014$**

Les focales sont appariées pour obtenir la meilleure égalité possible entre les deux grandissements, toutefois il est évident qu'elles ne peuvent être égales s'agissant de 4 composants optiques différents. Compte tenu des valeurs moyennes, le rapport entre les grandissements des voies 1 et 2, noté Ratio_γ vaut :

$$\text{Ratio}_\gamma = 1,0017$$

Compte tenu des incertitudes sur les focales, le rapport entre les grandissements des voies 1 et 2 peut être dans l'intervalle :

$$1 \leq \text{Ratio}_\gamma \leq 1,0044$$

Dans le cas d'une observation de 2 x 2 minutes de champ, **ce défaut produit un écart de 0,5 pixel entre les CCD** Themis actuelles (286 pixels en spatial).

-Si les 2 voies sont observées sur la même caméra, ce défaut est corrigible par simple anamorphose d'un des 2 champs et dans la direction spatiale seulement (il n'y a pas de différence de grandissement spectral).

-Si les 2 voies sont observées sur 2 caméras différentes, ce défaut n'est plus corrigible car entâché de l'erreur possible d'égalité de grandissement entre les 2 CCD (erreur qui est du même ordre, environ 0,5 pixel). Il devient impossible de distinguer si l'anamorphose doit être faite sur le grandissement spatial seul, sur le grandissement spectral seul ou sur le grandissement global de l'image.

C'est ce constat qui avait présidé au choix avantageux du mode dit « 2 x 1 minute », soit les 2 champs sur une même caméra CCD.



b/ Mises au point solaires

Le fait d'avoir deux chemins optiques distincts et deux fentes distinctes engendrent des incertitudes sur la position longitudinale du foyer F2 de chacune des voies, ainsi qu'une incertitude sur la position longitudinale de la fente F2.

Dans l'état actuel des voies séparatrices et compte-tenu du tolérancement des positions, focales et épaisseurs des différentes pièces optiques, il ressort les incertitudes suivantes :

- **incertitude sur la position des foyers F2'_1 et F2'_2 : ± 2 mm**, soit pour une ouverture de F/62,7, une incertitude sur la largeur de la tâche de diffraction de l'ordre de **0,11 arcsec**. Concrètement, dans l'hypothèse où l'un des 2 foyers est parfaitement positionné et donne la résolution de la tâche de diffraction théorique (0,2 arcsec par exemple), l'autre foyer peut souffrir d'une résolution amoindrie valant 0,31 arcsec. En terme d'optique ceci ne se traduit pas par une résolution spatiale différente entre les 2 voies mais par une diminution du rapport de Strehl d'une voie par rapport à l'autre.

- **incertitude sur la position des fentes en F2'_1 et F2'_2 : ± 1 mm**, soit une incertitude sur la largeur de la tâche de diffraction de l'ordre de **0,05 arcsec**.

Le défaut de mise au point différentielle entre les 2 voies est la somme en quadrature des défauts présents et peut donc valoir 0,13 arcsec.

c/ Résolutions spectrales

Dans le cas des observations MTR (prédispenseur : 150 tr/mm et échelle 79 tr/mm), le pouvoir de résolution des spectrographes Themis est très élevé, et quelque soit la longueur d'onde, supérieur à 500000. Le tableau 2 ci-dessous donne quelques valeurs de ce pouvoir de résolution et de résolution équivalente en fonction de la longueur d'onde.

Longueur d'onde [nm]	400	500	600	700	800	900
Pouvoir de Résolution	1 258 000	1 030 000	915 000	719 000	629 000	571000
Résolution [mÅ]	3,2	4,9	6,6	9,7	12,7	15,8

Tableau 2 : Quelques valeurs du Pouvoir de Résolution des spectrographes dans le cas d'observations MTR ($Z_{SP1}=0$ et $Z_{SP2}=0$)

Maintenant la résolution totale des spectrographes est la somme quadratique de la résolution intrinsèque (Pouvoir de Résolution) et de la résolution imposée par la fente d'entrée. Or quand on compare cette résolution « intrinsèque » aux spectrographes à la résolution de la fente d'entrée, on constate que c'est la fente d'entrée qui impose la résolution globale (la « bande passante ») du spectrographe. En effet la résolution (en Å) due à la fente est le produit de la largeur de la fente par la dispersion (en Å/mm), cette résolution est dans notre cas toujours supérieure à la résolution intrinsèque du spectrographe. Ce fait est illustré dans la tableau 3 où l'on donne les valeurs de résolution totale pour différentes valeurs de fentes d'entrée et en comparaison avec la résolution intrinsèque.



Longueur d'onde [nm]	400	500	600	700	800	900
Résolution intrinsèque [mÅ]	3,2	4,9	6,6	9,7	12,7	15,8
Résolution avec fente 0,25 arcsec [mÅ]	9,3	11,8	13,7	18,1	21,6	24,6
Résolution avec fente 0,50 arcsec [mÅ]	17,8	21,9	24,9	32,1	37,2	41,6
Résolution avec fente 1,00 arcsec [mÅ]	35,1	43,1	48,5	61,9	71,0	78,6

Tableau 3 : Résolution des spectrographes en fonction de la largeur de fente dans le cas d'observations MTR ($Z_{SP1}=0$ et $Z_{SP2}=0$)

Ce tableau montre clairement que la résolution spectrale est imposée par la fente d'entrée et ce quelque soit la longueur d'onde et pour toute fente supérieure ou égale à 0,25 arcsec : soit l'ensemble des cas d'observations possibles à Themis. Donc le paramètre largeur de fente a une influence importante sur la résolution spectrale.

Dans le cas des voies séparatrices, deux sources d'incertitudes jouent sur la largeur des fentes vues par les spectrographes :

-**incertitude sur la position des fentes en F2'_1 et F2'_2 : ± 1 mm**, soit une incertitude sur la largeur de la fente vue par les spectrographes de **$\pm 0,050$ arcsec**.

-**incertitude sur la largeur des fentes en F2'_1 et F2'_2 : ± 5 μ m**, soit une incertitude sur la largeur de la fente vue par les spectrographes de **$\pm 0,017$ arcsec**.

On obtient donc au total une incertitude sur la largeur différentielle des fentes de l'ordre de **$\pm 0,053$ arcsec** (somme en quadrature). Ce défaut est de loin le plus important engendré par les voies séparatrices. En effet, il produit, à dispersion égale, une différence de profil instrumental entre les deux voies, c'est à dire une différence de largeur de raie équivalente. Ce défaut est difficilement réductible par traitement d'image et entâche d'erreur la soustraction directe de deux spectres. Pour illustrer ce fait, on donne dans la tableau 4 un exemple de résolution équivalente (ou largeur de raie) obtenue pour une raie infiniment fine (largeur inférieure à 1 mÅ), et ce dans le cas où l'une des fente a sa largeur théorique moins l'incertitude de 0,05 arcsec (exemple : fente 1 = 0,45 arcsec) et l'autre sa largeur théorique plus l'incertitude de 0,05 arcsec (exemple : fente 2 = 0,55 arcsec).

Longueur d'onde [nm]	400	500	600	700	800	900
Résolution intrinsèque [mÅ]	3,2	4,9	6,6	9,7	12,7	15,8
Résolution avec fente 1 : 0,20 arcsec [mÅ]	7,7	9,9	11,6	15,6	18,9	21,8
Résolution avec fente 2 : 0,30 arcsec [mÅ]	11,0	13,8	15,8	20,8	24,5	27,6
Résolution avec fente 1 : 0,45 arcsec [mÅ]	16,1	19,7	22,4	28,9	33,5	37,5
Résolution avec fente 2 : 0,55 arcsec [mÅ]	19,6	24,1	27,4	35,3	40,9	45,8
Résolution avec fente 1 : 0,95 arcsec [mÅ]	33,3	40,9	46,1	58,8	67,5	74,7
Résolution avec fente 2 : 1,05 arcsec [mÅ]	36,9	45,2	50,9	65,0	74,6	82,5

Tableau 4 : Résolution différentielle des voies 1 et 2 en fonction de la largeur de fente entachée d'une incertitude de $\pm 0,05$ arcsec.

Le tableau suffit en soit... On constate des différences de largeur équivalente de raie de **10 % pour une fente de 1 arcsec**, de **20 % pour une fente de 0,5 arcsec** et de **33 % pour une fente de 0,25 arcsec**. Ramené dans l'espace des caméras ce défaut peut correspondre à 0,5 pixel de différence entre deux largeurs de raie (à dispersion égale). Quid de l'incertitude sur la mesure de polarisation lors de la soustraction ?...



-Performances de co-spatialité :

Nous allons maintenant nous intéresser aux performances de co-spatialité offertes par les voies séparatrices F2. Pour cela, nous calculerons l'incertitude sur cette mesure de co-spatialité en utilisant les méthodes imposées dans la norme ISO 17025 (ex EN45001) relatives à la traçabilité et la validité de toute mesure en métrologie internationale. Pour calculer cette incertitude on distingue trois types d'incertitudes : celles dues à la méthode de mesure, celles dues aux paramètres d'influence et celles dues aux étalonnages.

a/ Incertitude due à la méthode de mesure, notée I_{mesure} :

La méthode de mesure utilisée actuellement est un balayage de la fente fine F1 (de largeur 1 arcsec) devant les 2 fentes F2. La balayage se fait avec un pas de 7 μm par la coulisse EM18 au foyer F1 et l'on compare les courbes de convolution des 2 fentes en variation d'intensité.

- *Résolution de la méthode :*

Le balayage utilise un pas de 7 μm en F1, soit un pas de **0,096 arcsec**, cette distribution étant rectangulaire, l'écart-type associé à cette résolution, $\sigma_{\text{rés}}$, vaut :

$$\sigma_{\text{rés}} = \frac{\sqrt{2}}{3} 0,096 = 0,045 \text{ arcsec}$$

- *Répétabilité de la méthode :*

La répétabilité de la méthode est définie comme l'écart-type (n-1) de n mesures successives. Cet écart-type $\sigma_{\text{rép}}$ vaut :

$$\sigma_{\text{rép}} = 0,02 \text{ arcsec}$$

L'incertitude totale due à la méthode de mesure, I_{mesure} , vaut alors :

$$I_{\text{mesure}} = \sqrt{(\sigma_{\text{rés}}^2 + \sigma_{\text{rép}}^2)} = 0,049 \text{ arcsec}$$

b/ Incertitude due aux paramètres d'influence, notée I_{param} :

- *Parallélisme des fentes :*

Le parallélisme des fentes entre-elles est assuré par deux réglages de sensibilité minimale de $\pm 0,01^\circ$. Soit en terme de co-spatialité pour un champ de 2 arcmin, une incertitude due au parallélisme des fentes, σ_{\parallel} valant :

$$\sigma_{\parallel} = 120.tg0,01 = 0,021 \text{ arcsec}$$

- *Suivi du dérotateur :*

Le dérotateur provoque, lors du suivi solaire, une rotation de l'image du F1 afin de la maintenir parallèle à la fente F2. Actuellement, ce suivi est assuré avec une stabilité angulaire de $\pm 0,0033^\circ$ (0,2' d'angle). L'image tourne d'une valeur angulaire double par rapport au dérotateur, la stabilité angulaire de l'image est donc de $\pm 0,0066^\circ$. Soit en terme de co-spatialité pour un champ de 2 arcmin, une incertitude due au suivi du dérotateur, σ_{rot} valant :

$$\sigma_{\text{rot}} = 120.tg0,0066 = 0,014 \text{ arcsec}$$

- *Translation des fentes :*

La translation des fentes perpendiculairement à elles-même est assurée par deux réglages du sensibilité minimale de $\pm 5 \mu\text{m}$. Soit en terme de co-spatialité, une incertitude due à la translation des fentes, σ_{trans} valant :

$$\sigma_{\text{trans}} = \frac{5 \mu\text{m}}{280 \mu\text{m}.\text{arc sec}^{-1}} = 0,018 \text{ arcsec}$$



- *Stabilité de la translation image :*

La position en translation des fentes est stable à mieux qu'un micromètre, soit 3 marcsec qui seront négligés dans ce calcul. Par contre la position des images perpendiculairement aux fentes est assurée par la rotation d'un prisme à angle droit situé, par rapport au plan focal, à la distance égale à la focale de l'objectif, soit 360 mm. Ce prisme est porté par un dispositif rotatif de faible dimension avec un bras d'actuation de seulement 20 mm. La stabilité de ce réglage en rotation est critique car dans les limites de la stabilité thermique. En effet cette pièce est réalisée en Dural avec un coefficient de dilation thermique de l'ordre de $23 \mu\text{m.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, soit sur la portée du réglage de 20 mm, une stabilité thermique de la rotation de $0,46 \mu\text{m.K}^{-1}$. Ramenée dans le plan image, cette stabilité thermique de l'image perpendiculairement à la fente F2 vaut alors : $8,3 \mu\text{m.K}^{-1}$. Soit en terme de co-spatialité, une incertitude due à la stabilité de la translation image, σ_{stab} valant :

$$\sigma_{stab} = \frac{8,3 \mu\text{m.K}^{-1}}{280 \mu\text{m.arcsec}^{-1}} = 0,029 \text{ arcsec.K}^{-1}$$

- *Chromatisme transverse :*

Le chromatisme transverse engendré par le séparateur F1 est corrigé, en grande partie, par les voies séparatrices. Cependant, la correction théorique ne peut être complètement achromatique et la correction de chromatisme transverse pratique peut être écartée de la correction théorique. Le chromatisme transverse corrigé est illustré en figure 6 et montre des écarts de co-spatialité de l'ordre de $0,03 \text{ arcsec}$.

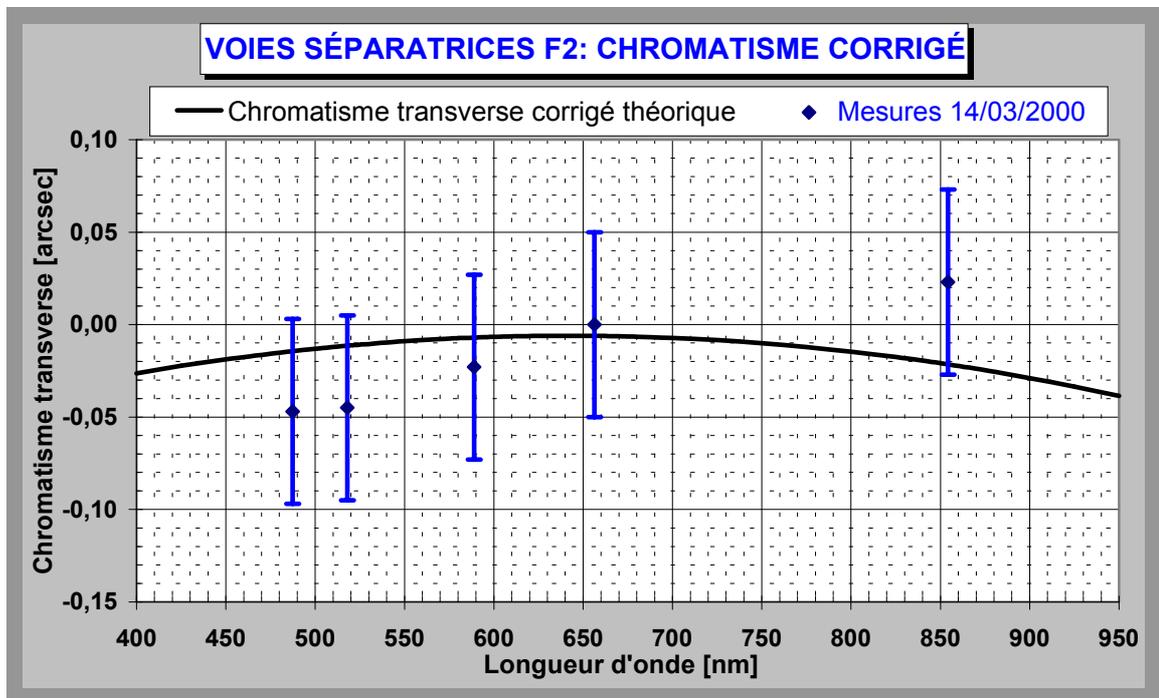


Figure 6 : Chromatisme transverse corrigé par les Voies séparatrices F2

Soit en terme de co-spatialité, une incertitude due au chromatisme transverse de l'image, σ_{chroma} valant :

$$\sigma_{chroma} = \pm 0,02 \text{ arcsec}$$



L'incertitude totale due aux paramètres d'influence, I_{param} , vaut alors :

$$I_{param} = \sqrt{(\sigma_{//}^2 + \sigma_{rot}^2 + \sigma_{trans}^2 + \sigma_{stab}^2 + \sigma_{chroma}^2)} = 0,047 \text{ arcsec}$$

c/ Incertitude due aux étalonnages, notée $I_{étalon}$:

Dans notre cas, deux incertitudes d'étalonnage peuvent intervenir : celle de l'étalonnage du facteur d'échelle F1 et celle de l'étalonnage du déplacement de la coulisse EM18.

-Etalonnage du facteur d'échelle F1 :

Le facteur d'échelle F1 en [mm/arcsec] découle de la connaissance de la focale du télescope. Cette focale est, depuis l'appariement M1/M2 fait à la Rhéosc en 1998, parfaitement connue et vaut 15040 mm. L'incertitude sur cette valeur de focale est égale à l'incertitude de repositionnement du foyer F1 fait lors du remontage des nouveaux M1 et M2 en décembre 1998, soit $\pm 1 \text{ mm}$. Le facteur d'échelle Echelle_{F1} est donné par la relation :

$$\text{Echelle}_{F1} = 15040 \cdot \tan(1 \text{ arcsec}) = 0,0729 \text{ mm/arcsec}$$

Lors de la mesure par balayage, l'incertitude sur la valeur du pas due à l'étalonnage du facteur d'échelle F1, $\sigma_{étalonF1}$, est négligeable et vaut :

$$\sigma_{étalonF1} = \pm 0,00001 \text{ arcsec}$$

-Etalonnage du déplacement coulisse :

Le déplacement de la coulisse EM18 est connu à $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$. L'incertitude sur la valeur du pas due à l'étalonnage du déplacement coulisse, $\sigma_{étalonEM18}$, vaut :

$$\sigma_{étalonEM18} = \pm 2 \text{ }\mu\text{m} / 72,9 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{arcsec}^{-1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} = \pm 0,013 \text{ arcsec}$$

L'incertitude totale due aux étalonnages, $I_{étalon}$, vaut alors :

$$I_{étalon} = \sqrt{(\sigma_{étalonF1}^2 + \sigma_{étalonEM18}^2)} = 0,013 \text{ arcsec}$$

L'incertitude totale sur la co-spatialité est alors la somme quadratique des incertitudes dues à la méthode de mesure, aux paramètres d'influence et aux étalonnages. Cette incertitude sur la co-spatialité, $I_{co-spatialité}$, vaut alors :

$$I_{co-spatialité} = \sqrt{(I_{mesure}^2 + I_{param}^2 + I_{étalon}^2)} = \sqrt{(0,049^2 + 0,047^2 + 0,013^2)} = 0,069 \text{ arcsec}$$

En principe, la norme actuelle sur le calcul des incertitudes précise que l'on doit fournir l'incertitude pour un intervalle de confiance de 95%, soit pour une distribution gaussienne : 2 fois l'écart-type, ce qui dans notre cas donne une incertitude de $\pm 0,14 \text{ arcsec}$. La valeur d'incertitude à un écart-type, 0,069 arcsec, est déjà parlante en soit et suffit à justifier une réflexion sur le sujet de la co-spatialité et sur la refonte du principe de la séparation F2. Les sources d'incertitudes sur la co-spatialité sont nombreuses et difficilement réductibles dans le cas des voies séparatrices F2. Une nouvelle méthode de séparation en F2 peut se baser sur le détail de ces sources d'incertitudes et baser la réflexion sur comment réduire, ou mieux éliminer, une grande partie de ces sources d'incertitudes. Pour se faire, on donne en page suivante un résumé des sources d'incertitudes étudiées dans ce paragraphe et une réflexion sur les causes d'incertitudes éliminables ou réductibles.



RÉSUMÉ DES CAUSES D'INCERTITUDES SUR LA CO-SPATIALITÉ :

Incertitude due à la méthode de mesure, notée I_{mesure} :

- Résolution de la méthode : $\sigma_{\text{rés}} = 0,045$ arcsec
- Répétabilité de la méthode : $\sigma_{\text{rép}} = 0,02$ arcsec

L'incertitude due à la méthode de mesure, I_{mesure} , vaut : $I_{\text{mesure}} = 0,049$ arcsec

Incertitude due aux paramètres d'influence, notée I_{param} :

- Parallélisme des fentes : $\sigma_{\parallel} = 0,021$ arcsec
- Suivi du dérotateur : $\sigma_{\text{rot}} = 0,014$ arcsec
- Translation des fentes : $\sigma_{\text{trans}} = 0,018$ arcsec
- Stabilité de la translation image (pour 1°C) : $\sigma_{\text{stab}} = 0,029$ arcsec
- Chromatisme transverse : $\sigma_{\text{chroma}} = 0,02$ arcsec

L'incertitude due aux paramètres d'influence, I_{param} , vaut : $I_{\text{param}} = 0,047$ arcsec

Incertitude due aux étalonnages, notée $I_{\text{étalon}}$:

- Étalonnage du facteur d'échelle F1 : $\sigma_{\text{étalonF1}} = 0,00001$ arcsec
- Étalonnage du déplacement coulisse : $\sigma_{\text{étalonEM18}} = 0,013$ arcsec

L'incertitude due aux étalonnages, $I_{\text{étalon}}$, vaut : $I_{\text{étalon}} = 0,013$ arcsec

L'incertitude totale sur la co-spatialité, $I_{\text{co-spatialité}}$, vaut :

$$I_{\text{co-spatialité}} = 0,069 \text{ arcsec}$$

RÉFLEXION SUR LES CAUSES D'INCERTITUDES SUR LA CO-SPATIALITÉ :

Comment réduire l'incertitude totale ? On voit bien qu'il ne suffit pas de réduire une cause d'incertitude, mais pratiquement toutes. Les 2 causes d'incertitudes les plus significatives sont l'incertitude due à la méthode de mesure (0,049 arcsec) et celle due aux paramètres d'influence (0,047 arcsec). Comment les réduire ?

-Réduction de l'incertitude due à la méthode de mesure :

Cette incertitude est essentiellement due au pas de la mesure de 0,096 arcsec. On peut donc la réduire en réduisant ce pas de mesure, la répétabilité suivant de façon proportionnelle la résolution. Si par exemple on réduit le pas au minimum possible (2 μm , soit 0,027 arcsec), on peut faire chuter l'incertitude à 0,013 arcsec. **Une autre façon de raisonner est de changer de méthode de mesure pour que la résolution du pas n'entre plus en ligne de compte dans le calcul.** Ceci peut s'obtenir en provoquant un balayage de la fente continu et non pas discret, ou encore en utilisant une méthode statique de contrôle comme une visée de fente très haute résolution par exemple.

-Réduction de l'incertitude due aux paramètres d'influence :

Cette incertitude est composée de 5 composantes d'influence distinctes mais pratiquement égales en intensité (de l'ordre de 0,02 arcsec), en réduire une ou deux ne sert à rien car c'est la composante la plus élevée qui s'imposera. Peut on réduire toutes les composantes d'incertitudes ? Dans le cas des voies séparatrices, c'est difficilement envisageable voire impossible. Seule la composante de stabilité de suivi du dérotateur σ_{rot} est réductible par augmentation du codage moteur, de fait le codage actuel peut être multiplié par 5 sans problème d'asservissement afin de diminuer l'incertitude à 0,003 arcsec. **Une autre façon de raisonner est, comme précédemment, de s'affranchir des voies séparatrices afin que ces sources d'incertitudes n'entrent plus dans le calcul.** C'est un principe d'ores et déjà utilisé avec la méthode dite de la grille (séparation longitudinale et non



transversale). Cette méthode s'affranchit des voies séparatrices et du chromatisme transverse du séparateur F1. Seules les incertitudes dues à la méthode de mesure de la co-spatialité et l'incertitude due à la stabilité du suivi angulaire du dérotateur entrent en ligne de compte. On a vu que ces incertitudes peuvent aisément être réduites pour donner une incertitude totale sur la co-spatialité inférieure à 0,015 arcsec. C'est d'ailleurs une valeur annoncée par les principaux utilisateurs de cette grille (environ 0,02 arcsec).

Evidemment, il y a un inconvénient dans cette méthode : la limitation du champ et le découpage périodique du champ à 16 arcsec. La question est donc : peut-on généraliser cette méthode utilisant une séparation longitudinale et non transversale à un champ de 2 arcmin ? La réponse est qu'il existe effectivement une solution et c'est l'objet de la proposition présentée dans le paragraphe suivant...

3. Principe de la méthode proposée

Le principe de cette méthode repose sur les quelques constatations faites ci-dessus et rappelées ci-après.

Quelles sont les sources d'incertitudes qui nous gênent le plus dans la méthode d'observation actuelle ?

-le chromatisme transverse de l'image dû à la séparation transverse de l'analyseur F1 ?

Et bien, éliminons le en le rendant totalement longitudinal par une séparation longitudinale de l'analyseur en F1 !

-les sources d'incertitudes dues aux paramètres d'influence des voies séparatrices (parallélisme et translation des fentes, stabilités, ...) ?

Et bien éliminons les totalement en effectuant la séparation des faisceaux I+S et I-S sous le foyer F2 et non au dessus !

Pourquoi sépare-t-on les faisceaux avant le F2 dans l'état actuel ?

Car il faut corriger le chromatisme transverse et séparer les deux champs I+S et I-S pour l'observation spectrale. Si l'on supprime le chromatisme transverse, la seule fonction des voies F2 devient de séparer les deux champs I+S et I-S pour l'observation spectrale, or cette séparation peut se faire d'une autre manière, et avantageusement sous le foyer F2.

Ces deux modifications sont détaillées dans les paragraphes suivants et les performances de co-spatialité améliorées sont recalculées.



3.1 La séparation F1

Le but de la méthode proposée est d'effectuer la séparation des champs en F1 non plus transversalement mais longitudinalement. C'est le principe de la méthode dite de la grille mais cette fois sans limitation du champ. Le schéma de cette configuration de séparateur longitudinal est donné en figure 7.

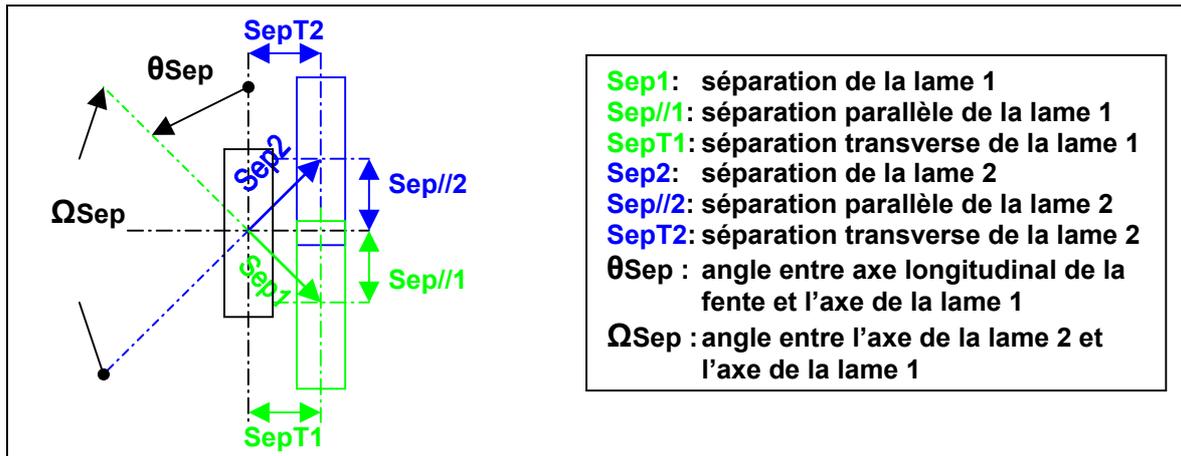


Figure 7 : Configuration du Séparateur longitudinal de l'analyseur Themis

Le séparateur longitudinal est un cas particulier de l'analyseur Themis avec l'angle entre l'axe longitudinal de la fente et l'axe de la première lame, $\theta_{Sep} = +45^\circ$ et non -45° comme dans le cas du séparateur transverse. Les performances du séparateur longitudinal sont illustrées dans le tableau 5 ci dessous.

PRINCIPE DU SÉPARATEUR PARALLÈLE						
Angle lame 1 / Fente	45,00	degré	Angle entre Lames	90,00	degré	
LAME SÉPARATRICE 1			LAME SÉPARATRICE 2			
Épaisseur lame 1	12,00	mm	Épaisseur lame 2	12,00	mm	
Séparations:			Séparations:			
Lame (400 nm)	12,415	arcsec	Lame (400 nm)	12,415	arcsec	
Transverse (400 nm)	8,779	arcsec	Transverse (400 nm)	8,779	arcsec	
Parallèle (400 nm)	8,779	arcsec	Parallèle (400 nm)	-8,779	arcsec	
Lame (650 nm)	11,572	arcsec	Lame (650 nm)	11,572	arcsec	
Transverse (650 nm)	8,182	arcsec	Transverse (650 nm)	8,182	arcsec	
Parallèle (650 nm)	8,182	arcsec	Parallèle (650 nm)	-8,182	arcsec	
Lame (900 nm)	11,300	arcsec	Lame (900 nm)	11,300	arcsec	
Transverse (900 nm)	7,990	arcsec	Transverse (900 nm)	7,990	arcsec	
Parallèle (900 nm)	7,990	arcsec	Parallèle (900 nm)	-7,990	arcsec	
LONGUEUR D'ONDE:	400 nm		650 nm		900 nm	
Séparation transverse	0,000	arcsec	0,000	arcsec	0,000	arcsec
Séparation parallèle	-17,558	arcsec	-16,365	arcsec	-15,981	arcsec
Décalage transverse	8,779	arcsec	8,182	arcsec	7,990	arcsec
Décalage parallèle	0,000	arcsec	0,000	arcsec	0,000	arcsec

Tableau 5 : Séparation Transverse et Parallèle du séparateur longitudinal de Themis.



Dans la cas théorique parfait ($\theta_{Sep} = +45^\circ$ et $\Omega_{Sep} = +90^\circ$ exactement), les deux séparations transverses sont égales et de même signe alors que les séparations longitudinales sont de signe opposé. Il vient donc que la séparation est purement longitudinale mais que les deux images sont décalées transversalement (~ 8 arcsec), et ce comme une fonction de la longueur d'onde. Il apparaît clairement dans le tableau 5 que la séparation transverse, donc la co-spatialité, entre les deux images reste nulle quelque soit la longueur d'onde. Le fait que la séparation longitudinale soit chromatique ne présente pas de problème car n'agit pas dans le sens de la co-spatialité. Le seul « défaut » de ce séparateur est que le décalage transverse est lui-aussi chromatique. Ceci implique que les 2 champs séparés sont purement co-spatiaux entre-eux quelque soit la longueur d'onde mais que deux images à deux longueurs d'onde différentes ne « voient » pas le même détail solaire (exemple : $-0,2$ arcsec entre 650 nm et 850 nm ou $+0,6$ arcsec entre 400 nm et 650 nm). Ce chromatisme n'est pas très pénalisant car il ne joue pas sur la co-spatialité et est de toute manière bien moins important que le même chromatisme induit par la réfraction atmosphérique dans le cas où la fente n'est pas rigoureusement orientée Nord-Sud. De plus ce chromatisme peut être aisément corrigé à mieux que $0,05$ arcsec soit très largement en dessous de la tâche de diffraction (environ $0,2$ arcsec).

Un bon point pour le séparateur longitudinal théorique : il annule parfaitement la co-spatialité et est parfaitement compatible avec l'analyseur actuel. Seulement le séparateur est un objet pratique ! quid de la co-spatialité en tenant compte des incertitudes sur ces paramètres pratiques ? Pour répondre à cette question rappelons les relations reliant les séparations Sep_i ($i=1$ pour la lame 1 et $i=2$ pour la lame 2) à ses caractéristiques :

$$Sep_i(\lambda) = e_i \cdot n^2(\lambda) \cdot \left(\frac{1}{n_o^2(\lambda)} - \frac{1}{n_e^2(\lambda)} \right) \frac{\sin 2A_i}{2} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{n^2(\lambda)} = \frac{\sin^2 A_i}{n_e^2(\lambda)} + \frac{\cos^2 A_i}{n_o^2(\lambda)}$$

où : e_i est l'épaisseur de la lame i , A_i est l'angle de taille de l'axe optique pour la lame i , $n_o(\lambda)$ et $n_e(\lambda)$ sont les indices de la Calcite respectivement ordinaire et extraordinaire.

Les séparations effectives respectivement transverse $SepT_i$ (perpendiculaire à la fente) et parallèle $Sep//_i$ (parallèle à la fente) sont alors fonction de l'angle θ_{Sep} du séparateur par rapport à la fente et de l'angle Ω_{Sep} entre les deux lames et sont données par les relations :

$$SepT_1(\lambda) = Sep_1(\lambda) \sin \theta_{Sep} \quad \text{et} \quad SepT_2(\lambda) = Sep_2(\lambda) \sin(180 - \theta_{Sep} - \Omega_{Sep})$$
$$Sep//_1(\lambda) = Sep_1(\lambda) \cos \theta_{Sep} \quad \text{et} \quad Sep//_2(\lambda) = -Sep_2(\lambda) \cos(180 - \theta_{Sep} - \Omega_{Sep})$$

Pour que la co-spatialité reste nulle il faut que les séparations transverses des 2 lames restent égales quelque soit la longueur d'onde. Des relations précédentes il vient que ces séparations transverses sont fonction de l'épaisseur e_i de la lame i , de l'angle de taille A_i de l'axe optique pour la lame i , des indices $n_o(\lambda)$ et $n_e(\lambda)$ de la Calcite respectivement ordinaire et extraordinaire, de l'angle θ_{Sep} du séparateur par rapport à la fente et de l'angle Ω_{Sep} entre les deux lames. Les deux lames de Calcite ont été taillées dans le même bloc, ceci permet d'écartier tout écart sensible sur les indices $n_o(\lambda)$ et $n_e(\lambda)$ et l'angle de taille A_i , restent donc une incertitude sur les trois paramètres suivant :

- les épaisseurs de lame 1 et 2 : $e_1 = 12 \pm 0,05$ mm et $e_2 = 12 \pm 0,05$ mm,
- l'angle du séparateur par rapport à la fente : $\theta_{Sep} = 45 \pm 0,02$ °, cet angle correspond à la motorisation du séparateur (moteur EM27 réglable avec une précision de $0,02^\circ$).
- l'angle entre les deux lames : $\Omega_{Sep} = 90 \pm 0,25$ °, cet angle est réglé manuellement avec une précision meilleure que $0,25^\circ$ afin d'assurer l'extinction des images parasites.



Compte tenu de ces incertitudes, qu'en est-il de la co-spatialité ? Un exemple montrant les valeurs de séparations transverses calculées pour des valeurs différentes d'épaisseur de lames et d'angle entre les deux lames est donné dans la tableau 6 ci-dessous.

PRINCIPE DU SÉPARATEUR LONGITUDINAL					
Angle lame 1 / Fente	45,00	degré	Angle entre lames	90,25	degré
LAME SÉPARATRICE 1			LAME SÉPARATRICE 2		
Épaisseur lame 1	12,06	mm	Épaisseur lame 2	11,94	mm
Séparations:			Séparations:		
Lame (400 nm)	12,477	arcsec	Lame (400 nm)	12,353	arcsec
Transverse (400 nm)	8,823	arcsec	Transverse (400 nm)	8,697	arcsec
Lame (650 nm)	11,630	arcsec	Lame (650 nm)	11,514	arcsec
Transverse (650 nm)	8,223	arcsec	Transverse (650 nm)	8,106	arcsec
Lame (900 nm)	11,357	arcsec	Lame (900 nm)	11,244	arcsec
Transverse (900 nm)	8,030	arcsec	Transverse (900 nm)	7,916	arcsec
LONGUEUR D'ONDE:		400 nm	650 nm	900 nm	
Séparation transverse	-0,126	arcsec	-0,117	arcsec	-0,115 arcsec

Tableau 6: Séparation transverse **non corrigée** du séparateur longitudinal de Themis, compte tenu des incertitudes sur l'épaisseur des lames et sur l'angle entre les lames.

Cet exemple tient compte des écarts maxima pouvant exister sur les épaisseurs de lames et sur l'angle entre les lames. On voit que si l'angle θ_{sep} entre le séparateur et la fente est maintenu à 45° (sa valeur nominale théorique) on obtient alors des écarts de co-spatialité importants (-0,126 arcsec à 400 nm et -0,117 arcsec à 650nm par exemple). Ce défaut serait rédhibitoire si il n'y avait pas de solution permettant de l'annuler, heureusement il est possible de retrouver une séparation transverse nulle en ajustant l'angle θ_{sep} entre le séparateur et la fente (angle qui est ajustable par la motorisation EM27 de l'analyseur). Cet ajustement est illustré dans le tableau 7 ci-dessous, où l'on reprend l'exemple du tableau 6 en recherchant l'angle qui annule la co-spatialité.

PRINCIPE DU SÉPARATEUR LONGITUDINAL					
Angle lame 1 / Fente	44,59	degré	Angle entre lames	90,25	degré
LAME SÉPARATRICE 1			LAME SÉPARATRICE 2		
Épaisseur lame 1	12,06	mm	Épaisseur lame 2	11,94	mm
Séparations:			Séparations:		
Lame (400 nm)	12,477	arcsec	Lame (400 nm)	12,353	arcsec
Transverse (400 nm)	8,760	arcsec	Transverse (400 nm)	8,759	arcsec
Lame (650 nm)	11,630	arcsec	Lame (650 nm)	11,514	arcsec
Transverse (650 nm)	8,164	arcsec	Transverse (650 nm)	8,164	arcsec
Lame (900 nm)	11,357	arcsec	Lame (900 nm)	11,244	arcsec
Transverse (900 nm)	7,973	arcsec	Transverse (900 nm)	7,973	arcsec
LONGUEUR D'ONDE:		400 nm	650 nm	900 nm	
Séparation transverse	0,000	arcsec	0,000	arcsec	0,000 arcsec

Tableau 7: Séparation transverse **corrigée** du séparateur longitudinal de Themis, compte tenu des incertitudes sur l'épaisseur des lames et sur l'angle entre les lames.



Il est donc possible d'obtenir avec ce séparateur longitudinal une séparation transverse nulle soit un écart de co-spatialité nul. Ceci s'obtient par réglage de la motorisation EM27 avec une précision de $\pm 0,02^\circ$. Quel est l'impact de cette incertitude de réglage sur la co-spatialité ? Le calcul est illustré dans les tableaux 8-a et 8-b ci-dessous où l'on reprend l'exemple du tableau 7 en soustrayant et additionnant $0,02^\circ$ respectivement à la valeur d'angle θ_{sep} de $44,59^\circ$ initiale.

PRINCIPE DU SÉPARATEUR LONGITUDINAL

Angle lame 1 / Fente	44,57	degré	Angle entre Lames	90,25	degré
LAME SÉPARATRICE 1			LAME SÉPARATRICE 2		
Épaisseur lame 1	12,06	mm	Épaisseur lame 2	11,94	mm
Séparations:			Séparations:		
Lame (400 nm)	12,477	arcsec	Lame (400 nm)	12,353	arcsec
Transverse (400 nm)	8,756	arcsec	Transverse (400 nm)	8,763	arcsec
Lame (650 nm)	11,630	arcsec	Lame (650 nm)	11,514	arcsec
Transverse (650 nm)	8,161	arcsec	Transverse (650 nm)	8,167	arcsec
Lame (900 nm)	11,357	arcsec	Lame (900 nm)	11,244	arcsec
Transverse (900 nm)	7,970	arcsec	Transverse (900 nm)	7,975	arcsec
LONGUEUR D'ONDE:		400 nm	650 nm	900 nm	
Séparation transverse	0,006	arcsec	0,006	arcsec	0,006

Tableau 8-a: Incertitude sur la co-spatialité du séparateur longitudinal ($\theta_{\text{sep}} = 44,57^\circ$)

PRINCIPE DU SÉPARATEUR LONGITUDINAL

Angle lame 1 / Fente	44,61	degré	Angle entre Lames	90,25	degré
LAME SÉPARATRICE 1			LAME SÉPARATRICE 2		
Épaisseur lame 1	12,06	mm	Épaisseur lame 2	11,94	mm
Séparations:			Séparations:		
Lame (400 nm)	12,477	arcsec	Lame (400 nm)	12,353	arcsec
Transverse (400 nm)	8,763	arcsec	Transverse (400 nm)	8,756	arcsec
Lame (650 nm)	11,630	arcsec	Lame (650 nm)	11,514	arcsec
Transverse (650 nm)	8,167	arcsec	Transverse (650 nm)	8,161	arcsec
Lame (900 nm)	11,357	arcsec	Lame (900 nm)	11,244	arcsec
Transverse (900 nm)	7,976	arcsec	Transverse (900 nm)	7,970	arcsec
LONGUEUR D'ONDE:		400 nm	650 nm	900 nm	
Séparation transverse	-0,006	arcsec	-0,006	arcsec	-0,006

Tableau 8-b: Incertitude sur la co-spatialité du séparateur longitudinal ($\theta_{\text{sep}} = 44,61^\circ$)

Il ressort de ces tableaux une incertitude sur la co-spatialité de $\pm 0,006$ arcsec.

L'analyseur Themis actuel placé en configuration de séparation longitudinale permet donc d'assurer une co-spatialité transverse meilleure que $\pm 0,006$ arcsec. Cette co-spatialité est réglée sur l'analyseur lui-même de manière figée et stable et est achromatique.



Nous avons vu qu'il est possible de réaliser une séparation longitudinale par rapport à la fente de façon à éliminer le chromatisme transverse et donc d'assurer la co-spatialité nulle. Cette séparation vaut, comme dans le cas de l'analyseur actuel, environ 16 arcsec longitudinalement à la fente. Deux champs de plus de 16 arcsec sont donc mélangés. Nous souhaitons évidemment travailler sur le champ total de 2 arcmin. Le schéma des images séparées par le séparateur longitudinal est donné en figure 8 vu en F2 pour un champ initial de 2 arcmin.

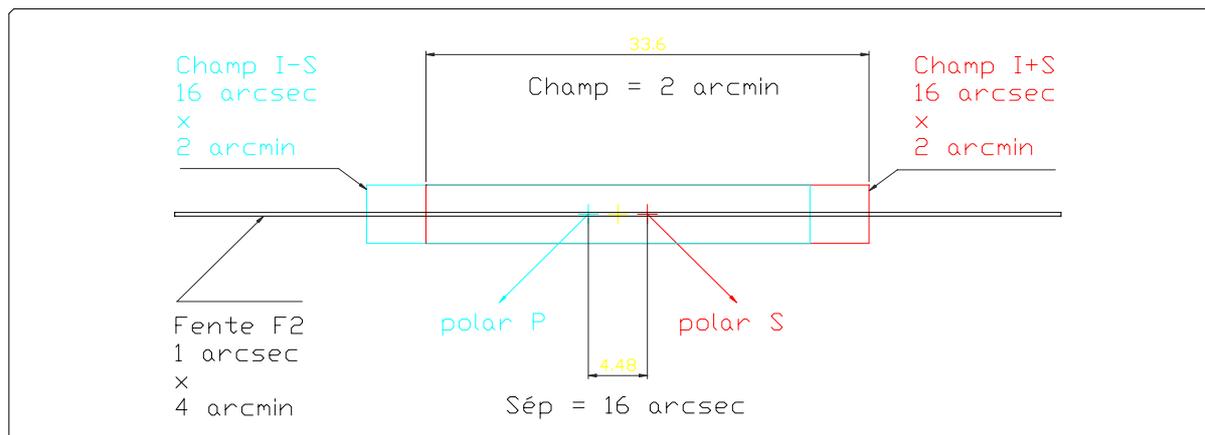


Figure 8 : Schéma en F2 des 2 champs I+S et I-S de 2 arcmin (séparation longitudinale)

Comme le montre la figure 8, le principe de la méthode proposée consiste à laisser les champs séparés longitudinalement être vus par la fente F2 sans autre intervention. En effet, le chromatisme transverse étant nul, il n'est plus nécessaire de passer par les voies séparatrices. Les 2 champs « tombent » sur une seule et même fente (celle utilisée actuellement avec la méthode dite de la « grille ». Le gain de performances est alors significatif :

- co-spatialité nulle ou quasi-nulle ($\pm 0,006$ arcsec),
- pas de différence de grandissement entre les 2 voies,
- pas de différence de mise au point entre les 2 voies,
- pas de différence de résolution spectrale entre les 2 voies,
- pas de différence de largeur spectrale de raie entre les 2 voies,
- résolution spatiale (largeur de fente) réglable continûment de 0 à 10 arcsec,
- possibilité de ne pas limiter la fente en largeur en F1 (champ de 2x2 arcmin).

Donc la méthode proposée est de laisser les champs séparés longitudinalement par l'analyseur actuel en configuration « séparation longitudinale » être vu directement par la fente F2 « classique » du spectrographe. Ceci règle le problème de la co-spatialité et autres défauts générés par les voies séparatrices. Mais alors me direz vous :

Les deux champs sont mélangés et ne sont pas observables directement. Comment va-t-on observer les 2 champs I+S et I-S à travers les spectrographes ?

C'est « simple » : en les séparant après la fente F2. Là où ils ne participent plus à la co-spatialité. Le principe de cette séparation « post-F2 » est explicité dans le paragraphe suivant.



3.2 Le séparateur post-F2

Les deux champs I+S et I-S sont mélangés et ne peuvent donc pas être séparés « classiquement » de manière géométrique. La seule solution est de les séparer en utilisant leurs états de polarisation différents. Rappelons que, à la sortie de l'analyseur de polarisation, les champs I+S et I-S ont un état de polarisation linéaire pur (à mieux que 10^{-4}) et ce quelque soit le paramètre de Stokes mesuré. Comme rappelé en figure 8, les axes de polarisation des champs I+S et I-S sont perpendiculaires entre eux et placés à 45° de l'axe longitudinal de la fente F2. Pour reprendre un système de notation utilisé par les opticiens s'agissant d'état de polarisation linéaire, nous poserons :

- Voie I+S : polarisation linéaire orientée à 45° de la fente, notée polarisation S
- Voie I-S : polarisation linéaire orientée à 135° de la fente, notée polarisation P

Le principe du séparateur post-F2 proposé est d'utiliser ces 2 états de polarisation perpendiculaires pour séparer les 2 voies de manière physique.

Afin de faire un choix de faisabilité technique, donnons les spécifications techniques que doit avoir cette séparation :

Spécifications techniques du séparateur post-F2 :

- domaine spectral : de 400 nm à 1000 nm,
- pureté de la séparation : $< 10^{-4}$ de mélange entre états de polarisation,
- transmission : $> 90\%$,
- chemins optiques : égaux à mieux que 0,25 mm,
- chromatisme longitudinal : rajout inférieur à 2 nm à F/62,7
- déplacement du foyer SP1 : inférieur à ± 5 mm

Un certain nombre de dispositifs susceptibles de séparer deux états de polarisation perpendiculaires peuvent être cités :

- le cube séparateur de polarisation,
- le séparateur de Savart,
- le séparateur de Glan-Thompson,
- le séparateur de Glan-Taylor.

Étudions la validité de ces dispositifs :

a/ le cube séparateur de polarisation

C'est le dispositif le plus simple, il est constitué de 2 prismes à angle droit collés par leurs hypothénuses. Moyennant un traitement adéquat de cette hypothénuse on obtient une séparation des polarisations P et S. La polarisation S tangentielle au plan de l'hypothénuse est réfléchiée et la polarisation P est transmise. Un schéma de ce dispositif est donné en figure 9-a.

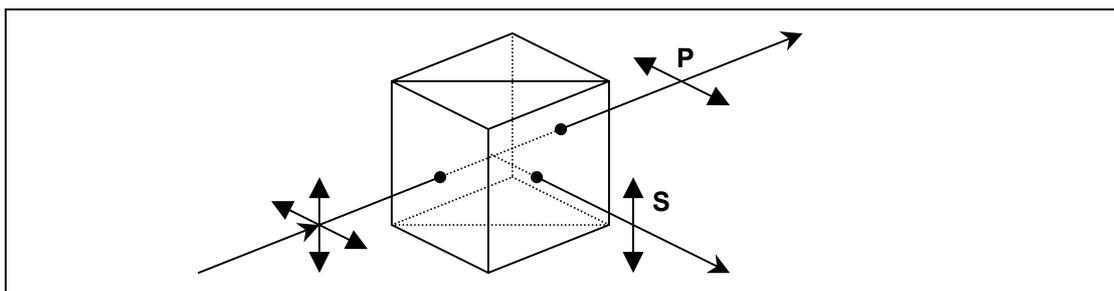


Figure 9-a : Séparation de polarisation par Cube polarisant



Ce type de cube séparateur est très courant dans le commerce mais présente un défaut considérable pour notre application : il n'existe pas de traitement séparateur s'étendant sur notre domaine spectral de 400 nm à 1000 nm. En effet les traitements existants sont dédiés à un domaine spectral d'environ 250 – 300 nm maximum, par exemple :

- Cube « Visible » : Transmission P > 95 % de 450 à 700 nm
 Transmission S > 95 % de 450 à 700 nm
- Cube « Infrarouge » : Transmission P > 95 % de 650 à 850 nm
 Transmission S > 95 % de 650 à 850 nm

Le domaine spectral n'est pas suffisant, la pureté de la séparation non plus puisqu'elle est de l'ordre de 10^{-1} . **Ce type de cube ne peut donc pas être utilisé.**

b/ le séparateur de Savart

Le séparateur de Savart est un séparateur constitué de deux lames biréfringentes croisées. C'est le principe du séparateur de l'analyseur Themis (voir figure 1). La séparation à effectuer dans notre cas est de l'ordre de 33,6 mm (voir figure 8) mais à 45° de la fente, soit 47,5 mm. Le séparateur Themis donne une séparation d'environ 1,16 mm. Il faudrait donc un séparateur plus de 40 fois plus puissant. Soit, par exemple, un séparateur identique au séparateur Themis mais constitué de deux lames de 480 mm d'épaisseur ! Un tel séparateur est illusoire et surtout introduirait une aberration d'astigmatisme supérieure à la seconde d'arc. **Un tel séparateur de Savart ne peut donc pas être utilisé.**

c/ le séparateur de Glan-Thompson

Le séparateur de Glan-Thompson est un type de séparateur combinant l'utilisation de la biréfringence et les propriétés de réflexion totale. Il est constitué de 2 prismes de Calcite taillés parallèlement à l'axe optique avec un angle d'environ 68° et collés entre-eux par leurs hypothénuses. A l'interface hypothénuse-colle le faisceau ordinaire (polarisation P) subit une réflexion totale et est « rejeté ». Le faisceau extraordinaire (polarisation S) est lui parfaitement transmis. Un schéma de ce dispositif est donné en figure 9-b.

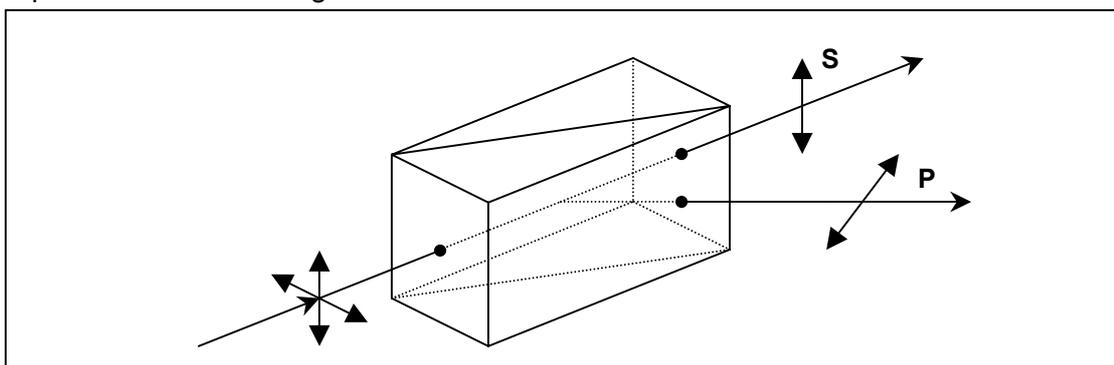


Figure 9-b : Séparation de polarisation par Prisme de Glan-Thompson

La pureté de la séparation est excellente car obtenue par réflexion totale (pureté meilleure que quelques 10^{-5}). Cette pureté peut être maintenue sur le domaine spectral de 400 nm à 1000 nm en choisissant convenablement l'angle de taille de l'hypothénuse. Toutefois, l'inconvénient de ce dispositif est l'angle de réflexion élevé du faisceau ordinaire (polarisation P) qui vaut, pour une taille de 68° , 136° dans le prisme (pour ne pas prendre en compte la réfraction prisme-air). Cet angle génère un



rapport longueur/section de 2,5 typiquement, soit pour notre cas une longueur d'environ 85 mm. Une telle épaisseur de Calcite ne permettrait pas de maintenir la spécification de chromatisme longitudinal sur le domaine spectral souhaité. **Un séparateur à prisme de Glan-Thompson est donc très proche des spécifications souhaitées mais ne peut pas être utilisé dans notre application.**

d/ *le séparateur de Glan-Taylor*

Le séparateur de Glan-Taylor est, tout comme le prisme de Glan-Thompson, un type de séparateur combinant l'utilisation de la biréfringence et les propriétés de réflexion totale. Il est constitué de 2 prismes de Calcite taillés parallèlement au dioptré d'entrée du prisme. Ces prismes forment un angle d'environ 38° avec leurs hypothénuses et sont assemblés entre-eux par leurs hypothénuses avec un interface d'air. A l'interface hypothénuse-air le faisceau ordinaire (polarisation S) subit une réflexion totale et est « rejeté ». Le faisceau extraordinaire (polarisation P) est lui parfaitement transmis. Un schéma de ce dispositif est donné en figure 9-c.

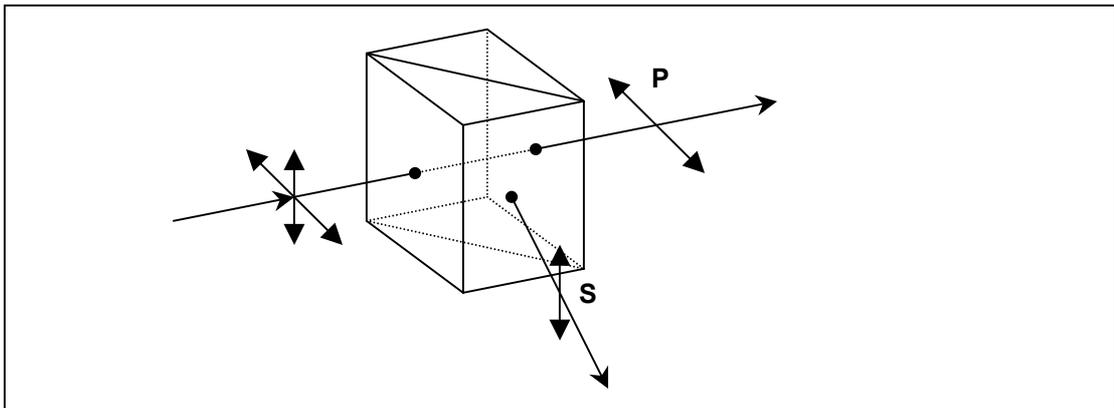


Figure 9-c : Séparation de polarisation par Prisme de Glan-Taylor

La pureté de la séparation est excellente car obtenue par réflexion totale (pureté meilleure que quelques 10^{-5}). Cette pureté peut être maintenue sur le domaine spectral de 400 nm à 1000 nm en choisissant convenablement l'angle de taille de l'hypothénuse. Étant donné l'angle de l'hypothénuse (38°), le rapport longueur sur section du prisme est maintenant d'environ 0,85. Avec un tel prisme on obtient pour notre application une longueur d'environ 30 mm pour un champ de 2 arcmin. Cette longueur permet tout à fait de maintenir la spécification de chromatisme longitudinal. Qui plus est, le repli fort (renvoi à 76°) du faisceau S permet, en choisissant les paramètres du prisme de façon adéquate, d'ajuster la longueur du dispositif et le chemin optique de manière à concevoir un composant qui ne modifie pas ou très peu le chemin optique. **C'est donc ce type de séparateur à prisme de Glan-Taylor qui doit être utilisé dans cette proposition.**

Une pré-étude simple montre que le prisme de Glan-Taylor satisfait aux spécifications imposées pour le séparateur post-F2. Évidemment, ce composant ne peut être sur étagère car il va falloir étudier un composant particulier s'adaptant à l'application. Premièrement il faut choisir l'angle de taille de l'hypothénuse des prismes. Deuxièmement il faut trouver un design opto-mécanique satisfaisant les spécifications géométriques de la séparation. Troisièmement il faut vérifier que la pureté de la séparation des 2 états de polarisation soit effectivement maintenue sur tout le domaine spectral de 400 à 1000 nm. C'est l'objet de la suite de ce paragraphe.



- Angle de l'hypothénuse :

Considérons un prisme de Glan-Taylor « typique » du commerce d'angle de taille $I = 38^\circ$. Le schéma de principe d'un tel prisme est donné en figure 10.

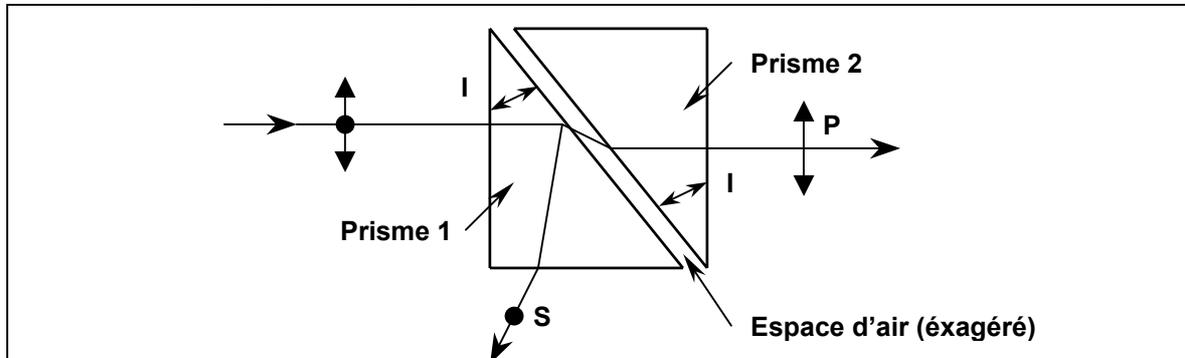


Figure 10 : Schéma d'un Prisme de Glan-Taylor d'angle 38°

Le tableau 9-a ci-dessous donne sur le domaine spectral spécifié les valeurs d'angles de Brewster, d'angles de réfraction, de coefficients de réflexion et de transmission des faisceaux ordinaire O (polarisation S) et extraordinaire E (polarisation P) pour ce prisme.

Longueur d'onde [nm]	Indices de réfraction		Angles de Brewster [°]		Angles de réfraction [°]		Coefficients de Réflexion [%]		Coefficients de Transmission [%]	
	Spath-O	Spath-E	O	E	O (S)	E (P)	O (S)	E (P)	O (S)	E (P)
400	1,68349	1,49743	36,44	41,90	RT	67,21	100,000	2,309	0,000	97,691
450	1,67402	1,49309	36,68	42,05	RT	66,82	100,000	2,117	0,000	97,883
500	1,66750	1,49005	36,85	42,15	RT	66,54	100,000	1,991	0,000	98,009
550	1,66281	1,48781	36,97	42,23	RT	66,35	100,000	1,904	0,000	98,096
600	1,65932	1,48611	37,06	42,29	RT	66,20	100,000	1,840	0,000	98,160
650	1,65665	1,48479	37,13	42,34	RT	66,08	100,000	1,791	0,000	98,209
700	1,65455	1,48373	37,19	42,37	RT	65,99	100,000	1,753	0,000	98,247
750	1,65288	1,48286	37,23	42,41	RT	65,92	100,000	1,723	0,000	98,277
800	1,65151	1,48214	37,27	42,43	RT	65,85	100,000	1,698	0,000	98,302
850	1,65039	1,48153	37,29	42,45	RT	65,80	100,000	1,677	0,000	98,323
900	1,64946	1,48101	37,32	42,47	RT	65,76	100,000	1,659	0,000	98,341
950	1,64867	1,48055	37,34	42,49	RT	65,72	100,000	1,644	0,000	98,356
1000	1,64800	1,48014	37,36	42,50	RT	65,68	100,000	1,631	0,000	98,369

RT: Réflexion Totale O : faisceau Ordinaire (polar S) E : faisceau Extraordinaire (polar P)

Tableau 9-a : Prisme simple de Glan-taylor d'angle 38°

Le fonctionnement d'un prisme de Glan Taylor est le suivant : le faisceau composé des 2 états de polarisations S et P pénètre dans le prisme en incidence nulle. À l'interface hypothénuse-air le faisceau ordinaire O (polar S) « voit » l'indice ordinaire du Spath et le faisceau extraordinaire E (polar P) « voit » l'indice extraordinaire. Or l'indice ordinaire du Spath est plus élevé que l'indice extraordinaire (exemple : 1,657 contre 1,485 à 650 nm). Par conséquent l'angle de Brewster (angle limite de réfraction) est plus faible pour l'onde ordinaire que pour l'onde extraordinaire (exemple : $37,13^\circ$ contre $42,34^\circ$ à 650 nm). Si l'angle de taille de l'hypothénuse (qui est l'angle d'indidence à ce dioptre) est compris entre ces deux valeurs d'angle, il y a réflexion totale de l'onde qui a l'angle de Brewster plus faible (soit l'onde ordinaire O de polarisation S) et réfraction de l'onde qui a l'angle de Brewster plus élevé (soit l'onde extraordinaire E de polarisation P). **Le tableau 9-a montre qu'un angle de 38° permet de maintenir la réflexion totale de la polarisation S de 400 à 1000 nm.**



Le faisceau ordinaire est alors réfracté par le dioptre de sortie Spath-air du premier prisme. Ceci est un inconvénient car cette dernière réfraction est évidemment chromatique, il faudra donc trouver un désign opto-mécanique éliminant cet inconvénient. Le second prisme étant symétrique au premier le faisceau extraordinaire est de nouveau réfracté par le dioptre air-hypothénuse et donc transmis à travers le second prisme sans déviation par rapport à au faisceau initial. Si l'espace d'air est suffisamment petit on peut fabriquer un ensemble sans déviation ni translation du faisceau extraordinaire de polarisation P.

Le bilan de performances en transmission et de pureté de cette simple séparation par un prisme de Glan-Taylor est le suivant :

- polarisation P : ▶ *Transmission* comprise entre 97,7% (400 nm) et 98,4% (1000 nm),
 ▶ *Pureté* meilleure que 10^{-5} grâce à la Réflexion Totale de la polar S.
- polarisation S : ▶ *Transmission* de 100,0 % grâce à la Réflexion Totale de la polar S,
 ▶ *Pureté* comprise entre 2,3% (400 nm) et 1,6% (1000 nm) due à la Réflexion Partielle de la polar P). Ce dernier point est un défaut qui sera facilement corrigé par le design opto-mécanique.

Peut-on optimiser cet angle de taille de l'hypothénuse ? Le tableau 9-a montre que cet angle doit être compris entre la valeur max de l'onde ordinaire ($37,36^\circ$ à 1000 nm) et la valeur min de l'onde extraordinaire ($41,9^\circ$ à 400 nm). Il est dangereux de s'approcher trop de la borne minimale ($37,36^\circ$) sans risquer de ne pas avoir de réflexion totale ; raisonnablement, **la valeur minimum peut donc être fixée à 38° .** Il est évident que plus on augmente cette valeur d'angle plus l'angle de réfraction de l'onde extraordinaire est élevé et donc plus la réflexion partielle de la polarisation P est élevée. Ce fait est illustré dans le tableau 9-b ci-dessous où sont listées les données d'un prisme d'angle $39,5^\circ$.

Longueur d'onde [nm]	Indices de réfraction Spath-O Spath-E		Angles de Brewster [°]		Angles de réfraction [°]		Coefficients de Réflexion [%]		Coefficients de Transmission [%]	
	O	E	O	E	O (S)	E (P)	O (S)	E (P)	O (S)	E (P)
400	1,68349	1,49743	36,44	41,90	RT	72,27	100,000	6,604	0,000	93,396
450	1,67402	1,49309	36,68	42,05	RT	71,75	100,000	6,026	0,000	93,974
500	1,66750	1,49005	36,85	42,15	RT	71,40	100,000	5,653	0,000	94,347
550	1,66281	1,48781	36,97	42,23	RT	71,15	100,000	5,396	0,000	94,604
600	1,65932	1,48611	37,06	42,29	RT	70,96	100,000	5,210	0,000	94,790
650	1,65665	1,48479	37,13	42,34	RT	70,81	100,000	5,069	0,000	94,931
700	1,65455	1,48373	37,19	42,37	RT	70,69	100,000	4,960	0,000	95,040
750	1,65288	1,48286	37,23	42,41	RT	70,60	100,000	4,872	0,000	95,128
800	1,65151	1,48214	37,27	42,43	RT	70,52	100,000	4,801	0,000	95,199
850	1,65039	1,48153	37,29	42,45	RT	70,45	100,000	4,741	0,000	95,259
900	1,64946	1,48101	37,32	42,47	RT	70,40	100,000	4,690	0,000	95,310
950	1,64867	1,48055	37,34	42,49	RT	70,35	100,000	4,647	0,000	95,353
1000	1,64800	1,48014	37,36	42,50	RT	70,30	100,000	4,608	0,000	95,392

RT: Réflexion Totale O : faisceau Ordinaire (polar S) E : faisceau Extraordinaire (polar P)

Tableau 9-b : Prisme simple de Glan-taylor d'angle $39,5^\circ$

Le bilan en pureté de ce prisme est moins bon que celui du prisme de 38° puisque la réflexion partielle de la polarisation P a été pratiquement multipliée par 3 (5,07% contre 1,79% à 650 nm par exemple). De même que la transmission de la polarisation P a considérablement diminué (94,9% contre 98,2% à 650 nm). Il est donc préférable de choisir l'angle de taille le plus faible possible. **Le choix se porte donc sur un prisme de Glan-Taylor d'angle d'hypothénuse égal à 38° .**



- Design opto-mécanique :

Le design opto-mécanique est une conséquence des quelques défauts constatés dans le point précédent (« angle de l'hypothénuse »). Citons les deux seuls défauts constatés sur l'onde ordinaire (polarisation S en réflexion totale à $2 \times 38^\circ$) :

► « Le faisceau ordinaire est alors réfracté par le dioptre de sortie Spath-air du premier prisme. Ceci est un inconvénient car cette dernière réfraction est évidemment chromatique. »

► « Pureté comprise entre 2,3% (400 nm) et 1,6% (1000 nm) due à la Réflexion Partielle de la polar P »

Ces deux défauts sont éliminés simplement en remplaçant le premier prisme du séparateur de Glan Taylor par un Rhomboèdre. Le schéma de principe de ce « Rhomboèdre » de Glan-Taylor comparé au prisme normal est donné en figure 11.

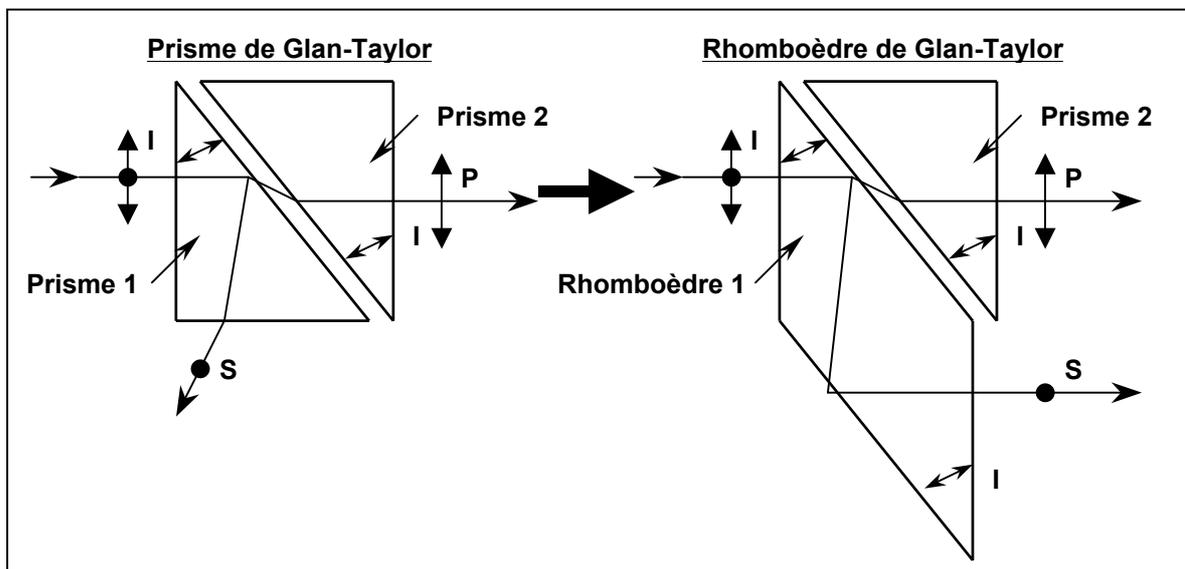


Figure 11 : Schéma du « Rhomboèdre » de Glan-Taylor d'angle 38°

Le fait de transformer le prisme en rhomboèdre résout trois fonctions à la fois :

- il renvoie le faisceau ordinaire de polarisation S dans la même direction que le faisceau extraordinaire de polarisation P.

- il supprime le défaut de refraction chromatique de l'onde ordinaire (polar S) au dernier dioptre spath-air du prisme 1. En effet, la réfraction de l'onde ordinaire au dioptre de sortie du rhomboèdre est à incidence nulle, donc achromatique. **Le Faisceau ordinaire (polarisation S) est donc parallèle au Faisceau extraordinaire (polarisation P) et parallèle au faisceau initial** (les contraintes de spécifications de fabrication de ces composants sont présentés plus avant dans ce rapport).

- il améliore la pureté de l'onde ordinaire de polarisation S. En effet la seconde réflexion au dioptre spath-air du rhomboèdre agit comme la première : à savoir comme un filtre de polarisation P. La polarisation S est une nouvelle fois réfléchi à 100%, mais la polarisation P présente sur cette voie (1,79% à 650 nm) est de nouveau réfléchi partiellement avec le même pourcentage : soit $(0,0179)^2 = 3,2 \cdot 10^{-4}$. **Le bilan devient :**

-Voie P : ► **Transmission comprise entre 97,7% (400 nm) et 98,4% (1000 nm),**
► **Pureté meilleure que 10^{-5} grâce à la Réflexion Totale de la polar S.**

-Voie S : ► **Transmission de 100,0 % grâce à la Réflexion Totale de la polar S,**
► **Pureté comprise entre $5 \cdot 10^{-4}$ (400 nm) et $2,5 \cdot 10^{-4}$ (1000 nm) grâce aux deux Réflexions Partielles de la polar P par le rhomboèdre).**



La barre des 10^{-4} de pureté n'est pas encore franchie pour la voie S, mais il suffit maintenant de rejeter au moins 20% de la polarisation P par rapport à la polarisation S sur la voie S. Pour ce faire un simple polariseur du commerce de type dichroïque peut être utilisé (taux d'extinction inférieur à 10% de 400 nm à 1000 nm).

Il reste maintenant à adapter le dispositif de Glan-Taylor à notre application et de s'assurer de l'égalisation des chemins optiques entre les voies de polarisation S et P. Rappelons que les axes de polarisation S et P des voies 1 et 2 sont respectivement à 45° et 135° de l'axe longitudinal de la fente. Or le principe du séparateur à « rhomboédre de Glan-Taylor » est basé sur l'alignement de la polarisation S avec le plan de la face hypothénuse du rhomboédre. Donc pour faire une séparation longitudinale et symétrique des 2 voies, il faut utiliser 2 rhomboédres croisés, l'un dont le plan d'hypothénuse est aligné avec la polarisation S (donc à 45° de la fente) et l'autre aligné avec la polarisation P (donc à 135° de la fente). Le schéma de principe de cette séparation à 2 rhomboédres est donné en figures 12-a et 12-b.

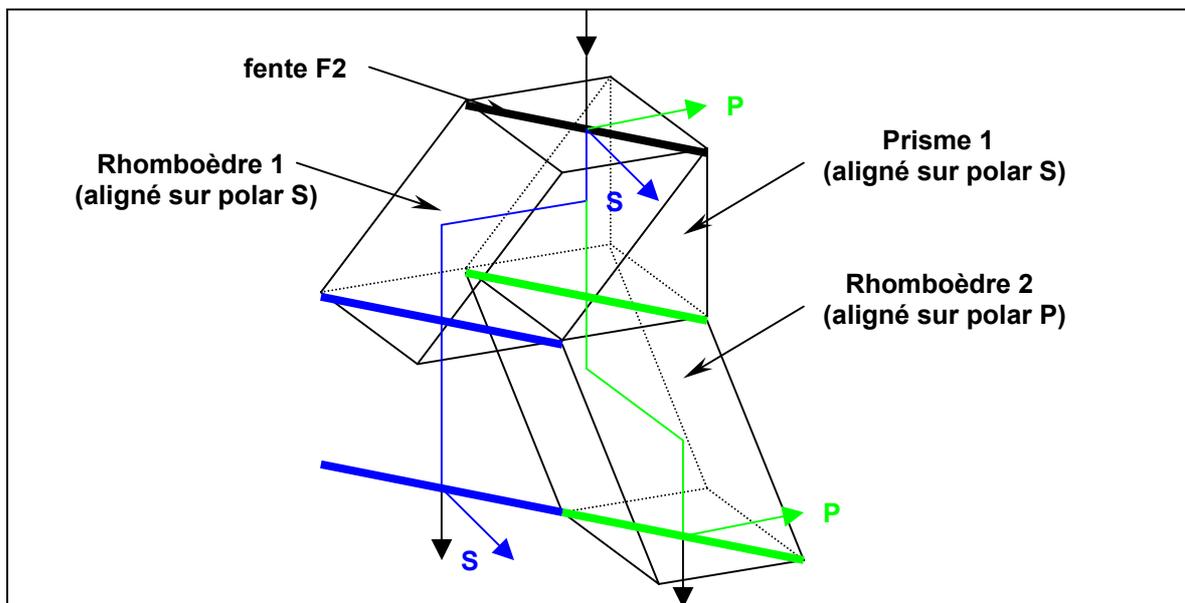


Figure 12-a : Vue 3D du Séparateur Post-F2 à 2 rhomboédres de Glan-Taylor

Le fonctionnement de ce séparateur post-F2 à deux rhomboédres de Glan-Taylor est le suivant :

- le rhomboédre n°1, orienté à -45° de l'axe longitudinal de la fente F2, sépare les deux voies en réfléchissant la polarisation S et transmettant la polarisation P par l'intermédiaire du prisme 1. L'image de polarisation S est décalée d'une quantité L_S (égale à la longueur du rhomboédre 1) dans une direction d'angle $\alpha_S = -45^\circ$ de l'axe de la fente.
- le rhomboédre n°2, orienté à 45° de l'axe longitudinal de la fente F2, ne travaille que sur la polarisation P et la décale pour ramener l'image de polarisation P sur le même axe que l'image de polarisation S. L'image de polarisation P est décalée d'une quantité L_P (égale à longueur du rhomboédre 2) dans une direction d'angle $\alpha_P = 45^\circ$ de l'axe de la fente.

La séparation produite par ce dispositif est donc une fonction des angles d'orientation des 2 rhomboédres par rapport à l'axe longitudinal de la fente F2 (α_S et α_P) et les longueurs L_S et L_P des rhomboédres 1 et 2.



La figure 12-b ci-après explicite cette séparation par le schéma du séparateur post-F2 vu du dessus de la fente F2.

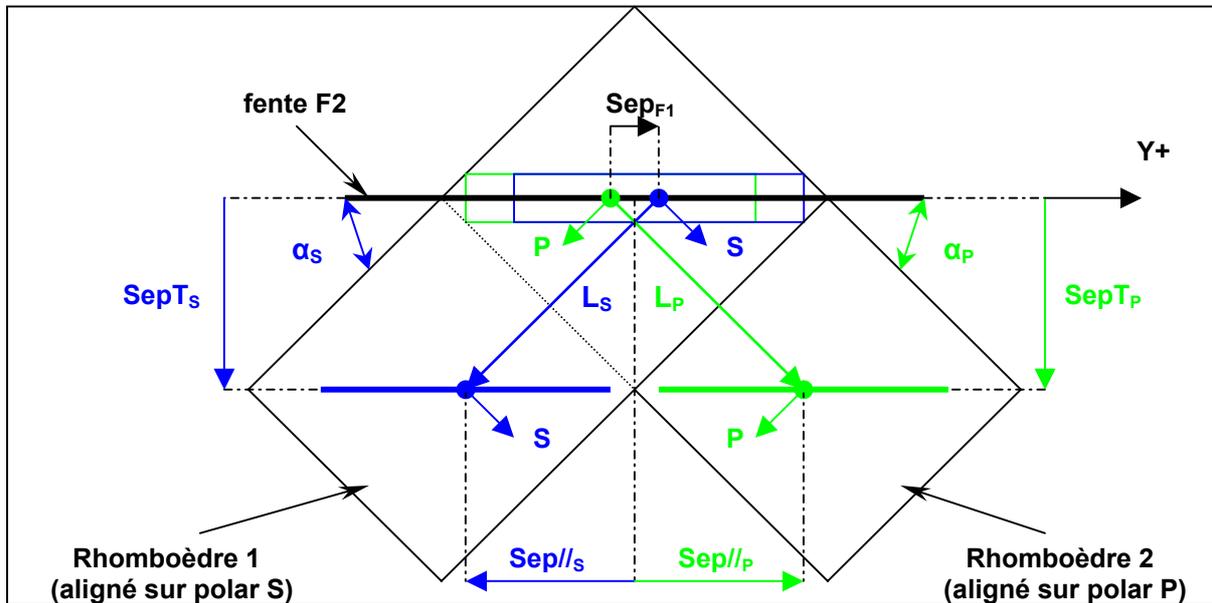


Figure 12-b : Vue du dessus du Séparateur Post-F2 à 2 rhomboèdres de Glan-Taylor

Les deux champs I+S et I-S arrivent sur la fente F2 séparés par le séparateur de l'analyseur de polarisation placé en F1. Cette séparation Sep_{F1} vaut approximativement 16 arcsec (voir chapitre 2). Les séparations effectives respectivement transverses $SepT_i$ (perpendiculaire à la fente) et parallèles $Sep//_i$ (parallèle à la fente) sont alors fonction des angles d'orientation des 2 rhomboèdres par rapport à l'axe longitudinal de la fente F2 (α_S et α_P) et les longueurs L_S et L_P des rhomboèdres 1 et 2. La relation algébrique suivante est donnée pour le sens positif compté selon l'axe Y+.

$$Sep//_S = L_S \sin \alpha_S - \frac{Sep_{F1}}{2} \quad \text{et} \quad Sep//_P = L_P \sin \alpha_P + \frac{Sep_{F1}}{2}$$

$$SepT_S = L_S \cos \alpha_S \quad \text{et} \quad SepT_P = L_P \cos \alpha_P$$

Les séparations totales, longitudinale $Sep//$ et transverse $SepT$, sont alors données par :

$$\boxed{Sep// = Sep//_P - Sep//_S = L_P \sin \alpha_P - L_S \sin \alpha_S - Sep_{F1}}$$

$$\boxed{SepT = SepT_P - SepT_S = L_P \cos \alpha_P - L_S \cos \alpha_S}$$

Si l'on considère le cas parfait, c'est à dire 2 rhomboèdres de longueur L identiques et orientés parfaitement à $\pm 45^\circ$ de la fente, soit $L_P = L_S = L$ et $\alpha_P = -\alpha_S = 45^\circ$, on obtient alors :

$$\boxed{Sep// = \frac{\sqrt{2}}{2} L - Sep_{F1} \quad \text{et} \quad SepT = 0}$$

La séparation transverse est annulée, on obtient donc un séparateur longitudinal pur. De la même façon que pour le séparateur F1, si l'on tient compte des incertitudes sur les longueurs de rhomboèdres et angles d'orientation, on s'aperçoit qu'il existe toujours une combinaison des angles $\alpha_P = -\alpha_S$ permettant d'annuler la séparation transverse $sepT$. **On est donc capable de fabriquer un dispositif séparateur agissant longitudinalement et placé sous la fente F2. Ce séparateur post-F2 permet en outre d'aligner les deux**



images I+S et I-S pour leur passage au foyer du spectrographe prédisperseur SP1 (table des masques). Moyennant la spécification adéquate des paramètres de ces rhomboédres (longueur, angle et tolérances sur ces valeurs), on peut réaliser un dispositif alignant parfaitement les deux images, ce qui apporte une grande amélioration sur la fabrication des masques MTR. En effet, actuellement les 2 images font un angle de $0,7^\circ$ à leur passage en SP1, fait qui oblige à réaliser des fentes à double inclinaison. Une tolérance angulaire de $0,05^\circ$ entre ces deux images permet de ne réaliser qu'une seule et même fente pour les deux images, soit un gain énorme en précision et surtout en simplicité (et donc en coût) sur la fabrication des masques.

Il nous reste maintenant à adapter les chemins optiques parcourus par les deux champs I+S et I-S et assurer la conformité du chromatisme longitudinal. La figure 12-a nous montre que les images de polarisation S et P parcourent les chemins suivants :

- polarisation S :
 - $\frac{1}{2}$ épaisseur de rhomboèdre 1 (indice ordinaire)
 - 1 longueur de rhomboèdre 1 (indice ordinaire)
 - $\frac{1}{2}$ épaisseur de rhomboèdre 1 (indice ordinaire)
- polarisation P :
 - $\frac{1}{2}$ épaisseur de rhomboèdre 1 (indice extraordinaire)
 - $\frac{1}{2}$ épaisseur de prisme 1 (indice extraordinaire)
 - $\frac{1}{2}$ épaisseur de rhomboèdre 2 (indice ordinaire)
 - 1 longueur de rhomboèdre 2 (indice ordinaire)
 - $\frac{1}{2}$ épaisseur de rhomboèdre 2 (indice ordinaire)

La différence de chemin optique est donc $\frac{1}{2}$ épaisseur de rhomboèdre 1 et $\frac{1}{2}$ épaisseur de prisme 1. Par fabrication le prisme et le rhomboèdre doivent être symétriques et ont donc la même épaisseur. La différence de chemin optique est donc égale à 1 épaisseur de rhomboèdre (ou de prisme). Il « suffit » donc de rajouter sur la voie S une lame non prismatique de Spath d'épaisseur égale à celle du rhomboèdre et orientée selon l'indice extraordinaire. Les tolérances typiques de fabrication de tels prismes sont aisément meilleures que 0,1 mm sur les dimensions. **La différence de chemin optique entre les deux voies peut donc être aisément maintenue inférieure à 0,2 mm. Le schéma optique complet du séparateur post-F2 proposé est donné en figure 12-c :**

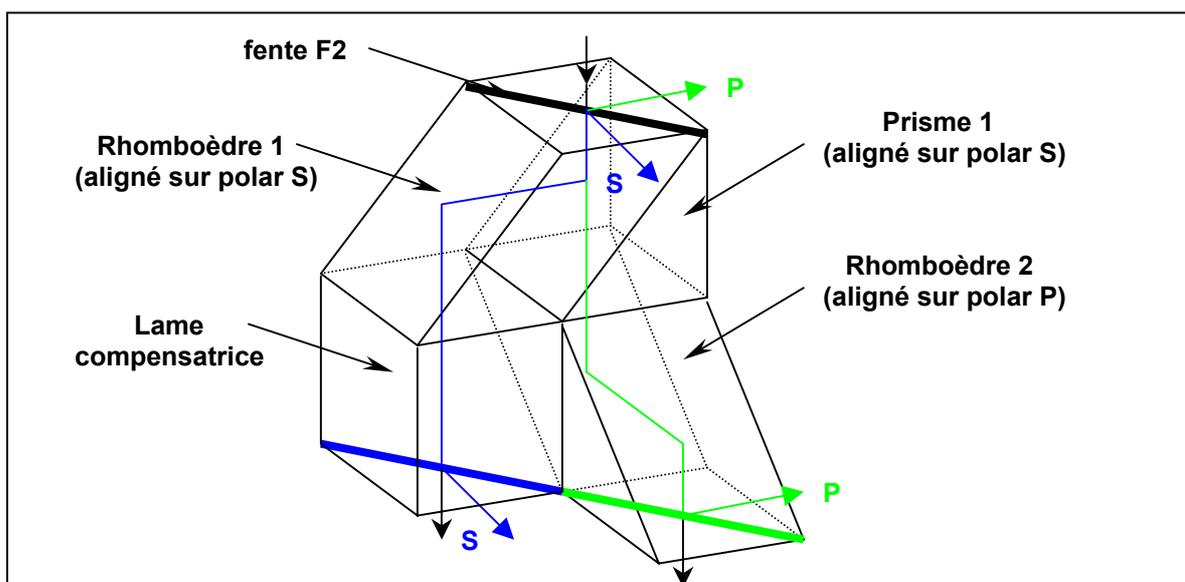


Figure 12-c : Vue 3D du Séparateur Post-F2 définitif
(Rappel : La polarisation S doit se propager selon l'indice extraordinaire de la lame)



Il nous reste deux spécifications à vérifier : le déplacement du foyer et le chromatisme longitudinal. Les deux sont reliées à l'épaisseur de matériau traversée. Ces spécifications dépendent de la réalisation pratique et donc seront discutées dans le chapitre suivant.

- Pureté de la séparation :

L'adjonction d'un second rhomboèdre a modifié le bilan de transmission de la séparation. De plus nous avons vu au début de ce paragraphe qu'il faut ajouter un polariseur de type dichroïque sur la voie S pour tenir la spécification de pureté de la séparation de 10^{-4} . Le tableau 10 ci-dessous donne les nouvelles performances de séparation en transmission des polarisations S et P.

SÉPARATEUR POST-F2					Angle I = 38,0 °			
Longueur d'onde [nm]	COEFFICIENT DE TRANSMISSION (Rhomboèdre de Glan-Taylor seul)				COEFFICIENT DE TRANSMISSION (Rhomboèdre de Glan-Taylor + polariseur dichroïque 10%)			
	Voie S		Voie P		Voie S		Voie P	
	polar S [%]	polar P [%]	polar S [%]	polar P [%]	polar S [%]	polar P [%]	polar S [%]	polar P [%]
400	100,000	0,053	0,000	97,691	100,000	0,005	0,000	97,691
450	100,000	0,045	0,000	97,883	100,000	0,004	0,000	97,883
500	100,000	0,040	0,000	98,009	100,000	0,004	0,000	98,009
550	100,000	0,036	0,000	98,096	100,000	0,004	0,000	98,096
600	100,000	0,034	0,000	98,160	100,000	0,003	0,000	98,160
650	100,000	0,032	0,000	98,209	100,000	0,003	0,000	98,209
700	100,000	0,031	0,000	98,247	100,000	0,003	0,000	98,247
750	100,000	0,030	0,000	98,277	100,000	0,003	0,000	98,277
800	100,000	0,029	0,000	98,302	100,000	0,003	0,000	98,302
850	100,000	0,028	0,000	98,323	100,000	0,003	0,000	98,323
900	100,000	0,028	0,000	98,341	100,000	0,003	0,000	98,341
950	100,000	0,027	0,000	98,356	100,000	0,003	0,000	98,356
1000	100,000	0,027	0,000	98,369	100,000	0,003	0,000	98,369

Tableau 10 : Bilan de Transmission du Séparateur post-F2

Ce bilan montre que le simple rajout d'un polariseur dichroïque sur la voie S permet d'assurer une pureté des polarisations meilleure que $5 \cdot 10^{-5}$. La transmission est très élevée sur les deux voies quelque soit la longueur d'onde (supérieure à 97 %). Ce bilan ne tient pas compte de l'absorption, ni des réflexions de Fresnel aux dioptries d'entrée et de sortie du dispositif. Toutefois, un traitement antireflet large bande (type EVAP-MTO) sur les dioptries d'entrée et de sortie offre une réflexion de Fresnel inférieure à 1% de 400 nm à 100 nm. **Le bilan total, compte tenu de ces traitements, offre une transmission toujours très élevée, puisque supérieure à 95 %. Ce chiffre est à comparer à la transmission actuelle des voies séparatrices qui est de l'ordre de 55%.**

Nous avons donc présenté une méthode permettant de s'affranchir de la majorité des défauts jouant sur la co-spatialité. Cette méthode apporte de plus un grand nombre d'améliorations quant aux autres paramètres opto-géométriques. Les performances de cette méthode sont données dans le paragraphe suivant.



3.3 Performances améliorées

Pour faciliter la comparaison avec les performances obtenues pour les voies séparatrices, ce paragraphe traite les performances propres à la nouvelle méthode proposée avec la même approche : d'une part, les performances opto-géométriques (images, pupilles, résolution spectrale, ...); d'autre part, les performances de co-spatialité en soit. **Il est important de noter que dans ce cas seul la séparation F1 a une influence sur les paramètres de co-spatialité en F2.**

-Performances opto-géométriques :

Études pour la méthode proposée les différences sur le grandissement des 2 images, sur leur mise au point solaire et sur leur résolution spectrale à travers les spectrographes. Ces écarts sont détaillés ci-dessous.

a/ Grandissements des images

Il faut séparer le grandissement des images en F2 et celui au foyer du premier spectrographe (SP1).

-grandissement en F2 :

En F2, avec la méthode proposée, seul l'analyseur de polarisation en F1 s'interpose entre le foyer F1 et le foyer F2. La seule incertitude qui puisse produire une différence de grandissement entre les 2 voies est l'incertitude sur l'épaisseur des 2 lames du séparateur de Spath en F1. Nous avons défini cette incertitude dans le paragraphe 2.1, l'épaisseur des lames vaut $12 \pm 0,05$ mm. Compte tenu de la focale au foyer F1 (15040 mm), cette incertitude peut provoquer une différence de grandissement entre les images de $3,3 \cdot 10^{-6}$, donc complètement négligeable (différence de $0,3 \cdot 10^{-3}$ arcsec sur un champ de 2 arcmin).

-grandissement en SP1 :

En SP1, c'est le séparateur post-F2 qui intervient. L'incertitude sur les chemins optiques des voies 1 et 2 vaut 0,2 mm. Compte tenu de la focale du collimateur du spectrographe prédisperseur (7011 mm), cette incertitude peut provoquer une différence de grandissement entre les images de $2,8 \cdot 10^{-5}$, donc complètement négligeable (différence de $3,3 \cdot 10^{-3}$ arcsec sur un champ de 2 arcmin).

b/ Mises au point solaires

Avec la nouvelle méthode, seul l'analyseur intervient. L'incertitude sur la différence d'épaisseur entre les 2 lames du séparateur ($\pm 0,05$ mm) peut provoquer une différence de mise au point solaire entre les deux voies de 0,7 mm. Soit à F/62,7 une incertitude sur la largeur de la tâche de diffraction de **0,04 arcsec**.

c/ Résolutions spectrales

Pour la nouvelle méthode, deux sources d'incertitudes jouent sur la largeur des fentes vues par les spectrographes :

-**incertitude sur la position des fentes en F2'_1 et F2'_2** : seul la différence de chemins optiques entre les deux voies dans le séparateur post-F2 intervient, soit $\pm 0,2$ mm, qui provoque une incertitude sur la largeur de la fente vue par les spectrographes de $\pm 0,011$ arcsec.

-**incertitude sur la largeur des fentes en F2'_1 et F2'_2** : dans la nouvelle méthode la fente F2 est unique, c'est une fente polie optiquement. En étant pessimiste, on peut considérer un défaut de 2λ , soit $\pm 1,0 \mu\text{m}$ à 500 nm. On obtient une incertitude sur la largeur de la fente vue par les spectrographes de $\pm 0,057 \cdot 10^{-3}$ arcsec.

L'incertitude totale vaut donc $\pm 0,011$ arcsec.



Ce défaut produit, à dispersion égale, une différence de profil instrumental entre les deux voies, c'est à dire une différence de largeur de raie équivalente. Ce défaut subsiste mais est fortement réduit par rapport aux voies séparatrices (rappel : 0,053 arcsec). Pour illustrer ce fait, on donne dans la tableau 11 un exemple de résolution équivalente (ou largeur de raie) obtenue pour une raie infiniment fine (largeur inférieure à 1 mÅ), et ce dans le cas où l'une des fente a sa largeur théorique moins l'incertitude de 0,01 arcsec (exemple : fente 1 = 0,49 arcsec) et l'autre sa largeur théorique plus l'incertitude de 0,01 arcsec (exemple : fente 2 = 0,51 arcsec).

Longueur d'onde [nm]	400	500	600	700	800	900
Résolution intrinsèque [mÅ]	3,2	4,9	6,6	9,7	12,7	15,8
Résolution avec fente 1 : 0,24 arcsec [mÅ]	9,0	11,4	13,2	17,6	21,0	24,0
Résolution avec fente 2 : 0,26 arcsec [mÅ]	9,7	12,2	14,1	18,7	22,1	25,2
Résolution avec fente 1 : 0,49 arcsec [mÅ]	17,5	21,3	24,2	31,2	36,1	40,3
Résolution avec fente 2 : 0,51 arcsec [mÅ]	18,2	22,4	25,5	32,9	38,2	42,8
Résolution avec fente 1 : 0,99 arcsec [mÅ]	34,7	42,6	48,0	61,2	70,2	77,7
Résolution avec fente 2 : 1,01 arcsec [mÅ]	35,5	43,5	49,0	62,6	71,8	79,5

Tableau 11 : Résolution différentielle des voies 1 et 2 en fonction de la largeur de fente entachée d'une incertitude de $\pm 0,01$ arcsec.

On constate des différences de largeur équivalente de raie de **2 % pour une fente de 1 arcsec**, de **4 % pour une fente de 0,5 arcsec** et de **8 % pour une fente de 0,25 arcsec**. Ramené dans l'espace des caméras ce défaut correspond au pire des cas à moins de 1,5 mÅ, soit à moins de 0,1 pixel (contre 0,5 pixel avec les voies séparatrices) de différence entre deux largeurs de raie (à dispersion égale).

Remarque : Si ce défaut n'est pas considéré comme négligeable, on peut tirer profit d'une diminution de la tolérance sur l'épaisseur des rhomboèdres constituant le séparateur post-F2, en passant par exemple d'une tolérance de $\pm 0,1$ mm à une tolérance de $\pm 0,05$ mm (qui reste dans le domaine du faisable techniquement). L'incertitude sur la largeur de fente équivalente vaudrait alors 0,005 arcsec, donnant un écart de largeur de raie inférieur à 0,75 mÅ, soit 0,05 pixel, dans le pire des cas.

-Performances de co-spatialité :

Nous allons maintenant nous intéresser aux performances de co-spatialité offertes par la nouvelle méthode proposée. Pour cela, nous calculerons l'incertitude de la même manière que dans le cas des voies séparatrices.

a/ Incertitude due à la méthode de mesure, notée I_{mesure} :

Nous avons vu dans le paragraphe 3.1 que l'incertitude principale vient du réglage de l'angle du séparateur θ_{Sep} par rapport à la fente F1. C'est la mesure permettant d'effectuer ce réglage qui doit être prise en compte. Ce réglage peut être effectué simplement en statique et hors télescope en utilisant le banc d'étalonnage de l'analyseur existant. Ce banc forme une image de la fente F1 (des fentes) à travers le séparateur avec la même échelle spatiale que le foyer F2 de Themis. En utilisant un objectif de microscope courant, on forme une image très agrandie des 2 images I+S et I-S sur notre caméra de réglage (700x500 pixels de 9 μm). Avec un objectif X10, on obtient une image de 2,8 mm/arcsec formée sur le CCD de 6,6mmx4,5 mm, soit une résolution par pixel de $3,2 \cdot 10^{-3}$ arcsec/pixel et un champ de 2,3 par 1,6 arcsec. Si l'on choisit la portion de l'image où les deux champs I+S et I-S sont jointifs, on



constate le désalignement des 2 images. Cette méthode permet donc de régler en direct l'angle du séparateur (EM27) qui offre le meilleur alignement possible de ces images. C'est cette méthode qui a été utilisée en 2000 pour régler le séparateur de l'analyseur V2 sur les fentes actuelles.

- *Résolution de la méthode* :

En prenant une résolution d'un pixel, on obtient une **résolution de $3,2 \cdot 10^{-3}$ arcsec**, cette distribution étant rectangulaire, l'écart-type associé à cette résolution, $\sigma_{rés}$, vaut :

$$\sigma_{rés} = \frac{\sqrt{2}}{3} 0,0032 = 0,0015 \text{ arcsec}$$

- *Répétabilité de la méthode* :

La répétabilité de la méthode est définie comme l'écart-type (n-1) de n mesures successives. Cet écart-type $\sigma_{rép}$ vaut :

$$\sigma_{rép} = 0,003 \text{ arcsec}$$

L'incertitude totale due à la méthode de mesure, I_{mesure} , vaut alors :

$$I_{mesure} = \sqrt{(\sigma_{rés}^2 + \sigma_{rép}^2)} = 0,0044 \text{ arcsec}$$

b/ Incertitude due aux paramètres d'influence, notée I_{param} :

- *Parallélisme des fentes* :

Le parallélisme des fentes n'a plus de sens, en effet, il n'y a qu'une seule et même fente. Deux détails solaires identiques sont maintenant séparés d'environ 16 arcsec dans le sens de la fente. Toutefois, en admettant un défaut de non-linéarité de cette fente de 1 μm sur ces 16 arcsec (pessimiste car la fente est polie optiquement), on obtient en terme de co-spatialité, une incertitude due au parallélisme des fentes, $\sigma_{||}$ valant :

$$\sigma_{||} = 0,0036 \text{ arcsec}$$

- *Suivi du dérotateur* :

Le dérotateur provoque, lors du suivi solaire, une rotation de l'image du F1 pour la maintenir parallèle à la fente F2. Actuellement, ce suivi est assuré avec une stabilité angulaire de $\pm 0,0033^\circ$ (0,2' d'angle). L'image tourne d'une valeur angulaire double par rapport au dérotateur, la stabilité angulaire de l'image est donc de $\pm 0,0066^\circ$. Soit en terme de co-spatialité sur une séparation de 16 arcsec, une incertitude due au suivi du dérotateur, σ_{rot} valant :

$$\sigma_{rot} = 16 \cdot \text{tg} 0,0066 = 0,0018 \text{ arcsec}$$

- *Translation des fentes* :

S'agissant d'une seule et même fente, la translation des fentes perpendiculairement à elles-mêmes n'a plus de raison d'être. Soit en terme de co-spatialité, une incertitude due à la translation des fentes, σ_{trans} valant :

$$\sigma_{trans} = 0,000 \text{ arcsec}$$

- *Stabilité de la translation image* :

S'agissant d'une seule et même fente, la stabilité différentielle entre images n'a plus de raison d'être. Soit en terme de co-spatialité, une incertitude due à la stabilité de la translation image, σ_{stab} valant :

$$\sigma_{stab} = 0,000 \text{ arcsec}$$



- *Chromatisme transverse* :

Étant donné le principe de la séparation longitudinale en F1, le chromatisme transverse engendré par le séparateur F1 est annulé. Soit en terme de co-spatialité, une incertitude due au chromatisme transverse de l'image, σ_{chroma} valant :

$$\sigma_{chroma} = \pm 0,000 \text{ arcsec}$$

À ces incertitudes communes aux voies séparatrices s'ajoute l'incertitude principale de la méthode de la séparation longitudinale en F1 : l'incertitude due à l'angle du séparateur (motorisation EM27).

- *Angle du séparateur (EM27)*:

Nous avons vu dans le paragraphe 3.1 – tableaux 8-a et 8-b, que l'incertitude sur l'angle du séparateur est de $0,02^\circ$. soit en terme de co-spatialité, une incertitude due à l'angle du séparateur, σ_{EM27} , valant :

$$\sigma_{EM27} = \pm 0,006 \text{ arcsec}$$

L'incertitude totale due aux paramètres d'influence, I_{param} , vaut alors :

$$I_{param} = \sqrt{(\sigma_{rot}^2 + \sigma_{EM27}^2)} = \sqrt{(0,0036^2 + 0,0018^2 + 0,0060^2)} = 0,0072 \text{ arcsec}$$

c/ **Incertitude due aux étalonnages, notée $I_{étalon}$** :

Dans notre cas, il n'y a aucune notion d'étalonnage. La méthode de mesure du réglage de l'alignement des 2 voies est entièrement relative et donc sans unité. L'incertitude totale due aux étalonnages, $I_{étalon}$, est donc nulle :

$$I_{étalon} = 0,000 \text{ arcsec}$$

L'incertitude totale sur la co-spatialité est alors la somme quadratique des incertitudes dues à la méthode de mesure, aux paramètres d'influence et aux étalonnages. Cette incertitude sur la co-spatialité, $I_{co-spatialité}$, vaut alors :

$$I_{co-spatialité} = \sqrt{(I_{mesure}^2 + I_{param}^2 + I_{étalon}^2)} = \sqrt{(0,0044^2 + 0,0072^2)} = 0,0084 \text{ arcsec}$$

Soit pour être réaliste en arrondissant au centième, une incertitude totale sur la co-spatialité, $I_{co-spatialité}$, inférieure à 0,01 arcsec. Pour conclure sur ce paragraphe, le tableau 12 offre un récapitulatif des performances obtenues en F2 avec la nouvelle méthode comparée aux voies séparatrices actuelles.

Paramètres traités :	Voies séparatrices	Méthode proposée	Gain
Écart de Grandissement des images	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$: 500
Écart de Mises au point solaires	0,13 arcsec	0,04 arcsec	: 3,2
Écart de Résolution spectrale	8,0 mÅ	1,5 mÅ	: 5,3
Facteur de Transmission	55 %	95 %	x 1,7
Limitation transverse de la fente F1	16 arcsec	120 arcsec	x 7,5
Co-spatialité	0,069 arcsec	0,009 arcsec	: 8

Tableau 12 : Comparatif des performances obtenues par la méthode des voies séparatrices et par la nouvelle méthode proposée dite de « séparation longitudinale »

Les chiffres parlent d'eux-mêmes : **tous les paramètres sont notablement améliorés et l'erreur de co-spatialité est divisée par un facteur 8.** Voyons dans le chapitre suivant comment peut s'implanter cette nouvelle méthode.



4. Étude technique d'implantation

4.1 La séparation F1

L'implantation technique de cette séparation comprend les trois tâches suivantes :

- a/ l'implantation de la séparation longitudinale sur l'analyseur de polarisation
- b/ le réglage de la séparation longitudinale sur l'analyseur
- c/ l'alignement de l'image de la fente F1 sur la fente F2

Étudions ces tâches dans le détail :

a/ implantation de la séparation longitudinale sur l'analyseur de polarisation

Cette implantation ne présente aucune difficulté : en effet, la tâche consiste à rajouter au niveau « contrôle-commande » la fonction de rotation du séparateur de l'analyseur. Actuellement ce séparateur est réglé pour une séparation purement transverse ; à savoir pour un angle entre l'axe longitudinale de la fente F1 et la première lame du séparateur, $\theta_{\text{Sep}} = -45^\circ$. L'obtention de la séparation purement longitudinale se fait par simple rotation de 90° de ce séparateur, soit pour un angle de séparateur $\theta_{\text{Sep}} = +45^\circ$. Cette fonction est motorisée (moteur EM27) sur l'analyseur version 2 (analyseur à inversion de voies), cet ajout peut donc être entièrement automatique. **Le principe de la fonction est de n'enlever aucune des fonctions actuelles de l'analyseur, sinon de rajouter la possibilité de séparation longitudinale.** Les spécifications de cet ajout « contrôle-commande » sont alors :

- ▶ à l'initialisation, maintenir l'analyseur dans sa configuration actuelle, à savoir :
 - séparateur (EM27) en séparation transverse (angle 0°)
 - lames quart d'onde (EM25, EM26) en position « Q » (angles $0^\circ, 0^\circ$)
- ▶ à la demande de l'utilisateur, passer en configuration « séparation longitudinale » :
 - addition de 90° sur les offsets du séparateur (EM27)
 - addition de 90° sur les offsets des lames quart d'onde (EM25, EM26)
 - initialisation de l'analyseur dans sa nouvelle configuration.
- ▶ à la demande de l'utilisateur, repasser en configuration « séparation transverse » :
 - soustraction de 90° sur les offsets du séparateur (EM27)
 - soustraction de 90° sur les offsets des lames quart d'onde (EM25, EM26)
 - initialisation de l'analyseur dans sa nouvelle configuration.

b/ réglage de la séparation longitudinale sur l'analyseur

Ce réglage consiste à trouver l'angle θ_{Sep} (c'est à dire l'offset de la motorisation EM27) qui donne une séparation purement longitudinale, ou encore un alignement parfait entre les 2 images de la fente F1. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent, ce réglage peut être réalisé hors-télescope et de manière définitive avant une campagne sur le banc d'étalonnage de l'analyseur (Izaña – 3^{ème} étage). Ce banc forme à travers l'analyseur, une image de la fente F1 séparée à l'échelle du foyer F2 ; c'est à dire avec une ouverture de F/62,7 et une échelle de 0,28 mm/arcsec égales aux caractéristiques du foyer F2 Themis.

À partir de cette image on peut aisément former une image agrandie d'un facteur 10 en utilisant quelques moyens du laboratoire d'optique de Themis :

- 1 objectif
- 1 CCD 700x500 pixels, pixel de 9 μm .

Le schéma de ce dispositif de réglage est donné en figure 13.

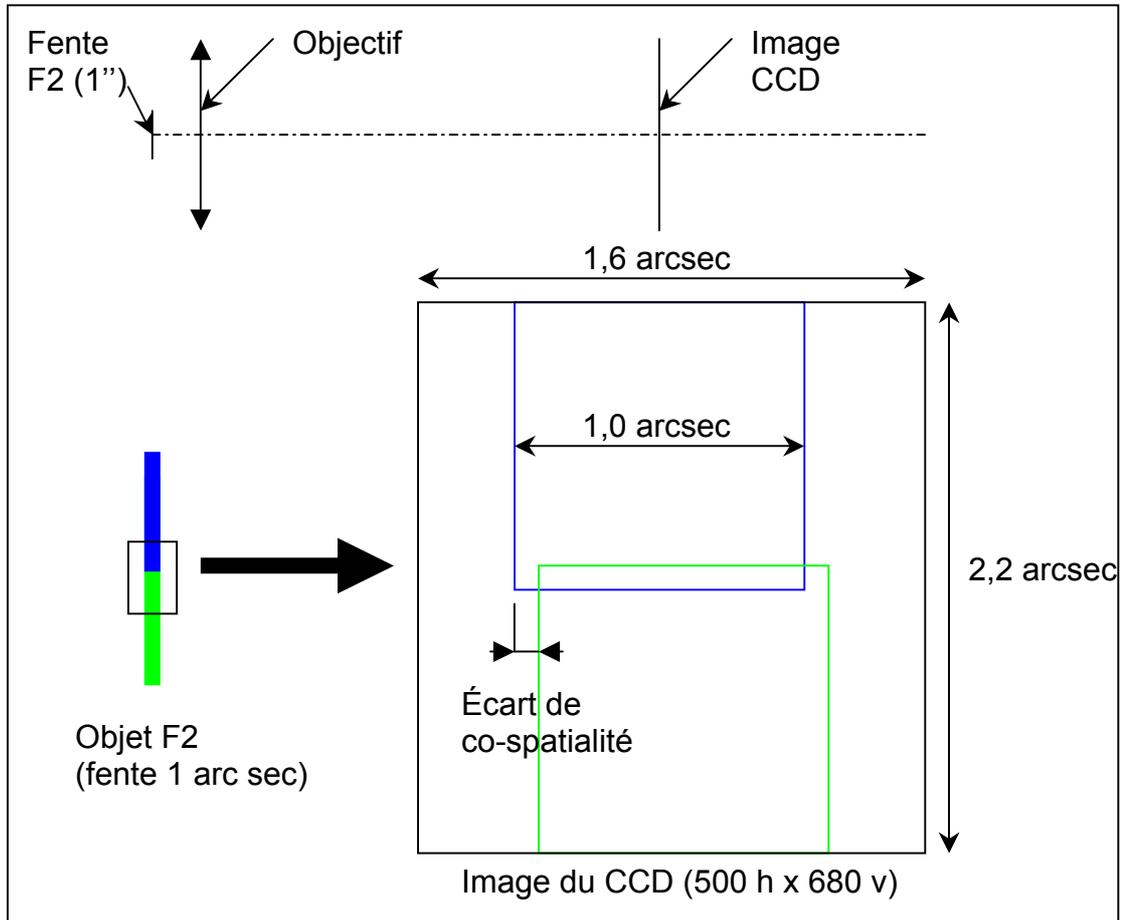


Figure 13 : Banc de réglage de l'analyseur en « séparation longitudinale »

Sur le CCD se forme une image d'échelle spatiale égale à 2,8 mm/arcsec . Les paramètres de l'image sont :

- champ : 500 pixels soit 1,6 arcsec en horizontal (perpendiculaire à la fente)
680 pixels soit 2,2 arcsec en vertical (parallèle à la fente)
- résolution : pixel de 9 μm , soit 0,0032 arcsec/pixel

La procédure de réglage est alors la suivante :

- ▶ pré-réglage visuel de l'alignement des 2 images sur l'objet F2 (à 0,5 arcsec)
- ▶ alignement des 2 images en colonne sur le CCD
- ▶ réglage de l'alignement des 2 images sur le CCD (à 1 pixel) :
 - acquisition d'une image
 - mesure de l'écart de co-spatialité
 - rotation d'un pas du séparateur EM27 (0,02°)
 - répétition de cette procédure jusqu'à mesurer un écart opposé à la valeur initiale mesurée.
- ▶ À partir de la série de données d'écarts de co-spatialité :
 - interpolation de la courbe Écart = f (pas_{EM27})
 - déduction de l'offset de la motorisation EM27 au minimum d'écart.



c/ alignement de l'image de la fente F1 sur la fente F2

Ce réglage consiste à trouver l'angle θ_{Rot} **du dérotateur de champ** (c'est à dire l'offset de la motorisation) qui donne un parallélisme parfait entre les deux images de la fente F1 séparées longitudinalement et la fente F2. Ce réglage doit se faire sur le télescope avant une campagne et est fixé définitivement par la suite. Sur la fente MTR d'entrée des spectrographes, ce réglage est assuré tous les ans depuis 1998 par une méthode visuelle utilisant le contraste d'extinction centre-extrémité par la fente F2. Étant donnée la disposition des voies séparatrices et le fait qu'il y ait 2 fentes et non une, cette méthode n'a pu être appliquée pour l'alignement des images sur les fentes des voies séparatrices. Toutefois, dans la nouvelle méthode proposée, nous n'avons qu'une seule et même fente, donc cette méthode de réglage, très précise, reprend toute sa valeur.

Le dérotateur provoque, lors du suivi solaire, une rotation de l'image du F1 pour la maintenir parallèle à la fente F2. Actuellement, ce suivi est assuré avec un pas angulaire de $\pm 0,0033^\circ$ (0,2' d'angle). L'image tourne d'une valeur angulaire double par rapport au dérotateur, le pas angulaire de l'image est donc de $\pm 0,0066^\circ$. Soit en terme de co-spatialité sur une séparation de 16 arcsec, une incertitude due au pas du dérotateur, σ_{rot} de 0,0018 arcsec (voir : « incertitude due au suivi du rotateur »). La méthode « visuelle » utilisée jusqu'à présent est la suivante :

- le télescope est positionné en manuel sur un fond de ciel avec les paramètres angulaires des grands axes fixés et cohérents entre-eux (valeur de dérotateur adapté aux valeurs d'élévation et de préfente F1) . Cette méthode permet d'avoir une « immobilisation » de l'image de la fente F1 sur le F2.
- la fente « fine » (1 arcsec) de l'analyseur est mise en place (EM24=1).
- la fente F2 est réglée à une largeur très faible d'environ 0,1 arcsec (rappelons que cette fente peut être réglée de manière continue de 0 à 16 arcsec).
- l'image de cette fente est décalée transversalement (par la coulisse EM18) jusqu'à obtenir la « quasi-extinction » du faisceau sous la fente F2.
- on règle alors l'angle du dérotateur (pas de $0,0033^\circ$) jusqu'à obtenir une répartition parfaite des intensités dans chaque voie. Concrètement il suffit d'observer la variation d'intensité entre le centre de l'image et l'une ou les deux extrémités de la ou des images I+S et I-S. Un contraste d'intensité centre-bord signifie un dérèglement du parallélisme. Une égalité des intensités centre-bord signifie un parallélisme parfait des images I+S et I-S sur la fente F2.

Cette méthode permet d'apprécier visuellement un contraste centre-bord notable à l'oeil pour une erreur de ± 1 pas de dérotateur autour de la position angulaire de meilleur réglage (de contraste moindre). Démontrons ce fait :

L'image de la fente F1 est décalée (par pas de 2 μm soit 0,027 arcsec) devant la fente F2 de 0,1 arcsec jusqu'à obtenir une quasi extinction. Soit par exemple, une image sous la fente F2 de 0,02 arcsec (ce chiffre a peu d'importance car c'est l'intensité obtenue qui compte). Posons donc que cette intensité obtenue au centre vaut : $I_{\text{centre}} = 1$ **pour une fente de 0,02 arcsec**. Les variations d'intensité entre le cas d'alignement parfait et un cas désaligné de 1 pas de dérotateur sont :



-alignement parfait : les intensités obtenues aux extrémités haute et basse sont égales à l'intensité au bord ; soit $I_{haute} = I_{basse} = I_{centre} = 1$

-alignement parfait + 0,0033° : l'image de 2 arcmin tourne de 0,0066° dans le sens trigonométrique. L'extrémité haute « s'allume » et l'extrémité basse « s'éteint » (par exemple). En terme de largeur de fente, l'extrémité haute s'est « élargie » de 0,0069 arcsec, le centre s'est maintenu à sa largeur initiale de 0,02 arcsec et l'extrémité basse s'est « rétrécie » de 0,0069 arcsec . Les largeurs de fentes sont alors :

- . extrémité haute : largeur = 0,02 + 0,0069 = 0,0269 arcsec
- . centre : largeur = 0,02 arcsec
- . extrémité basse : largeur = 0,02 – 0,0069 = 0,0131 arcsec

L'intensité lumineuse variant comme la largeur de fente, les intensités sont alors :

- . extrémité haute : $I_{haute} = 0,0269 / 0,02 = 1,345$
- . centre : $I_{centre} = 1,000$
- . extrémité basse : $I_{basse} = 0,0131 / 0,02 = 0,655$

Soit un contraste centre-bord de 34,5 % et un contraste haut-bas de 69 %. L'oeil étant capable de discerner des contrastes de l'ordre de 1%, cette méthode « visuelle » permet de régler le parallélisme de l'image de la fente F1 avec la fente F2 avec une précision de 1 pas de dérotateur (0,0018 arcsec en co-spatialité sur la séparation de 16 arcsec entre les deux voies).

Il est remarquable de noter que cette méthode permettrait de détecter des réglages meilleurs dans l'hypothèse où le pas angulaire du dérotateur serait plus précis. Exemple : 1 pas de 0,001° donnerait une rotation de 0,002° de l'image, soit un écart de largeur de fente de 0,002 arcsec entre le centre et une extrémité du champ. Dans le même cadre que le calcul ci-dessus, le contraste d'intensité centre-bord vaudrait 10%, soit un contraste appréciable par l'oeil sans difficulté.

Démonstration étant faite que cette méthode « visuelle » permet de régler le parallélisme de façon plus que suffisante, il n'est pas utile d'envisager une autre méthode de réglage utilisant capteurs ou autres CCD. Toutefois, dans l'hypothèse où des irréductibles incrédules mettraient en doute cette démonstration, il suffirait d'utiliser cette même méthode en formant l'image de la fente F2 sur un CCD (judicieusement placé en SP1 en « teinte plate » du réseau prédisperseur 150 tr/mm) et de perdre quelques précieuses journées à dépouiller les données acquises.

Notons aussi que cette méthode peut être utilisée pour le réglage de la séparation longitudinale de l'analyseur sur le banc d'étalonnage, mais cette fois en appréciant le contraste d'extinction entre la voie I+S et la voie I-S par simple translation d'une fente devant l'image des 2 voies. Cette méthode est beaucoup plus précise que toute méthode utilisant des CCD et leur discrétisation.

Comme quoi, les CCD n'ont pas encore relégué au fond du puit les bonnes vieilles méthodes de contraste relatif qui font loi en métrologie mondiale et notamment optique.

Maintenant que la séparation F1 longitudinale est implantée et parfaitement réglée dans les limites de l'incertitude définie dans le paragraphe 3.3, le problème de la co-spatialité est réglé. Passons donc à la séparation des champs I+S et I-S par le nouveau dispositif séparateur « post-F2 » proposé. C'est l'objet du paragraphe suivant.



4.2 Le séparateur post-F2

La réalisation optique et opto-mécanique du séparateur post-F2 doit tenir compte des impératifs suivants :

- aucune modification de la configuration actuelle : toute la configuration actuelle et donc toutes les méthodes observationnelles actuelles (MTR, DPSM, avec ou sans Voies séparatrices, MTR 2x1 arcmin et MTR 2x2 arcmin) sont conservées. Le dispositif placé sous le foyer F2 doit pouvoir se rajouter ou se retirer à volonté.
- déplacement de foyer SP1 inférieur à 5 mm : cette limite de 5 mm est la possibilité de réglage actuelle du foyer SP1 (table des masques). Une variation de 5 mm n'implique pas de variations significatives des aberrations des spectrographes (la démonstration en est faite plus avant dans ce paragraphe).
- chromatisme longitudinale (profondeur de champ) rajouté inférieur à 2 mm : Le fait de rajouter des épaisseurs de verre augmente le chromatisme longitudinal, c'est à dire la différence de position du foyer en profondeur de champ en fonction de la longueur d'onde. Le dispositif ne doit pas rajouter plus de 2 mm de différence de profondeur de champ de 400 nm à 1000 nm (une variation de 5 mm de ce chromatisme est encore tolérable mais ne prenons pas de risque).
- aberration additionnelle inférieure à 0,03 arcsec : le dispositif ne doit pas rajouter un total de toutes les aberrations (Zernicke 1 à 15) supérieur à 0,03 arcsec.

- **Emplacement du séparateur post-F2 :**

Compte-tenu de ces impératifs la première conclusion est la suivante : l'épaisseur de verre doit être la plus faible possible. La séparation obtenue est proportionnelle à la taille (et donc l'épaisseur des rhomboèdres). La taille des rhomboèdres est proportionnelle à la taille du champ à séparer. Plus on s'éloigne du foyer F2 plus le faisceau sera grand. Il faut donc se placer à la distance la plus petite possible sous le foyer F2. Afin de localiser cet emplacement, étudions le schéma optique des spectrographes Themis du foyer F2 au foyer SP2 (récepteur CCD) donné en figure 14-a.

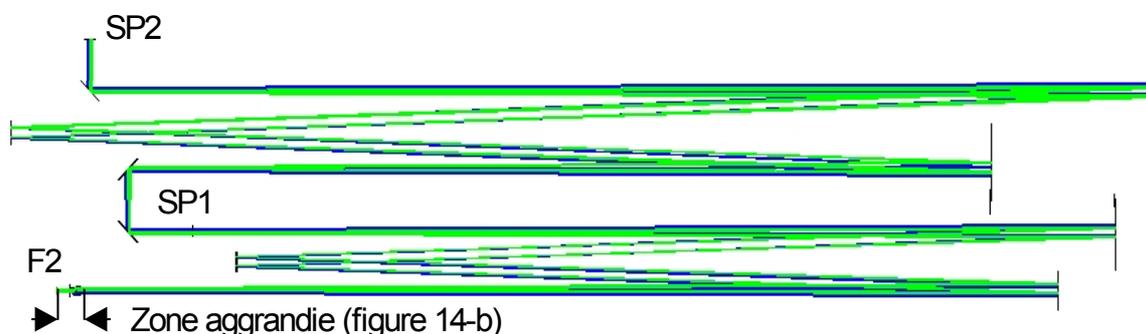


Figure 14-a : Schéma optique des spectrographes THEMIS

L'emplacement le plus proche du F2 est dans la zone intitulée « zone agrandie » sur la figure 14-a. Cette zone agrandie pratiquement en taille réelle est montrée en figure 14-b, en page suivante.

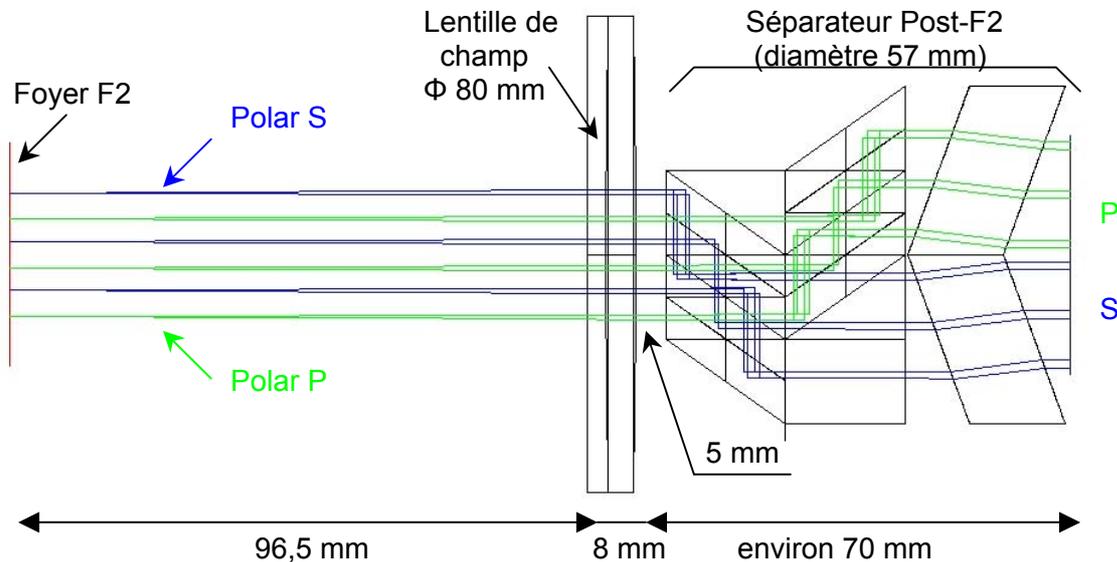


Figure 14-b : Emplacement du « séparateur post-F2 » sous le foyer F2 des spectrographes

Dans la configuration normale de cette partie des spectrographes, un seul composant intervient : c'est la lentille de champ F2 placée à 96,5 mm sous le foyer. Sa fonction est de former l'image de la pupille sur les réseaux prédispenseurs (via le collimateur). Cette lentille est de focale très élevée et met la pupille pratiquement à l'infini. On a donc tout avantage à placer le dispositif séparateur sous cette lentille dans le but de limiter une séparation des pupilles des 2 voies. Le dispositif séparateur doit donc être placé sous cette lentille de champ et le plus proche possible de celle-ci. Sur la figure 14-b est représenté le dispositif séparateur le plus long (pour champ de 2 arcmin) placé à 5 mm sous la lentille de champ. **Dans ces conditions le dispositif « 2x2 arcmin » tient dans un cylindre de 57 mm de diamètre par 70 mm de longueur ; ces faibles dimensions sont remarquables et simplifient l'intégration.** En effet, ces faibles dimensions simplifient la conception d'une mécanique de portage et réglage de ce séparateur permettant sa mise en place et remise en place reproductible. Cette conception opto-mécanique sera présentée après la description du design optique.

- Design optique du séparateur post-F2 :

Pour tenir compte des différents modes d'observations MTR et DPSM, il faut réaliser deux séparateurs post-F2 distincts :

- 1 Séparateur post-F2 pour champ de 2 arcmin (MTR 2x2 arcmin et DPSM)
- 1 Séparateur post-F2 pour champ de 1 arcmin (MTR 2x1 arcmin et DPSM)

Détaillons le design optique de ces 2 séparateurs un par un :

- Séparateur post-F2 pour champ de 2 arcmin :

Étant donné les dimensions des champs et la séparation F1, les rhomboédres du séparateur de 2 arcmin doivent avoir une section carrée de 30 mm minimum. Pour tenir compte de l'élargissement des faisceaux à l'ouverture de F/62,7, il faut rajouter



1,5 mm à cette dimension. En prenant une marge très large de 2,5 mm pour éviter les bords des prismes, on obtient une section totale de 34 mm. Le schéma des champs I+S et I-S sur cette section totale de 34 mm est donné en figure 15-a (**vue du dessus**):

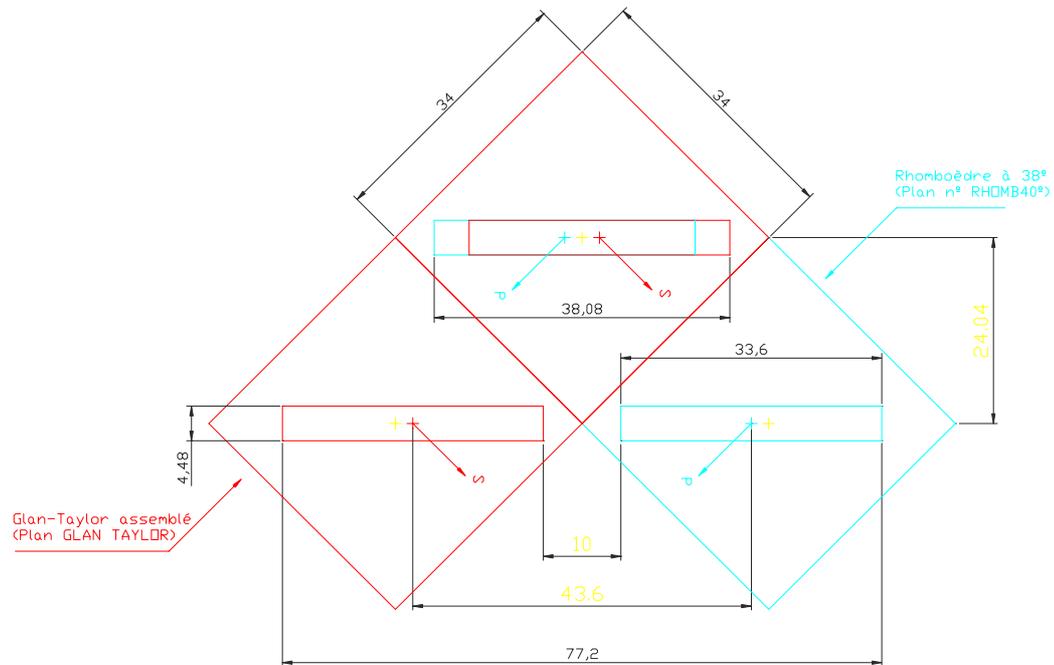


Figure 15-a : Schéma de la section d'entrée du séparateur post-F2 de 2 arcmin

Le design optique du séparateur complet est donné en figure 15-b (**vue 3D**).

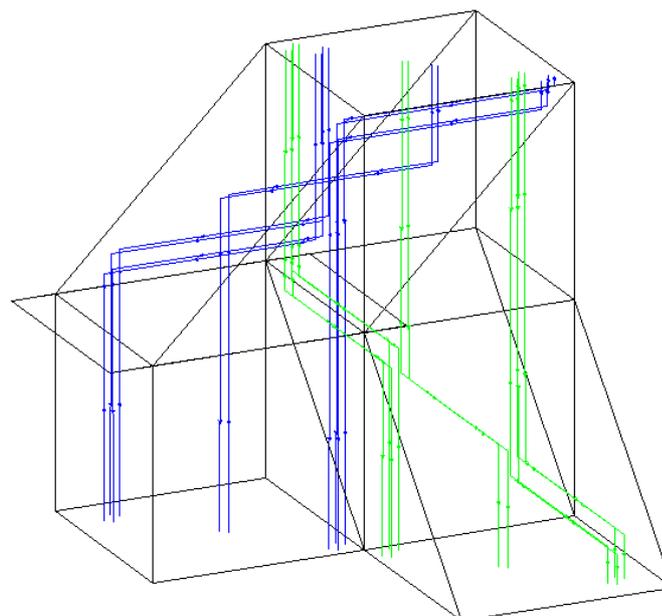


Figure 15-b : Schéma optique 3D du séparateur post-F2 de 2 arcmin



Le schéma optique du séparateur 2x2 arcmin est fonctionnel et conforme à la séparation souhaitée. Il est entièrement calculé et validé par le programme optique « Zeemax 10 ». **Le déplacement du foyer SP1 est de + 4,3 mm.**

Ce déplacement ne modifie pas de façon significative le bilan des aberrations dans les spectrographes.

- Qualité optique en SP1 :

Pour illustrer la qualité optique de l'insertion du bloc séparateur dans le faisceau nous comparons les « spot-diagrammes » obtenus en SP1 (foyer du premier spectrographe) sans et avec le bloc séparateur pour les voies 1 et 2. Chaque spot-diagramme donne l'image d'une source ponctuelle pour 5 points du champ (champ de 2 arcmin x 16 arcsec : 1 point central et 4 points aux coins du champ), l'échelle représentée par le cercle correspond à 0,1 arcsec. La figure 16-a ci-dessous donne le spot-diagramme en SP1 sans le bloc séparateur (soit le spectrographe actuel) pour la longueur d'onde 600 nm. Ce spot-diagramme correspond donc à notre référence servant à la comparaison avec l'insertion du nouveau bloc 2 arcmin.

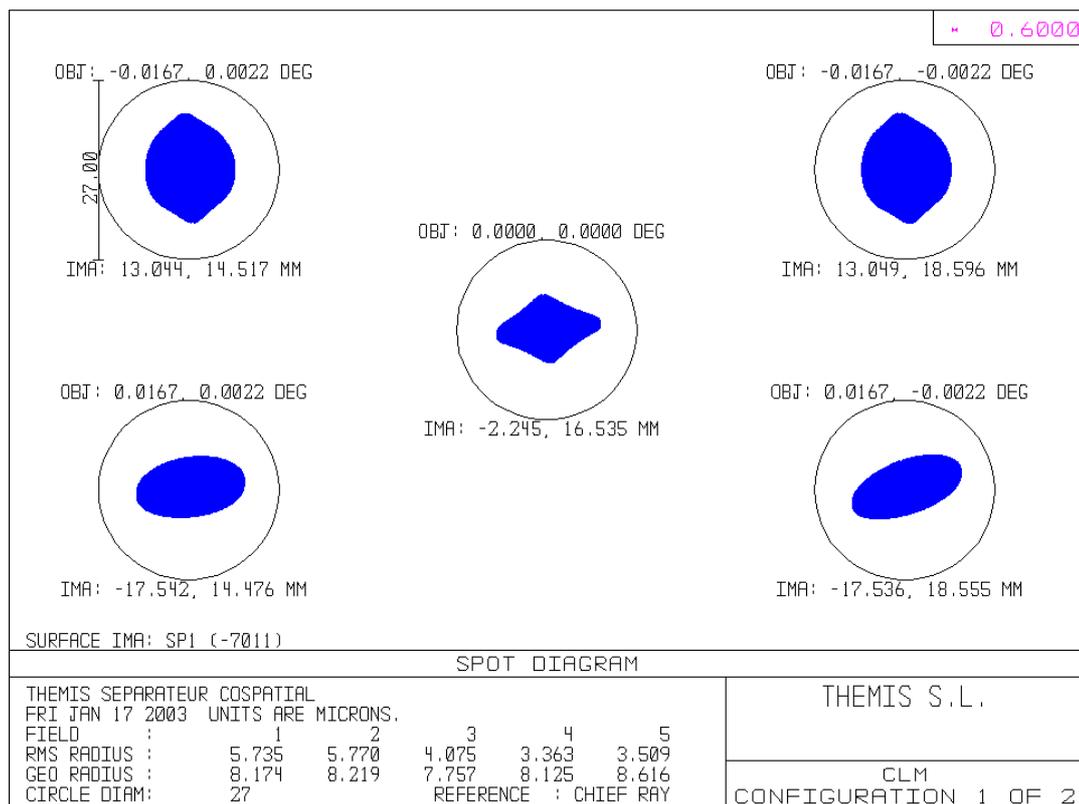


Figure 16-a : Spot-Diagramme de référence en SP1 (premier spectrographe)

Cette figure montre qu'en SP1 l'ensemble des rayons est focalisé dans une tâche de diamètre 16,4 µm, soit dans 0,06 arcsec (à comparer avec la résolution du télescope de 0,2 arcsec). Cette donnée est calculée en prenant le rayon géométrique de la tâche, ce qui est le cas le plus pessimiste. Comparons maintenant ce résultat avec les spot-diagrammes des voies 1 et 2 du nouveau bloc séparateur 2x2 arcmin. La figure 16-b donne le spot-diagramme de la voie 1 et la figure 16-c celui de la voie 2.

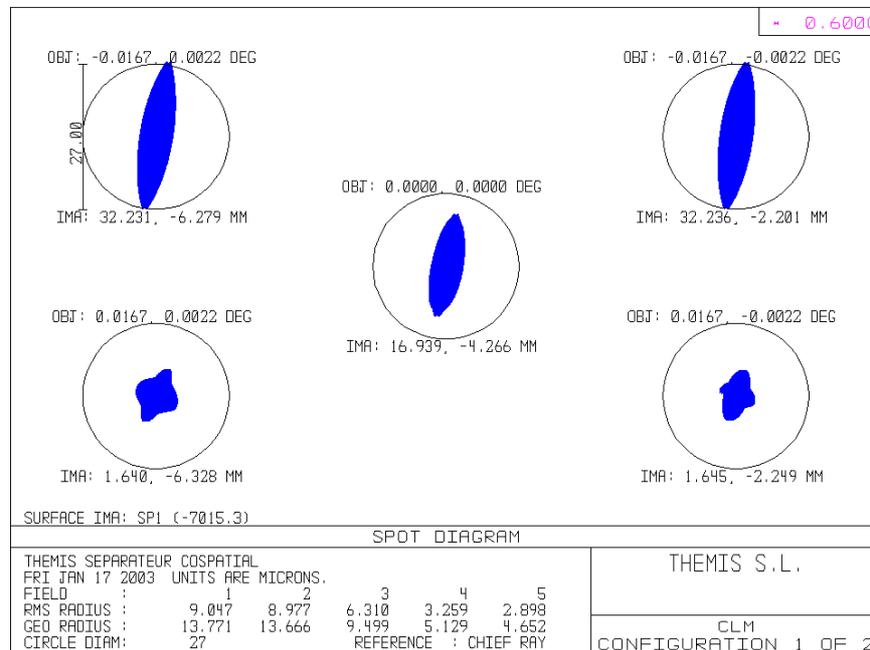


Figure 16-b : Spot-Diagramme en SP1 après insertion du bloc 2x2 arcmin (voie 1)
Cette figure montre qu'en SP1 l'ensemble des rayons est focalisé dans une tâche de 0,1 arcsec. **La résolution du télescope est conservée (0,2 arcsec) pour la voie 1.**

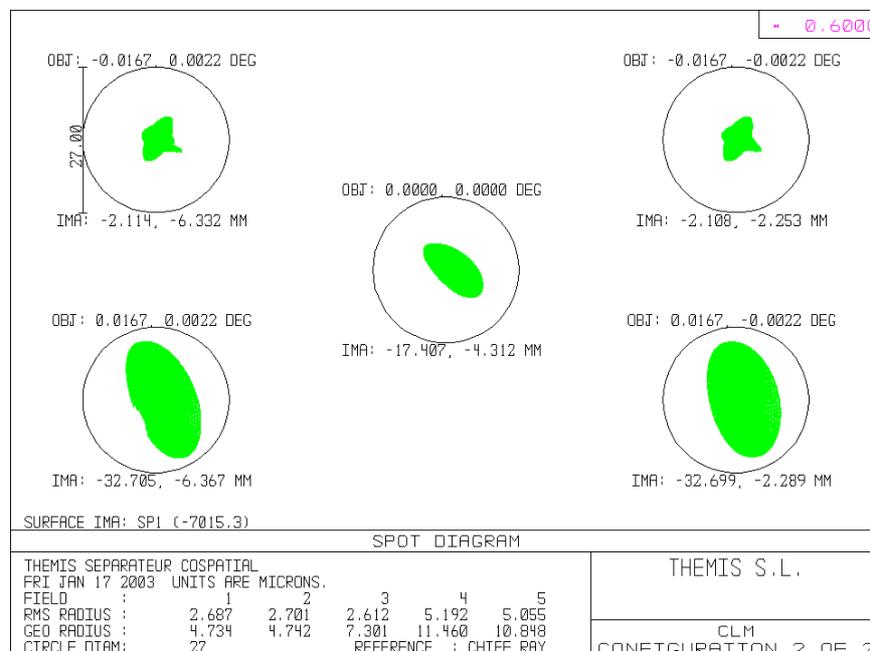


Figure 16-c : Spot-Diagramme en SP1 après insertion du bloc 2x2 arcmin (voie 2)
Cette figure montre qu'en SP1 l'ensemble des rayons est focalisé dans une tâche de 0,1 arcsec. **La résolution du télescope est conservée (0,2 arcsec) pour la voie 2. L'insertion du bloc séparateur 2x2 arcmin ne modifie donc pas la résolution du télescope en spectrométrie. Vérifions maintenant le chromatisme axial.**



- Chromatisme axial :

Il s'agit de vérifier que le dispositif ne rajoute pas plus de 2 mm de chromatisme axial de 400 à 900 nm. Pour ce faire nous comparons la courbe de chromatisme axial obtenue en SP1 sans le séparateur 2x2 arcmin (figure 17-a) avec la courbe de chromatisme axial obtenue après insertion du nouveau séparateur (figure 17-b).

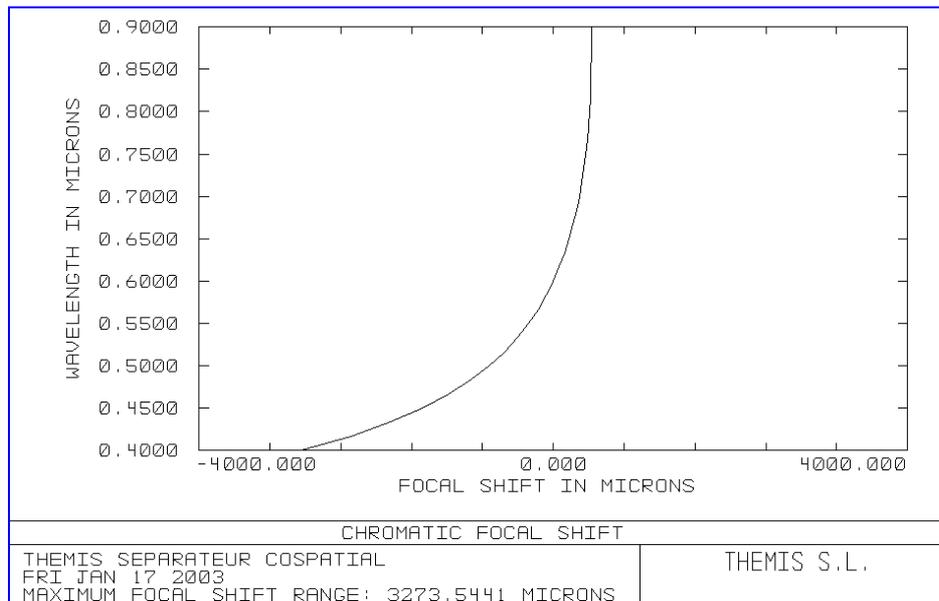


Figure 17-a : Chromatisme axial de 400 à 900 nm en SP1 (sans séparateur)

Le chromatisme axial en SP1 est actuellement de **3,27 mm** de 400 à 900 nm.

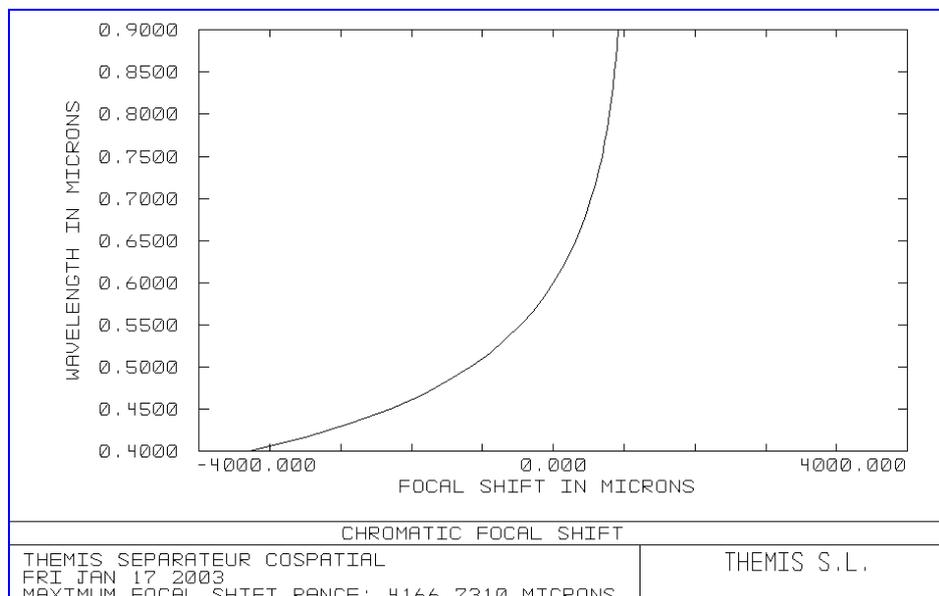


Figure 17-b : Chromatisme axial de 400 à 900 nm en SP1 (avec séparateur)

Le chromatisme axial avec séparateur est de **4,17 mm**, soit un rajout de **0,9 mm** par rapport au SP1 théorique. Cette valeur est très inférieure à la spécification de 2 mm. **L'insertion du bloc séparateur est donc dans la spécification de chromatisme.**



- Séparateur post-F2 pour champ de 1 arcmin :

Étant donné les dimensions des champs, la séparation F1 et les marges décrites pour le séparateur précédent, les rhomboèdres du séparateur de 1 arcmin doivent avoir une section carrée de 20 mm. Le schéma des champs I+S et I-S sur cette section totale de 20 mm est donné en figure 18-a (**vue du dessus**):

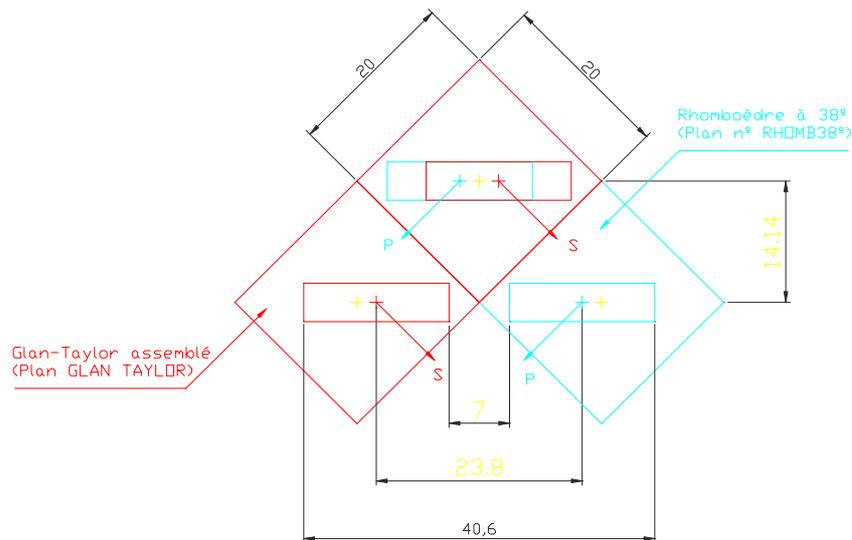


Figure 18-a : Schéma de la section d'entrée du séparateur post-F2 de 1 arcmin

Le design optique du séparateur complet est donné en figure 18-b (**vue 3D**).

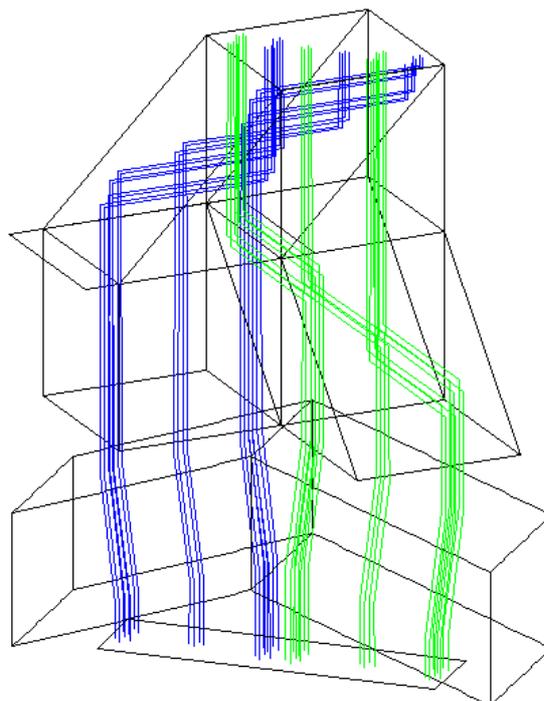


Figure 18-b : Schéma optique 3D du séparateur post-F2 de 1 arcmin



Le schéma optique du séparateur 2x1 arcmin est fonctionnel et conforme à la séparation souhaitée. Il est entièrement calculé et validé par le programme optique « Zeemax 10 ». **Le déplacement du foyer SP1 est de + 4,7 mm**, donc dans la tolérance de 5 mm.

- Qualité optique en SP1 :

Pour illustrer la qualité optique de l'insertion du bloc séparateur dans le faisceau nous comparons les « spot-diagrammes » obtenus en SP1 (foyer du premier spectrographe) sans et avec le bloc séparateur pour les voies 1 et 2. Chaque spot-diagramme donne l'image d'une source ponctuelle pour 5 points du champ (champ de 1 arcmin x 16 arcsec : 1 point central et 4 points aux coins du champ), l'échelle représentée par le cercle correspond à 0,1 arcsec. La figure 19-a ci-dessous donne le spot-diagramme en SP1 sans le bloc séparateur (soit le spectrographe actuel) pour la longueur d'onde 600 nm. Ce spot-diagramme correspond donc à notre référence servant à la comparaison avec l'insertion du nouveau bloc 1 arcmin.

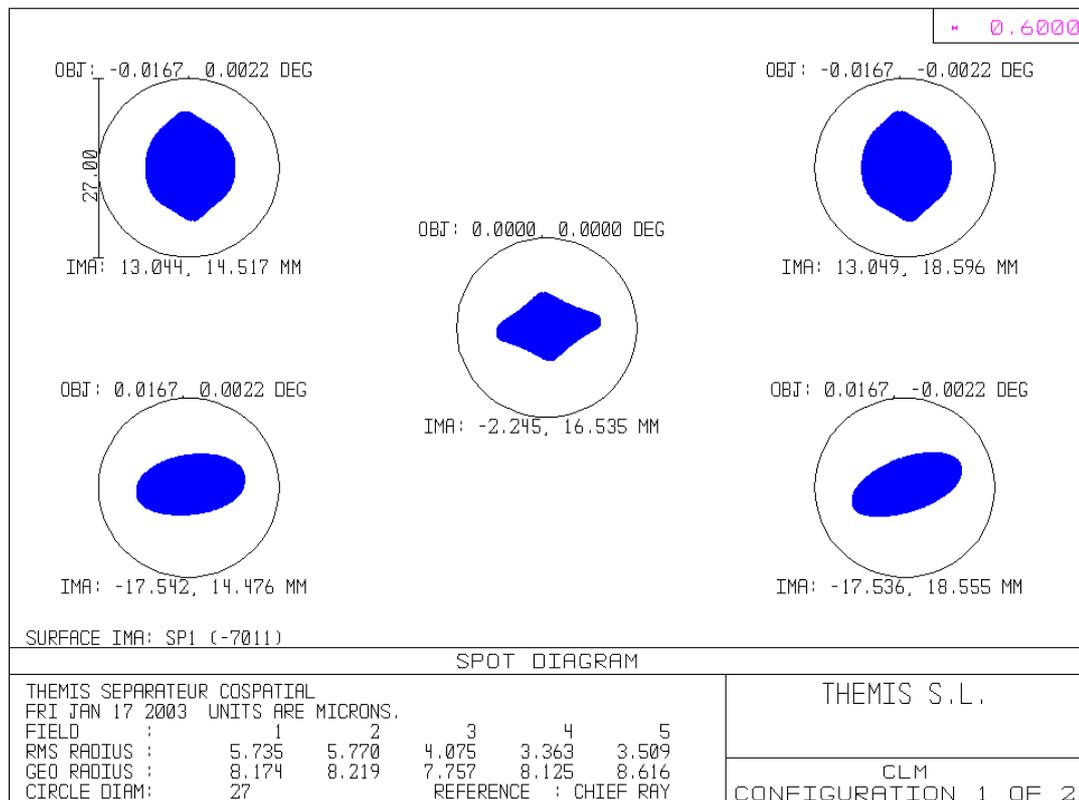


Figure 19-a : Spot-Diagramme de référence en SP1 (premier spectrographe)

Cette figure montre qu'en SP1 l'ensemble des rayons est focalisé dans une tâche de diamètre 16,4 µm, soit dans 0,06 arcsec (à comparer avec la résolution du télescope de 0,2 arcsec). Cette donnée est calculée en prenant le rayon géométrique de la tâche, ce qui est le cas le plus pessimiste. Comparons maintenant ce résultat avec les spot-diagrammes des voies 1 et 2 du nouveau bloc séparateur 2x1 arcmin. La figure 19-b donne le spot-diagramme de la voie 1 et la figure 19-c celui de la voie 2.

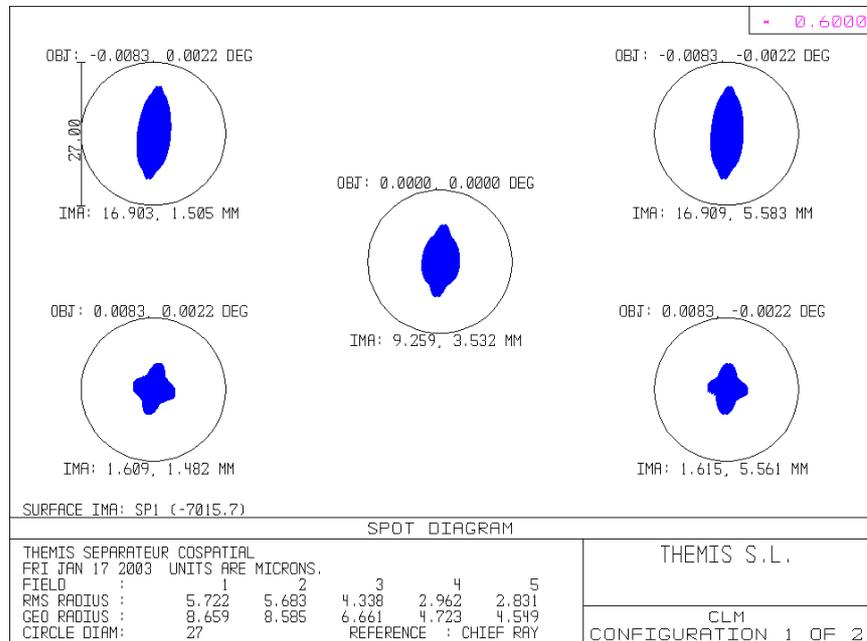


Figure 19-b : Spot-Diagramme en SP1 après insertion du bloc 2x1 arcmin (voie 1)
Cette figure montre qu'en SP1 tous les rayons sont focalisés dans une tâche de 0,07 arcsec. **La résolution du télescope est conservée (0,2 arcsec) pour la voie 1.**

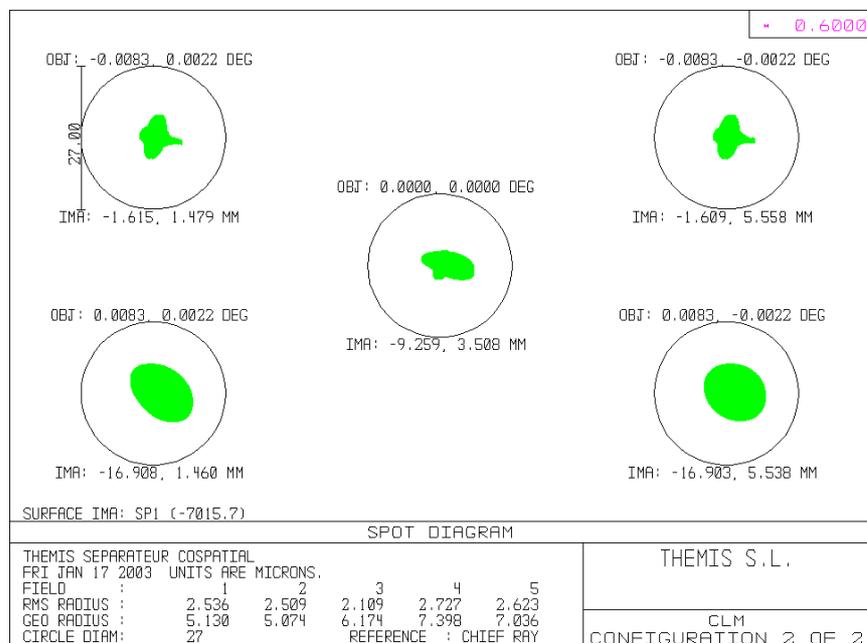


Figure 19-c : Spot-Diagramme en SP1 après insertion du bloc 2x1 arcmin (voie 2)
Cette figure montre qu'en SP1 tous les rayons sont focalisés dans une tâche de 0,07 arcsec. **La résolution du télescope est conservée (0,2 arcsec) pour la voie 2. L'insertion du bloc séparateur 2x1 arcmin ne modifie donc pas la résolution du télescope en spectrométrie. Vérifions maintenant le chromatisme axial.**



- Chromatisme axial :

Il s'agit de vérifier que le dispositif ne rajoute pas plus de 2 mm de chromatisme axial de 400 à 900 nm. Pour ce faire nous comparons la courbe de chromatisme axial obtenue en SP1 sans le séparateur 2x1 arcmin (figure 20-a) avec la courbe de chromatisme axial obtenue après insertion du nouveau séparateur (figure 20-b).

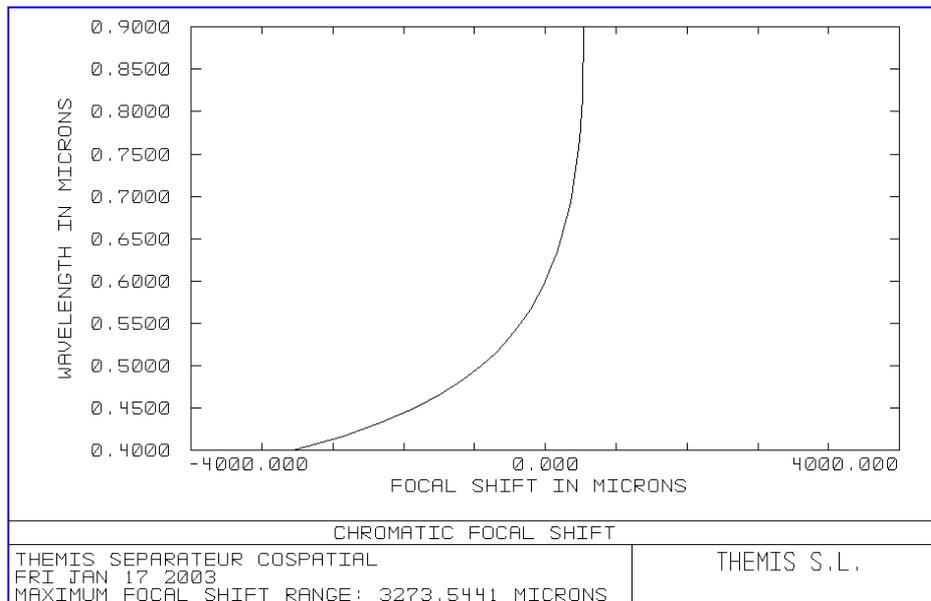


Figure 20-a : Chromatisme axial de 400 à 900 nm en SP1 (sans séparateur)

Le chromatisme axial en SP1 est actuellement de **3,27 mm** de 400 à 900 nm.

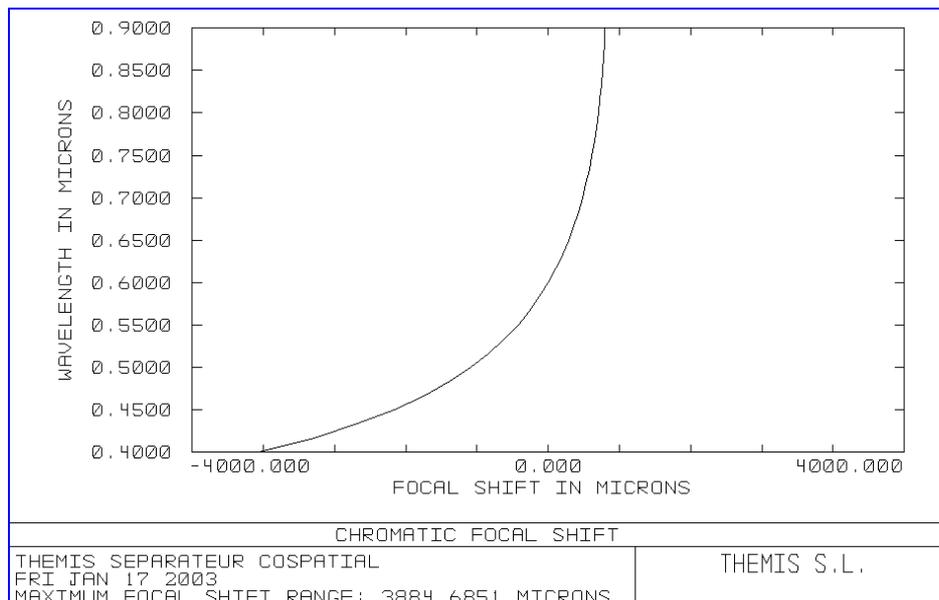


Figure 20-b : Chromatisme axial de 400 à 900 nm en SP1 (avec séparateur)

Le chromatisme axial avec séparateur est de 3,89 mm, soit un rajout de **0,62 mm** par rapport au SP1 théorique. Cette valeur est très inférieure à la spécification de 2 mm. **L'insertion du bloc séparateur est donc dans la spécification de chromatisme.**



- Fabrication optique du séparateur post-F2 :

Pour pouvoir fournir les tolérances de fabrication des rhomboèdres, il faut tenir compte des effets de rotation et translation de l'image en SP1 ainsi que de l'effet de déplacement de la pupille sur le réseau. Les spécifications sur ces paramètres sont les suivantes :

Image SP1 : - parallélisme meilleur que $0,02^\circ$ (décalage inférieur à $0,1 \text{ \AA}$ entre le haut et le bas de la fente de 2 arcmin)
- alignement meilleur que $0,025 \text{ mm}$ entre les 2 images (décalage inférieur à $0,25 \text{ \AA}$ entre les 2 fentes)

Pupilles : - décalage inférieur à 1 mm (sur réseau prédisperseur)

Ces paramètres améliorent considérablement la réalisation des masques MTR. En effet, nous rappelons que dans la situation actuelle, les 2 images de fente passant par les voies séparatrices font un angle de $0,7^\circ$ entre-elles. Ceci oblige à réaliser des masques MTR comportant 2 inclinaisons différentes pour la voie 1 et la voie 2. En utilisant le séparateur proposé et en respectant les spécifications citées ci-dessus, il n'est plus nécessaire de fabriquer des masques à 2 inclinaisons : une seule et même fente d'inclinaison unique permet de filtrer spectralement les 2 voies en SP1. Tout gain en simplicité sur ces masques se convertit en gain de précision.

Tolérances de fabrication :

Compte-tenu de ces spécifications, les tolérances de fabrication des rhomboèdres sont :

- tolérance d'épaisseur : $\pm 0,1 \text{ mm}$ ($\pm 0,05 \text{ mm}$ si besoin est)
- tolérance angulaire : $\pm 15''$ d'angle

Procédé de fabrication :

Pour améliorer le réglage il est préférable d'avoir 2 rhomboèdres identiques (en angle et épaisseur). Pour cela il faut imposer le procédé de fabrication :

- ébauche d'un rhomboèdre de section double par rapport au rhomboèdre désiré
- polissage des surfaces d'entrée, de sortie et de réflexion totale
- coupe du rhomboèdre en deux rhomboèdres identiques
- polissage des surfaces latérales (dépolies)

De cette manière les 2 rhomboèdres auront, quelque soient les tolérances, les mêmes épaisseurs, longueurs et surtout angles.

Polissage et qualité optique.

- poli à $\lambda/4 \text{ rms}$ (pour la proximité du foyer, un poli à $\lambda/2$ est déjà suffisant),
- qualité optique « laser » : Scratch/Dig 60/40
- traitement AR EVAP-MTO 400-1000 nm sur les surfaces d'entrée et de sortie

Ces tolérances sont tout à fait du domaine de la réalisation optique classique. **La réalisation de ces séparateurs ne posent donc pas de problèmes techniques particuliers.**

- Portage mécanique du séparateur post-F2 :

Réglages :

Le système de portage mécanique doit comporter les réglages suivants :

- rotation du rhomboèdre du bas autour de OX (course : $\pm 1^\circ$, sensibilité : $0,01^\circ$)
- berceau Trait-Point-Plan autour des axes OY et OZ (course : $\pm 1^\circ$, sensibilité : $0,01^\circ$)
- rotation du bloc entier autour de OX (course : $\pm 1^\circ$, sensibilité : $0,01^\circ$)

Encombrement : Voir plans mécaniques n°11-15-000 « Équipement F2 »

Le système doit être fixé par le dessous du F2 dans la colonne de passage F2/Spectro.

La fixation doit être répétable angulairement à $0,01^\circ$.

Le système doit porter la surface supérieure du premier rhomboèdre à une distance de 5 mm de la lentille de champ (tolérance : $\pm 0,25 \text{ mm}$)

Le volume disponible est un cylindre de diamètre 110 mm par 80 mm de haut.

Un tel système mécanique est simple à concevoir et peut se fabriquer en interne.



4.3 Ressources

Dans ce dernier paragraphe sont présentées les ressources nécessaires à la mise en oeuvre de ce nouveau séparateur post-F2, à savoir : le budget, les tâches techniques et une ébauche de planning.

- Budget :

Séparateur Post-F2 2x2 arcmin :

Optique : 4500 Euros (OPA-OPTICAD)
Mécanique : 2500 Euros (IAC-Themis)
Total : **7000 Euros** (46 kF)

Séparateur Post-F2 2x1 arcmin :

Optique : 4000 Euros (OPA-OPTICAD)
Mécanique : 2000 Euros (IAC-Themis)
Total : **6000 Euros** (39 kF)

Soit pour les 2 séparateurs :

Total : 13000 Euros (85 kF)

- Tâches techniques :

T1 : étude optique (12 semaines)

T1.1 : complément d'étude optique (CLM, 1 semaine)

T1.2 : réalisation des plans de fabrication optique (CLM, 1 semaine)

T1.3 : obtention du devis (CLM 5%, 1 semaine)

T1.4 : commande et suivi de fabrication (CLM 5%, 8 semaines)

T2 : étude mécanique (12 semaines)

T2.1 : plans d'ensemble du portage (RG, CLM, 2 semaines)

T2.2 : plans de détails (RG, 3 semaines)

T2.3 : commande et suivi de fabrication (RG 5%, 6 semaines)

T3 : montage optique (2 semaines)

T3.1 : tests des rhomboèdres en polarisation (CLM, 3 jours)

T3.2 : assemblage des rhomboèdres (CLM, 2 jours)

T3.3 : pré réglage des rhomboèdres (CLM, 2 jours)

T3.1 : réglage de l'analyseur en séparation longitudinale (CLM, 4 jours)

T4 : implantation et test: (2 semaines)

T4.1 : réglage de l'alignement F1 / F2 (RD, CLM, 1 jour)

T4.2 : implantation du séparateur 2x1 arcmin et réglage (RD, CLM, 2 jours)

T4.3 : test du séparateur 2x1 arcmin (RD, CLM, 3 jours)

T4.4 : implantation du séparateur 2x2 arcmin et réglage (RD, CLM, 2 jours)

T4.5 : test du séparateur 2x2 arcmin (RD, CLM, 3 jours)

T5 : validation : (TBD)

T5.1 : validation du séparateur 2x2 arcmin (Astro, TBD)

T5.2 : validation du séparateur 2x1 arcmin (Astro, TBD)

- Planning :

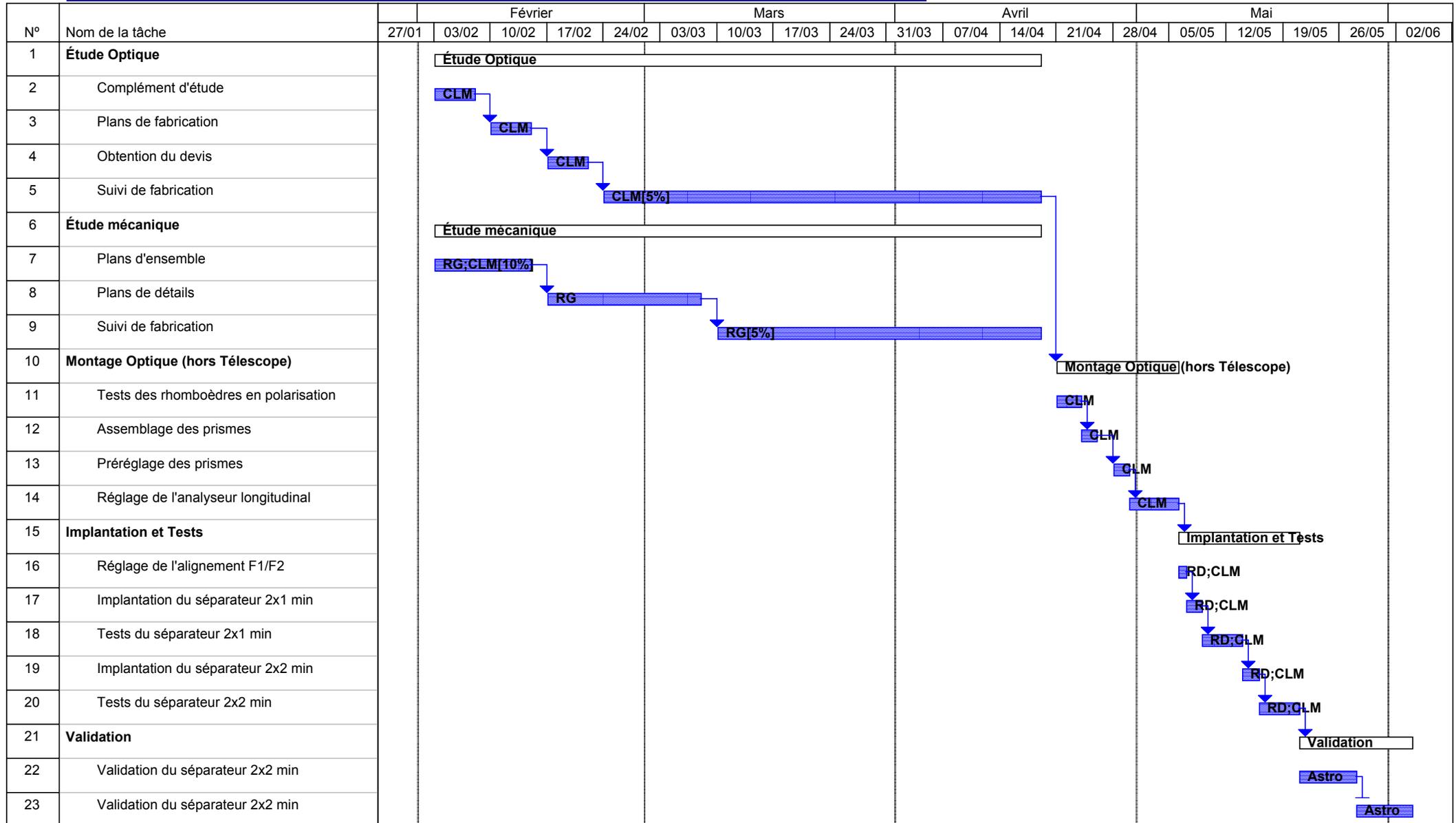
(voir diagramme de Gant page suivante)



TELESCOPE THEMIS

CNRS / INSU CNR

Réf. : Séparateur_F2
 N° version : 1.0
 Date : 20/01/2003
 Page : 53 sur 54





5. Conclusion

Ce rapport a présenté une méthode originale (dans le sens littéral du terme) permettant d'améliorer les performances de co-spatialité des mesures de spectro-polarimétrie et de spectro-imagerie. Le principe de cette méthode est basée sur la réalisation d'une séparation longitudinale (et non plus transverse) par l'analyseur en F1 et sur une séparation des voies I+S et I-S sous le foyer F2, c'est à dire après la fente d'entrée des spectrographes.

Afin de pouvoir apprécier et chiffrer l'amélioration apportée par cette nouvelle méthode, il était nécessaire de présenter les performances de la méthode utilisée actuellement. Nous avons donc présenté en détail la séparation de l'analyseur de polarisation F1 ainsi que les voies séparatrices F2. Les performances actuelles ont été calculées, tant sur les paramètres opto-géométriques (grandissement, mise au point, ...) que sur la co-spatialité. Ainsi, il a été démontré **qu'actuellement l'incertitude sur la valeur de co-spatialité vallait 0,069 arcsec.**

Le rapport a présenté en détail le concept de la méthode proposée, tant celui du séparateur longitudinal en F1 que du séparateur « post-F2 ». Il a été démontré que le concept de la séparation longitudinale par l'analyseur de polarisation actuel est viable, parfaitement réalisable et permettait de **réduire considérablement l'incertitude sur la valeur de la co-spatialité à une valeur de 0,009 arcsec.** Il a été démontré aussi que l'apport de la méthode proposée ne se limitait pas à une réduction de l'erreur de co-spatialité, mais qu'elle apportait aussi de considérables améliorations de tous les paramètres opto-géométriques. Les améliorations apportées sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Paramètres traités :	Voies séparatrices	Méthode proposée	Gain
Écart de Grandissement des images	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$: 500
Écart de Mises au point solaires	0,13 arcsec	0,04 arcsec	: 3,2
Écart de Résolution spectrale	8,0 mÅ	1,5 mÅ	: 5,3
Facteur de Transmission	55 %	95 %	x 1,7
Limitation transverse de la fente F1	16 arcsec	120 arcsec	x 7,5
Co-spatialité	0,069 arcsec	0,009 arcsec	: 8

Il a été démontré en outre que le concept de la méthode proposée est **parfaitement compatible avec toutes les spécifications** du télescope et que notamment l'implantation de cette méthode est conçue comme un **rajout à la configuration actuelle, rajout « transparent » et escamotable.** En d'autres mots, toutes les autres configurations (voies séparatrices, grille, ...) ne sont ni modifiées, ni empêchées par cette nouvelle méthode.

Enfin, une étude technique a démontré la **faisabilité technique de cette méthode**, tant la faisabilité de la séparation longitudinale en F1 que celle du bloc séparateur « post-F2 ». Cette étude a présenté le design opto-mécanique complet de 2 blocs séparateurs de 2 arcmin et 1 arcmin de champ respectivement. Ce design opto-mécanique a respecté les 3 étapes fondamentales de tout design optique qui sont : la **validation du concept optique** par logiciel de calcul optique, le **tolérancement** des pièces optiques et la vérification du **respect des spécifications optiques** du télescope en F2 et dans les spectrographes. Pour finir ont été présentées les ressources nécessaires à la mise en oeuvre de cette méthode, à savoir : un **budget peu élevé de 13000 Euros**, une **charge de 4 homme-mois** (2 personnes à temps plein sur 2 mois) et un **planning s'étalant sur 4 mois dont 1 mois d'implantation** ; ressources qui sont aisément dans le **cadre des ressources actuelles du « Système Télescope »** de Themis S.L.